



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора

по научной работе ИПФ РАН

член-корреспондент РАН Е.А. Мареев

07 сентября 2018 г.

### Отзыв

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук»

на диссертационную работу Сазонова Дмитрия Сергеевича

«Многопараметрическая модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности: анализ спутниковой информации и надводных измерений»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертация посвящена важной проблеме дистанционного определения скорости и направления ветра по данным измерения собственного радиотеплового излучения водной поверхности.

Развитие методов дистанционного зондирования сопровождается увеличением числа искусственных спутников Земли, на борту которых установлена разнообразная измерительная аппаратура. Эффективность использования получаемых данных для мониторинга состояния поверхности нашей планеты и исследования процессов ее взаимодействия с атмосферой непрерывно растет. Набор задач, связанный с применением данных дистанционного зондирования, широк, начиная с актуальных приложений практического характера (краткосрочное и долгосрочное прогнозирование погоды, предупреждение стихийных бедствий и многих других) и заканчивая фундаментальными исследованиями, например, процессов изменения климата.

Для глобального и регионального исследования и мониторинга системы океан-атмосфера хорошо себя зарекомендовала микроволновая радиометрия. Радиометрические приемники измеряют собственное радиотепловое излучение физических объектов в диапазоне дециметровых, сантиметровых и миллиметровых длин волн. Измерения, выполняемые с борта искусственных спутников, дают возможность проводить круглосуточный мониторинг. Благодаря наличию в указанном диапазоне длин волн «окон

прозрачности» атмосферы, принимаемое на спутнике излучение определяется состоянием подстилающей поверхности и обладает высокой информативностью.

Исследование зависимости радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости и направления приводного ветра, температуры воды и других метеорологических и физических параметров является необходимым этапом в развитии методов дистанционного зондирования Земли из космоса. Определение поля приводного ветра с помощью микроволновых измерений из космоса позволяет исследовать глобальные климатические явления, прогнозировать стихийные бедствия и решать ряд других важных задач.

Основное внимание в работе Д.С.Сазонова уделено развитию моделей и алгоритмов восстановления скорости и направления приводного ветра с помощью перспективного космического радиометра, который будет установлен на борту международной космической станции в рамках космического эксперимента «Конвергенция».

В работе Д.С.Сазонова исследованы взаимосвязи собственного радиоизлучения взволнованной водной поверхности с полем приводного ветра в микроволновой области на частоте в 37,5 ГГц, разработана многопараметрическая модель этих взаимосвязей и предложен алгоритм дистанционного определения направления ветра на основе микроволновых измерений.

Исходя из сказанного, актуальность работы не вызывает сомнения.

### **Научная новизна и достоверность полученных результатов**

Автором получен целый ряд новых и значимых результатов:

1. Проведен анализ экспериментальных радиополяриметрических данных на частоте 37,5 ГГц, полученных на океанографической платформе, принадлежащей Федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Черноморский гидрофизический полигон РАН» (ЧГП РАН), в период с 2005 по 2016 г. В результате анализа установлена взаимосвязь между радиационно-ветровой зависимостью, скоростью ветра и температурой поверхности воды.

2. Проведено моделирование радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в рамках двухмасштабной модели волнения, использующей спектр волнения в области гравитационно-капиллярных волн (ГКВ). В результате расчетов получены модельные оценки радиационно-ветровой зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности.

3. Выполнено сравнение модельных расчетов и экспериментально измеренных значений радиационно-ветровой зависимости в рамках совместного корреляционного анализа и анализа невязок в широком диапазоне скоростей приводного ветра и вертикальных углов наблюдения. Результаты сравнения показали, что в большинстве случаев модельные расчеты сходятся с экспериментом, однако количественные оценки свидетельствуют, что модели отличаются друг от друга и от натуральных измерений.

4. Разработана регрессионная модель собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин волн на основе экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости.

5. Разработан алгоритм определения направления ветра по спутниковым измерениям третьего параметра Стокса в двух полосах обзора микроволнового радиометра-спектрометра.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и библиографии. В ней содержится 138 страниц, в том числе 68 рисунков, 11 таблиц. Библиография включает 85 наименования.

**Глава 1** носит обзорный характер. В ней представлен аналитический обзор исследований радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Приведены основные результаты исследования, как в натуральных, так и в лабораторных условиях. Описаны эксперименты, результаты которых показали новые взаимосвязи между радиотепловым излучением водной поверхности и метеорологическими параметрами. Представлены методы описания радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии. Приведен список основных микроволновых приборов спутникового базирования и задачи, решаемые с помощью радиометрии.

**Глава 2** посвящена обработке экспериментальных радиометрических измерений. В ней описаны экспериментальные исследования, проведенные на океанографической платформе, используемое научное оборудование, методика проведения эксперимента. Показана процедура обработки экспериментальных данных, способ вычисления радиояркостных температур, радиояркостных контрастов и радиационно-ветровой зависимости. Представлено сравнение модельных расчетов с экспериментальными измерениями радиационно-ветровой зависимости и показано, что, несмотря на значимую корреляцию между модельными и экспериментальными данными они достаточно сильно различаются. Также в данной главе приведено сравнение модельных и экспериментальных величин азимутальной анизотропии радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Сделаны выводы, что в большинстве случаев

модельные расчеты сходятся с экспериментом, однако, количественные оценки свидетельствуют, что модели отличаются друг от друга и от натурных измерений.

**Глава 3** посвящена моделированию радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности на основе экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии. Показана необходимость нормирования объясняющих переменных модели. Описаны этапы моделирования и составления регрессионных соотношений. Представлено сравнение разработанной модели с экспериментальными данными (оценка точности аппроксимации в терминах коэффициента корреляции). Приведены соотношения для расчета азимутальных вариаций радиотеплового излучения, радиояркостного контраста и радиояркостной температуры.

**Глава 4** посвящена разработке алгоритма определения направления ветра по многочастотным радиополяриметрическим измерениям собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в КЭ «Конвергенция». Приведено теоретическое обоснование возможности определения направления ветра по измерениям в двух полосах обзора микроволнового радиометра-спектрометра (МИРС) и разработан метод повышения надежности определения направления ветра. Решена тестовая задача восстановления направления ветра и оценены погрешности предлагаемого метода. Показан пример восстановления поля ветра на основе спутниковых измерений прибором WindSat.

**Заключение** содержит основные результаты работы.

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служат результаты качественного и количественного сравнения данных, полученных в натурных экспериментах дистанционными методами, с данными численного моделирования и аналитических расчетов.

### **Замечания**

Однако, несмотря на все достоинства представленной на рассмотрение работы, необходимо сделать следующие замечания.

1) В работе недостаточно внимания уделено теоретическим моделям радиотеплового излучения. Подробно не рассмотрено ни одной аналитической модели радиотеплового излучения. Используемая в работе двухмасштабная модель излучения упоминается вскользь. Не понятно, как происходит расчет по двухмасштабной модели с использованием моделей спектров волнения. Имеются ли особенности применения двухмасштабной модели в данной постановке задачи?

При первом упоминании модели MW (Meissner, Wentz) она названа моделью ветрового волнения, тогда как, по-видимому, имеется ввиду модель радиотеплового излучения.

2) В Главах 2 и 3 разрабатывались многопараметрические модели радиотеплового излучения MiROSE и MiROSE-a, однако они не используются в Главе 4 для создания алгоритма определения направления ветра для сравнения с алгоритмом, построенным на базе модели MW (Meissner, Wentz). Также отсутствует сравнение предложенного алгоритма с какими-либо другими подходами (в том числе теоретическими), даже на модельных данных. Из-за этого теряется связь последней главы с предыдущими.

3) При обработке реальных данных радиометра WindSat с помощью предложенного в Главе 4 алгоритма получено распределение поля ветра. Однако вывод о работоспособности предлагаемого алгоритма делается из сравнения с другой моделью, подробности работы которой не приводятся. В результате сложно судить о преимуществах предлагаемого подхода. Наиболее надежным подтверждением эффективности алгоритма стало бы сравнение восстановленного направления ветра с данными морских буев.

4) Недостаточно подробно описано влияние геометрии поверхности на характеристики радиотеплового излучения, что затрудняет понимание. Не совсем понятно, какие именно геометрические характеристики влияют на излучение и как они связаны с ветром.

5) Неудачно сформулировано положение 1. В частности, не ясно, что имеется в виду под «общим характером» и «аналогичными результатами». Нигде в работе не поясняется что такое «угол наблюдения» или «вертикальный угол наблюдения», а также отсутствуют подробные схемы измерений с указанием этих углов.

Тем не менее, диссертационная работа представляет несомненную ценность, как с научной, так и с практической стороны.

### **Практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы Д.С. Сазонова могут использоваться в научных организациях, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями в области дистанционного зондирования морской поверхности (ФГБУН Институт космических исследований РАН, ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ФГБОУВО МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, ФГБУН Институт физики атмосферы РАН, ФГБУН

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ФГБНУ Институт прикладной физики РАН и др.).

Предложенная Д.С. Сазоновым модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности MiROSE-a может быть применена для получения предварительных (экспресс) оценок скорости и направления ветра, температуры поверхности воды непосредственно в ходе экспериментальных измерений.

### **Заключение**

По теме диссертации опубликованы 35 работ, среди которых 7 входят в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии, из них 6 работ индексируются в РИНЦ, 1 — в Scopus.

По объему выполненных исследований, новизне результатов, научному и практическому значению диссертационная работа Д.С. Сазонова «Многопараметрическая модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности: анализ спутниковой информации и надводных измерений» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Сазонов Дмитрий Сергеевич**, достоин присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Доклад Д.С. Сазонова по материалам диссертационной работы и отзыв ИПФ РАН на нее были представлены, обсуждены и одобрены в ИПФ РАН на заседании научного семинара отделения «Отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики» 7 августа 2018 г.

Отзыв ведущей организации подготовили:

Титченко Юрий Андреевич,  
кандидат физ.-мат. наук  
младший научный сотрудник

отдела радиофизических методов в гидрофизике  
отделения геофизических исследований

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46,  
телефон +7(831)416-49-28, факс +7(831)436-59-76, e-mail: [yuriy@ipfran.ru](mailto:yuriy@ipfran.ru)



Караев Владимир Юрьевич,  
Кандидат физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник

отдела радиофизических методов в гидрофизике

отделения геофизических исследований Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной  
физики Российской академии наук»,

603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46,

телефон +7(831)416-49-28, факс +7(831)436-59-76, e-mail: volody@ipfran.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46

тел. +7(831) 436-62-02

email: dir@appl.sci-nnov.ru