

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ  
ФИЗИКИ ИМ. А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(ИПФ РАН)

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., Ермаков С.А.

Нижний Новгород – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Дистанционные наблюдения геометрии пленочных сликов на взволнованной водной поверхности и исследование механизмов растекания пленок в поле ветровых волн .....</b>	<b>18</b>
1.1. Введение.....	18
1.2. Спутниковые данные .....	25
1.3. Натурные эксперименты .....	29
1.4. Лабораторные исследования.....	33
1.5. Теоретический анализ.....	38
1.6. Приложение к натурным данным.....	40
1.7. Выводы к главе 1 .....	50
<b>Глава 2. Спутниковые наблюдения спиральных сликовых структур в приложении к восстановлению скоростей морских течений .....</b>	<b>52</b>
2.1. Введение.....	52
2.2. Радиолокационные спутниковые наблюдения.....	56
2.3. Метод максимальной кросс-корреляции .....	57
2.4. Результаты и обсуждение.....	60
2.5. Выводы к главе 2 .....	68
<b>Глава 3. Дистанционное зондирование биогенных плёнок на поверхности водоёма .....</b>	<b>69</b>
3.1. Введение.....	69
3.2. Натурный эксперимент.....	72
3.3. Результаты натурального эксперимента .....	74
3.4. Анализ мультиспектральных спутниковых изображений плёнок.....	78
3.5. Выводы к главе 3 .....	83
<b>Глава 4. Особенности радиолокационного обратного рассеяния морской поверхности, покрытой плёнками ПАВ .....</b>	<b>85</b>
4.1. Введение.....	85
4.2. Эксперимент .....	87
4.3. Теоретические основы .....	88
4.4. Чистая поверхность воды .....	90
4.5. Плёнки .....	93

4.6. Доплеровские сдвиги VV- и HH-поляризованного обратного рассеяния	96
4.7. Выводы к главе 4 .....	97
<b>Заключение.....</b>	<b>99</b>
<b>Список цитированной литературы .....</b>	<b>101</b>
<b>Список работ по теме диссертации.....</b>	<b>109</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

В настоящее время почти 20% площади Мирового океана [1] покрыто органическими плёнками. 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. тон.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к исследованиям геометрии slickов, 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 плёнок на поверхности воды остается довольно ограниченным, в частности ввиду явного недостатка данных по растеканию плёнок в натуральных 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 плёнки на спокойной, невзволнованной поверхности воды. Влияние же волнения на slick учитывалось при этом только при расчёте 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 плёнки.

Хорошо известно, что интенсивное “цветение” фитопланктона в водоёмах также приводит к образованию на поверхности воды пленок и, соответственно, к уменьшению интенсивности радиолокационного сигнала. Однако различение плёнок 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 плёнок, концентрацией фитопланктона и особенностями радиолокационного сигнала достаточно мало.

Один из способов различать биогенные плёнки, связанные с цветением фитопланктона, от антропогенных загрязнений “небольшого возраста” основан на анализе геометрии плёнок. Плёнки биогенного происхождения регулярно наблюдаются, в частности, на радиолокационных изображениях, в виде сложной структуры, распределённой 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 изменчивость брэгговской и небрэгговской составляющих обратного радиолокационного рассеяния, обусловленная пленками ПАВ, а в ссылках [15,16] подчеркивалась важная роль волновой нелинейности, в частности, микробрушений волны, при попытке описать уменьшение

обратного радиолокационного рассеяния, обусловленное наличием на поверхности воды плёнки. 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 плёнки на взволнованной поверхности воды, учитывающей влияние волнения на деформацию разлива; анализ взаимосвязи радиолокационного сигнала, концентрации фитопланктона и характеристик биогенных плёнок при зондировании внутреннего водоёма; 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 плёночных 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 коротки гравитационно-капиллярных волн на деформацию плёнки.

в) разработку физической модели, описывающей растекание плёночных сликов на взволнованной поверхности воды, учитывающей действие волнения на деформацию плёнки;

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 плёночных разливов в присутствии ветрового волнения показано вытягивание сликов по направлению ветра, при этом продольный размер пятна пленки сильно зависит от скорости ветра и растёт быстрее поперечного размера, который, в свою очередь, от ветра не зависит. Показаны различия в характере растекания плёнок с разными физическими характеристиками.

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

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

4. Из анализа данных комплексных радиофизических подспутниковых экспериментов по исследованию взаимосвязи между концентрацией хлорофилла и радиолокационным сигналом в исследуемом водоёме показано, что в областях высокой концентрации фитопланктона возможно образование толстых биогенных плёнок на поверхности воды, которые наблюдаются как на спутниковых мультиспектральных изображениях за счёт сгустков водорослей и частиц (пыли, цвета растений, пыльцы и др.), так и в радиолокационных сигналах за счёт 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 плёнок и плёнок ПАВ показано, что контрасты тонких биогенных плёнок в ближнем инфракрасном диапазоне близки к контрастам перенасыщенных (немономолекулярных) пленок ПАВ, а в коротковолновом инфракрасном диапазоне контрасты тонких биогенных плёнок, как и в случае мономолекулярных пленок ПАВ, близки к 1 и сильно отличаются от контрастов перенасыщенных плёнок ПАВ

6. Из анализа структур поверхностных течений, восстановленных по последовательным спутниковым радиолокационным изображениям сложных плёночных структур на поверхности моря с помощью метода максимальной кросс-корреляции, и сравнения этих течений с геометрией плёнок показано частичное соответствие геометрии снимков со структурой поля поверхностных течений. Такое неполное соответствие может быть обусловлено как нестационарностью течений, которые могут быстрее меняться во времени, чем снимковые структуры, так и низкой точностью определения компонентов скорости, направленных вдоль снимковых полос, что является недостатком метода максимальной кросс-корреляции. Показано, что использование специальной обработки - «отслеживания» локальных снимковых особенностей позволяет более корректно восстановить скорости поверхностных течений,

что приводит к лучшему соответствию геометрии сликов и структуры течений.

7. На основе анализа результатов выполненных натурных 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 плёнок в поле ветрового волнения обусловлено действием индуцированных напряжений, возникающих при распространении коротких ветровых волн в область плёнки. 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 плёнок, которые наблюдаются на мультиспектральных изображениях как области повышенной яркости, в частности в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах, при этом интенсивность радиолокационного обратного рассеяния взволнованной поверхности воды снижается при увеличении концентрации фитопланктона.

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

### **Научная и практическая значимость результатов**

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

Результаты, полученные в ходе натурных экспериментов по исследованию взаимосвязи между интенсивностью обратного радиолокационного рассеяния поверхности водоёма и концентрацией фитопланктона, а также из анализа спутниковых мультиспектральных изображений различных плёнок 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 натурных 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 ИПФРАН.

### **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 статьи 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 плёночных 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 плёнки; разработка физической модели, описывающей растекание плёночных 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 объем работы**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объем диссертации - 111 страница, 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 плёночных разливов на взволнованной поверхности водоёмов 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, и воздействие волнения на такие загрязнения учитывается только для расчёта дрейфа пятна. Сформулирована постановка задачи. В разделе 2.2 описана методика проведения натуральных подспутниковых экспериментов по растеканию плёнок поверхностно-активных веществ с известными физическими характеристиками в поле ветровых волн; представлены полученные результаты, в частности, показан эффект вытягивания плёночных пятен по направлению ветра. В разделе 2.3 приведено описание натуральных экспериментов, проводившихся на Горьковском водохранилище по растеканию плёнок ПАВ, где геометрия плёнок отслеживалась с помощью методики оконтуривания пятен на моторной лодке с GPS приёмником на борту. На основе полученных данных показана зависимость продольной относительно ветра оси пятен от скорости ветра, при этом рост поперечной оси от скорости ветра не зависит. Также показан разный характер растекания веществ с различными физическими характеристиками. Раздел 2.4 посвящен описанию лабораторных исследований влияния коротких ветровых волн, затухающих в области плёнки, на её деформацию, представлены полученные результаты. В разделе 2.5 теоретически продемонстрировано влияние на динамику пленок напряжений, индуцированных ГКВ, в частности, возможность уравнивания ими градиента поверхностного натяжения и формирования стационарной границы плёнки, показано соответствие теоретических расчётов и результатов лабораторных экспериментов. В

разделе 2.6 предложена физическая модель, описывающая растекание плёночных сликов на поверхности воды в поле ветровых волн с учётом действия дополнительных напряжений, индуцированных затухающими в области плёнки ГКВ, которая описывает вытягивание этих пятен по направлению ветра. Для объяснения экспериментальных зависимостей продольных масштабов разливов от скорости ветра предложена гипотеза о перетекании вещества с боковых частей пятна плёнки к его подветренной границе за счёт действия продольных компонент индуцированного напряжения. Показано соответствие теоретических расчётов с данными натурных экспериментов для начальных этапов растекания плёнки.

Во **второй главе** описано исследование геометрии сложных сликовых структур на поверхности моря, проявляющихся на спутниковых радиолокационных изображениях в виде темных нитевидных полос и ассоциирующихся с биогенными плёнками, и их взаимосвязь с полями поверхностных течений в данной области. В разделе 2.1 представлен обзор литературы по интерпретации сликовых структур на поверхности моря и по основным методам восстановления скоростей поверхностных течений моря с помощью методов спутникового дистанционного зондирования. В разделе 2.2 описаны анализируемые спутниковые радиолокационные изображения сложных сликовых структур на поверхности Балтийского моря. 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.

**Третья глава** посвящена комплексному исследованию влияния фитопланктона на интенсивность микроволнового излучения. В раздел 3.1 показана актуальность исследований взаимосвязи концентрации фитопланктона и интенсивности обратного радиолокационного рассеяния поверхности водоёмов. 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 плёнок на поверхности воды, которые наблюдаются как на спутниковых мультиспектральных изображениях за счёт сгустков водорослей, так и в радиолокационных сигналах за счёт гашения мелкомасштабной ветровой ряби в данных областях. Раздел 3.4 посвящен сравнению спектральных контрастов плавающих на поверхности воды водорослей и плёнок олеиновой кислоты, полученных в ходе анализа спутниковых мультиспектральных данных. Показано отличие между плавающими на поверхности воды водорослями и плёнками OLE, особенно в красном - ближнем инфракрасном диапазоне. Также проведено сравнение толстых /тонких биогенных плёнок, и перенасыщенных/мономолекулярных плёнок ПАВ.

**Четвертая глава** посвящена исследованию особенностей радиолокационного рассеяния от обрушающихся длинных ветровых волн. В раздел 4.1 представлен краткий литературный обзор исследований, посвященных роли обрушающихся ветровых волн на формирование 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 плёнок олеиновой кислоты, соответственно. В разделе 4.6 показаны доплеровские сдвиги VV- и HH-поляризационного обратного рассеяния чистой морской поверхностью и покрытой плёнкой, показано, что механизмы рассеяния на VV- и HH-поляризациях, а, следовательно, и формирование брэгговской и небрэгговской компоненты различны. Брэгговская компонента определяется гравитационно-капиллярными брэгговскими волнами, а основной вклад в небрэгговскую компоненту несут пики в радиолокационном сигнале, которые связаны с, движущихся быстрее ГКВ брэгговских волн.

В заключении приведены основные результаты работы.

# ГЛАВА 1. ДИСТАНЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЛЕНОЧНЫХ СЛИКОВ НА ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАСТЕКания ПЛЕНОК В ПОЛЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

## 1.1. Введение

Слики на морской поверхности – явление, которое неизменно привлекает внимание ученых и исследователей уже многие годы. Слики – это выглаженные области на поверхности воды, в которых, по каким-либо причинам отсутствует мелкомасштабное волнение. Три основные причины формирования таких областей, это:

- плёнки на поверхности воды;
- штиль, ветровые тени или области безветрия;
- поглощение коротких волн градиентами поверхностных течений, например, в случае внутренних волн, которые создают у поверхности моря поле течений, дивергентные и конвергентные компоненты которых поглощают и модулируют гравитационно-капиллярные волны, таким образом создавая на морской поверхности картину в виде чередующихся периодических полос с интенсивной мелкомасштабной рябью и без неё (сликовые области).

Наибольший интерес для исследования представляют плёночные слики, поскольку они являются одним из индикаторов экологического состояния морской среды и могут говорить о наличии загрязнений или повышенной биологической активности в наблюдаемой области.

Вещества, формирующие плёнки на поверхности воды можно разделить на две основные категории: естественные слики, которые уже образуются в море или же естественным образом попадают туда, и искусственные (антропогенные), поступающие в море в результате деятельности человека.

Естественные слики – в основном биогенные пленки, т.е. результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито и зоопланктона, а также бактерий, образуются в море как результат сложных

биохимических реакций в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов, и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова, однако их мониторинг помогает в исследовании областей с повышенной биологической продуктивностью, в том числе с жизненными циклами хлорофилла и активным цветением водорослей. Такие пленки сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превысит 5-7 м/с. Наличие slicks в виде пятен или полос свидетельствует также о неравномерном распределении ПАВ по поверхности моря [5], что связывают с наличием неоднородностей в поле скорости течений, например внутренними волнами [17,18], вихрями и различными циркуляционными процессами [12,19], конвективными движениями и т.п. Таким образом плёнки поверхностно-активных веществ хорошо маркируют динамические процессы, происходящие в поверхностном слое океана. Но бывают и естественные slicks не биогенного характера, а минерального, например, естественные выбросы нефти со дна, такие как грифоны и грязевые вулканы [20], естественные выходы углеводородов (метановые сипы) и т.д. Исследование естественных slicks, в частности их геометрии, дрейфа и влияния на ветроволновые процессы могут быть важны и для понимания многих динамических процессов, происходящих в океане.

Антропогенные загрязнения могут быть биогенными, например, отходы рыбопроизводства, так и минеральными – сырая нефть и нефтепродукты, которые возникают в море из-за сброса балластных вод, выносов нефти со стоком рек, промышленные и канализационные стоки, аварии на хозяйственных объектах [21]. Очевидно, что такие нефтяные загрязнения наносят невосполнимый ущерб окружающей среде, оказывают пагубное влияние на флору и фауну, особенно в прибрежных районах, в том числе влияют и на социальные процессы, нанося урон, например, индустрии туризма, что во всех случаях несёт огромные материальные потери. Поэтому прогнозирование распространений таких загрязнений является значимой задачей с экологической и финансовой точки зрения.

Для обнаружения и исследования пленочных загрязнений моря применяются пассивные и активные датчики в ультрафиолетовом (УФ), видимом, инфракрасном (ИК) и СВЧ диапазонах [9]. Применимость УФ-диапазона ограничивается областью 320–400 нм – т.е. областью, в которой излучение Солнца достигает Земли, не претерпевая поглощения озоном и кислородом атмосферы. Однако интенсивность такого излучения достаточно слаба, поэтому УФ-диапазон еще только осваивается для мониторинга верхних слоев атмосферы и самой Земли. Чаще для мониторинга Земли используют видимый и ИК диапазон, в которых пятна загрязнений на поверхности океана имеют более светлый тон по сравнению с незагрязненной поверхностью - при малой высоте солнца над горизонтом; в видимой области возможен темный тон пятен. Однако, использование видимого диапазона сильно ограничено временем суток (необходимо дневное освещение) и погодными условиями (отсутствие облачности). ИК-датчики могут работать как в дневное время, так и ночью, однако их показания также значительно искажаются при наличии облачности или осадков. Поэтому основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени ее загрязненности являются спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), что обусловлено их физическими и техническими особенностями:

- 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;

- 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;

- высокое пространственное разрешение современных космических РСА позволяет с необходимой точностью детектировать нефтяные загрязнения даже относительно небольшого размера и оценивать их параметры.

С помощью таких устройств возможно осуществлять локальный мониторинг районов морской нефтедобычи на шельфе, морских путей перевозки нефти, оперативно контролировать места аварий танкеров, экологическую обстановку во внутренних морях, в портах и в местах сброса сточных вод. Однако для решения задачи обнаружения и локализации нефтяных загрязнений на морской поверхности, а также для определения типа загрязнения на данный момент необходимо привлекать дополнительную информацию, поскольку визуальный анализ РЛИ не позволяет достаточно надежно классифицировать наблюдаемые пятна, а также отличить нефтяные слики от сликов биогенного происхождения.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к исследованиям геометрии плёночных сликов, в частности дистанционными методами, что связано с необходимостью в качественном прогнозировании распространения загрязнений такого типа, в том числе для оперативной организации работ по их ликвидации. Однако пятна, которые регулярно наблюдаются на аэрокосмических изображениях различных акваторий не поддаются детальному исследованию, поскольку такие выбросы зачастую были осуществлены в неизвестное время, часто с неизвестными физическими характеристиками и количеством вещества, кроме того, выброс вероятнее всего был не мгновенным и происходил, например, во время движения судна (рис.1.1).

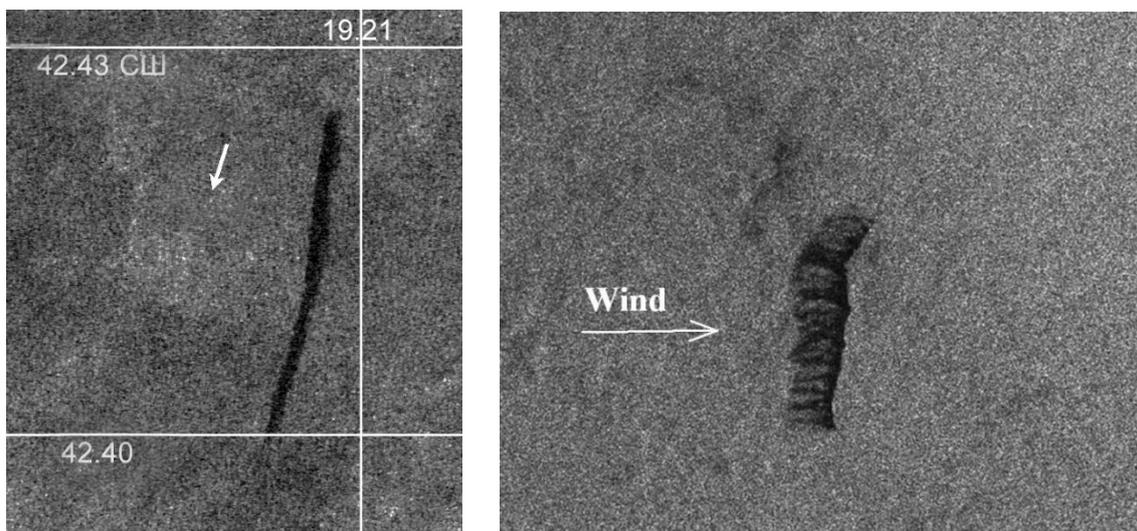


Рис. 1.1. Примеры спутниковых радиолокационных изображений плёночных сликов на поверхности воды (предположительно корабельные сбросы). Белые стрелки- направление ветра.

Для построения и валидации качественных физических моделей, описывающих деформацию и дрейф плёночных загрязнений на поверхности моря, существует необходимость в проведении контролируемых натуральных экспериментов с известными характеристиками вещества, детальной регистрацией формы, положения пятен и метеорологических условий. Очевидна сложность проведения таких комплексных натуральных исследований, что объясняет ограниченное количество работ в этой области. Основная сложность заключалась в точных измерениях размеров пятна, и только с развитием систем зондирования с воздушных носителей или из космоса стало возможным количественное изучение поведения плёночных разливов в море. Результаты крупномасштабных натуральных экспериментов по дрейфу и естественному растеканию нефтяных пятен были представлены в работах [22-24]. В работе [22] представлены результаты эксперимента по растеканию пятна сырой нефти объёмом  $\sim 150 \text{ м}^3$ , форма которого регистрировалась с аэронавигатора с помощью фотосъёмки в течении 4 дней. Наблюдения показали формирование вытянутого по направлению ветра пятна, основной размер которого линейно увеличивался со временем, а малый размер быстро

увеличивался в течение первых нескольких часов, но впоследствии оставался постоянным. В работе [23] представлены результаты экспериментов с меньшим объемом вещества (дизельного топлива), примерно 5 м<sup>3</sup>. Форма регистрировалась также с аэроносителя, но с помощью комбинированного ИК/УФ сканера, который способен наблюдать как толстые плёнки (ИК диапазона), так и области тонких плёнок (УФ диапазон). Некоторые разливы наблюдались более 30 часов и также характеризовались вытянутой формой по направлению ветра и квазипостоянным поперечным размером. Эксперименты, представленные в [24], проводились с тремя эмульсиями (объем 0.5 м<sup>3</sup>) с разными объемными долями нефти в них и растительным маслом (объем 0.2 м<sup>3</sup>). Форма регистрировалась с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой L-диапазона UAVSAR (длина волны 13 или 27 см в зависимости от режима съемки), установленном на аэроносителе. Пятна, как и в предыдущих экспериментах, характеризовались вытянутой по направлению ветра формой, однако последняя детально не изучалась, а основное внимание было уделено распределению по глубине веществ с разными физическими характеристиками. Характерная вытянутая форма пятен также наблюдалась в ряде работ, посвящённых перспективам использования оптических систем мониторинга водной поверхности, в частности ориентированных на детектирование загрязнений, в которых, для имитации загрязнений, использовалось небольшое количество растительного/оливкового масла (порядка 50 мл) [25,26].

Все представленные выше работы, описывающие контролируемые эксперименты по растеканию плёночных загрязнений на поверхности воды, не позволяют на их основе построить обобщённую модель растекания пятен, в силу единичности экспериментов. Поскольку известно, что на геометрию и дрейф сликов на поверхности воды влияет множество факторов и процессов, которые необходимо учитывать при прогнозировании их распространения, и к которым относятся, в частности, приповерхностный ветер, течения [27,28], поверхностные и внутренние волны [29], температура окружающей среды [30]

и пр. Эти факторы влияют на физико-химические процессы (растекание, испарение, растворение, эмульгирование) в пленке и, как результат, на ее характеристики (вязкость, плотность, поверхностное натяжение и т.д.) [31]. Поэтому для более детального понимания процесса деформации плёнок в реальных условиях и влияния на них различных метеорологических условий необходимо проводить регулярные эксперименты в квазистационарных условиях с изменением одного или нескольких параметров (физических характеристик вещества, скорости ветра или течений). Как например в работе [28], в которой описан ряд экспериментов по растеканию растительного мала (объем 340 мл). Исследования проводились в северной части Чёрного моря в районе пос. Кацивели в 2005-2007 году. Форма сликов регистрировалась с помощью фотокамеры, установленной на стационарной океанографической платформе МГИ РАН. В ходе работ анализировалась зависимость формы сликов (площадь, продольный размер) от скорости ветра, где было показано увеличение скорости роста продольного размера пятен от увеличения скорости ветра. Однако аналогичные эксперименты на данный момент достаточно редки.

В настоящий момент существует ряд моделей, прогнозирующих распространение нефтяных загрязнений в реальных условиях [6] в которых учитывается огромное количество 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 плёнки на спокойной не взволнованной поверхности воды. Влияние же волнения на слик обычно учитывается только при расчёте его дрейфа как целого, а вытягивание разливов по направлению ветра объясняется распределением скоростей ветрового течения по глубине [23], что может быть справедливо только для толстых плёнок, где вещество распределено в слое, превышающем толщину скин-слоя (порядка и больше см). Как было показано

в работе [28], эффект вытягивания разливов справедлив и для плёнок мономолекулярной толщины, однако, это не может быть объяснено сдвиговыми ветровыми течениями.

В настоящей работе представлены новые спутниковые данные, подтверждающие вытягивание мономолекулярных плёнок на поверхности воды по направлению ветра, полученные в ходе подспутниковых экспериментов. Представлены результаты новых натуральных экспериментов по растеканию разливов поверхностно-активных веществ на взволнованной водной поверхности. В ходе лабораторных работ показано влияние короткого ветрового волнения, затухающего в области плёнки, на её деформацию. Предложена физическая модель, основанная на действии дополнительных напряжений, индуцированных затухающими в области плёнки короткими волнами, объясняющая вытягивание плёночного пятна по направлению ветра.

## **1.2. Спутниковые данные**

Для исследования формирования геометрии плёночных сликов и подтверждения эффекта вытягивания тонких мономолекулярных плёнок на поверхности воды был проведён ряд подспутниковых экспериментов в период 2009-2022 гг. на Горьковском водохранилище, Нижегородская область, Россия. Исследования проводились в условиях открытой воды (летний период) при умеренных скоростях ветра (скорости 5-10 м/с). Разливы создавались мгновенным выливанием фиксированного количества вещества на поверхность воды с моторной лодки. В ходе экспериментов использовалось два вещества с известными физическими характеристиками, это олеиновая кислота (OLE) и растительное масло (VO), которые абсолютно безвредны для окружающей среды. Плёнки создавались за 20-40 минут до спутниковой съёмки, для того, чтобы слики успели приобрести характерную вытянутую форму, но еще не успели разрушиться под действием обрушений, биоразложения, перемешивания и т.д.

Эксперименты проводились под спутники с радиолокационными и мультиспектральными устройствами на борту, данные высокого пространственного разрешения (~10-30 м) которых находятся в открытом доступе: спутники семейства Sentinel [32] и Landsat [33]. Кроме того, проводились эксперименты под спутник TerraSAR-X.

Характеристики для используемых спутников [34] с радарными с синтезированной апертурой представлены в таблице 1, для спутников с мультиспектральными датчиками в таблице 2.

Таблица 1. Характеристики используемых спутниковых РСА.

Спутник	Инструмент	Диапазон съемки	Длина волны/ частота	Угол зондирования, град.	Пространственное разрешение	Поляризация
Sentinel-1	SAR	C	5,6 см /5.405 ГГц	15-45	10 м	VV+VH / HH+HV
TerraSAR-X	SAR-X	X	3,11 см /9.65 ГГц	20-55	1 / 3 / 16 м	VV / HH / HV / VH

Таблица 2. Характеристики используемых спутниковых мультиспектральных датчиков.

Спутник	Инструмент	Количество каналов	Ширина полосы	Пространственное разрешение
Sentinel-2	MSI (Multi-Spectral Imager)	13 (VIS / NIR / SWIR)	290 км	10 / 20 / 60 м (в зависимости от канала)

Landsat - 8/9	OLI (Operational Land Imager)	9 (VIS / NIR / SWIR)	185 км	30 м (панхроматический канал 15 м)
------------------	-------------------------------------	-------------------------	--------	--

На рис. 1.2 представлены оптические изображения, полученные в момент проведения натурных экспериментов с помощью спутника Sentinel-2A, за 24.06.2020 (слева) и 19.06.21 (справа). В ходе эксперимента за 24 июня были созданы три разлива растительного мала с одинаковым объемом вещества (500 мл) и разным временным интервалом до пролёта спутника с целью оценки изменения формы плёночного пятна со временем. Также были созданы два больших разлива из растительного мала (1 л) и олеиновой кислоты (1.5 л) для сравнения проявления плёнок с разными физическими характеристиками в оптическом диапазоне. Помимо искусственных разливов, на изображении наблюдаются тонкие полосы (более темные относительно фоновой воды) ориентированные вдоль ветра, маркирующие присутствие циркуляции Ленгмюра в водоеме. В ходе эксперимента за 19 июня были созданы четыре разлива: по два из растительного масла и олеиновой кислоты, объемом по 160 мл и 320 мл каждого вещества, для исследования растекания плёночных сликов с разным количеством и физическими характеристиками вещества. На изображении видно, что растекание веществ с разными физическими характеристиками принципиально разное. Стики олеиновой кислоты растекаются медленнее, чем плёнки растительного масла, при этом у подветренной части разливов OLE можно увидеть светлые области, что обычно связано с присутствием перенасыщенной плёнки в данной области.

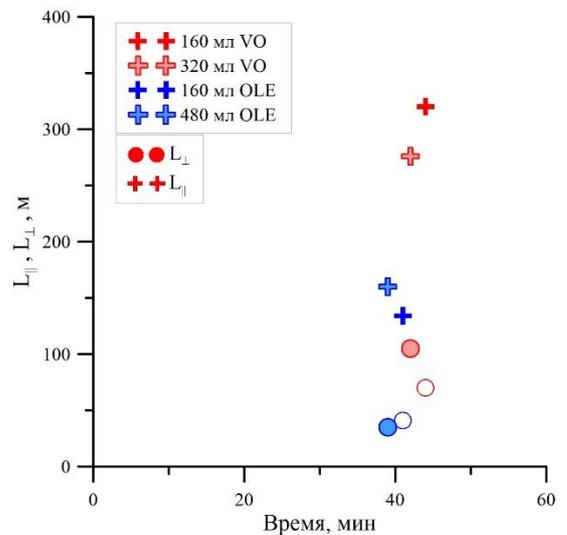
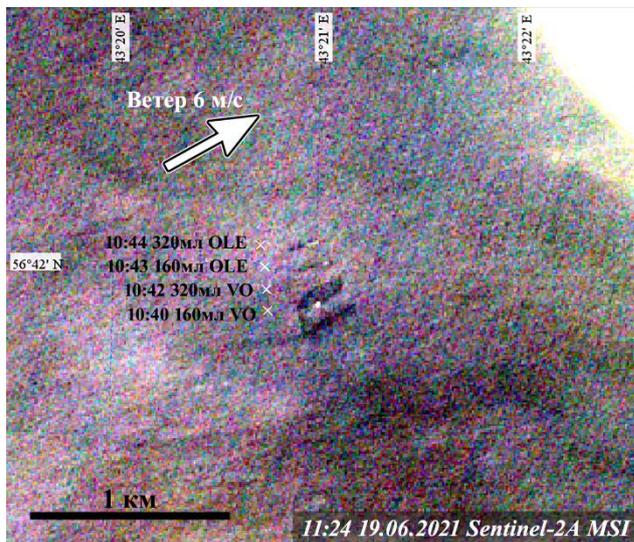
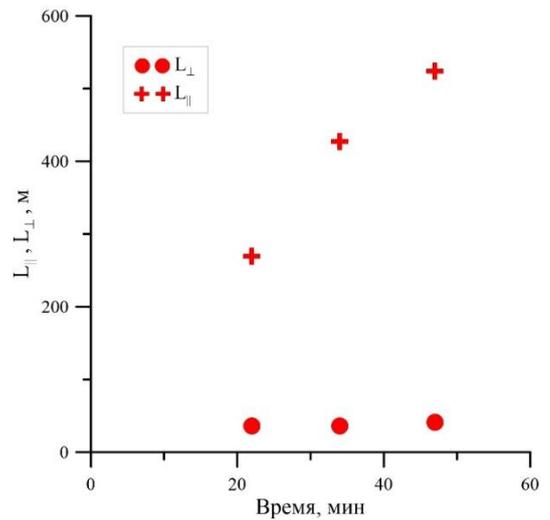
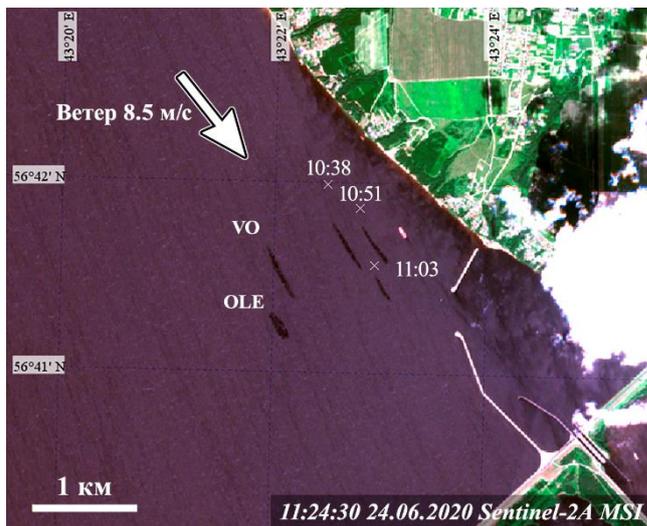


Рис. 1.2. (слева) Спутниковые оптические изображения в RGB представлении искусственных разливов, созданных в ходе натуральных экспериментов, полученных с помощью Sentinel-2 MSI за 24.06.2020 (сверху), за 19.06.2021 (снизу). (справа) Продольные и поперечные размеры разливов, наблюдаемых на изображениях слева, в зависимости от времени от начала разлива.

Пример спутникового радиолокационного изображения искусственных сликов, полученного в момент проведения натуральных экспериментов, представлен на рис. 1.3. Изображение получено 02.07.2009 в 18:35 по Московскому времени с помощью TerraSAR-X. Цель эксперимента аналогична эксперименту за 24.06.2020. Для создания каждого из искусственных сликов использовалось ~ 500 мл OLE.

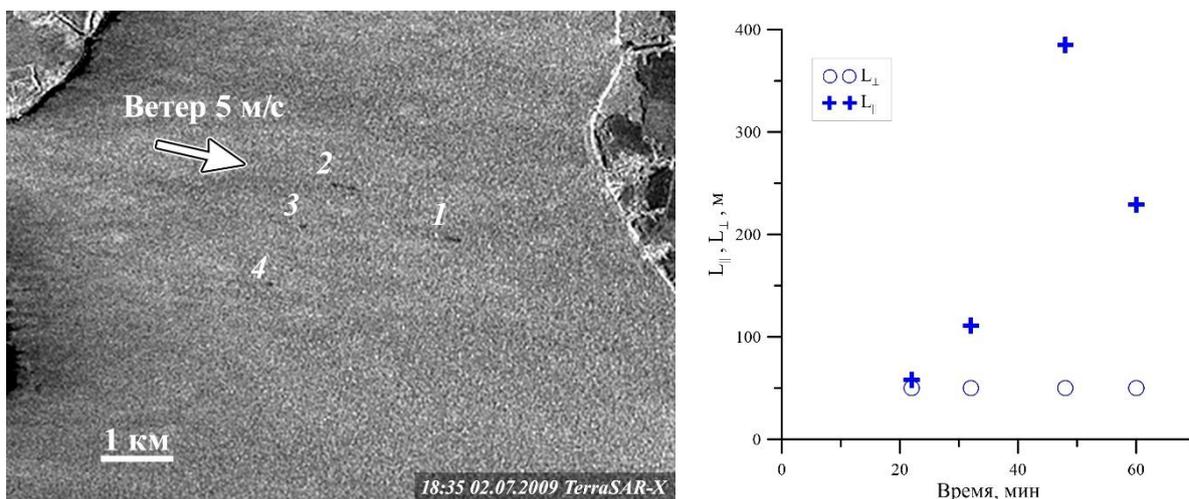


Рис.1.3. (слева) Спутниковое радиолокационное изображение искусственных разливов, созданных в ходе натуральных экспериментов, полученных с помощью TerraSAR-X за 02.07.2009 (сверху). (справа) Продольные и поперечные размеры разливов, наблюдаемых на изображении слева, в зависимости от времени от начала разлива.

Из анализа спутниковых данных, полученных в ходе проведения экспериментов, видно что плёнки, толщинами  $< 100$  нм, имеют квазиэллиптическую форму и вытянуты по направлению ветра. Размер разлива и его проявление, в частности на оптических изображениях, зависит от физических характеристик вылитого вещества. При этом, при длительном растекании порядка и больше часа, наблюдается уменьшение площади пятна, как в случае на рис. 1.3.

### 1.3. Натурные эксперименты

Для более детального исследования изменения формы плёночных разливов со временем на взволнованной поверхности воды был проведен ряд натуральных экспериментов на Горьковском водохранилище летом 2018-2022 гг. Аналогично подспутниковым экспериментам, описанным выше, на поверхность воды мгновенно выливалось фиксированное количество олеиновой кислоты или растительного масла для создания искусственных сликов. Такие слики хорошо наблюдаются на взволнованной воде из-за гашения коротких волн в области плёнки. Для регистрации формы пятен

использовался метод оконтуривания разливов на моторной лодке с GPS приёмником на борту. Точность данной методики была подтверждена в специальных, хотя и немногочисленных экспериментах с использованием аэрофотосъемки плёночных пятен с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Преимуществом аэрофотосъемки является то, что процедура неинвазивна. Однако возможности фотосъемки ограничены небольшим временем работы БПЛА (около 15 мин). Поэтому аэрофотосъемка использовалась в основном для проверки измерений, полученных в ходе оконтуривания пятен. Точность метода оконтуривания определяется:

а) ошибками определения координат с помощью GPS, которые на самом деле составляют не более 5 метров;

б) конечным временем оконтуривания одного пятна (в связи с деформацией пятна за время оконтуривания);

в) некоторым влиянием гидродинамических возмущений от катера на распространение пятна.

Тем не менее, было показано, что обе методологии согласуются друг с другом, по крайней мере, в пределах точности эксперимента.

Деформация пятна анализировалась на временных интервалах до 2 часов, продолжительность наблюдений сильно зависела от метеорологических условий; при скорости ветра более 7-8 м/с слики обычно разрушались и исчезали через час или меньше. Физические характеристики пленки олеиновой кислоты и растительного масла, такие как коэффициент упругости/поверхностного натяжения, были изучены до проведения экспериментов в лаборатории с помощью метода параметрически возбуждаемых волн [35]. Пленки OLE и VO за время растекания около 0,5-1 часа могут быть охарактеризованы как пересыщенные, т.е. как мономолекулярные пленки с микроскопическими каплями конечной толщины. Упругость и поверхностное натяжение таких гетерогенных пленок можно приближенно считать константами, где поверхностное напряжение для

OLE-пленок составляют около 32 мН/м и для VO около 40 мН/м, упругость 22 мН/м и 12 мН/м соответственно (см. [35]).

На рисунке 1.4 приведен пример контуров слика OLE, полученных с помощью метода оконтуривания, при разном времени растекания. Видно, что форма пятна сильно асимметрична - пятно вытянуто вдоль ветра, и форма характеризуется появлением подветренной "головы" и наветренного "хвоста".

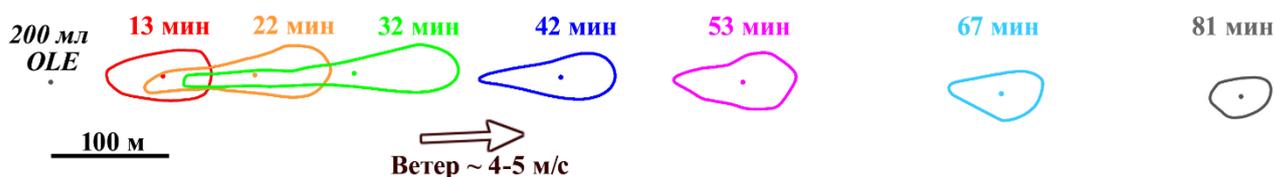


Рис. 1.4. Деформация плёнки OLE на поверхности воды со временем.

Результаты обработки данных экспериментов представлены на рисунке 1.5, иллюстрирующем продольные и поперечные масштабы пятен для нескольких OLE-сликов объёмом около 200 мл в зависимости от времени растекания при различных скоростях ветра.

На рисунке 1.6 представлены результаты обработки данных экспериментов (продольные и поперечный оси в зависимости от времени растекания) для сликов VO и OLE объёмом 200 мл при скорости ветра ~ 8 м/с, также представлены данные, полученный в ходе подспутниковых экспериментов.

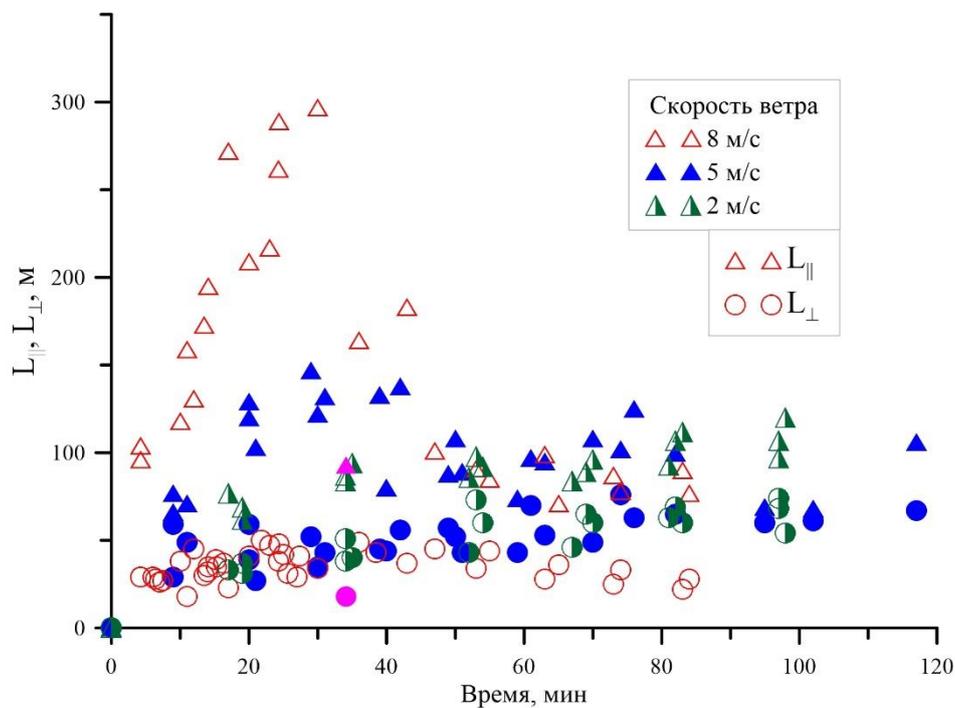


Рис. 1.5. Оси пятен OLE вдоль ветра (треугольники) и поперек ветра (кружки) в зависимости от времени растекания. Красный цвет - ветер 8 м/с, синий - 5 м/с, зеленый – 2 м/с, фиолетовые символы - аэрофотосъемка.

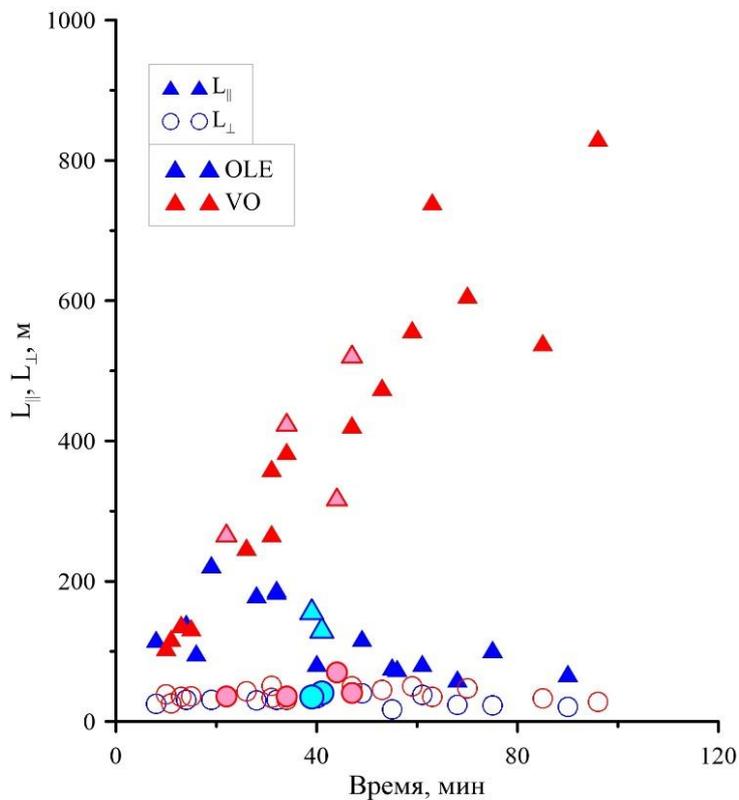


Рис. 1.6. Оси пятен OLE (синие) и VO (красные) вдоль ветра (треугольники) и поперек ветра (кружки) в зависимости от времени

растекания. Голубой и розовый цвета – данные подспутниковых экспериментов для сликов OLE и VO, соответственно.

Из рис. 1.5 и 1.6 видно, что ось, ориентированная вдоль ветра, увеличивалась со временем быстрее, чем ось, ориентированная поперек. Кроме того, продольная ось на начальной стадии растекания пятна сильно зависит от скорости ветра (рис. 1.5), и скорость роста оси быстро увеличивается со скоростью ветра. Поперечная же ось растёт со временем медленнее и слабо зависит от скорости ветра. На поздних стадиях растекания пленки продольная ось достигает максимума, а затем уменьшается, стремясь к значениям поперечной оси. Следует отметить, что начальный рост продольной оси и ее уменьшение на более поздних стадиях лучше наблюдался при сравнительно низких скоростях ветра, порядка 4-5 м/с; при более сильных скоростях ветра, например, 8 м/с, данных, демонстрирующих стадию сжатия, достаточно мало, что может быть связано с фрагментацией пятна из-за обрушения волн. Кроме того, из рис. 1.6 видно, что плёнки растительного масла достигают большего продольного масштаба, чем плёнки олеиновой кислоты, при этом скорость роста продольной оси для этих плёнок на начальных этапах растекания одинаковая.

#### **1.4. Лабораторные исследования**

Как говорилось ранее, в современных моделях, описывающих распространение нефтяных разливов [6], процесс растекания в основном описывается моделью Фэя [7,8] как осесимметричное растекание на спокойной невзволнованной поверхности. Волнение же учитывается через дрейф Стокса как дополнение к общему перемещению пятна и никак не влияет на деформацию его формы.

Для исследования влияния волнения на деформацию плёнки поверхностно-активных веществ на поверхности воды был проведен ряд лабораторных экспериментов в овальном ветроволновом бассейне ИПФ РАН

с двумя прямыми секциями, одна из которых, с геометрическими размерами 2 м в длину и по 30 см в широту и в глубину, являлась рабочей областью. Схема установки и вид сверху на рабочую секцию бассейна показаны на рис. 1.7.

По краям рабочей области устанавливались две наклонных плоскости, которые служили границей для локализации пленки и одновременно являлись волногасителями (коэффициент отражения волн не более 0.07). Источником поверхностных волн служил механический волнопродуктор, с помощью которого осуществлялась генерация волн частотой 4 Гц, амплитуды которых регистрировались струнными волнографами. Для создания пленок ПАВ использовались спиртовые растворы олеиновой кислоты (OLE), наносившиеся с помощью капельницы на поверхность воды.

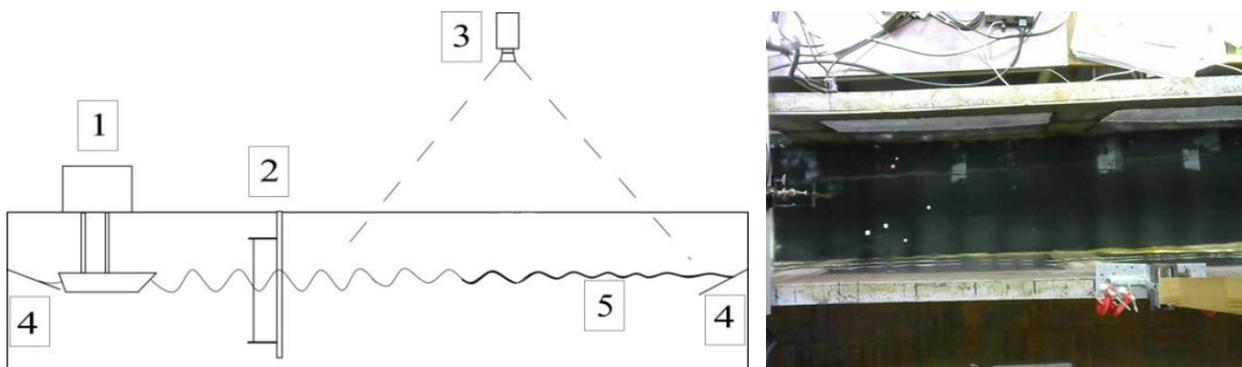


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки. Вид сбоку: 1 – волнопродуктор, 2 – волнографы, 3 – фото/видеокамера, 4 – волногаситель, 5 – пленка OLE (слева). Фотография – вид на бассейн сверху (справа).

Генерируемые поверхностные волны приводили к дрейфу пленки в направлении распространения волн и ее сжатию. В результате около волнопродуктора образовывалась очищенная от пленки область, а с противоположной стороны у волногасителя происходило концентрирование ПАВ. Для визуализации образующейся стационарной границы плёнки на поверхность воды наносились частицы (цветные бумажные частицы размером 5 мм и частицы талька), движение которых непрерывно регистрировалось

установленной над бассейном видеокамерой (см. фото на рис. 1.7 (справа)). Обработка видеозаписей включала в себя оцифровку траектории движения маркеров и распределения талька, по которым и определялась граница плёнки. На рис. 1.8 представлены характерные варианты распределения талька и траекторий частиц.

Первая часть эксперимента заключалась в исследовании зависимости положения границы плёнки относительно волнопродуктора от амплитуды волнения. Для более детального исследования зависимости изрезанности границы плёнки от амплитуды волнения использовалось три волнографа, равномерно распределённых поперек рабочей области. Положение границы плёнки и её форма рассматривались для трёх поверхностных концентраций олеиновой кислоты:  $1.27 \text{ мг/м}^2$ ,  $2.3 \text{ мг/м}^2$  и  $4.6 \text{ мг/м}^2$ .

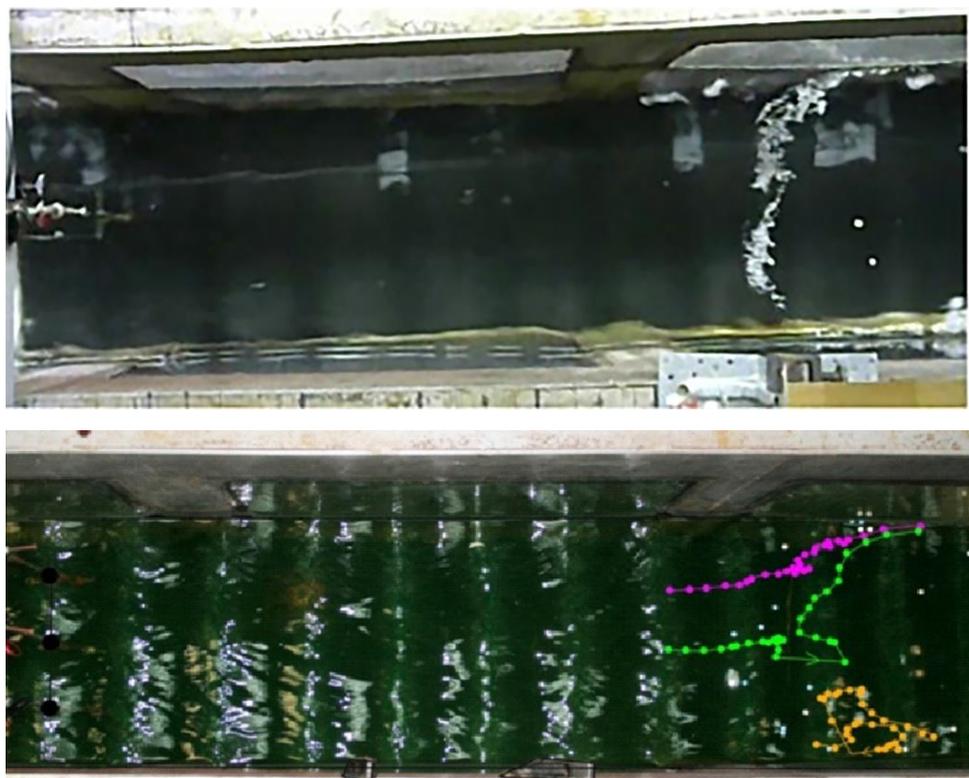


Рис. 1.8. Характерное распределение талька у границы плёнки (сверху), характерные траектории частиц, по которым определялась граница плёнки (снизу).

В результате обработки данных были получены следующие зависимости расстояния до стационарной границы плёнки от амплитуды для трёх разных поверхностных концентраций олеиновой кислоты (рис. 1.9).

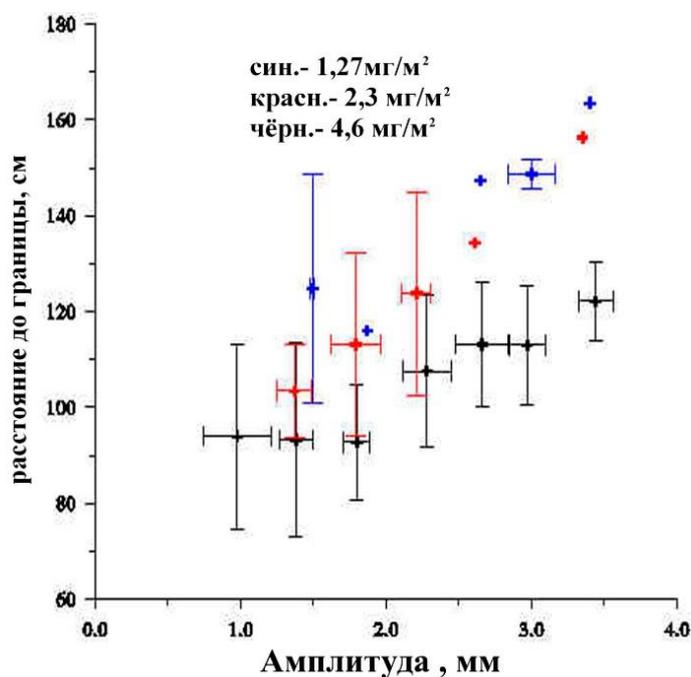


Рис. 1.9. Зависимости средних значений расстояния до границы плёнки от средних значений амплитуды для разных значений средней поверхностной концентрации.

Из этих зависимостей и из анализа траектории маркеров (рис. 1.10) видно, что положение границы плёнки зависит от амплитуды набегающих волн, и чем больше эта амплитуда, тем сильнее смещается граница плёнки от источника волнений.

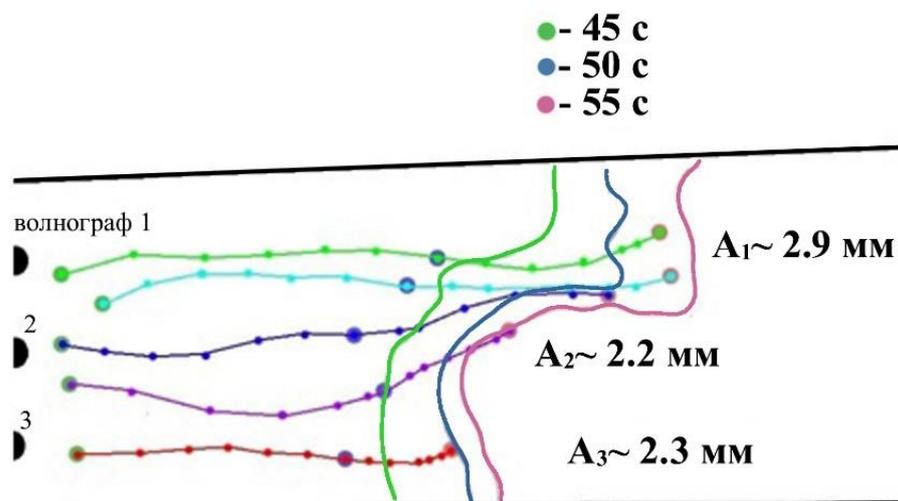


Рис. 1.10. Положение границы плёнки в разные моменты времени ( $A_1$  - средняя амплитуда, измеренная первым волнографом,  $A_2$  - вторым волнографом,  $A_3$  - третьим).

Вторая часть эксперимента заключалась в исследовании квазистационарного распределения концентрации пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне. В данном случае исследования проводились только с пленкой OLE с концентрацией  $0.51 \text{ мг/м}^2$ . Для анализа распределения концентрации ПАВ с поверхности воды, покрытой поджатой волнами пленкой, одновременно отбиралось 5 сеточных проб [35]. Далее взятые сетками образцы ПАВ смывались специально очищенным этиловым спиртом, и характеристики пленки ПАВ исследовались с помощью метода параметрически возбуждаемых волн [35]. В ходе этих исследований измерялись длины стоячих гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), параметрически возбуждаемых на поверхности воды в вертикально осциллирующей кювете - "ряби Фарадея". С использованием дисперсионного соотношения для ГКВ восстанавливались значения коэффициента поверхностного натяжения (КПН). Измерения производились для двух значений амплитуды волн:  $A = 0.17 \text{ см}$ ,  $A = 0.42 \text{ см}$ . На каждую амплитуду приходилось по две серии экспериментов с пробами. В ходе дальнейшей

обработки строились зависимости КПН от расстояния от границы поджатой пленки, определяемой по траектории маркеров.

В результате обработки поверхностных проб было исследовано стационарное распределение пленки ПАВ на поверхности воды в бассейне при различных амплитудах волн. Зависимости КПН поверхности от расстояния от границы пленки представлены на рис. 1.11. Ошибка определения границы пленки, возникающая вследствие ее изрезанности, не превышает 11%, ошибка определения КПН составила менее 15 %.

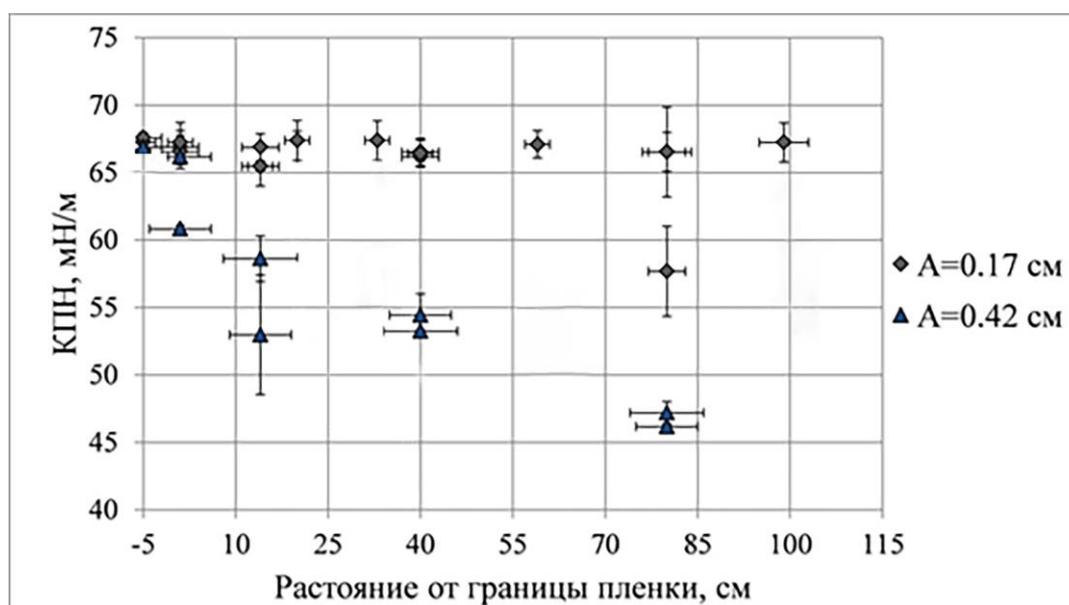


Рис. 1.11. Экспериментальные значения КПН в зависимости от расстояния от границы пленки. Частота волны 4 Гц, амплитуды:  $A = 0.17$  см (ромбы),  $A = 0.42$  см (треугольники).

На рис. 1.11 условной границе пленки отвечает расстояние 0 см. По мере распространения волн в область пленки наблюдается уменьшение КПН, что связано с ростом концентрации ПАВ за счет поджатия волнами.

### 1.5. Теоретический анализ

Из исследования распределения КПН поверхности воды в присутствии квазистационарной поджатой плёнки хорошо видно, что значения КПН в области плёнки не постоянны. Из-за стационарности границы можно сделать

предположение, что градиент поверхностного натяжения уравнивается силой, которая возникает как результат затухания волн в плёнке при их распространении в область пятна. Напряжение, возникающее при затухании в области плёнки волны с амплитудой  $A$ , частотой  $\omega$ , и волновым числом  $k_0$  согласно работе [36] может быть записано следующим образом:

$$\bar{\tau}_i = \frac{\mu\omega k_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x)}{\delta} \frac{\beta_0^2}{|\beta - 1 + i|^2} \left[ \frac{1}{\beta_0^2} - 2 \left( \frac{\kappa}{k_0} + k_0 \delta \right) \frac{1}{\beta_0} + 4k_0 \delta \right] \equiv T_0 |A|^2 \exp(-2\kappa x) \quad (1.1)$$

где  $\beta = \frac{2\mu\omega}{Ek^2\delta}$ ,  $k = k_0 + ik$ ,  $\kappa$  - коэффициент затухания волны в пространстве,  $\delta = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$  - толщина вязкого пограничного слоя в волне,  $\mu$  - динамическая вязкость,  $\rho$  - плотность воды,  $E$  - упругость пленки. Слагаемое  $4k_0\delta$  в (1) описывает компоненту напряжения для чистой поверхности воды (при  $E = 0$ ), он включает в себя дрейф Стокса и дрейф, вызванный вязким затуханием волны. Остальные члены в (1.1) описывают напряжение на поверхности воды, покрытой пленкой ПАВ.

Формирование локализованной в пространстве пленки можно описать исходя из следующего уравнения:

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} - \alpha \bar{\tau}_i(\sigma, E(\sigma), x, \dots) = 0, \quad (1.2)$$

где  $\sigma$  - КПН.

Выражение для давления пленки, т.е. разницы между КПН для чистой воды и для пленки, в явном виде можно записать следующим образом:

$$\sigma_0 - \sigma = \alpha \frac{T_0 A^2}{2\kappa} (1 - \exp(-2\kappa x)). \quad (1.3)$$

Здесь  $\sigma_0$  - КПН воды в отсутствие пленки. Для расчета теоретических зависимостей разницы КПН при  $A = 0.17, 0.35$  и  $0.42$  см использовались следующие значения параметров:  $f=4$  Гц,  $E=20$  мН/м (согласно [35]),  $\alpha=0.35$  - эмпирический коэффициент.

Теоретическая зависимость давления от расстояния от края пленки и сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 1.12. Линиями обозначены зависимости распределений давления пленки для трех амплитуд в зависимости от расстояния от границы пленки, рассчитанные в рамках описанной модели. Экспериментальные данные обозначены точками (треугольник – 0.42 см, ромб – 0.17 см).

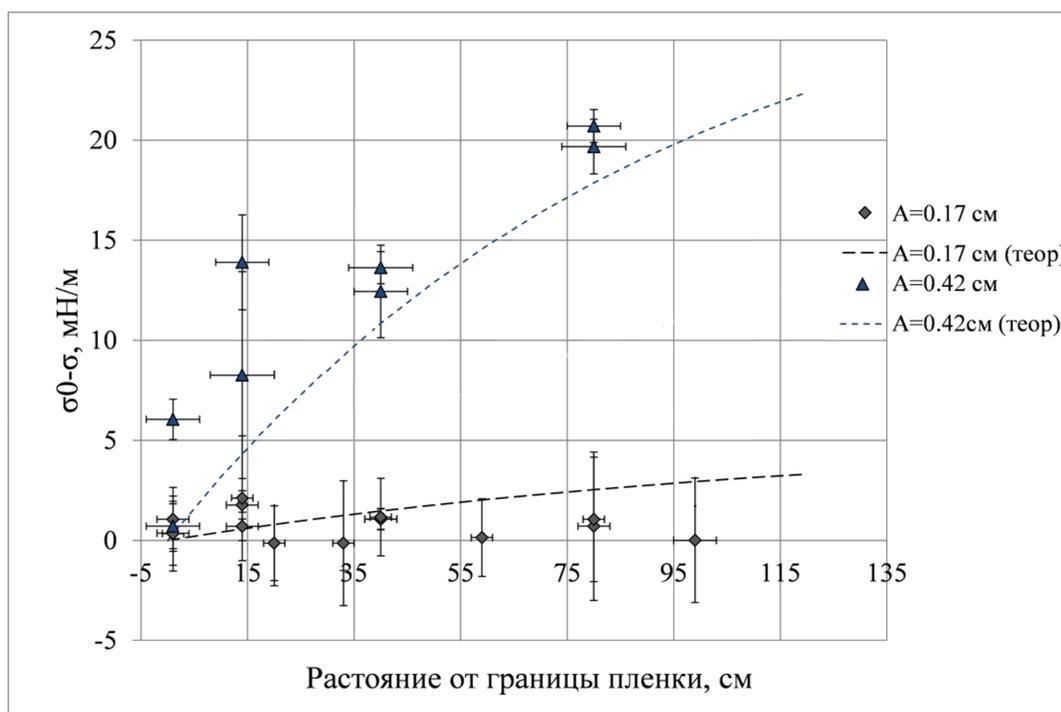


Рис. 1.12. Теоретические и экспериментальные зависимости давления пленки от расстояния от края пленки.

Как видно из рис. 1.12. модель удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

### 1.6. Приложение к натурным данным

Согласно модели Фэя [7] существует несколько режимов растекания нефти на поверхности воды, определяемых различными факторами: на начальных стадиях и при больших количествах нефти (порядка нескольких тонн) процесс растекания контролируется гравитационными/инерционными силами, на следующей стадии доминируют инерционные/вязкие силы, последняя стадия реализуется для тонких слоев нефти и эволюцию пятна

определяют поверхностное натяжение и вязкость. Для неограниченной поверхности на всех этих стадиях пятно имеет круглую форму и характеризуется различными режимами распространения во времени по разным законам, например, на стадии поверхностного натяжения радиус пятна растёт со временем по закону  $t^{3/4}$  и контролируется двумя силами: поверхностным натяжением и вязким трением (рис. 1.13 (слева)). Круглые пятна, однако, редко наблюдаются в естественных условиях. Регулярные наблюдения и представленные выше экспериментальные данные показывают, что пятна поверхностно-активных веществ обычно имеют эллиптическую форму, даже при слабом ветре, с длинной осью, направленной по ветру.

В лабораторных экспериментах было показано существование силы (рис. 1.12), возникающей при затухании волн в области плёнки, поэтому для объяснения эффекта асимметрии пленочных пятен была предложена модель растекания пленки, учитывающая действие этой силы. Модель основана на физическом механизме деформации пятна из-за поверхностного напряжения, вызванного поверхностными волнами, распространяющимися под углом к направлению ветра. Напряжение увеличивается в сликах из-за усиленного гашения волн, что приводит к уменьшению скорости растекания в направлении поперек ветра и на подветренной стороне слика в направлении по ветру. Кроме того, из-за индуцированного напряжения происходит дополнительный дрейф боковых частей пятна, параллельных направлению ветра, по ветру.

Процесс растекания пленки в нашей модели определяется балансом трех сил, которые определяются поверхностным натяжением, вязкими напряжениями в поверхностном пограничном слое и средними напряжениями, индуцированными поверхностными волнами (рис. 1.13 (справа)):

$$\Delta\sigma - \alpha \frac{\mu\Delta l_i}{t\sqrt{\nu t}} \Delta l_i - \beta \overline{F_{ind}^i} \approx 0, \quad (1.4)$$

где  $\Delta\sigma$  - давление пленки (разность между коэффициентами поверхностного натяжения для фоновой поверхности воды и для покрытой пленкой

поверхности),  $\alpha$  и  $\beta$  - эмпирические коэффициенты,  $\Delta l_i$  - приращения осей пятна в поперечном или продольном направлениях относительно ветра ( $i=1$ , или  $\parallel$ , соответственно),  $\mu$  и  $\nu$  - динамическая и кинематическая вязкости воды, соответственно.

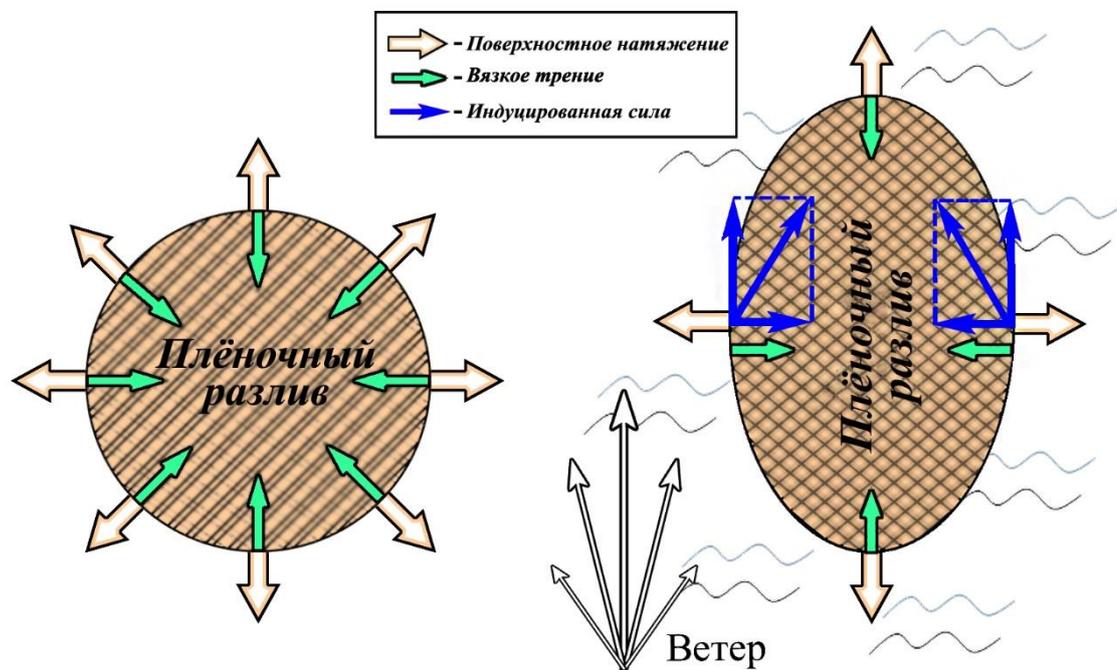


Рис. 1.13. Силы, действующие на плёнку на поверхности воды на спокойной невзволнованной поверхности воды (слева), на взволнованной поверхности (справа).

Первый, второй и третий члены в (1.4) обозначают силы поверхностного натяжения, вязкие и индуцированные поверхностные волны, соответственно. Можно увидеть, что уравнение (4) без учета индуцированной силы хорошо согласуется с законом роста радиуса пятна со временем по модели Фэя  $R \sim t^{3/4}$ .

Следует отметить, что давление пленки может зависеть от условий окружающей среды, в частности, от действия ветровых волн. Последнее приводит к образованию турбулентности и перемешиванию ПАВ вниз, в приповерхностные слои воды. Этот эффект может быть описан феноменологической зависимостью  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_0[1-f(V)]$ , где  $\Delta\sigma_0$  обозначает давление пленки, если пренебречь перемешиванием ПАВ из-за обрушения

волн,  $f(V)$  - эмпирическая функция, детерминированная относительной площадью обрушений,  $V$  - скорость ветра.

Для простоты рассмотрим далее прямоугольное пятно, а  $f$  примем равную 0 (т.е. взволнованная поверхность воды без обрушений)

### Поперечная ось

Сила, обусловленная индуцированным напряжением, действующая на небольшой элемент  $\Delta l_{\perp}$  единичной длины вдоль границы слика, может быть записана как

$$\bar{F}_{ind}^{\perp} = \iint \frac{T_0}{2\kappa} (1 - e^{-2\kappa\Delta l_{\perp}}) F(k, \varphi) k dk \sin \varphi d\varphi \approx \Delta l_{\perp} \cdot 1 \cdot \tau_{\perp}^0, \quad (1.5)$$

где  $\tau_{\perp}^0 = \iint T_0 F(k, \varphi) k dk \sin \varphi d\varphi$  обозначает компоненту волнового поверхностного напряжения, направленную поперек ветра,  $F(k, \varphi)$  - спектр ветровых волн,  $\varphi$  - угол между волновым вектором и скоростью ветра ( $T_0$  см. в (1.1)).

### Продольная ось

Для описания эволюции продольной оси пятна во времени отдельно рассматриваются динамика наветренной, подветренной границ и боковых частей пятна, выдвигается гипотеза о "механизме перетекания" вещества. Качественно предложенный механизм перетекания можно объяснить следующим образом. При расчете продольного масштаба пятна учитываются только индуцированные напряжения, действующие на наветренную границу и боковые части разлива. Для подветренной части слика индуцированные напряжения пренебрежимо малы, так как интенсивность ветровых волн в слике обычно на порядок меньше, чем за его пределами. В результате, подветренная граница пятна растекается в соответствии с моделью ФЭя.

Динамика наветренной границы пятна определяется действием поверхностного натяжения, индуцированных напряжений и сил вязкого трения и может быть описана аналогично растеканию поперечной оси пятна.

Сила, обусловленная индуцированным напряжением, действующая на небольшой элемент  $(\Delta l_{\parallel})_{up}$  с единичной длиной вдоль границы пятна при встречном ветре ( $up$ ), по аналогии с (1.5) может быть записана как

$$(\bar{F}_{ind}^{\parallel})_{up} \approx (\Delta l_{\parallel})_{up} \cdot 1 \cdot (\tau_{\parallel}^0)_{up}, \quad (1.6)$$

где  $\tau_{\parallel}^0 = \iint T_0 F(k, \varphi) k dk \cos \varphi d\varphi$ ,  $(\Delta l_{\parallel})_{up}$  приращение наветренной части пятна.

Боковые полосы разлива, параллельные направлению ветра, дрейфуют по ветру быстрее, чем основная часть пятна, из-за дополнительных сил, вызванных затухающими в области пятна волнами. Ширина боковых полос имеет порядок интегральной длины затухания  $1/k_{ef}$  коротких ветровых волн, на которые в основном влияет пленка (типичный диапазон длин волн около 1,5-30 см). Боковые полосы обгоняют основное тело пятна и "разворачиваются" к центральной оси пятна под действием поперечных компонент индуцированных напряжений и заполняют область перед подветренной границей. На рисунке 1.14 схематично показаны боковые полосы, на которые воздействуют компоненты волновых индуцированных напряжений.

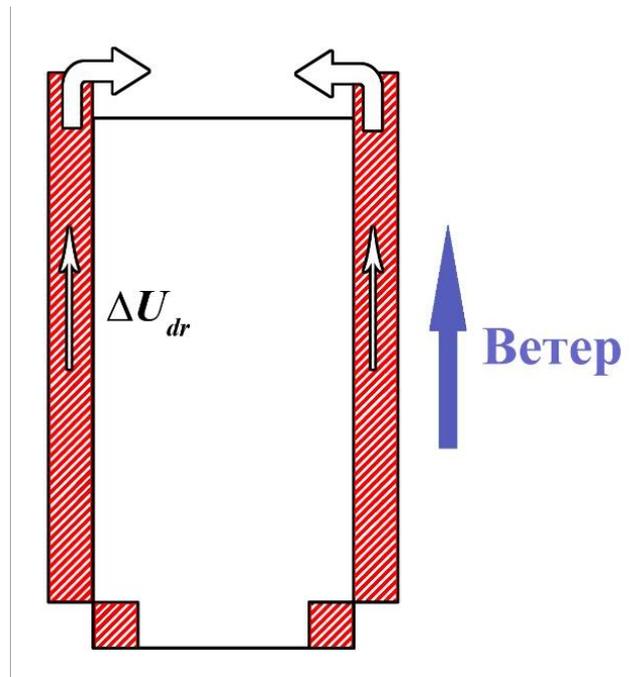


Рис. 1.14. Схематическое объяснение эффекта "перетекания" из-за индуцированных волновых напряжений.

Дополнительная скорость дрейфа  $\Delta U_{dr}$  боковых полос (sb) может быть оценена при приравнивании силы волнового воздействия  $(F_{ind}^{\parallel})_{sp}$  к силе трения, последняя может быть описана в рамках теории пограничного слоя для тонкой пластины как

$$\beta(F_{ind}^{\parallel})_{sp} L_{\parallel}^0 \approx 0.664\alpha\sqrt{\nu\rho \cdot \Delta U_{dr}^3 \cdot L_{\parallel}^0} \frac{1}{\kappa_{ef}}, \quad (1.7)$$

где  $(F_{ind}^{\parallel})_{sp} \approx \frac{1}{\kappa_{ef}} \cdot 1 \cdot (\tau_{\parallel}^0)_{sp}$ , (следует заметить, что  $(\tau_{\parallel}^0)_{sp}$  отличается от  $(\tau_{\parallel}^0)_{up}$  из-за разных угловых пределов при интегрировании спектра ветровых волн в (1.5)),  $L_{\parallel}^0$  - продольный масштаб без учёта эффекта перетекания.

Скорость наветренной границы  $\Delta U_{dr}^{down}$  с учётом эффекта перетекания может быть оценена из баланса поверхностно-активного вещества как

$$\Delta U_{dr}^{down} \cdot L_{\perp} \approx 2\Delta U_{dr} \cdot \frac{1}{\kappa_{ef}}. \quad (1.8)$$

Движение подветренной границы пятна определяется как растеканием за счет поверхностного натяжения по модели Фэя, так и эффектом перетекания. Таким образом, координата  $X_d$  подветренной границы имеет вид

$$X_d = X_0(t) + \int \Delta U_{dr}^{down} dt. \quad (1.9)$$

Где первый член в правой части уравнения (1.9) определяется моделью Фэя и растёт как  $t^{3/4}$ .

Продольный масштаб разлива может быть окончательно получен при вычислении координат подветренной (d) и наветренной (up) границ пятна,

$$L_{\parallel}(t) \propto X_d - X_{up} \approx Const + \sqrt{\frac{\Delta\sigma \cdot \sqrt{\nu}}{\alpha\mu} t^{3/4} + \int \Delta U_{dr}^{down} dt + \frac{\sqrt{\nu}}{2\alpha\mu} \left( \sqrt{\left( \beta(\tau_{\parallel}^0)_{up} \right)^2 t^3 + 4 \cdot \Delta\sigma \cdot \alpha \frac{\mu}{\sqrt{\nu}} t^{3/2}} - \beta(\tau_{\parallel}^0)_{up} t^{3/2} \right)} \quad (1.10)$$

Теоретические зависимости масштабов вдоль и поперек ветра от времени растекания показаны на рисунке 1.15 для скоростей ветра 2 м/с, 5 м/с и 8 м/с. Эмпирические коэффициенты в (4) были выбраны как  $\alpha=0.7$  и  $\beta=0.47$ . Кривые на рисунке 1.15 были построены для упругости  $E = 20$  мН/м и давления

пленки  $\Delta\sigma = 40$  мН/м, эти значения типичны для пленок OLE при достаточно высоких концентрациях около 2-3 мг/м<sup>2</sup> и более.

Для теоретического моделирования эволюции разлива использовался спектр ветровых волн в форме, предложенной в [37]. Угловая функция распределения волн в спектре ветровых волн принималась равной  $(\cos\varphi)^2$ . Интегрирование в (1.5) проводилось в диапазоне волновых чисел от 0,2 рад/см до 4,5 рад/см, (длина волны от 1,5 см до 30 см), т.е. по спектру коротких ветровых волн, на которые наиболее сильно влияет пленка. При расчете оси пятна в направлении поперек ветра учитывались симметричные индуцированные напряжения, действующие внутрь пятна.

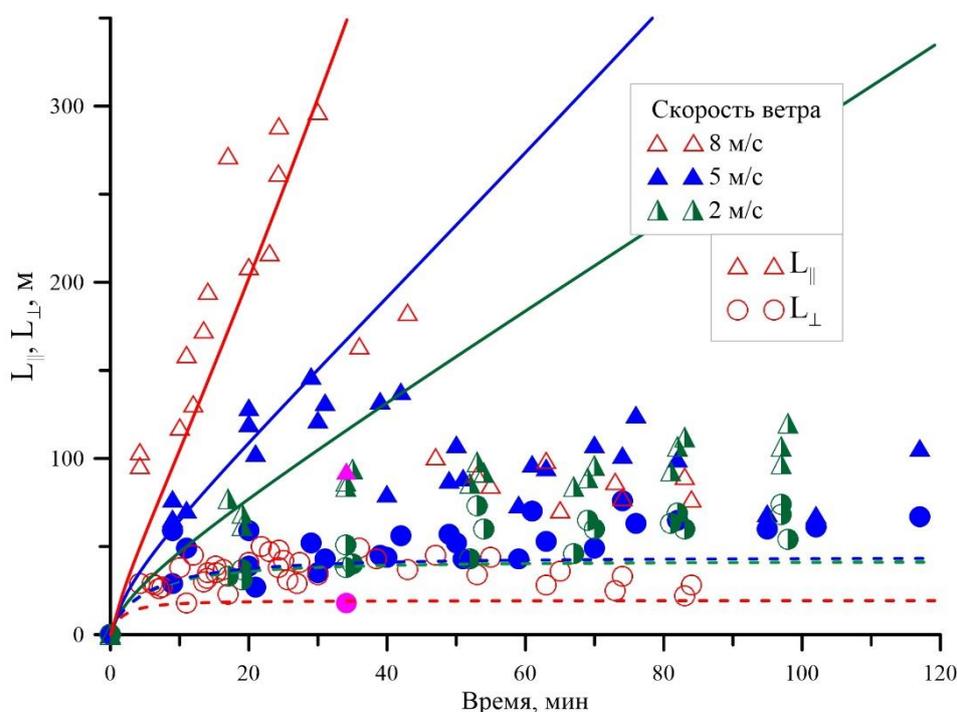


Рис. 1.15. Теоретические зависимости продольных (сплошные) и поперечных (поперечные) относительно ветра размеров пятна OLE в сравнении с экспериментальными данными на рис. 1.5. Красный цвет - ветер 8 м/с, синий - 5 м/с, зеленый – 2 м/с.

Видно, что теоретические зависимости на начальных этапах растекания удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Дополнительный (по сравнению с чистой водой) дрейф за счет ветроволновых напряжений может быть получен из расчёта перемещения координат центра тяжести пятна следующим образом:

$$\Delta U_{dr}^{add} = \frac{d}{2dt} (X_d + X_{up}) \quad ((1.11))$$

Теоретические зависимости скорости дополнительного дрейфа пятна от времени растекания представлены на рисунке 1.16.

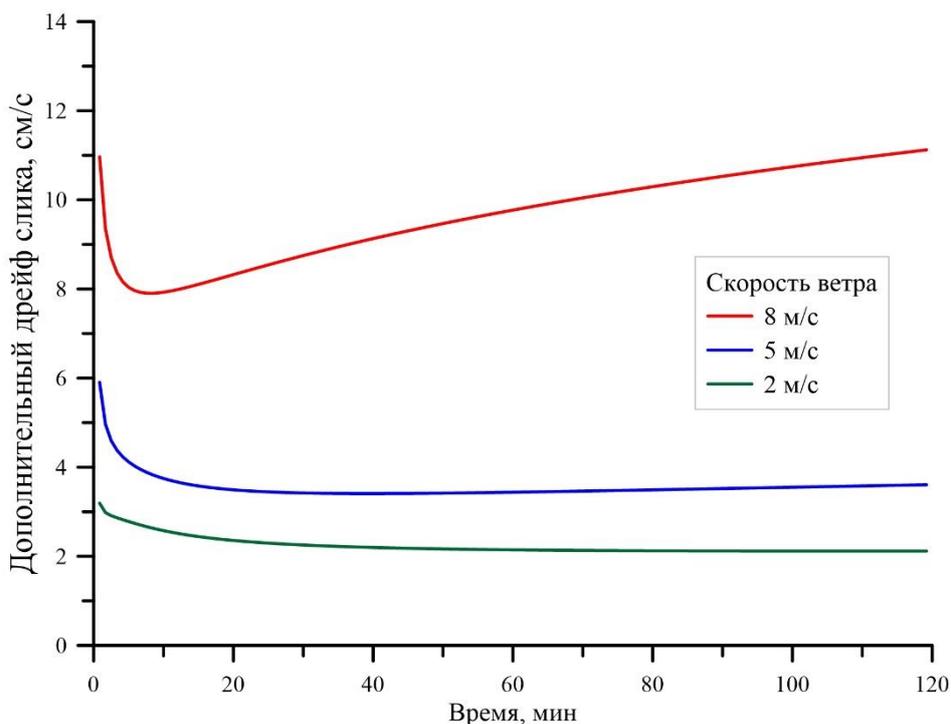


Рис. 1.16. Теоретические зависимости скорости дополнительного дрейфа пятна от времени растекания.

Существование дополнительно дрейфа сликов согласуется с гипотезой, упоминаемой в литературе [38], о том, что нефтяные пятна движутся быстрее, чем окружающий их микрослой чистой воды.

Следует отметить, что оценка дрейфа (1.11) может быть применена только в том случае, если поперечный размер пятна почти равномерен вдоль разлива, что происходит в основном при слабом ветре или при достаточно коротком времени растекания. Согласно предложенному механизму перетекания, перемещение боковых полос пятна по направлению ветра приводит к уменьшению ширины пятна на его наветренной стороне. Этот

процесс утончения наветренной части сликов схематически показан на рисунке 1.14 и может качественно объяснить наблюдения, демонстрирующие образование подветренной "головы" слика и его наветренного "хвоста" (рис. 1.4).

На рис. 1.17 представлены теоретические зависимости продольной и поперечной оси пятна от времени растекания в сравнении с экспериментальными данными для сликов OLE и VO при скорости ветра 7 м/с. Для расчётов использовались следующие значения упругости и давления плёнки: для плёнки OLE упругость  $E=20$  м Н/м, давление плёнки  $\Delta\sigma = 40$  мН/м (аналогично представленным выше зависимостям), для плёнки VO упругость  $E= 12$  мН/м,  $\Delta\sigma = 32$  мН/м, согласно [35].

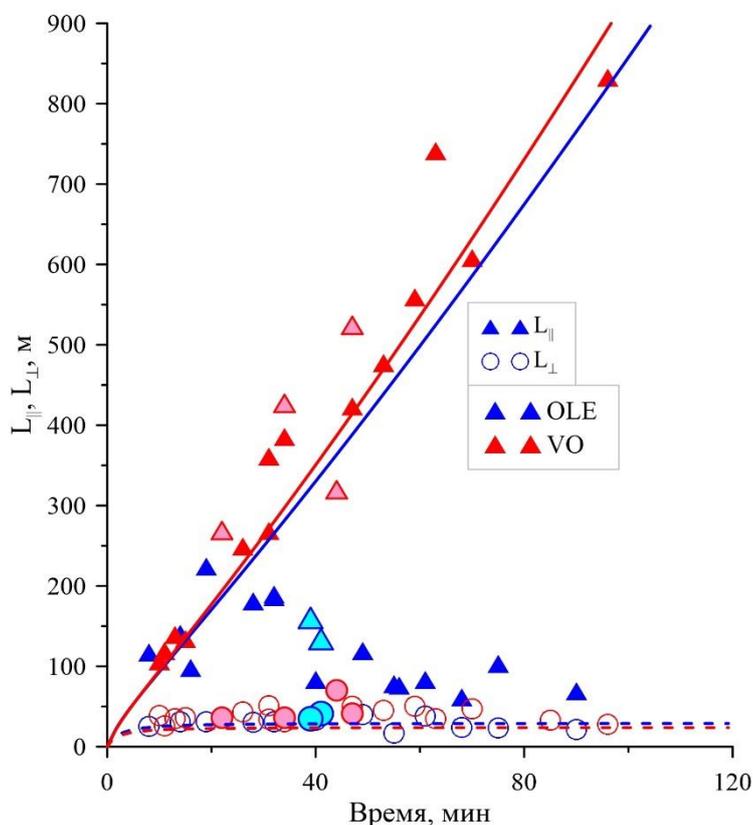


Рис. 1.17. Теоретические зависимости продольных (сплошные) и поперечных (поперечные) относительно направления ветра размеров пятна OLE (синие) и VO (красные) в сравнении с экспериментальными данными на рис. 1.6.

Из рис. 1.17 видно, что скорости роста осей для плёнок OLE и VO близки друг к другу и в теоретических расчётах, и в экспериментальных данных, что связано с близкими по значению физическими характеристиками плёнок. Однако, как показывает эксперимент, плёнки VO достигают больших максимальных размеров, что предположительно может быть связано с химическими свойствами разных веществ. Такое предположение было выдвинуто на основе регулярных визуальных наблюдений растекания плёнок. В ходе натурных экспериментов было замечено, что плёнки OLE растекаются неравномерно и внутри слика наблюдаются области с повышенной концентрацией ПАВ (рис. 1.18). Также неравномерное растекание плёнок OLE можно увидеть и на спутниковых изображениях (рис. 1.2), где повышенная концентрация ПАВ проявляется в виде светлой области в подветренной части слика. Растительное масло, в отличие от олеиновой кислоты, растекается равномерно и “сгустков” вещества внутри пятна не наблюдается.



Рис. 1.18. Снимок плёнки олеиновой кислоты, полученный в ходе натурных экспериментов на Горьковском водохранилище с помощью БПЛА.

Уменьшение размеров пятна на поздних этапах растекания на данный момент в модели не описывается, однако такое поведение может быть связано с изменениями физических характеристик вещества в ходе длительного растекания плёнки, в том числе за счёт наличия обрушений волн при умеренных и больших скоростях ветра, которые приводят образованию турбулентности и перемешиванию плёнки в поверхностном слое воды. Этот эффект может быть описан феноменологической зависимостью  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_0[1 - f(V)]$ , представленной ранее.

### **1.7. Выводы к главе 1**

Проведён ряд натурных, в том числе подспутниковых, экспериментов по растеканию тонких плёнок с известными физическими характеристиками на поверхности воды в присутствии ветрового волнения. Эксперименты проводились на Горьковском водохранилище и для создания сликков использовались растительное масло и олеиновая кислота. Форма разливов регистрировалась с помощью метода оконтуривания пятен на моторной лодке с GPS приёмником на борту. Получено, что поперечный относительно направления ветра размер пятна растёт медленно со временем и слабо зависит от скорости ветра. Продольный размер пятна растёт быстрее поперечного и зависит от скорости ветра: чем сильнее ветер, тем быстрее скорость роста продольной оси. В экспериментах с плёнками OLE и VO было получено, что скорости роста продольной/поперечной оси для веществ с разными, но близкими, физическими характеристиками близки между собой, однако пятно плёнки VO достигает больших продольных размеров, чем OLE.

В ходе лабораторных экспериментов по компрессии плёнки гравитационно-капиллярными волнами у препятствия, проводившихся в ОВВБ ИПФ РАН, было показано, что индуцированное напряжением, возникающее при затухании волн конечной амплитуды в области плёнки, уравнивает градиент коэффициента поверхностного натяжения, что приводит к образованию квазистационарной границы плёнки. Предложена

физическая модель, описывающая эволюцию плёночного пятна на взволнованной водной поверхности, основанная на действии силы, индуцированной набегающими в область плёнки ветровыми волнами. Механизм описывает асимметричное растекание плёнки на взволнованной поверхности воды, а именно вытягивание плёночных пятен по направлению ветра. Для объяснения полученных экспериментальных зависимостей продольного относительно ветра размера пятна от скорости ветра выдвинута гипотеза о механизме перетекания вещества. Этот механизм описывает движение поверхностно-активных веществ от боковых и наветренной сторон пятна к его подветренной границе под действием продольной компоненты индуцированной волнами силы. Механизм перетекания способствует дополнительному дрейфу плёночных пятен, что согласуется с гипотезой о том, что слики движутся быстрее, чем окружающий их микрослой чистой воды и может качественно объяснить образование подветренной “головы” и наветренного “хвоста” слика. Полученные теоретические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными на начальных этапах растекания, в том числе и при сравнении изменения размеров пятен плёнок с разными физическими характеристиками.

## ГЛАВА 2. СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПИРАЛЬНЫХ СЛИКОВЫХ СТРУКТУР В ПРИЛОЖЕНИИ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ СКОРОСТЕЙ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ

### 2.1. Введение

Естественные слики, которые являются результатом жизнедеятельности морских организмов и растений, сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 5-7 м/с. Наличие сликов в виде пятен или полос свидетельствует также о неравномерном распределении ПАВ по поверхности моря [5], что связывают с наличием неоднородностей в поле скорости течений, например внутренними волнами [17,18], вихрями и различными циркуляционными процессами [12,19], конвективными движениями и т.п. Если предположить, что морские слики переносятся поверхностными течениями как пассивное (или почти пассивное) вещество, то естественно использовать их в качестве маркеров течений в поверхностном микрослое. Отметим, что информация о течениях в микрослое особенно важна в контексте прогнозирования переноса загрязнений, будь то биогенные или антропогенные загрязнения.

Для получения информации о течениях в верхнем слое океана на большой акватории без проведения натурных измерений активно используются методы дистанционного зондирования. Например, наиболее распространенным методом измерения морских течений с масштабами в десятки и сотни км является спутниковая альтиметрия [39-41], которая характеризуется высокой точностью получаемой динамической топографии (до 1-2 см, по данным [42]). Скорости подповерхностных течений, океанических фронтов и мезомасштабных вихрей определяются на основе геострофического приближения [43]. Точность определения морских течений может достигать порядка см/с на масштабах в десятки км [44, 45], но эффективность методов альтиметрии географически ограничена, поскольку геострофическое предположение недействительно в экваториальной полосе

[46], кроме того, наиболее высокое пространственное разрешение получаемых течений с помощью методов альтиметрии на данный момент достигаются порядка 5 км и толщина слоя воды, для которого были восстановлены течения, неизвестна.

Другой известный способ получения данных о течениях в верхних слоях океана основан на сопоставлении последовательных спутниковых (или авиа) оптических, инфракрасных или радиолокационных изображений моря. Анализ смещения яркостных неоднородностей между последовательными кадрами позволяет получить поле горизонтальных скоростей верхних океанических течений. В литературе наиболее применяемыми методами такого анализа являются метод максимальной кросс-корреляции (МСС – Maximum Cross-Correlation) (см. [47-49] и указанные ссылки) и метод оптического потока [50, 51]. Поиск течений с помощью этих методов обычно выполняется посредством анализа дрейфа льда [49], яркостной температуры или распределения ее горизонтального градиента [47, 50], видимых неоднородностей верхнего слоя моря, таких как неоднородное распределение фитопланктона на оптических и ИК изображениях [51, 52] и пятна плёнок ПАВ на радиолокационных изображениях [12, 53].

Одним из важных недостатков оптических/ИК наблюдения является то, что они ограничены дневным временем и безоблачными условиями. Микроволновые радары, в частности радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), являются более перспективным инструментом как с точки зрения работы РСА в любую погоду, так и при любом освещении. Кроме того, благодаря тому, что на РСА изображениях отображаются именно поверхностные неоднородности морской поверхности, течения, восстановленные с помощью радиолокационных изображений этих неоднородностей (сликовых структур), соответствуют течениям в поверхностном микрослое моря. В случае с оптическими изображениями, толщина поверхностного слоя, для которого восстанавливаются течения, будет сильно зависеть от длины волны излучения и оптических свойств воды

в исследуемой области, поэтому, без дополнительных измерений, возможна лишь оценка толщины этого слоя.

Алгоритм МСС представляет собой метод блочного сопоставления, который определяет сходство между двумя последовательными парами изображений на основе анализа положения максимума кросс-корреляционной матрицы. Метод оптического потока первоначально возник в области компьютерного зрения и для его оценки широко используются дифференциальные методы. Для реализации метода оптического потока предполагается, что поток по существу постоянен в локальной окрестности рассматриваемого пикселя, и решаются основные уравнения оптического потока для всех пикселей в этой окрестности методом наименьших квадратов. Метод оптического потока считается более надежным и дает более высокое пространственное разрешение, чем метод МСС [54], особенно при смещениях порядка 1 пикселя или меньше. Однако при больших смещениях элементов между кадрами оба метода хорошо согласуются [55-57]. Поэтому, в случае смещения неоднородностей на расстояние больше 1 пикселя между последовательными кадрами, лучше подходит метод МСС, характеризующийся более простыми вычислениями.

В литературе геометрию сложных сликовых структур, характерное распределение фитопланктона или дрейфующего льда на спутниковых изображениях часто ассоциируют с характерной структурой поля течений, например, традиционный подход к интерпретации спиральных структур на спутниковых изображениях верхнего слоя океана основан на прямом приравнении внешнего масштаба спирали к масштабам океанического вихря. В [10, 58, 59] проведен анализ характеристик океанических вихрей в фиксированном регионе (направление вращения, распределение размеров вихрей, соотношения длин осей вихрей), который основан на интерпретации неоднородно распределенных пленок ПАВ или льдин, образующих спиральные структуры на радиолокационных панорамах морской поверхности.

Lyzenga и Marmorino проанализировали серию радиолокационных изображений сликков и сравнили полученное поле течений с измерениями ADCP [11]. Они обнаружили, что полученное и измеренное поля течения в целом соответствуют друг другу, но заметили, что ориентация полосовых сликков отличается от направления течения, измеренного ADCP, примерно на  $16^\circ$ . Позже в [12] было отмечено, что сликки указывают на области конвергенции и действуют как пассивные трассеры и могут быть использованы для картирования поля течения. Но векторы скорости течения, полученные в [11, 12], не вполне соответствовали геометрии сликковых структур. В работе [12] так же показано, что в одной из серий наблюдаемых "циклонических спиральных" сликковых структур, которые, по крайней мере, изначально напоминали спиральные вихревые течения, нет никаких свидетельств того, что реальные океанские вихри присутствовали ни на глубине или на поверхности моря. Таким образом, один из ключевых вопросов в контексте рассматриваемой проблемы заключается в том, отражает ли геометрия сликковых структур на поверхности моря геометрию линий течения или нет. Попытка оценить скорости течения по последовательным изображениям была также предпринята в [5], где была прослежена "грибовидная" (дипольная) плёночная структура на двух изображениях ASAR ENVISAT с разницей в 12 часов. Следует подчеркнуть, что полученные в [5] поля скоростей течений очень приблизительно соответствовали геометрии структуры пятна, аналогично тому, что было получено в вышеупомянутых работах. Возможная причина такого несоответствия может также заключаться в том, что временной интервал между получением изображений мог быть слишком большим, и за это время сликковая структура значительно изменилась.

Таким образом, можно сделать вывод, что необходимы дополнительные исследования, чтобы лучше понять, насколько хорошо морские сликки отслеживают поверхностные течения и насколько хорошо сликки могут быть использованы для количественного определения течений.

Ниже представлены новые результаты анализа двух последовательных изображений SAR, полученных с интервалом около 30 минут, целью которого является определение скоростей морских поверхностных течений и лучшее понимание связи между полем поверхностных течений и геометрией пятен.

## **2.2. Радиолокационные спутниковые наблюдения**

Проанализирована пара изображений морской поверхности, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой, расположенных на спутниках Envisat и ERS-2 Европейского космического агентства (ESA). Как известно, спутник Envisat (Environmental Satellite) был запущен в марте 2002 года. Он был оснащен ASAR - усовершенствованным радаром с синтезированной апертурой. Это устройство позволяло получать изображения с пространственным разрешением от 25 м до 150 м в диапазоне ширины полосы обзора от 56 до 400 км в зависимости от режима работы. Диапазон углов падения составлял от 15 до 45 градусов.

Спутник ERS-2 (European Remote Sensing) был запущен в апреле 1995 года. Он был оснащен AMI-SAR (Active Microwave Instrument Synthetic Aperture Radar) - микроволновым датчиком, сочетающим в себе возможности как радара с синтезированной апертурой, так и ветрового микроволнового скаттерометра. В режиме PCA аппарат позволял получать изображения подстилающей поверхности с полосой обзора шириной около 100 км с пространственным разрешением 25 м. Угол падения составлял 23 градуса. Envisat и ERS-2 летали на одной и той же околополярной солнечно-синхронной орбите. Оба радиолокатора работали в C-диапазоне (рабочая длина волны 5,66 см).

Были проанализированы два последовательных изображения юго-восточной части Балтийского моря в районе Гданьского залива, полученные 25.04.2009. Район исследования показан на рисунке 2.1 (слева). Первое PCA изображение (см. рис. 2.1 (справа)) было получено в 09:09:08 по UTC с помощью спутника Envisat ASAR в режиме WSM (Wide Swath Mode), второе

изображение было получено с помощью ERS-2 SAR IMM (Image Mode Medium resolution) в 09:40:49 UTC. Точечное разрешение обоих снимков составляет 75 м. Оба снимка демонстрируют обилие биогенных пятен и полос сложной формы.

По метеорологическим данным, полученным из данных реанализа NCEP, скорость ветра составляла около 5 м/с, направление ветра северо-северо-западное.

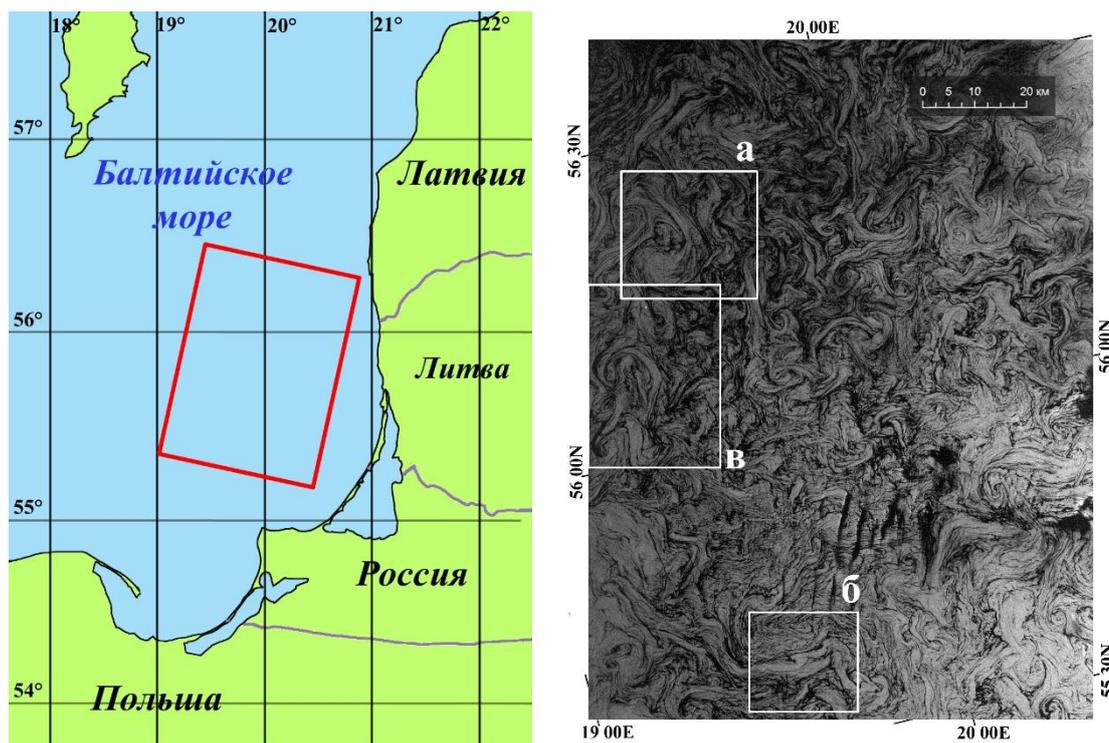


Рис. 2.1. Карта исследуемого района Балтийского моря, красный прямоугольник показывает местоположение снимка SAR (слева). ASAR-снимки Envisat, полученные в 09:09:08 GMT 25.04.2009 (справа). Масштабы снимков 100 км x 130 км.

### 2.3. Метод максимальной кросс-корреляции

Для получения поля скорости течений была использована методика МСС. Сликвые структуры, которые на изображениях наблюдаются в виде тёмных “нитеобразных полос”, использовались в качестве маркеров, смещения которых оценивались по последовательным снимкам РСА. Для применения метода МСС радиолокационные изображения были разделены на

множество небольших фрагментов - областей опроса, как схематично показано на рисунке 2.2. Размер фрагмента определял пространственное разрешение полученного поля скорости течения. Для определения смещения сликовых структур в пределах данного фрагмента на последовательных кадрах использовался метод максимальной кросс-корреляции. Этот метод можно описать следующим образом. Для определения наиболее вероятного смещения сликовых структур в пределах области исследования рассчитывалась функция взаимной корреляции между двумя последовательными фрагментами. Расположение максимума в корреляционной матрице соответствует наиболее вероятному смещению сликовых структур, то есть можно определить направление и скорость движения сликовых структур на поверхности воды. Схема алгоритма МСС представлена на рис. 2.2, фрагменты брались размером 32 x 32 пикселя (2.4 x 2.4 км) с шагом между центрами областей в 16 пикселей для перекрытия соседних подизображений на 50%. Такой шаг был выбран для получения дополнительной информации о смещении на границах и углах каждой области. Эта информация использовалась для учета дополнительных смещений и поворотов сликовых структур в анализируемом окне [60].

Размер окна был подобран исходя из оценок максимального смещения неоднородностей на полных изображениях и характерной ширины сликовых структур, кроме того существует потребность в лучшем разрешении восстановленного поля скоростей. Согласно оценкам, максимальная скорость смещения на полных изображениях достигала порядка 40 см/с, что соответствует смещению ~ 760 м за интервал между двумя кадрами, а ширины сликовых структур могли достигать 2 км. Для корректного восстановления скоростей размер окна должен быть больше максимального смещения неоднородностей и размеров самих неоднородностей, однако, для получения поля течений с наилучшим разрешением существует необходимость в использовании окна расчёта минимально возможного размера, что остановило нас на выборе окна 32 x 32 пикселей.

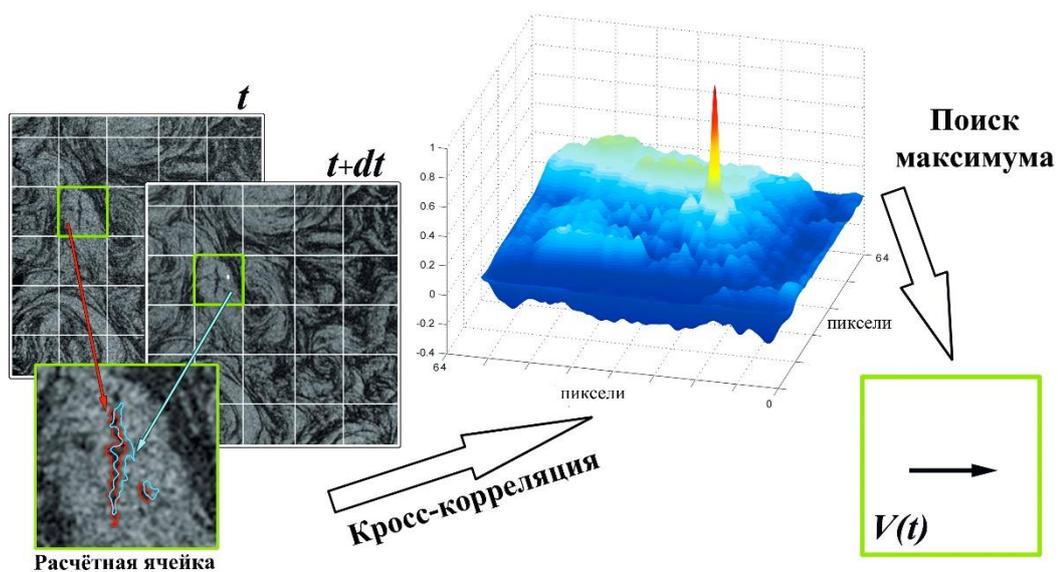


Рис. 2.2. Диаграмма, иллюстрирующая шаги алгоритма максимальной кросс-корреляции.

Преимущественно большое количество яркостных неоднородностей обеспечило существенно выраженный максимум кросс-корреляционной функции. Скорость в фрагменте считалась определенной, если коэффициент взаимной корреляции превышал 0.5, в фрагментах с корреляционным коэффициентом меньше 0.5 смещение оценивалось по интерполированным векторам. Чтобы получить более «конкретные» значения скорости при обработке, была выполнена 3-точечная гауссова субпиксельная оценка в окрестности максимального значения для обоих направлений смещения (рис. 2.3). Поскольку пространственная дискретизация кросс-корреляционной функции равна размеру пикселя, окончательная ошибка скорости, связанная с размером пикселя, может быть выражена как  $dV_{er} = 0.5$  размера пикселя/время между кадрами = 2 см/с [61]. Между снимками Envisat и ERS-2 также существует ошибка геопозиционирования. Эта ошибка была оценена как "смещение земли" между кадрами (см. также [42]). В идеале, кросс-корреляция над сушей должна показывать нулевые векторы скорости. Таким образом, векторы смещения земли показывают ошибку геопозиционирования между снимками. Ошибка была рассчитана как средняя величина векторов

перемещения земли при сравнении полных изображений, полученных со спутников Envisat и ERS-2. Ошибка геопозиционирования была оценена как 4 см/с.

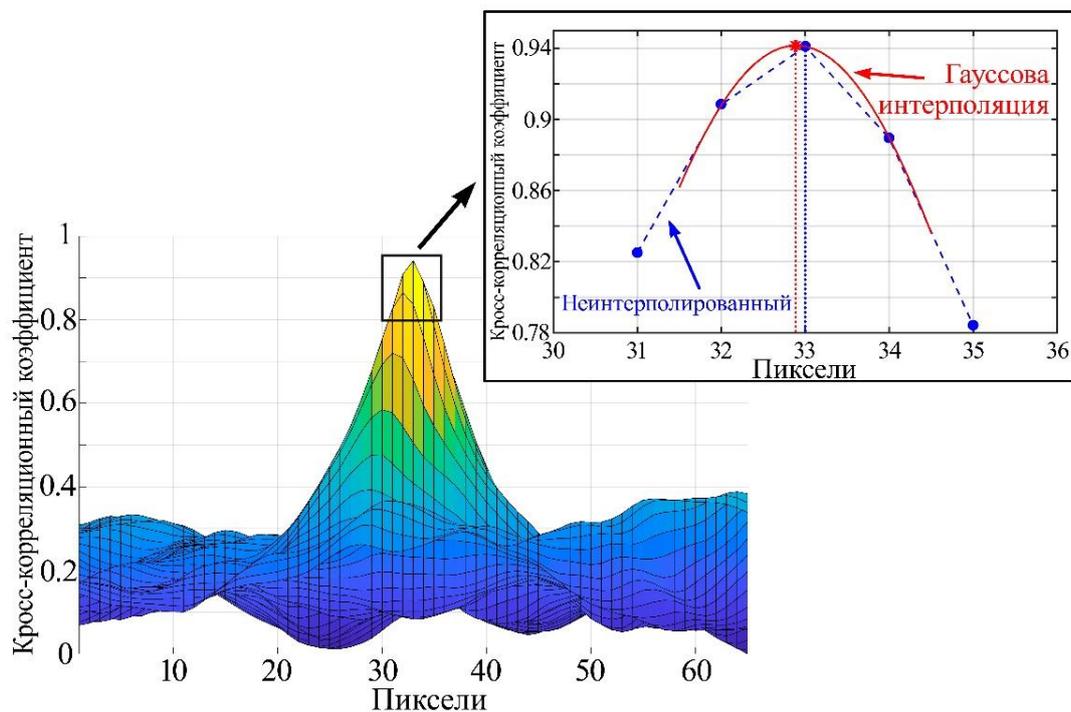


Рис. 2.3. Пример одномерного коэффициента взаимной корреляции.

#### 2.4. Результаты и обсуждение

Скорости поверхностных течений, полученные с помощью метода МСС для фрагментов изображений "а" и "б" (см. рис. 2.1 (справа)), представлены на рисунке 2.4.

Полученный диапазон величины скорости варьируется от 0 см/с до 35 см/с.

Размер используемых в МСС подизображений показан на рис. 2.4а красным контуром.

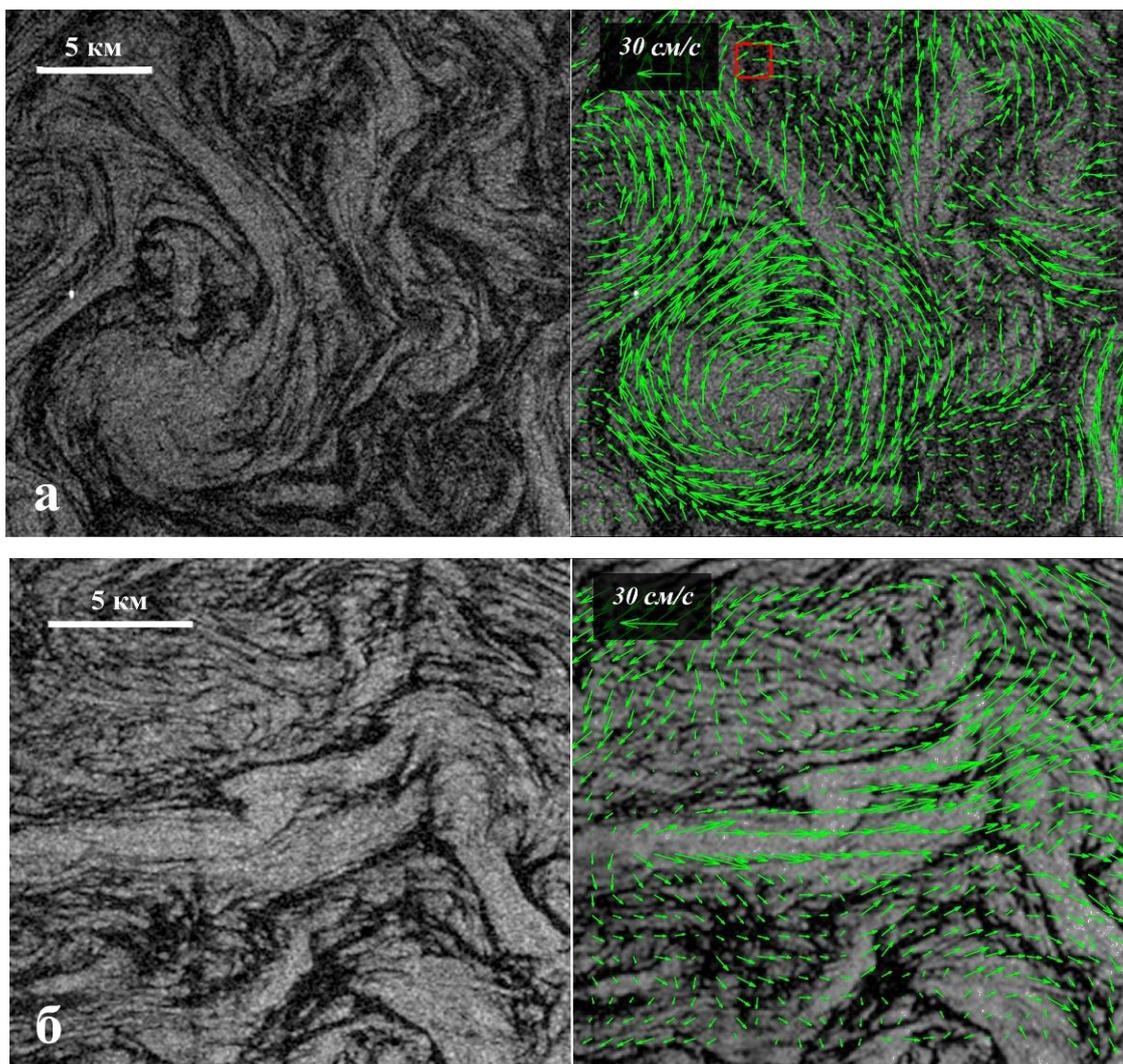


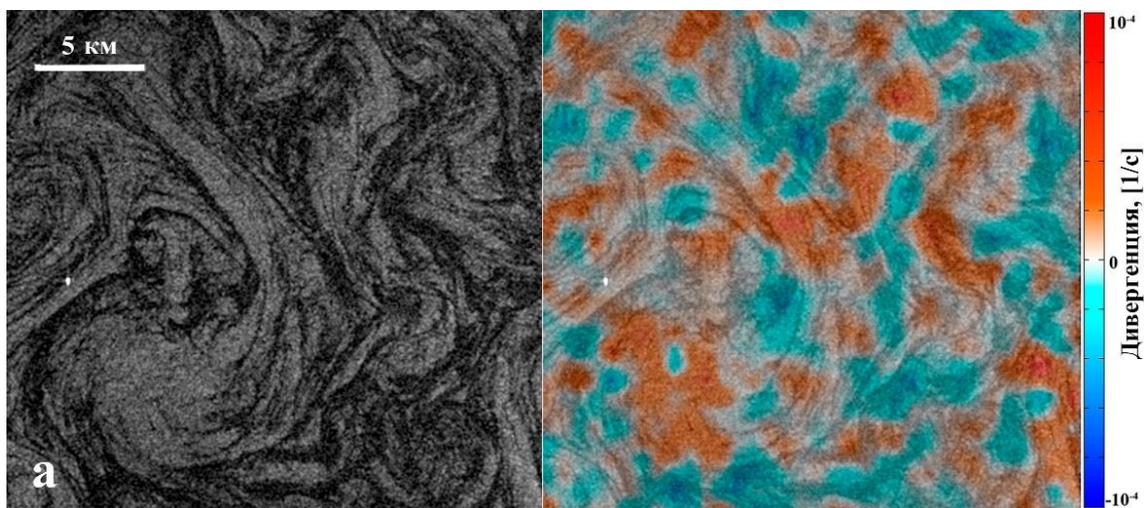
Рис. 2.4. Фрагменты изображений (а) и (б) (см. рис. 2.1 (справа)), иллюстрирующие нитевидные структуры сликов (слева) и поля текущих скоростей, полученные с помощью метода МСС (справа).

Очевидно, что ошибка в определении модуля скорости приводит также к неопределенности направления вектора скорости. Например, для величины течения около 30 см/с ошибка в направлении течения составляет  $\pm 4$  градуса.

Векторное поле скорости, полученное для фрагмента (а) на рис. 2.1, показывает, что линии течения в целом похожи на сликовые структуры. Некоторое несоответствие наблюдается для мелкомасштабных особенностей слика в правой нижней и левой верхней частях рисунка 2.4а. Другой случай показан на рисунке 2.4б. Здесь поле скорости показывает существование вихря в верхней части рисунка 2.4б, однако вихрь не проявляется в нитевидной

структуре сликов. Более того, некоторые сликовые полосы или их части ориентированы почти перпендикулярно скоростям течения и вряд ли могут быть интерпретированы как маркеры линий тока течения. Можно было бы ожидать, что слики будут повторять линии тока течений. В этом контексте несоответствие, демонстрируемое рисунком 2.4, на данный момент не совсем понятно.

Рассмотрим кратко результаты по полю дивергенции течений, которое было рассчитано по восстановленным скоростям течений. Пространственные распределения дивергенции для фрагментов изображений (а) и (б) представлены на рисунке 2.5а и рисунке 2.5б, соответственно. Рисунок 2.5а демонстрирует некоторое сходство между сликовыми структурами и областями конвергенции, где  $\text{div}V < 0$ . Однако Рисунок 2.5б, как и в случае с полем скорости течений, показывает худшее сходство, особенно в верхней части изображения. В нижней части изображения на рисунке 2.5б геометрия области конвергенции похожа на структуру сликов.



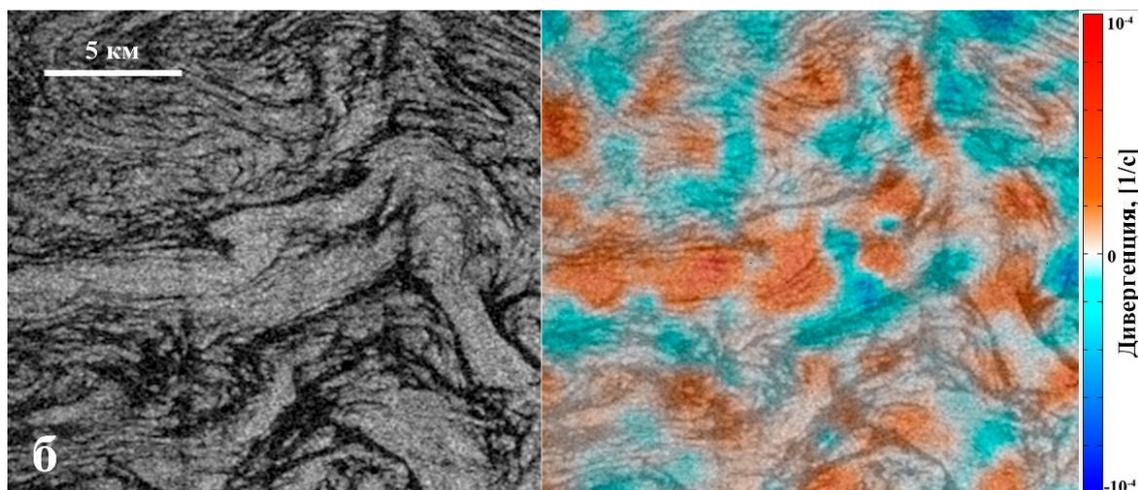


Рис. 2.5. Фрагменты изображений (а) и (б) (рис. 2.1) (слева) и дивергенция поля скорости, полученного с помощью метода МСС (справа).

Одной из причин расхождений линий тока восстановленных поверхностных течений (и конвергентных областей) и геометрии сликовых полос может являться нестационарный характер течений. Перенос плёнок ПАВ можно приближённо описывать как движение пассивных маркеров в поле течений, если не учитывать влияние зон дивергенции и конвергенции течений на форму сликов. Поэтому геометрия сликовых полос должна соответствовать траекториям жидких частиц, которые в стационарном поле течений совпадают с линиями тока. Последние, однако, в нестационарном случае, вообще говоря, не соответствуют лагранжевым траекториям. Соответственно, и слики могут не отвечать линиям тока. Нестационарность течений, таким образом, приводит к различиям между формой сликов и линиями тока течений. Для инструментального обоснования данного предположения необходимо выполнить ряд измерений поверхностных течений и наблюдения сликовых структур на временах, меньших времени нестационарности течений, которые могут быть обусловлены достаточно быстрыми изменениями метеоусловий. Совместные измерения полей приповерхностных течений, скорости и направления ветра синхронно с наблюдениями сликов весьма сложны. Вероятно, это можно осуществить с помощью некоторых методов дистанционного зондирования, например на

основе анализа доплеровского спектра рассеянного микроволнового сигнала X-, Ku- или Ka-диапазонов. Однако восстановление поверхностных течений из анализа доплеровских спектров радиолокационного сигнала — также нетривиальная задача, которая ещё полностью не решена, поскольку в настоящее время природа рассеивателей микроволн до конца не изучена и скорости рассеивателей, определяющие доплеровский сдвиг радиолокатора, с хорошей точностью пока не известны. Это связано с тем, что скорость рассеивателей микроволнового излучения определяется как фазовой скоростью квазилинейных брэгговских волн см-диапазона, так и скоростями рассеивателей, связанных с сильными и/или микрообрушениями более длинных поверхностных волн [62].

Еще одной из причин указанного несоответствия является наличие весьма важного источника ошибок восстановления поверхностного поля течений по смещению плёночных структур, а именно, определения той компоненты скорости течений, которая направлена вдоль сликовых полос. Очевидно, что если смещение сликовой полосы вдоль нее самой за время между кадрами значительно меньше длины полосы и при этом полоса “гладкая” и не имеет характерных неровностей границ, то зарегистрировать такое смещение оказывается затруднительным.

В связи с этим, в дополнение к методу МСС была использована процедура “ручной” обработки или методика “отслеживания” смещения отдельных сликов по неровностям их границ. Метод “отслеживания” достаточно трудоемок при обработке большого количества структур на изображениях и практически применим лишь к единичным сликам, на которых удастся выделить характерные неоднородности и отследить их смещение на последовательных кадрах. Пример использования ручной обработки приведен на рис. 2.6 для фрагмента (в) на рис. 2.1, где для сравнения показан результат, полученный методом МСС. Как видно из рис. 2.6, при общем удовлетворительном согласии геометрии сликовых структур со скоростями, полученными МСС методом, существуют вектора скорости,

которые не согласуются с векторами, полученными МСС методом и которые действительно направлены вдоль сликовых полос, а не поперек последних (рис. 2.6 (справа)). В таких областях МСС метод рассчитывает среднюю скорость сликов в подызображении, не учитывая перемещение мелкомасштабных локальных особенностей вдоль самих полос. Метод “отслеживания” отдельных сликовых структур, ориентированный на отслеживание смещения отдельных локальных особенностей, даёт дополнительную информацию о таких смещениях и позволяет улучшить достоверность восстановленных полей течений.

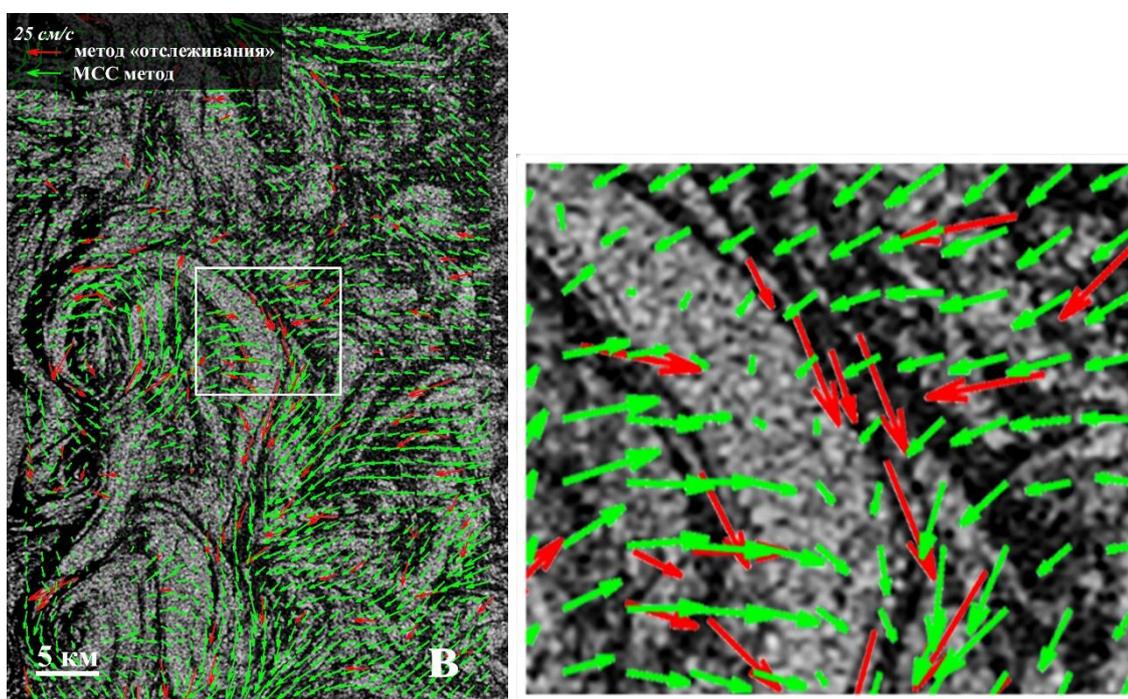


Рис. 2.6. Фрагмент (в) рис. 2.1, где приведены поле скоростей течений, восстановленное методом МСС (зелёные стрелки), и вектора, полученные методом “отслеживания” (красные стрелки) (слева). Увеличенная область, оконтуренная белым на рисунке слева, показывает существенное расхождение результатов при использовании двух методов.

Для более наглядной демонстрации ошибки при восстановлении поверхностных течений методом МСС, возникающей в следствии смещения нитевидных сликовых полос, не имеющих характерных неоднородностей, вдоль самих себя, был проанализирован модельный случай, представленный

на рис. 2.7. Для моделирования такого случая тёмная область на рис. 2.7, характеризующая плёночное пятно, была смещена относительно своего первоначального положения (зеленый контур на рис. 2.7 (слева)) на 4 пикселя вправо и 11 пикселей вверх (красный контур на рис. 2.7 (слева)). Зелёный вектор, характеризующий истинное смещение, обведен чёрным контуром. Восстановленные скорости смещения структуры, полученные с помощью МСС, представлены на рис. 2.7 (справа). По ним видно, что восстановленные вектора соответствуют истинному смещению только на поперечных границах сликовой полосы, а в центральной части полосы метод МСС фиксирует только поперечное смещение полосы, без учёта продольной компоненты. В случае же бесконечной нитевидной полосы без характерных особенностей в форме, метод МСС не смог бы восстановить смещение полосы вдоль самой себя. Однако, по таким локальным одиночным структурам, как представлено на рис. 2.7, возможно получить только локальную скорость для участка, ограниченного размерами разлива. В случае сложных сликовых структур, распределённых на большой площади (как рис. 2.1), эта возникающая ошибка, характерная для единичных гладких нитевидных полос, будет незначительна. Однако при интерпретации данных возможное наличие такой ошибки нужно учитывать.

При смещении нитевидных полос вдоль самих себя, которые имеют большое количество характерных особенностей, метод МСС хорошо восстанавливает компоненту, ориентированную по направлению полос рис. 2.8.

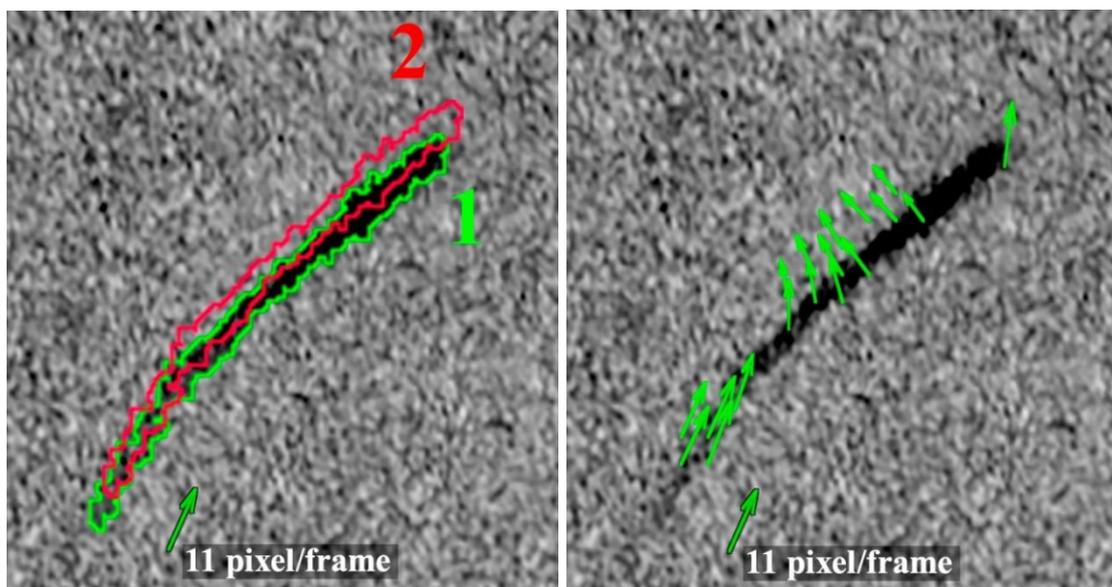


Рис. 2.7. Спутниковое радиолокационное изображение корабельного сброса на поверхности Чёрного моря, примерно в 45 км на юг от г. Судак, полученное с помощью спутника ERS-2 07.05.2009 в 08:23:16 по UTC.

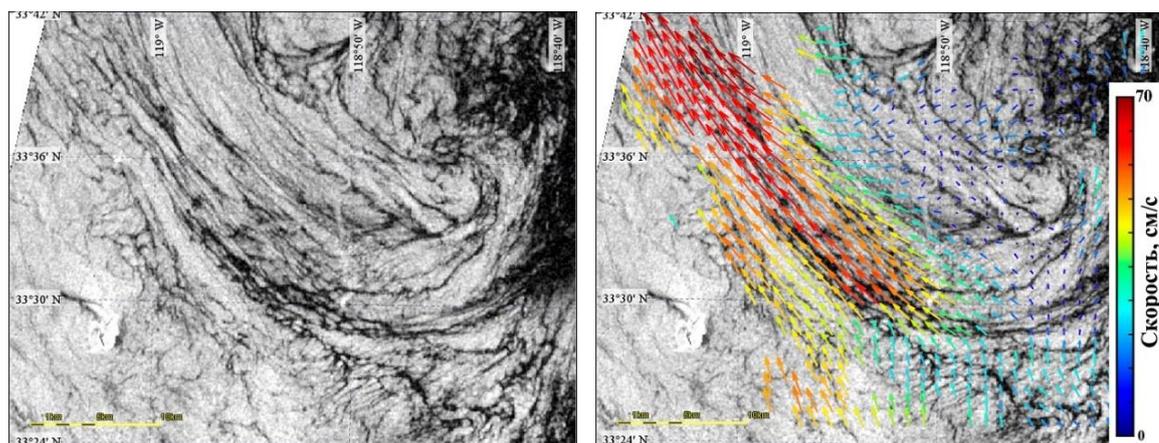


Рис. 2.8. Спутниковое радиолокационное изображение биогенных нитевидных плёночных структур на поверхности Тихого океана, примерно в 60 км на юго-запад от г. Лос-Анджелес, США, полученное с помощью спутника ERS-2 17.04.2008 в 18:31:03 по UTC (слева). Восстановленное поле скоростей течений для снимков, полученных за 17.04.2008 с помощью Envisat ASAR в 18:04:16 и ERS-2 SAR в 18:31:03 по UTC (справа).

## 2.5. Выводы к главе 2

Были проанализированы два последовательных, с интервалом около 32 минут, радиолокационных изображения нитевидных плёночных структур в Балтийском море и получено поле скорости течения с помощью метода МСС. Получено, что для некоторых пятен их геометрия хорошо согласуется с линиями тока течений, а для других - нет. Часто можно наблюдать, что скорости течения, полученные по смещению сликовых полос, направлены под довольно большими углами, вплоть до 90 град. к ориентации этих полос. Несоответствия возникают также между зонами повышенной концентрации ПАВ и зонами конвергенции поверхностных течений.

Предположительно относительно слабое сходство между картинками и полями поверхностных течений объясняется тем, что течения не являются стационарными и могут довольно быстро меняться во времени. С другой стороны, морские слики могут обладать некоторой "памятью" и не могут мгновенно менять свою форму в зависимости от быстрых изменений условий окружающей среды, в основном от изменения скорости/направления ветра. Поэтому необходимы дальнейшие исследования связи между геометрией пятна и полем течений с использованием последующих изображений SAR с особым акцентом на одновременные вспомогательные полевые измерения течений.

Еще одной причиной несоответствия сликовых полос с восстановленными скоростями течений и недостатком метода МСС является низкая точность определения компонентов скорости, направленных вдоль полосы слика. В случае, если сликовая полоса слабо деформирована вдоль себя, например, слабо изменена по ширине и/или на полосе отсутствуют мелкие неоднородности, то сдвиг сликовой полосы вдоль себя практически не распознается на последовательных снимках РСА. Такая ошибка, в случае восстановления течений в области присутствия таких гладких единичных полос, будет существенна. Однако, при сложном распределении ПАВ, занимающем большую площадь, вклад ошибки будет невелик.

## ГЛАВА 3. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ БИОГЕННЫХ ПЛЁНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЁМА

### 3.1. Введение

Эвтрофикация водоемов, в частности прибрежных зон океана, озер и водохранилищ, может приводить к интенсивному, иногда катастрофическому, развитию фитопланктона - “цветению” воды, что вызывает снижение её прозрачности, уменьшение концентрации растворенного кислорода, резкое повышение уровня содержания токсинов в воде и пр. Это приводит к массовой гибели рыбы, нарушению нормальной работы водоочистных сооружений, непригодности использования воды как питьевой. Использование спутниковых систем для диагностики зон “цветения” является весьма актуальным при развитии методов экологического мониторинга внутренних водоемов и прибрежных зон океана. Наблюдение зон цветения в оптическом диапазоне основано на анализе вариаций цвета верхнего слоя воды, хотя применение оптических спутниковых сканеров и ограничено светлым временем суток, а также благоприятными метеоусловиями (отсутствием сильной облачности, тумана, осадков). Цветение может проявляться и на радиолокационных спутниковых панорамах (см. например, [63]), что обусловлено наличием биогенных пленок ПАВ, связанных с жизнедеятельностью фитопланктона и приводящих к подавлению мелкомасштабных ветровых волн – ряби. Биогенные пленки проявляются на радиолокационных изображениях в виде сликов, т.е. областей с пониженной интенсивностью РЛ сигнала [64, 65]. Однако подобные области могут быть связаны и со штилевыми зонами, морской слизью или мусором, нефтяными пленками и пр.

До последнего времени в литературе было распространено утверждение, хотя и не основанное на сколько-нибудь убедительных измерениях, о том, что биогенные пленки являются “тонкими”- квазимономолекулярными с толщиной порядка двух-трех десятков ангстрем [66, 67]. Однако на основе

визуальных наблюдений можно заключить, что в случаях интенсивного (катастрофического) цветения фитопланктона биогенные пленки могут характеризоваться наличием радужных пятен, либо “корки”, образующейся из-за скопления клеток планктона, пыли, пыльцы растений и пр., и в этом отношении эти пленки могут быть схожими, например, с нефтяными разливами, имеющими сравнительно большую толщину порядка мкм и более [63, 68].

Отметим, что значительное количество работ посвящено экспериментам с искусственными сликками для моделирования эффектов подавления волн и, соответственно, особенностей РЛ рассеяния [16, 69, 70]. В этих экспериментах использовались различные жирные спирты, кислоты, эфиры, которые могут входить в состав естественных загрязняющих органических веществ и образовывать пленки, близкие по свойствам к биогенным и антропогенным ПАВ, в т.ч. и синтетическим полимерным ПАВ (СПАВ) [71, 72]. Эти пленки, как правило, образуют мономолекулярные слои, однако при значительных концентрациях, например, в центре разлива ПАВ, формируется перенасыщенная пленка (см. глава 1), содержащая капли ПАВ, соседствующие с монослоем. В природных условиях такие перенасыщенные пленки также могут формировать корку из-за пыли и пр.

Таким образом, пленки на морской поверхности могут иметь самое разное происхождение и характеристики, в том числе толщину.

В работе [73] посвященной анализу возможностей радиолокационной диагностики пленок, показано, что на данный момент невозможно отличать плёнки биогенного происхождения от плёночных загрязнений антропогенной природы, в частности нефтяных, с помощью только микроволновых радиолокаторов без привлечения измерений в других диапазонах спектра электромагнитных волн. Хотя авторы и предполагают, что различие нефтяных и биогенных плёнок может быть основано на различиях статистических характеристик обратного микроволнового рассеяния из-за переменной толщины нефтяных плёнок и однородности мономолекулярных

биогенных пленок, это не может быть использовано в случаях интенсивного цветения водорослей, где, как отмечено выше, биогенные пленки могут иметь конечную толщину.

Можно полагать, что существует возможность дополнительно использовать оптические/инфракрасные (ИК) датчики и по спектральным характеристикам отраженного от воды излучения отличать плёнки биогенного происхождения от антропогенных загрязнений, включая нефтяные. Типичные спектры отражения для внутренних водоемов с доминирующим цветением цианобактерий изучались в целом ряде работ (см. например, [68, 74-76]). В частности, в работах [68, 75] представлены спектры отражения для областей водоёма с концентрациями хлорофилла-а  $> 100 \text{ мг/м}^3$ , которые проявлялись в виде скопления плавающих на поверхности воды водорослей. В основном в литературе представлены спектры от 400 нм до 800 нм, которые захватывают видимый (380-750 нм) и ближний ИК (NIR, длины волн 750-1000 нм) диапазоны. Выбор этого диапазона связан с пиком в спектре отражения вблизи 700 нм и корреляцией его величины с концентрацией хлорофилла-а [77]. Другие диапазоны, например, коротковолновый ИК (SWIR, длины волн 1-3 мкм), исследованы слабо, в том числе из-за сильного поглощения излучения на данных длинах волн водой. Случай проявления толстых биогенных плёнок в SWIR также исследовался недостаточно.

Возможность детектирования нефтяных загрязнений в оптическом и инфракрасном диапазонах обсуждалась в [78-70], существует и ряд эффективных методик по определению толщин нефтяных плёнок, в особенности в ближнем и коротковолновом ИК диапазонах [81]. Однако нам не известны работы по изучению проявлений в этих диапазонах пленок иной природы, включая плёнки ПАВ.

В данной главе представлены, как развитие результатов предыдущих экспериментов, так и данные новых комплексных радиофизических исследований зон цветения фитопланктона, в том числе выполнен анализ имеющихся данных спутниковых мультиспектральных наблюдений водоемов,

в частности, в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах, в областях интенсивного цветения фитопланктона, а также перенасыщенных пленок ПАВ на водной поверхности, выполнен сравнительный анализ спектральных контрастов для таких пленок в видимом и NIR/SWIR диапазонах, выявлены значительные различия в полученных спектральных контрастах, которые могут использоваться для различения разных типов пленок.

### **2.3. Натурный эксперимент**

Работы проводились в 2022 году на Горьковском водохранилище с борта плавучей лаборатории ИПФ РАН “Геофизик”. Судовые наблюдения включали измерения концентрации фитопланктона зондом YSI EXO 2 на глубине 0.5 м, отбор проб поверхностных пленок и анализ их характеристик методом параметрически возбуждаемых волн [35], радиолокационное зондирование ветрового волнения СВЧ-скаттерометрами (длины волн 8 мм и 3 см), измерения скорости ветра с помощью акустического анемометра WindSonic и течений с помощью ADCP (акустического доплеровского профилографа). Наблюдения проводились квазисинхронно со съемкой акватории со спутника Sentinel-2 мультиспектральным устройством (инструмент MSI).

Пример спутникового изображения в естественном отображении (комбинация красного (665 нм), зеленого (560 нм) и синего (490 нм) каналов) в момент проведения натуральных экспериментов представлен на рис. 3.1. Данное изображение получено 12.09.2022 (время съемки ~ 08:24:30 по UTC) спутником Sentinel-2A и демонстрирует области с повышенной концентрацией фитопланктона, которые соответствуют ярким зеленым областям на изображении. Синей линией обозначен трек, вдоль которого проводились подспутниковые измерения, а синие точки соответствуют областям, где отбирались пробы поверхности. Белая область на изображении – облака, частично перекрывающие исследуемую территорию (в данной области натурные измерения не сопоставлялись со спутниковыми данными).

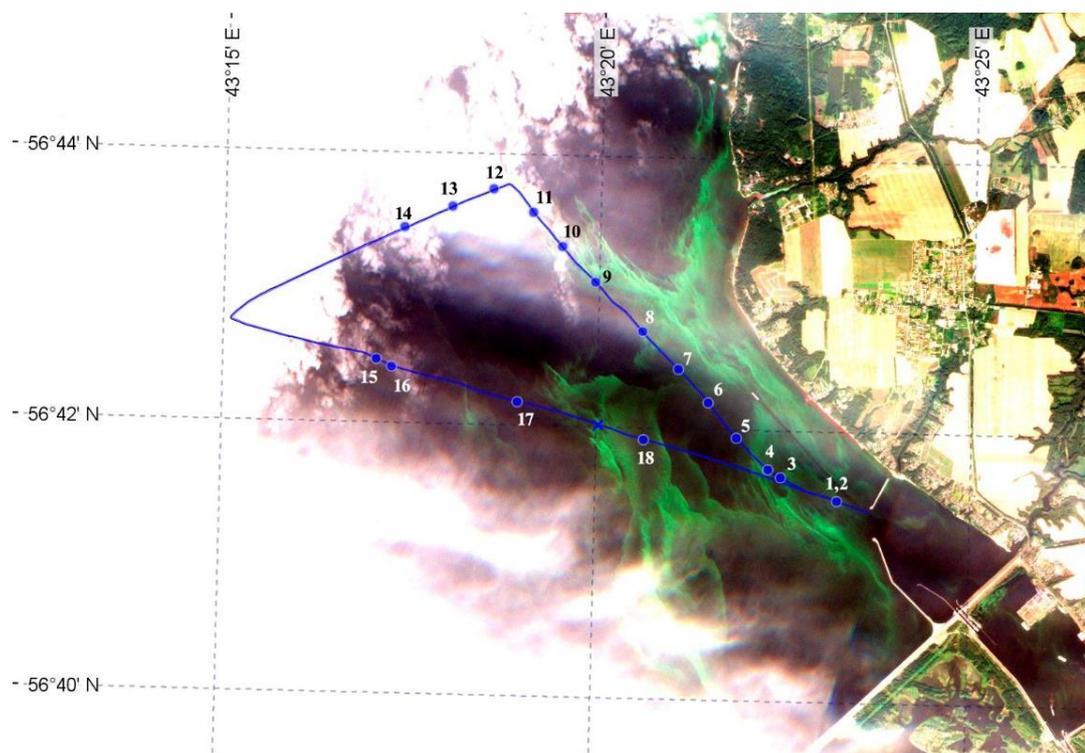


Рис. 3.1. Спутниковое изображение в естественном отображении (комбинация красного (665 нм), зеленого (560 нм) и синего (490 нм) каналов) в момент проведения натурных экспериментов за 12.09.2022, время съемки ~ 08:24:30 по UTC, полученное с помощью Sentinel-2 MSI. Синяя линия – траектория подспутниковых измерений. Синие точки - пробы поверхности.

Известно, что вариации концентрации фитопланктона находятся в хорошем соответствии с вариациями яркости оптического изображения в зеленой части спектра из-за объемного рассеяния света из приповерхностных слоев воды. Важно отметить, что области наиболее сильного цветения проявляются и в усилении сигнала в NIR/SWIR диапазонах (0,8 и 1,6 мкм). Это позволяет полагать, что интенсивное рассеяние ИК-излучения связано с толстыми биогенными пленками, визуальными различимыми благодаря пыли и сгусткам водорослей, которые также вносят вклад в рассеяние. Для проверки данного предположения по спутниковым данным был рассчитан индекс плавающих на поверхности воды водорослей (FAI – Floating Algae Index) [82], который является эффективным индексом для обнаружения поверхностной

растительности в водоемах за счет устранения большей части атмосферных эффектов и который менее чувствителен к аэрозолям и геометрии наблюдений (положения солнца и пр.) по сравнению с аналогичными индексами

$$FAI=R_{NIR}-[R_{red}+(R_{SWIR}-R_{red})\times(\lambda_{NIR}-\lambda_{red})/(\lambda_{SWIR}-\lambda_{red})] \quad (2.1)$$

где  $R_i$  - коэффициенты отражения (reflectance) соответственно в красном (red), коротковолновом (SWIR) и ближнем (NIR) ИК-диапазонах. На рис. 3.2 представлена карта распределения FAI в исследуемой акватории.

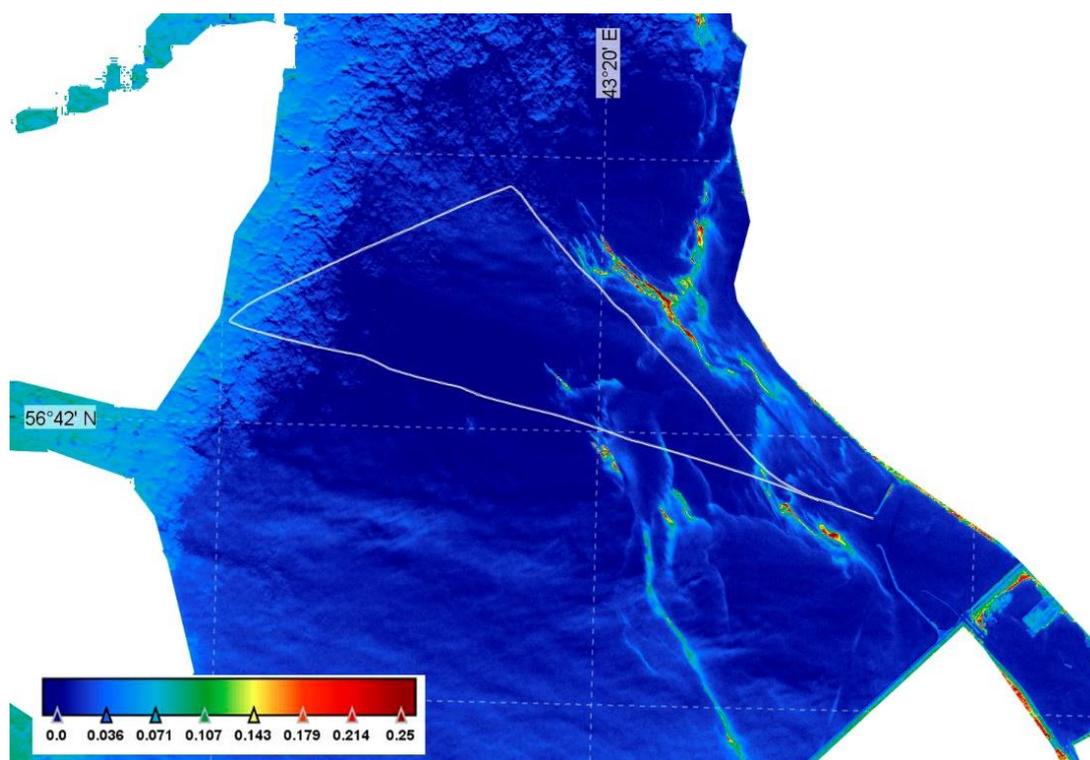


Рис. 3.2. Пространственное распределение плавающих водорослей (FAI), восстановленное по данным Sentinel-2 MSI за 12.09.2022. Белая линия - траектория подспутниковых измерений.

### 3.3. Результаты натурного эксперимента

Данные, полученные в ходе натуральных экспериментов и рассчитанные по спутниковым данным вдоль трека, представлены на рис. 3.3, которые соответствуют участкам полного трека, направленным по движению судна на северо-запад (пробы 1-11) и юго-восток (пробы 15-18). Участок от пробы 12 до 14 не демонстрируется, поскольку на нём значения концентрации

хлорофилла были квазиоднородны. Все данные построены в зависимости от времени измерения, сверху-вниз это:

- скорость ветра в м/с;
- коэффициент поверхностного натяжения воды в мН/м;
- индекс FAI спроецированный на трек;
- концентрация хлорофилла, полученная с помощью зонда YSI в мг/л;
- интенсивность радиолокационного сигнала (длина волны - 8 мм), нормированная на квадрат сглаженной скорости ветра, для устранения влияния изменения ветра на сигнал, в отн.ед.;
- интенсивность радиолокационного сигнала (длина волны - 3 см), аналогично 8-мм скаттерометру.

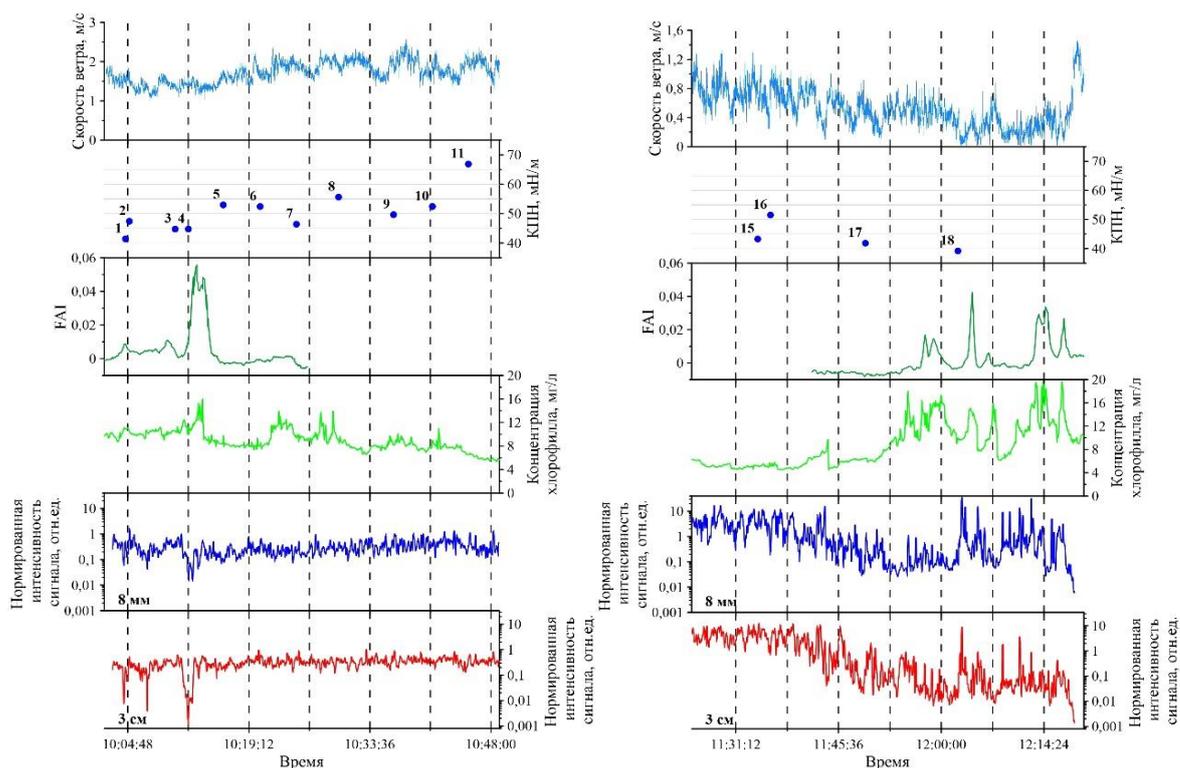


Рис. 3.3 Полученные данные от времени измерений для участков трека от 1 до 11 пробы (слева), от 15 до 18 (справа), сверху-вниз: скорость ветра; коэффициент поверхностного натяжения; индекс FAI; концентрация хлорофилла, полученная с помощью зонда YSI; нормированная

интенсивность сигнала 8-мм скаттерометра; нормированная интенсивность сигнала 3-см скаттерометра.

Как можно увидеть из рис. 3.3, пространственное распределение плавающих водорослей показало соответствие в положении между повышенными значениями индекса FAI и максимумами концентрации хлорофилла, измеренными с помощью зонда YSI. При этом наиболее высокие значения FAI соответствовали областям визуально наблюдавшимся с судна пленок, имевших вид плотной “корки” (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Фото пленки с плавающими на поверхности воды водорослями за 12.09.2022, полученное в ходе описанных выше подспутниковых экспериментов.

Такое соответствие говорит о наличии толстых биогенных плёнок на поверхности воды в областях высокой концентрации хлорофилла, которые наблюдаются благодаря скоплению сгустков водорослей и частиц (пыли, цвета растений, пыльцы). Присутствие на поверхности воды таких толстых биогенных пленок подтвердили и полученные в эксперименте достаточно

низкие значения коэффициента поверхностного натяжения в поверхностных пробах.

Так же можно увидеть, что интенсивность сигналов СВЧ-скаттерометров снижалась в зонах сильного цветения, что происходит из-за подавления мелкомасштабной ветровой ряби толстыми биогенными плёнками, хотя мы видим, что корреляция вариаций интенсивности радиолокационного рассеяния, концентрации водорослей и коэффициента поверхностного натяжения не очень высокая. Такое несоответствие может быть связано с рядом причин. Во-первых, в условиях достаточно высокой в целом концентрации биогенных пленок, вариации этой концентрации уже не приводят к сильным вариациям коэффициента затухания и, соответственно, вариациям интенсивности ветровой ряби. Во-вторых, пульсации скорости ветра маскируют эффект подавления волн пленками.

Однако, всё же взаимосвязь радиолокационного сигнала от концентрации хлорофилла видно, особенно на соответствующих зависимостях (рис. 3.5). Из рис. 3.5 видно, что чем больше концентрация хлорофилла, тем меньше интенсивность сигнала.

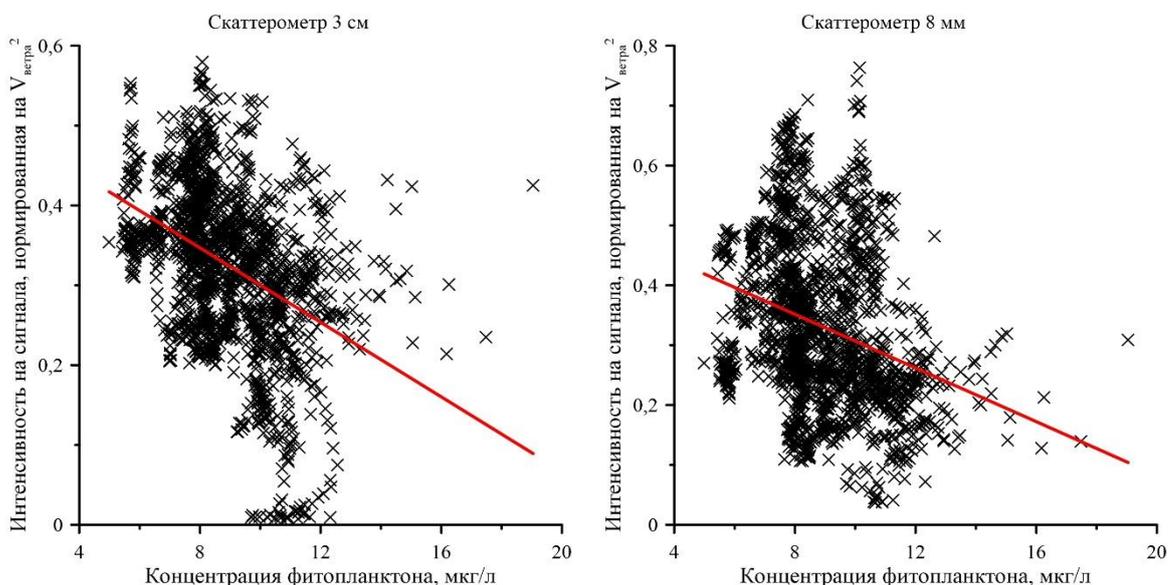


Рис. 3.5 Зависимость интенсивности нормированного радиолокационного сигнала для 3-см скаттерометра (слева) и для 8-мм

скаттерометра (справа) от концентрации хлорофилла-а для участка трека от 1 до 11 пробы.

### **3.4. Анализ мультиспектральных спутниковых изображений плёнок**

Интересно сравнить особенности проявления на изображениях плёнок фитопланктона и плёнок ПАВ, которые часто используются при проведении экспериментов с искусственными пленками ПАВ (см. например, [35]). Как уже отмечалось выше, в случаях, когда средняя концентрация ПАВ на поверхности воды существенно превышает концентрацию мономолекулярной пленки, образуется перенасыщенная пленка, типичный вид которой приведен на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Неоднородной перенасыщенной пленки ПАВ - олеиновой кислоты за 18.08.2021, полученное в ходе натуральных экспериментов на Горьковском водохранилище

Перенасыщенные плёнки представляют собой двухфазную среду, состоящую из прозрачного, невидимого в оптике мономолекулярного слоя с плотной упаковкой молекул ПАВ (предельный монослой) и капель (линз), в

которых сосредоточен избыток ПАВ. В натуральных условиях перенасыщенная пленка олеиновой кислоты (OLE) имеет вид фрагментированной “корки” (и в этом отношении она имеет сходство с биогенной “коркой”), разделенной областями мономолекулярной пленки (рис. 3.6), фрагменты корки видны из-за скопления капель ПАВ, мелких частиц, пыльцы растений. Отметим, что радужные области в такой пленке обычно не наблюдаются, а средние толщины перенасыщенных пленок ПАВ, определяемые по известному объему вылитого ПАВ и площади пятен, для наших экспериментов можно оценить как имеющие порядок 0.1 мкм. Перенасыщенные плёнки могут формироваться в центральных областях разливов ПАВ и проявляться на спутниковых оптических изображениях в виде светлых областей, тогда как периферийная мономолекулярная пленка видна как темная область, что связано с гашением гравитационно-капиллярных волн в плёнке. Пример спутникового MSI-изображения разлива искусственной пленки OLE, приведен на рис. 3.7.

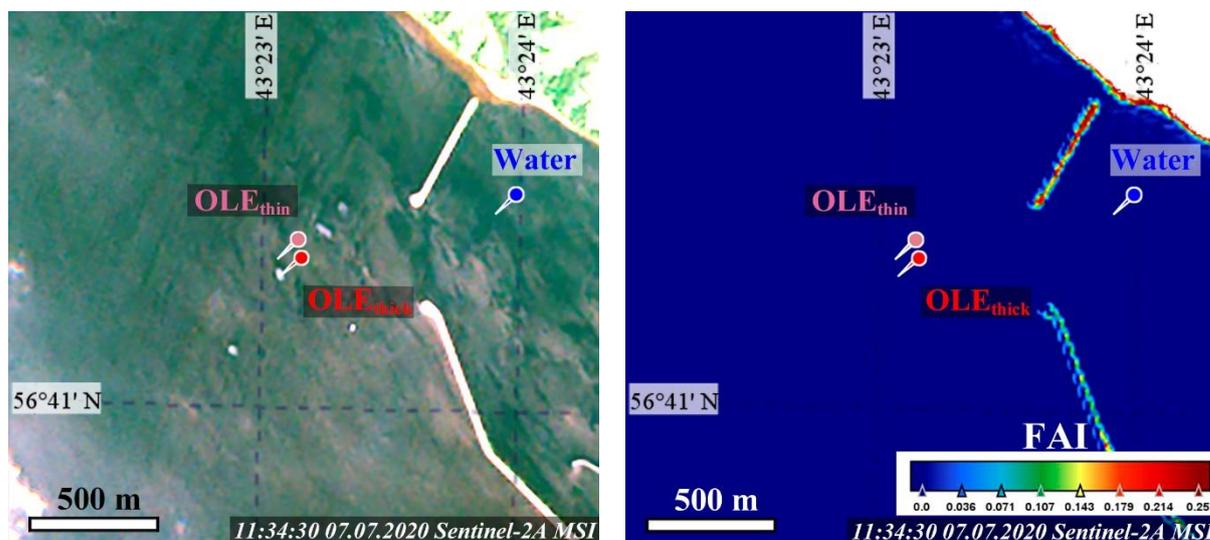


Рис. 3.7. Пример спутникового оптического изображения искусственных сликов - разливов ПАВ (OLE) на Горьковском водохранилище 07.07.2020 (слева) и индекс FAI (справа).  $OLE_{thick}$  – область перенасыщенной плёнки,  $OLE_{thin}$  – тонкой плёнки, Water – область “чистой воды”.

Следует подчеркнуть, что расчет FAI для такой пленки ПАВ ожидаемо дает очень малые значения этого индекса (см. рис. 3.7 (справа)).

Спектральный контраст будем характеризовать отношением коэффициентов отражения для чистой воды и для плёнки в определенных спектральных диапазонах длин волн. Для анализа спектральных контрастов все каналы были приведены к одному пространственному разрешению в 10 м методом билинейной интерполяции с помощью платформы для обработки спутниковых данных SNAP (Sentinel Application Platform) (<https://step.esa.int/>). Примеры спутниковых изображений в естественных цветах, по которым оценивались контрасты, представлены на рис. 3.7 для плёнок ПАВ и рис. 3.8 для толстых биогенных плёнок (фрагмент изображений рис. 3.1 и рис 3.2). Спектральный контраст  $K$  толстых биогенных пленок определялся как  $K = |R_{\text{water}} - R_{\text{film}}| / (R_{\text{water}} + R_{\text{film}})$ , где  $R_{\text{water}}$  – коэффициент отражения для области чистой воды (т.е. с низкой концентрацией фитопланктона),  $R_{\text{film}}$  – коэффициент отражения для областей с высоким содержанием фитопланктона (высоким значением FAI).

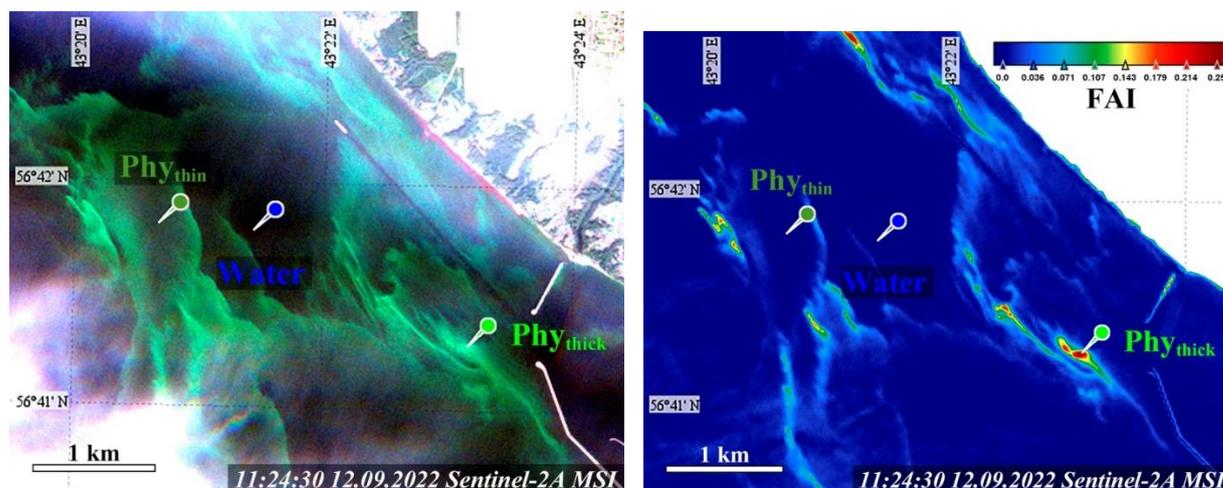


Рис. 3.8. Увеличенные фрагменты рис. 3.1 и 3.2 с обозначениями, соответствующими  $Phy_{\text{thick}}$  – область толстой плёнки,  $Phy_{\text{thin}}$  – тонкой плёнки,  $Water$  – область “чистой воды”.

На рис. 3.9 представлены зависимости спектральных контрастов для толстых биогенных плёнок, отвечающих областям с высоким индексом FAI ( $Phy_{\text{thick}}$  на рис. 3.8) Здесь же приведены контрасты для областей перенасыщенной плёнки OLE от длины волны излучения ( $OLE_{\text{thick}}$  на рис. 3.7).

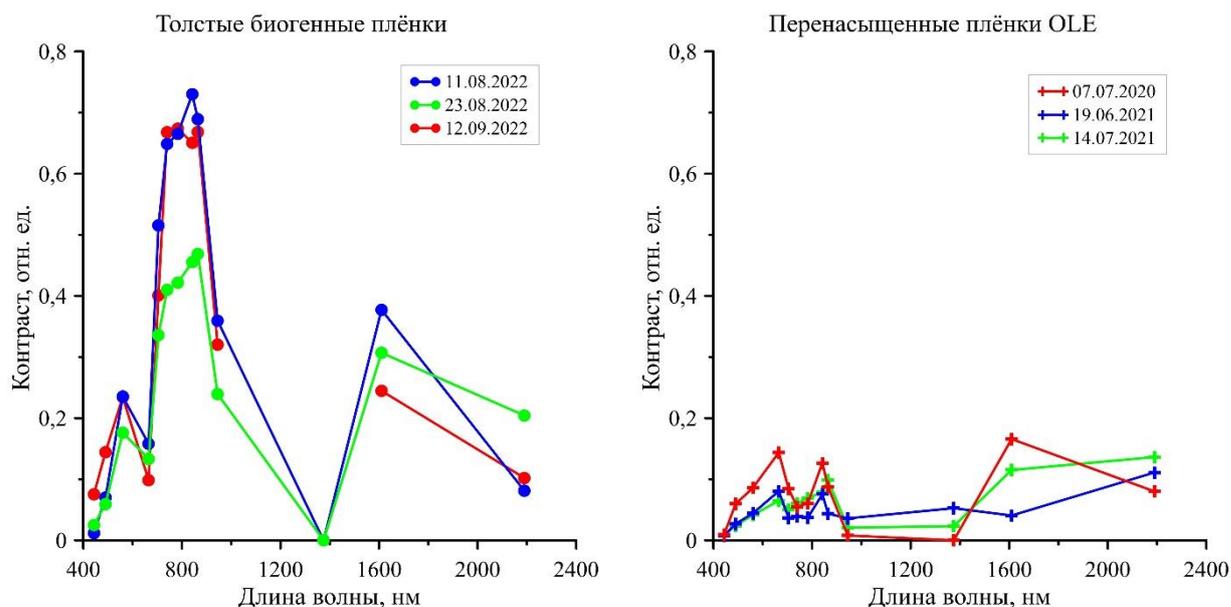


Рис. 3.9. Спектральные контрасты для толстых биогенных пленок  $Phy_{thick}$  (а) и перенасыщенных плёнок  $OLE_{thick}$  (б) в зависимости от длины волны излучения

Из анализа представленных спектральных контрастов видно, что толстые биогенные плёнки характеризуются максимумами в зеленом диапазоне (560 нм), красном и NIR (740-865 нм), а также в SWIR (длина волны 1610 нм), при этом наиболее выраженный максимум находится в красном - NIR диапазонах. Плёнки OLE характеризуются двумя близкими по значению контраста максимумами в красном диапазоне (665 нм) и в NIR (842-865 нм). Из сравнения спектральных контрастов этих плёнок видно, что они существенно отличаются друг от друга в красном-NIR диапазонах как по абсолютным значениям, так и по перепадам контраста в зависимости от длины волны.

Локальный минимум контрастов в случае OLE в красном диапазоне предположительно связан с поглощением водой излучения на длинах волн 740-760 нм из-за наличия участков мономолекулярной пленки, обеспечивающей относительно свободное прохождение света в воду.

Сравним полученные выше спектральные контрасты для толстых и тонких биопленок фитопланктона и перенасыщенных и мономолекулярных

пленок ПАВ (OLE). Последние при расчете контрастов выбирались на периферии разливов ПАВ, где отсутствуют острова плотной корки, сама пленка не видна визуально и проявляется лишь благодаря эффекту подавления ветровой ряби ( $OLE_{thin}$  на рис. 3.7). Тонкие биогенные плёнки выбирались в областях, где видно присутствие фитопланктона, однако значения индекса FAI в них около или ниже нуля ( $Phy_{thin}$  на рис. 3.8). Характерные зависимости контрастов от длины волны излучения для ряда спутниковых изображений для указанных различных типов пленок приведены на рис. 3.10.

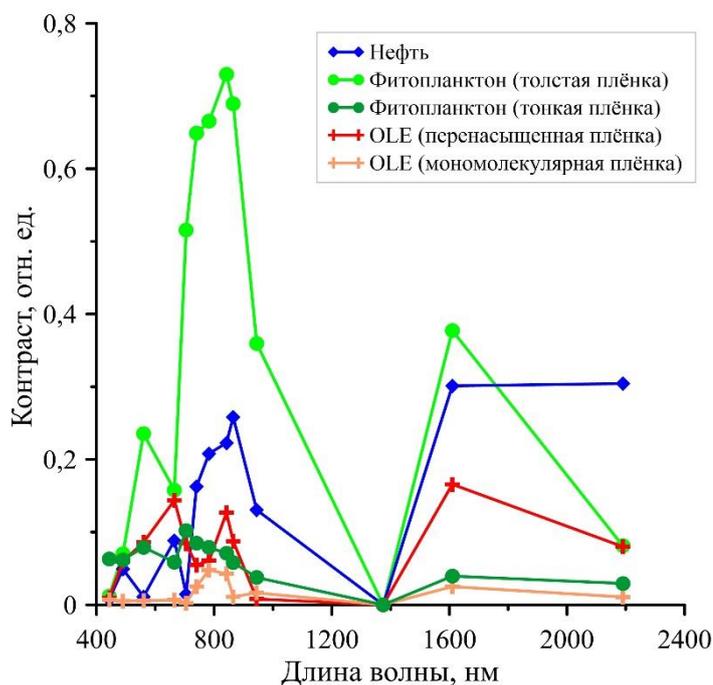


Рис. 3.10. Сравнение типичных спектральных контрастов толстых и тонких биопленок и ПАВ.

Видно, что в ближнем ИК диапазоне контрасты для тонких биогенных плёнок при небольших концентрациях фитопланктона близки по характеру и по величине к перенасыщенным плёнкам ПАВ. При этом в SWIR диапазоне различие между этими типами плёнок существенно, контрасты тонких биогенных плёнок близки по значениям к контрастам мономолекулярных плёнок ПАВ. Отметим, что согласно предварительному анализу, хорошо растекшиеся, мономолекулярные пленки других ПАВ (додецилового спирта и растительного масла) имеют контрасты, схожие со случаем мономолекулярной пленки OLE. Следует напомнить, что представленные

данные были получены для штилевых условий (скорости ветра порядка и менее 2 м/с). В условиях более сильного ветра контрасты могут отличаться от приведенных выше и будут более подробно анализироваться позднее.

Как видно из рис. 3.10 спектральные контрасты толстых биогенных плёнок существенно отличаются от контрастов тонких биогенных плёнок и пленок ПАВ. Интересно отметить, что контраст толстых биогенных плёнок в SWIR диапазоне схож с контрастом толстых нефтяных пленок, в частности, при анализе изображений нефтяного разлива [83]. В дальнейшем планируется провести более детальный анализ контрастов для нефтяных пленок в указанных диапазонах для различных метеоусловий и характеристик разливов.

### **3.5. Выводы к главе 3**

Был проведен ряд натурных подспутниковых экспериментов на Горьковском водохранилище в период активного “цветения” фитопланктона с целью анализа проявления зон интенсивного “цветения” в радиолокационных сигналах.

Из анализа экспериментальных данных было получено, что области повышенной концентрации фитопланктона могут проявляться в виде биогенных плёнок на поверхности воды, которые являются достаточно толстыми и могут иметь вид “корки”. Такие плёнки проявляются как на спутниковых мультиспектральных изображениях за счёт сгустков водорослей и частиц (пыли, цвета растений, пыльцы и др.), в том числе и на NIR и SWIR изображениях, так и в радиолокационных сигналах, за счёт гашения мелкомасштабной ветровой ряби в данных областях, при этом, чем больше концентрация хлорофилла, тем меньше интенсивность РЛ сигнала.

Был проведён анализ зависимостей спектральных контрастов плавающих на поверхности воды водорослей и плёнок OLE от длины волны излучения, полученных из спутниковых данных. Показано, что:

1. контрасты тонких биогенных плёнок в NIR диапазоне близки к контрастам перенасыщенных (немономолекулярных) пленок ПАВ;

2. В SWIR диапазоне контрасты тонких биогенных плёнок, как и в случае мономолекулярных пленок ПАВ, близки к нулю и сильно отличаются от контрастов перенасыщенных плёнок ПАВ

Указанные особенности контрастов в мультиспектральных изображениях биогенных пленок могут быть использованы в качестве дополнительной информации, например, при решении задач дистанционной диагностики биогенных пленок, в том числе с использованием микроволновых радиолокаторов.

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОКРЫТОЙ ПЛЁНКАМИ ПАВ

### 4.1. Введение

Проблема рассеяния волн микроволнового диапазона на шероховатой поверхности в применении к радиолокационному дистанционному зондированию океана активно обсуждается в литературе уже несколько десятилетий (см., например, [84-88] и ссылки в них). Некоторые недавние исследования посвящены роли обрушений ветровых волн в формировании обратного радиолокационного рассеяния [89-91]. В настоящее время активно изучаются возможности использования мультиполяризационного зондирования для получения более полной информации о физических процессах, определяющих радиолокационное рассеяние, включая определение характеристик морских течений, внутренних волн, сликов и т.д. (см. [14-16] и цитируемую литературу). Анализ радиолокационного рассеяния при различных поляризациях, в частности, на двух соосных поляризациях, показал, что традиционная двухмасштабная брэгговская модель не может объяснить некоторые важные характеристики радиолокационного обратного рассеяния, в том числе, соотношение значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на соосных вертикальной (VV-) и горизонтальной (HH-) поляризациях. В [13] была выдвинута гипотеза, что это несоответствие является результатом вклада некоторой дополнительной, неполяризованной (небрэгговской) составляющей в УЭПР. Неполяризованная компонента предположительно связана с квазизеркальным рассеянием микроволн от мелкомасштабных участков водной поверхности с большими локальными наклонами, формирующимися на профиле сильнонелинейных ветровых волн, в том числе при их обрушении [89]. Более корректно такое рассеяние следует характеризовать как дифракцию на данных участках, поскольку последние сравнимы или меньше длин микроволн. В работах [14-16] исследовалась изменчивость брэгговской и небрэгговской компонент при наличии пленок

ПАВ, а в [15,16] подчеркивалась важная роль нелинейности ветровых волн, в частности, их микробрушений, при попытке описать уменьшение УЭПР, обусловленное наличием пленки на поверхности воды. Также хорошо известно, что обратное радиолокационное рассеяние модулируется доминирующими ветровыми волнам (ДВВ), масштабы которых превышают размеры облучаемой радиолокатором области водной поверхности. Рассеяние на морской поверхности в присутствии длинных ветровых волн традиционно описывается в рамках концепции модуляционно-передаточной функции (МПФ) (см., например, [92-95]). Было показано, что модуляция определяется несколькими физическими механизмами. Это геометрическая модуляция (эффекты наклона и дальности) и гидродинамическая модуляция, обусловленная вариациями спектра коротких ветровых волн, ответственных за обратное рассеяние. Гидродинамическая модуляция традиционно описывалась в релаксационном приближении с учетом модуляции резонансных брэгговских волн орбитальными горизонтальными скоростями ДВВ. В [96] эффекты модуляции и МПФ изучались также в присутствии пленок. Концепция МПФ не учитывает сильно нелинейные эффекты, в частности, влияние обрушений волн на модуляцию обратного рассеяния радара. В настоящее время роль сильно нелинейных эффектов обрушивающихся волн на обратное радиолокационное рассеяние не до конца понятна, и эти эффекты должны быть исследованы более подробно, в том числе экспериментально.

В данной главе представлены результаты натурных экспериментов по модуляции радиолокационного рассеяния ветровыми волнами, и основное внимание уделяется исследованию изменчивости брэгговских и небрэгговских компонент радиолокационного обратного рассеяния и лучшему пониманию физических механизмов радиолокационного обратного рассеяния. Результаты свидетельствуют о том, что распределения брэгговских и небрэгговских компонент по профилю ДВВ различны, что может быть использовано, например, для разработки улучшенной комбинированной

модели обратного радиолокационного рассеяния. А именно, поскольку брэгговское рассеяние доминирует почти по всему профилю ДВВ, двухмасштабная модель рассеяния может быть применена почти везде, кроме областей вблизи гребней наиболее интенсивных ДВВ. Вблизи гребней интенсивных волн радиолокационное рассеяние может быть предположительно описано как квазизеркальное.

#### 4.2. Эксперимент

Эксперименты проводились с океанографической платформы Морского гидрофизического института (МГИ) весной 2017 года и осенью 2018 года. В экспериментах использовался двухполяризационный (VV и HH) радиолокатор - доплеровский скаттерометр X-диапазона, который был установлен на платформе на высоте 12 м (рис. 4.1). Ширина луча антенны скаттерометра X-диапазона составляет около  $5,5^\circ$ , наблюдения проводились под углом падения  $60^\circ$ , следовательно, масштаб облучаемого пятна составлял около 1,5 м, что примерно на порядок меньше, чем длина доминирующих ветровых волн в натуральных экспериментах. Скаттерометр X-диапазона работал в режиме непрерывной волны с линейной частотной модуляцией. Частота дискретизации составляла 2000 Гц, а доплеровские спектры рассеяния радара анализировались за временные интервалы 0,25 с. Доплеровский сдвиг радара определялся как "центр тяжести" доплеровского спектра. Поскольку пространственное и временное разрешение скаттерометра было существенно меньше, чем длины волн и периоды доминирующих ветровых волн, это позволило изучить вариации радиолокационного рассеяния по профилю ДВВ. Скорость и направление ветра измерялись с помощью акустического анемометра WindSonic, установленного на высоте 16 м. Поверхностные гравитационные волны измерялись с помощью струнного волнографа, установленного на расстоянии около 10 м от освещенных радаром участков. Для изучения влияния пленок на модуляцию обратного рассеяния радара также был проведён ряд аналогичных экспериментов. Пленочные пятна

создавались с помощью спиртовых растворов олеиновой кислоты, выливаемых на поверхность воды. Наблюдения проводились при скорости ветра от 7 до 10 м/с, средняя высота доминирующих ветровых волн составляла около 0,2 м-0,4 м. Для наблюдений был выбран такой диапазон скоростей ветра, поскольку при более высоких скоростях ветра пленочные пятна быстро разрушаются, а при меньших скоростях ветра модулирующие ДВВ малы (или соизмеримы) в сравнении с размером пятна скаттерометра.

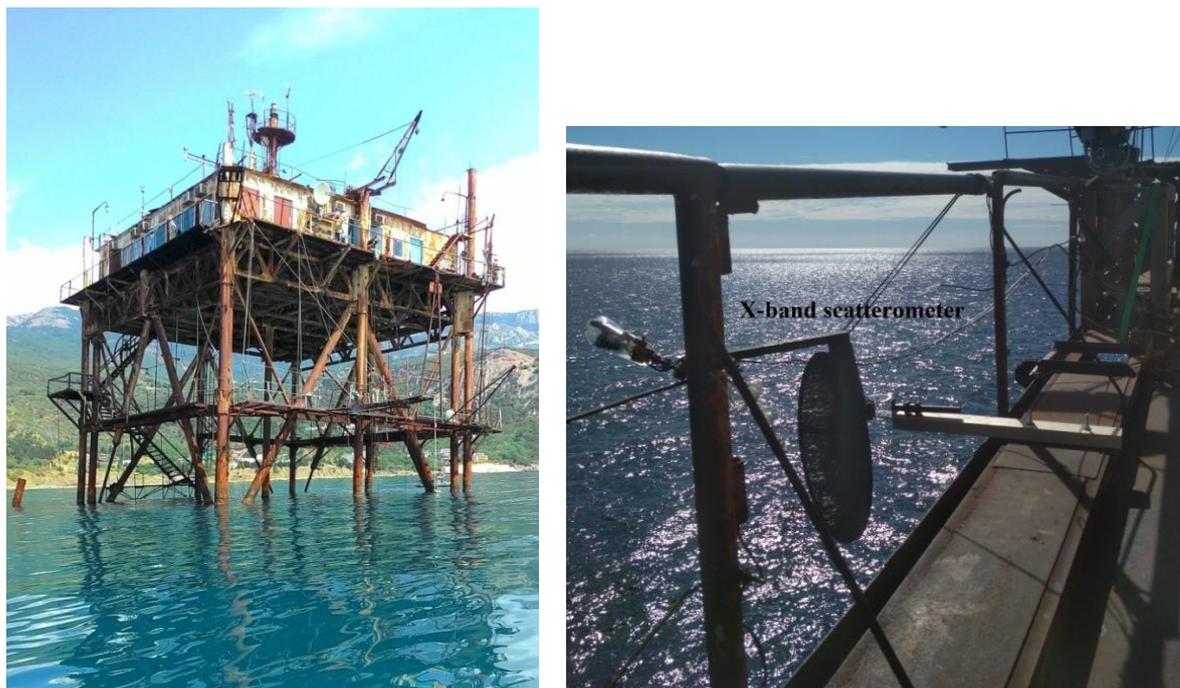


Рис. 4.1. Океанографическая платформа (слева) и скаттерометр X-диапазона, установленные на платформе (справа).

### 4.3. Теоретические основы

Предполагается, что микроволновое рассеяние состоит из резонансной (брэгговской) и небрэгговской составляющих. Первая компонента определяется поверхностными волнами, длина которых удовлетворяет резонансу с электромагнитными длинами волн. Вторая, небрэгговская (или неполяризованная) компонента связана с рассеянием от малых квазизеркальных граней на профиле поверхностных волн, длина которых больше брэгговской. Такие структуры на гребне волны появляются из-за нелинейности ветровых волн, в частности, из-за их обрушения.

Предполагается, что полная удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) представляет собой сумму двух компонент (см., например, [89])

$$\sigma_{pp}^0 = \sigma_{B\_pp}^0 + \sigma_{NBC}^0, \quad (4.1)$$

Здесь  $\sigma_{pp}^0$  - это полная УЭПР,  $p$  обозначает вертикальную (V) или горизонтальную (H) поляризацию падающей/отражённой волны,  $\sigma_{B\_pp}^0$  - брэгговская (поляризованная) компонента (BC) радиолокационного обратного рассеяния, описываемая двухмасштабной моделью Брэгга,  $\sigma_{NBC}^0$  - небрэгговская компонента (NBC). Брэгговская компонента в соответствии с двухмасштабной моделью может быть записана как (см., например, [73])

$$\sigma_{BC\_pp}^0 = 16\pi k_{em}^4 R_{pp}(\theta) F(\vec{k}_B), \quad (4.2)$$

где  $F(\vec{k}_B)$  - спектр ветровых волн при волновом векторе Брэгга  $\vec{k}_B = 2k_{em}\vec{n}_s$ ,  $k_{em}$  - волновое число падающей электромагнитной волны,  $\vec{n}_s$  - проекция единичного волнового вектора падающей электромагнитной волны на поверхность моря,  $|\vec{n}_s| = \sin \theta$ ,  $\theta$  - угол падения,  $R_{pp}(\theta)$  - коэффициент отражения, который зависит от поляризации падающих/отраженных электромагнитных волн.

Предполагая, что небрэгговская компонента является неполяризованной, одинаковой как для VV, так и для HH радиолокационного рассеяния, можно избавиться от NBC из общего радиолокационного обратного рассеяния (4.1) при вычитании  $\sigma_{HH}^0$  из  $\sigma_{VV}^0$ . Согласно данному предположению поляризационная разность (PD) может быть описана двухмасштабной теорией рассеяния, а именно,

$$PD = \sigma_{B\_VV}^0 - \sigma_{B\_HH}^0 = (R_{VV} - R_{HH})F(\vec{k}_B), \quad (4.3)$$

Небрэгговская компонента может быть найдена из (4.1)-(4.3) как

$$\sigma_{NBC}^0 = \frac{1}{2}[\sigma_{VV}^0 + \sigma_{HH}^0 - \frac{R_{VV} + R_{HH}}{R_{VV} - R_{HH}} PD], \quad (4.4)$$

#### 4.4. Чистая поверхность воды

Проиллюстрируем изменчивость радиолокационного обратного рассеяния при анализе доплеровского спектра. Доплеровский спектр имеет пик в частотной области, и положение пика характеризует доплеровский сдвиг радара. Интенсивность и частота пика изменяются из-за модуляции радиолокационного обратного рассеяния орбитальными скоростями ДВВ, соответственно, и спектры отличаются в разных фазах длинной волны, как показано на рисунке 4.2.

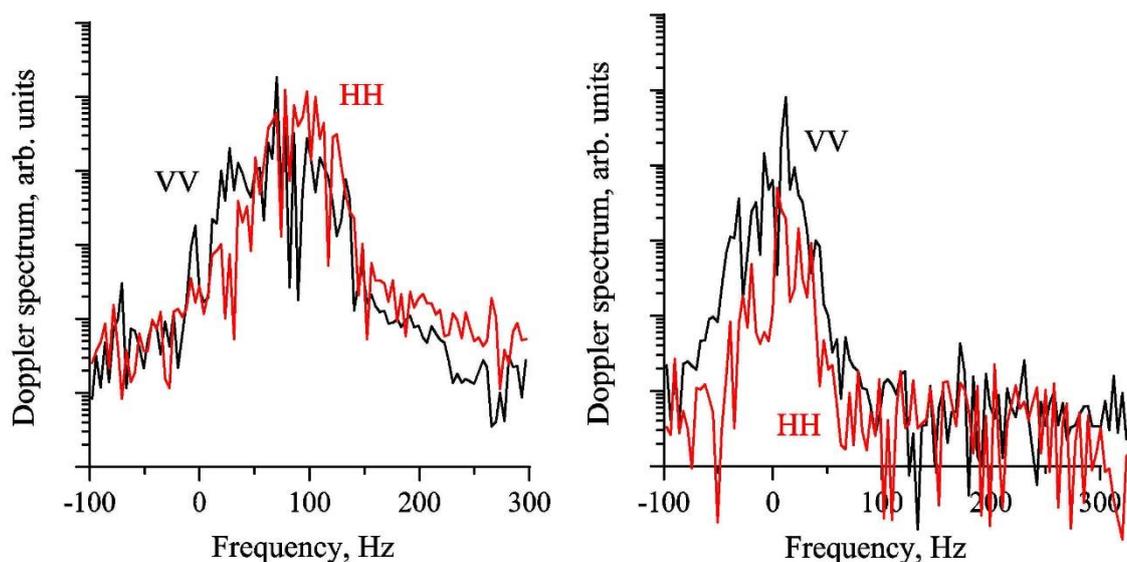


Рис. 4.2. Примеры радарного доплеровского спектра вблизи гребня (слева) и вблизи подошвы (справа) длинной волны. Черные кривые - VV-поляризация, красные кривые - HH-поляризация. Наблюдения навстречу ветру, скорость ветра 8 м/с.

Изменения спектра радиолокационного доплеровского рассеяния можно хорошо увидеть на спектрограммах (см. рис. 4.3), иллюстрирующих временные изменения спектра. На рисунке 4.3 показаны спектрограммы для VV- и HH-поляризованного обратного рассеяния, а также для брэгговской и небрэгговской компонент. Можно сделать вывод, что ВС компонента почти не отличается от VV-поляризованного радиолокационного рассеяния, по крайней мере, для случая угла падения  $60^\circ$ , а NBC весьма схожа с HH-компонентой. На спектрограммах, особенно на HH-поляризации, видны очень короткие и

интенсивные пики. Такие же пики наблюдаются и в спектре небрэгговской компоненты. Интенсивность “фонового” рассеяния на НН-поляризации и небрэгговской компоненты довольно слабая везде, за исключением областей пиков. Появление пиков не коррелирует с периодом ДВВ. Напротив, модуляция рассеяния на VV-поляризации и брэгговской компоненты с периодами ДВВ хорошо выражена и пики не на много сильнее, чем модуляция, связанная с ДВВ.

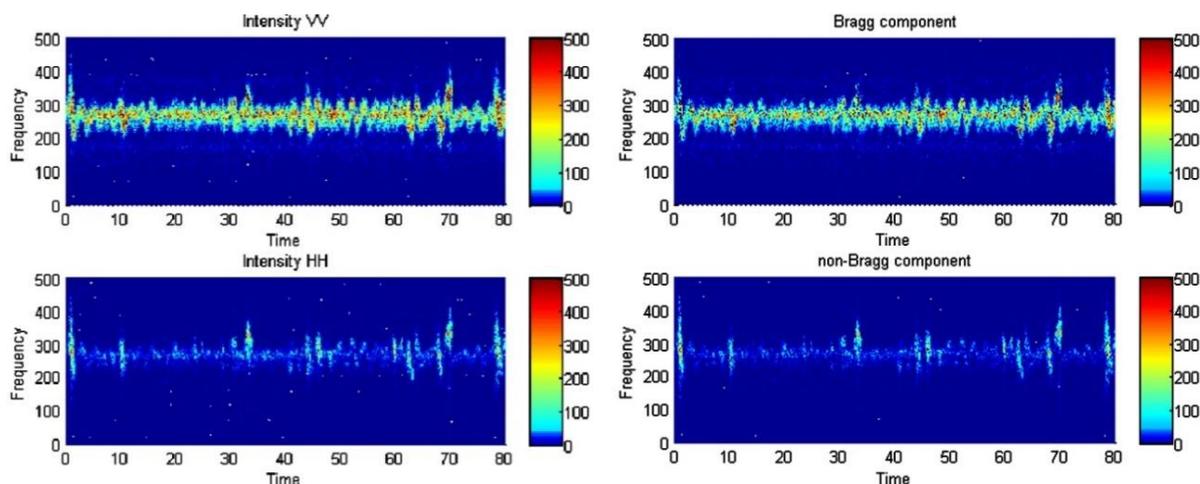


Рис. 4.3. Спектрограммы обратного рассеяния радара при VV и НН поляризациях (слева), а также брэгговской и небрэгговской составляющих радиолокационного рассеяния (справа). Наблюдения с наветренной стороны, скорость ветра 10 м/с, угол падения 60 град. Смещение частоты на 250 Гц соответствует "нулевому" доплеровскому сдвигу. Чистая вода.

Обсудим теперь изменения обратного рассеяния радара из-за ДВВ более подробно и рассмотрим изменение радиолокационного рассеяния со временем. Типичные временные ряды рассеяния радара X-диапазона на VV и НН-поляризациях показаны на рисунке 4.4. Хорошо видно, что вариации обратного рассеяния на НН-поляризации могут быть охарактеризованы появлением редких, но сильных пиков, интенсивность которых в целом намного больше, чем у "фонового" радиолокационного рассеяния, модулированного периодами ДВВ. Заметим, что на VV-поляризации пики незначительно превышают "фоновую" модуляцию. Даже без специальной

обработки данных можно сделать вывод, что пики на VV- и HH-поляризациях имеют практически одинаковую интенсивность, что указывает на то, что радиолокационное рассеяние в пиках может быть охарактеризовано как практически независимое от поляризации, то есть как неполяризованное обратное рассеяние.

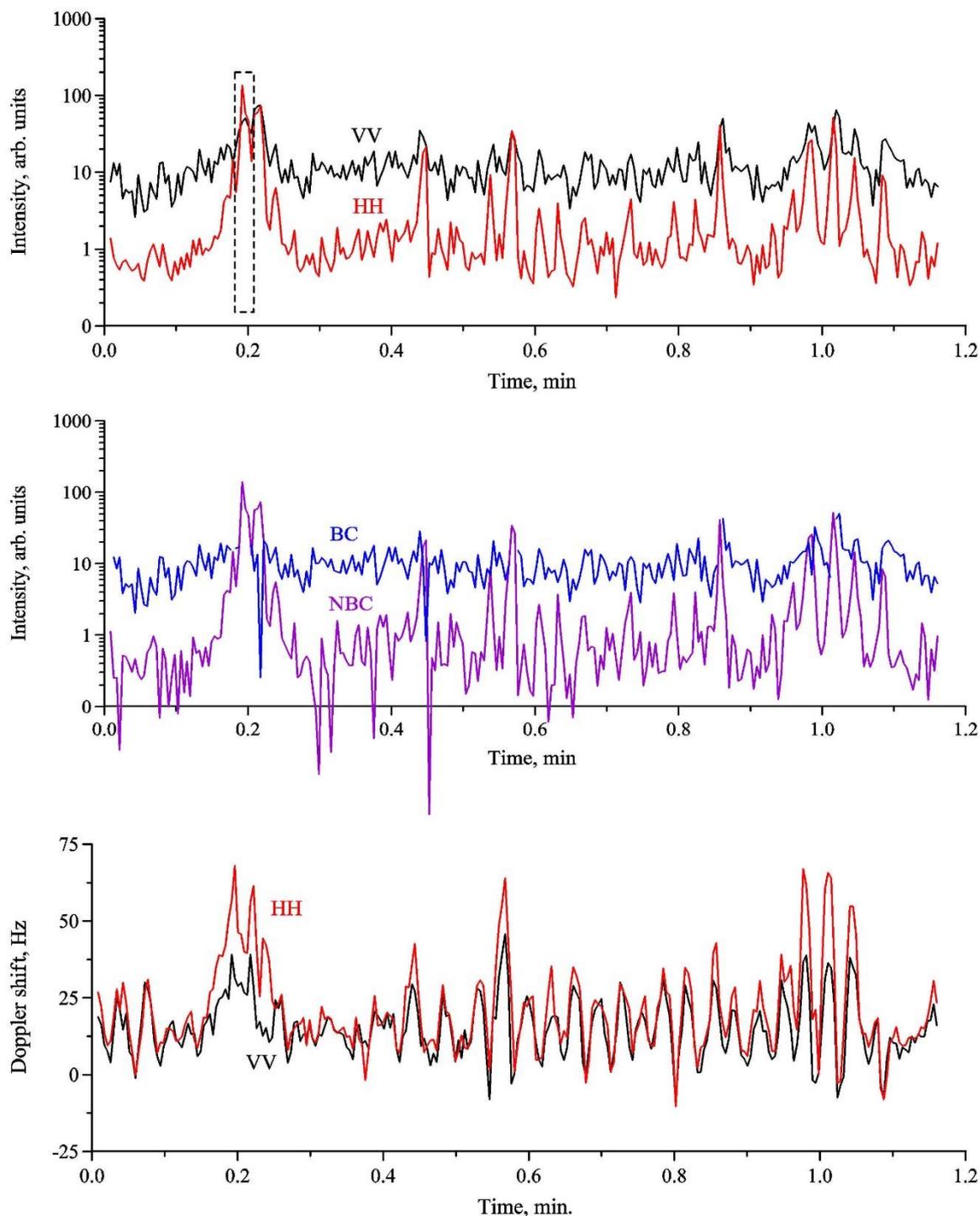


Рис. 4.4. Временные ряды радиолокационного обратного рассеяния (верхняя панель) и радиолокационного доплеровского сдвига (нижняя

панель) при VV-поляризации (черный) и при HH-поляризации (красный).

Чистая вода. Временные ряды для ВС (синий) и NBC (фиолетовый) находятся в середине. Выделенный фрагмент (пунктирный прямоугольник) на верхней панели обозначает область, где  $\sigma_{VV}^0 < \sigma_{HH}^0$  скорость ветра составляет 10 м/с.

Пики часто, но не всегда, возникают вблизи наибольших максимумов скорости орбитальной волны, т.е. вблизи гребней наиболее интенсивных ДВВ, и только один из примерно 3-10 гребней характеризуется появлением пиков (см. рис. 4.3, 4.4). ВС и NBC на рисунке 4.4 демонстрируют некоторое сходство с VV- и HH-поляризованным обратным рассеянием радара, соответственно. Однако существуют некоторые временные интервалы, как показано на рисунке 4.4, где обратное рассеяние на VV-поляризации меньше, чем на HH, что противоречит теории Брэгга.

#### 4.5. Плёнки

Изменения обратного рассеяния на VV- и HH-поляризациях в слайках в целом схожи со случаем чистой воды, а именно, умеренные изменения радиолокационного обратного рассеяния с периодами ДВВ чередуются с более редкими пиками. На рисунке 4.5 показаны спектрограммы для VV/HH-поляризованного рассеяния и для брэгговской/небрэгговской компоненты, а на рис. 4.6 показаны временные ряды VV-/HH- поляризованного обратного рассеяния, ВС и NBC и доплеровского сдвига. Плёночное пятно характеризуется следующими усредненными контрастами (отношение фотн/слик):  $K_{VV} \approx 8$ ,  $K_{HH} \approx 4$ ,  $K_{ВС} \approx 17$ ,  $K_{NBC} \approx 4$ . Эти контрасты, хотя и имеют одинаковый порядок величины, тем не менее, отличаются друг от друга и показывают, что VV-поляризованное радиолокационное обратное рассеяние, а также ВС, подавляются в пятне сильнее, чем HH и небрэгговская компоненты. Подавление ВС связано с усилением вязкого затухания брэгговских волн см-диапазона из-за пленок, в то время как подавление NBC

связано с более слабым затуханием более длинных волн дм-масштаба и подавлением соответствующих нелинейных структур, предположительно ответственных за формирование NBC. Однако связь между различными контрастами не является универсальной (см., например, [16]) и может меняться в зависимости от метеорологических условий, характеристик пленки, состояния моря и так далее.

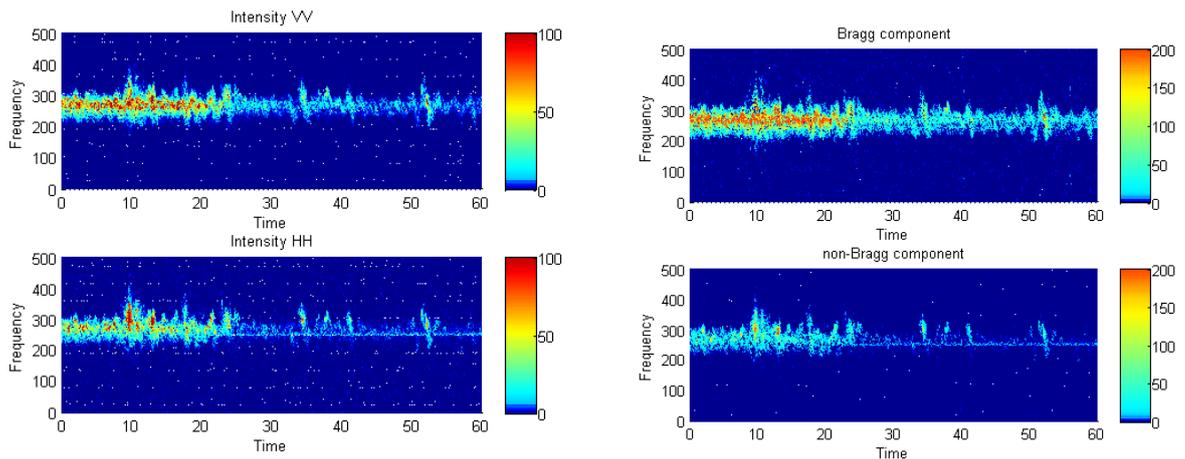
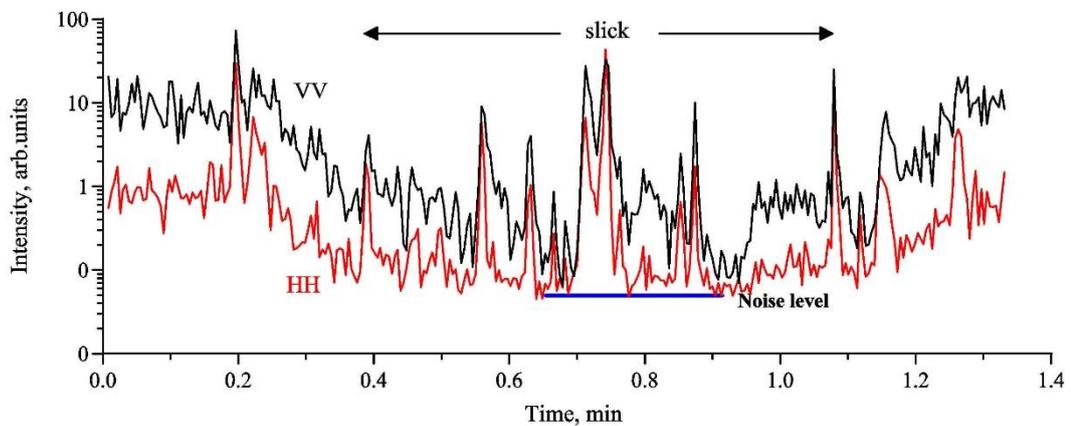


Рис. 4.5 Спектрограммы БК и НБК в зоне без плёнки (левая часть) и в зоне с плёнкой (правая часть). Угол падения 60 град. Лёгкий ветер, наблюдения с наветренной стороны.



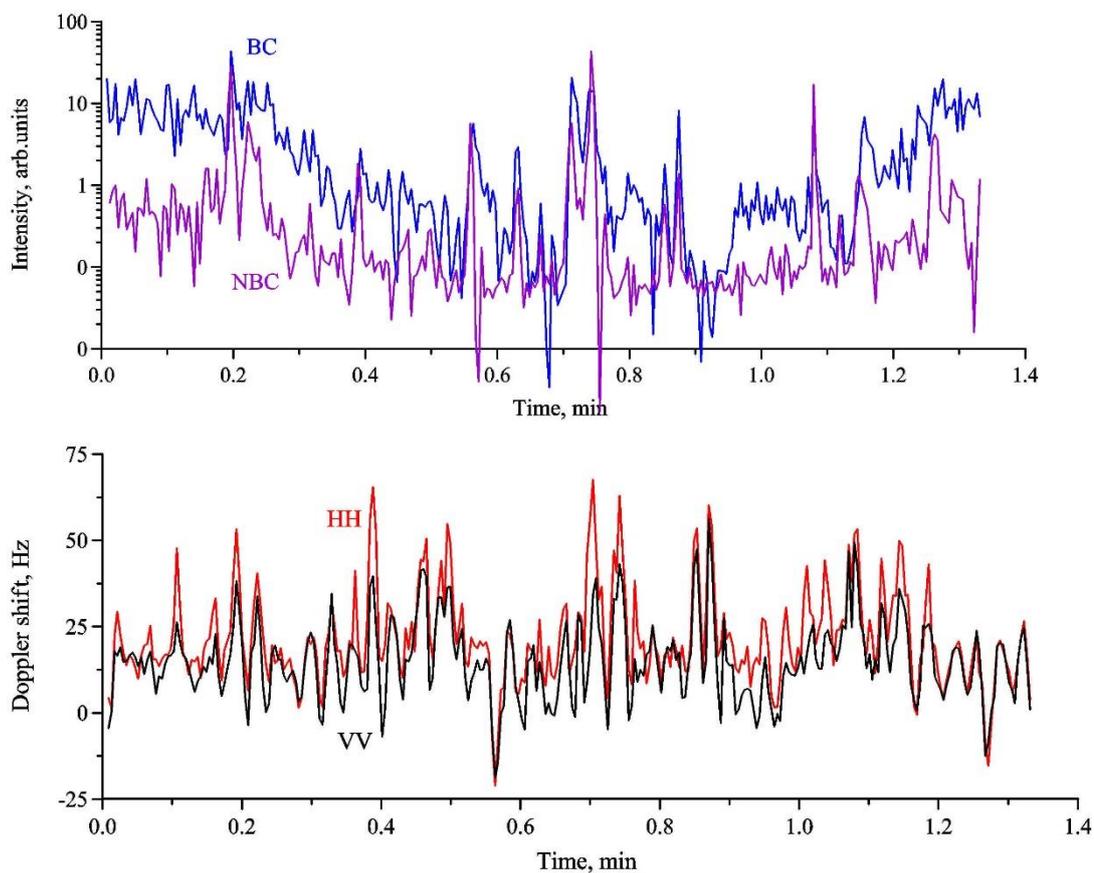


Рис. 4.6. То же, что и на рисунке 4.4, но для случая слика скорость ветра составляет 10 м/с.

Хотя интенсивность рассеяния на VV- и HH-поляризациях в сликах может приближаться к значениям, близким к уровню шума, интенсивность обратного рассеяния во многих пиках остается сравнимой с таковой в областях без сликов, а значения интенсивности в пиках на разных поляризациях близки по значениям. Как и в случае чистой воды, интенсивности VV- и HH-поляризованных пиков обратного рассеяния почти равны друг другу, и пики часто располагаются вблизи гребней ДВВ. Доплеровские сдвиги в пиках обычно больше на HH-поляризации, чем на VV (более подробно см. ниже), и разница может быть даже более выраженной в плёнках, чем на чистой воде.

#### 4.6. Доплеровские сдвиги VV- и HH-поляризованного обратного рассеяния

Рассмотрим гистограммы доплеровских сдвигов, которые представлены на рисунке 4.7 как для области чистой воды, так и для плёнки. Ширина распределений доплеровских сдвигов определяется в основном орбитальными скоростями ДВВ, и максимумы доплеровского сдвига соответствуют некоторым средним значениям сдвига. Хорошо видно, что средние доплеровские сдвиги на HH-поляризации больше, чем на VV-поляризации как на чистой воде, так и в сликах, а разница доплеровских сдвигов в сликах весьма существенна.

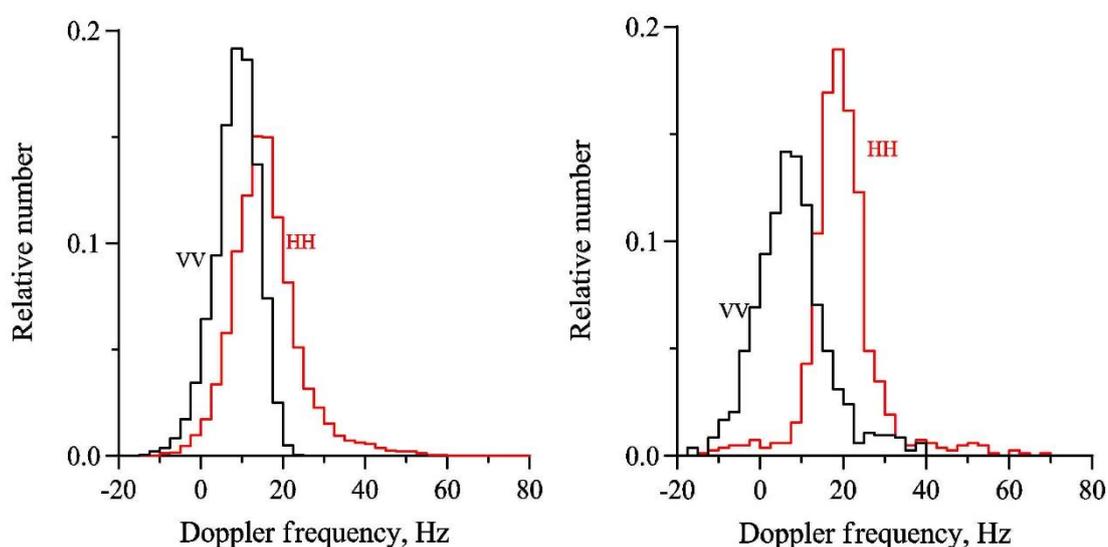


Рис. 4.7. Гистограммы радарных доплеровских сдвигов на чистой воде (слева) и в сликах (справа). Скорость ветра 10 м/с.

Из выявленного различия между доплеровскими сдвигами можно сделать вывод, что механизмы рассеяния на VV- и HH-поляризациях, а, следовательно, и происхождение NBC и BC в исследуемых условиях различны. Предположительно, NBC связана с наличием некоторых специфических нелинейных структур (НС) на профиле интенсивных волн см-дм масштаба - “toe/bulges” структур и паразитной ряби, образующихся вблизи гребней волн [97, 98]. В том числе в NBC вносят вклад обрушения более длинных метровых волн [89]. Дециметровые и метровые волны движутся

быстрее, чем см-брэгговские волны (в данном случае длина брэгговской волны составляет около 2 см), а особые нелинейные структуры на волновом профиле и обрушения гребней волн могут обеспечивать квазизеркальное рассеяние падающих микроволн. Тогда доплеровский сдвиг NBC должен быть больше, чем ВС-сдвиг, что согласуется с результатом на рисунке 4.7. Более выраженная разница между доплеровскими сдвигами в слайках объясняется тем, что брэгговская компонента определяется сильно затухающими в области плёнки “медленными” сантиметровыми волнами, а неполяризованная связана как с микрообрушениями см-дм волн, так и с сильными обрушениями “быстрых” волн метрового диапазона длин, на последние пленка практически не оказывает влияния

#### **4.7. Выводы к главе 4**

Небрэгговское рассеяние волн микроволнового диапазона при умеренных углах падения (около  $60^\circ$ ) и при скорости ветра 7-10 м/с вносит значительный вклад в радиолокационное рассеяние в X-диапазоне.

Мгновенное радиолокационное обратное рассеяние характеризуется модуляцией с периодами ДВВ и наличием редких, но сильных пиков интенсивности, вносящих значительный вклад в радиолокационное обратное рассеяние. Пики на VV- и HH-поляризациях имеют практически одинаковую интенсивность, что указывает на то, что радиолокационное рассеяние в них можно считать практически неполяризованным. Пики наиболее выражены на HH-поляризации, в то время как на VV-поляризации они не значительно больше, чем "фоновая" модуляция с периодами ДВВ. Такие пики интенсивности часто, но не всегда, возникают вблизи наибольших максимумов скорости орбитальной волны, то есть вблизи гребней наиболее интенсивных поверхностных волн. Вариации обратного рассеяния в слайках в целом похожи на вариации в областях чистой воды.

Радарные доплеровские сдвиги в пиках обычно больше на HH-поляризации, чем на VV-поляризации, и эта разница может быть даже больше

в сличках, чем на чистой воде. Из выявленной разницы между радарными доплеровскими сдвигами можно сделать вывод, что механизмы рассеяния на VV- и HH-поляризациях, а, следовательно, и формирование NBC и BC различны. BC определяется гравитационно-капиллярными брэгговскими волнами (для рассматриваемого случая с длиной волны 2 см). В сличке брэгговские волны сильно. Предполагается, что пики в радиолокационном рассеянии, которые вносят основной вклад в NBC, в целом связаны с сильной нелинейностью гравитационных волн дм и метрового масштаба, которые движутся быстрее гравитационно-капиллярных брэгговских волн, а именно со особыми нелинейными структурами на волновом профиле - “toe/bulges” структурами, паразитной рябью, образующимися вблизи гребней см-дм волн и обрушениями метровых волн. Особые нелинейные структуры на волновом профиле см-дм волн и обрушения “быстрых” метровых волн могут иметь большие наклоны и обеспечивать квазизеркальное рассеяние падающих микроволн. Первые могут подавляться плёнкой, однако на вторые она практически не оказывает влияния, что приводит к появлению пиков интенсивности и при наличии плёнки на морской поверхности, а также к увеличению разницы между доплеровскими сдвигами на разных поляризациях, по сравнению со случаем чистой воды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже перечислены основные результаты диссертации:

1. В ходе натурных 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 растёт со временем и скорость этого роста зависит от скорости, а поперечный по отношению к направлению скорости ветра размер слика от скорости ветра практически не зависит.

2. С использованием данных натурных экспериментов по растеканию разливов ПАВ, а также результатов лабораторного моделирования эффекта формирования стационарной границы плёнки за счет баланса градиента поверхностного натяжения и индуцированных гравитационно-капиллярными волнами напряжений разработана физическая модель анизотропного растекания плёнок 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 сликовых 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., Митягина М. И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №. 3. – С. 48-48.
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.
17. *Ermakov, S. A., Sergievskaya, I. A., Zuikova, E. M., Goldblat, V. Y., & Scott, J. C.* Field studies of natural slicks due to internal waves //IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99. – IEEE, 1999. – Т. 1. – С. 167-169.
18. *de Macedo C. R., da Silva J. C. B.* Further Insights on the Effects of Surfactants on Internal Wave SAR Signatures by Means of the Co-Polarized Phase Difference //IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2020. – С. 696-699.
19. *Platonov, A., Carrillo, A., Matulka, A., Sekula, E., Grau, J., Redondo, J. M., & Tarquis, A. M.* Multifractal observations of eddies, oil spills and natural slicks in the ocean surface //Il nuovo cimento C. – 2008. – Т. 31. – №. 5\6. – С. 861-880.
20. *Иванов, А. Ю., Матросова, Е. Р., Кучейко, А. Ю., Филимонова, Н. А., Евтушенко, Н. В., Терлеева, Н. В., & Либина, Н. В.* Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокационной съемки //Исследование Земли из космоса. – 2020. – №. 5. – С. 43-62.
21. *Дурягина Е. Г.* Нефтепродукты в морской среде //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – №. 17. – С. 122-130.
22. *Jeffery P. G.* Large-scale experiments on the spreading of oil at sea and its disappearance by natural factors //International Oil Spill Conference. – American Petroleum Institute, 1973. – Т. 1973. – №. 1. – С. 469-474.
23. *Elliott A. J., Hurford N., Penn C. J.* Shear diffusion and the spreading of oil slicks //Marine Pollution Bulletin. – 1986. – Т. 17. – №. 7. – С. 308-313.
24. *Jones, C. E., Dagestad, K. F., Breivik, Ø., Holt, B., Röhrs, J., Christensen, K. H., Espeseth, M., Brekke, C., & Skrunes, S.* Measurement and modeling of oil slick transport //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2016. – Т. 121. – №. 10. – С. 7759-7775.
25. *Konstantinov O. G., Pavlov A. N.* Complex monitoring of the state of sea water basins by optical methods. Part 2. Sea surface pollution registration //Atmospheric and Oceanic Optics. – 2013. – Т. 26. – №. 4. – С. 293-299.

26. *Shmirko K., Bobrikov A., Pavlov A.* Features of formation of sea surface slicks video images //21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2015. – Т. 9680. – С. 218-224.
27. *Капустин, И. А., Ермошкин, А. В., Богатов, Н. А., & Мольков, А. А.* Об оценке вклада приводного ветра в кинематику slicks на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – №. 2. – С. 163-172.
28. *Korinenko A. E., Malinovsky V. V.* Field study of film spreading on a sea surface //Oceanologia. – 2014. – Т. 56. – №. 3. – С. 461-475.
29. *Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Kapustin I. A.* Strong modulation of short wind waves and ka-band radar return due to internal waves in the presence of surface films. Theory and experiment //Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – №. 13. – С. 2462.
30. *Сергиевская И. А., Лазарева Т. Н.* Влияние температуры окружающей среды на вязкоупругие свойства нефтяных плёнок в приложении к проблеме дистанционного зондирования //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – №. 2. – С. 176-183.
31. *Бескид П. П., Дурягина Е. Г.* Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти //Эксплуатация морского транспорта. – 2011. – №. 1. – С. 71-75.
32. Sentinel Online technical website. URL: <https://sentinel.esa.int/> (дата обращения: 31.04.2023).
33. Landsat Science. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 31.04.2023).
34. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. URL: <https://space.oscar.wmo.int/> (дата обращения: 31.04.2023).
35. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн – Н.Новгород: ИПФ РАН. – 2010. – 164 с.
36. *Foss M.* Manifestation of momentum transfer in case of ocean surface waves being damped by an elastic film or a viscous layer. – Dissertation Dr. Sci., University of Tromso, Norway. – 2000. – 128 p.
37. *Elfouhaily T., Chapron, B., Katsaros, K., & Vandemark, D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1997. – Т. 102. – №. C7. – С. 15781-15796.
38. *Филлипс О. М.* Динамика верхнего слоя океана / Перевод с англ. Ю.А. Волкова и Г.С. Голицына; Под ред. А.С. Моница. - Москва : Мир. – 1969. – 267 с.
39. *Chen G., Han G., Yang X.* On the intrinsic shape of oceanic eddies derived from satellite altimetry //Remote Sensing of Environment. – 2019. – Т. 228. – С. 75-89.

40. *Early J. J., Samelson R. M., Chelton D. B.* The evolution and propagation of quasigeostrophic ocean eddies //Journal of Physical Oceanography. – 2011. – T. 41. – №. 8. – C. 1535-1555.
41. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies //Progress in oceanography. – 2011. – T. 91. – №. 2. – C. 167-216.
42. *Fu L. L., Le Traon P. Y.* Satellite altimetry and ocean dynamics //Comptes Rendus Geoscience. – 2006. – T. 338. – №. 14-15. – C. 1063-1076.
43. *Kubryakov, A. A., Stanichny, S. V., Zatsepin, A. G., & Kremenetskiy, V. V.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem //Journal of Marine Systems. – 2016. – T. 163. – C. 80-94.
44. *Lebedev S. A., Kostianoy A. G.* Satellite altimetry of the Caspian Sea //Sea, Moscow. – 2005. – T. 366.
45. *Raj, R. P., Johannessen, J. A., Eldevik, T., Nilsen, J. Ø., & Halo, I.* Quantifying mesoscale eddies in the Lofoten Basin //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2016. – T. 121. – №. 7. – C. 4503-4521.
46. *Rio M. H., Santoleri R.* Improved global surface currents from the merging of altimetry and sea surface temperature data //Remote sensing of Environment. – 2018. – T. 216. – C. 770-785.
47. *Emery, W. J., Thomas, A. C., Collins, M. J., Crawford, W. R., & Mackas, D. L.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1986. – T. 91. – №. C11. – C. 12865-12878.
48. *Dransfeld S., Larnicol G., Le Traon P. Y.* The potential of the maximum cross-correlation technique to estimate surface currents from thermal AVHRR global area coverage data //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2006. – T. 3. – №. 4. – C. 508-511.
49. *Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E.* Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations //The Cryosphere. – 2020. – T. 14. – №. 9. – C. 2941-2947.
50. *Chen W.* Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2011. – T. 116. – №. C6.
51. *Aleskerova, A., Kubryakov, A., Stanichny, S., Medvedeva, A., Plotnikov, E., Mizyuk, A., & Verzhenskaia, L.* Characteristics of topographic submesoscale eddies off the Crimea coast from high-resolution satellite optical measurements //Ocean Dynamics. – 2021. – T. 71. – №. 6-7. – C. 655-677.
52. *Marmorino G., Chen W.* Use of WorldView-2 along-track stereo imagery to probe a Baltic Sea algal spiral //Remote Sensing. – 2019. – T. 11. – №. 7. – C. 865.
53. *Qazi W. A., Emery W. J., Fox-Kemper B.* Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential

SAR images //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – T. 52. – №. 12. – C. 7559-7580.

54. Sun, H., Song, Q., Shao, R., & Schlicke, T. Estimation of sea surface currents based on ocean colour remote-sensing image analysis //International journal of remote sensing. – 2016. – T. 37. – №. 21. – C. 5105-5121.

55. Delandmeter, P., Lambrechts, J., Marmorino, G. O., Legat, V., Wolanski, E., Remacle, J. F., Chen, W. & Deleersnijder, E. Submesoscale tidal eddies in the wake of coral islands and reefs: satellite data and numerical modelling //Ocean Dynamics. – 2017. – T. 67. – C. 897-913.

56. Liu, T., Merat, A., Makhmalbaf, M. H. M., Fajardo, C., & Merati, P. Comparison between optical flow and cross-correlation methods for extraction of velocity fields from particle images //Experiments in Fluids. – 2015. – T. 56. – C. 1-23.

57. Yang Z., Johnson M. Hybrid particle image velocimetry with the combination of cross-correlation and optical flow method //Journal of Visualization. – 2017. – T. 20. – C. 625-638.

58. Ivanov A. Y., Ginzburg A. I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images //Journal of Earth System Science. – 2002. – T. 111. – №. 3. – C. 281.

59. Stuhlmacher A., Gade M. Statistical analyses of eddies in the Western Mediterranean Sea based on Synthetic Aperture Radar imagery //Remote Sensing of Environment. – 2020. – T. 250. – C. 112023.

60. Thielicke W., Stamhuis E. PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB //Journal of open research software. – 2014. – T. 2. – №. 1.

61. Huang H., Dabiri D., Gharib M. On errors of digital particle image velocimetry //Measurement Science and Technology. – 1997. – T. 8. – №. 12. – C. 1427.

62. 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. – T. 11. – №. 4. – C. 423.

63. Qi L., Wang, M., Hu, C., & Holt, B. On the capacity of Sentinel-1 synthetic aperture radar in detecting floating macroalgae and other floating matters //Remote Sensing of Environment. – 2022. – T. 280. – C. 113188.

64. Lin I. I., Alpers W., Liu W. T. First evidence for the detection of natural surface films by the QuikSCAT scatterometer // Geophysical research letters. – 2003. – T. 30. – №. 13. –C. 1713.

65. Ermakov, S. A., Kapustin, I. A., Lazareva, T. N., Sergievskaya, I. A., & Andriyanova, N. V. On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2013. – T. 49. – C. 307-314.

66. Gade M., Hühnerfuss H., Korenowski G. Marine surface films //The Netherlands: Springer-Verlag Berline Heidelberg. – 2006.

67. *Hühnerfuss H., Lange P., Walter W.* Wave damping by monomolecular surface films and their chemical structure. Part II: Variation of the hydrophilic part of the film molecules including natural substances // *Journal of Marine Research*. – 1984. – T. 42. – №. 3. – C. 737-759.
68. *Molokov, A. A., Fedorov, S. V., Pelevin, V. V., & Korchemkina, E. N.* Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 imagery // *Remote Sensing*. – 2019. – T. 11. – №. 10. – C. 1215.
69. *Alpers W., Hühnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1989. – T. 94. – №. C5. – C. 6251-6265.
70. *Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H., Masuko H., Kobayashi T.* Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1998. – T. 103. – №. C9. – C. 18851-18866.
71. *Ermakov S. A., Kijashko S. V.* Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films // *Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions and Remote Sensing*. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. – C. 113-128.
72. *Scott J. C., Thomas N. H.* Sea surface slicks-surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing // *Institute of mathematics and its applications conference series*. – Oxford; Clarendon; 1999, 1999. – T. 69. – C. 221-230.
73. *Alpers W., Holt B., Zeng K.* Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // *Remote sensing of environment*. – 2017. – T. 201. – C. 133-147.
74. *Gilerson, A. A., Gitelson, A. A., Zhou, J., Gurlin, D., Moses, W., Ioannou, I., & Ahmed, S. A.* Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands // *Optics Express*. – 2010. – T. 18. – №. 23. – C. 24109-24125.
75. *Hu C.* Hyperspectral reflectance spectra of floating matters derived from Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) observations // *Earth System Science Data*. – 2022. – T. 14. – №. 3. – C. 1183-1192.
76. *O'Reilly, J.E., Maritorena, S., O'Brien, M.C., Siegel, D.A., Toole, D., Menzies, D., Smith, R.C., Mueller, J.L., Mitchell, B.G., Kahru, M., et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3 // *NASA Technical Memorandum*. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center. – 2000. – V. 11. – P. 9–23.
77. *Gitelson A. A.* Nature of the peak near 700-nm on the radiance spectra and its application for remote estimation of phytoplankton pigments in inland waters // *8th Meeting on Optical Engineering in Israel: Optical Engineering and Remote Sensing*. – SPIE, 1993. – T. 1971. – C. 170-179.
78. *Kram M., Laverman L.* System and method for optical detection of petroleum and other products in an environment : пат. 7227139 США. – 2007.

79. *Zhao, J., Temimi, M., Ghedira, H., & Hu, C.* Exploring the potential of optical remote sensing for oil spill detection in shallow coastal waters—a case study in the Arabian Gulf // *Optics Express*. – 2014. – Т. 22. – №. 11. – С. 13755-13772.
80. *Fingas M., Brown C.* Review of oil spill remote sensing // *Marine pollution bulletin*. – 2014. – Т. 83. – №. 1. – С. 9-23.
81. *Мольков А. А., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Ермаков С. А.* Дистанционные методы определения толщины плёнок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2020. – Т. 17. – №. 3. – С. 9-27.
82. *Hu C.* A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Т. 113. – №. 10. – С. 2118-2129.
83. *Rajendran, S., Sadooni, F. N., Al-Kuwari, H. A. S., Oleg, A., Govil, H., Nasir, S., & Vethamony, P.* Monitoring oil spill in Norilsk, Russia using satellite data. *Sci. Rep.* 11, 3817. – 2021.
84. *Valenzuela G. R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—A review // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1978. – Т. 13. – №. 1-4. – С. 61-85.
85. *Holliday D., St-Cyr G., Woods N. E.* A radar ocean imaging model for small to moderate incidence angles // *International Journal of Remote Sensing*. – 1986. – Т. 7. – №. 12. – С. 1809-1834.
86. *Fung A. K., Li Z., Chen K. S.* Backscattering from a randomly rough dielectric surface // *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*. – 1992. – Т. 30. – №. 2. – С. 356-369.
87. *Voronovich A. G.* A two-scale model from the point of view of the small-slope approximation // *Waves in Random Media*. – 1996. – Т. 6. – №. 1. – С. 73.
88. *Plant W. J.* Microwave sea return at moderate to high incidence angles // *Waves in random media*. – 2003. – Т. 13. – №. 4. – С. 339.
89. *Kudryavtsev, V., Hauser, D., Caudal, G., & Chapron, B.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2003. – Т. 108. – №. C3. – С. 2-24.
90. *Ermakov S. A., Kapustin I. A., Sergievskaya I. A.* On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves // *Radiophysics and quantum electronics*. – 2012. – Т. 55. – №. 7. – С. 453-461.
91. *Ermakov, S. A., Kapustin, I. A., Kudryavtsev, V. N., Sergievskaya, I. A., Shomina, O. V., Chapron, B., & Yurovskiy, Y. Y.* On the Doppler frequency shifts of radar signals backscattered from the sea surface // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2014. – Т. 57. – С. 239-250.

92. *Hara T., Plant W. J.* Hydrodynamic modulation of short wind-wave spectra by long waves and its measurement using microwave backscatter //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1994. – T. 99. – №. C5. – C. 9767-9784.
93. *Keller, W. C., Plant, W. J., Petitt Jr, R. A., & Terray, E. A.* Microwave backscatter from the sea: Modulation of received power and Doppler bandwidth by long waves //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1994. – T. 99. – №. C5. – C. 9751-9766.
94. *Romeiser R., Alpers W., Wismann V.* An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1997. – T. 102. – №. C11. – C. 25237-25250.
95. *Donelan, M. A., Haus, B. K., Plant, W. J., & Troianowski, O.* Modulation of short wind waves by long waves //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2010. – T. 115. – №. C10. – C10003.
96. *Ermakov, S. A., Sergievskaya, I. A., Zuikova, E. M., & Shchegol'kov, Y. B.* Modulation of radar backscatter by long waves on the sea surface covered with a surfactant film //Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2004. – T. 40. – №. 1. – C. 91-98.
97. *Longuet-Higgins M. S.* Parasitic capillary waves: a direct calculation //Journal of Fluid Mechanics. – 1995. – T. 301. – C. 79-107.
98. *Longuet-Higgins M. S., Cleaver R. P.* Crest instabilities of gravity waves. Part 1. The almost-highest wave //Journal of Fluid Mechanics. – 1994. – T. 258. – C. 115-129.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1\*. Даниличева О. А., Ермаков С. А. О проявлениях биогенных плёнок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоёма //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\*. *Sergievskaya 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., Ергошкин А.В., Лазарева Т.Н., Лещев 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., Ергошкин А.В., Лазарева Т.Н., Лещев 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 молодых». – 2021. – С. 64.

17\*. *Даниличева О.А., Ермаков С.А., Капустин И.А.* Деформация плёночных slicks 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., Лещев 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 слоев на водной поверхности // Тезисы докладов 15-й Всероссийской 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 слоев на водной поверхности //Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. – 2018. – С. 405-407.