

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
1.1. АКТУАЛЬНОСТЬ.....	5
1.2. НОВИЗНА ТЕМЫ.....	5
1.3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕШАЕМОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ .....	7
1.4. СВЕДЕНИЯ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ВЫВОДЫ ИЗ НИХ .....	7
1.5. ЦЕЛЬ НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЫ.....	8
1.6. ЦЕЛИ ПЕРВОГО ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	8
1.7. ЗАДАЧИ ПЕРВОГО ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	8
<b>2. ЭТАП 1</b> .....	<b>9</b>
2.1. ВЗАИМНЫЙ ОБМЕН ОПЫТОМ МЕЖДУ ПАРТНЕРАМИ В ОБЛАСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ПНИР.....	9
2.1.1 Анализ результатов иностранного партнера по тематике научно-технической проблемы в рамках ПНИР, полученных ранее и отраженных в научных публикациях.....	10
2.1.2 Анализ результатов российского партнера по тематике научно-технической проблемы в рамках ПНИР, полученных ранее и отраженных в научных публикациях.....	16
2.1.3 Сопоставление ожидаемых результатов в рамках ПНИР с результатами уже осуществленных исследований .....	21
2.1.4 Разработка общей методики проведения исследований .....	34
2.2. ПОДГОТОВКА УТОЧНЕННОГО ДОГОВОРА .....	37
2.3. ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	38
2.4. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РФ И ЗА РУБЕЖОМ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ.....	41
2.4.1 Основные сведения о радиолокаторах, используемых для наблюдения океана.....	42
2.4.2 Геометрия радиолокационной съемки.....	47
2.4.3 Радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR космического аппарата Envisat.....	50
2.4.4 Радиолокатор с синтезированной апертурой SAR космического аппарата RADARSAT-2.....	55
2.4.5 Радиолокатор с синтезированной апертурой SAR ИСЗ TerraSAR-X.....	57
2.4.6 Основные механизмы формирования РЛИ морской поверхности.....	60
2.4.7 Основные гидродинамические процессы, исследуемые с помощью спутниковых радиолокационных данных <sup>67</sup>	
2.4.8 Подготовка материалов, обобщающих результаты существующих работ по исследованию гидродинамических процессов на основе спутниковых данных, для научно-образовательного курса .....	72
2.4.9 Адаптация специальной документации, посвященной устройству и техническим возможностям радиолокаторов спутников RADARSAT-2 и TerraSAR-X, для студенческой и школьной аудитории.....	73
<b>3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>74</b>
<b>4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	<b>77</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВВ	Внутренние волны
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ИК	инфракрасный
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	Космический аппарат
НАНУ	Национальная академия наук Украины
НАСА	Национальный комитет по аэронавтике и исследованию космического пространства (США)
НОАА	Национальная администрация по исследованию океана и атмосферы (США)
ПАВ	Поверхностно-активные вещества;
ПНИР	Поисковые научно-исследовательские работы
РЛ	радиолокационный
РЛИ	радиолокационное изображение
РЛС	радиолокационная станция
РЛСБО	радиолокационная станция бокового обзора
РСА	радиолокатор с синтезированной апертурой
СВЧ	сверхвысокие частоты
ТПМ	температура поверхности моря
ТПО	температура поверхности океана
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (Усовершенствованный

радиолокатор с синтезированной апертурой)

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения)
DLR	Немецкое космическое агентство
Envisat	ENVIronment SATellite (Спутник по исследованию окружающей среды)
ERS-1/2	European Remote Sensing Satellite (Серия европейских спутников дистанционного зондирования)
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство)
GMT	Greenwich Mean Time (Среднее время по Гринвичу)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров по электротехнике и электронике)
IMM	Image Mode medium resolution (данные, получаемые в узкой полосе обзора со средним разрешением – 75 м в точке)
ITU	International Telecommunication Union (Международный союз электросвязи)
MCSST	Multi-Channel Sea Surface Temperature (Температура поверхности моря, рассчитанная по многоканальным данным)
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer (Спектрометр среднего разрешения)
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (Сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Национальный комитет по авиации и исследованию космического

пространства, США)

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальный комитет по исследованию океана и атмосферы США)
QuikSCAT	Quick SCATterometer (Спутник с быстрым скаттерометром на борту)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Радиолокатор с синтезированной апертурой)
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (широкополосный датчик обзора морской поверхности)
SIR-C/X-SAR	Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar (Радиолокатор с синтезированной апертурой космического бортового базирования, работающий в диапазоне L, C и X )

# **1. Введение**

## **1.1. Актуальность**

На современном этапе исследование океана невозможно представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. В последнее время во всем мире запущено большое количество спутников с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Огромное количество поступающей со спутников информации используется не только в чисто научных целях, но и для решения многих хозяйственных и природоохранных задач. На заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России 27 июня 2011 года, на котором обсуждались экологические аспекты модернизации экономики, Президент РФ Дмитрий Медведев назвал несколько перспективных проектов. Первый из них - создание системы мониторинга экологической обстановки из космоса. Проведение спутникового экологического мониторинга морской поверхности включает в себя не только выявление нефтяных и других антропогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. Прогноз распространения загрязнений может строиться только на детальном знании всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга, так как загрязнения, попадая в морскую среду, становятся частью этой

## **1.2. Новизна темы**

Одним из важнейших элементов динамики вод, ответственных за интенсивное перемешивание, являются мелкомасштабные процессы, такие как субмезомасштабные вихри, фронты, струи и внутренние волны. Стандартные методы дистанционного исследования при помощи сенсоров оптического диапазона

мало эффективны для исследования этих процессов, отличающихся сильной изменчивостью во времени и пространстве, спонтанностью появления, неустойчивостью и коротким временем жизни. Только с появлением возможности использования данных радиолокаторов высокого пространственного разрешения (вплоть до 3 м) спутников RADARSAT-2 и TerraSAR-X, которые позволяют изучать субмезомасштабные гидродинамические процессы с характерными пространственными масштабами менее 1 км независимо от погодных условий, освещенности и времени суток, открылись перспективы получения новых важных и интересных результатов в этом направлении.

Уникальная для российских ученых и молодых исследователей возможность использовать радиолокационные изображения высокого пространственного разрешения спутников RADARSAT-2 и TerraSAR-X будет предоставлена в рамках договора SOAR RADARSAT-2/TerraSAR-X Initiative LOAN AGREEMENT LI-16180 («Договор о данных»), участниками которого являются научные группы Университета г. Гамбург и ИКИ РАН.

Использование исключительных возможностей применяемого подхода позволит измерять характеристики течений с точностью и пространственным разрешением, более чем в 10 раз превышающими другие известные на сегодняшний день методы дистанционных измерений из космоса. Таким образом, становится возможным детальное изучение типа, формы и динамических характеристик явлений, обусловленных океаническими фронтами и наблюдаемых в непосредственной близости от них - струй, спиральных вихрей, вихревых диполей, внутренних волн, что представляет собой существенный шаг вперед на пути оперативного использования данных спутниковой радиолокации в приложении к исследованию как внутренних и окраинных морей России, так и Мирового океана в целом.

### **1.3. Современное состояние решаемой научно-технической проблемы**

Несмотря на усиленное внимание к исследованию гидродинамических процессов, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные процессы, в первую очередь вихри и гидрологические фронты с характерными масштабами 30-100 км, поскольку пространственное разрешение спутниковых сенсоров оптического диапазона, на данных которых базировались исследования, составляет 250 – 1000 м.

Вихревые структуры, мелкомасштабные фронты, струи с характерными масштабами от сотен метров до первых десятков километров изучены значительно слабее.

Возможность изучения субмезомасштабных гидродинамических процессов и явлений по данным спутникового дистанционного зондирования может быть обеспечена использованием радиолокационных данных очень высокого пространственного разрешения (до 3 м) в широкой полосе обзора независимо от погодных условий, освещенности, времени суток и наличия облачности.

В последние годы и в России и за рубежом во многих высших учебных заведениях большое внимание уделяется изучению методов дистанционного зондирования Земли и, в частности, океана. Однако, несмотря на издание серьезных учебников и учебных пособий, направленных в первую очередь на описание теоретических основ дистанционного зондирования, ощущается острая нехватка научно-образовательных материалов на электронных носителях, содержащих конкретные примеры использования спутниковой радиолокации для проведения исследований в области гидродинамических процессов.

### **1.4. Сведения о патентных исследованиях и выводы из них**

Проведен патентный поиск по вопросам современного состояния и тенденций развития в данном направлении научно-исследовательских работ глубиной в 11 лет. Выявлен значительный интерес мировой научной общественности к решению вопросов применения данных дистанционного зондирования к исследованию

гидродинамических процессов и разработки средств и методик восстановления геофизических параметров на основе этих данных. Однако предлагаемый нами подход является оригинальным, новым и патентно-чистым.

### **1.5. Цель настоящей работы**

Основной целью работы является стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание технологий, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его, и привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям в рамках международной кооперации с научно-исследовательскими и научно-образовательными организациями Германии.

ПНИР нацелена на выполнение международных обязательств Российской Федерации по развитию научно-технического сотрудничества с Германией.

### **1.6. Цели первого этапа исследований**

Анализ особенностей существующих в мире методик и систем мониторинга поверхности океана из космоса и определение основных требований, возникающих при необходимости одновременного использования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения и сенсоров оптического диапазона. Выбор и обоснование принятого направления исследований и способов решения поставленных задач и разработка общей методики проведения исследований.

### **1.7. Задачи первого этапа исследований**

Взаимный обмен опытом между партнерами в области проведения исследований по тематике ПНИР. Обзор существующих на данном этапе средств и методов дистанционного зондирования океана в применении к исследованию гидродинамических процессов. Анализ научно-технической литературы.

Подготовка материалов, обобщающих результаты существующих работ по исследованию гидродинамических процессов на основе спутниковых данных, для научно-образовательного курса.

## **2. ЭТАП 1**

### **2.1. Взаимный обмен опытом между партнерами в области проведения исследований по тематике ПНИР**

Общей целью выполнения ПНИР в рамках мероприятия является стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей ИКИ и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание технологий, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его, получение международных патентов и привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям в рамках международной кооперации с научно-исследовательскими и научно-образовательными организациями Германии. На первом этапе исполнения ПНИР проведен взаимный обмен опытом между партнерами в области проведения исследований по тематике ПНИР на основе ознакомления российских участников с публикациями иностранного партнера и проведение анализа научных работ иностранного партнера. Проведен также подбор публикаций российских участников по тематике ПНИР для дальнейшего ознакомления иностранного партнера с результатами, полученными российскими исследователями, а также для дальнейшего сопоставления ожидаемых результатов в рамках ПНИР с результатами уже осуществленных исследований.

### *2.1.1 Анализ результатов иностранного партнера по тематике научно-технической проблемы в рамках ПНИР, полученных ранее и отраженных в научных публикациях*

Иностранный партнер – коллектив Университета г. Гамбург – на протяжении длительного времени проводит успешные исследования в области теории и практики изучения гидродинамических структур по спутниковым изображениям. Проводимые исследования и, соответственно, публикации, отражающие результаты этих исследований, можно подразделить на три основных направления.

Во-первых, это экспериментальные работы по основам формирования спутниковых и, в частности, радиолокационных изображений водной поверхности.

Во-вторых, значительное внимание коллективом уделяется особенностям проявления различных гидродинамических процессов и явлений на спутниковых изображениях различной природы.

Третье важное направление – восстановление полей скоростей течений по последовательности спутниковых изображений. Рассмотрим основные публикации иностранного партнера по обозначенным направлениям.

В плане изучения принципов формирования спутниковых радиолокационных изображений водной поверхности коллективом были получены следующие результаты.

На основе измерений, проведенных в ветро-волновом экспериментальном бассейне с помощью скаттерометров X и Ka диапазонов, были исследованы процессы зарождения и распространения вынужденных и свободных коротких гравитационно-капиллярных волн на покрытой пленкой и открытой водной поверхности [1]. Измерения доплеровского сдвига частоты радиолокационного сигнала показало, что на поверхности, свободной от пленки, гравитационно-капиллярные волны X и Ka диапазонов образуются на гребнях крутых гравитационных волн с частотами 3-5 Гц. Гравитационные волны с частотами около

2 Гц не сопровождаются возникновением брэгговских волн X и Ka диапазонов, и рассеяние от таких волн в Ka диапазоне обеспечивается их обрушением. Скорости ветра, при которых наблюдается формирование гравитационно-капиллярных волн, составляют от 1,5 до 10 м/с.

Было установлено, что соотношение вынужденных и свободно распространяющихся брэгговских волн зависит от частоты радиолокатора, скорости ветра, амплитуды доминирующей волны и покрытия поверхности пленками. В частности, подавление гравитационных волн поверхностными пленками при скоростях около 8 м/с приводит к исчезновению вынужденных брэгговских волн и сокращению доплеровского сдвига сигнала X и Ka диапазонов до значений, соответствующих свободно распространяющимся брэгговским волнам.

В результате проведения натурных и лабораторных экспериментов исследованы характеристики рассеяния радиолокационного сигнала различной частоты и поляризации при различных углах падения с различными ветровыми условиями, при наличии и отсутствии атмосферных осадков [2; 3]. В частности, в работе было показано, что доминирующий рассеивающий механизм на сигнале вертикальной поляризации – это брэгговское рассеяние, которое строго зависит от брэгговской длины волны. Вариации шероховатости водной поверхности, возникающие в результате удара капель дождя, приводят к смещению волнового числа до 100 рад/м. Высказано предположение, что это смещение зависит от распределения размера водяных капель. Принимая во внимание зависимости рассеяния радиолокационного сигнала при различных частотах и поляризации от интенсивности выпадения осадков, предложен метод расчета интенсивности осадков по рассеянию сигнала L диапазона (ВВ-поляризации) и С диапазона (ГВ-поляризации). Учитывая относительную доступность радиолокационных данных указанных диапазонов, предложенный метод может быть очень перспективным для исследования природы мелкомасштабных конвективных ячеек над океаном.

В ходе натуральных экспериментов было исследовано воздействие микрообрушений на гребнях волн зыби на микроволновое и инфракрасное излучение взволнованной морской поверхности [4]. В результате проведенных измерений было установлено, что и рассеяние в микроволновом диапазоне, и инфракрасное излучение скин-слоя испытывают модуляции под действием волн зыби, но в различной фазе. В целом, максимум рассеяния наблюдается на переднем фронте волны, а максимум температуры скин-слоя – на заднем. Измерениями в инфракрасном диапазоне было установлено, что микрообрушения волн зыби происходят вблизи гребня волн, позади которого наблюдается тепловой след. Микрообрушениями также объясняется максимум рассеяния на переднем фронте волны. Соотношение микроволнового и инфракрасного сигналов было исследовано также посредством сравнения доплеровского спектра с полученными одновременно изображениями инфракрасного и видимого диапазонов. При наличии малых и микрообрушений доплеровский спектр обнаруживал характеристики, близкие к таковым для «белых шапок». В отсутствие микрообрушений, доплеровские смещения и отношения поляризаций значительно меньше – в соответствии с теорией рассеяния в композитных средах.

В результате натуральных экспериментов было исследовано влияние стратификации приводного слоя атмосферы на формирование радиолокационного изображения морской поверхности [5].

Особое внимание исследователями было уделено особенностям формирования радиолокационного сигнала в областях дождевых ячеек [6-18]. Так, в работе [7] с помощью лабораторных экспериментов исследовалось влияние скорости ветра и эффектов выпадения дождя на рассеяние радиолокационного сигнала X диапазона. Для регистрации рассеяния использовался скаттерометр X диапазона частоты 9,8 ГГц. Предварительные результаты измерений показали, что рассеяние увеличено на частотах от 5 до 100 Гц. В результате сравнения крутизны волн в направлении ветра и поперек него было обнаружено, что наблюдающаяся анизотропия возрастает с

увеличением скорости ветра. При сравнении обратно отраженного сигнала при различных поляризациях (ВВ, ГГ и ГВ) было обнаружено, что при скоростях ветра ниже приблизительно 8 м/с на всех поляризациях рассеяние, обусловленное выпадением дождя, возрастает. При больших скоростях ветра рассеяние возрастает только на перекрестной поляризации.

В работе [13] было показано, что выпадение капель дождя на водную поверхность приводит к формированию тонкого квазиоднородного слоя, который имеет огромное значение для процессов тепло- и газообмена на поверхности раздела вода – воздух. Турбулентность, вызванная одиночным и множественным выпадением капель на водную поверхность, наблюдалась в серии лабораторных экспериментов с помощью внесения пассивных трассеров, с помощью метода цифрового слежения за частицами и посредством ультразвукового зондирования. В ходе экспериментов были зафиксированы вихри с характерным размером 10-15 мм. Толщина результирующего перемешанного слоя при умеренном выпадении осадков составила около 15 см.

Возможности интерферометрической обработки радиолокационных данных, полученных с борта самолета, были опробованы коллективом в ходе полевых экспериментов, проведенных на Северном море [19]. В результате было установлено, что предложенная методика может быть успешно применена для определения характеристик течений и особенностей донной топографии прибрежных акваторий.

Следующее обширное направление исследований касается наблюдений различных гидродинамических процессов и явлений с помощью спутниковых данных.

Наиболее общие вопросы по исследованию состояния морской среды с помощью радиолокационных изображений были рассмотрены в рамках международного проекта SIMP (“Slicks as Indicators for Marine Processes: Novel Tools

for Marine Remote Sensing of the Coastal Zone”). Проведенные исследования выявили значительные возможности спутниковых радиолокационных изображений для визуализации самых разнообразных процессов, происходящих как толще морских вод, так и на их поверхности. К их числу относятся поверхностные и внутренние волны, течения, вихревые структуры, мелкомасштабные океанические фронты и пр. [20-22].

Один из циклов работ был посвящен исследованию возможностей спутникового наблюдения динамики речных плюмов [23-25]. На примере северо-западной части Средиземного моря, в районе устья р. Эбро, были рассмотрены преимущества и недостатки спутниковых изображений различной физической природы для исследования поступления и распространения речных вод в морском бассейне. Аналогичные исследования производились также у побережья Балтийского моря, в Померанской бухте, во время наводнения на реке Одер [26].

Одна из работ посвящена исследованию элементов циркуляции в прибрежной зоне северо-восточной части Черного и юго-восточной части Балтийского морей [27]. На основе многолетних многосенсорных наблюдений, проведенных в указанных районах, были проанализированы причины генерации мезо- и мелкомасштабных вихревых структур и механизмы их визуализации на спутниковых изображениях.

В работах [28;29] рассматривалась возможность наблюдения сейшей в Балтийском море по данным о высоте уровенной поверхности, полученным с помощью спутникового альтиметра ERS-1.

Важная проблема однозначного разделения на радиолокационных изображениях проявлений океанических и атмосферных процессов была затронута в [30]. В этой работе авторы анализировали изображения SIR-C/X-SAR, полученные в различных каналах, с целью исследования проявления на них океанических фронтов. В качестве тестового района выступила акватория у восточного побережья

США, в районе течения Гольфстрим. В результате выявления особенностей проявления атмосферных и океанических фронтов при различных частотах и поляризации зондирующего сигнала была разработана методика, позволяющая разделять на радиолокационных изображениях проявления океанических и атмосферных фронтообразующих процессов и восстанавливать их количественные характеристики.

Аналогичные исследования по восстановлению характеристик нижнего слоя атмосферы в областях формирования конвективных ячеек произведены в [31].

На основе спутниковых данных о скорости приводного ветра, полученных скаттерометром QuikScat, и о концентрации хлорофилла а (сканер SeaWiFS) за семилетний период (2000-2007 гг.) было исследовано влияние ветрового воздействия на биопродуктивность вод в Средиземном море [32]. В результате предпринятого анализа было показано, что благодаря особенностям атмосферного форсинга области Лионского залива и Родосско-Иерапетринского круговорота являются районами повышенной биологической продуктивности на фоне в целом малопродуктивных средиземноморских вод.

Следующее направление активной исследовательской деятельности коллектива касается восстановления параметров поля поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений.

В одном из экспериментов были задействованы спутниковые изображения различной природы, полученные в северной и южной частях собственно Балтийского моря сенсорами Landsat TM, ERS-2 SAR, Envisat ASAR, IRS-1C WiFS и SeaStar SeaWiFS [33-37]. Изображения были получены во время активного цветения цианобактерий в июле 1997 г. и в июле-августе 1999 г. Также была задействована пара изображений ASAR, полученных в мае 2005 г. В качестве трассеров течений на этих изображениях выступили клетки цианобактерий или – в случае с радиолокационными изображениями – поверхностные пленки био- или

антропогенного происхождения. Определение параметров течений определялось методом нормализованной кросс-корреляции. В результате произведенного восстановления поля течений были выявлены мелкомасштабные турбулентные структуры, которые не доступны для воспроизведения современными оперативными численными моделями. Результирующие значения скоростей течений (от 4 до 35 см/с) превышают соответствующие значения, полученные по результатам моделирования. Обнаруженное превышение объяснено воздействием на морскую поверхность ветра, который увеличивает скорости течений в непосредственной близости от поверхности, в то время как модели отражают осредненную скорость течений с участием более глубоких слоев.

Подробный анализ погрешностей и ограничений, возникающих при такого рода расчетах, приведен в работах [38-40].

В работе [41] предложена новая методика по выделению активных контуров на радиолокационных изображениях с использованием асимметричной функции внешней энергии. Указанная методика была успешно опробована при определении границ приливной зоны на участке немецкого побережья Северного моря.

### ***2.1.2 Анализ результатов российского партнера по тематике научно-технической проблемы в рамках ПНИР, полученных ранее и отраженных в научных публикациях***

Научный коллектив ИКИ РАН имеет обширный опыт исследования гидродинамических процессов в поверхностном слое морских вод по данным спутникового дистанционного зондирования. Деятельность, осуществляемую коллективом в этой области, можно подразделить на несколько различных направлений.

Прежде всего, усилиями коллектива были развиты теоретические основы применения средств дистанционного зондирования в микроволновом и оптическом диапазонах для мониторинга состояния морской поверхности [42-48]:

- создана обобщенная (трехмасштабная) модель рассеяния электромагнитных волн на поверхностных проявлениях внутренних волн;
- открыты поляризационные эффекты в рассеянии радиолокационного сигнала на настильных углах, которые позволяют регистрировать неустойчивость пограничного слоя океан-атмосфера, а также различать источники модуляции радиолокационного сигнала по их принадлежности к внутриокеаническим или атмосферным процессам;
- разработаны новые методики восстановления параметров процессов и явлений на поверхности океана на основе данных дистанционного зондирования из космоса и - предложен ряд оригинальных моделей, позволяющих перейти от качественной интерпретации наблюдаемых явлений к восстановлению количественных зависимостей;
- разработан универсальный комплекс алгоритмов и программ целевой обработки цифровых изображений, позволяющий проводить статистический, спектральный и другие виды анализа радиолокационных и оптических изображений, а также данных контактных измерений.

В этом – методическом – направлении также следует отметить, что в результате совместного анализа спутниковых изображений различной природы были выявлены наиболее информативные в плане проявления вихревых структур спутниковые океанологические продукты, а также изучены гидрологические, гидрометеорологические и гидробиологические характеристики поверхностного слоя морских вод, способствующие особенно детальному отображению вихревых структур [49-53].

Проведенные исследования выявили закономерности, позволяющие с высокой точностью классифицировать и идентифицировать гидродинамические процессы по их проявлениям на радиолокационных изображениях. Речь идет, в первую очередь, о таких явлениях, как течения и гидрологические фронты, внутренние волны в океане, вихри и вихревые структуры.

Следующее направление заключается в проведении полуоперативного или оперативного комплексного спутникового мониторинга акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей.

В 2004-2005 гг. коллектив ИКИ РАН принимал участие в оперативном спутниковом мониторинге юго-восточной части Балтийского моря. На основе ежедневных оптических, инфракрасных и радиолокационных спутниковых данных, а также численного моделирования детально исследовалась мезомасштабная динамика вод юго-восточной части Балтийского моря [49,54,55].

В 2005–2009 гг. коллектив ИКИ РАН принимал участие в спутниковом мониторинге состояния вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей, обеспечивая прием, обработку и интерпретацию радиолокационных данных Envisat ASAR и ERS-2 SAR [49,56,57]. Многолетний спутниковый мониторинг позволил выявлять новые элементы циркуляции водной среды на шельфе Черного моря; в частности, на радиолокационных изображениях морской поверхности было детектировано большое количество вихрей относительно малых размеров, с диаметрами от нескольких километров до первых десятков километров. Большой объем данных позволил провести определенные обобщения и получить статистические результаты о возникновении и развитии мелкомасштабных вихревых структур в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря. Особое внимание уделено исследованию формирования, развития и перемещения вихрей малого масштаба (до 10 км) и сезонной изменчивости их проявления [58-61].

По радиометрическим данным NOAA AVHRR и Aqua MODIS, полученным в 2006-2010 гг., было произведено исследование нестационарных мезомасштабных вихревых структур Черного моря. С помощью этих данных впервые были исследованы особенности пространственно-временной динамики для основных типов мезомасштабных вихревых структур Черного моря нестационарной природы: прибрежных антициклонических вихрей, вихревых диполей (грибовидных течений) и вихревых цепочек [51, 62-64].

На протяжении последних лет (с 2009 г.) на основе спутниковых радиолокационных данных Envisat ASAR и ERS-2 SAR коллективом осуществляется ежедневный спутниковый мониторинг акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей. В результате анализа радиолокационных изображений, полученных в ходе мониторинга, были проведены различные исследования гидродинамических структур проявляющихся в поверхностном слое вод указанных морей. Наиболее значительные результаты были получены по изучению субмезомасштабных вихревых структур указанных бассейнов и проявлений на радиолокационных изображениях внутренних волн.

В частности, по вихревой тематике были исследованы механизмы, с помощью которых субмезомасштабные вихри проявляются на радиолокационных изображениях исследуемых морей [52; 63, 65]. В результате анализа изображений за 2009-2010 г. были выявлены особенности пространственного распределения субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей [63; 66].

Что касается исследования внутренних волн, на основе данных спутникового радиолокационного зондирования морской поверхности было проведено исследование генерации и распространения внутренних волн в морях без приливов [67-71]. Особое внимание уделено рассмотрению случаев фронтального механизма генерации внутренних волн, когда наблюдаемые внутренние волны неприливно происхождения излучались нестационарным (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям) фронтом. Также на основе многосенсорной спутниковой

информации были выявлены случаи поверхностных проявлений цугов внутренних волн неприливного происхождения, локализованных в окрестностях вихревых структур.

Следующее направление касается совместного анализа полученных квазисинхронно спутниковой информации и данных контактных гидрологических наблюдений, выполненных *in situ*.

В рамках этого направления коллектив ИКИ РАН проводит ежегодные экспериментальные подспутниковые исследования изменчивости морской среды на шельфе Черного моря, в том числе детальные исследования с помощью ADCP и методов акустического зондирования на стационарных трассах. В ходе натурных исследований на внутреннем шельфе Черного моря во время одного из таких экспериментов удалось подтвердить наличие интенсивных мелкомасштабных вихрей, выявленных ранее на радиолокационных изображениях [72,73].

В результате совместного анализа спутниковых и контактных данных на примере северо-восточной части Черного моря было исследовано влияние различных типов нестационарных мезомасштабных структур на гидрологическую и биологическую структуру вод [74].

Особое внимание также было уделено такому направлению, как исследование гидродинамических процессов в проливах. В рамках этого направления были рассмотрены методические вопросы возможности исследования динамики вод в проливах по спутниковым данным, а также проведено изучение формирования запрепятствованных вихревых структур на островах при наличии сильного течения в проливе [75-79].

Проведенный в ходе исполнения первого этапа проекта анализ научных публикаций по тематике ПНИР показал, что во всем мире высок интерес к проблеме применения данных дистанционного зондирования к исследованию гидродинамических процессов и разработки средств и методик восстановления

геофизических параметров на основе этих данных. Несмотря на усиленное внимание к проблеме, ряд экспериментальных явлений еще не нашел адекватного объяснения в рамках существующих представлений. Решению этих вопросов уделяется большое внимание во всем мире. Проводящиеся в рамках исполнения настоящей ПНИР исследования соответствуют мировому уровню интереса к этой проблематике.

### ***2.1.3 Сопоставление ожидаемых результатов в рамках ПНИР с результатами уже осуществленных исследований***

Несмотря на усиленное внимание к исследованию гидродинамических процессов, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные процессы, в первую очередь вихри и гидрологические фронты с характерными масштабами 30-100 км, поскольку пространственное разрешение спутниковых сенсоров оптического диапазона, на данных которых базировались исследования, составляет 250 – 1000 м.

Вихревые структуры, мелкомасштабные фронты, струи с характерными масштабами от сотен метров до первых десятков километров изучены значительно слабее. Среди работ зарубежных ученых следует отметить работы американских исследователей [80; 81], которые изучали мелкомасштабные вихревые структуры у берегов Калифорнии.

Ряд приоритетных исследований фронтов и мезомасштабных вихрей в Черном и Каспийском морях был проведен коллективом участников ПНИР в сотрудничестве с их коллегами из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института НАНУ [82,83]. Результаты отражены в многочисленных публикациях в отечественных и зарубежных изданиях, а также в трудах международных конференций.

До сих пор нерешенными остаются вопросы, касающиеся механизмов возникновения мелкомасштабных гидродинамических процессов, районов их

проявления, продолжительности существования, их тонкой пространственной структуры, связи с мезомасштабными процессами. Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды и в разных районах, на наш взгляд, будет способствовать решению поставленных проблем.

До сих пор нерешенной проблемой остается восстановление полей течений по спутниковым данным. Относительно неплохие результаты достигнуты при восстановлении глобальных полей течений [84]. Однако задача восстановления локальных течений, являющаяся чрезвычайно важной для прогноза дрейфа нефтяных загрязнений, до сих пор не решена. Использование радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения и применение к ним алгоритма восстановления течений, разрабатываемого специалистами Университета г. Гамбург, позволит значительно продвинуться в этом направлении.

В последние годы и в России и за рубежом во многих высших учебных заведениях большое внимание уделяется изучению методов дистанционного зондирования Земли и, в частности, океана. Однако, несмотря на издание серьезных учебников и учебных пособий [85-87], направленных в первую очередь на описание теоретических основ дистанционного зондирования, ощущается острая нехватка научно-образовательных материалов на электронных носителях, содержащих конкретные примеры использования спутниковой радиолокации для исследования гидродинамических процессов.

**Вихревая динамика вод** оказывает огромное влияние на циркуляционные процессы в океане, процессы водообмена между шельфовой зоной и открытым морем и т.д. Гидродинамической теории вихрей посвящена обширная литература, однако океанские вихри имеют специфические особенности, в общей теории обычно не учитываемые.

Несмотря на усиленное внимание к исследованию вихревых процессов в океане, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные вихри с размерами 30-100 км.

Вихревые структуры с характерными масштабами от единиц километров до первых десятков километров изучены значительно слабее. Это связано, скорее всего, с тем, что при большой сложности и стоимости натуральных измерений основным инструментом дистанционного исследования вихревой активности традиционно являются спутниковые ИК и оптические сенсоры (AVHRR NOAA, MODIS Terra/Aqua, MERIS), которые позволяют при отсутствии облачного покрова наблюдать вихревые структуры с диаметрами порядка 20-30 км и более и на которых вихри малых масштабов плохо разрешаются. В качестве примера на рисунке 1 приведены фрагменты радиолокационного изображения морской поверхности и поля поверхностных температур, восстановленного на основе данных сенсора AVHRR ИСЗ NOAA-17.

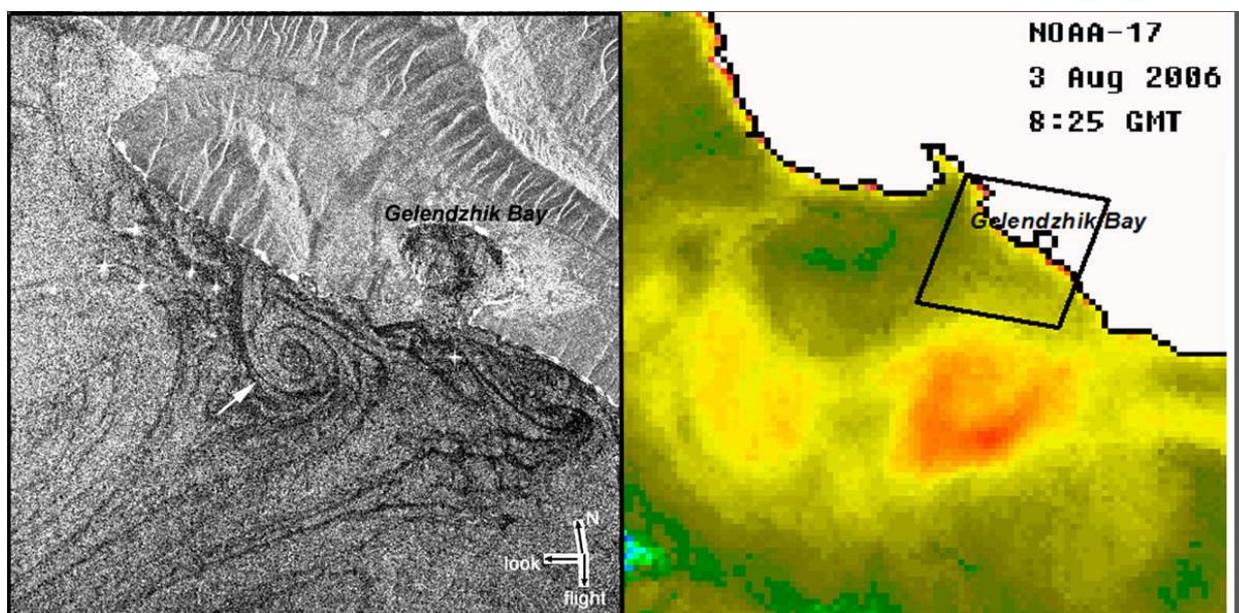


Рисунок 1 – Фрагмент (25 x 25 км) радиолокационного изображения, полученного сенсором Envisat ASAR 03.08.06 в 07:37 GMT (слева) и инфракрасного изображения, полученного сенсором AVHRR 03.08.06 в 8:25 GMT (справа)

В недавнее время начались работы по описанию механизмов формирования радиолокационных образов вихревых структур на морской поверхности. Проведенный нами анализ показал, что применение современных методов исследования, в частности, привлечение данных спутниковой радиолокации морской поверхности в совокупности с ADCP позволяет получить новые более детальные знания об этом явлении. Анализ полученных нами данных показал, что на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности детектируется большое количество вихрей относительно малых размеров, с диаметрами от нескольких километров до десятков километров (причем на их периферии могут развиваться вихри меньших размеров). Вихри этого типа имеют, как правило, спиралеобразный вид, и в подавляющем большинстве случаев являются циклоническими по направлению вращения.

На радиолокационных изображениях данные вихри визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теплое время года. Источники происхождения этих органических пленок пространственно распределены по поверхности и моменты их возникновения распределены во времени. Эти пленки обладают способностью избирательного гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения, в силу неравномерного распределения поверхностного натяжения в местах их скопления, и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра. Благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры малых размеров. Пример радиолокационного изображения спиралеобразного циклонического вихря в прибрежной зоне представлен на рисунке

2. Радиолокационное изображение выявляет тонкую структуру вихря, поэтому появляется возможность оценить долю пленок биогенного происхождения, вовлеченных в вихревую структуру в целом и сконцентрированных в зонах конвергенции.

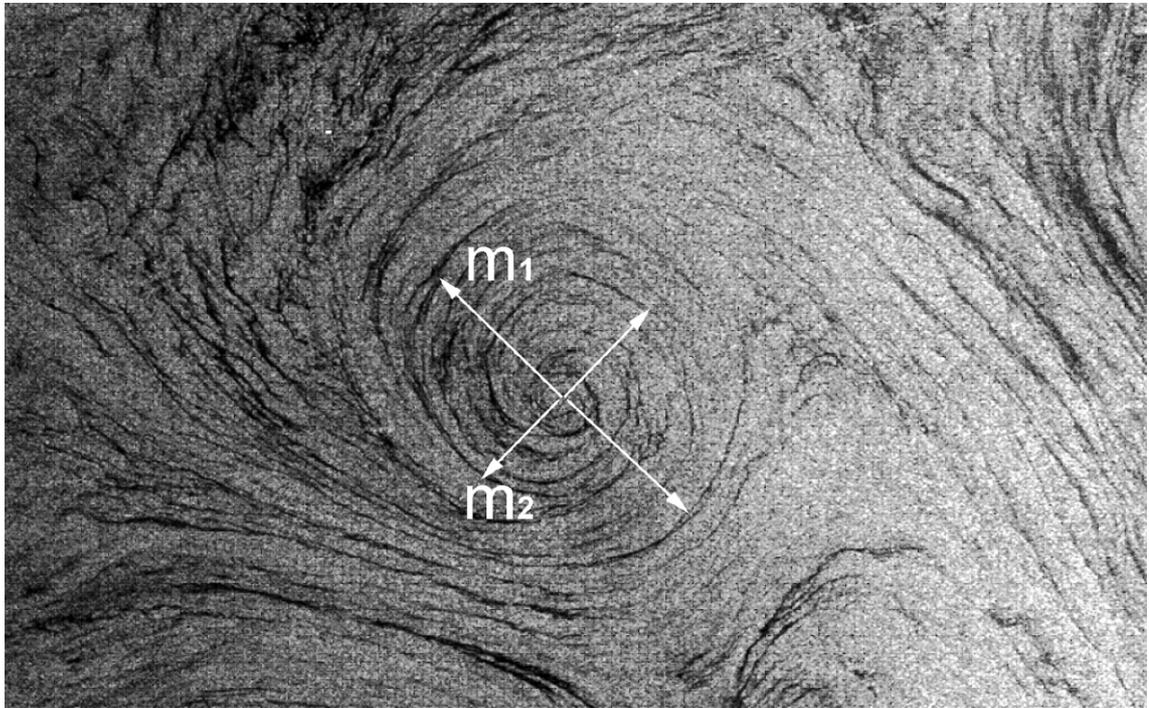


Рисунок 2 – Фрагмент Envisat ASAR изображения, полученного 10.05.2007 в 07:36:59 UTC. Циклонический вихрь с диаметром 25 км. Большая и малая оси имеют длины 26,6 км и 23,5 км соответственно.

Появляются также отдельные работы, посвященные исследованию вихрей малых масштабов методами радиолокационного наблюдения морской поверхности [88]. Следует отметить, что подавляющее число работ, посвященных дистанционным методам диагностики мелкомасштабной вихревой активности, базируется только на данных радиолокации морской поверхности. Новизна подхода, предлагаемого в рамках данного проекта, состоит в совместном использовании разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности

(радиолокация, скаттерометрия, спектрорадиометры оптического и инфракрасного диапазона), контактных и акустических измерений с высоким пространственным разрешением.

Особого рассмотрения заслуживает еще один класс вихревых структур, детектируемых на радиолокационных изображениях морской поверхности. Речь идет о вихревых диполях или грибовидных течениях, представляющих собой квазисимметричные пространственные структуры, являющиеся комбинацией узкой струи с парой вихрей противоположного знака на конце, так что структура в целом напоминает гриб в разрезе. На радиолокационных изображениях морской поверхности грибовидные течения визуализируются благодаря сликам поверхностно-активных веществ естественного происхождения, концентрирующихся в зонах конвергенции.

Размеры вихревых диполей могут варьироваться от десятков до сотен километров. Опубликованные сведения о наблюдении подобных вихревых структур касаются диполей с характерными размерами порядка сотен километров[43, 89].

Проведенные нами исследования показали, что использование радиолокационных изображений морской поверхности высокого разрешения совместно с данными дистанционного зондирования, полученных другими сенсорами, позволяет:

- наблюдать вихревые диполи существенно меньших размеров (с характерными размерами несколько километров);
- наблюдать ранние степени формирования и развития вихревых диполей еще до того, как они проявятся в оптических и ИК изображениях;
- детально выявить структуру поверхностных течений, обусловленных диполем.

Также можно утверждать, что совместный анализ данных дистанционного зондирования, полученных различными сенсорами, позволяет повысить

достоверность восстановления картины циркуляции в прибрежных зонах. В качестве иллюстрации может быть рассмотрен следующий пример.

19.06.06 над районом интереса в северо-восточной части Черного моря радиолокационные съемки были проведены дважды, с одиннадцатичасовым интервалом. РЛИ, приведенное на рисунке 3а, получено утром в условиях слабого южного ветра 2-4 м/с и неразвитого поверхностного волнения. Оно характеризуется обширными областями штиля и насыщенностью нитевидными сликами, связанными с поверхностно-активными веществами биогенного происхождения. Слики очерчивают большой грибовидный вихрь – вихревой диполь. Линейные размеры диполя составляют 66 км (ширина) на 62 км (длина). Примерные координаты центра 37°20' E, 44°15' N. Вечернее РЛИ (рисунок 3б) получено в условиях слабого, 1-3 м/с, восточного, северо-восточного ветра. Грибовидный вихрь, выявленный на утреннем снимке, заметно вырос в размерах до 92 км (ширина) на 78 км (длина), а его ось совершила поворот по часовой стрелке примерно на 20 градусов.

Анализ последовательных снимков позволяет построить пространственное распределение скоростей течений и прогнозировать возможное перемещение и развитие диполя (рисунок 3в). Рассчитанная скорость перемещения циклонической составляющей диполя составляет 0.05-0.1 м/сек в северо-восточном направлении, антициклонической – 0,2-0,3 м/сек в юго-восточном направлении.

На ИК-изображениях *AVHRR* ИСЗ серии *NOAA* и на цветосинтезированных изображениях аппаратуры *MODIS* ИСЗ *Aqua*, полученных в тот же день, 19.06.06, этот диполь был слабо различим, однако более отчетливо проявился на следующие сутки – 20.06.06 (рисунки 3 г,д).

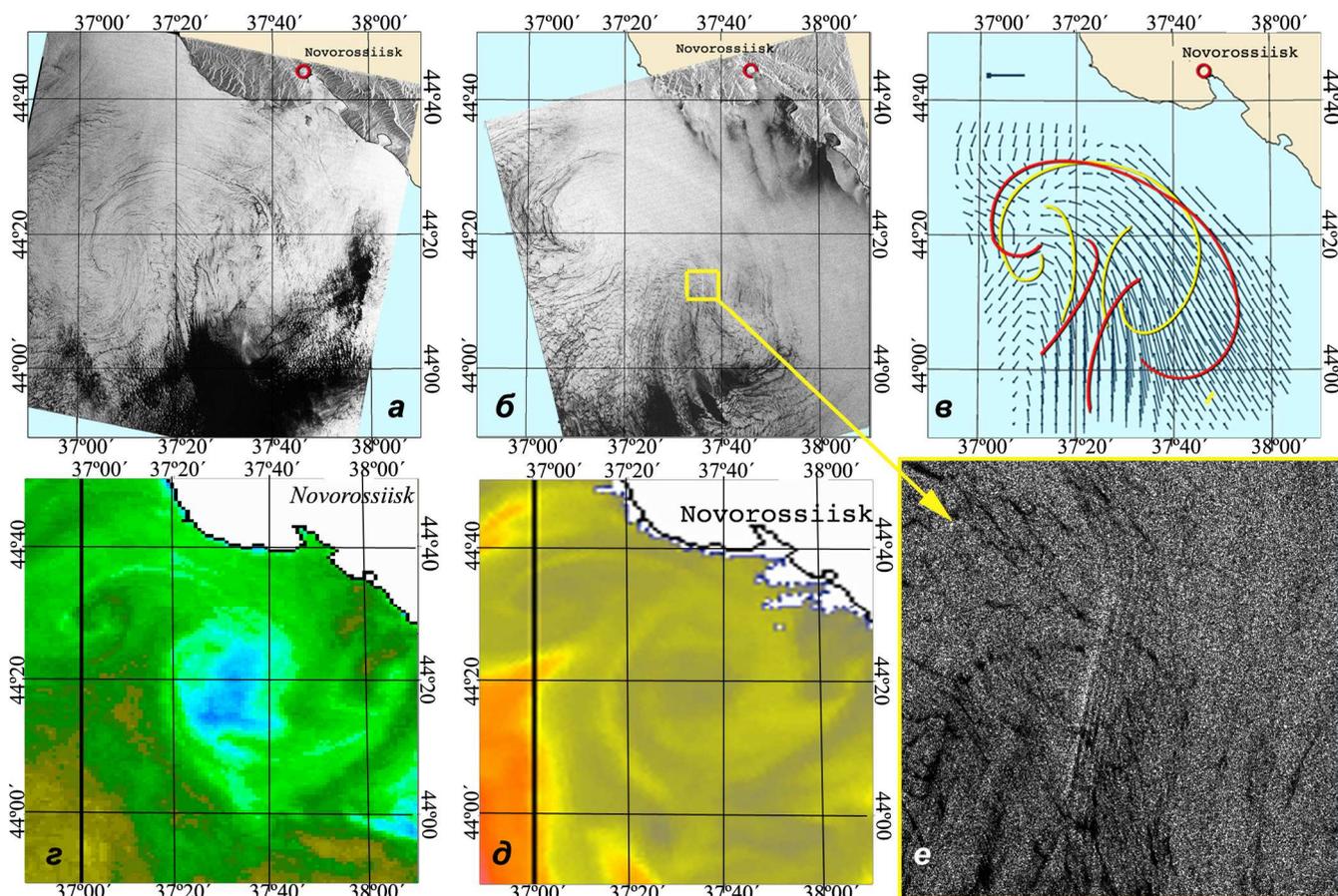


Рисунок 3 – Проявление вихревого диполя в данных спутникового зондирования морской поверхности:

**а)** ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 07:52 UTC;

**б)** ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 19:10 UTC;

**в)** карта–схема перемещения вихревого диполя;

**г)** поле ТМП, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 20.06.2006 03:20 UTC;

**д)** поле нормализованной яркости восходящего излучения, восстановленное из данных MODIS Aqua от 20.06.2006 11:10 UTC;

**е)** Поверхностные проявления морских внутренних волн неприливного происхождения в непосредственной близости от холодной части вихревого диполя

Грибовидные структуры, совпадающие по форме со структурами, выявленными на радиолокационных изображениях, отчетливо выделяются в полях поверхностной температуры и замутненности вод. В данном случае температурные контрасты оказались более размытыми и слабо выраженными. Можно видеть, что

разнородные изображения оказались сложным образом, но в достаточно сильной степени коррелированными.

Рассмотренный выше пример показывает, что комплексный анализ различных по своей природе спутниковых данных предоставляет возможность более глубокой и качественной интерпретации спутниковой информации и построения объективной картины сложного взаимодействия гидродинамических, метеорологических и биологических факторов, каждый из которых вносит свой вклад в общую картину.

Что касается изучения тонкой структуры течений, то до сих пор основное внимание было направлено на выявлению и исследованию тонкой вертикальной структуры течений. Экспериментальные сведения о пространственной структуре неоднородностей поля течений неволновой природы (мелкомасштабные фронты и вихри) с размерами порядка немногих сотен метров до сих пор достаточно скудны. Планируемые исследования с привлечением радиолокационных данных высокого пространственного разрешения призваны заполнить пробел в существующих представлениях о течениях на морском шельфе.

Можно утверждать, что уровень результатов, ожидаемых в ходе выполнения проекта, сопоставим с мировым и по ряду позиций будет опережать аналогичные зарубежные разработки.

**Фронты и фронтальные разделы** представляют собой один из важнейших элементов динамики вод, являясь, с одной стороны, границами между водами с различными гидрофизическими, гидробиологическими и др. характеристиками, а с другой - областями наиболее интенсивного перемешивания. Они обладают сложной структурой и высокой пространственно-временной изменчивостью. Несмотря на усиленное внимание к исследованию динамики вод и процессов водообмена, наиболее изученными экспериментально и описанными теоретически до настоящего времени остаются крупномасштабные океанические фронты в климатических фронтальных зонах. В то же время влияние огромного числа факторов и

разнообразие реальных условий определяют неизбежную фрагментарность сведений о процессах формирования, структуре и динамике мелкомасштабных фронтов во внутренних морях. Систематического исследования, направленного на решение этой проблемы, до сих пор не проводилось, и процессы мелкомасштабного фронтогенеза/фронтотолза, а также связанные с ними механизмы горизонтального и вертикального турбулентного обмена не учитываются в общепринятых ныне моделях прибрежной циркуляции.

Мелкомасштабные фронты (с характерным поперечным масштабом менее радиуса деформации Россби) достаточно сложны для исследования традиционными океанологическими методами в силу ряда причин, к которым следует отнести их малые размеры, нестационарность, спонтанность их появления и относительно непродолжительное время существования.

Нами накоплен достаточный экспериментальный материал, позволяющий утверждать, что привлечение к исследованию совокупности данных спутникового дистанционного зондирования, полученных различными сенсорами (радиолокация, скаттерометрия, видимый и ИК диапазоны) позволит локализовать районы наиболее частого зарождения мелкомасштабных фронтов во внутренних морях, восстановить сопутствующую целостную картину метеорологических и гидродинамических явлений и процессов, и сделать предположения о непосредственных механизмах фронтогенеза/фронтотолза. Привлечение к исследованию данных спутниковой радиолокации высокого разрешения (12,5 – 75 м) позволит исследовать многие структурные детали проявлений мелкомасштабных фронтов на морской поверхности и наблюдать за их развитием, эволюцией и перемещением.

Будут установлены частота повторяемости и пространственное распределение мелкомасштабных фронтов в тестовых районах, формы проявления и продолжительность их существования, типичные скорости перемещения, структура в толще вод, сезонная и межгодовая изменчивость. На основе дистанционных и контактных измерений будут произведены классификация фронтов по типу

изменчивости гидрофизических полей в окрестностях фронтального раздела и оценки пределов изменчивости основных характеристик отдельных фронтов.

Внимание будет уделено выявлению закономерностей возникновения различных поверхностных проявлений фронтов малого масштаба на морской поверхности: слики, пенные полосы, цветовые и яркостные контрасты и пр.

Важное место в проекте отводится исследованию неустойчивости фронтальных разделов и ее вклада в процесс структурообразования: выявлению структурных элементов (меандры, внутренние гравитационные волны, спиральные вихри и пр.), порожденных при развитии фронтов малого масштаба, их перемещения, обострения и разрушения и восстановлению связанных с ними характеристик изменчивости физических полей.

**Внутренние волны (ВВ)** играют важную роль в процессах горизонтального и вертикального обмена и перемешивания вод и в формировании термохалинной циркуляции водоемов. Существование внутренних волн в толще морских вод обусловлено устойчивой стратификацией, соответствующей увеличению плотности воды по направлению силы тяжести. Движения, создаваемые ВВ, пронизывают всю толщу вод и оказывают огромное влияние на динамические процессы, протекающие в Мировом океане и на его поверхности. Вследствие этого, исследованию внутренних волн, механизмов их возникновения, развития, распространения и разрушения уделяется большое внимание. Теории распространения внутренних волн в стратифицированной жидкости посвящены сотни публикаций, при этом их поток не обнаруживает тенденции к уменьшению до сих пор. Основные теоретические результаты изложены в работах [90-93]. Амплитуда ВВ может достигать в океане до ста метров, длины волн – многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, при определенных условиях ВВ могут проявляться на поверхности океана, модулируя ветровую рябь

своими орбитальными течениями. Движения, создаваемые внутренними волнами, пронизывают всю толщу океана и играют важную роль также и в процессах, происходящих на его поверхности.

Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на радиолокационных изображениях морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала, обусловленных модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра поверхностного волнения переменными течениями, создаваемыми в приповерхностном слое ВВ. Привлечение к исследованию ВВ в океане данных спутникового радиолокационного зондирования морской поверхности, обеспечивающих регулярный обзор акваторий с высоким пространственным разрешением независимо от освещения и облачного покрытия значительно расширило возможности получения информации об источниках и механизмах генерации, распространении и взаимодействии таких волн.

Несмотря на усиленное внимание к исследованию ВВ, наиболее изученными экспериментально и описанными теоретически остаются внутренние гравитационные волны в прибрежных акваториях океанов и приливных морей, возникающие при взаимодействии приливных течений с краем шельфа.

Экспериментальные исследования, как правило, проводятся на ограниченных акваториях и привязаны к местам устойчивой генерации приливных внутренних волн. В то же время, разнообразие условий в реальном океане, влияние огромного числа факторов как атмосферного, так и внутриокеанического происхождения, при большой сложности и стоимости натуральных измерений создают определенную фрагментарность сведений о процессах, приводящих к возбуждению внутренних гравитационных волн.

Сведения о ВВ во внутренних морях, таких, например, как Черное и Каспийское, практически отсутствуют. Характерной особенностью, общей для этих морей, является то, что они могут быть отнесены к классу бесприливных морей, т.к. колебания уровня воды в этих морях под влиянием приливов составляет менее 10

сантиметров. Соответственно, упомянутый выше механизм генерации ВВ приливными течениями здесь исключен. Однако зарождение внутренних волн в этих морях возможно при протекании активных динамических процессов, связанных с возникновением и релаксацией прибрежного апвеллинга, вихрями различных масштабов, сгонно-нагонными явлениями, осцилляциями гидрологических фронтов и пр.

Экспериментальные исследования внутренних волн в основном проводятся традиционными океанографическими средствами (например, с помощью сети распределенных датчиков), что обуславливает трудоемкость и дороговизну эксперимента, причем измерения, как правило, проводятся на ограниченных акваториях и привязаны к местам устойчивой генерации приливных внутренних волн.

Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на радиолокационных изображениях морской поверхности за счет перестройки спектра поверхностного волнения.

Методы восстановления пространственно-временных характеристик внутренних волн по их проявлениям на радиолокационных изображениях морской поверхности существенно расширяют возможности получения информации об источниках и механизмах генерации, распространении и взаимодействии таких волн. В прошедшее десятилетие дистанционные методы широко развивались в основном в приложении к изучению внутренних гравитационных волн в океане, генерация которых на материковом склоне связана с приливо-отливными течениями и внутренними приливами в шельфовой зоне [94-98].

Ряд приоритетных исследований по теории радиолокационного рассеяния на морской поверхности в присутствии поверхностных проявлений внутренних волн и по экспериментальному исследованию их нелинейных взаимодействий на основе радиолокационных данных был проведен в ИКИ РАН, их результаты отражены в

многочисленных публикациях в отечественных и зарубежных изданиях, а также в трудах международных конференций.

К сожалению, волны неприливногo происхождения к настоящему моменту изучены слабее. Существует ряд работ, посвященных натурным наблюдениям и численному моделированию процессов генерации и распространения короткопериодных внутренних волн в бесприливных морях. Подавляющая часть экспериментальных данных по внутренним волнам неприливногo происхождения получена с помощью контактных методов, когда прибор погружается в воду и дает сведения о том, что делается вокруг него [99,100].

#### ***2.1.4 Разработка общей методики проведения исследований***

Основным методом решения поставленных в рамках ПНИР научно-исследовательских задач является метод дистанционного зондирования поверхности океана, открывающий широкие возможности систематического получения необходимой информации с высоким пространственным разрешением в широкой полосе обзора, в масштабе времени, близком к реальному. В ходе работ по исполнению ПНИР будет специально заказываться спутниковая съемка акваторий тестовых районов.

Спутниковые радиолокационные изображения морской поверхности предоставляют уникальную возможность исследования гидродинамических процессов и явлений, позволяя систематически наблюдать их пространственную изменчивость с высоким разрешением (3-12 м) в широкой полосе обзора независимо от погодных условий, освещенности, времени суток и наличия облачности. Однородность диэлектрических свойств морской поверхности существенно облегчает анализ радиолокационных изображений и позволяет связать

интенсивность радиолокационного сигнала непосредственно с геометрическими параметрами возмущений поверхности океана

Основу исследования составят изображения морской поверхности очень высокого разрешения, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой космических аппаратов TerraSAR-X и RADARSAT-2 и ASAR Envisat. Физические и технические особенности эти сенсоров обеспечивают:

- возможность круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;
- возможность всепогодной съёмки, т.к. атмосфера практически прозрачна для используемого РСА микроволнового излучения;
- обзор больших акваторий независимо от времени суток и облачного покрытия с высоким пространственным разрешением (до 3 м) в относительно широкой полосе обзора

Для решения поставленных в проекте задач потребуется знание всей совокупности информации о сопутствующих процессах в океане и придном слое атмосферы: мезомасштабной динамике вод, наличии фронтальных зон и зон апвеллинга, полях температуры и цветения вод, полях приповерхностного ветра и поверхностного волнения.

Для уверенной интерпретации радиолокационных данных и восстановления более полной картины мезомасштабной динамики вод, наличия фронтальных зон и зон апвеллинга привлекаются оптические снимки (разрешения до 250 метров) и инфракрасные снимки (разрешение 1 км) сканирующих спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua (NASA, США). В оптических и ИК данных вихревые структуры визуализируются благодаря наличию контрастов в полях температуры, хлорофилла-а и взвешенных примесей. Данные получают в полосе обзора (ширина кадра) 3000 км с пространственным разрешением 0,25-1,1 км, повторяемость съёмки 3-6 часов.

Регулярный круглосуточный прием изображений с американских спутников серии NOAA (NOAA-12, -15, -16, -17) с разрешением 1,1 км при благоприятных погодных условиях обеспечивает получение карт температуры поверхности моря и оптических характеристик воды каждые 4 часа в течение суток.

Для данных оптических и ИК сенсоров развиты стандартные методики идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур, однако разрешающая способность изображений, получаемых при помощи сенсоров Aqua/Terra MODIS и NOAA AVHRR, позволяет изучать вихревые структуры с диаметрами порядка 20-30 км и более и только при отсутствии облачного покрова. В проекте также будут использоваться данные сканирующего радиометра Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) ИСЗ Landsat 7, обеспечивающего съемку морской поверхности в шести каналах с разрешением 30 м, в одном ИК канале – 60 м и одновременную панхроматическую съемку с разрешением 15 м при ширине полосы обзора для всех каналов 185 км. На снимках, полученных с помощью Landsat ETM+ мелкомасштабные вихри особенно хорошо проявляются в зоне солнечного блика.

Следует также отметить, что подавляющее число работ, посвященных дистанционным методам изучения вихревых структур, фронтов и поверхностных проявлений внутренних волн в океане и базируется лишь на данных радиолокации морской поверхности. Методики проведения исследований в рамках данного проекта включают в себя совместное использование разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности (радиолокация, скаттерометрия, спектрометрические оптического и инфракрасного диапазона).

Адекватная тематическая обработка и последующий совместный анализ всей совокупности доступных данных дистанционного зондирования морской поверхности позволяли проводить регулярные следующие регулярные наблюдения:

- за циркуляцией, динамикой ОЧТ, образованием, положением, перемещением ПАВ и других вихревых структур, в основном, в прибрежной зоне морей (по данным ИСЗ, *Aqua*, *Terra* и *NOAA*, *Envisat*, *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*);
- за распространением речного стока в прибрежной зоне морей, с которым в прибрежную зону поступает большое количество взвеси, бытовых и промышленных отходов и загрязнений (по данным ИСЗ, *Aqua* и *Terra*);
- за загрязнениями морской поверхности нефтью и нефтепродуктами и прочими антропогенными загрязнениями (по данным ИСЗ *Envisat*, *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*);
- за появлением биогенных пленок поверхностно-активных веществ, вследствие цветения фитопланктона по данным *Envisat*, *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*);
- за явлениями, проявляющимися на морской поверхности в поле цвета или температуры моря и влияющими на перенос взвеси и загрязнений, например, за температурными фронтами и апвеллингами (по данным ИСЗ *Монитор-Э*, *Aqua*, *Terra* и *NOAA*);
- за распределением хлорофилла-а (по данным ИСЗ *Aqua*);

С этой точки зрения, ожидаемые результаты ПНИР, базирующиеся на комплексном подходе к изучению гидродинамических процессов, с учетом всего многообразия факторов, определяющих их возникновение и развитие, будут не только соответствовать мировому уровню, но в чем-то и опережать его.

## 2.2. Подготовка уточненного Договора

В ходе исполнения первого этапа ПНИР был подготовлен уточненный Договор о научно-техническом сотрудничестве между ИКИ РАН и Университетом г. Гамбург, определяющий предмет и объем общей исследовательской программы партнеров,

сроки ее выполнения, распределение между участниками выполняемых работ, условия взаимодействия, сроки проведения рабочих встреч, экспедиционных работ, состав участников и аппаратура подспутниковых измерений. Полностью договор представлен в *Приложении 1* к данному отчету.

### **2.3. Проведение патентных исследований**

В ходе исполнения работ по первому этапу ПНИР было проведено патентное исследование с целью определения уровня техники и методологии в области спутниковых радиолокационных систем высокого разрешения для исследования морей и океанов. Задачей поиска является отбор и анализ патентов на изобретения и полезные модели, относящихся к приборам и методам спутниковых радиолокационных систем высокого разрешения для исследования морей и океанов.

Основным направлениям развития радиолокационных средств дистанционного зондирования океана являются повышение точности и надежности получаемых данных, улучшения их пространственного разрешения, увеличение охвата и частоты обзора акваторий. Немаловажной проблемой также является высокая стоимость подобных средств. Диапазон предлагаемых решений в корпусе отобранных для анализа патентов очень широк: от модификаций в системе приема/передачи сигнала «классических» РСА до сложных многокомпонентных интерферометрических систем.

В качестве примера модификации «классического» РСА можно привести технологию уменьшения размера антенны или увеличения полосы обзора без наращивания неопределенностей в системе обработки принимаемого РСА сигнала, предложенную в патенте США №7348917 «Технология радара с синтезированной мультиапертурой». Радиолокационный импульс передается через регулярные интервалы времени, но не по всей ширине диаграммы направленности антенны, а

только по ее части. Отраженный сигнал затем интерполируется на полную ширину диаграммы.

Существенное число патентов описывают бистатические системы РСА с отдельными передающим и приемным блоками, которые позволяют передавать и принимать радиолокационные сигналы одновременно. С целью максимизации амплитуды принимаемого сигнала предлагается, например, (патент США № 6870500 «РСА бокового обзора») разделить апертуру приемной антенны на несколько субапертур и организовать специальным образом сдвиг фаз принимаемых субапертурами отраженных сигналов, а затем суммировать их для получения результирующего сигнала. Многоканальная радарная система (патент США №7940376 «Многоканальная радарная система детектирования движущихся объектов и метод») предполагает наличие одной передающей и нескольких приемных антенн с синтезированными апертурами. Разработаны специальные пространственно-временные адаптивные алгоритмы обработки сигналов с целью лучшей компенсации нестыковок каналов и большего подавления мешающих отражений и помех передающего сигнала. В бистатической системе с движущимися относительно друг друга передающей и приемной антеннами (патент США №6388606 «РСА самолетного или спутникового базирования») предлагается использовать разные диаграммы направленности – широкую для передающей и узкую для принимающей антенн. В данной системе предлагаются и другие методы подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенны и преодоления неоднозначности определения точки отражения сигнала.

Изобретения интерферометрических систем также составляют большую долю патентов в рассматриваемой области. Специально ориентированной на измерение параметров морских течений и топографии поверхности заявлена система патента США №6264143 («Устройство радиолокационной интерферометрии»). В нее входят по крайней мере один спутник-излучатель сигнала и несколько спутников-приемников. Последние должны быть точно синхронизированы и их орбиты

должны иметь одинаковый эксцентриситет, отличный от эксцентриситета орбиты спутника-излучателя. Система дифференциальной интерферометрии для наблюдения за высокоскоростными поверхностными волнами, например, сейсмическими, в т.ч. на морской поверхности, предложена в патенте США №6911931 «Использование динамического интерферометрического радара с синтезированной апертурой для регистрации высокоскоростных поверхностных волн». Это система также предполагает наличие, как минимум, одного спутника-излучателя и нескольких спутников-приемников сигнала, не накладывая на них, однако, жестких ограничений по конфигурации.

Некоторые из предлагаемых систем привлекают, в дополнение к спутниковой, информацию из других источников, как правило, наземных. В частности, патент США №6130644 «Метод и устройство для геодезической съемки и/или обзора земной поверхности спутниковыми средствами» описывает метод построения РСА-интерферограмм с использованием сигналов и со спутника, и с наземной антенны.

Данные проведенного патентного исследования показывают, что научные исследования и технические разработки в мире в данном направлении представляют значительный интерес. Полученные в результате патентного поиска материалы характеризуют уровень техники и методологии в области спутниковых радиолокационных систем высокого разрешения для исследования морей и океанов. Они свидетельствуют о большом потенциале такого типа разработок. Это подтверждает, что проводимые ПНИР по теме «Исследование гидродинамических процессов по спутниковым радиолокационным изображениям высокого пространственного разрешения с участием научно-исследовательского коллектива Университета г. Гамбург, Германия» являются высоко перспективными и не обеспечиваются существующими известными в настоящее время патентными материалами. Отчет о проведенных патентных исследованиях представлен в **Приложении 2** к данному отчету.

## **2.4. Анализ научных публикаций по исследованию гидродинамических процессов в РФ и за рубежом на основе спутниковых данных**

Исследованию гидродинамических процессов в океане на основе данных дистанционного зондирования уделяется большое внимание во всем мире. Бурное развитие этих исследований в течение последних лет было в значительной степени стимулировано совершенствованием сенсоров и методов спутникового дистанционного зондирования океана, а также относительной спутниковых данных.

В настоящее время радиолокационное (РЛ) зондирование в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне является одним из основных методов дистанционного исследования, как океанических процессов, так и процессов взаимодействия океана и атмосферы. С точки зрения получения океанологической информации о мгновенном состоянии океана радиолокационная съемка океана из космоса предоставляет следующие преимущества:

- возможность круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;
- возможность всепогодной съёмки, т.к. атмосфера практически прозрачна для используемого в радиолокации микроволнового излучения;
- диэлектрические свойства воды в микроволновом диапазоне однородны, что позволяет считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений и тем самым облегчает интерпретацию снимков;

Можно сказать, что уникальным свойством радиолокационной съемки по сравнению с оптической является возможность получать изображение с высоким пространственным разрешением (вплоть до единиц метров) в широкой полосе обзора независимо от естественной освещенности (времени суток и года) и облачного покрова.

### ***2.4.1 Основные сведения о радиолокаторах, используемых для наблюдения океана***

Активное дистанционное зондирование земной поверхности основано на измерении вариаций рассеянного излучения. При использовании в дистанционном зондировании океана радиолокационной станции (РЛС) – это может быть установленный на радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования или установленная на самолете радиолокационная станция бокового обзора (РЛСБО) – информация о параметрах подстилающей поверхности заключена в функции отражения, которая наблюдается в виде отраженной от взволнованной морской поверхности электромагнитной волны в зоне приемной антенны. Функция отражения определяется не только свойствами самой поверхности, но и условиями ее формирования, т.е. системой испускаемых и принимаемых сигналов. РЛ-образ морской поверхности зависит от диапазона зондирования, поляризации излучения и угла падения зондирующего сигнала.

Излучающее устройство радиолокатора испускает электромагнитную волну. Ее характеристиками являются: длина  $\lambda$ ; частота – величина  $f = C/\lambda$ , где  $C$  - скорость распространения электромагнитных волн в среде (в вакууме  $3 \cdot 10^8$  м/с); волновой вектор, указывающий направление распространения волны, а также поляризация электромагнитной волны. Последнее свойство очень важно, поскольку от ориентации плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны.

Для изучения океана используются радиолокаторы с длинами волн от 1,11 см (частота  $f=27$  ГГц) до 30 см (частота  $f=1$  ГГц). Обычно подобные радиолокаторы работают в импульсном режиме, хотя иногда применяют и непрерывное излучение. В таблице 1 приведены традиционные обозначения частотных диапазонов. Эти

обозначения сложились на Западе в ходе Второй мировой войны. В настоящее время они закреплены в США стандартом IEEE, а также международным стандартом ITU

Таблица 1. Частотные диапазоны РЛС

Диапазон	Частоты	Длина волны	Применение
P	< 300 МГц	> 1 м	Использовался в США на первых самолетах-лабораториях NASA
L	1 — 2 ГГц	15 — 30 см	РСА на борту ИСЗ <i>SEASAT</i> (США) и <i>JERS-1</i> (Япония), сенсор SIR-C/X-SAR на борту космического челнока <i>Endeavor</i> (США)
S	2 — 4 ГГц	7,5 — 15 см	РСА ИСЗ «Алмаз-1»
C	4 — 8 ГГц	3,75 — 7,5 см	РСА на борту европейских спутников <i>ERS-1,2</i> и <i>Envisat</i> и канадских спутников <i>RADARSAT-1,2</i>
X	8 — 12 ГГц	2,5 — 3,75 см	РСА на борту германского спутника <i>TerraSAR-X</i>
K <sub>u</sub>	12 — 18 ГГц	1,67 — 2,5 см	Ледовая разведка, картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия. РЛСБО «Нить» и «Торос» на борту самолетов-лабораторий ТУ-134 Сх и Ан-24

В практике радиолокационного зондирования Земли используются зондирующие сигналы с различной поляризацией (горизонтальной или вертикальной). Плоскость, проходящая через направление распространения электромагнитной волны и направление вектора электрического поля, называется плоскостью поляризации. Если плоскость поляризации в данной точке пространства сохраняет фиксированное положение, то волну называют плоско или линейно поляризованной. Поляризация излучения определяется ориентацией вектора

электрического поля  $E$  в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор электрического поля  $E_{г}$  параллелен подстилающей поверхности. При вертикальной поляризации вектор излучения  $E_{в}$  направлен под углом падения к местной вертикали (см. рисунок. 4).

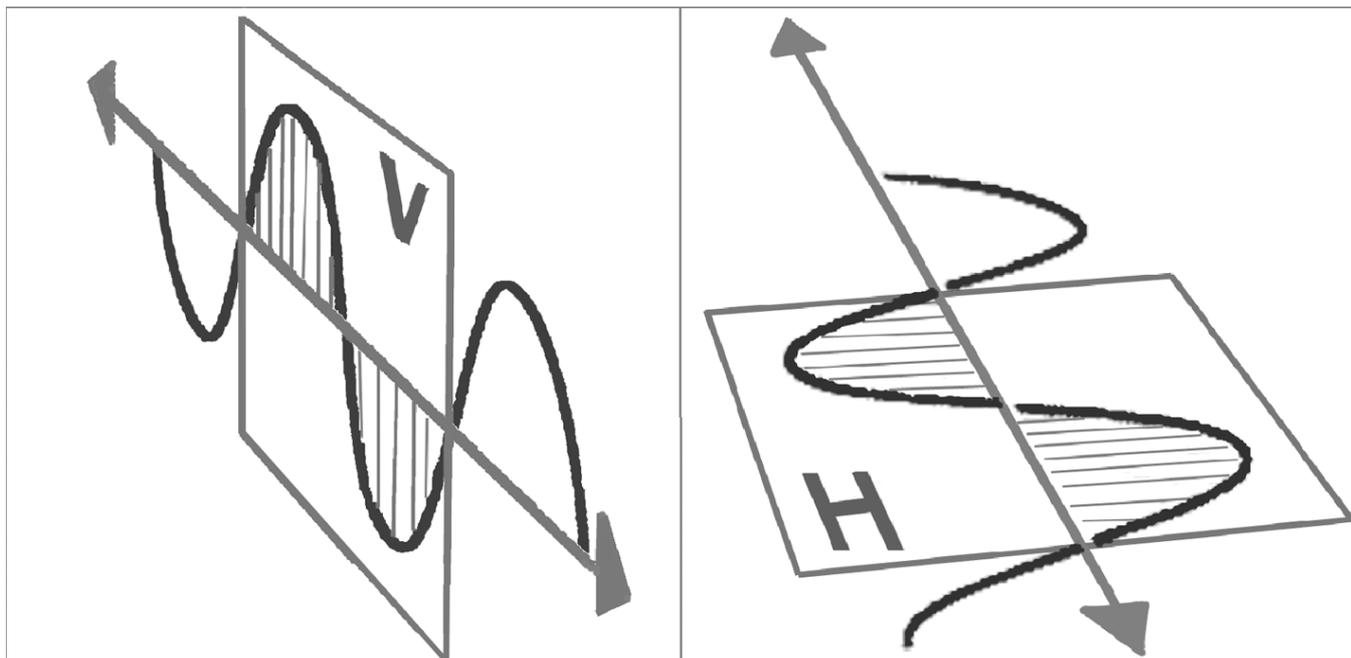


Рисунок 4 – Вектор электрического поля при вертикальной (ВВ) и горизонтальной (ГГ) поляризациях зондирующего сигнала

В зависимости от конструктивных особенностей и режима работы РЛС приемо-передающие системы могут осуществлять:

- излучение и прием на вертикальной (ВВ) поляризации;
- излучение и прием на горизонтальной (ГГ) поляризации;
- излучение и прием на перекрестных поляризациях (ВГ и ГВ).

Мощность обратно-рассеянного сигнала, попадающего в приемную антенну РЛС, зависит от поляризации излучения и от взаимного направления поляризаций при излучении и приеме. В общем случае, коэффициент рассеяния водной

поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестных поляризациях.

- ВВ-поляризация применяется для изучения широкого класса процессов и явлений, проявляющихся на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения.
- ГГ-поляризация, будучи менее чувствительной к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, широко применяется для наблюдения морских льдов и разделения сигнатур ледового покрова и открытой воды
- Поскольку интенсивность рассеяния морской поверхности существенно понижается при использовании излучения и приема на перекрестных поляризациях (ВГ и ГВ), такие режимы используются для выделения на морской поверхности объектов, обуславливающих многократное рассеяние, таких, например, как корабли и деформации ледового покрова (торосы, трещины, расколотый лед).

Влияние выбора поляризации иллюстрируется рисунком 5, где представлены изображения, полученные одновременно, но при разных поляризациях отраженного сигнала. Радиолокационное изображение (РЛИ), приведенное на рисунке 5а, получено при ВВ поляризации, на нем отчетливо выделяются поверхностные проявления атмосферных явлений, в частности, внутренних волн в атмосфере. Суда на их фоне выделить довольно сложно, особенно при автоматическом детектировании. РЛИ, представленное на рисунке 5б, получено на перекрестной ВГ поляризации; на нем полностью отсутствуют поверхностные проявления океанических и атмосферных процессов, зато отчетливо выделяются радиолокационные образы судов.

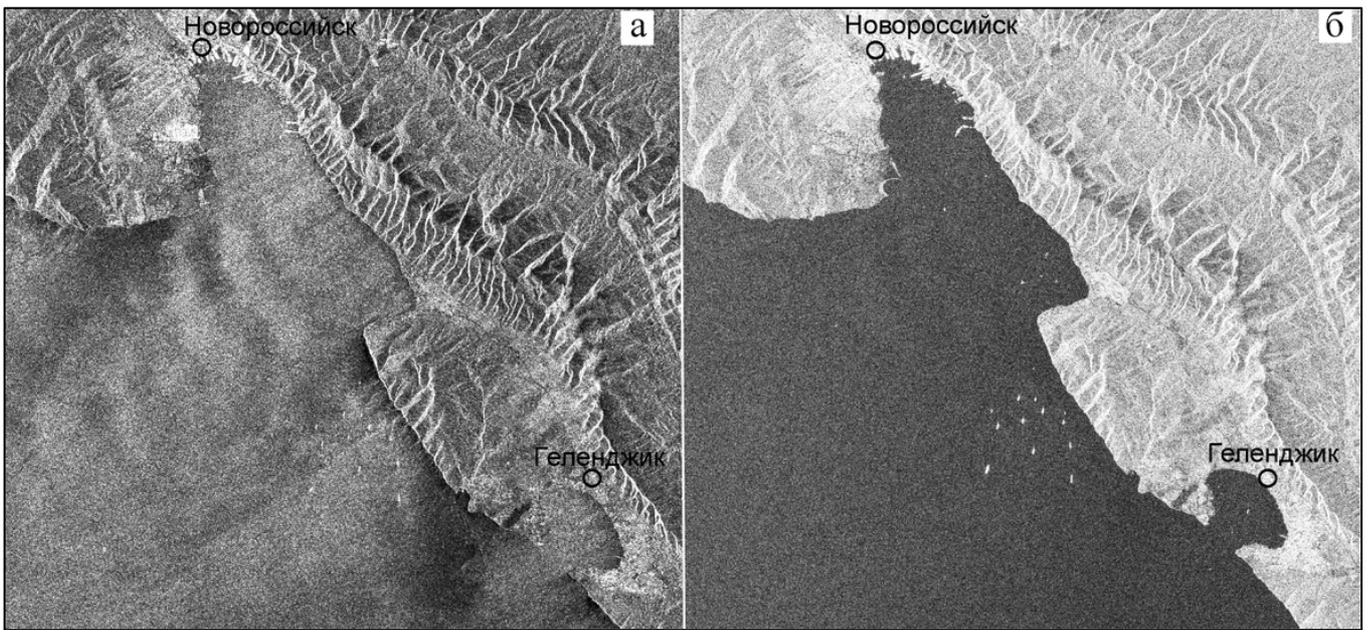


Рисунок 5 – Фрагмент изображения Envisat ASAR от 27.08.2005, 19:13 UTC.

а) ВВ -поляризация; б) ВГ-поляризация

Спутниковые радиолокаторы первого поколения обладали возможностью съемки на одной фиксированной поляризации зондирующего сигнала, либо горизонтальной (ГГ) - РСА спутников «Алмаз-1», *Radarsat-1*, *Seasat*, *JERS-1*, либо вертикальной - РСА спутников *ERS-1,2*.

Спутниковые радиолокаторы нового поколения, установленные на спутниках *Envisat*, *Radarsat-2* и *TerraSAR-X* обладают возможностью производить съемку в различных режимах: ВВ, ГГ, ВВ/ГГ, ВВ/ВГ, ГГ/ГВ.

### 2.4.2 Геометрия радиолокационной съемки

**Радиолокаторы бокового обзора.** На самолетах обычно устанавливают радиолокационные станции бокового обзора. Антенна такой станции вытягивается вдоль фюзеляжа самолета и обеспечивает боковое "видение". Совместим ось  $x$  с направлением движения самолета, а ось  $y$  направим перпендикулярно оси  $x$  (в соответствии с рисунком б).

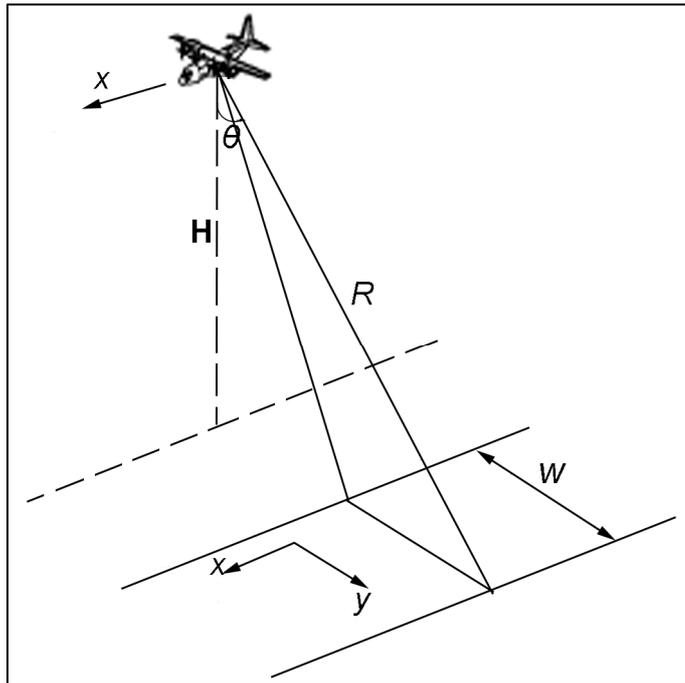


Рисунок б – Геометрия радиолокационной съемки подстилающей поверхности при помощи РЛСБО, установленной на самолете-лаборатории.  $H$ -высота полета,  $W$ -ширина полосы обзора,  $\theta$  - угол падения, отсчитываемый от вертикали

Разрешение РЛСБО в боковом направлении (по наклонной дальности)

определяется длительностью импульса  $\tau$ :  $\Delta y = \frac{c\tau}{2\sin\theta}$ , где  $c$  - скорость света, а  $\theta$  - угол зондирования. При типичной длине импульса  $\tau=0,1$  мкс и высоких углах зондирования разрешение по наклонной дальности составит примерно 15 м.

Разрешение же в продольном направлении, т.е. в направлении полета (ось  $x$ ), зависит от угловой (азимутальной) ширины диаграммы направленности  $\Delta\varphi$ , которая может быть оценена как отношение длины волны  $\lambda$  к длине антенны  $L_a$ :  $\Delta\varphi \sim \lambda / L_a$ . Тогда разрешение в азимутальном направлении определяется следующим образом:

$$\Delta x = \frac{H \Delta\varphi}{\cos\theta}, \text{ где } H - \text{высота полета.}$$

В частности, при длине волны  $\lambda=2$  см и длине антенны  $L_a:=6$  м (для самолетной антенны это довольно большая длина) и номинальной высоте полета 2 км имеем  $\Delta\varphi \approx 1/300$  рад, элемент разрешения  $\Delta x$  на расстоянии  $y=10$  км от оси полета составит  $\Delta x = y \cdot \Delta\varphi / 2 = 15$  м. Таким образом, в рассмотренном примере элемент разрешения ("пиксел") на плоскости  $x, y$  имеет размер 15 м x 15 м.

При установке РЛСБО на спутнике размеры элемента разрешения в продольном направлении (ось  $x$ ) заметно возрастают по причине увеличения наклонной дальности  $R$ , которая составляет, в зависимости от высоты орбиты, 400-1000 км. В качестве примера можно указать, что РЛСБО, установленная на спутнике "Океан 0", имела разрешение 1300 x 2000 метров.

**Радиолокаторы с синтезированной апертурой.** Разрешение  $\Delta x$  в продольном направлении можно улучшить, если использовать технику "синтезирования апертуры". В этом методе производится специальная когерентная (т.е. с сохранением фазы) обработка рассеянных сигналов в течение некоторого времени  $\Delta t$ , за которое самолет или спутник, движущийся со скоростью  $v$ , пролетает расстояние  $v\Delta t$ . Расстояние  $\Delta L_{\text{синт}} = v\Delta t$  играет роль длины *синтезированной* антенны и может в сотни и тысячи раз превышать физические размеры бортовой антенны  $L_a$ .

При  $\Delta L_{\text{синт}}=5$  км, длине волны 5 см и наклонной дальности  $R=1000$  км разрешение  $\Delta x$ , оцененное при помощи введенной выше формулы, составит 5 м. Весьма высокое разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой (сокращенно их называют РСА) сочетается с их способностью работать в условиях

облачности и в темное время суток. В этом заключается их главное преимущество перед приборами оптического и инфракрасного (ИК) диапазонов.

Краткие сведения о спутниковых РСА, как первого поколения, так и функционирующих на орбите в настоящее время, приведены в таблице 2. Более полная информация о спутниковых радиолокаторах приведена в работах [49,101].

Таблица 2. Краткие сведения о спутниковых радиолокаторах с синтезированной апертурой

ИСЗ	SEASA Т	ERS- 1/2	«Алмаз»	JERS-1	RADARSAT- 1	Envisat	RADARSA Т-2	TerraSAR-X
Страна	США	ЕС	СССР	Япония	Канада	Европа	Канада	Германия
Год вывода на орбиту	1978	1991/ 1995	1991	1992	1995	2002	2007	2008
Диапазон	L	C	S	L	C	C	C	X
Частота зондирующего сигнала (ГГц)	1.275	5.25	3.1	1.275	5.3	5.7	5.3	9.65
Длина волны зондирующего сигнала (см)	23.5	5.66	9.6	23.5	5.66	5.66	5.66	3.13
Поляризация	ГГ	ВВ	ГГ	ГГ	ГГ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ
Угол падения (градусы)	20	23	17-62	39	20-50	15-45	20-60	20-55
Ширина полосы обзора по наземной дальности (км)	100	100	30-60	75	50-500	56-400	18-500	10/30/100
Простр. разрешение (м)	25	25	25	18	8-100	25-75	3 -100	1/3/16

В настоящее время PCA установлены на европейском спутнике *Envisat*, на канадских спутниках *RADARSAT 1,2*. а также на немецких спутниках *TerraSAR-X* и *TanDEM-X*. Наиболее доступными и пригодными для целей регулярного мониторинга различных акваторий на сегодняшний день являются данные радиолокаторов, установленных на европейских спутниках *Envisat* и *ERS-2*.

Спутники *RADARSAT-2* и *Terra-SAR-X* выведены на орбиту сравнительно недавно, в 2007 г., и их данные распространялись до сих пор только на коммерческой основе. Вследствие этого практически отсутствуют публикации, как в российских, так и зарубежных журналах, посвященные использованию данных радиолокаторов, установленных на этих спутниках, для исследований гидродинамических процессов. Канадское и немецкое космические агентства впервые с момента запуска этих спутников предоставили ученым разных стран, в частности научному коллективу ПНИР, бесплатно заказывать и получать данные одновременно с двух спутников. Это позволит решать абсолютно новые задачи, в частности, открывается возможность решения задачи восстановления течений с большой точностью, поскольку разница во времени между пролетами этих двух спутников составляет несколько минут.

#### **2.4.3 Радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR космического аппарата *Envisat***

1 марта 2002 г. Европейским космическим агентством в целях дальнейшего развития программы исследований земной поверхности, начатой спутниками *ERS*, был осуществлен запуск космического аппарата *Envisat (Environmental Satellite)*. Была избрана солнечно-синхронная орбита со средней высотой 790 км, наклоном  $98,55^\circ$  и 35-дневным циклом точной повторяемости пролетов по своим трассам. В соответствии с программой миссии глобального мониторинга в целях изучения

окружающей среды и безопасности (*GMES – Global Monitoring for Environment and Security*) на борту спутника установлены различные приборы, работающие в широком диапазоне волн электромагнитного спектра - от микроволнового до ультрафиолетового - и предназначенные для мониторинга Мирового океана, льдов, суши и атмосферы.

Улучшенный радиолокатор с синтезированной апертурой *ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)*, установленный на спутнике *Envisat* использует фазированную антенную решетку с углом падения лучей от 15 до 45 градусов. Съемка выполняется в *C*-диапазоне длин волн (5,6 см) в пяти различных режимах поляризации (ВВ, ГГ, ВВ/ГГ, ГВ/ГГ, ВГ/ВВ). Полученные этим сенсором радиолокационные данные используются для мониторинга нефтяных пятен и льда на поверхности моря, определения местоположения судов, исследования различных океанских явлений (течений, фронтов, вихрей, внутренних волн), процессов в атмосфере над океаном (внутренние гравитационные волны, конвекция, атмосферные фронты и вихри) и других целей. Конструкция радиолокатора предусматривает возможность проведения съемок в различной по ширине полосе обзора и с различным пространственным разрешением, позволяя пользователю выбрать режим работы, соответствующий характеру решаемых задач. Характеристики основных режимов работы сенсора *ASAR ИСЗ Envisat* приведены в таблице 3.

***Съемка в широкой полосе обзора Wide Swath Mode (WS)*** предоставляет возможности проведения съемки в полосе обзора шириной 400 км с пространственным разрешением 75 x 75 м на одной из выбранных поляризаций зондирующего сигнала (ВВ или ГГ). Этот режим работы позволяет получать радиолокационные изображения одного и того же интересующего района подстилающей поверхности с периодом повторных наблюдений от 1 дня в полярных регионах до 1 недели на экваторе. Геометрия радиолокационной съемки в режиме широкой полосы обзора представлена на рисунке 7.

Таблица 3. Характеристики режимов работы сенсора ASAR IC3 Envisat

Режим	Ширина полосы обзора (км)	Разрешение (м)	Поляризация
Стандартный (Image Mode)	от 56 до 100	30	ВВ, ГГ
Поляризационный (Alternating Polarisation Mode)	от 56 до 100	30	ГГ/ВВ, ГГ/ГВ, ВВ/ВГ
Широкополосный (Wide Swath Mode)	400	150	ВВ, ГГ
Глобального мониторинга (Global Monitoring Mode)	400	1000	ВВ, ГГ
Спектральный (Wave Mode)	5	30	ВВ, ГГ

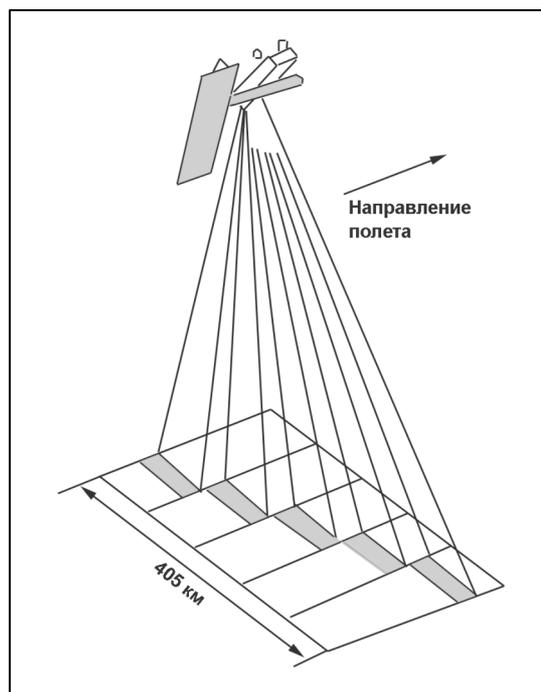


Рисунок 7 – Получение изображения сенсора Envisat в широкой полосе обзора

### ***Режим двухполяризационной съемки (Alternating Polarisation Mode)***

позволяет получать одновременные пары изображений подстилающей поверхности, сформированные при различных сочетаниях поляризаций испущенного и принятого радиолокационного сигнала, а именно ВВ/ГГ, ГГ/ГВ и ВВ/ГВ в полосе обзора 100 км и с пространственным разрешением до 30 м. Геометрия радиолокационной съемки в режиме двух поляризаций представлена на рисунке 8.

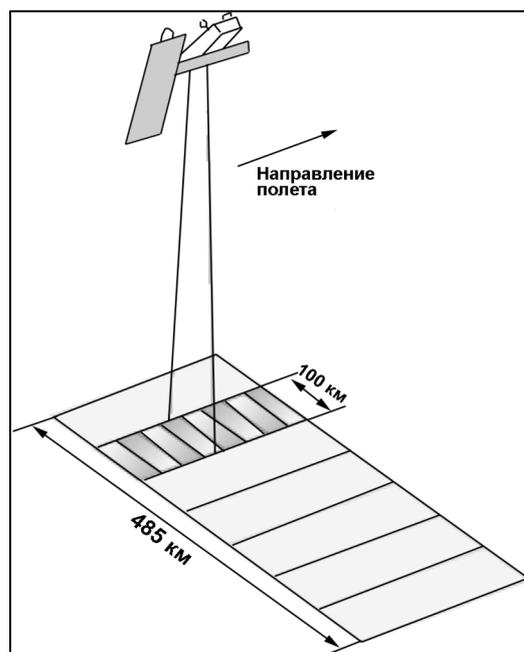


Рисунок 8 – Получение изображения сенсора Envisat при двух поляризациях зондирующего сигнала

При проведении **съемки в узкой полосе обзора (Image Mode)** фазированная антенная решетка путем изменения угла испускания зондирующего сигнала, позволяет выбрать любую из 7 полос и получить изображения с высоким пространственным разрешением (30x30м) на одной из выбранных поляризаций (ВВ) или (ГГ) размером от 56 км (7 полоса ) до 100 км (1 полоса). Геометрия радиолокационной съемки в режиме узкой полосы обзора представлена на рисунке 9, а основные геометрические характеристики съемки для различных полос сведены в таблицу 4.

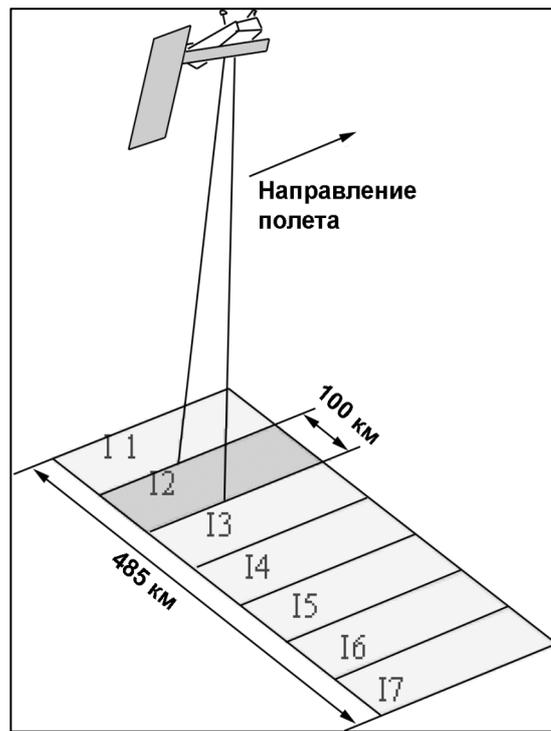


Рисунок 9 – Получение изображения сенсора Envisat в режиме узкой полосы обзора

Таблица 4. Геометрические характеристики изображений с высоким разрешением

Номер полосы	Ширина полосы (км)	Расстояние от воображаемой наземной линии орбиты (км)	Диапазон углов наблюдения (градусы)
I1	105	187 - 292	15,0-22,9
I2	105	242 - 347	19,2-26,7
I3	82	337 - 419	26,0-31,4
I4	88	412 - 500	31,0-36,3
I5	64	490 - 555	35,8-39,4
I6	70	550 - 620	39,1-42,8
I7	56	615 - 671	42,5-45,2

#### **2.4.4 Радиолокатор с синтезированной апертурой SAR космического аппарата RADARSAT-2**

В декабре 2007 г. с космодрома Байконур был запущен космический аппарат *RADARSAT-2*, разработанный Канадским космическим агентством и компанией *MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.)*. *RADARSAT-2* также функционирует на солнечно-синхронной орбите идентичной орбите аппарата *RADARSAT-1* и оснащен РСА, обладающим возможностями изменения ширины полосы съемки и пространственного разрешения. Съемка земной поверхности проводится в С-диапазоне длин волн (5,6 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV) в диапазоне съемочных углов от 10° до 60°. Расчетный срок пребывания на орбите – не менее 7 лет. Максимальное пространственное разрешение в режиме *Ultra-Fine* составит 3 метра в полосе съемки 20 км. Общий вид ИСЗ *RADARSAT-2* представлен на рисунке 7, а основные геометрические характеристики съемки для различных режимов работы сведены в таблицу 5.

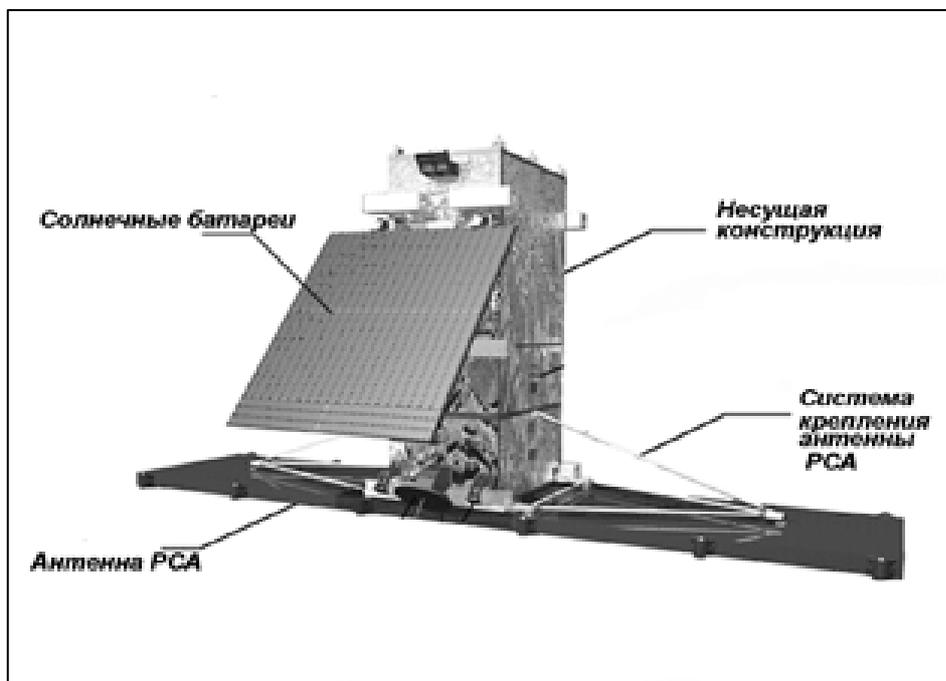


Рисунок 10 – Общий вид ИСЗ RADARSAT-2

Таблица 5. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры космического аппарата RADARSAT-2

Режим	Номинальное пространственное разрешение (для продукта Single Look Complex — SLC; дальность x азимут), м	Ширина полосы съемки, км	Диапазон углов съемки, град.	Поляризация
Сверхвысокого разрешения (Ultra-Fine)	1,6 x 2,8	20	20–59	Одинарная (по выбору — НН или VV или HV или VH)
Расширенный сверхвысокого разрешения (Wide Ultra-Fine)	1,6 x 2,8	50	29–50	
Высокого разрешения с некогерентным накоплением (Multi-Look Fine)	3,1 x 4,6	50	30–50	
Расширенный высокого разрешения с некогерентным накоплением (Wide Multi-Look Fine)	3,1 x 4,6	50	29–50	
Высокого разрешения (Fine)	5,2 x 7,7	50	30–50	
Расширенный высокого разрешения (Wide Fine)	5,2 x 7,7	150	20–40	Одинарная (по выбору — НН или VV или HV или VH); Двойная (по выбору — НН/HV или VV/VH)
Стандартный (Standard)	9,0 (или 13,5) x 7,7	100	20–52	
Широкозахватный (Wide)	13,5 x 7,7	150	20–45	
Узкий низкого разрешения (ScanSAR Narrow)	79,9–37,7 x 60	300	20–46	
Широкий низкого разрешения (ScanSAR Wide)	160,0–72,1 x 100	500	20–49	НН
Расширенный высокого разрешения (Extended High)	13,5 x 7,7	75	49–60	
Расширенный низкого разрешения (Extended Low)	9,0 x 7,7	170	10–23	

## Продолжение таблицы 5

Высокого разрешения с полной поляризацией (Fine Quad-pol)	5,2 x 7,6	25	18–49	Полная (HH+VV+HV+V H)
Расширенный высокого разрешения с полной поляризацией (Wide Fine Quad-pol)	5,2 x 7,6	50	18–42	
Стандартный с полной поляризацией (Standard Quad-pol)	9,0 (или 13,5) x 7,6	25	18–49	
Расширенный стандартный с полной поляризацией (Wide Standard Quad-pol)	9,0 (или 13,5) x 7,6	50	18–42	

### 2.4.5 Радиолокатор с синтезированной апертурой SAR ИСЗ TerraSAR-X

Коммерческий спутник TerraSAR-X, разработанный немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией EADS Astrium GmbH, Германия, был запущен 15 июня 2007 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Днепр» и выведен на околополярную орбиту со средней высотой 514 км и наклоном 94,44°. Период точной повторяемости орбит составляет 11 суток. РСА, установленный на спутнике TerraSAR-X, позволяет изменять направление радиолокационного луча в диапазоне от 20° до 60° градусов, причем это достигается не механическим движением антенны, а сложением множества отдельных лучей. Съемка осуществляется в X-диапазоне при частоте зондирующего сигнала 9,65 ГГц и длине волны, соответственно, 3 см в следующих режимах:

- прожекторный с разрешением 1-2 м, размером кадра 10×10 км и шириной полосы обзора от 463 до 622 км;

- маршрутный с разрешением 3 метра, размером кадра 30×10 км и шириной полосы обзора от 287 до 622 км;
- обзорный с разрешением 16 метров, размером кадра 100×150 км и шириной полосы обзора от 287 до 577 км.

Общий вид ИСЗ TerraSAR-X представлен на рисунке 11, а основные геометрические характеристики съемки для различных режимов работы сведены в таблицу.

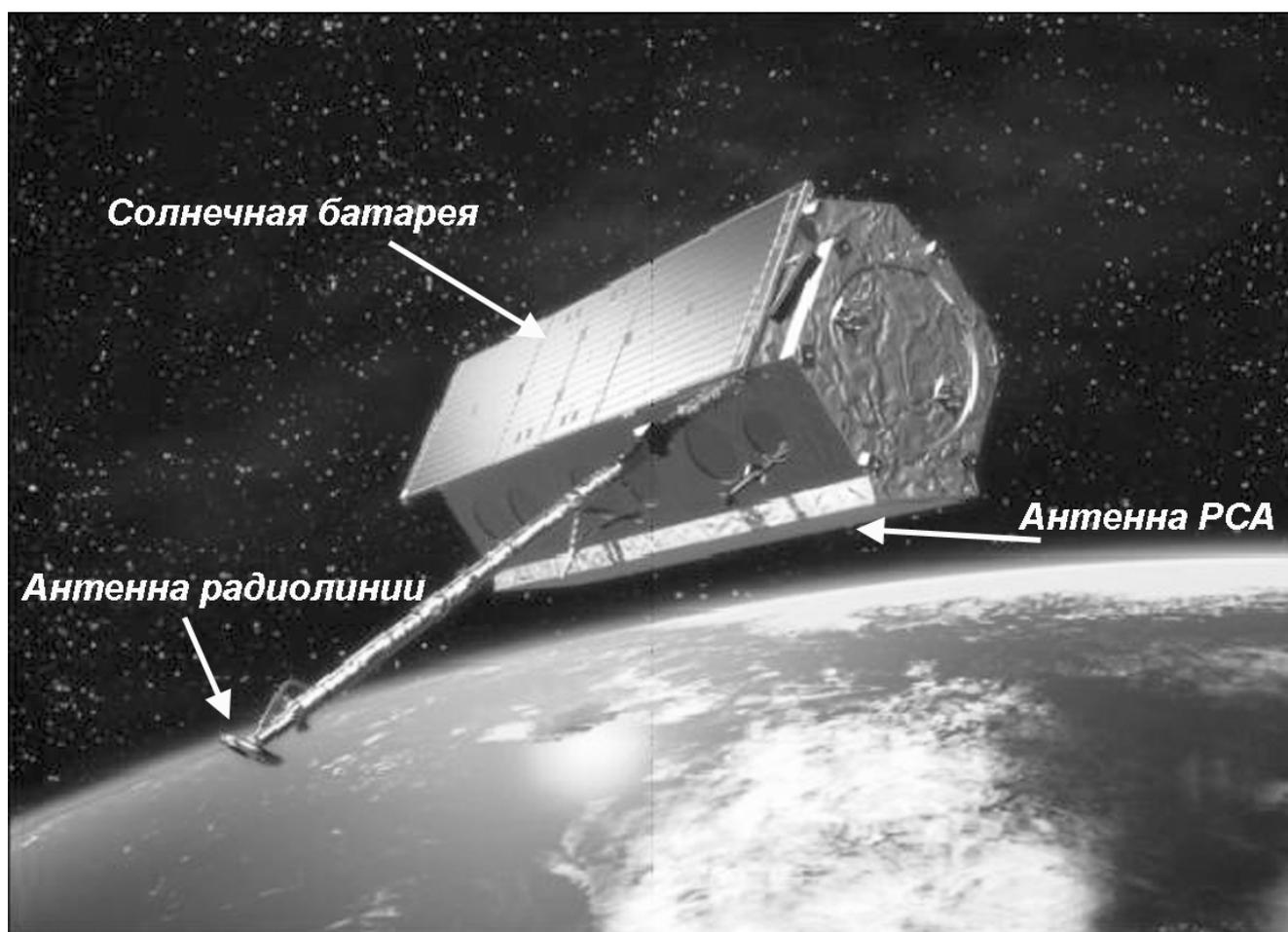


Рисунок 11 – Общий вид ИСЗ TerraSAR-X

Таблица 6. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры космического аппарата TerraSAR-X

Спектральный диапазон	X-диапазон (3,1 см)			
Радиометрическое разрешение, бит на пиксель	16			
Периодичность съемки, сутки	11 (подцикл: 2,5 суток)			
Формат файлов	CEOS, GeoTIFF			
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с	300			
Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км	Диапазон углов съемки, град.	Поляризация
Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight — HS)	1	10	20–55	Одинарная (по выбору — VV или HH); двойная (VV/HH)
Высокого разрешения (SpotLight — SL)	2	10	20–55	
Широкополосный высокого разрешения (StripMap — SM)	3	30	20–55	Одинарная (по выбору — VV или HH); двойная (по выбору — VV/HH или HH/HV или VV/VH)
Среднего разрешения (ScanSAR — SC)	16	100	20–55	Одинарная (по выбору — VV или HH)

#### ***2.4.6 Основные механизмы формирования РЛИ морской поверхности***

Радиолокационные изображения поверхности океана, полученные с космических и авиационных носителей, несут информацию о разнообразных явлениях, происходящих как непосредственно в приповерхностном слое, так и в глубине океана. Разумеется, электромагнитные волны СВЧ диапазона проникают в воду не более, чем на несколько миллиметров, и протекающие в океане процессы визуализируются только благодаря своим поверхностным проявлениям.

Отраженный от поверхности океана РЛ сигнал обусловлен рассеянием брэгговского типа на ряби - коротких гравитационно-капиллярных волнах на морской поверхности, возбуждаемых приповерхностным ветром. Атмосферные и внутриокеанические процессы тем или иным способом модулируют эти гравитационно-капиллярные волны, что проявляется в модуляциях интенсивности радиолокационного сигнала. Различные структуры на поверхности океана становятся видимыми благодаря тем или иным механизмам модуляции ряби, главным образом - течениям и поверхностно-активным веществам (ПАВ), влияющим на поверхностное натяжение жидкости. Таким образом, радиолокационные изображения поверхности океана могут визуализировать движения как в самом океане, так и в атмосфере над ним. Это своего рода природная камера Вильсона, делающая возможным наблюдение эффектов, скрытых от глаза. Огромное преимущество волн СВЧ диапазона перед электромагнитными волнами других диапазонов состоит в том, что они проникают через облачный покров, обеспечивая круглосуточное и всепогодное наблюдение океана. Еще одно преимущество СВЧ радиоволн, важное для задач дистанционной диагностики океана, заключается в том, что эти волны *резонансным образом* взаимодействуют с коротковолновой компонентой поверхностного волнения и тем самым визуализируют такие движения в океане, которые недоступны для наблюдения в других диапазонах электромагнитного спектра.

Эффективность применения космических средств дистанционного зондирования в большой мере зависит от наличия адекватных моделей, связывающих характеристики принимаемого спутниковым прибором микроволнового излучения с параметрами морской поверхности и атмосферы над ней.

**Резонансный (брегговский) механизм рассеяния.** В диапазоне СВЧ вода представляет собой проводящую жидкость с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'',$$

вещественная и мнимая части которой зависят от частоты. По своей величине значения  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  сопоставимы друг с другом - скажем, на длине волны  $\lambda = 3$  см  $\varepsilon = 49,3 + i39,5$  [102]. Достаточно высокие значения  $\varepsilon'$  и  $i\varepsilon''$  позволяют в первом приближении считать воду идеальным проводником.

Величины  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  весьма слабо зависят от температуры и солености воды, так что сечение радиолокационного рассеяния зависит, прежде всего, от формы поверхности, и лишь в малой степени – от других факторов.

При зондировании под умеренными углами ( $18^\circ - 50^\circ$ ) и в отсутствие длинных поверхностных волн основной вклад в формирование обратного рассеяния вносит брегговское резонансное рассеяние. Общепринятая резонансная теория рассеяния радиоволн основана на использовании метода малых возмущений. В рамках метода возмущений высота неровностей поверхности  $z = \zeta(\rho)$  считается малой по сравнению с длиной электромагнитной волны  $\lambda$ :  $|z| \ll \lambda$ , так что в уравнениях Максвелла возникает малый параметр  $\mu = k\sigma_\zeta \ll 1$  (здесь  $\rho = (x, y)$  - двумерный вектор в плоскости  $x, y$ ,  $\sigma_\zeta = \langle \zeta^2 \rangle^{1/2}$  - среднеквадратичное возмущение поверхности). Волновое поле  $E = E_{nad} + E_{omp}$ , представляющее собой сумму падающей ( $E_{nad}$ ) и рассеянной ( $E_{omp}$ ) волн, можно разложить в ряд по параметру  $\mu$  с использованием условия

перпендикулярности суммарного поля  $E$  границе хорошо проводящей жидкости. Интенсивность ведущего члена ряда (приближение однократного рассеяния) удобно характеризовать удельным сечением рассеяния  $\sigma$ , которое является безразмерной величиной (сечение рассеяния, измеряемое в квадратных метрах, отнесено здесь к единице площади).

Упрощенное выражение для удельного сечения рассеяния на горизонтальной поляризации [103,104] имеет вид:

$$\sigma_h^{res} = 4k^4 (\cos\theta)^4 F_\zeta(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновой вектор зондирующей волны,  $\theta$  - угол падения, отсчитываемый от вертикали. Величина  $F_\zeta(\mathbf{q})$ , представляющая собой спектральную плотность неровностей, связана преобразованием Фурье

$$F_\zeta(\mathbf{q}) = \frac{1}{4\pi^2} \int K_\zeta(\boldsymbol{\rho}) e^{i\mathbf{q}\boldsymbol{\rho}} d\boldsymbol{\rho} \quad (2)$$

с корреляционной функцией неровностей

$$K_\zeta(\boldsymbol{\rho}) = \langle \zeta(\boldsymbol{\rho}' + \boldsymbol{\rho}) \zeta(\boldsymbol{\rho}') \rangle. \quad (3)$$

Через  $\mathbf{q}$  здесь обозначена горизонтальная (в плоскости  $x,y$ ) компонента вектора рассеяния  $\mathbf{k}_{рас} - \mathbf{k}_{исп}$ , равного разности между волновым вектором рассеянной волны  $\mathbf{k}_{рас}$  и волновым вектором первичной волны  $\mathbf{k}_{исп}$ . При рассеянии строго назад, когда  $\mathbf{k}_{рас} = -\mathbf{k}_{исп}$ , имеем  $\mathbf{q} = 2\mathbf{k}_{исп\perp}$  ( $\mathbf{k}_{исп\perp}$  - горизонтальная компонента вектора  $\mathbf{k}_{исп}$ ), откуда для модуля  $q$  получаем

$$q = 2k \sin\theta. \quad (4)$$

Величине  $q$  соответствует пространственная гармоника поверхностного возмущения  $\Lambda = 2\pi/q$ . В силу (4) эта гармоника связана с длиной электромагнитной

волны  $\lambda = 2\pi/k$  соотношением

$$\Lambda = -\frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (5)$$

известным как соотношение Вульфа-Брегга.

Это соотношение определяет резонансную длину волны возмущения, которая селективно преобразует первичную волну, падающую под углом  $\theta$ , в рассеянную волну, идущую в обратном направлении [42].

Схематично механизм формирования берегового резонансного рассеяния изображен на рисунке 12.

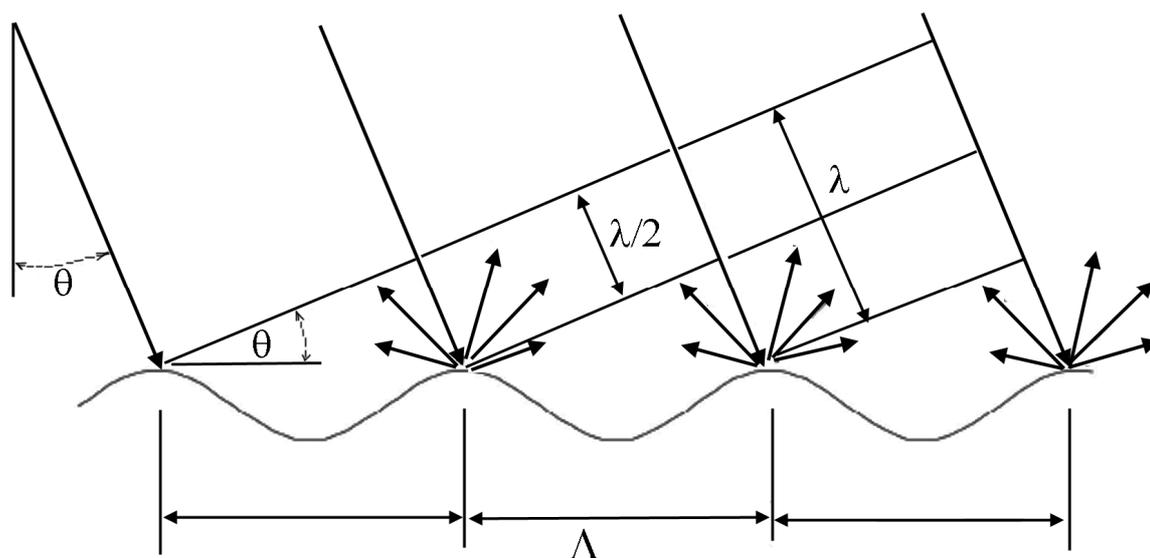


Рисунок 12 – Механизм формирования резонансного рассеяния радиолокационного сигнала на взволнованной морской поверхности, где  $\lambda$ - длина зондирующей волны,  $\Lambda$ -длина резонансной компоненты спектра поверхностного волнения,  $\theta$ - угол между направлением зондирования и надиром

Для характерных углов зондирования  $20^\circ$ - $26^\circ$  длины резонансной компоненты поверхностного волнения для наиболее распространенных частотных диапазонов таковы:

для X-диапазона (длина зондирующей волны 23 см) –  $3,9 \pm 0,5$  см,

для C-диапазона (длина зондирующей волны 5,7 см) –  $7 \pm 1$  см,

для L-диапазона (длина зондирующей волны 23 см)  $30 \pm 4$  см.

Следует отметить, что согласно (5) с увеличением угла зондирования возрастает и длина резонансной компоненты поверхностного волнения.

**Двухмасштабная модель рассеяния.** Спектр морского волнения принято делить на две компоненты - крупномасштабную и мелкомасштабную. К крупномасштабной компоненте спектра волнения относят волны, длина которых превышает 1 м. Гравитационно-капиллярные волны сантиметрового и отчасти дециметрового масштаба, так называемую «рябь», относят к мелкомасштабной компоненте. Двухмасштабную или композитную модель морской поверхности квалифицируют также как "рябь на крупной волне" (см. рисунок 13).

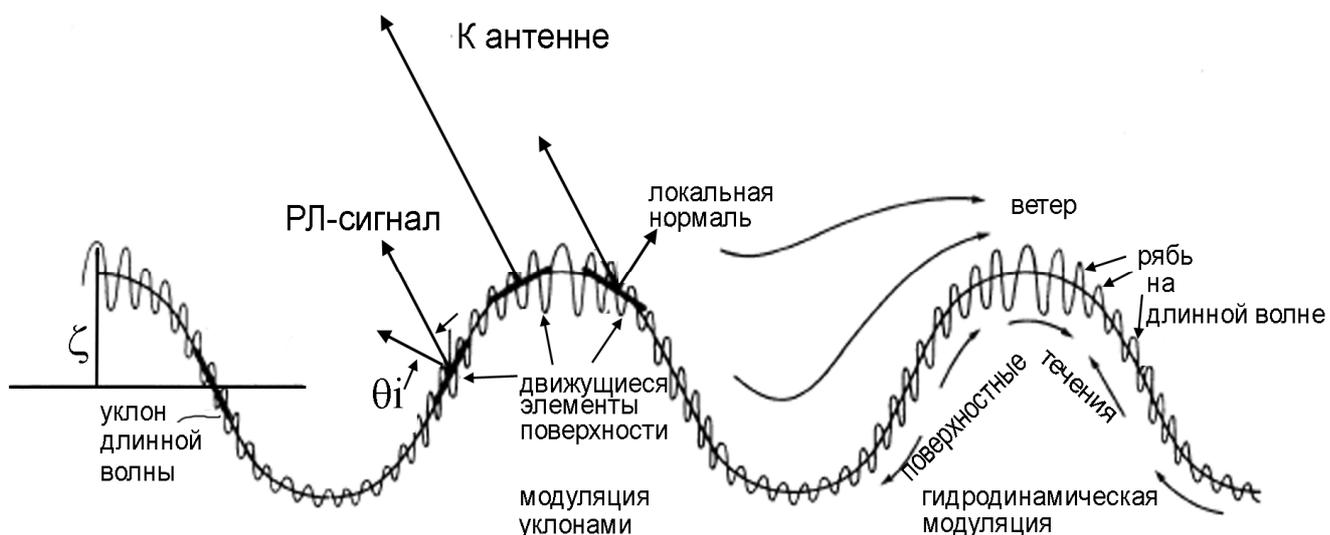


Рисунок 13 – Схематичное представление двухмасштабной модели поверхности

Влияние ряби учитывают в рамках теории возмущений (брегговский механизм рассеяния), а влияние крупномасштабной компоненты - изменением наклона поверхности. В результате мелкомасштабная компонента волнения (ее "сантиметровая" часть) оказывается ответственной за обратное рассеяние радиолокационных сигналов, а крупномасштабная - за пространственную

модуляцию рассеянных сигналов. Такой комбинированный подход известен как двухмасштабная модель рассеяния.

Длинноволновая компонента оказывает на рассеяние тройное воздействие:

Во-первых, длинноволновая компонента меняет угол визирования ряби, возбужденной ветром, так что угол  $\theta$  в формуле (4) будет промодулирован крупными волнами. Этот эффект получил название «модуляция уклонами длинных волн».

Во-вторых, спектр ряби испытывает на себе воздействие локальных течений, индуцированных крупной волной. Дело в том, что частицы жидкости, участвующие в волновом процессе, движутся по эллиптическим траекториям, что и создает течения на поверхности жидкости. Эти течения *растягивают* и модифицируют гравитационно-капиллярные волны, если токи жидкости и капиллярные волны движутся в одном и том же направлении, и *сжимают* волновые пакеты капиллярно-гравитационных волн при движении в противоположном направлении. Эти эффекты могут быть описаны при помощи уравнения сохранения волнового действия и к ним применимо обобщенное название «гидродинамическая модуляция». Более подробно эти вопросы рассматриваются в работах [105-108].

В-третьих, согласно [109, 110] вблизи вершины крупных волн образуется цуг ветро-независимых волн капиллярно-гравитационной части спектра. В работе [109] последние названы "связанными" брэгговскими волнами, чтобы отличить их от "свободных" брэгговских волн, под которыми подразумеваются капиллярно-гравитационные волны, возбужденные ветром. В результате действия указанных трех процессов крупная волна модулирует спектр ряби, что и создает предпосылки для "проявления" крупномасштабной компоненты поверхностного волнения на радиолокационных изображениях.

Разумеется, указанная "тройная" модуляция дает наблюдаемый эффект, если длина крупных волн превышает элемент разрешения РЛС. При разрешении  $\Delta x \sim 30$  м

это условие реализуется только для достаточно длинных волн зыби, скажем, для поверхностных волн с длиной  $\lambda \geq 60-100$  м. Двухмасштабная модель волнения и брегговский резонансный механизм рассеяния неплохо описывают рассеяние для умеренных углов зондирования, что обычно имеет место при радиолокационном зондировании морской поверхности со спутников. При высоких углах зондирования, встречающихся при зондировании с самолетов, эта модель нуждается в совершенствовании за счет учета нерезонансных эффектов, в частности, рассеяния на микрообрушениях. Основные результаты в этом направлении освещены в публикациях [89, 43, 44, 111-113].

Отметим, что РСА изображения формируются несколько иначе, чем в случаях РЛСБО, судовых и береговых радаров, потому что к «обычной» модуляции брегговского сечения рассеяния в случае РСА добавляется еще один механизм, а именно, модуляция доплеровского смещения частоты. В РЛСБО такая модуляция не регистрируется, тогда как в случае РСА орбитальное движение позволяет „видеть” волнение даже в условиях, когда флуктуации сечения рассеяния отсутствуют.

Космические РСА работают при углах падения 20-60 град. При таких углах эффекты нерезонансного рассеяния невелики, и формирование РСА изображений происходит преимущественно на основе брегговского механизма рассеяния, с участием эффекта Доплера. Доплеровская визуализация движения частиц жидкости, безусловно, является положительным для наблюдения эффектом. Однако такая визуализация сочетается и с негативным проявлением орбитального движения. Специфика отображения РСА морской поверхности связана с подвижностью последней, т.е. с тем, что за конечное время синтеза положение рассеивателей изменяется, или, что эквивалентно, наличие у рассеивателей радиальной скорости искажает доплеровский спектр сигнала. Это приводит к тому, что в РСА изображении появляются интерференционные «биения» между доплеровскими частотами, которые на практике воспринимаются как характерные

шумы, затрудняющие восстановление спектра волнения. В результате спектр волнения, регистрируемый когерентным РСА, работающим по случайному движению поверхности, оказывается не идентичным исходному спектру волнения. Особенности РСА изображения морской поверхности проявляются в виде трех основных эффектов: ухудшение разрешающей способности по азимуту, расфокусировка изображения, дополнительная модуляция яркости изображения крупных поверхностных волн.

По вопросу формирования РСА изображений морской поверхности имеется достаточно много публикаций как зарубежных, так и отечественных авторов, в частности можно указать работы [114-116].

Радиолокационные данные активно используются при изучении различных процессов, происходящих в океане, а также явлений, воздействующих на его поверхность. Однородность диэлектрических свойств морской поверхности существенно облегчает анализ радиолокационных изображений и позволяет связать интенсивность обратно рассеянного сигнала с характеристиками шероховатости поверхности океана. Двумерные распределения радиолокационного сечения обратного рассеяния позволяют наблюдать пространственные характеристики изучаемых явлений.

#### ***2.4.7 Основные гидродинамические процессы, исследуемые с помощью спутниковых радиолокационных данных***

Прежде всего, спутниковые радиолокационные данные позволяют исследовать поверхностные проявления *течений*, а также *гидрологических фронтов*, представляющих собой границы раздела морских вод с различными свойствами: температура, соленость, плотность, цвет, различные взвеси и органические примеси [117,118]. В свою очередь, течения могут быть связаны с топографией дна (особенно

на мелководье), так что радиолокационные снимки косвенно могут нести информацию и о рельефе дна.

На радиолокационных изображениях морской поверхности детектируются морские вихревые структуры различных размеров, с диаметрами от нескольких километров до десятков километров. Как правило, на радиолокационных изображениях эти вихри визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теплое время года. Эти пленки обладают способностью избирательного гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения, в силу неравномерного распределения поверхностного натяжения в местах их скопления, и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра [119,120]. Благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры малых размеров, с характерными размерами в единицы км. Вихри этого типа детектируются только на радиолокационных изображениях морской поверхности и вследствие своих небольших размеров неразличимы на изображениях оптических и ИК сенсоров.

Кроме того, радиолокационное изображение позволяет выявить тонкую структуру вихря, предоставляя возможность оценить долю пленок биогенного происхождения, вовлеченных в вихревую структуру и сконцентрированных в зонах конвергенции.

Радиолокаторы высокого разрешения обладают возможностью выявлять *поверхностное волнение*, точнее, крупномасштабную компоненту волнения с характерными длинами, превышающими 20-40 м.

Особый интерес представляют собой поверхностные проявления *внутренних волн* в океане. Существование внутренних волн в толще морских вод обусловлено устойчивой стратификацией, соответствующей увеличению плотности воды в направлении силы тяжести. Внутренние волны играют важную роль в процессах горизонтального и вертикального обмена и перемешивания вод и в формировании термохалинной циркуляции водоемов. Амплитуда внутренних волн может достигать в океане до ста метров, длины волн – многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, при определенных условиях внутренние волны могут проявляться на поверхности океана, модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями [121-124]. Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн в океане – это чередование квазипараллельных полос выглаженной (слики) и шероховатой (сулои) морской поверхности.

Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на радиолокационных изображениях морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала, обусловленных модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра поверхностного волнения переменными течениями, создаваемыми в приповерхностном слое внутренними волнами [125,126].

На поверхности океана отражаются не только внутрокеанические, но и некоторые атмосферные процессы. В частности, на радиолокационных изображениях видны проявления вариаций *поля приповерхностного ветра*, который воздействует на сантиметровую составляющую спектра волн на морской поверхности (гравитационно-капиллярные волны) и тем самым влияет на рассеяние радиоволн. Флуктуации скорости ветра “отпечатываются” на морской поверхности и тем самым – на радиоизображениях, в виде пятен сантиметровой ряби различной интенсивности. Первоначально этот «ветровой шум» рассматривался как мешающий фактор при изучении волнения, а также сликов, вызванных внутренними волнами, течениями, разливами нефти, осадками и т.п. Однако позднее выяснилось,

что характеристики этих шумов несут информацию о пространственно-временной структуре ветра, и, следовательно, могут использоваться для изучения процессов в придном слое атмосферы. Возбужденная ветром мелкомасштабная рябь на поверхности океана визуализирует ряд других атмосферных движений: *атмосферные фронты, атмосферные внутренние волны*, а также атмосферные *конвективные ячейки*, развивающиеся над океаном в условиях неустойчивой стратификации, т.е. в условиях, когда температура морской поверхности превышает температуру атмосферы над морской поверхностью. Возможность выявлять и исследовать внутренние гравитационные волны и конвективные процессы в работах [127-131]. Наконец, радиолокаторы реагируют еще на *атмосферные осадки*, которые могут, как усиливать, так и ослаблять (за счет эффекта "выглаживания" поверхности) рассеяние радиоволн.

Помимо того, радиолокаторы в состоянии видеть выглаженные участки поверхности - слики, в том числе слики, обусловленные *нефтяными загрязнениями* и *поверхностно-активными* веществами (ПАВ).

Ситуация зондирования областей морской поверхности, покрытых поверхностными, в том числе нефтяными, пленками – так называемых пленочных сликов оказывается весьма интересной. Наличие поверхностной пленки приводит к понижению интенсивности волно-ветрового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения. В этом случае на поверхности океана образуются выглаженные области, которые проявляются на радиолокационном изображении как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности [128,129].

Радиолокационные образы разливов нефтеуглеродов на морской поверхности, естественно, зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется рядом параметров, таких как скорость

ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти. Форма разлива оказывается разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта.

Установлено [128,129], что пленки в разливах нефтепродуктов характеризуются сильной неоднородностью по толщине и по степени гашения волн и, в среднем, оказывают меньшее гасящее действие, чем пленки ПАВ.

Важнейшим фактором, определяющим возможность достоверного детектирования нефтяных загрязнений на морской поверхности на радиолокационных изображениях является приповерхностный ветер [130]. При скорости ветра, превышающей 9-10 м/сек, пленочные загрязнения любой природы - как нефтяные, так и биогенные - не различимы на радиолокационных изображениях морской поверхности.

В штилевых условиях или при слабых неустойчивых ветрах резонансная составляющая поверхностного волнения может не развиваться, что приводит к ослаблению радиолокационных контрастов. На радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, присутствует большое количество областей ослабления рассеяния, не относящихся к пленочным загрязнениям, что повышает вероятность ложной тревоги при детектировании пятен нефтяных загрязнений по радиолокационным данным.

Задача распознавания нефтяных пятен на радиолокационных снимках существенно усложняется тем, что эти пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, которые принято называть «подобиями» пятен [131].

Среди РЛ-подобий нефтяных пятен можно назвать органические пленки, некоторые типы льда («сало»), области, затененные сушей (ветровая тень), области локального ослабления приповерхностного ветра, гидрологические фронты, поверхностные проявления океанических внутренних гравитационных волн, дождевые ячейки, зоны апвеллинга. Все вышеперечисленные процессы и явления

приводят к перестройке спектра поверхностного волнения, ослабляя резонансную рябь, и проявляются на радиолокационных изображениях в виде областей пониженного рассеяния, которые могут быть ошибочно интерпретированы как нефтяные загрязнения. Главная трудность заключается в различении пятен загрязнений нефтепродуктами и пленок биогенных поверхностно активных веществ на морской поверхности. Органические пленки естественного происхождения повсеместно встречаются на обширных площадях морской поверхности, преимущественно в теплое время года и в областях повышенной биологической активности, особенно в прибрежной зоне. Пленки естественного происхождения очень чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции. Благодаря этому их можно идентифицировать на радиолокационных изображениях.

#### ***2.4.8 Подготовка материалов, обобщающих результаты существующих работ по исследованию гидродинамических процессов на основе спутниковых данных, для научно-образовательного курса***

В результате проведенного анализа научных публикаций по исследованию гидродинамических процессов на основе спутниковых данных были подготовлены два вида материалов для научно-образовательных курсов в виде презентаций в формате Microsoft Office PowerPoint формате. Первая презентация «Исследование гидродинамических процессов на основе спутниковых данных» предназначена для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов соответствующих специальностей. Научно-образовательные материалы включают в себя:

- описание ныне существующих гидродинамических моделей, используемых в исследованиях океана;

- примеры радиолокационных изображений, на которых проявляются гидродинамические процессы в толще и в поверхностном слое океана;
- интерпретация изображений с учетом физических моделей.

Вторая презентация **«Использование данных дистанционного зондирования при изучении океана»** содержит краткую характеристику роли дистанционных методов в современной науке об океане и красочные примеры проявления гидродинамических процессов в данных спутникового дистанционного зондирования. Представлены изображения различных частей Мирового океана: морей (окраинного, внутриматерикового и межостровного), заливов и проливов с характерными особенностями гидрологического режима: поступлением вод речного стока, волновыми и приливными движениями, отличиями в скорости водообмена с прилегающими акваториями. Данные научно-образовательные материалы подготовлены для учителей и школьников старших классов.

#### ***2.4.9 Адаптация специальной документации, посвященной устройству и техническим возможностям радиолокаторов спутников RADARSAT-2 и TerraSAR-X, для студенческой и школьной аудитории***

Опираясь на техническую документацию, представленную на официальных сайтах RADARSAT-2 (<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>) и TerraSAR-X (<http://www.infoterra.de/terrasar-x-satellite>) подготовлены учебные материалы для научно-образовательного курса «Спутники Terra-SAR-X, TANDEM-X и RADARSAT-2: носители радиолокаторов нового поколения». Учебные материалы содержат обзор технических характеристик радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) нового поколения, установленных на спутниках Terra-SAR-X, TanDEM-X и RADARSAT-2, адаптированные для студенческой и школьной аудитории. При подготовке данной презентации был проведен перевод технической

документации на русский язык, подобран иллюстративный материал, отражающий возможности и технические особенности перечисленных радиолокаторов.

Перечисленные выше презентации представлены в электронном виде в виде дополнительного материала на CD, прилагаемом к настоящему отчету.

### **3. Заключение**

В заключение перечислим основные результаты, полученные при выполнении первого этапа ПНИР «Исследование гидродинамических процессов по спутниковым радиолокационным изображениям высокого пространственного разрешения с участием научно-исследовательского коллектива Университета г. Гамбург, Германия».

Выполнен анализ современной научно-технической литературы, затрагивающий исследование океана на основе использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, в том числе и публикаций научных коллективов – исполнителей проекта. Особое внимание было уделено особенностям применения спутниковой радиолокации высокого пространственного разрешения для исследования субмезомасштабных гидродинамических процессов.

Определены основные направления исследований в рамках ПНИР, включающие в себя использование радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения для :

изучения особенностей проявлений мелкомасштабных вихревых структур, внутренних волн и мелкомасштабных фронтов на радиолокационных изображениях высокого разрешения;

- выявления механизмов формирования и эволюции мелкомасштабных вихревых структур в тестовых районах. Сравнение полученных результатов с результатами предыдущих исследований;
- восстановления параметров течений, связанных с прохождением вихревых структур;
- исследования межгодовой и сезонной изменчивости и пространственного распределения вихревой и волновой активности в тестовых районах;
- определение параметров внутренних волн по их поверхностным проявлениям в Черном, Балтийском, Северном и Каспийском морях;
- исследования пространственной структуры и динамики мелкомасштабных фронтов (с характерным поперечным масштабом менее радиуса деформации Россби) во внутренних и окраинных морях.

Подготовлен уточненный Договор о научно-техническом сотрудничестве между ИКИ РАН и Университетом г. Гамбург, определяющий предмет и объем общей исследовательской программы партнеров, сроки ее выполнения, распределение между участниками выполняемых работ, условия взаимодействия, сроки проведения рабочих встреч, экспедиционных работ, уточнение состава участников и набора аппаратуры

В результате обобщения и анализа опубликованных результатов исследований разработаны материалы для научно-образовательного курса на электронном носителе:

- **«Исследование гидродинамических процессов на основе спутниковых данных»;**
- **«Спутники Terra-SAR-X, TANDEM-X и RARARSAT-2: носители радиолокаторов нового поколения»;**

- **Лекция для школьников «Использование данных дистанционного зондирования при изучении океана»**

Данные учебные курсы находятся в стадии апробации при проведении лекционных занятий в рамках спец. курса «Спутниковая океанология» для студентов 5-ого курса и магистрантов первого года обучения кафедры океанология, географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

#### **4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Gade, M., N. Braun, and P.A. Lange, 1998: Laboratory measurements of artificial rain impinging on a wind-roughened water surface, Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '98, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2559-2561.

2 Braun, N., and Gade M. New insights into the radar backscattering from the water surface at different radar frequencies and polarizations in the presence of rain and wind, Proceed. Oceans'2000, IEEE, Piscataway, NJ, USA.

3 Braun, N., Gade M., Schymura G. Multi-Frequency/Multi-Polarization Measurements of Radar Backscatter Under Different Rain and Wind Conditions, Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '00, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 123-125.

4 Branch, R., W.J. Plant, M. Gade, and A.T. Jessup. Relating Microwave Modulation to Microbreaking Observed in Infrared Imagery, IEEE Geosci. Remote Sens. Letters, 5(3).

5 Ufermann, S., M. Gade, R. Romeiser, and W. Alpers. On the impact of lower atmospheric stratification on SAR images of the ocean surface, in Operational Remote Sensing for Sustainable Development, G.A.Nieuwenhuis, R.A. Vaughan, M. Molenaar (eds.), Balkema, Rotterdam, 261-265.

6 Braun, N., and M. Gade. Multifrequency scatterometer measurements on water surfaces agitated by artificial and natural rain, Int. J. Remote Sens., 27, 27-39.

7 Braun, N., M. Gade, and P.A. Lange. Laboratory measurements of artificial rain impinging on a water surface, Proceed. Oceans'98, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1817-1822.

8 Braun, N., M. Gade, and P.A. Lange. Laboratory measurements of artificial rain impinging on a water surface, in *Operational Remote Sensing for Sustainable Development*, G.A.Nieuwenhuis, R.A. Vaughan, M. Molenaar (eds.), Balkema, Rotterdam, 339-344.

9 Braun, N., M. Gade, and P.A. Lange. Radar backscattering measurements of artificial rain impinging on a water surface at different wind speeds, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '99*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 200-202.

10 Braun, N., M. Gade, and P.A. Lange. The effect of artificial rain on wave spectra and multi-polarisation X band radar backscatter, *Int. J. Remote Sens.*, 23, 4305-4322.

11 Braun, N., M. Gade, and P.A. Lange. Laboratory measurements of artificial rain impinging on slick-free and slick-covered water surfaces, in *Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing*, M. Gade, H. Hühnerfuss, and G.M. Korenowski (Eds.), Springer, Heidelberg, 342 pp., 145-156.

12 Gade, M., W. Alpers, S.A. Ermakov, H. Hühnerfuss, and P.A. Lange. Wind-wave tank measurements of bound and freely propagating short gravity-capillary waves, *J. Geophys. Res.*, 103, 21697-21710.

13 Lange, P.A., G. van der Graaf and, M. Gade. Rain-Induced Subsurface Turbulence Measured Using Image Processing Methods, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '00*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 3175-3177.

14 Melsheimer, C., and M. Gade. Rain cells over the sea monitored by synthetic aperture and weather radars: a comparison, *Proceed. Oceans'98*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1445-1448.

15 Melsheimer, C., W. Alpers, and M. Gade. Investigation of multifrequency/multipolarization radar signatures of rain cells derived from SIR-

C/X-SAR data, Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '96, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1370-1372.

16 Melsheimer, C., M. Gade, and W. Alpers. Investigation of multifrequency/multipolarization radar signatures of rain cells derived from SIR-C/X-SAR data, J. Geophys. Res., 103, 18,867-18,884.

17 Melsheimer, C., W. Alpers, and M. Gade. Simultaneous observations of rain cells over the ocean by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1/2 satellites and by weather radars, Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS)'99, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 194-196.

18 Melsheimer, C., W. Alpers, and M. Gade. Simultaneous observations of rain cells over the ocean by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1/2 satellites and by weather radars, J. Geophys. Res., 106, 4556-4677.

19 Romeiser, R., O. Hirsch and, M. Gade. Remote Sensing of Surface Currents and Bathymetric Features in the German Bight by Along-Track SAR Interferometry, Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '00, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1081-1083.

20 Gade, M., O.Yu. Lavrova, L.M. Mitnik, J.C.B. da Silva, S.A. Ermakov, and D.K. Woolf. SIMP: Slicks as Indicators for Marine Processes, Proceed. 31st Intern. Conf. Remote Sens. Environ., St. Petersburg, Russia, 20-24 June 2005.

21 Gade, M., S.A. Ermakov, O.Yu. Lavrova, L.M. Mitnik, J.C. da Silva, and D.K. Woolf.: Using Marine Surface Films as Indicators for Marine Processes in the Coastal Zone, Proceed. 7th Intern. Conf. Mediterr. Coast. Environ., Kusadasi, Turkey, 25-29 October 2005, 1405-1416.

22 Gade, M., S.A. Ermakov, O.Yu. Lavrova, L.M. Mitnik, J.C.B. da Silva, and D.K. Woolf. Remote Sensing of Slick as Indicators of Marine Processes in the Coastal Zone, Proceed. ESA Envisat Symp., Montreux, Switzerland, 23-27 April 2007.

23 Gade, M. Satellite Remote Sensing of Coastal Discharge Plumes in Europe, *Proceed. Int. Conf. "Studying Land Use Effects in Coastal Zones with Remote Sensing and GIS"*, Antalya, Turkey.

24 Gade, M. Satellite remote sensing of coastal discharge plumes in Europe, *Issledovanie Zemli iz kosmosa (Remote sensing of the Earth)*, 2004/3, ISSN 0205-9614, 60-66 (in Russian).

25 Gade, M., and V. Barale. Multi-Sensor Remote Sensing of Coastal Discharge Plumes: A Mediterranean Test Site, in *Remote Sensing of the European Seas*, V. Barale and M. Gade (Eds.), Springer, Heidelberg, 514 pp., 475-486.

26 Siegel, H., M. Gerth, and M. Gade. Remote Sensing of the Pomeranian Bight by different optical and microwave sensors during the Oder flood in August 1997, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '99*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 308-310.

27 Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multi-Sensor Observations of Meso-Scale Features in European Coastal Waters, in *Remote Sensing of the European Seas*, V. Barale and M. Gade (Eds.), Springer, Heidelberg, 514 pp., 463-474.

28 Metzner, M., M. Gade, and I. Hennings. Can seiches be observed in the Baltic Sea by the ERS-1 radar altimeter due to water level changes? *Proceed. IAPSO'95*, Honolulu, HI.

29 Metzner, M., M. Gade, I. Hennings, and A.B. Rabinovich. The observation of seiches in the Baltic Sea using a multi data set of water levels, *J. Marine Syst.*, 24, 67-84.

30 Ufermann, S., R. Romeiser, and M. Gade. On the radar signatures of oceanic fronts - analysis of multichannel radar imagery and model predictions, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '98*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1659-1661.

31 Ufermann, S., R. Romeiser, and M. Gade. On radar signatures of atmospheric and oceanic phenomena, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS)'99*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1963-1965.

32 Barale, V., and M. Gade. Multisensor Study of Wind Patterns and Algal Blooms in Near-Coastal Gyres of the Mediterranean Sea. *Proceed 28th EARSeL Symp.*, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008.

33 Gade, M., G. Fiedler, and L. Dreschler-Fischer. Two-dimensional Sea Surface Current Fields Derived From Multi-sensor Satellite Data, *Proceed. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) '03*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 3540-3542.

34 Gade, M., G. Fiedler, L. Dreschler-Fischer, and O. Rud. Using Multi-sensor Remote Sensing Data for Calculating Mesoscale Ocean Current Fields, *Proceed. 6th Int. Medcoast Conf.*, Ravenna, Italy.

35 Gade, M., G. Fiedler, and L. Dreschler-Fischer. Mesoscale Sea Surface Currents Derived from Multi-Sensor Satellite Imagery, *Proceed. ESA Envisat Symp.*, Montreux, Switzerland, 23-27 April 2007.

36 Gade, M., B. Seppke, and L. Dreschler-Fischer. Deriving Mesoscale Surface Current Fields from Multi-Sensor Satellite Data. *Proceed. Ocean from Space 2010 Symp.*, Venice, Italy, 26-30 April, 2010.

37 Seppke, B., Gade, M., and Dreschler-Fischer, L. Sea Surface Current Fields in the Baltic Sea Derived From Multi-Sensor Satellite Data. *Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop 2009*

38 Seppke, B., L. Dreschler-Fischer, M. Wessel, and M. Gade. A Knowledge Based Framework for the Detection of Measurement Uncertainties in Derived Sea Surface Current Fields. *Proceed. IGARSS 2010*, Honolulu, HI, USA, 26-30 July, 2010.

39 Seppke, B., M. Gade, and L. Dreschler-Fischer. Evaluation of High-Resolution Sea Surface Current Fields in the Baltic Sea Derived from Multi-Sensor Satellite Imagery, Proceed. ESA Living Planet Symp., Bergen, Norway, 28 June - 2 July, 2010, ESA Special Publication SP-686.

40 Seppke, B., M. Gade, and L. Dreschler-Fischer. The Use of Spatial Constraints in the Derivation of Mesoscale Sea Surface Current Fields From Multi-Sensor Satellite Data. Proceed. IGARSS 2010, Honolulu, HI, USA, 26-30 July, 2010.

41 Seppke, B.; Dreschler-Fischer, L.; Hübbe, N. Using Snakes with Asymmetric Energy Terms for the Detection of Varying-Contrast Edges in SAR Images. In Proc. ICPR 2010, August 2010.

42 Кравцов Ю.А., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана // Радиотехника. 2000. № 1. С. 61-73.

43 Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Рассеяние электромагнитных волн на мезомасштабных обрушающихся волнах на морской поверхности // Известия РАН. Серия физическая. 1999. Т.63. № 12. С. 2403-2410.

44 Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи Физических Наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69-87.

45 Кравцов Ю.А., А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, Л.М. Митник, М.И. Митягина, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский. Поляризационные особенности радиолокационных изображений следов внутренних волн на поверхности океана // Исследование Земли из космоса. 1997. №6. С.43-55.

46 Mityagina M.I., Pungin V.G., Yakovlev V.V. Two-polarization  $K_u$  - band radar imagery of sea surface in presence of atmospheric boundary layer motions // *Waves in Random Media*. 1998. V. 8. P. 111-118.

47 Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3. № 2. С. 135-139.

48 Mityagina M. and Churumov A. Radar backscattering at sea surface covered with oil films. *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space* / Ed. A. Marcal. Millpress. Rotterdam. Netherlands, 2006. P. 783-790.

49 Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шерemet Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.

50 Каримова С.С. Исследование субмезомасштабных вихрей Черного и Балтийского морей по радиолокационным и радиометрическим спутниковым данным // *Электронный сборник докладов Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой»*. М.: Издательство JRE, 2010а. С. 148-159.

51 Каримова С.С. Исследование нестационарных вихревых структур Черного моря по данным инфракрасных и оптических изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011а. Т. 8. №4. С. 228-244.

52 Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // *Исследование Земли из космоса*, 2011. №5. С. 15-23.

53 Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009-2010 годах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. №3. С. 168-185.

54 Kostianoy A.G., Litovchenko K.Ts., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Lebedev S.A., Stanichny S.V., Soloviev D.M., Sirota A.M., Pichuzhkina O.E. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience // Environmental Research, Engineering and Management. 2006. N4 (38). P.70-77.

55 Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // Remote Sensing of the European Seas. Barale, Vittorio; Gade, Martin (Eds.) Springer. 2008. P. 463-474.

56 Кровотынцев В.А., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Островский. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2007. Выпуск 4. Том 1. с.295-303.

57 Shcherbak S.S., O.Y. Lavrova, M.I. Mityagina, T.Yu. Bocharova, V.A. Krovotyntsev, and A.G. Ostrovskii. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the north-eastern coastal zone of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing, Volume 29, Issue 21 November 2008, pp. 6331-6345.

58 Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. С. 118-123.

59 Lavrova O.Yu., T. Bocharova. Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // *Advance in Space Research*, 2006, 38 (10), p. 2162-2168.

60 Mityagina M., Lavrova O. Dynamic phenomena in the coastal waters of the North-Eastern Black Sea retrieved from satellite data // *Proceedings of IGARSS 2008*, ISBN 978-1-4244-2808-3, V. II. P. 347-350.

61 Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu. Multi-sensor observation of mesoscale and small-scale features // *Proceedings of SeaSAR*, 2008.

62 Каримова С.С. Вихревые течения в Черном море // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 95-101.

63 Каримова С.С. Исследование нестационарных вихревых структур Черного моря по спутниковым данным // *Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: Материалы Международной научно-практической конференции*. – Майкоп: Изд-во «Магарин О.Г.», 2011б. С. 107-116.

64 Karimova S.S. Eddy statistics for the Black Sea by visible and infrared remote sensing // In book “Remote Sensing of the Changing Oceans”. D. Tang (Ed.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. P. 61-76.

65 Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // *Proceedings of the Third International Workshop SeaSAR 2010*. 25-29 January 2010. ESRIN, Frascati, Italy.

66 Karimova S.S. Satellite observations of eddies in coastal zones // *Proceedings of MEDCOAST 2011*, Rhodes, Greece.

67 Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.

68 Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S. Multi-Sensor Survey of Seasonal Variability in Coastal Eddy and Internal Wave Signatures in the North-Eastern Black Sea // International Journal of Remote Sensing. 2010. V. 17. P. 4779–4790.

69 Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 128-136.

70 Митягина М.И., О.Ю. Лаврова. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 155-164.

71 Lavrova O.Yu., Sabinin K.D. Surface manifestations of internal soliton trains in non-tidal seas // Proceedings of the third US/EU-Baltic International Symposium: Ocean Observations, Ecosystem-Based Management & Forecasting, 2008.

72 Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. Вып. 5. С. 206-215.

73 Lavrova O.Yu., Serebryany A.N. Sea current variability caused by near shore eddy: joint analysis of satellite radar and acoustic data // Proceedings of the 37th COSPAR Scientific Assembly 2008.

74 Каримова С.С. Мезомасштабные вихри в северо-восточной части Черного моря: совместный анализ данных спутниковых и контактных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Т. I. С. 493-499.

75 Лаврова О.Ю., Ликучева Т.В., Сабинин К.Д., Woodgate R.A. Восстановление параметров течения в Беринговом проливе по данным спутниковой радиолокации и контактных измерений // Тезисы Пятой юбилейной Всероссийской конференции «Дистанционное зондирование Земли из космоса». ИКИ РАН, Москва, 12–16 ноября 2007 г. С. 170.

76 Щербак С.С., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. I. С. 376-383.

77 Lavrova O., L. Mitnik, T. Bocharova. Using SAR data to fine-tune adopted circulation patterns in straits: internal waves and vortex structures // Proceedings of the ISRS 2006 PORSEC, 2-4 November 2006, Busan, Korea 2006.

78 Lavrova O.Yu., K.D. Sabinin, T.Yu. Bocharova. Water dynamics in straits: impact of atmospheric and oceanic processes // COSPAR Scientific Assembly 2006b Abstracts.

79 Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu., Sabinin K.D. Satellite remote sensing of water dynamics in the Strait of Kerch Region // Proceedings of Envisat Symposium, 2007.

80 DiGiacomo P. M. and B. Holt. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106, 22,521–22,543, doi:10.1029/2000JC000728.

81 Marmorino, G. O., B. Holt, M. J. Molemaker, P. M. DiGiacomo, M. A. Sletten. Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight // *J. Geophysical Research*, 2010, 115, C05010, doi:10.1029/2009JC005863.

82 Гинзбург, А.И., Костяной, А.Г., Соловьев, Д.М., Станичный, С.В. Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // *Исследование Земли из космоса*, 2000. №1. С. 3-14.

83 Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Том 7. № 1. С. 248-259.

84 Chapron, B., F. Collard, and F. Ardhuin, Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation, *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, C07008, doi:10.1029/2004JC002809.

85 Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. *Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб.заведений. М.: Издательский центр "Академия", 2004. 336 с.*

86 Рис У.Г. *Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.*

87 Малинников В. А., А.Ф. Стеценко, А.Е. Алтынов, С.М. Попов. *Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: Учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2009. 140 с.*

88 DiGiacomo P. M. and B. Holt Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. C10, pp. 22,521-22,543.

89 Romeiser R., Schmidt A., and Alpers W. A three-scale composite surface model for the ocean wave - radar modulation transfer function // *Journal of Geophysical Research*. 1994. V. 99. N. C5. P. 9785-9801.

90 Garrett C. and W. Munk. Space-time scales of internal waves // *Geophysical Fluid Dynamics*, 1972, Vol. 3, no3, 225-264.

91 Миропольский Ю З., Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Ленинград. Гидрометеиздат. 1981. 300 с.

92 Морозов Е.Г. Океанические внутренние волны. Москва. Наука. 1985. 151 с.

93 Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. С.-Петербург: Гидрометеиздат. 1992. 272 с.

94 Alpers, W.: Theory of radar imaging of internal waves // *Nature*, 314, 245-247, 1985.

95 Zeng, K., and W. Alpers. Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model // *Int. J. Remote Sensing*, 25(7-8), 1277-1281, 2004.

96 Apel, J R., Byrne H.M., Proni, J.R., Chrnell R.L., Observations of oceanic internal and surface waves Earth Resources Technology satellite//*JGR*, 1975.V.80, no 6, 865-881.

97 Hsu M.-K., Liu A.K., Liu C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR // *Cont. Shelf. Res.* 2000. V. 20. P. 389–410.

98 Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии. В книге «Новые идеи в океанологии». Москва. Наука. С. 55 – 117.

99 Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.

100 Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн в шельфовой зоне Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журнал. 1997. № 3. С. 3–16.

101 Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.

102 Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.

103 Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

104 Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Т. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.

105 Басович А.Я., Таланов В.И. О трансформации коротких поверхностных волн на неоднородных течениях // Известия АН СССР. ФАО. 1977. Т. 13. № 7. С. 766-773.

106 Troitskaya Yu.I. Modulation of the growth rate of short surface capillary-gravity wind waves by a long wave // Journal of Fluid Mechanics. 1994. V. 273. P. 169-187.

107 Горшков К.А., Долина И.С., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 661-672.

108 Alpers W. Imaging ocean surface waves by synthetic aperture radar : A review // Satellite Microwave remote Sensing / Ed. N.D. Allan. Ellis Horwood Ltd., 1983. P. 107-119.

109 Plant W.J. A model for microwave Doppler sea return at high incidence angles: Bragg scattering from bound, tilted waves // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. N. C9. P. 21131-21146.

110 Zavorotny V.U., Voronovich A.G. Two scale model and ocean radar Doppler spectra at moderate and low grazing angles // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. V. 46. N. 1. P. 84-92.

111 Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface: 1. The background model // Journal of Geophysical Research. V. 108. N. C3. P. 8054-8077.

112 Voronovich A. G., Zavorotny V. U. Theoretical model for scattering of radar signals in Ku- and C-bands from a rough sea surface with breaking waves//Waves in Random Media. 2001. N. 11. P. 247– 269.

113 Churyumov A.N., Kravtsov Y.A., Mityagina M.I., Morkotun A.V. A Three-Component Composite Model of the Sea Surface: Incorporating Steep and Breaking Mesoscale Wavelets into the Two-scale Model // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03). 2003. V. 7. P. 4183 – 4185.

114 Alpers W. R., Ross D. B., Rufenach C. L. On the Detectability of Ocean Surface Waves by Real and Synthetic Aperture Radar // Journal of Geophysical Research. 1981. V. 86. N. C7. P. 6481-6498.

115 Alpers W. R. and Rufenach C. L. The Effect of Orbital Motions on Synthetic Aperture Radar Imagery of Ocean Waves // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1979. V. AP-27. N. 5. P. 685-690.

116 Каневский М.В. Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. 124 с

117 Romeiser R., Schmidt A., and Alpers W. A three-scale composite surface model for the ocean wave - radar modulation transfer function // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. N. C5. P. 9785-9801.

118 Johannessen J. ., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., and Chapron B. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // Journal of Geophysical Research. V. 110. N. C0717. P. 1-14.

119 Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектра ветрового волнения под действием внутренних волн // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. №11. С. 1068-1076.

120 Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И. Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность (ред. Е.Н. Пелиновский). Горький: ИПФ, 1982. С. 8-30.

121 Баханов В.В., Таланов В.И. Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. трудов (ред. В.И. Таланов, Е.Н. Пелиновский). Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 1. С. 81-106.

122 Горшков К.А., Долина И.С., Соустова И.А. Троицкая Ю.И. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 661-672.

Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // Nature. 1985. 314, 245-247.

123 Ermakov S.A., DaSilva J.C., Robinson I.S. The role of surface films in SAR signatures of internal waves on the shelf. II. Internal tidal waves // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. N. C4. P. 8033-8043.

124 Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Пунгин В.Г., Сабинин К.Д. Проявление тонкой структуры ветрового поля перед холодным атмосферным фронтом в радиолокационных изображениях морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 4. С. 3 -12.

125 Ufermann S., and Romeiser R. Numerical study on signatures of atmospheric convective cells in radar images of the ocean // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. N. C25. P. 25707-25720.

126 Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Наблюдение подветренных волн и вихревых структур за природными препятствиями в атмосфере при помощи радиолокационного зондирования морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 2004. № 5. С. 44-50.

127 Mityagina M. I. Intensity of convective motions in marine atmospheric boundary layer retrieved from ocean surface radar imagery // Nonlinear Processes in Geophysics. 2006. N. 13. P. 303–308.

128 Браво-Животновский Д.М., Долин Л.С., Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Титов В.И. Эффект усиления дециметровых ветровых волн в зоне нефтяного slicka // Доклады АН СССР. 1984. Т. 276. № 5. С. 1243-1246.

129 Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Салашин С.Г. Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных slickaх // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 7. С. 707-715.

130 Gade M., Alpers W., Bao M. Measurements of the radar backscattering over different oceanic surface films during the SIR-C/XSAR campaigns // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'96). 1996. V. 2. P. 860–862.

131 Espedal H.A. and Johannessen O.M. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // International Journal of Remote Sensing. 2000. V. 21. 11. P. 2141–2144.