

Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности

А.В. Кузьмин¹, И.А. Репина^{1,2}, И.Н. Садовский¹, А.Б. Селунский¹

¹ *Институт космических исследований РАН
Москва, 117997, Россия*

E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru

² *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Москва, 119017, Россия*

В работе представлен обзор основных научных результатов в области микроволновых радиометрических исследований морской поверхности, выполненных коллективом сотрудников ИКИ РАН. Приведено описание теоретических исследований формирования собственного электромагнитного излучения взволнованной морской поверхности. Особое внимание уделено проблеме учета излучения коротких гравитационно-капиллярных волн, представлены методы и подходы к решению данного вопроса, существующие в настоящее время. Значительная часть обзора посвящена описанию экспериментальных исследований, проводимых коллективом на протяжении нескольких десятков лет. Среди основных результатов, полученных в ходе самолетных экспериментов, можно выделить обнаружение эффекта азимутальной анизотропии собственного излучения морской поверхности (лежащего в основе современных методов определения скорости ветра над океаном) и резонансного механизма его формирования мелкомасштабными компонентами волнения. Развитием последнего стало формирование новой теории, получившей название теории «критических явлений». Детальное изучение отдельных ее положений продолжается и в настоящее время в рамках лабораторных исследований. Основное внимание в ходе многочисленных натуральных экспериментов, реализуемых коллективом из ИКИ РАН на базе двух полигонов – Южного Отделения ИО РАН и МГИ РАН, уделяется исследованию процессов взаимодействия системы океан – атмосфера. Важной частью работ является определение спектров ветровых волн методом НРРС, разработанным в ИКИ, и выявление их связи с набором гидрометеопараметров. Все измерения проводятся с использованием комплекса радиометров-поляриметров, разработанных сотрудниками Отдела исследований Земли из космоса. В настоящее время новый этап в проводимых исследованиях и технических разработках связан с включением проекта «Конвергенция» в программу долгосрочных научных исследований на Российском сегменте МКС.

Ключевые слова: микроволновый радиометр, радиометрия, радиополяриметрические измерения, морская поверхность, собственное излучение, теория микроволнового излучения, критические явления, натуральный эксперимент, поляризационная анизотропия, гравитационно-капиллярное волнение, спектр ГКВ, скорость и направление ветра

Введение

Микроволновые радиометрические исследования заняли достойное место в ряду средств дистанционного зондирования Земли из космоса. Без них сегодня не обходится ни один прогноз погоды, ни одно глобальное исследование процессов, происходящих на поверхности Мирового океана и в толще атмосферы. Радиометрические измерения в микроволновом диапазоне обладают высокой информативностью, возможностью получения данных в любое время суток и практически при любой облачности. Микроволновые радиометры имеют относительно небольшую стоимость, низкие значения энергопотребления и габаритно-весовых характеристик, что позволяет создавать на их основе высокоэффективные многочастотные комплексы, применяемые в глобальных измерениях по всему земному шару.

СВЧ-радиометрия исторически развивалась как средство дистанционного зондирования атмосферы (Башаринов и др., 1972). ИКИ РАН является одним из научных институтов, где микроволновые радиометры впервые были использованы для изучения мор-

ской поверхности. Такие исследования были начаты в середине 70-х годов прошлого века под руководством выдающегося ученого – профессора Валентина Семеновича Эткина (1933–1995). В созданном им отделе Исследований Земли из космоса работы велись по двум магистральным направлениям: во-первых, проводились исследования собственного и рассеянного излучения морской поверхности, а во-вторых, изучались динамические характеристики процессов на поверхности океана, в значительной мере определяющих его характер излучения и рассеяния.

Среди множества новых результатов, полученных коллективом отдела того периода, следует отметить экспериментальное открытие и теоретическое объяснение резонансного механизма теплового излучения поверхности океана в микроволновом диапазоне, названного теорией «критических явлений» (Эткин и др., 1978) и ставшего базой множества пионерских разработок, созданных и реализуемых в настоящее время в ИКИ РАН.

Высокая активность в области экспериментальных исследований была и остается характерной особенностью отдела Исследований Земли из космоса. Помимо реализации многочисленных лабораторных опытов, начиная с 1999 г. экспериментальные работы ведутся в прибрежной зоне Черного моря близ г. Геленджик на базе Южного отделения ИО РАН (Булатов и др., 2003), а с 2005 г. микроволновые радиометрические исследования стали также проводиться на морской гидрофизической платформе Экспериментального отделения МГИ, расположенной в южной части полуострова Крым (п. Качивели).

В предлагаемой работе представлен краткий обзор основных результатов теоретических, натурных и лабораторных исследований собственного излучения морской поверхности в микроволновом диапазоне, выполненных сотрудниками в ИКИ РАН, и обозначены приоритетные направления дальнейших исследований.

Теория микроволнового излучения морской поверхности

Создание адекватной математической модели радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности является одной из фундаментальных проблем дистанционного зондирования (ДЗ) Океана. В ИКИ РАН этой проблеме уделялось (и уделяется) большое внимание.

Изначально переход из оптического диапазона в область СВЧ при решении задач ДЗ сопровождался попытками описания излучения морской поверхности только в рамках приближения геометрической оптики (ГО). Однако, необходимость учета вклада коротких поверхностных волн, чей период сравним с длиной электромагнитной волны, стала очевидна из первых же сравнений модели ГО с данными натурных измерений: модель существенно недооценивала наблюдаемые эффекты. Для расчета излучения от ряби был использован хорошо известный метод малых возмущений (ММВ), когда и уклон, и отношение высоты неровностей к длине электромагнитной волны считаются малыми величинами. Комбинация ММВ для коротких волн и ГО для учета длинных составило осно-

ву так называемой двухмасштабной модели излучения (ДММ). ДММ оказалась весьма успешной и популярной в моделировании микроволнового излучения морской поверхности, была реализована в ИКИ и активно использовалась для интерпретации большого числа самолетных и корабельных экспериментов.

Двухмасштабная модель излучения

ДММ излучения морской поверхности была первой моделью, учитывающей вклад как длинных волн, так и коротких (Semyonov, 1966). В связи с этим она получила активную поддержку как отечественных, так и зарубежных специалистов, занимающихся вопросами дистанционного зондирования океана активными и пассивными методами.

В рамках ДММ величина приращения интенсивности собственного излучения, обусловленная присутствием ветрового волнения (яркостный контраст ΔT_{br}), определяется суммой вклада ее длинноволновых ΔT_{br_long} и коротковолновых компонент ΔT_{br_short} :

$$\Delta T_{br} = \Delta T_{br_long} + \Delta T_{br_short}.$$

Деление поверхностных гармоник с волновыми числами $K=2\pi/\Lambda$ (Λ – пространственный период) осуществляется путем их сравнения с соответствующим значением для принимаемого электромагнитного излучения $k = 2\pi/\lambda_0$. В случае, когда K оказывается меньше граничного волнового числа $K_0 = 0,05 k$ (данный параметр указан на основе результатов работы (Трохимовский, 1997)), волна требует учета в рамках длинноволнового приближения (ГО). В противном случае требуется расчет в рамках теории дифракции.

Отметим, что вид членов в представленном соотношении напрямую зависит от характера проводимых исследований – модельные, лабораторные, натурные (в т.ч. спутниковые, самолетные, наземные и т.п.), и может включать в себя учет таких факторов, как: подсвет атмосферы и затухание в ней, присутствие пенных образований или пленок поверхностно-активных веществ и т.д.

Учет вклада длинноволновых компонент

В рамках приближения ГО крупные волны представляются в виде совокупности элементарных площадок (фацетов). Вклад каждой из них считается независимым, поэтому результирующее значение яркостной температуры определяется путем простого суммирования. Определяющей в данной ситуации является ориентация фацетов как относительно общего уровня морской поверхности, так и по отношению к точке наблюдения (направлению излучения). Таким образом, в самом общем случае, яркостный контраст, обусловленный длинными волнами, является функцией распределения уклонов элементов поверхности η_x и η_y (в декартовой системе координат): $\Delta T_{br_long} \cong f(\sigma_x^2, \sigma_y^2)$, где σ_x^2 и σ_y^2 – дисперсии уклонов крупных волн вдоль и поперек направления распространения волнения.

Детальный порядок расчета интенсивности излучения крупномасштабных компонент ветрового волнения приведен в (Садовский, 2012).

Следует отметить, что вариативной частью представленных в (Садовский, 2012) соотношений являются: методика оценки излучения/поглощения атмосферы, модель диэлектрической проницаемости водной среды, а также вид функции распределения уклонов волновых аппликат. Их выбор в значительной степени влияет на результаты модельных оценок вклада длинноволновых компонент волнения и до сих пор является предметом активных дискуссий.

Учет вклада коротковолновых компонент

Как уже говорилось ранее, для учета вклада тех волновых компонент, высота и пространственный период которых малы по сравнению с длиной волны регистрируемого электромагнитного излучения, в рамках описываемой ДММ (Трохимовский, 1997), применяется хорошо известный ММВ.

Следует обратить особое внимание, что ключевую роль в понимании процесса излучения мелкомасштабных компонент волнения стало открытие «критических явлений». В частности, в ходе серии экспериментальных и теоретических работ (Эткин и др., 1978; Ирисов, 1984) было показано наличие резонансных максимумов в излучении при выполнении условия:

$$\rho^2 + 2\rho \cdot \sin \theta_k \cdot \cos \varphi_k - \cos^2 \theta_k = 0,$$

где
$$\rho = n \frac{\lambda_0}{\Lambda}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Каждая гармоника коротковолновой части спектра $S(K)$ вносит свой вклад $\delta(K/k)$ в приращение излучательной способности поверхности, а полная величина контраста ΔT_{br_short} определяется интегрированием:

$$\Delta T_{br_short} = \int_{K_0}^{\infty} S(K) \delta(K/k) dK,$$

где функция $\delta(K/k)$ находится методом малых возмущений (Ирисов, 1984) для синусоидальной поверхности. В силу того, что функция $\delta(K/k)$ постоянна для выбранной длины волны принимаемого излучения, можно записать:

$$\Delta T_{br_short} \cong f(S(K)),$$

т.е. вклад коротковолновых компонент известен, если известен спектр возвышений в области $K > K_0$. В последних двух выражениях, для простоты, опущены индексы и обозначе-

ния, характеризующие пространственный характер волнения и угловые и поляризационные свойства излучения (более детально, например, (Садовский, 2007)).

Метод малых уклонов

Несмотря на то, что развитие теории «критических явлений» позволило обосновать выбор граничного волнового числа K_0 , деление пространственного спектра ветрового волнения в рамках ДММ было и остается достаточно искусственным. Следующий важный шаг в развитии теории излучения морской поверхности был сделан с созданием радиометрического метода малых уклонов (ММУ). Основные положения данной теории были получены в рамках анализа взаимодействия акустических волн с взволнованной морской поверхностью (Voronovich, 1985). Его дальнейшее распространение на микроволновый диапазон показало, что выражения, полученные ММВ, являются, по сути, результатом ММУ (Irisov, 1997). Таким образом, была существенно расширена область применимости ММВ: было снято ограничение на малую величину возвышений волн. Одновременно с этим решалась проблема деления спектра волн на разные масштабы, теперь вклад от всех волновых компонент может рассчитываться одним способом, который включает в себя и «критические явления», и приближение Кирхгофа. На сегодняшний момент ММУ является самой передовой и логически завершенной моделью в радиометрии морской поверхности.

Волновой метод

Еще одним методом описания взаимодействия плоско-поляризованной монохроматической электромагнитной волны с морской поверхностью стал «волновой метод». Этот метод представляет собой модификацию хорошо известного метода медленно меняющихся амплитуд теории волн (Виноградова и др., 1979)

В (Селунский и др., 2013) было получено точное решение волнового уравнения на синусоидальной границе раздела вода – воздух для произвольной поляризации. Для этого граничные условия на периодической поверхности разлагались в ряды Фурье по пространственным гармоникам, после чего приравнивались тангенциальные коэффициенты при одинаковых экспонентах в двух средах. Это приводит к бесконечномерной системе линейных уравнений, которая решается с любой выбранной степенью точности, в силу ее диагональной структуры.

«Волновой метод» не содержит ограничений на амплитуды или уклоны поверхностных гармоник. При достаточно «крутых» амплитудах поверхностной волны, возникает проблема существования поля вблизи границы раздела вода – воздух в виде плоской волны. Если принять плосковолновую модель за основу, мы получим в ближней зоне некорректную

картину – рост амплитуд затухающих волн на границе. Это объясняется тем фактом, что плоская волна не является физически реальной и переносит в себе бесконечную энергию.

Особенности излучения в штормовых условиях

При скоростях ветра более 7 м/с существенный вклад в радиояркую температуру вносят пенные образования и капельно-брызговые облака, образующиеся при обрушении гравитационных волн. Этот вклад растет с ростом скорости ветра. В ИКИ РАН было уделено много сил и внимания исследованию радиоярких характеристик пенных структур.

Цикл лабораторных исследований (Милицкий и др., 1978) в диапазоне длин волн от 0,26 до 18 см показал, что увеличение яркостной температуры за счет пенного покрова обязано слою плотно упакованных газовых пузырьков, расположенных на водной поверхности (эмульсионному монослою). Приращение яркостной температуры за счет монослоя, толщина которого составляет около 0,1 см, составляет порядка 100 К для длин волн $0,8 \div 2$ см. Увеличение толщины слоя пены до 1 см не приводит к существенному увеличению радиояркости. Модель переходного слоя диэлектрика не может объяснить наблюдаемые эффекты.

В работе (Райзер, Шарков, 1981) рассмотрена применимость различных моделей для интерпретации экспериментальных зависимостей теплового микроволнового излучения в дисперсных системах. Предложена модель макроскопического описания системы с введением в эффективные параметры дипольного момента пузырька, что наиболее полно отражает свойства грубодисперсной среды в микроволновом диапазоне. В дипольном приближении учитываются кооперативные эффекты, связанные с плотной упаковкой частиц, что очень важно для сантиметрового диапазона. Данный модельный подход с использованием приближений Лоренца – Лоренца и Хюльста можно обобщить на более широкий класс природных объектов. К числу таких объектов можно отнести морской лед и снег, водонефтяные эмульсии, увлажненные почвы и грунты.

Экспериментальные радиометрические исследования морской поверхности

Наряду с теоретическими работами по изучению особенностей излучения электромагнитных волн поверхностью моря, в ИКИ РАН большое место уделялось экспериментальным исследованиям. Было проведено значительное количество лабораторных экспериментов, в которых моделировались различные элементы и аспекты излучения морской поверхности. Но основной упор был сделан на экспериментальные исследования поверхности моря с борта самолетов-лабораторий. Отдельной строкой можно упомянуть радиометрические измерения морской поверхности с борта научно-исследовательских судов, в рейсах которых участвовали сотрудники института. Все эти эксперименты внесли существенный вклад в изучение взаимодействия океана и атмосферы радиометрическими средствами.

Экспериментальные исследования, начавшиеся с середины 70-х годов прошлого века, первоначально проводились на небольших самолетах Ил-14, которые обладали всеми необходимыми качествами для этой работы. Ил-14 был своеобразным полигоном для проверки различного типа радиометрической аппаратуры и методик измерения радиояркостной температуры поверхности моря.

Затем в распоряжение ИКИ РАН были выделены самолеты-лаборатории Ан-12 и Ту-134сх, которые были переоборудованы для проведения радиометрических измерений и приступил к полетам в 1980 г.

Первые самолетные эксперименты имели целью изучение влияния ветра на параметры собственного микроволнового излучения. В этих экспериментах было обнаружено, что тепловое излучение поверхности моря имеет ярко выраженную азимутальную анизотропию (Беспалова и др., 1979), и было высказано предположение о возможности использования этого эффекта для дистанционного определения вектора ветра. Дальнейшие многочисленные эксперименты, проведенные в различных морях Советского Союза в широком диапазоне углов визирования (от надира до настильных углов), позволили выявить физическую природу явления и разработать метод определения скорости и направления приповерхностного ветра по микроволновым поляриметрическим измерениям (Дзюра и др., 1993).

Измерения азимутальной анизотропии обычно проходило на высоте от 200 до 500 м в полетах по кругу с креном от 5 до 30 градусов или в прямолинейных галсах по и против ветра. На *рис. 1* показано измерение азимутальной анизотропии при полетах по кругу.

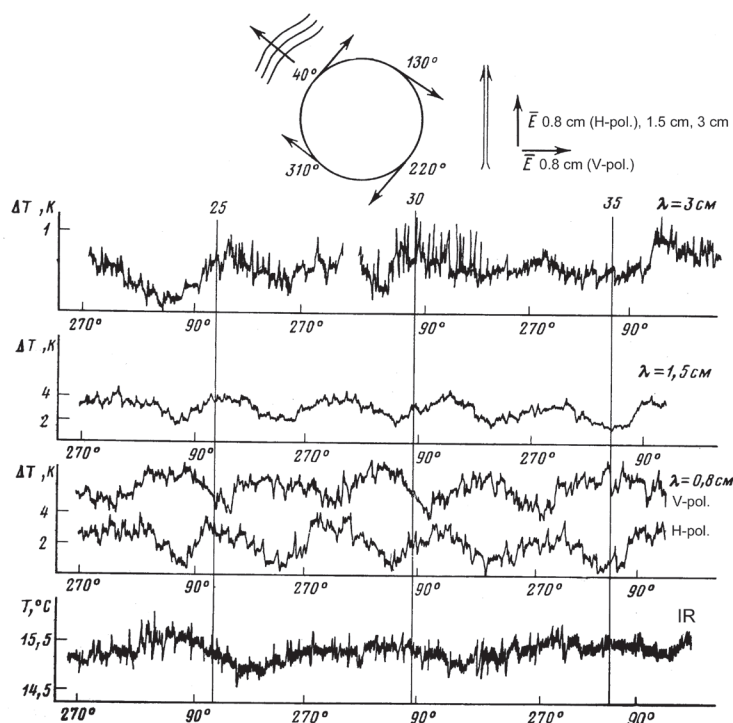


Рис. 1. Измерение азимутальной анизотропии при полетах по кругу (Беспалова и др., 1979)

Исследование эффекта азимутальной анизотропии показало, что он тесно связан с поляризационными характеристиками собственного излучения морской поверхности. Даже при измерениях в надир микроволновое излучение становится поляризованным в присутствии ветра, а эффект азимутальной анизотропии, по сути, является эффектом поляризационной анизотропии (ПА).

Дальнейшие исследования показали, что эффект ПА не может быть объяснен длинноволновыми компонентами волнения. Измерения в штилевых условиях в присутствии зыби продемонстрировали, что ПА возникает из-за поверхностных волн в гравитационно-капиллярном диапазоне спектра, которые зависят от мгновенного потока воздуха над поверхностью моря. Величина ПА (т.е. разность яркостных температур, измеренных вдоль и поперек направления ветра) увеличивается с ростом скорости ветра и имеет характерную квадратичную зависимость от нее $\Delta T = \lambda V^2$. Обратный эффект на регистрируемые значения ПА оказывает увеличение длины волны принимаемого излучения.

При скорости ветра, превышающей 10–12 м/с, рост величины ПА замедляется из-за смены ветрового режима поверхности, появления пены и капель (Трохимовский и др., 1983). Как показано в (Trokhimovski et al., 1995), измерения поляризационной анизотропии удается проводить практически при любой облачности и дожде, особенно если использовать разностные поляризационные каналы.

Наряду с измерениями в надир, в описываемых экспериментах проводились измерения микроволнового излучения на настильных углах обзора. Полученные результаты оказались очень полезны для понимания физических причин азимутальной зависимости микроволнового излучения. Так, в работах (Ирисов и др., 1990; Гречко и др., 1991) показано, что вклад в радиояркостный контраст на таких углах визирования привносят как гравитационно-капиллярные компоненты волнения, так и длинноволновые.

Важной вехой в натурных самолетных исследованиях стал совместный комплексный российско-американский эксперимент JUSREX'92 (The Joint United States / Russia Internal Waves Remote Sensing Experiment). Основная цель эксперимента была в исследовании взаимосвязи между параметрами спектра шероховатости морской поверхности, величиной обратного рассеяния радиолокационного сигнала и яркостной температуры в микроволновом диапазоне при различных метеорологических условиях и стратификации приподнятого слоя атмосферы. Другая цель эксперимента JUSREX'92 заключалась в сравнении радиометрических, радарных, оптических и контактных методов исследования океана.

С российской стороны в эксперименте участвовали самолет-лаборатория Ту-134сх и научно-исследовательское судно «Академик Иоффе», с американской – самолеты-лаборатории P-3 и DC-8 (Gasparovic, Etkin, 1994).

Сочетание активных и пассивных микроволновых приборов на борту Ту-134сх обеспечили хорошую возможность для сравнения различных методов совместного анализа. На *рис. 2* представлены композитное изображение (полученное 25 июля 1992 г.) снимка локатора бокового обзора (ЛБО) и графические данные температуры, скорости и направления ветра, полученные по радиометрическим измерениям (Etkin et al., 1993).

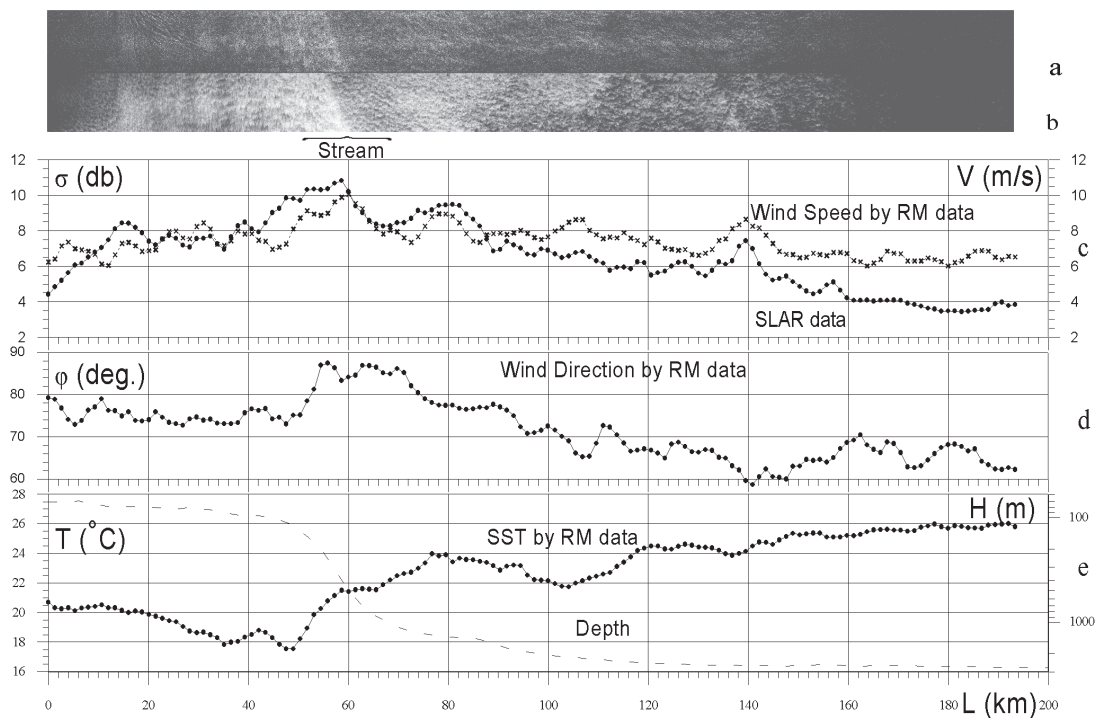


Рис. 2. Композитное изображение снимка локатора бокового обзора (ЛБО) и графические данные температуры, скорости и направления ветра, полученные по радиометрическим измерениям, 25 июля 1992 г (Etkin et al., 1993)

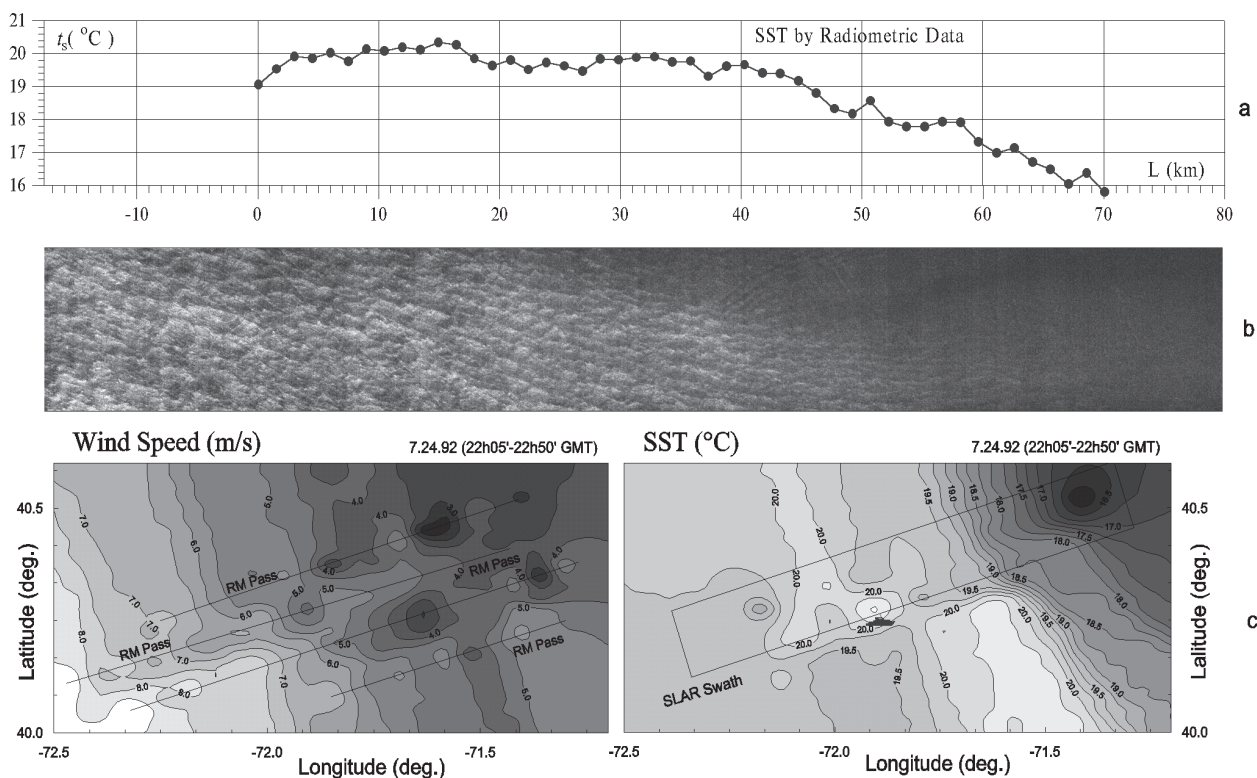


Рис. 3. Композитное изображение данных, полученных 24 июля 1992 г. Внизу (с) приведены поля температуры и ветра, реконструированные по радиометрическим данным из четырех параллельных проходов. Отмечены положения НИС «Академик Иоффе» и контур радиолокационной полосы. (b) показано изображение ЛБО на VV-поляризации и температурный разрез по этому изображению (a)

На *рис. 3* представлены данные, полученные 24 июля 1992 г., на которых построены поля температуры и ветра, реконструированные из четырех параллельных проходов. Увеличение скорости ветра (с востока на запад) видно как на радарном, так и на радиометрическом изображениях. В западной части радиолокационного изображения конвекционные ячейки и ветровые полосы свидетельствует о нестабильной стратификации атмосферы в этом районе. Переход от нейтральной к нестабильной стратификации атмосферы, видимый на радиолокационном изображении, совпадает с количественными данными по температуре.

Результаты эксперимента JUSREX'92 внесли весомый вклад в методы исследования морской поверхности. Они продемонстрировали, какой мультипликативный эффект могут дать комбинированное применение радиометрических и радиолокационных данных в дистанционном зондировании океана. Микроволновые радиометры предоставляют количественную информацию о температуре поверхности и векторе приповерхностного ветра. Температурные данные позволяют определить фронты и районы перехода атмосферного пограничного слоя от стабильной к нестабильной стратификации. Эти особенности часто проявляются на радиолокационных снимках. Приводный ветер является определяющим фактором влияния на сечение обратного рассеяния. Направление ветра, получаемое по радиометрическим данным, также является важным параметром для интерпретации радиолокационных данных, потому что проявления поверхностных явлений на море в радиолокационных изображениях в значительной степени зависят от взаимного угла между ветром и направлением визирования. Радиолокационные изображения морской поверхности, в свою очередь, могут быть полезными в повышении точности и интерпретации радиометрических измерений. Результаты эксперимента JUSREX'92 показали, что степень поляризации микроволнового теплового излучения океана зависит как от скорости ветра, так и от стабильности приводного слоя атмосферы.

*Лабораторные исследования излучательных свойств
периодически неровной водной поверхности*

Как уже было отмечено ранее, одним из ключевых открытий, сделанных специалистами ИКИ РАН, стало открытие резонансного характера излучения мелкомасштабных поверхностных волн (Кравцов и др., 1978; Эткин и др., 1978). Дальнейшие исследования были направлены на раскрытие и формулировку основных положений теории «критических явлений» и объединяли результаты как натуральных, так и лабораторных экспериментов (Трохимовский, Эткин, 1985; Гершензон и др., 1986). В ходе экспериментов было наглядно продемонстрировано, что в нештормовых условиях именно короткие гравитационно-капиллярные (ГКВ) вносят определяющий вклад в приращение излучательной способности морской поверхности и отвечают за ее пространственную неоднородность (эффект азимутальной анизотропии).

В связи с чрезвычайной важностью данного вопроса, лабораторные эксперименты исследователей ИКИ продолжаются и в настоящее время. Основное внимание уделяется повышению точности и достоверности проводимых измерений. Так, для реализации экспе-

римента 2002 г., была разработана установка для детального исследования профиля излучающей поверхности (Trokhimovskii et al., 2003). Получение постоянной во времени, т.н. «замороженной» структуры на поверхности воды, осуществлялось путем опускания системы параллельно натянутых нитей ниже, а затем подъема ее над уровнем гладкой поверхности. За счет сил поверхностного натяжения на поверхности создавались неровности, имитирующие простую поверхностную волну (с плоским фронтом) с переменными амплитудой и периодом. Определение профиля получаемых неровностей выполнялось посредством специально созданной сканирующей установки, применение в составе которой полупроводникового лазера позволило не только значительно повысить точность определения амплитуды гармонических составляющих неровностей, но и контролировать их возможное изменение (за счет испарения или образования пленок ПАВ) в ходе длительных (для обеспечения высокой разрешающей способности по углам визирования и максимального времени накопления сигнала) измерений.

Дальнейшее усовершенствование лабораторной установки включало в себя минимизацию влияния на результаты исследований фонового излучения. Для этого установка была оснащена системой отражательных экранов, по сути заменивших неконтролируемое излучение окружающих объектов хорошо предсказуемым (или измеренным) нисходящим излучением небосвода (рис. 4). Детальное описание методики проведения измерений, а также всех составляющих лабораторного макета приведено в (Sadovsky et al., 2004).

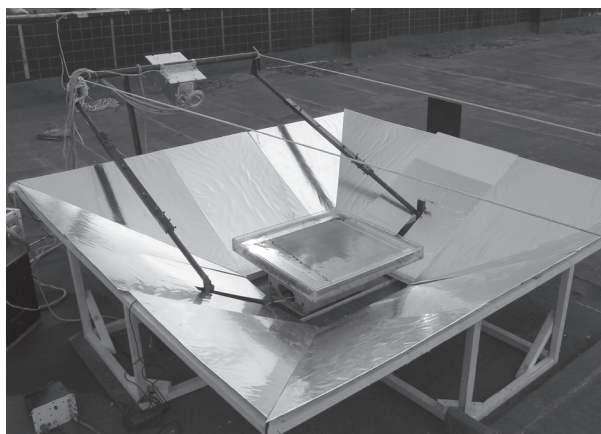


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки, использованной в эксперименте 2004 г.

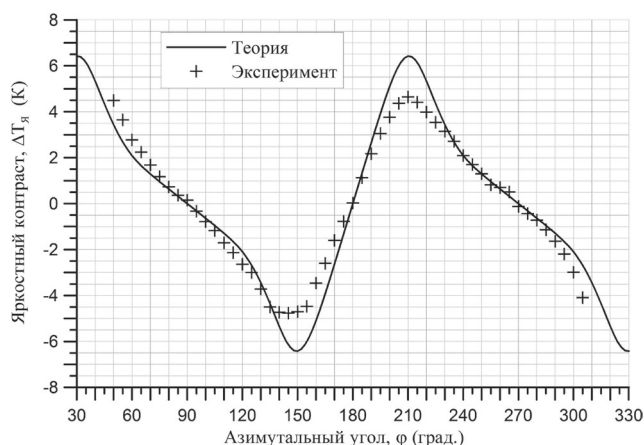


Рис. 5. Зависимость приращения третьего модифицированного параметра Стокса возмущенной поверхности от азимутального угла при вертикальном угле зондирования 20° . Крестики – эксперимент, сплошная линия – модельный расчет

Введенные усовершенствования позволили перейти от качественной демонстрации основных положений теории «критических явлений» к получению количественных оценок данного явления. При этом величина расхождения с данными модельных расчетов имеет порядок, сопоставимый (в большинстве случаев) с предельной флуктуационной чувствительностью используемых радиометров (рис. 5).

Следует отметить, что лабораторные исследования были и остаются базовым доказательным инструментом всевозможных теорий и предположений в области радиометрии морской поверхности. Это обусловлено возможностью детального контроля максимально возможного числа факторов, влияющих на формирование излучения, начиная с характеристик измерительного оборудования и заканчивая физико-химическими параметрами водной среды (важность последнего аспекта рассмотрена в (Садовский и др., 2014)).

Исследования со стационарных платформ в акватории Черного моря

В начале 90-х годов двадцатого века, в связи с усложнением политической и экономической ситуации в нашей стране, возможности проведения судовых и аэрокосмических экспериментов резко сократились. Необходимость поддержания высокого уровня исследований в области радиофизических методов зондирования морской поверхности, достигнутых к этому моменту коллективом ИКИ РАН, требовала поиска альтернативных (бюджетных) экспериментальных площадок. Первой из них стал экспериментальный полигон Южного отделения института океанологии РАН близ города Геленджик (*рис. 6*), где, начиная с 1999 года, под руководством Кравцова Ю.А., возглавлявшего отдел Исследований Земли из космоса ИКИ в тот период, были начаты систематические экспериментальные исследования (Булатов и др., 2003).

Среди основных задач, решаемых учеными на данном полигоне, следует отметить следующие: апробация оригинальной методики измерения пространственных спектров ветрового волнения – метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС) (Ирисов и др., 1987; Kuzmin et al., 2000); исследование влияния дождя на излучательные характеристики морской поверхности (Bulatov et al., 2000), а также возмущений, вызванных потоком подводных газовых пузырьков (Bulatov et al., 2001); проведение подспутниковых измерений для обоснования возможности исследования вихревых структур на морской поверхности и обнаружения нефтяных загрязнений малого масштаба (Kravtsov et al., 2000).

В 2005 г. экспериментальные радиополяриметрические исследования морской поверхности, реализуемые в ИКИ, получили новый толчок в развитии благодаря освоению нового полигона. В рамках международного научного проекта Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring (CAPMOS) были проведены первые комплексные исследования характеристик взаимодействия океана и атмосферы на стационарной океанографической платформе (*рис. 7*) ЭО МГИ НАНУ (Экспериментальное отделение Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины), расположенной у южного берега Крыма вблизи п. Качивели (Кузьмин и др., 2009).

Благодаря тесному сотрудничеству 8 научных групп из 4 стран (России, Украины, Италии и Дании) был значительно расширен набор задействованного измерительного оборудования (по сравнению с экспериментами серии «Геленджик»), детальное описание которого, а также схемы его расположения и программы реализации исследований представлено, например, в (Pospelov et al., 2009).



Рис. 6. Внешний вид контейнерной лаборатории на пирсе ЮО ИО РАН в Голубой бухте



Рис. 7. Внешний вид стационарной океанологической платформы ЭО МГИ НАНУ

Проведение экспериментальных исследований на океанографической платформе, продолжившихся в 2007, 2009 и 2012 гг., позволило сформировать уникальный банк данных радиополяриметрических измерений взволнованной морской поверхности для обширного набора условий волнообразования. Благодаря этому, ученым ИКИ РАН удалось значительно продвинуться в реализации уникального метода НРРС (Садовский, 2008; Садовский и др., 2009), а его использование при обработке радиометрической информации – не только восстанавливать пространственный спектр ветровых ГКВ, но и отслеживать динамику отдельных спектральных компонент на фоне меняющихся метеоусловий (Sadovsky et al., 2009; Садовский, Сазонов, 2010).

Современные задачи радиометрических исследований океана

Исследование параметров морского волнения

Исследование поверхностных волн представляет интерес как с точки зрения изучения самого явления, так и его влияния на другие физические процессы, такие как ветровые течения, тепло- и массообмен между атмосферой и океаном, формирование верхнего квази-однородного слоя и т.д. Также параметры волнения необходимо учитывать при составлении прогнозов погоды, при расчетах характеристик акустических и электромагнитных полей, взаимодействующих с морской поверхностью, при оценке воздействия на береговую линию, гидротехнические сооружения и плавсредства и во многих других случаях.

Несмотря на современное развитие теории волн, методов математической статистики и появление нового поколения наблюдательной и вычислительной техники, а также развитие средств дистанционного зондирования, ситуация с изучением, прогнозированием и оценкой волн в океане остается достаточно сложной и неопределенной.

Форма спектра в диапазоне гравитационно-капиллярных волн до сих пор является предметом активного изучения и дискуссий. Следует отметить, что в отличие от энерго-

несущих составляющих волнения, вопрос изучения данной области волновых компонент долгое время оставался на втором плане. Исследование этого диапазона ветровых волн сопряжено со значительными техническими трудностями (эффекты смачивания при использовании струнных волнографов, модуляция крупными волнами при анализе данных буев, невозможность восстановления абсолютных значений амплитуды при обработке оптических данных и т.д.). В связи с этим, долгое время для описания амплитуды этих компонент применялась простейшая степенная аппроксимация, основанная на физическом механизме их затухания за счет капиллярных эффектов.

Появление спутниковых средств дистанционного зондирования океана предъявило новые требования к уровню точности оценки коротковолновой части спектра, вызванные наличием как резонансных эффектов в формировании отраженного и собственного излучения, так и ярко выраженной анизотропией их свойств. Успехи теоретических исследований нелинейных эффектов межволнового взаимодействия и диссипации волновой энергии, переноса вещества и энергии через границу раздела океан – атмосфера и т.д., сформировали ряд актуальных вопросов в области изучения коротких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), ответы на которые требуют систематического изучения формы спектра ГКВ при различных условиях волнообразования.

Первые попытки применения микроволновой радиометрии для дистанционного зондирования океана были предприняты около тридцати лет назад (Ирисов и др., 1987; Ирисов и др., 1990; Трохимовский, 1997). Но лишь в последние годы сотрудникам ИКИ РАН удалось отработать методику дистанционного определения характеристик ветровых волн – метода НРПС, основывающегося на угловых радиометрических измерениях в сантиметровом и миллиметровом диапазонах и позволяющего решать задачу восстановления спектра волнения в диапазоне для длин волн от 0,15 до 160 см (Садовский и др., 2007, 2008 а,б; Сазонов и др., 2014; Repina et al., 2012).

Активное применение (и дальнейшее усовершенствование) метода НРПС позволяет осуществлять исследования параметров ветрового волнения в натуральных условиях и, что особенно важно при исследовании ГКВ, без непосредственного контакта с исследуемым объектом. Его использование дает возможность отслеживать динамику пространственного спектра ГКВ в различных гидрометеоусловиях, исследовать процессы энерго- и массообмена на границе океан – атмосфера, изучать влияние на характеристики поверхностного волнения параметров ветрового потока, энергонесущих компонент волнения, поверхностно-активных веществ (в том числе нефтяных пленок). Это, в свою очередь, способствует созданию универсальной (учитывающей обширный набор параметров волнообразования) физической модели ветрового волнения.

Последнее оказывается критически важным при интерпретации данных дистанционного зондирования Мирового океана, поскольку решение обратных задач параметризации (к которым относятся все дистанционные радиофизические методы исследований) напрямую зависит от наличия адекватной модели, связывающих параметры волнообразования с пространственным спектром поверхностных волн.

Одним из важнейших климатообразующих факторов на Земле считается масштабное в пространстве и времени взаимодействие океана и атмосферы, которое складывается из многообразных процессов обмена энергией, импульсом и веществом. Основным средством получения мгновенных параметров этого взаимодействия, таких как температура поверхности океана, скорость приповерхностного ветра, общее влагосодержание атмосферы, профили ее температуры и влажности, интенсивность осадков и др., в глобальных масштабах является спутниковая микроволновая радиометрия. Микроволновые радиометры получают информацию независимо от времени суток, освещенности и облачности, ограничивающих действие всех оптических приборов. Малое потребление позволяет им работать непрерывно, в отличие от радиолокаторов, время работы которых составляет около 5%.

Глобальность подразумевает охват измерениями значительной части Земного шара. Однако очень важным является получение длительных временных рядов данных для оценки, например, климатических или других природных явлений, имеющих продолжительность, исчисляемую годами, например Эль-Ниньо. Такой пример в дистанционном зондировании демонстрируют микроволновые радиотепловые комплексы SSM/I, установленные на спутниках серии DMSP и непрерывно дающие информацию в течение более 15 лет.

Значение информации о глобальном радиотепловом поле системы океан – атмосфера для многообразия работ в области климатологии и исследования атмосферы и океана, ведущихся в ИКИ РАН, сделало актуальным создание специализированной базы дистанционных данных SSM/I. В основу построения этой базы данных положен принцип их рассмотрения как длинных рядов наблюдений, пространственных и временных: многолетние ежедневные наблюдения отдельных зон и всего земного шара (Ермаков и др., 2007). С использованием указанной базы данных была сформирована электронная коллекция GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru>) глобальных радиотепловых полей, которые характеризуют интегральный влаго- и водозапас тропосферы (Астафьева и др., 2008). Полученные глобальные радиотепловые поля пригодны для изучения термодинамических процессов в системе океан – атмосфера с масштабами от сотен километров до планетарных и изменяющихся на короткопериодных (синоптических, мезометеорологических), внутригодовых и междугодовых временных отрезках.

Проблемы и перспективы радиометрических инструментов

Разработке и созданию микроволновых радиометров в ИКИ РАН всегда уделялось большое внимание. В настоящее время в рамках научного эксперимента на РС МКС «Конвергенция», носящего название «Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф», идет подготовка по созданию сканирующего микроволнового радиометра-спектрометра (МИРС) в диапазоне частот от 6 до 220 ГГц. Радиометр будет состоять из 31 канала, из которых 12 каналов поляризационных

на частотах 10,6 18,7 и 36,0 ГГц, 5 каналов близ линии 118,7 ГГц и 7 каналов около линии 183,3 ГГц. МИРС представляет собой многоканальный радиометр панорамного типа обзора со сканированием пространства лучами, вращающимися вокруг направления в надир под постоянным углом $45 \pm 0,1^\circ$ (коническое сканирование) с периодом 1,29 с. При таком способе обзора поверхности Земли для высоты орбиты космического аппарата 450 км полоса обзора составит 810 км. Целью космического эксперимента является исследование основ зарождения и эволюции крупномасштабных кризисных атмосферных процессов типа тайфунов и тропических циклонов как одних из основных элементов в формировании глобального массо- и влагообмена в системе океан – атмосфера. Одной из важнейших задач эксперимента является определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы.

Для определения профилей водяного пара используют многоканальные измерения в линии 183,3 ГГц (Семина и др., 2012). Между тем, в ближайшем слое атмосферы у поверхности Земли на высотах до 2–3 км такие измерения не работают, особенно при наличии облачного слоя. Обычно для этих высот используют измерения в линии 22, 235 ГГц (Семина и др., 2013). В работе (Стерлядкин, Шарков, 2014) предложен новый разностно-дифференциальный метод, использующий различие дифференциальных сигналов на различных склонах линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Этот метод позволяет повысить пространственную по высоте избирательность измерений, снизить влияние облаков и осадков.

Применение новых схем радиометрического приема заставляет искать новые пути повышения чувствительности и методов обработки радиометрического сигнала. Одним из интересных методов в радиометрии в последнее время стал метод оцифровки высокочастотного сигнала для радиометров прямого усиления или сигнала промежуточной частоты для супергетеродинных радиометров до квадратичного детектора. Существующие скоростные АЦП позволяют оцифровывать сигналы в полосе более 3 ГГц. Такой подход оказывается достаточно гибким для дальнейших частотных преобразований на цифровом уровне.

Одной из особенностей радиометрического метода является широкая полоса приема электромагнитного излучения, в связи с этим микроволновая радиометрия последние годы испытывает постоянное давление со стороны связных систем различного типа, выражающееся во все повышающемся уровне помех. Причем помехи «продвигаются» в область более высоких частот. Связные системы на 40 ГГц уже не вызывают удивления. По этой причине приходится делать все более узкополосные радиометры и применять специальные способы фильтрации помех. Оцифровка высокочастотного сигнала и в этом случае позволит улучшить схемы фильтрации.

Заключение

В настоящее время трудно представить изучение процессов, имеющих место в системе океан – атмосфера, без привлечения микроволновой радиометрии как метода дистанционного зондирования. В силу известных особенностей электромагнитного излучения

микроволнового диапазона, таких, как высокая чувствительность к вариациям физико-химических параметров объектов и их геометрии, а также значительная проникающая способность, средства исследований в данной части спектра являются одними из самых перспективных и активно развиваемых технологий ДЗЗ.

Исторически ИКИ РАН является одним из ведущих мировых центров сбора, хранения и обработки данных дистанционного зондирования Земли, среди базовых направлений научно-исследовательской деятельности которого, безусловно, следует выделить микроволновые радиополяриметрические исследования океана и атмосферы. Традиции получения научных продуктов мирового уровня, исследования фундаментальных причин физических взаимодействий, заложенные в последней четверти двадцатого века, активно поддерживаются различными коллективами ИКИ РАН, в том числе сотрудниками отдела Исследований Земли из космоса.

Среди ключевых достижений в области радиометрии морской поверхности, полученными к настоящему моменту специалистами ИКИ РАН, следует отметить: обнаружение резонансного характера излучения ветровых волн, заложившее основу теории формирования собственного излучения морской поверхности; обнаружение эффекта поляризационной анизотропии теплового излучения океана, активно применяемого в методиках определения скорости и направления приповерхностного ветра; разработка метода НРРС, дистанционного восстановления параметров спектра ветровых волн, не имеющего мировых аналогов. Представленный перечень может быть дополнен значительным числом других практических результатов, нашедших отражение при решении разнообразных задач ДЗ морской поверхности. Эти результаты получены в рамках реализации темы «Мониторинг» (номер государственной регистрации 01.20.0.2.00164), по которой в последние годы выполняется значительное количество работ ИКИ РАН и проектов РФФИ. Безусловным успехом последних лет работы коллектива отдела Исследований Земли из космоса стало включение предложенного им проекта «Конвергенция» в программу долгосрочных научных исследований на Российском сегменте МКС.

Основными направлениями дальнейшей работы являются: экспериментальные исследования частично поляризованного собственного излучения морской поверхности и приподного слоя атмосферы, включающие лабораторную, натурную и спутниковую составляющие; развитие теории формирования собственного излучения океана в присутствии компонент ветрового волнения различных масштабов; разработка перспективных методов исследований разнообразных процессов и явлений, определяющих характер взаимодействия системы океан – атмосфера; создание измерительного оборудования с прецизионно высокими показателями точности для решения перспективных задач ДЗ.

Активное сотрудничество с ведущими научными коллективами России, включая ИФА РАН, ИРЭ РАН, ИО РАН, МГИ РАН, ИПФ РАН, позволяет коллективу лаборатории Микроволновой радиометрии отдела Исследований Земли из космоса ИКИ РАН с уверенностью смотреть в будущее и сохранять лидирующие позиции в области микроволновых радиометрических исследований морской поверхности.

Литература

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Межгодовые изменения радиотеплового поля Земли по данным микроволнового спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 9–15.
2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1972. 188 с.
3. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Глотов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.
4. Булатов, М.Г., Ю.А. Кравцов, А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов, Д.В. Александров Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999–2002). М.: КДУ, 2003. 143 с.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979, 386 с.
6. Гершензон В.Е., Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Азимутальные эффекты при критических явлениях в тепловом радиоизлучении шероховатой поверхности: Препринт Пр-1104. М.: ИКИ АН СССР, 1986. 26 с.
7. Гречко С.И., Ирисов В.Г., Кузьмин А.В., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Характеристики собственного СВЧ-излучения морской поверхности на настильных углах наблюдения: Препринт Пр-1729. М.: ИКИ РАН, 1991. 41 с.
8. Дзюра М.С., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Способ дистанционного определения скорости и направления ветра над водной поверхностью: А.С. 1582849 от 23.05.1988 // Бюллетень изобретений. 1993. №№ 45–46.
9. Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
10. Ирисов В.Г. Исследование излучения электромагнитных волн периодически неровной поверхностью: Препринт Пр-944. М.: ИКИ АН СССР, 1984. 18 с.
11. Ирисов В.Г., Кузьмин А.В., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Азимутальные зависимости собственного СВЧ-излучения поверхности океана на настильных углах наблюдения // Исследования Земли из космоса. 1990. № 6. С. 99–107.
12. Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.
13. Кравцов Ю.А., Мирская Е.А., Попов Е.А., Троицкий И.А., Эткин В.С. Критические явления при тепловом изучении периодически неровной водной поверхности // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. № 7. С. 733–739.
14. Кузьмин А.В., Горячкин Ю.А., Ермаков Д.М., Ермаков С.А., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Ретина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т., Шарков Е.А., Чухарев А.М. Морская гидрофизическая платформа “Кацивели” как подспутниковый полигон на Черном море // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
15. Милицкий Ю.А., Райзер В.Ю., Шарков Е.А., Эткин В.С., О тепловом радиоизлучении пенообразных структур // ЖТФ. 1978. Т. 48. № 5. С. 1031–1033.
16. Райзер В.Ю., Шарков Е.А. К вопросу об электродинамическом описании плотно упакованных дисперсных систем // Известия ВУЗов. Радиофизика, 1981. Т. 27. № 7. С. 809–818.
17. Садовский И.Н. (2008а) Методика восстановления параметров спектра ветрового волнения на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 1–7.
18. Садовский И.Н. (2008б) Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 1. Расчет радиояркостных контрастов взволнованной водной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Выпуск 5. Том II. 2008. С. 192–198.
19. Садовский И.Н. Особенности учета вклада длинноволновых компонент волнения в приращение излучательной способности морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. № 1. С. 228–239.
20. Садовский И.Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: Дис. канд. физ.-мат. наук. 01.04.01. М., 2007. 184 с.
21. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Исследование динамики спектра ГКВ по результатам серии натурных экспериментов «САРМОС» // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 229.
22. Садовский И.Н., Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В. Обзор моделей комплексной диэлектрической проницаемости водной среды, применяемых в практике дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 79–92.
23. Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н. Исследование параметров спектра ветрового волнения по данным дистанционных радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–8.
24. Сазонов Д.С., Дулов В.А., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Кузьмин А.В. Подспутниковые измерения асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона // Украинский метеорологический журнал. 2014. № 1. С. 54–58.
25. Селунский А.Б., Кузьмин А.В., Комарова Н.Ю. Тепловое поглощение плоской электромагнитной волны произвольной поляризации на синусоидальной границе водной поверхности. Препринт Пр-2171. М.: ИКИ РАН, 2013.
26. Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А. Использование резонансных линий 22,2; 183 и 325 ГГц для восстановления детальных вертикальных профилей водяного пара в тропической атмосфере // Исследование Земли из космоса. 2013. № 1. С. 1–6.
27. Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А. О возможности восстановления вертикального распределения водяного пара в атмосфере тропиков по измерениям в линии 183 ГГц из космоса // Исследование Земли из космоса. 2012. № 2. С. 41–52.

28. *Стерлядкин В.В., Шарков Е.А.* Дифференциальные радиотепловые методы определения вертикального профиля водяного пара в тропосфере и стратосфере Земли // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 15–28.
29. *Трохимовский Ю.Г.* Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
30. *Трохимовский Ю.Г., Хапин Ю.Б., Эткин В.С.* Поляризационные и спектральные характеристики радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности моря: Препринт Пр-821. М.: ИКИ АН СССР, 1983. 36 с.
31. *Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Лабораторные и натурные исследования критических явлений в радиотепловом излучении взволнованной водной поверхности: Препринт Пр-988. М.: ИКИ АН СССР, 1985. 23 с.
32. *Эткин В.С., Ворсин Н.Н., Кравцов Ю.А., Мировский В.Г., Никитин В.В., Попов А.Е., Троицкий И.А.* Обнаружение критических явлений при тепловом радиоизлучении периодически неровной водной поверхности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 3. С. 454–456.
33. *Bulatov M.G., Raev M.D., Skvortsov E.I.* Experimental study of the Third Stokes Parameter in microwave emission from the sea surface perturbed by rain // Physics of Vibrations. 2000. Vol. 8 (3). P. 172–178.
34. *Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Litovchenko K.C., Pungin V.G., Raev M.D., Sabinin K.D., Skvortsov E.I.* Microwave backscatter and self emission of the sea surface perturbed by gas bubble flow // Doklady Earth Sciences. Vol. 381. No. 8. October–November 2001. P. 964–966.
35. *Etkin V.S., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Smirnov A.I., Yakovlev V.V.* The determination of sea surface wind and temperature with airborne radiometric data (Joint US/Russia Internal Waves Remote Sensing Experiment) // Proc. IGARSS'93, Tokyo, Japan. 1993. P. 1622–1624.
36. *Gasparovic R.F., Etkin V.S.* // Proc. IGARSS'94, Pasadena. 1994. P. 741–743.
37. *Irisov V. G.* Small-slope expansion for thermal and reflected radiation from a rough surface // Waves Random Media. 1997. Vol. 7. P. 1–10.
38. *Kravtsov Yu.A., Kuz'min A.V., Lavrova O.Yu., Mitnik L.M., Mityagina M.M., Sabinin K.D., Trokhimovskii Yu.G.* Surface manifestation of oceanic internal waves viewed in radar images polarization features // Earth observation and Remote Sensing. 2000. Vol. 15. No. 6. P. 909–926.
39. *Kuzmin A., Pospelov M., Trokhimovskii Yu.* Sea surface parameters retrieval by passive microwave polarimetry // Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere. Eds. P. Pampaloni, S. Paloscia. Zeist, The Netherlands. VSP Intern. Science Publishers, 2000. P. 3–11.
40. *Pospelov M.N., De Biasio F., Goryachkin Y.N., Komarova N.Y., Kuzmin A.V., Pampaloni P., Repina I.A., Sadovsky I.N., Zecchetto S.* Air–sea interaction in a coastal zone: The results of the CAPMOS'05 experiment on an oceanographic platform in the Black Sea // Atmospheric Research. 2009. Vol. 94. No. 1. P. 61–73.
41. *Repina I., Artamonov A., Chukharev A., Esau I., Goryachkin Y., Kuzmin A., Pospelov M., Sadovsky I., Smirnov M.* Air–sea interaction under low and moderate winds in the Black Sea coastal zone // Estonian Journal of Engineering. 2012. Vol. 18. No. 2. P. 89–101. doi: 10.3176/eng.2012.2.01.
42. *Sadovsky I.N., Kuzmin A.V., Pospelov M.N.* Dynamics of Short Sea Wave Spectrum Estimated From Microwave Radiometric Measurements // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47. No. 9. P. 3051–3056.
43. *Sadovsky I., Kuzmin A., Pospelov M.* The angular dependence of the Stokes parameters of thermal radio-emission from the rough water surface // Program and abstracts of 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Application, 24–27 Feb., 2004, Rome, Italy. 2004. P. 185.
44. *Semyonov B. I.* Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours // Radio Eng. Electron Phys. 1966. Vol. 1. P. 1179–1187.
45. *Trokhimovski Yu., Kuzmin A., Pospelov M., Irisov V., Sadovsky I.* Laboratory polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 3. P. 8039.
46. *Trokhimovski Yu.G., Bolotnikova G.A., Etkin V.S., Grechko S.I., Kuzmin A.V.* The dependence of S-band sea surface brightness temperature on wind vector at normal incidence // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. Vol. 33. No. 4. P. 1085–1088.
47. *Voronovich A.G.* Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces // Sov. Phys. JETP. 1985. Vol. 62. P. 65–70.

Microwave radiometric studies of the sea surface

A.V. Kuzmin¹, I.A. Repina^{1,2}, I.N. Sadovsky¹, A.B. Selunsky¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru

² Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

The article presents a review of main scientific results in the field of microwave radiometric studies of the sea surface obtained by a team of researchers of Space Research Institute RAS (IKI RAS). Theoretical investigation of formation of electromagnetic radiation of a rough sea surface is described. The focus is on the problem of short gravity-capillary waves radiation, modern methods and approaches to solving it are presented. A considerable part of the review is devoted to the description of experimental studies conducted by the team for the past decades. Among the main results of airborne experiments we should note detection of an effect of azimuthal anisotropy of sea surface radiation (which is today the cornerstone in determining wind speed and direction over the sea surface) and the resonance mechanism of its formation by small scale waves. The latter grew into a new theory that received the name of critical phenomena theory. Certain aspects of the theory are still being investigated in laboratory experiments. Multiple field experiments conducted by researchers of IKI RAS on two sites – the Southern Division of IO RAS and MGI RAS – center on interaction processes of ocean and atmosphere. Another important direction of research is determination of wind-wave spectra by NRRS method developed by IKI RAS and identification of their relation with a set of hydrometeorological parameters. All measurements are made using a complex of radiometers and polarimeters developed by the IKI RAS research team. At present, the new stage of research and development activities is associated with the inclusion of the Convergence Project into the program of long-term scientific investigations on the Russian Segment of the International Space Station.

Keywords: microwave radiometer, radiometry, radio polarimetric measurements, sea surface, own radiation, theory of microwave emission, critical phenomena, natural experiment, polarizing anisotropy, gravity-capillary waves, GCW spectrum, wind speed and direction

References

1. Astaf'eva N.M., Raev M.D., Sharkov E.A., Mezhdovnye izmeneniya radioteplovogo polya Zemli po dannym mikrovolnovogo sputnikovogo monitoringa (The interannual changes in the radio thermal field of the Earth according to satellite microwave monitoring), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 9–15.
2. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (The radio emission of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1972, 188 p.
3. Bepalova E.A., Veselov V.M., Glotov A.A., Milititskii Yu.A., Mirovskii V.G., Pokrovskaya I.V., Popov A.E., Raev M.D., Sharkov E.A., Etkin V.S., *Issledovanie anizotropii vetrovogo volneniya po variatsiyam polarizovannogo teplovogo izlucheniya* (A study of the anisotropy of wind waves on variations of polarized thermal radiation), *Doklady AN SSSR*, 1979, Vol. 246, No. 6, pp. 1482–1485.
4. Bulatov, M.G., Kravtsov Yu.A., Kuzmin A.V., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Raev M.D., Skvortsov E.I., Aleksandrov D.V., *Mikrovolnovye issledovaniya morskoi poverkhnosti v pribrezhnoi zone "Gelendzhik 1999–2002"* (Microwave studies of the sea surface in the coastal zone "Gelendzhik 1999–2002"), Moscow: KDU, 2003, 143 p.
5. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Sukhorukov A.P., *Teoriya voln* (Wave Theory), Moscow: Nauka, 1979, 386 p.
6. Gershenzon V.E., Irisov V.G., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Azimutal'nye efekty pri kriticheskikh yavleniyakh v teplovom radioizluchanii sherokhovatoi poverkhnosti: Preprint Pr-1104* (Azimuthal effects in the critical phenomena in thermal radio emission from a rough surface. Preprint Pr-1104), Moscow: IKI AN SSSR, 1986, 26 p.
7. Grechko S.I., Irisov V.G., Kuzmin A.V., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Kharakteristiki sobstvennogo SVCh-izlucheniya morskoi poverkhnosti na nastil'nykh uglakh nablyudeniya: Preprint Pr-1729* (Features of microwave radiation of the sea surface at grazing angles. Preprint Pr-1729), Moscow: IKI RAS, 1991, 41 p.
8. Dzyura, M.S., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Sposob distantsionnogo opredeleniya skorosti i napravleniya vetra nad vodnoi poverkhnost'yu: A.S. 1582849, 23.05.1988* (A method of remote determination of wind speed and direction over water. Inv. Certificate 1582849, 23.05.1988), *Bull. of Inventions*, 1993, No. 45–46.
9. Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A., *Elektronnaya baza mnogoletnikh dannykh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean-atmosfera* (Electronic data base of long-term global radio thermal field of the Earth in the context of multi-scale study ocean-atmosphere system), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 1, pp. 7–13.
10. Irisov V.G., *Issledovanie izlucheniya elektromagnitnykh voln periodicheski nerovnoi poverkhnost'yu: Preprint Pr-944* (The study of radiation of electromagnetic waves periodically uneven surface. Preprint Pr-944), Moscow: IKI AN SSSR, 1984, 18 p.
11. Irisov V.G., Kuzmin A.V., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Azimutal'nye zavisimosti sobstvennogo SVCh-izlucheniya poverkhnosti okeana na nastil'nykh uglakh nablyudeniya* (Azimuthal dependence of microwave radiation of ocean surface at grazing angles), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1990, No. 6, pp. 99–107.

12. Irisov V.G., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., Radioteplovaya spektroskopiya morskoi poverkhnosti (Radio spectroscopy of sea surface), *Doklady AN SSSR*, 1987, Vol. 297, No. 3, pp. 587–589.
13. Kravtsov Yu.A., Mirovskaya E.A., Popov E.A., Troitskii I.A., Etkin V.S., Kriticheskie yavleniya pri teplovom izluchenii periodicheski nerovnoi vodnoi poverkhnosti (Critical phenomena in the thermal radiation periodically rough water surface), *Izvestiya AN SSSR, FAO*, 1978, Vol.14, No. 7, pp. 733–739.
14. Kuzmin A.V., Goryachkin Yu.A., Ermakov D.M., Ermakov S.A., Komarova N.Yu., Kuznetsov A.S., Repina I.A., Sadovskii I.N., Smirnov M.T., Sharkov E.A., Chukharev A.M., Morskaya gidrofizicheskaya platforma “Katsiveli” kak podsputnikovyi poligon na Chernom more (Marine Hydrophysical platform “Katsiveli” as a subsatellite test site on the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44.
15. Militskii Yu.A., Raizer V.Yu., Sharkov E.A., Etkin V.S., O teplovom radioizluchenii penoobraznykh struktur (On the foam-like structures of thermal radiation), *ZhTF*, 1978, Vol. 48, No. 5, pp. 1031–1033.
16. Rayzer V.Yu., Sharkov E.A. K voprosu ob elektrodinamicheskom opisani plotno upakovannykh dispersnykh sistem (On the problem of electrodynamic description of densely packed dispersed systems), *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 1981, Vol. 27, No. 7, pp. 809–818.
17. Sadovskii I.N. (2008a), Metodika vosstanovleniya parametrov spektra vetrovogo volneniya na osnove dannykh uglovykh radiopolarimetriceskikh izmerenii (Methods of recovering the parameters of the spectrum of wind waves on the basis of angular radio polarimetric measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 6, pp. 1–7.
18. Sadovskii I.N. (2008b), Metodika distantsionnogo opredeleniya kharakteristik vetrovogo volneniya: 1. Raschet radioyarkostnykh kontrastov vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti (Methods of remote determining the characteristics of wind waves: 1. Calculation of brightness contrasts of rough water surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, pp. 192–198.
19. Sadovskii I.N., Osobennosti ucheta vklada dlinnovolnovykh komponent volneniya v prirashchenie izluchatel'noi sposobnosti morskoi poverkhnosti (Some features of calculating long-wave contribution in the increment of the sea surface emissivity), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 228–239.
20. Sadovskii I.N., *Polyarizatsionnye radioteplovye metody v issledovaniyakh parametrov morskogo volneniya: Diss. cand. fiz.-mat. nauk* (Polarization of radio techniques in the study of parameters of sea waves. Candidate's phys. and math. sci. thesis), Moscow, 2007, 184 p.
21. Sadovskii I.N., Sazonov D.S., Issledovanie dinamiki spektra GKV po rezul'tatam serii naturnykh eksperimentov “CAPMOS” (Study of the dynamics of the spectrum of STB based on a series of field experiments «CAPMOS»), 8 konferentsiya “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa” (8th Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAN, Book of abstracts, 2010, p. 229.
22. Sadovskii I.N., Sharkov E.A., Kuzmin A.V., Sazonov D.S., Pashinov E.V., Obzor modelei kompleksnoi dielektricheskoi pronitsaemosti vodnoi sredy, primenyaemykh v praktike distantsionnogo zondirovaniya (The review of permittivity models of the aqueous medium, used in the practice of remote sensing), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 79–92.
23. Sadovskii I.N., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Issledovanie parametrov spektra vetrovogo volneniya po dannykh distantsionnykh radiopolarimetriceskikh izmerenii (Investigation of the parameters of the spectrum of wind waves according to the remote radio polarimetric measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 2, pp. 1–8.
24. Sazonov D.S., Dulov V.A., Sadovskii I.N., Chechina E.V., Kuzmin A.V., Podsputnikovye izmereniya asimmetrii uklonov vetrovykh voln gravitatsionnogo diapazona (Subsatellite measurements of slope asymmetry of gravitational wind waves), *Ukrainskii metrologicheskii zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 54–58.
25. Selunskii A.B., Kuzmin A.V., Komarova N.Yu., *Teplovoye pogloshchenie ploskoi elektromagnitnoi volny proizvol'noi polarizatsii na sinusoidal'noi granitse vodnoi poverkhnosti: Preprint Pr-2171* (Thermal absorption of a plane electromagnetic wave of arbitrary polarization on a sinusoidal edge of the water surface. Preprint Pr-2171), Moscow: IKI RAS, 2013.
26. Semin A.G., Kuzmin A.V., Khapin Yu.B., Sharkov E.A., Ispol'zovanie rezonansnykh linii 22,2; 183 i 325 GGts dlya vosstanovleniya detal'nykh vertikal'nykh profilei vodyanogo para v tropicheskoi atmosfere (Using the resonance lines 22.2; 183 and 325 GHz for recovery of detailed vertical profiles of water vapor in the tropical atmosphere), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 1, pp. 1–6.
27. Semin A.G., Kuzmin A.V., Khapin Yu.B., Sharkov E.A., O vozmozhnosti vosstanovleniya vertikal'nogo raspredeleniya vodyanogo para v atmosfere tropikov po izmereniyam v linii 183 GGts iz kosmosa (On the possibility of recovery of the vertical distribution of water vapor in the atmosphere of the tropics for measurements in line 183 GHz from space), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 2, pp. 41–52.
28. Sterlyadkin V.V., Sharkov E.A., Differentsial'nye radioteplovye metody opredeleniya vertikal'nogo profilya vodyanogo para v troposfere i stratosfere Zemli (Differential radio methods of determining the vertical profile of water vapor in the troposphere and stratosphere), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 5, pp. 15–28.
29. Trokhimovskii Yu.G., Model' radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti (The model of radio emission of rough sea surface), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 1, pp. 39–49.
30. Trokhimovskii Yu.G., Khapin Yu.B., Etkin V.S., *Polyarizatsionnye i spektral'nye kharakteristiki radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti moriya: Preprint Pr-821* (Polarization and spectral characteristics of radio emission rough water surface of the sea. Preprint Pr-821), Moscow: IKI AN SSSR, 1983, 36 p.
31. Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S., *Laboratornye i naturnye issledovaniya kriticheskikh yavlenii v radioteplovom izluchenii vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti: Preprint Pr-988* (Laboratory and field studies of critical phenomena in radio thermal radiation rough water surface. Preprint Pr-988), Moscow: IKI AN SSSR, 1985, 23 p.
32. Etkin V.S., Vorsin N.N., Kravtsov Yu.A., Mirovskii V.G., Nikitin V.V., Popov A.E., Troitskii I.A., Obnaruzhenie kriticheskikh effektov pri teplovom radioizluchenii nerovnoi vodnoi poverkhnosti (Detection of critical thermal radiation effects of rough water surface), *Izvestiya VUZov. Radiofizika*, 1978, Vol. 21, No. 3, pp. 454–456.
33. Bulatov M.G., Raev M.D., Skvortsov E.I., Experimental study of the Third Stokes Parameter in microwave emission from the sea surface perturbed by rain, *Physics of Vibrations*, 2000, 8 (3), pp. 172–178.
34. Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Litovchenko K.C., Pungin V.G., Raev M.D., Sabinin K.D., Skvortsov E.I., Microwave backscatter and self emission of the sea surface perturbed by gas bubble flow, *Doklady Earth Sciences*, Vol. 381, No. 8, October-November 2001, pp. 964–966.

35. Etkin V.S., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Smirnov A.I., Yakovlev V.V., The determination of sea surface wind and temperature with airborne radiometric data (Joint US/Russia Internal Waves Remote Sensing Experiment), *Proc. IGARSS'93*, Tokyo, Japan, 1993, pp. 1622–1624.
36. Gasparovic R.F., Etkin V.S., *Proc. IGARSS'94*, Pasadena, 1994, pp. 741–743.
37. Irisov V.G., Small-slope expansion for thermal and reflected radiation from a rough surface, *Waves Random Media*, 1997, Vol. 7, pp. 1–10.
38. Kravtsov Yu.A., Kuzmin A.V., Lavrova O.Yu., Mitnik L.M., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Trokhimovskii Yu.G., Surface manifestation of oceanic internal waves viewed in radar images polarization features, *Earth observation and Remote Sensing*, 2000, Vol. 15, No. 6, pp. 909–926.
39. Kuzmin A., Pospelov M., Trokhimovskii Yu., Sea surface parameters retrieval by passive microwave polarimetry, In: *Microwave radiometry and remote sensing of the Earth's surface and atmosphere*, Eds. P. Pampaloni, S. Paloscia, VSP Intern. Science Publishers, Zeist, The Netherlands, 2000, pp. 3–11.
40. Pospelov M.N., De Biasio F., Goryachkin Y.N., Komarova N.Y., Kuzmin A.V., Pampaloni P., Repina I.A., Sadovsky I.N., Zecchetto S., Air–sea interaction in a coastal zone: The results of the CAPMOS'05 experiment on an oceanographic platform in the Black Sea, *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 94, No. 1, pp. 61–73.
41. Repina I., Artamonov A., Chukharev A., Esau I., Goryachkin Y., Kuzmin A., Pospelov M., Sadovsky I., Smirnov M. Air-sea interaction under low and moderate winds in the black sea coastal, *Estonian Journal of Engineering*, 2012, Vol. 18, No. 2, pp. 89–101, doi: 10.3176/eng.2012.2.01.
42. Sadovsky I.N., Kuzmin A.V., Pospelov M.N. Dynamics of short sea wave spectrum estimated from microwave radiometric measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 9, pp. 3051–3056.
43. Sadovsky I., Kuzmin A., Pospelov M. The angular dependence of the Stokes parameters of thermal radio-emission from the rough water surface *8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Application*, 24–27 Feb., 2004. Rome, Italy, Program and abstracts, 2004, pp. 185.
44. Semyonov B. I., Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours, *Radio Eng. Electron Phys.*, 1966, Vol. 1, pp. 1179–1187.
45. Trokhimovski Yu., Kuzmin A., Pospelov M., Irisov V., Sadovsky I. Laboratory polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves, *Radio Science*, 2003, Vol. 38, No. 3, 8039.
46. Trokhimovski Yu.G., Bolotnikova G.A., Etkin V.S., Grechko S.I., Kuzmin A.V., The dependence of S-band sea surface brightness temperature on wind vector at normal incidence, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1995, Vol. 33, No. 4, pp. 1085–1088.
47. Voronovich, A. G. Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces, *Sov. Phys. JETP*, 1985, Vol. 62, pp. 65–70.