



На правах рукописи

ПАНФИЛОВА Мария Андреевна

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ,
СКОРОСТИ ПРИВОДНОГО ВЕТРА
И ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Караев Владимир Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Лебедев Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр РАН;
Бадулин Сергей Ильич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН

Защита состоится «4» октября 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 при ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «21» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На данный момент основными источниками информации о поле приводного ветра, морском волнении и состоянии ледяного покрова являются средства дистанционного зондирования, установленные на орбитальных носителях. Треки спутников покрывают практически всю площадь Мирового океана, что позволило перейти от точечных измерений морскими буями и измерений с кораблей вдоль судоходных трасс к полномасштабному исследованию динамики атмосферы и океана. Новые возможности изучения взаимодействия атмосферы и океана стали существенным шагом в развитии океанографии, а также моделирования и прогнозирования атмосферных процессов и процессов на поверхности океана.

Среди приборов, установленных на спутниках, особо выделяются активные радиолокационные системы СВЧ-диапазона. Электромагнитные волны сантиметрового диапазона проходят сквозь облака, что позволяет получать информацию независимо от погодных условий, а также от времени суток. Диапазоны СВЧ-волн, используемые для дистанционного зондирования, определяются, во-первых, окном прозрачности атмосферы, во-вторых, лежат в областях частот, не востребованных для связи или для других задач.

Весь диапазон углов падения можно разделить на несколько интервалов, которые различаются по доминирующим механизмам обратного рассеяния и решаемым задачам: 1) малые углы падения ($0 - 15^\circ$), 2) средние углы падения ($20 - 70^\circ$) и 3) скользящие углы падения ($70 - 90^\circ$). Отдельно можно выделить переходную область углов падения между малыми и средними углами падения ($10 - 20^\circ$). Границы интервалов четко не определены и зависят от интенсивности волнения.

Орбитальные радиолокаторы могут выполнять измерения при малых и средних углах падения, и выбор углов падения в значительной степени определяется решаемой задачей. Информация о состоянии морской поверхности и приводном слое атмосферы может быть получена при анализе мощностных или спектральных характеристик отраженного сигнала, а также формы отраженного импульса.

Скаттерометры выполняют измерения при средних углах падения ($20 - 60^\circ$). По энергетике сигнала, отраженного морской поверхностью, определяют скорость и направление приводного ветра [1, 2]. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) также работают при средних углах падения. РСА обладают высоким пространственным разрешением, и их данные можно использовать для определения поля приводного ветра, а также спектра длинных волн [3, 4].

При нулевом угле падения работают радиовысотометры. По данным радиовысотометров создаются карты динамической топографии морской поверхности [5]. По форме отраженного морской поверхностью импульса опре-

деляется высота значительного волнения [6]. Также разработаны алгоритмы определения периода [7, 8] и крутизны волнения [9]. По энергетике отраженного сигнала определяют скорость приводного ветра [10–12].

Большие объемы радиолокационных измерений при малых углах падения, отличных от нулевого, в диапазоне $0\text{--}18^\circ$ стали доступны исследователям относительно недавно – в начале 2000-х годов. Это были данные радиолокатора Ku-диапазона, установленного на спутнике TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), который был выведен на орбиту в 1997 году [13]. В 2014 был запущен спутник GPM (Global Precipitation Measurement) с двухчастотным радиолокатором (Dual Frequency Precipitation Radar – DPR) Ku- и Ka-диапазонов на борту [14]. В 2018 году на орбиту был выведен радиолокатор Ku-диапазона SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) на спутнике CFOSAT (Chinese-French Oceanography Satellite).

В работах [15, 16] показано, что по измерениям при малых углах падения в рамках приближения геометрической оптики возможно определение дисперсии уклонов крупномасштабного (по сравнению с длиной волны зондирующего излучения) волнения. Однако стандартных алгоритмов определения дисперсии уклонов в полосе обзора радиолокаторов нет.

Важной проблемой дистанционного зондирования морской поверхности является мониторинг нефтяных загрязнений. Ряд работ посвящен разработке моделей гашения коротких волн нефтяной пленкой [17–19], лабораторному исследованию этого процесса, например, [20]. Детектирование разливов нефти проводится по данным PCA: например, [21]. Эксперименты при малых углах малочисленны [22]. При этом стоит отметить, что данных о дисперсии уклонов в области сликса по измерениям в СВЧ-диапазоне ранее получено не было.

Также нет стандартного подхода для определения скорости ветра при малых углах падения. Разработан ряд алгоритмов определения скорости ветра по геофизическим модельным функциям для каждого угла падения [23; 24]. Однако, при углах падения $8\text{--}10^\circ$ удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) не чувствительна к изменениям шероховатости морской поверхности. Для решения этой проблемы необходимо использовать информацию о зависимости УЭПР от угла падения.

Детектирование ледяного покрова по измерениям при малых углах падения проводилось по энергетике отраженного сигнала [25], однако, данные о статистике уклонов для решения этой задачи не использовались.

В данной диссертации подход, основанный на исследовании угловой зависимости УЭПР, был развит и применен для определения полной дисперсии уклонов (в том числе в области разлива нефти), скорости приводного ветра и положения ледяного покрова в полосе обзора радиолокаторов, установленных на спутниках TRMM и GPM.

Целью работы является исследование применения данных радиолокационного зондирования морской поверхности при малых углах падения для по-

лучения информации о состоянии поверхности океана, положении ледяного покрова и скорости приводного ветра. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Собрать объединенный массив данных радиолокатора на спутниках GPM, морских буев и скаттерометра для разработки алгоритма определения скорости ветра.

2. Разработать методы анализа данных и создать комплекс программ для обработки данных радиолокаторов на спутниках TRMM и GPM.

3. Изучить влияние типа подстилающей поверхности на зависимость УЭПР от угла падения.

Научная новизна

Показано, что по данным радиолокатора, сканирующего при малых углах падения, можно определить полную дисперсию уклонов (равную сумме дисперсий уклонов в двух взаимно перпендикулярных направлениях) крупномасштабного, по сравнению с длиной зондирующего излучения, волнения.

Впервые получена зависимость дисперсии уклонов по данным радиолокатора Ku-диапазона от скорости ветра в области нефтяного слика.

Показано, что алгоритм определения скорости ветра по сигналу, пересчитанному к нулевому углу падения, позволяет восстановить скорость ветра даже в тех областях полосы обзора, где исходный сигнал слабо коррелирует со скоростью ветра, и где не работают алгоритмы, основанные на геофизических модельных функциях для каждого угла падения в отдельности.

Впервые показана работоспособность экспресс-методики определения положения ледяного покрова с опорой на геометрические свойства подстилающей поверхности.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения (равная сумме дисперсий уклонов в двух взаимно перпендикулярных направлениях) может быть восстановлена в полосе обзора сканирующего радиолокатора при малых углах падения.

2. При использовании данных об угловой зависимости УЭПР скорость приводного ветра определяется даже в тех областях полосы обзора, где исходный сигнал слабо коррелирует со скоростью ветра.

3. Зависимость полной дисперсии уклонов по данным Ku-диапазона в нефтяном слике от скорости приводного ветра близка к измерениям в оптическом диапазоне.

4. Коэффициент эксцесса плотности вероятности уклонов является критерием для классификации типа подстилающей поверхности: вода или ледяной покров.

Достоверность научных результатов

Степень достоверности полученных результатов подтверждается сопоставлением восстановленных параметров с данными других приборов для дистанционного зондирования, а также результатами численного моделирования. Результаты работы были опубликованы в рецензируемых журналах [1а–6а], в трудах и тезисах конференций [7а–27а].

Научная и практическая значимость работы

Разработаны и реализованы алгоритмы определения дисперсии уклонов, скорости приводного ветра и положения ледяного покрова по данным радиолокаторов на спутниках TRMM и GPM. Данные о дисперсии уклонов получены по всему земному шару, и могут применяться для дистанционной диагностики разливов нефти на морской поверхности, а также для валидации численных моделей волнения и исследования процессов взаимодействия атмосферы и океана.

Скорость приводного ветра, восстановленная в полосе обзора по данным радиолокатора Ku-диапазона, определяется с достаточно высоким разрешением (5 км), в том числе, в прибрежной зоне (начиная с расстояния около 10 км от берега). Полученные данные о скорости ветра могут использоваться для расчетов прогноза погоды, анализа изменений климата, а также планирования строительства ветровых электростанций.

Разработанный алгоритм определения положения ледяного покрова не требует точной калибровки радиолокатора и может быть применен для уточнения существующих методик детектирования морского льда.

Апробация результатов работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на:

- конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 2012– 2021 (Москва);
- конференциях "Комплексные исследования Мирового океана" 2017 (Москва), 2019 (Севастополь), 2020, 2021 (Москва);
- международных симпозиумах International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2016, 2017, 2019– 2021;
- международных симпозиумах International Union of Radio Science (URSI) 2020, 2022;
- международном симпозиуме Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2021;
- школе–конференции "Нелинейные волны" 2020;
- конференции "Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики" 2020;
- конференции OCEANS 2019;
- рабочей встрече 11th Coastal Altimetry Workshop 2018;

– рабочей встрече CFOSAT Science Team Meeting 2018; а также на семинарах ИПФ РАН и семинарах в National Oceanography Center (Southampton, UK) 2018 и Institute of Coastal Zone Research (Yantai, China) 2018.

Результаты работы приведены в 6 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии, 21 – в статьях в сборниках трудов и тезисах докладов. Результаты диссертации были использованы в ходе научно-исследовательских работ в рамках грантов РФФИ и РФФИ.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Большая часть программного кода для обработки данных написана автором. Результаты численного моделирования поверхностного волнения в Персидском заливе получены А.М. Кузнецовой, результаты пятой главы получены в соавторстве с А.П. Шиковым.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 112 страниц с 49 рисунками. Список литературы содержит 112 наименований, включая работы автора.

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Глава 1 носит обзорный характер. В разделе 1.1 изложены основные условия, при которых справедливо приближение геометрической оптики, приводится выражение для зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) от угла падения при малых углах падения. В разделе 1.2 приводятся модели УЭПР для морского льда. В разделе 1.3 дан краткий обзор экспериментальных работ по измерению УЭПР при малых углах падения. Основное внимание уделено результатам анализа данных сканирующих радиолокаторов на спутниках TRMM и GPM.

Глава 2 посвящена описанию алгоритма обработки данных сканирующих радиолокаторов на спутнике GPM. На рис. 1 представлена схема сканирования двухчастотного дождевого локатора со спутника миссии GPM. Сканирование происходит вдоль оси X , ось Y ориентирована вдоль направления полета.

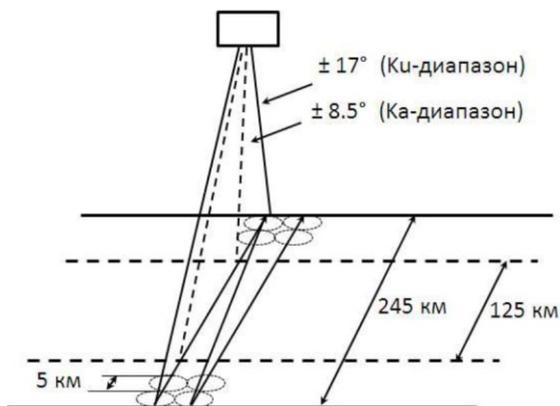


Рис. 1. Схема сканирования двухчастотного дождевого лоатора со спутника миссии GPM

Зависимость УЭПР от угла падения θ в приближении геометрической оптики имеет вид

$$\sigma^0(\theta) = \frac{\sigma^0(0)}{\cos^4 \theta} \exp \left[-\frac{\tan^2 \theta}{2\sigma_x^2(1-K_{xy}^2)} \right], \quad (1)$$

где σ_x^2 – дисперсия уклонов вдоль направления сканирования, σ_y^2 – дисперсия уклонов поперек направления сканирования, K_{xy}^2 – коэффициент корреляции между уклонами в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Моменты σ_x^2 , σ_y^2 , K_{xy}^2 относятся к крупномасштабной поверхности, относительно длины волны зондирующего излучения (в рамках двухмасштабной модели поверхности); $\sigma^0(0)$ – УЭПР при нулевом угле падения, определяемая выражением

$$\sigma^0(0) = \frac{R_{eff}^2(0)}{2\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-K_{xy}^2}}, \quad (2)$$

где $R_{eff}^2(0)$ – эффективный коэффициент отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля для шероховатой поверхности.

Тогда, имея измерения при нескольких углах падения, $\sigma^0(0)$ и $2\sigma_x^2(1-K_{xy}^2)$, можно определить, проведя линейную регрессию. Алгоритм обработки данных в полосе обзора радиолокатора включает в себя следующие этапы:

1. Рассматривается окно 5×5 элементов разрешения вокруг каждой ячейки при углах падения меньше 12.5 градусов. Удаляются из рассмотрения области, занятые льдом, сушей, а также области осадков. Оставшиеся данные должны содержать измерения, как минимум, при 4 углах падения и по 4 измерения для каждого угла падения.

2. В каждом окне по линейной регрессии определяются $\sigma^0(0)$ и $2\sigma_x^2(1 - K_{xy}^2)$.

3. Проводится оценка качества данных по коэффициенту корреляции K между $\ln(\sigma^0(\theta)\cos^4\theta)$ и $\tan^2\theta$. При обработке данных выбрано следующее условие: если $K \leq -0.7$, волнение в пределах окна можно считать однородным. В противном случае значение в центре окна убирается из рассмотрения.

4. В середине полосы обзора восстановленные значения для УЭПР при нулевом угле падения замещаются измеренными.

5. Проводится медианная фильтрация для восстановленных в полосе значений $\sigma^0(0)$ и $2\sigma_x^2(1 - K_{xy}^2)$.

В разделе 2.2 проводится численное моделирование измерений радиолокатора с учетом уровня шума в реальных данных, оценивается точность восстанавливаемых параметров. В разделе 2.3 описан метод определения полной дисперсии уклонов, равной сумме дисперсий уклонов в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Показано, что построив регрессионную зависимость вида

$$2\sigma_x^2(1 - K_{xy}^2) = \frac{A}{\sigma^0(0)}, \quad (3)$$

можно определить полную дисперсию уклонов $\sigma_{tot}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ по формуле

$$\sigma_{tot}^2 = \frac{A}{\sigma^0(0)}. \quad (4)$$

Были обработаны данные радиолокатора на спутниках TRMM за 2010 и 2012 годы и радиолокаторов на спутнике GPM за 2015–2019 годы. Коэффициенты A получены для каждого года в отдельности.

Таким образом, после выполнения пунктов 1 – 5, по формуле (4) вычисляется полная дисперсия уклонов в полосе обзора.

В разделе 2.4 приведен пример обработки данных радиолокатора Ку-диапазона на спутнике GPM вблизи тайфуна Хагибис. На рис. 2, *a* представлено распределение исходного сигнала в полосе обзора. В черно-белой цветовой гамме показано поле яркостных температур, измеренных радиометром GMI (GPM Microwave Imager), также установленного на спутнике GPM. На рис. 2, *b* – распределение восстановленной величины $\sigma^0(0)$ в полосе. Показано, что процедура обработки данных позволяет исключить изменения сигнала

ла, связанные с изменением угла падения и выявить пространственную структуру морского волнения. Распределение σ_{tot}^2 для Ку-диапазона представлено на рис. 2, в.

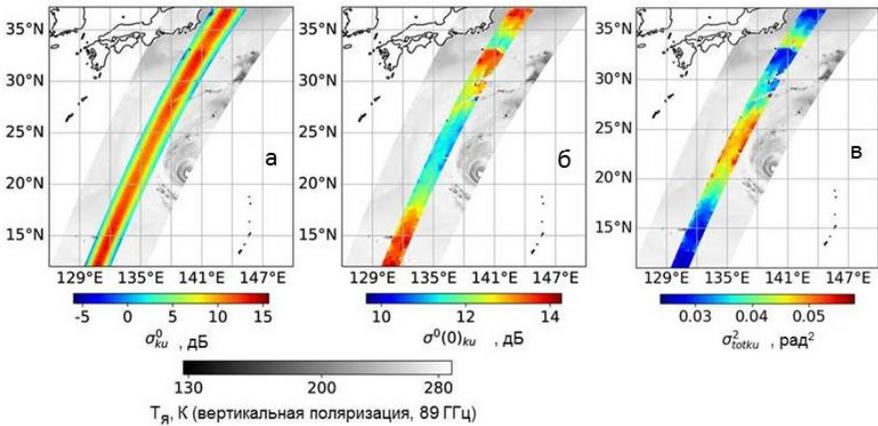


Рис. 2. Распределение УЭПР в исходных данных DPR по данным Ку-диапазона (а), УЭПР при нулевом угле падения в полосе обзора (б), распределение σ_{tot}^2 (в)

Также построены глобальные поля уклонов по данным DPR Ку-диапазона, накопленным за июль и январь 2018 года.

Раздел 2.5 посвящен сравнению результатов численного моделирования волнения по модели WAVEWATCH III с измерениями радиолокатора Ка-диапазона на спутнике GPM. Сравнивались дисперсия уклонов по измерениям радиолокатора Ка-диапазона и рассчитанная как интеграл от спектра уклонов по результатам моделирования. Проведено сравнение расчетов для двух параметризаций генерации волн за счёт передачи энергии ветра (функций источника): ST4 и ST6 (ST – Source Term).

Глава 3 посвящена определению дисперсии уклонов в области нефтяного slicka, образовавшегося в результате аварии на платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе в апреле 2010 года. В разделе 3.1 исследуется распределение УЭПР в области slicka. Приводится зависимость контраста УЭПР от скорости ветра.

Раздел 3.2 посвящен определению дисперсии уклонов по данным Ку-диапазона в области разлива нефти. По алгоритму, описанному в **Главе 2**, в области slicka была восстановлена σ_{tot}^2 . На рис. 3, а приведено изображение Мексиканского залива в оптическом диапазоне, на рис. 3, б представлено распределение σ_{tot}^2 по данным радиолокатора Ку-диапазона в полосе шириной 145 км. Видно существенное уменьшение дисперсии уклонов в области нефтяного slicka.

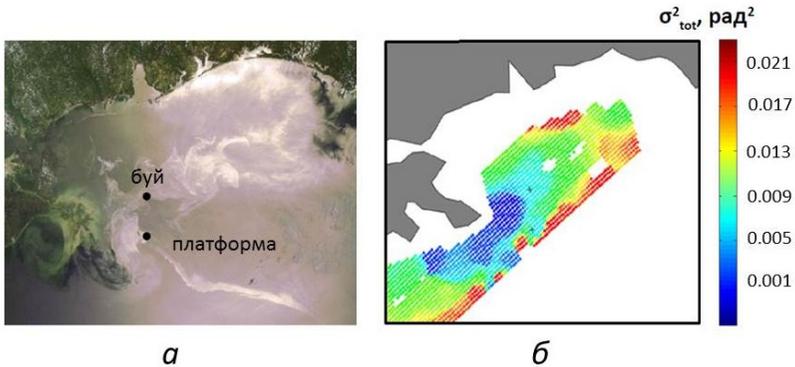


Рис. 3. Изображение MERIS Envisat, 24 мая 2010 (а),
распределение σ_{tot}^2 в полосе шириной 145 км (б)

Измерения σ_{tot}^2 были объединены с данными о скорости ветра с морского буя. Была построена зависимость дисперсии уклонов по данным Ku-диапазона в слике от скорости ветра и аппроксимирована линейной функцией

$$\sigma_{totKu_slick}^2 = 0.0075 + 0.0019U_{10} \pm 0.004. \quad (5)$$

В той же акватории для чистой поверхности воды по данным за 2012 год была построена аналогичная зависимость. Экспериментальные данные и регрессионные зависимости для покрытой нефтью (точки и сплошная линия) и чистой поверхности (кружки и пунктирная линия) приведены на рис. 4, а.

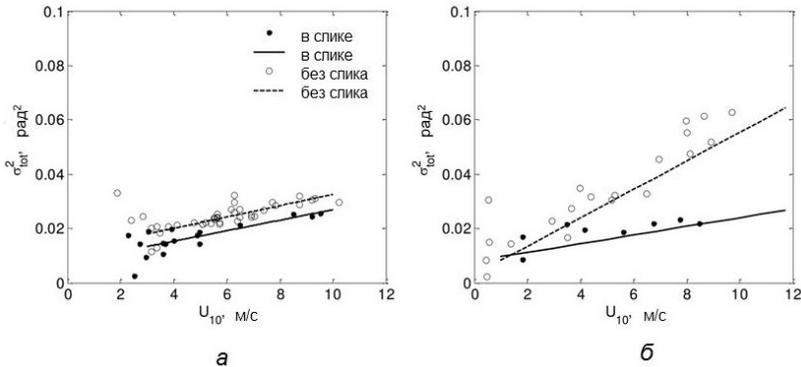


Рис. 4. Полная дисперсия уклонов по данным в Ku-диапазоне (а) и по эксперименту Кокса и Манка (б). Точки и сплошная линия соответствуют области слика, а кружки и пунктир – чистой поверхности

Было проведено сравнение с «оптическими» уклонами, измеренными в известном эксперименте [26]. Экспериментальные данные и регрессионная зависимость для оптического диапазона представлены на рис. 4, б. Для чис-

той поверхности разница между дисперсией уклонов по данным Ку-диапазона и по данным оптических измерений [26] велика (пунктирные линии на рис. 4), в то время как для поверхности, покрытой нефтью, эти значения близки (сплошные линии на рис. 4). Это связано с тем, что нефтяная пленка подавляет короткомасштабную (относительно длины волны зондирующего излучения) часть волнения. Тогда реальная морская поверхность и крупномасштабная поверхность, параметры которой определяются в СВЧ-диапазоне, становятся близки.

Глава 4 посвящена определению скорости ветра по данным радиолокатора на спутнике GPM. Алгоритм определения скорости ветра построен по данным DPR в Ку-диапазоне.

В разделе 4.1 приводится обзор работ по определению скорости приводного ветра по микроволновым измерениям. В работах [27, 28] показано, что корреляция между УЭПР и скоростью ветра практически отсутствует при углах падения 8° – 10° градусов и максимальна при нулевом угле падения. Поэтому определение скорости ветра по геофизическим модельным функциям, построенным для каждого угла падения в отдельности, в части полосы обзора, где углы падения равны 8° – 10° градусов, проблематично, как показано в работе [23] по данным радиолокатора SWIM.

Корреляция скорости ветра и УЭПР максимальна при нулевом угле падения. Поэтому был предложен следующий подход: в полосе обзора вычисляется $\sigma^0(0)$ по алгоритму в Главе 2, затем по нему определяется скорость ветра.

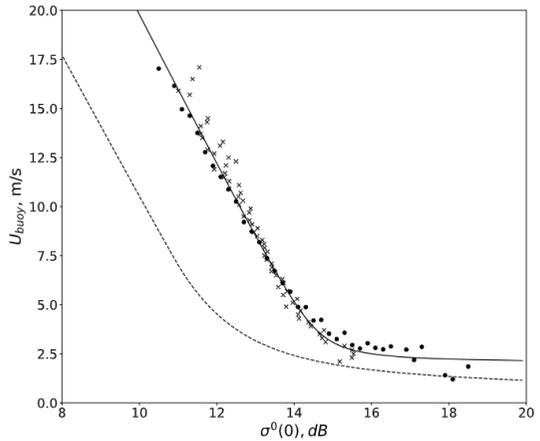
В разделе 4.2 описаны используемые для построения модели данные морских буев. Был создан объединенный массив данных о $\sigma^0(0)$ и скорости ветра на высоте 10 м за 2017–2019 годы.

Раздел 4.3 посвящен построению регрессионной модели для определения скорости ветра. Методика определения скорости ветра по УЭПР при нулевом угле падения аналогична изложенной в работе [10]. Получено более простое, чем в [10], выражение для зависимости скорости ветра от УЭПР при надире непосредственно по данным буев о скорости ветра

$$U_{10} = -(\alpha\sigma^0(0) + b) + \sqrt{(\alpha\sigma^0(0) + b)^2 + c^2} + d, \quad (6)$$

где $a = 1.84$, $b = -26.83$, $c = 2.38$, $d = 1.7$. Полученная параметризация может применяться для анализа данных радиовысотометров. На рис. 5 представлена зависимость скорости ветра по данным буев от $\sigma^0(0)$. Точки соответствуют усредненным значениям скорости ветра при заданном УЭПР, звездочки – усредненным значениям УЭПР при заданном значении скорости ветра. Сплошная линия соответствует регрессионной зависимости (6), а пунктирная линия – зависимости из [10] по данным радиовысотометра. Зависимости для DPR и радиовысотометра не совпадают, что связано с различиями калибровки радиолокаторов.

Рис. 5. Зависимость скорости ветра по данным буев от УЭПР. Точки соответствуют усредненным значениям скорости ветра при заданном УЭПР, звездочки – усредненным значениям УЭПР при заданном значении скорости ветра. Сплошная линия соответствует регрессионной зависимости (6), а пунктирная – зависимости из [10]



Раздел 4.4 посвящен валидации полученной модели по данным скаттерометра ASCAT. Среднее отклонение и среднее квадратичное отклонение (СКО) между восстановленными по данным скаттерометра и по данным радиолокатора Ku-диапазона скоростями ветра составляют 0.28 м/с и 1.26 м/с. СКО для участков полосы обзора, соответствующих углам падения 8° и 10° , составляет соответственно 1.22 м/с и 1.41 м/с. Улучшение точности определения скорости ветра связано с тем, что при обработке используется информация об угловом тренде сигнала.

В разделе 4.5 приведен локальный пример определения скорости ветра для Адриатического моря. На рис. 6 представлено сравнение скорости ветра в Адриатическом море по данным DPR и ASCAT.

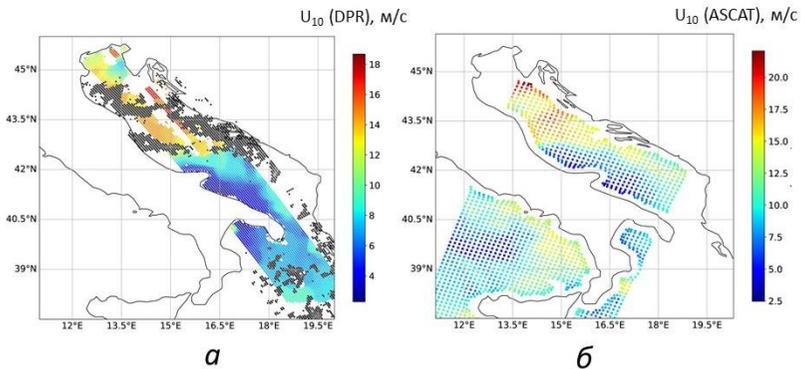


Рис. 6. Распределение скорости ветра в Адриатическом море 17.01.2017, 06:20 UTC по данным DPR Ku-диапазона (цвет), области дождя с интенсивностью более 0.5 мм/час отмечены черным (а); распределение скорости ветра в Адриатическом море 17.01.2017, 08:50 UTC по данным ASCAT (б)

Преимущество данных DPR заключается в том, что скорость ветра может быть определена с высоким разрешением (5 км) и в непосредственной близости от берега (начиная с 10 км), а также из рассмотрения могут быть удалены области осадков, известные по данным DPR.

В разделе 4.6 обсуждаются погрешности определения скорости ветра. Показано, что погрешность метода определения скорости ветра, связанная с обработкой данных DPR, составляет около 1 м/с.

В **Главе 5** обсуждается применение данных DPR в Ku-диапазоне для детектирования ледяного покрова. В разделе 5.1 приводятся плотности распределения значений УЭПР при углах падения от 0° до 4.5° для покрытой льдом и взволнованной морской поверхности. Поскольку плотности распределения существенно перекрываются, при этих углах падения классификация типа подстилающей поверхности только по значению УЭПР может быть затруднительна.

В разделе 5.2 описан метод определения границы ледяного покрова вдоль направления полета методом, применяемом для поиска границ на оптических изображениях (edge detection). Алгоритм из работы [29] был адаптирован для одномерного случая. На примере Охотского моря показано хорошее соответствие определенных таким методом границ ледяного покрова, границам, определенным по измерениям радиометра GMI.

В разделе 5.3 обсуждается вид угловой зависимости УЭПР для взволнованной и покрытой льдом морской поверхности. Приводятся формулы для расчета коэффициента эксцесса плотности вероятности уклонов. На рис. 7, а представлено распределение УЭПР в полосе обзора радиолокатора Ku-диапазона и распределение коэффициента эксцесса, рассчитанного для каждой симметрично дополненной половины скана (б).

Поскольку плотность вероятности уклонов взволнованной водной поверхности близка к нормальному распределению, коэффициент эксцесса γ_2 для нее близок к нулю (правая часть полосы на рис. 7), а для практически плоской поверхности льда достигает 20 (левая часть полосы на рис. 7).

В разделе 5.4 описана методика определения граничного значения коэффициента эксцесса для классификации типа подстилающей поверхности (вода или лед). В качестве сопутствующей информации о положении ледяного покрова использовались данные о сплоченности льда по измерениям радиометра GMI (GPM Microwave Imager), установленного на том же спутнике, что и радиолокатор Ku-диапазона (сплоченность рассчитывалась по алгоритму из работы [30]). В качестве критерия качества классификации была выбрана F-мера. В качестве оптимального был выбран порог, при котором F-мера достигает максимального значения. Распределение ледяного покрова по данным радиолокатора Ku-диапазона на спутнике GPM (спутник работает в широтах не выше 65°) за первую декаду июля 2018 года и карта ледяного покрова по данным радиометра AMSR-2 с сайта Бременского университета за 10 июля 2018 года представлены на рис. 8. Хорошее соответствие положения льда для

широт не выше 65° по данным обоих приборов подтверждает работоспособность алгоритма.

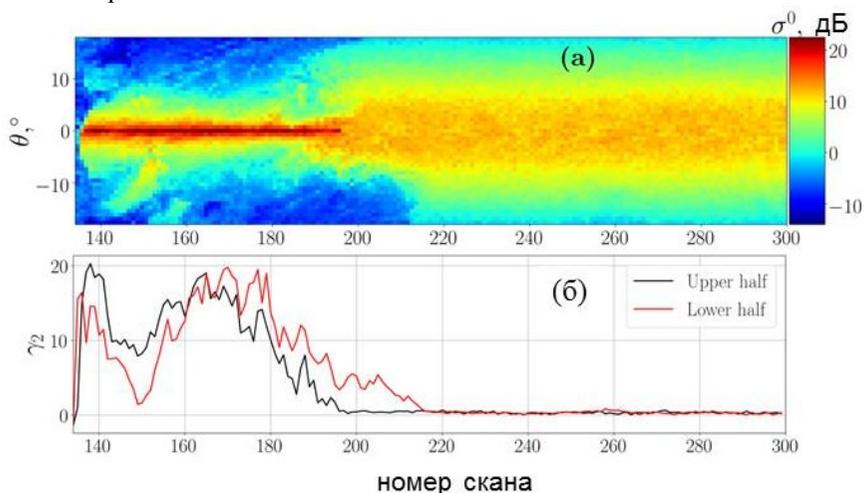


Рис. 7. Распределение УЭПР в полосе обзора DPR (а), коэффициент эксцесса, вычисленный для каждой дополненной половины скана (б)

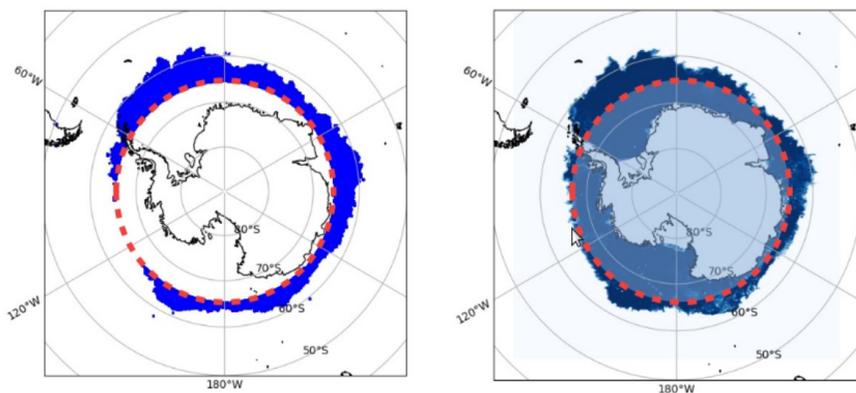


Рис. 8. Положение ледяного покрова по данным DPR (слева), по данным Бременского университета (справа) в Антарктике

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1) Разработан и реализован в программном коде алгоритм для обработки данных в широкой полосе обзора радиолокаторов. Проведена обработка данных радиолокаторов на спутнике GPM за период с 2015 под 2019 годы. За эти

годы получены измерения полной дисперсии уклонов и УЭПР при нулевом угле падения.

2) Получена зависимость радиолокационного контраста (слик/чистая поверхность) от угла падения. Получена зависимость полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения в Ку-диапазоне от скорости ветра в слике и выполнено сравнение с данными оптических измерений для скоростей ветра в диапазоне от 2 до 10 м/с. Обработка радиолокационных данных показала, что полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения является информативным параметром при исследовании морского волнения, в частности, в районе нефтяного загрязнения.

3) Разработан алгоритм определения скорости приводного ветра по данным радиолокатора Ку-диапазона. Преимущество обсуждаемого алгоритма состоит в том, что скорость ветра определяется в полосе обзора с высоким пространственным разрешением, при этом данные могут быть получены в прибрежной зоне на расстоянии 5–10 км от берега, а области осадков известные по данным того же радиолокатора, исключаются из рассмотрения. Пересчет УЭПР в полосе обзора к УЭПР при нулевом угле падения позволяет определять скорости ветра в областях полосы обзора, соответствующих углам падения $8-10^\circ$, где исходный сигнал слабо коррелирует со скоростью ветра.

4) Показано, что коэффициент эксцесса плотности вероятности уклонов является идентификатором типа подстилающей поверхности – вода или лед. Показано, что граница ледяного покрова вдоль направления полета может быть определена по положению «скачка» УЭПР. Таким образом, разработан метод экспресс-оценки положения ледяного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. HERSBACH H., STOFFELN A., HAAN S. CMOD5: An improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry // ECMWF, 2003.

2. STOFFELN A., VERSPEEK J. A., VOGELZANG J., VERHOEF A. The CMOD7 geophysical model function for ASCAT and ERS wind retrievals // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017. – V. 10, № 5. – P. 2123–2134.

3. ZHANG B., PERRIE W., VACHON P. W., LI X., PICHEL W. G., GUO J., HE Y. Ocean vector winds retrieval from C-band fully polarimetric SAR measurements // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – V. 50, № 11. – P. 4252–4261.

4. SANTOS F., SANTOS A., VIOLANTE-CARVALHO N., CARVALHO L., BRASIL-CORREA Y., PORTILLA-YANDUN J., ROMEISER R. A simulator of Synthetic Aperture Radar (SAR) image spectra: the applications on oceanswell waves // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – V. 42, № 8. – P. 2981–3001.

5. ЛЕБЕДЕВ С. А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 33–49.

6. Passaro M., Fenoglio-Marc L., Cipollini P. Validation of Significant Wave Height From Improved Satellite Altimetry in the German Bight // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2015. – V. 53, № 4. – P. 2146–2156.
7. Gommenginger C. P., Srokosz M. A., Challenor P. G., Cotton P. D. Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model // *Geophysical Research Letters*. – 2003. – V. 30, № 22. – P. 1–5.
8. Badulin S. I. A physical model of sea wave period from altimeter data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2014. – V. 119, № 2. – pp. 856–869.
9. Badulin S., Grigorieva V., Gavrikov A., Geogjaev V., Krinitskiy M., Markina M. Wave steepness from satellite altimetry for wave dynamics and climate studies // *Russ. J. Earth. Sci.* – 2018. – V. 18. –ES5005.
10. Abdalla S. Ku-Band Radar Altimeter Surface Wind Speed Algorithm // *Marine Geodesy*. – 2012. – V. 35, sup1. – pp. 276–298.
11. Gourrion J., Vandemark D., Bailey S., Chapron B., Gommenginger C., Challenor P., Srokosz M. A. A Two-Parameter Wind Speed Algorithm for Ku-Band Altimeters // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – Boston MA, USA, 2002. – V. 19, № 12. – pp. 2030–2048.
12. Karaev V. Yu., Kanevsky M.B., Balandina G.N., Cotton P. D., Challenor P. G. On the problem of the near ocean surface wind speed retrieval by radar altimeter: A two-parameter algorithm // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – V. 23, № 16. – pp. 3263–3283.
13. Kummerow C., Barnes W., Kozu T., Shiue J., Simpson J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – Boston MA, USA, 1998. – V. 15, № 3. – pp. 809–817.
14. Gao J., Tang G., Hong Y. Similarities and Improvements of GPM Dual-Frequency Precipitation Radar (DPR) upon TRMM Precipitation Radar (PR) in global precipitation rate estimation, type classification and vertical profiling // *Remote Sensing*. – 2017. – V. 9, № 11.
15. Freilich M., Vanhoff B. The relationship between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM precipitation radar measurements // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. – 2003. – V. 20. – P. 549–562.
16. Chu X., He Y., Chen G. Asymmetry and anisotropy of microwave backscatter at low incidence angles // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – 2012. – V. 5. – P. 4599–4609.
17. Ermakov S., Panchenko A., Salashin S. Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation // *Dynamics of Atmosphere and Oceans*. – 1992. – V. 16. – P. 279–304.
18. Jenkins A., Jakobs S. Wave damping by a thin layer of viscous fluid // *Physics of Fluids*. – 1997. – V. 9, № 5. – P. 1256–1264.
19. Pinel N., Bourlier C., Sergievskaya I., Longepe N., Hajduch G. Asymptotic Modeling of Three-Dimensional Radar Backscattering from Oil Slicks on Sea Surfaces // *Remote Sensing*. – 2022. – V. 14, № 4.

20. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Guo J. Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water // Marine pollution bulletin. – 2019. – V. 146, № 1. – P. 206–214.
21. Zhang B., Perrie W., Li X., Pichel W. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image // Geophysical research letters. – 2011. – V. 120. – P. 6164–6184.
22. Johnson J., Crosswell W. Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface // Radio science. –1982. – V. 11. – P. 611–617.
23. Ren L., Yang J., Xu Y., Zhang Y., Zheng G., Wang J., Dai J., Jiang C. Ocean surface wind speed dependence and retrieval from off-nadir CFOSAT SWIM data // Earth and Space Science. 2021. – V. 8, № 6. – e2020EA001505.
24. Hossan A., Jones W. L. Ku- and Ka-band ocean surface radar backscatter model functions at low-incidence angles using full-swath GPM DPR data // Remote Sensing. – 2021. – V. 13, № 8. – P. 1-27.
25. Peureux C., Longepe N., Mouche A. Sea-ice detection from near-nadir Ku-band echoes from CFOSAT/SWIM scatterometer // Earth and Space Science. – 2022.
26. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // Journal of the Optical Society of America. 1954. – V. 44. – P. 838–850.
27. Chu X., He Y., Karaev V. Y. Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and wave parameters at low incidence angles // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2012.–V. 5. – P. 4599–4609.
28. Yan Q., Zhang J., Fan C., Meng J. Analysis of Ku- and Ka-band sea surface backscattering characteristics at low-incidence angles based on the GPM Dual-Frequency Precipitation Radar Measurements // Remote Sensing.– 2019. – V. 11, № 7. –P. 1–22.
29. Canny J. A. Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. PAMI–8. № 6. – P. 679–698.
30. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – V. 113, № C2. – P. 1–14.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1a. Panfilova M. A., Karaev V. Y., Guo J. Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2018. – V. 123, № 3. – P. 1924–1936.
- 2a. Panfilova M., Karaev V., Mitnik L., Titchenko Y., Ryabkova M., Meshkov E. Advanced view at the ocean surface // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. – V. 125, № 11. – P. 1–13.

3а. Panfilova M., Karaev V. Wind speed retrieval algorithm using Ku-band radar onboard GPM satellite // *Remote Sensing*. – 2021. – V. 13, № 22.

4а. Панфилова М.А., Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И., Караев В.Ю. Методика сравнения данных расчёта волновой модели WAVEWATCH III с данными радиолокатора Ka-диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17, № 7. – с. 9–18.

5а. Панфилова М. А., Караев В. Ю. Использование данных орбитального дождевого радиолокатора Ku-диапазона для исследования изменения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в слике // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14, № 5. – С. 187–194.

6а. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Митник Л. М., Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Андреева З. В., Волгутов Р. В. Особенности радиолокационного зондирования ледяного покрова при малых углах падения на примере Охотского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17, № 7. – С. 187–202.

7а. Panfilova M., Shikov A., Karaev V. Sea ice detection using Ku-band radar onboard GPM satellite // 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. – 2020. – С. 1–3.

8а. Mitnik L., Kuleshov V., Panfilova M., Karaev V., Mitnik M., Baranyuk A. Satellite study of atmospheric cyclones and rivers around Antarctica // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. – 2021. – P. 7071–7074.

9а. Panfilova M. A., Kuznetsova A. M., Titchenko Yu. A., Sergeev D. A., Troitskaya Yu. I. Methods of comparing the wave model simulation data with the Ka-band radar data // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. – 2021. – P. 7537–7540.

10а. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Panfilova M., Karaev V., Titchenko Yu. Retrieval of mean square slopes of sea waves, surface wind speed, total water vapor content and total cloud liquid water content in Hagibis typhoon area from satellite active and passive microwave data // IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2020. – P. 5709–5712.

11а. Панфилова М. А., Караев В. Ю., Шиков А. П. Глобальная карта дисперсии уклонов морской поверхности по данным двухчастотного дождевого радиолокатора // *Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*. Институт космических исследований Российской академии наук. – 2019. – С. 317.

12а. Панфилова М. А., Караев В. Ю. Использование данных орбитального дождевого радиолокатора Ku-диапазона для исследования изменения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в слике // *Современные пробле-*

мы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 5. – С. 187–194.

13а. Панфилова М. А., Караев В. Ю., Митник Л. М. Определение скорости ветра по данным двухчастотного радиолокатора на спутнике GPM // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых. Москва. – 2021. – С. 160–161.

14а. Панфилова М. А., Караев В. Ю. Годовая изменчивость дисперсии уклонов Каспийского моря по данным двухчастотного радиолокатора на спутнике GPM // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. Москва. – 2021. – С. 268.

15а. Панфилова М. А., Караев В. Ю., Митник Л. М. Определения скорости ветра в циклонах по данным радиолокатора DPR и радиометра GMI на спутнике GPM // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. Москва. – 2021. – С. 269.

16а. Панфилова М. А., Шиков А. П., Караев В.Ю. Измерение дисперсии уклонов морского волнения в СВЧ-диапазоне при малых углах падения // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2020. – С. 150–151.

17а. Панфилова М., Шиков А., Караев В. Определение дисперсии уклонов морской поверхности и детектирование ледяного покрова по данным дождевого радиолокатора // Нелинейные волны - 2020. Тезисы докладов XIX научной школы. – 2020. – С. 185–186.

18а. Панфилова М. А., Шиков А. П., Караев В. Ю. Определение дисперсии уклонов морской поверхности и детектирование ледяного покрова по данным дождевого радиолокатора // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Нелинейные волны». Нижний Новгород. – 2020. – С. 185–186.

19а. Панфилова М. А., Митник Л. М., Кулешов В. П., Баранюк А. В., Караев В. Ю., Титченко Ю. А. Определение дисперсии уклонов морской поверхности, скорости приводного ветра и характеристик атмосферы в тайфуне Hagibis по данным микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений из космоса // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва. – 2020. – С. 237.

20а. Панфилова М. А., Шиков А. П., Караев В. Ю. Детектирование ледяного покрова на поверхности моря по радиолокационным измерениям в Кудиапазоне при малых углах падения // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики. Тезисы докладов международной научной конференции. – 2020. – С. 273–276.

21а. Панфилова М. А. Особенности УЭПР при малых углах падения для развивающегося волнения // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2019. – С. 142.

22а. Шиков А. П., Панфилова М. А. Алгоритм картографирования ледяного покрова по данным двухчастотного дождевого радиолокатора и радиометра на примере Охотского моря // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2019. – С. 191–192.

23а. Шиков А. П., Панфилова М. А., Караев В. Ю. Использование данных двухчастотного радиолокатора и радиометра на спутнике GPM для детектирования ледяного покрова на поверхности моря // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Институт космических исследований Российской академии наук. – 2019. – С. 352.

24а. Kuznetsova A., Panfilova M., Titchenko Y., Baydakov G., Troitskaya Y. Study of waves at different fetches using WAVEWATCH III modeling and precipitation radar data // OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019. – 2019. – P. 8867107.

25а. Панфилова М. А., Шиков А. П., Понур К. А., Виноградов И. Д., Рябкова М. С., Караев В. Ю. Картографирование ледяного покрова по данным двухчастотного дождевого радиолокатора на примере Охотского моря // Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Институт космических исследований Российской академии наук. – 2018. – С. 309.

26а. Панфилова М. А., Караев В. Ю. Измерение дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и мониторинг нефтяных загрязнений по данным дождевого радиолокатора // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. – 2017. – С. 215–217.

27а. Panfilova M. A., Karaev V. Y., Mitnik L. M. KA-band Radar Onboard GPM Satellite Surface Wind Speed Algorithm // 2021 Photonics Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – 2021. – P. 2273–2278.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР	12
1.1 Приближение геометрической оптики.....	12
1.2 Модели УЭПР для покрытой льдом морской поверхности	21
1.3 Обзор экспериментов при малых углах падения	23
1.4 Заключение по первой главе.....	30
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ УКЛОНОВ ПО ДАННЫМ ДОЖДЕВОГО РАДИОЛОКАТОРА	31
2.1 Обработка данных в полосе обзора.....	31
2.2 Численное моделирование.....	35
2.3 Полная дисперсия уклонов	38
2.4 Пример обработки данных.....	42
2.5 Сравнение с результатами моделирования волнения	44
2.6 Заключение по второй главе.....	50
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ УКЛОНОВ В ОБЛАСТИ НЕФТЯНОГО СЛИКА	52
3.1 Распределение УЭПР в полосе обзора. Контраст в области, покрытой нефтяной пленкой.....	52
3.2 Дисперсия уклонов в снимке.....	55
3.3 Заключение по третьей главе.....	59
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАТОРА KU-ДИАПАЗОНА	60
4.1 Введение.....	60
4.2 Используемые данные.....	63
4.3 Построение регрессионной модели.....	64
4.4 Валидация.....	67
4.5 Локальный пример определения скорости ветра.....	74
4.6 Ошибка при определении скорости ветра.....	75
4.7 Заключение по четвертой главе.....	78
ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАТОРА KU-ДИАПАЗОНА	79
5.1 Статистика значений УЭПР при малых углах падения.....	79
5.2 Определения положения границы ледяного покрова	82
5.3 Угловая зависимость УЭПР поверхности, покрытой льдом	85
5.4 Критерий для классификации типа подстилающей поверхности.....	88
5.5 Заключение по пятой главе.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДЕЛЬ СПЕКТРА ВОЛНЕНИЯ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАТОРОВ НА СПУТНИКАХ TRMM И GPM	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100

ПАНФИЛОВА Мария Андреевна

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ,
СКОРОСТИ ПРИВОДНОГО ВЕТРА
И ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ**

Автореферат

Подписано к печати 27.06.2022 г.
Формат $60 \times 90^{1/16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 30(2022).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46