

На правах рукописи



ДАНИЛИЧЕВА Ольга Аркадьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭВОЛЮЦИИ
ПЛЁНОЧНЫХ СЛИКОВ В ПОЛЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
И ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ
И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ
МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

1.6.17 – океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

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

Научный руководитель: Ермаков Станислав Александрович, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Костяной Андрей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН» (г. Москва);

Дулов Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Морского гидрофизического института РАН» (г. Севастополь).

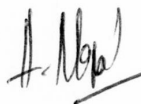
Ведущая организация: ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «07» октября 2024 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.03 при ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН и на сайте ipfran.ru.

Автореферат разослан «26» августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время почти 20% площади Мирового океана [1] покрыто органическими пленками. Одним из главных источников антропогенного загрязнения поверхности океана является нефть. А общее количество нефтепродуктов, попадающих в море, оценивается разными исследованиями от 6 до 12 млн. тонн.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к исследованиям геометрии сликов, связанных с наличием на морской поверхности антропогенных загрязнений, в частности, пленок нефтепродуктов, в том числе при решении задач дистанционного зондирования океана [2–5]. Это связано с необходимостью качественного прогнозирования распространения загрязнений такого типа, в том числе для оперативной организации работ по их ликвидации. Однако, в настоящее время понимание процессов, контролирующих эволюцию пленок на поверхности воды остается довольно ограниченным, в частности ввиду явного недостатка данных по растеканию пленок в природных условиях.

Существует ряд моделей, прогнозирующих распространение нефтяных загрязнений на сравнительно небольших временах их существования в реальных условиях [6], в которых учитывается ряд процессов, влияющих на распространение нефти, таких как растекание, диффузия, эмульгирование, испарение, биоразложение, растворение, вертикальное турбулентное перемешивание и т. д. При этом базовой моделью при описании процесса растекания является модель Фэя или ее аналоги [7, 8], которые описывают осесимметричное растекание пленки на спокойной, невзволнованной поверхности воды. Влияние же волнения на слик учитывалось при этом только при расчете его дрейфа как целого.

В этой связи как экспериментальные исследования распространения антропогенных пленок на морской поверхности, так и развитие соответствующих моделей оказывается весьма актуальным.

Для обнаружения и исследования пленочных загрязнений моря применяются пассивные и активные датчики в ультрафиолетовом (УФ), видимом, инфракрасном (ИК) и СВЧ-диапазонах [9]. Наиболее перспективными считаются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), работающие в СВЧ-диапазоне, чья работа не ограничена погодными условиями (облачностью) и условиями освещенности (день/ночь), в отличие от других датчиков. На радиолокационных изображениях пленочные слики проявляются в виде темных областей с пониженной интенсивностью радиолокационного (РЛ) сигнала, что связано с затуханием коротких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) в области пленки.

Хорошо известно, что интенсивное «цветение» фитопланктона в водоемах также приводит к образованию на поверхности воды пленок и, соответственно, к уменьшению интенсивности радиолокационного сигнала. Однако различие пленок биогенного происхождения от пленок, например, нефтепродуктов, только по характеру вариаций радиолокационного сигнала и без использования дополнительной информации на данный момент представляется весьма затруднительным. Отметим при этом, что и исследований, ориентированных на поиск взаимосвязи между характеристиками биогенных пленок, концентрацией фитопланктона и особенностями радиолокационного сигнала, достаточно мало.

Один из способов различать биогенные пленки, связанные с цветением фитопланктона, от антропогенных загрязнений «небольшого возраста» основан на анализе геометрии пленок. Пленки биогенного происхождения регулярно наблюдаются, в частности, на радиолокационных изображениях, в виде сложной структуры, распределенной на большой площади. Следует сказать, что и антропогенные загрязнения, будучи достаточно «старыми» (т. е. на временах, существенно превышающих характерные времена растекания загрязняющих пленок) по своей структуре могут мало отличаться от биогенных пленок. Можно полагать, что на больших временах существования пленочных сликов их динамика должна существенно определяться полем приповерхностных течений. В соответствии с этим, в литературе геометрию сложных сликовых структур на спутниковых изображениях часто ассоциируют с характерной структурой поля течений. В частности, характеристики спиральных структур на спутниковых изображениях верхнего слоя океана априорно отождествляют с геометрией океанических вихрей [10]. Однако в работах [11, 12] показано, что поле скорости течения не вполне соответствует геометрии сликовых структур. Таким образом, один из ключевых вопросов в контексте данной проблемы заключается в том, отражает ли геометрия сликовых структур на поверхности моря геометрию линий тока течений или нет, что также требует дополнительных исследований.

Для развития теорий и методов дистанционного зондирования океана, в частности, для дистанционного зондирования нефтяных разливов, большое количество исследований в настоящий момент направлено на лучшее понимание микроволнового рассеяния от морской поверхности, в частности, на анализ роли обрушений волн на обратное рассеяние радиолокационного сигнала. Анализ радиолокационного рассеяния при различных поляризациях показал, что традиционная двухмасштабная брэгговская модель не может объяснить некоторые важные характеристики радиолокационного обратного рассеяния, в том числе связь между радиолокационными сечениями рассеяния при вертикальной (VV-) и горизонтальной (HH-) со-поляризациях. В [13] была выдвинута гипотеза, что это несоответствие является результатом вклада некоторой дополнительной, неполяризованной (небрэгговской) составляющей в радиолокационное рассеяние. В работах [14–16] исследовалась из-

менчивость брэгговской и небрэгговской составляющих обратного радиолокационного рассеяния, обусловленная пленками ПАВ, а в ссылках [15, 16] подчеркивалась важная роль волновой нелинейности, в частности, микрообрушений волны, при попытке описать уменьшение обратного радиолокационного рассеяния, обусловленное наличием на поверхности воды пленки. В настоящее время роль нелинейных эффектов обрушения волн на обратное радиолокационное рассеяние не до конца понятна, и их исследование, включая экспериментальное, представляется весьма важным.

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями настоящего исследования являются: разработка новой физической модели, описывающей растекание пленки на взволнованной поверхности воды, учитывающей влияние волнения на деформацию разлива; анализ взаимосвязи радиолокационного сигнала, концентрации фитопланктона и характеристик биогенных пленок при зондировании внутреннего водоема; исследование связи геометрии сложных сликовых структур на поверхности моря со структурой поля поверхностных течений; исследование влияния нелинейных эффектов обрушения волн на обратное рассеяние радара; анализ затухания волн при прохождении дрейфующего льда по радиолокационным данным и описание обратного радиолокационного рассеяния от морской поверхности в присутствии льда.

Достижение этих целей потребовало решения следующих задач:

- а) проведение ряда натурных, в том числе подспутниковых, экспериментов по растеканию пленочных разливов на поверхности воды, по исследованию взаимосвязи между концентрацией хлорофилла и радиолокационным сигналом и по модуляции радиолокационного рассеяния, вызванного ветровыми волнами;
- б) проведение лабораторных исследований влияния коротких гравитационно-капиллярных волн на деформацию пленки;
- в) разработка физической модели, описывающей растекание пленочных сликов на взволнованной поверхности воды, учитывающей действие волнения на деформацию пленки;
- г) поиск и анализ последовательных спутниковых радиолокационных изображений сложных сликовых структур на поверхности моря, анализ возможностей восстановления поля поверхностных течений по этим последовательным изображениям с помощью метода максимальной кросс-корреляции;
- д) анализ вклада неполяризованной компоненты в обратное радиолокационное рассеяние морской поверхности при умеренной скорости ветра.

Научная новизна

Исследования, описанные в настоящей диссертационной работе, новы и оригинальны.

1. В ходе натурных экспериментов, в том числе подспутниковых, по растеканию пленочных разливов в присутствии ветрового волнения показано вытягивание сликов по направлению ветра, при этом продольный размер пятна пленки сильно зависит от скорости ветра и растет быстрее поперечного размера, который, в свою очередь, от ветра не зависит. Показаны различия в характере растекания пленок с разными физическими характеристиками.

2. На основе проведенных лабораторных экспериментов продемонстрировано влияние на динамику пленок индуцированных ГKB-напряжений, в частности возможность уравнивания ими градиента поверхностного натяжения и формирования стационарной границы пленки.

3. Разработана физическая модель, описывающая растекание пленок на поверхности воды в присутствии ветрового волнения с учетом напряжений, индуцированных набегающими в область пленки волнами. Для объяснения экспериментальных зависимостей продольных масштабов разливов от скорости ветра предложена гипотеза о перетекании вещества с боковых частей пятна пленки к его подветренной границе за счет действия продольных компонент индуцированного напряжения.

4. Из анализа данных комплексных радиофизических подспутниковых экспериментов по исследованию взаимосвязи между концентрацией хлорофилла и радиолокационным сигналом в исследуемом водоеме показано, что в областях высокой концентрации фитопланктона возможно образование толстых биогенных пленок на поверхности воды, которые наблюдаются как на спутниковых мультиспектральных изображениях за счет сгустков водорослей и частиц (пыли, цвета растений, пыльцы и др.), так и в радиолокационных сигналах за счет гашения мелкомасштабной ветровой ряби в данных областях, при этом чем больше концентрация хлорофилла, тем меньше интенсивность РЛ-сигнала.

5. Из анализа спутниковых мультиспектральных изображений биогенных пленок и пленок ПАВ показано, что контрасты толстых биогенных пленок в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах существенно отличаются от тонких биогенных пленок и пленок ПАВ. При этом контрасты толстых биогенных пленок в коротковолновом инфракрасном диапазоне качественно сходны с нефтяными, а в ближнем инфракрасном диапазоне наблюдается их существенное различие.

6. Из анализа структур поверхностных течений, восстановленных по последовательным спутниковым радиолокационным изображениям сложных пленочных структур на поверхности моря с помощью метода максимальной кросс-корреляции, и сравнения этих течений с геометрией пленок показано частичное соответствие геометрии сликов со структурой поля поверхностных течений. Такое неполное соответствие может быть обусловлено как нестационарностью течений, которые могут быстрее меняться во времени, чем сликовые структуры, так и низкой точностью определения компонентов скорости, направленных вдоль сликовых полос, что является недостатком метода

максимальной кросс-корреляции. Показано, что использование специальной обработки – «отслеживания» локальных сликовых особенностей – позволяет более корректно восстановить скорости поверхностных течений, что приводит к лучшему соответствию геометрии сликов и структуры течений.

7. На основе анализа результатов выполненных натуральных экспериментов по РЛ-зондированию ветрового волнения при умеренных ветрах показано, что обратное рассеяние характеризуется наличием коротких пиков, связанных с острыми гребнями интенсивных, в том числе обрушивающихся, декаметровых волн. При этом интенсивности пиков на VV- и HH-поляризациях оказываются близкими по величине, что свидетельствует о существенно небрэгговском характере рассеяния в областях обрушений, в областях вне гребней интенсивных ДВВ рассеяние приближенно можно охарактеризовать как близкое к брэгговскому. Величины доплеровских сдвигов в пиках для брэгговской компоненты ниже, чем для небрэгговской, из-за значительного вклада «медленных» брэгговских волн в доплеровский спектр брэгговского рассеяния. Показано также, что пленка приводит к подавлению интенсивности радиолокационного сигнала, причем степень подавления (контраст) брэгговской компоненты выше, чем небрэгговской, при этом увеличивается и разница в доплеровских сдвигах для двух компонент.

Положения, выносимые на защиту

1. Анизотропное растекание пленок в поле ветрового волнения обусловлено действием индуцированных напряжений, возникающих при распространении коротких ветровых волн в область пленки. При описании временной зависимости продольной оси пятна ПАВ необходим учет эффекта перетекания вещества с боковых частей разлива к его подветренной границе.

2. Специальная обработка – «отслеживания» локальных сликовых особенностей в дополнение к методу максимальной кросс-корреляции – позволяет более корректно восстановить скорости поверхностных течений по последовательным радиолокационным изображениям сложных сликовых структур.

3. Области высокой концентрации фитопланктона могут проявляться на поверхности воды в виде толстых биогенных пленок, которые наблюдаются на мультиспектральных изображениях как области повышенной яркости, в частности в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне, при этом интенсивность радиолокационного обратного рассеяния взволнованной поверхности воды снижается при увеличении концентрации фитопланктона.

4. Наличие пленки на морской поверхности увеличивает разницу между доплеровскими сдвигами для брэгговской и неполяризованной компонент, что объясняется сильным подавлением брэгговской ряби по сравнению с обрушающимися волнами.

Научная и практическая значимость результатов

Разработана физическая модель, описывающая динамику тонких пленочных разливов на морской поверхности, которая учитывает влияние ветровых волн на деформацию пленки. Данная модель поможет улучшить существующие модели, ориентированные на прогнозирование распространения антропогенных загрязнений.

Результаты, полученные в ходе натуральных экспериментов по исследованию взаимосвязи между интенсивностью обратного радиолокационного рассеяния поверхности водоема и концентрацией фитопланктона, а также из анализа спутниковых мультиспектральных изображений различных пленок на поверхности воды, могут быть полезны для развития методов экологического мониторинга внутренних водоемов и прибрежных зон океана.

Исследование взаимосвязи между геометрией сликовых структур на поверхности моря и структурой поля поверхностных течений может выступать основой для дальнейшего развития методов корректной интерпретации спутниковых изображений сложных сликовых структур.

Результаты радиофизических экспериментов по исследованию обратного радиолокационного рассеяния от морской поверхности в присутствии длинных ветровых волн, в частности, исследование вклада небрэгговской компоненты в радиолокационный сигнал и понимание механизмов образования этой компоненты будет полезно, например, для разработки улучшенной комбинированной модели обратного радиолокационного рассеяния.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных результатов подтверждается соответствием теоретических результатов с данными натуральных экспериментов, а также физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями.

Научные результаты, изложенные в диссертации, с достаточной степенью полноты опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и докладывались на ряде российских и международных конференций.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на:

- международной конференции SPIE Remote Sensing 2018, 2019;
- международном симпозиуме International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2020;
- конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2017–2022»;
- конференциях «Проблемы экологии Волжского бассейна – 2022»;
- школе-конференции «Нелинейные волны – 2020»;

- международной научной конференции «Наука будущего – наука молодых – 2021»;
- на семинарах ИПФ РАН.

Публикации по теме диссертации

Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 21 печатной работе, из них 13 в реферируемых журналах текущего списка ВАК, 1 статья в сборниках трудов конференций, 7 тезисов докладов.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации получены автором лично либо при непосредственном участии: проведение ряда натурных, в том числе подспутниковых, экспериментов и обработка полученных данных по растеканию пленочных разливов на поверхности воды, по исследованию взаимосвязи между концентрацией хлорофилла и радиолокационным сигналом и по модуляции радиолокационного рассеяния, вызванного ветровыми волнами; проведение и обработка данных лабораторных исследований влияния коротких ГКВ на деформацию пленки; разработка физической модели, описывающей растекание пленочных сликов на взволнованной поверхности воды; поиск, обработка и анализ спутниковых радиолокационных изображений сложных сликовых структур на поверхности моря и длинных ветровых волн в присутствии льда; интерпретация полученных данных.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объем диссертации – 113 страниц, включая 43 рисунка, 2 таблицы, список цитированной литературы, состоящий из 98 работ, и список работ по теме диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, обозначена новизна результатов диссертации и приведены положения, выносимые на защиту, обозначены научная и практическая значимость работы, описано краткое содержание работы.

Первая глава посвящена дистанционным наблюдениям тонких пленочных разливов на взволнованной поверхности водоемов и исследованию механизмов их растекания в поле ветровых волн.

В **разделе 1.1** обозначаются основные проблемы, связанные с дистанционным зондированием антропогенных загрязнений и прогнозированием их

распространения, в частности, на основе обзора литературы показано, что современные модели ориентированы в основном на прогнозирование растекания толстых нефтяных разливов, в которых процесс растекания пятен описывается аналогично растеканию пленки на спокойной не взволнованной поверхности воды, а воздействие волнения на такие загрязнения учитывается только для расчета дрейфа пятна как целого. Сформулирована постановка задачи.

В разделе 2.2 описана методика проведения натуральных подспутниковых экспериментов по растеканию пленок поверхностно-активных веществ с известными физическими характеристиками в поле ветровых волн; представлены полученные результаты, в частности, показан эффект вытягивания пленочных пятен по направлению ветра.

В разделе 2.3 приведено описание натуральных экспериментов, проводившихся на Горьковском водохранилище по растеканию пленок ПАВ, где геометрия пленок отслеживалась с помощью методики оконтуривания пятен на моторной лодке с GPS-приемником на борту. На основе полученных данных показано, что размер продольной относительно ветра оси пятен зависит от скорости ветра, в отличие от поперечной оси, которая от скорости ветра не зависит (рис. 1). Также показан разный характер растекания веществ с различными физическими характеристиками.

Раздел 2.4 посвящен описанию лабораторных исследований влияния коротких ветровых волн, затухающих в области пленки, на ее деформацию. Лабораторные эксперименты проводились в овальном ветроволновом бассейне ИПФ РАН, на поверхности воды в котором создавались пленки ПАВ. Источником поверхностных волн служил механический волнопродуктор. Амплитуды волн регистрировались струнными волнографами. Лабораторные эксперименты состояли из двух частей. Первая часть эксперимента заключалась в исследовании зависимости положения границы пленки относительно волнопродуктора от амплитуды волнения. Из анализа результатов данной части экспериментов показано, что положение границы пленки зависит от амплитуды набегающих волн, и чем больше эта амплитуда, тем сильнее смещается граница пленки от источника волнений. Вторая часть эксперимента заключалась в исследовании квазистационарного распределения концентрации пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне. Из исследования распределения КПН поверхности воды в присутствии квазистационарной поджатой пленки получено, что значения КПН в области пленки не постоянны.

В разделе 2.5 теоретически продемонстрировано влияние на динамику пленок напряжений, индуцированных ГКВ, в частности, возможность уравновешивания ими градиента поверхностного натяжения и формирования стационарной границы пленки, показано соответствие теоретических расчетов и результатов лабораторных экспериментов.

В разделе 2.6 предложена физическая модель, описывающая растекание пленочных сликов на поверхности воды в поле ветровых волн с учетом дей-

ствия дополнительных напряжений, индуцированных затухающими в области пленки ГКВ, которая описывает вытягивание этих пятен по направлению ветра. Растекание в предложенной модели описывается следующим образом:

$$\Delta\sigma - \alpha \frac{\mu\Delta l_i}{\tau\sqrt{vt}} \Delta l_i - \beta \overline{F_{ind}^1} \approx 0, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – давление пленки (разность между коэффициентами поверхностного натяжения для фоновой поверхности воды и для покрытой пленкой поверхности), α и β – эмпирические коэффициенты, Δl_i – приращения осей пятна в поперечном или продольном направлениях относительно ветра ($i = \perp$ или \parallel соответственно), μ и ν – динамическая и кинематическая вязкости воды, соответственно, F_{ind} – сила, обусловленная индуцированным напряжением.

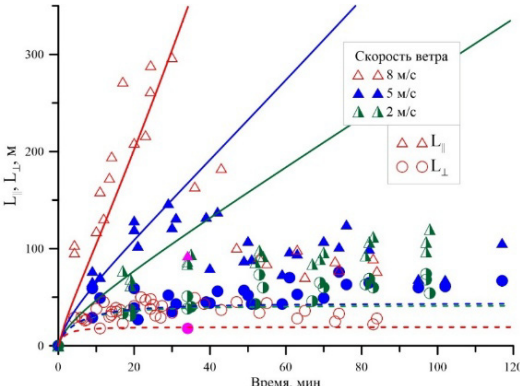


Рис. 1. Теоретические зависимости продольных (сплошные) и поперечных (поперечные) относительно направления ветра размеров пятна ПАВ в сравнении с экспериментальными данными (треугольники – продольная ось, круги – поперечная ось). Красный цвет – ветер 8 м/с, синий – 5 м/с, зеленый – 2 м/с

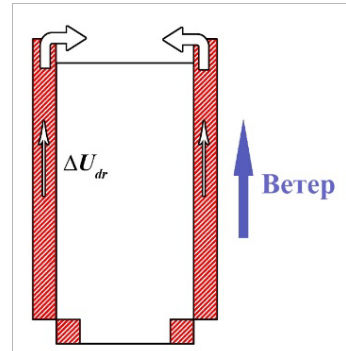


Рис. 2. Схематическое объяснение эффекта «перетекания» из-за индуцированных волновых напряжений

Для объяснения экспериментальных зависимостей продольных масштабов разливов от скорости ветра предложена гипотеза о перетекании вещества с боковых частей пятна пленки к его подветренной границе за счет действия продольных компонент индуцированного напряжения (рис. 2). Показано соответствие теоретических расчетов с данными натуральных экспериментов для начальных этапов растекания пленки (рис. 1).

Основные результаты первой главы изложены в работах [2*, 4*, 6*, 8*, 9*, 13*].

Во **второй главе** описано исследование геометрии сложных сликовых структур на поверхности моря, проявляющихся на спутниковых радиолокационных изображениях в виде темных нитевидных полос и ассоциирующих-

ся с биогенными пленками, и их взаимосвязь с полями поверхностных течений в данной области.

В [разделе 2.1](#) представлен обзор литературы по основным методам восстановления скоростей поверхностных течений моря с помощью методов спутникового дистанционного зондирования и по интерпретации сликовых структур на поверхности моря, которые часто ассоциируют с характерной структурой поля течений.

В [разделе 2.2](#) описаны анализируемые спутниковые радиолокационные изображения сложных сликовых структур на поверхности Балтийского моря.

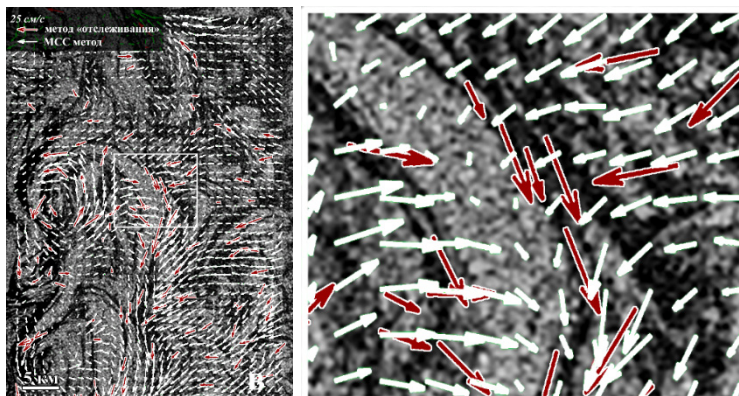


Рис. 3. Фрагмент радиолокационного изображения сложных сликовых структур на поверхности Балтийского моря, где приведены поле скоростей течений, восстановленное методом МСС (белые стрелки), и вектора, полученные методом «отслеживания» (красные стрелки) (слева). Увеличенная область, околонуриная белым на рисунке слева, показывает существенное расхождение результатов при использовании двух методов

[Раздел 2.3](#) посвящен описанию метода максимальной кросс-корреляция (МСС), используемого для восстановления поверхностных течений моря по последовательным радиолокационным изображениям сложных сликовых структур.

Полученные результаты и их обсуждение представлены в [разделе 2.4](#). Показано лишь частичное соответствие геометрии нитевидных сликов и структуры поля скоростей течения, несоответствие же объяснено нестационарностью течений и тем, что слики не могут мгновенно менять свою форму в зависимости от быстрых изменений условий окружающей среды. Показано, что еще одной причиной несоответствия сликовых полос с восстановленными скоростями течений и недостатком метода МСС является низкая точность определения компонентов скорости, направленных вдоль полосы слика. Для увеличения точности восстановленных течений методом МСС предложено дополнительное использование специальной обработки – «отслеживания»

локальных сликовых неоднородностей. Показано (рис. 3), что метод «отслеживания» отдельных сликовых структур, ориентированный на отслеживание смещения отдельных локальных особенностей, дает дополнительную информацию о смещениях, происходящих вдоль гладких сликовых полос, и позволяет улучшить достоверность восстановленных полей течений.

Основные результаты второй главы изложены в работах [5*, 7*, 10*].

Третья глава посвящена комплексному исследованию влияния фитопланктона на интенсивность электромагнитного излучения.

В **разделе 3.1** показана актуальность исследований взаимосвязи концентрации фитопланктона и интенсивности обратного радиолокационного рассеяния поверхности водоемов.

Раздел 3.2 посвящен описанию комплексных радиофизических исследований зон цветения фитопланктона, проводимых на Горьковском водохранилище в 2022 году, в том числе представлены мультиспектральные спутниковые данные, полученные с помощью Sentinel-2 MSI в момент проведения исследований.

В **разделе 3.3** представлены результаты комплексных исследований и показано, что в областях высокой концентрации фитопланктона возможно образование толстых биогенных пленок на поверхности воды, которые наблюдаются как на спутниковых мультиспектральных изображениях за счет сгустков

водорослей, так и в радиолокационных сигналах за счет гашения мелкомасштабной ветровой ряби в данных областях.

Раздел 3.4 посвящен сравнению спектральных контрастов плавающих на поверхности воды водорослей и пленок ПАВ, полученных в ходе анализа спутниковых мультиспектральных данных. Показано, что контрасты толстых биогенных пленок в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне существенно отличаются от тонких биогенных пленок и пленок ПАВ. При этом контрасты толстых биогенных пленок в коротковолновом инфракрасном

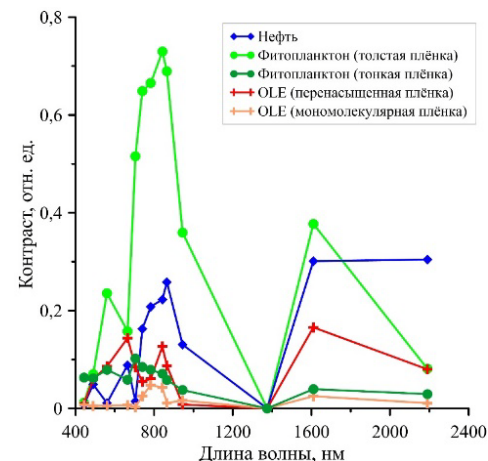


Рис. 4. Сравнение типичных спектральных контрастов толстых и тонких биопленок и ПАВ

диапазоне качественно сходны с нефтяными, а в ближнем инфракрасном диапазоне наблюдается их существенное различие (рис. 4).

Основные результаты третьей главы изложены в работе [1*].

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей радиолокационного рассеяния от обрушающихся длинных ветровых волн.

В **разделе 4.1** представлен краткий литературный обзор исследований, посвященных роли обрушающихся ветровых волн в формировании радиолокационного сигнала, сформулирована постановка задачи.

Раздел 4.2 посвящен описанию натуральных экспериментов по модуляции радиолокационного рассеяния, вызванного ветровыми волнами, проводимых на Черном море в 2018 году.

В **разделе 4.3** представлены теоретические основы по описанию радиолокационного обратного рассеяния взволнованной морской поверхности, в частности, описаны поляризованная (брэгговская) и неполяризованная (небрэгговская) компоненты.

В **разделах 4.4 и 4.5** представлены результаты натуральных экспериментов по исследованию изменчивости радиолокационного обратного рассеяния чистой поверхности моря и поверхности моря в присутствии пленок ПАВ, соответственно. Показано, что радиолокационное обратное рассеяние характеризуется модуляцией с периодами длинных (метровых) ветровых волн и наличием редких всплесков интенсивности, вносящих значительный вклад в радиолокационное обратное рассеяние. Интенсивности таких всплесков на VV- и HH-поляризациях близки по значениям, что указывает на то, что радиолокационное рассеяние в них можно считать практически неполяризованным.

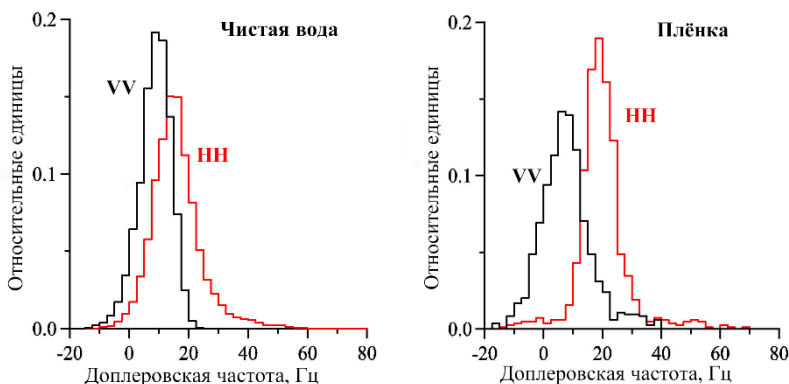


Рис. 5. Гистограммы доплеровских сдвигов для случая чистой воды (слева) и пленки (справа). Черным – VV-поляризация, красным – HH-поляризация. Скорость ветра 10 м/с, угол падения 60°

В анализируемом случае (угол падения 60°) основной вклад в брэгговскую компоненту вносит рассеяние на VV-поляризации, а в неполяризованную – на HH. В пленках брэгговская компонента гасится сильнее, чем непо-

ляризованная, однако наличие всплесков интенсивности схоже со случаем чистой воды.

В разделе 4.6 показаны доплеровские сдвиги VV- и HH-поляризованного обратного рассеяния чистой морской поверхностью и покрытой пленкой (рис. 5), из которых видно, что механизмы рассеяния на VV- и HH-поляризациях, а следовательно, и формирование брэгговской и небрэгговской компоненты в анализируемом случае различны. Показано, что присутствие пленки на поверхности воды приводит к увеличению разницы между доплеровскими сдвигами для брэгговской и неполяризованной компонент радиолокационного сигнала. Дано объяснение эффекта, основанное на том, что брэгговская компонента определяется сильно затухающими в области пленки «медленными» сантиметровыми волнами, а неполяризованная связана как с микрообрушениями сантиметровых волн, так и с сильными обрушениями «быстрых» волн метрового диапазона длин, на последние пленка практически не оказывает влияния.

Основные результаты четвертой главы изложены в работах [3*, 11*, 12*].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В ходе натуральных экспериментов, в том числе спутниковых, по растеканию разливов поверхностно-активных веществ (ПАВ) на водной поверхности в присутствии ветрового волнения впервые количественно изучен эффект вытягивания пленочных сликов в направлении скорости ветра. Показано, что продольный размер слика растет со временем и скорость этого роста зависит от скорости ветра, а поперечный по отношению к направлению скорости ветра размер слика от скорости ветра практически не зависит.

2. С использованием данных натуральных экспериментов по растеканию разливов ПАВ, а также результатов лабораторного моделирования эффекта формирования стационарной границы пленки за счет баланса градиента поверхностного натяжения и индуцированных гравитационно-капиллярными волнами напряжений разработана физическая модель анизотропного растекания пленок ПАВ на водной поверхности с учетом таких напряжений. В рамках данной модели ограничение скорости роста поперечного размера разлива ПАВ со временем определяется балансом поперечных компонент индуцированных напряжений и сил, связанных с градиентом поверхностного натяжения, а рост продольного масштаба описывается в рамках гипотезы о «перетекании ПАВ» с боковых частей слика к его подветренной границе под действием продольных компонент индуцированных волновых напряжений.

3. Из анализа смещений сложных сликовых структур по последовательным спутниковым радиолокационным изображениям морской поверхности, полученных с помощью метода максимальной кросс-корреляции, показано, что существенный недостаток данного метода связан с некорректной оценкой компонент скорости, направленных вдоль сликовых полос. Показано, что

использование специальной обработки – «отслеживания» локальных slick-овых неоднородностей в дополнение к методу максимальной кросс-корреляции – позволяет точнее восстановить поле скорости поверхностных течений.

4. В ходе комплексных радиофизических спутниковых экспериментов зарегистрированы проявления толстых биогенных пленок, формирующихся в зонах высокой концентрации фитопланктона, как областей повышенной яркости на оптическом спутниковом изображении, в том числе в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах. Показано, что контрасты толстых биогенных пленок в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах существенно отличаются от тонких биогенных пленок и пленок ПАВ. При этом контрасты толстых биогенных пленок в коротковолновом инфракрасном диапазоне качественно сходны с нефтяными, а в ближнем инфракрасном диапазоне наблюдается их существенное различие.

5. На основе анализа результатов выполненных натуральных экспериментов по наклонному радиолокационному микроволновому зондированию ветрового волнения при умеренных ветрах показано, что присутствие пленки на поверхности воды приводит к увеличению разницы между доплеровскими сдвигами для брэгговской и неполяризованной компонент радиолокационного сигнала. Дано объяснение эффекта, основанное на том, что брэгговская компонента определяется сильно затухающими в области пленки «медленными» сантиметровыми волнами, а неполяризованная связана как с микрообрушениями сантиметровых волн, так и с сильными обрушениями «быстрых» волн метрового диапазона длин, на последние пленка практически не оказывает влияния.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов, В. А., Показеев, К. В., Совга, Е. Е.* Загрязнение Мирового океана: учебное пособие. М.: Макс Пресс, 2006. 164 с.
2. *Лаврова, О. Ю., Мутягина, М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 3. – С. 48.
3. *Da Silva, J. C. B., Ermakov, S. A., Robinson, I. S., Jeans, D. R. G., & Kijashko, S. V.* Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf: 1. Short-period internal waves // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1998. – Т. 103. – № C4. – С. 8009–8031.
4. *Ermakov, S. A., Salashin, S. G., Panchenko, A. R.* Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation // Dynamics of atmospheres and oceans. – 1992. – Т. 16. – № 3–4. – С. 279–304.
5. *Gade, M., Byfield, V., Ermakov, S., Lavrova, O., & Mitnik, L.* Slicks as indicators for marine processes // Oceanography. – 2013. – Т. 26, № 2. – С. 138–149.

6. *Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G.* Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges // *Journal of marine science and engineering*. – 2021. – Т. 9. – № 2. – С. 181.

7. *Fay, J. A.* The spread of oil slicks on a calm sea // *Oil on the Sea: Proceedings of a symposium on the scientific and engineering aspects of oil pollution of the sea*, sponsored by Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution and held at Cambridge, Massachusetts, May 16, 1969. – Springer US, 1969. – С. 53–63.

8. *Hoult, D. P.* Oil spreading on the sea // *Annual review of fluid mechanics*. – 1972. – Т. 4. – № 1. – С. 341–368.

9. *Сутырина, Е. Н.* Дистанционное зондирование Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, – 2013. – 165 с.

10. *DiGiacomo, P. M., Holt, B.* Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2001. – Т. 106. – № C10. – С. 22521–22543.

11. *Lyzenga, D. R., Marmorino, G. O.* Measurement of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1998. – Т. 103. – № C9. – С. 18769–18777.

12. *Marmorino, G. O., Holt, B., Molemaker, M. J., DiGiacomo, P. M., & Sletten, M. A.* Airborne synthetic aperture radar observations of «spiral eddy» slick patterns in the Southern California Bight // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2010. – Т. 115. – № C5.

13. *Phillips, O. M.* Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves // *Journal of physical oceanography*. – 1988. – Т. 18. – № 8. – С. 1065–1074.

14. *Minchew, B., Jones, C. E., Holt, B.* Polarimetric analysis of backscatter from the Deepwater Horizon oil spill using L-band synthetic aperture radar // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2012. – Т. 50. – № 10. – С. 3812–3830.

15. *Kudryavtsev, V. N., Chapron, B., Myasoedov, A. G., Collard, F., & Johannessen, J. A.* On dual co-polarized SAR measurements of the ocean surface // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2012. – Т. 10. – № 4. – С. 761–765.

16. *Ermakov, S. A., Sergievskaya, I. A., Da Silva, J. C., Kapustin, I. A., Shomina, O. V., Kupaev, A. V., & Molkov, A. A.* Remote sensing of organic films on the water surface using dual co-polarized ship-based X-/C-/S-band radar and TerraSAR-X // *Remote sensing*. – 2018. – Т. 10. – № 7. – С. 1097.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А.* О проявлениях биогенных пленок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водо-

ема // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 5. – С. 273–284.

2*. *Вострякова, Д. В., Капустин, И.А., Лазарева, Т.Н., Даниличева, О.А., Ермаков, С.А.* Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 63–73.

3*. *Danilicheva, O., Sergievskaya, I., Ermakov, S., Shomina, O., Kupaev, A., & Kapustin, I. A.* study of relation between non-Bragg microwave radar backscattering and decimeter-scale wind waves // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2021. – SPIE, 2021. – Т. 11857. – С. 93–99.

4*. *Ermakov, S., Danilicheva, O., Kapustin, I., Shomina, O., Sergievskaya, I., Kupaev, A., Molkov, A.* Film slicks on the sea surface: their dynamics and remote sensing // IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2020. – P. 3545–3548.

5*. *Danilicheva, O. A., Ermakov, S. A., Kapustin, I. A.* Retrieval of surface currents from sequential satellite radar images // Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosm. – 2020. – V. 17. – P. 93–96.

6*. *Ermakov, S. A., Danilicheva, O., Kapustin, I., Leschev, G., Molkov, A.* Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2020. – V. 17. – № 6. – P. 97–102.

7*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Капустин, И. А.* О восстановлении поля поверхностных морских течений с использованием последовательных спутниковых радиолокационных изображений сликовых структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 206. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-206-214

8*. *Ермошкин, А. В., Капустин, И. А., Даниличева, О. А., Поплавский, Е. И., & Русаков, Н. С.* Исследование морфологических особенностей пленочных загрязнений на водной поверхности по данным радиолокационных наблюдений // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 64. – С. 48–57.

9*. *Ermakov, S. A., Danilicheva, O.A., Kapustin, I.A., Molkov, A.A.* Drift and shape of oil slicks on the water surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. – SPIE, 2019. – V. 11150. – P. 146–152. doi:10.1117/12.2533203

10*. *Danilicheva, O. A., Ermakov, S. A., Kapustin, I.A., Lavrova, O.Y.* Characterization of surface currents from subsequent satellite images of organic slicks on the sea surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. – SPIE, 2019. – V. 11150. – P. 377–383. doi: 10.1117/12.2533448

11*. *Sergievskaya, I. A., Ermakov, S.A., Ermoshkin, A.V., Kapustin, I.A., Molkov, A.A., Danilicheva, O.A., Shomina, O.V.* Modulation of dual-polarized X-

band radar backscatter due to long wind waves // Remote Sensing. – 2019. – V. 11. – № 4. – P. 423. doi:10.3390/rs11040423

12*. *Sergievskaia, I. A., Ermakov, S. A., Ermoshkin, A. V., Kapustin, I. A., Danilicheva, O. A.* Particularities of radar backscattering associated with wave breaking on the sea surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018. – SPIE, 2018. – V. 10784. – P. 139–145. doi:10.1117/12.2325708

13*. *Ermakov, S. A., Kapustin, I. A., Molkov, A. A., Leschev, G. V., Danilicheva O. A.* Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018. – SPIE, 2018. – V. 10784. – P. 117–122. doi:10.1117/12.2325745

14*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Капустин, И. А., Еρμοшкин, А. В., Лазарева, Т. Н., Лецев, Г. В., Доброхотова, Д. В., Сергиевская, И. А.* Проявление зон интенсивного цветения фитопланктона в радиолокационных сигналах при зондировании внутренних водоемов // Труды 7-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна». – 2022. – С. 1–4.

15*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Капустин, И. А., Еρμοшкин, А. В., Лазарева, Т. Н., Лецев, Г. В., Доброхотова, Д. В., Сергиевская, И. А.* Подспутниковые комплексные исследования зон цветения фитопланктона в Горьковском водохранилище // Тезисы докладов 20-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2022. – С. 156.

16*. *Даниличева, О. А.* Эволюция разливов поверхностно-активных веществ на морской поверхности. Теория и эксперимент. // Сборник тезисов докладов 4-й международной научной конференции «Наука будущего – наука молодым». – 2021. – С. 64.

17*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Капустин, И. А.* Деформация пленочных сликов на поверхности воды в условиях ветрового волнения // Тезисы докладов 18-й Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2020. – С. 205

18*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Мольков, А. А., Капустин, И. А.* Исследование динамики «точечных» разливов в условиях ветрового волнения // Тезисы докладов XIX научной школы "Нелинейные волны ". – 2020. – С. 97.

19*. *Даниличева, О. А., Ермаков, С. А., Капустин, И. А., Мольков, А. А., Дмитриева, М. С., Лецев, Г. В.* Исследование динамики разливов поверхностно-активных веществ в условиях ветрового волнения // Тезисы докладов 16-й Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2018. – С. 259.

20*. *Даниличева, О. А., Лазарева, Т. Н., Ермаков, С. А.* Лабораторное моделирование физического механизма воздействия волнения на границу пленочных сликов на водной поверхности // Тезисы докладов 15-й Всероссий-

ской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2017. – С. 246.

21*. Даниличева, О. А., Лазарева, Т. Н., Ермаков, С. А. Лабораторное исследование физического механизма воздействия волнения на структуру границы пленочных slickов на водной поверхности // Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. – 2018. – С. 405–407.

ДАНИЛИЧЕВА Ольга Аркадьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ПЛЁНОЧНЫХ СЛИКОВ
В ПОЛЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ
ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОМ
ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 24.06.2024 г.

Формат $60 \times 90^{1/16}$. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ № 33(2024).

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