

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
УДК 551.465:621.396.969:551.46.09

МЯСОЕДОВ АЛЕКСАНДР ГЕРМАНОВИЧ

**Поверхностные проявления океанических явлений на оптических и  
радиолокационных спутниковых снимках: Синергетический подход  
в исследовании**

**Синергетика спутниковых оптических и радиолокационных  
изображений поверхностных явлений Океана**

Специальность 25.00.28 — океанология

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Кудрявцев В. Н.

СПб – 2013

# Содержание

<b>Todo list</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Введение</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>1 Солнечный блик как “инструмент” исследования Океана из Космоса</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1 Общие представления . . . . .	8
1.2 Оптические исследования океана из Космоса . . . . .	11
1.2.1 Солнечный блик как источник информации о поверхностных явлениях	13
1.3 Модель изображения морской поверхности в области солнечного блика . . . . .	15
1.3.1 Основные соотношения . . . . .	15
1.3.2 Связь вариаций яркости с вариациями СКН . . . . .	17
1.3.3 Восстановления СКН по полям яркости . . . . .	19
1.3.4 Пример восстановления СКН модельного блика . . . . .	21
1.4 Применение метода к анализу данных MODIS и MERIS . . . . .	24
1.5 Программа восстановления СКН по полям яркости . . . . .	27
1.5.1 Среда и языки программирования . . . . .	27
1.5.2 Данные MODIS и MERIS, используемые в примере . . . . .	27
1.5.3 Процедура восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям . . . . .	28
1.6 Выводы по главе . . . . .	40
<b>2 Оптические и радиолокационные исследования нефтяных сливов</b> . . . . .	<b>42</b>
2.1 Нефтяные плёнки природного происхождения . . . . .	42
2.2 Катастрофические нефтяные загрязнения . . . . .	45
2.3 Контрасты СКН и УЭПР нефтяных сливов . . . . .	55
2.4 Выводы по главе . . . . .	59
<b>3 Исследование суб- и мезомасштабной динамики океана по оптическим и радиолокационным изображениям</b> . . . . .	<b>61</b>

3.1	Внутренние волны . . . . .	61
3.2	Мезомасштабные течения . . . . .	66
3.2.1	Наблюдения . . . . .	66
3.2.2	Процедура реконструкции квазигеострофической и агеострофической циркуляции по ТПО . . . . .	69
3.2.3	Особенности мезомасштабных течений, восстановленные по ТПО, и их связь с аномалиями РСА сигнала и СКН . . . . .	73
3.3	Интерпретация данных наблюдений на основе модельных представлений . . .	77
3.3.1	Результаты интерпретации данных . . . . .	78
3.4	Выводы по главе . . . . .	82
	<b>Заключение . . . . .</b>	<b>85</b>
	<b>Список рисунков . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>Список таблиц . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Литература . . . . .</b>	<b>90</b>
	<b>A Основные соотношения модели RIM . . . . .</b>	<b>97</b>
A.1	Приближённое решение задачи о трансформации волн . . . . .	100
A.2	Трансформация СКН и обрушений волн . . . . .	103

# **Todo list**

единицы измерения в Главах textit . . . . .	8
??? . . . . .	76
APPENDIX . . . . .	97

# Введение

Обзор, введение в тему, обозначение места данной работы в мировых исследованиях и т.п.

**Целью** данной работы является ...

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать, разработать, вычислить и т.д. и т.п.
2. Исследовать, разработать, вычислить и т.д. и т.п.
3. Исследовать, разработать, вычислить и т.д. и т.п.
4. Исследовать, разработать, вычислить и т.д. и т.п.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Первое положение
2. Второе положение
3. Третье положение
4. Четвертое положение

**Научная новизна:**

1. Впервые ...
2. Впервые ...
3. Было выполнено оригинальное исследование ...

**Научная и практическая значимость ...**

**Степень достоверности** полученных результатов обеспечивается ... Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: перечисление основных конференций, симпозиумов и т.п.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие . . .

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в XX печатных изданиях [Басс и Фукс, 1972], X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [Мельник и др., 1980], XX — в тезисах докладов [Дулов и др., 1986].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет XXX страница с XX рисунками и XX таблицами. Список литературы содержит XXX наименований.

# Глава 1

## Солнечный блик как “инструмент” исследования Океана из Космоса

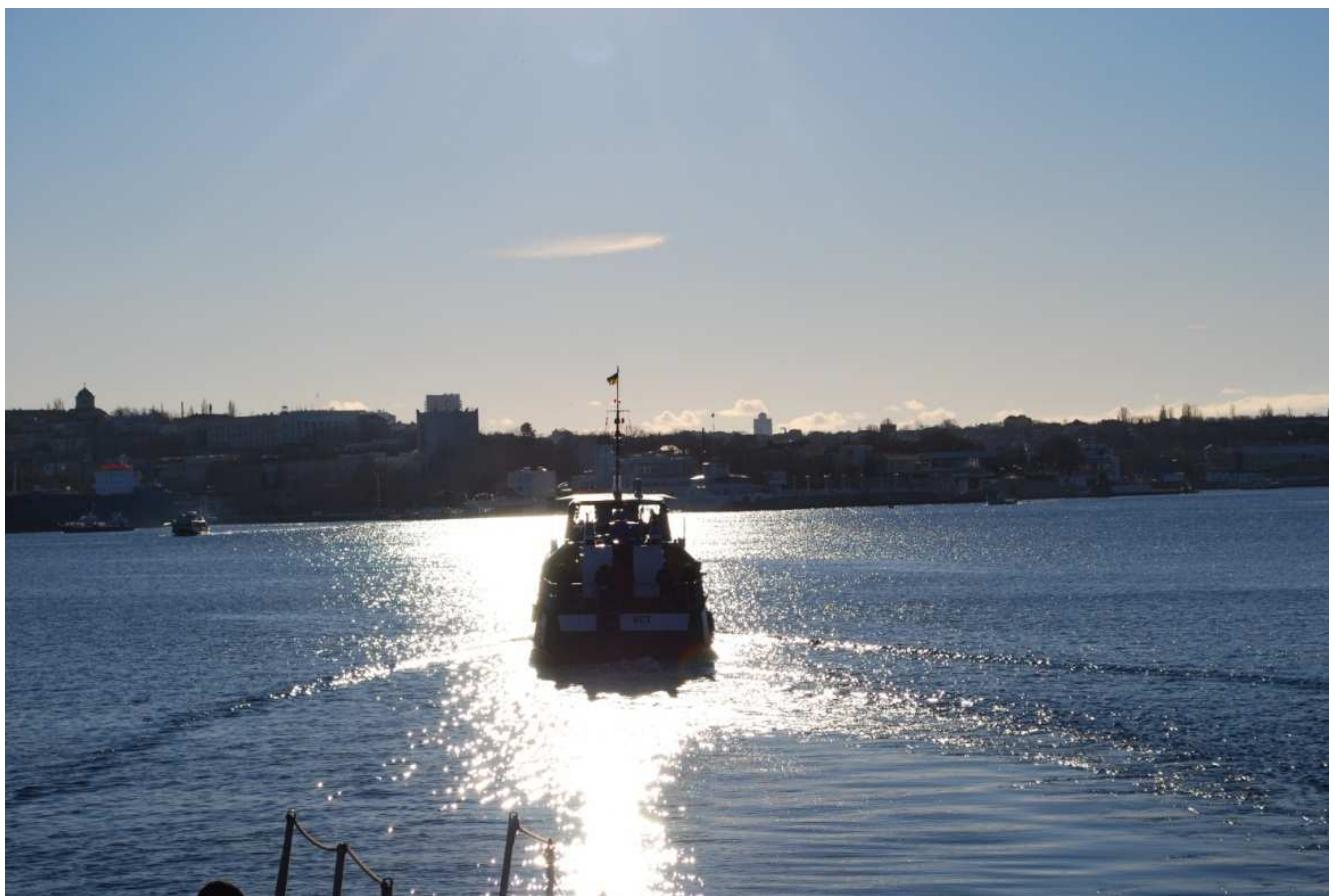
Морозным днем 31 декабря 2008 года я плыл на пароме по Севастопольской бухте и уже в который раз наблюдал всем хорошо известное явление – солнечный блик (см. Рисунок 1.1). Те, кто живут у моря, настолько привыкли наблюдать блики на морской поверхности, что их это давно не удивляет. Те же, кто приехал отдохнуть, нежатся под лучами солнца и прикрываются солнцезащитными очками, чтобы бликующая поверхность не слепила глаза. И лишь некоторые вспоминают о бликах, когда играют с детьми или со своими питомцами, “пускают солнечных зайчиков”, отраженных от зеркала пудреницы. Но, несмотря на то, что явление это, казалось бы, довольно обыденное, оно далеко не полностью изучено и, уверен, о применении его будет написана еще ни одна диссертация.

Итак, рассмотрим, каковы же условия для формирования солнечного блика на поверхности океана.

единицы измерения в Главах textit

### 1.1 Общие представления

Спутниковое дистанционное зондирование (ДЗ) – это регистрация датчиком, установленным на искусственном спутнике, электромагнитного излучения, которое отражается или испускается поверхностью Земли [Robinson, 2004]. При дистанционном зондировании океанов, морей и др. водных объектов одним из источников измеряемого излучения является солнечный свет, который проникает в толщу воды, частично поглощается ею, а также рассеивается и отражается, в том числе и в направлении удаленного датчика (см. Рисунок 1.2).

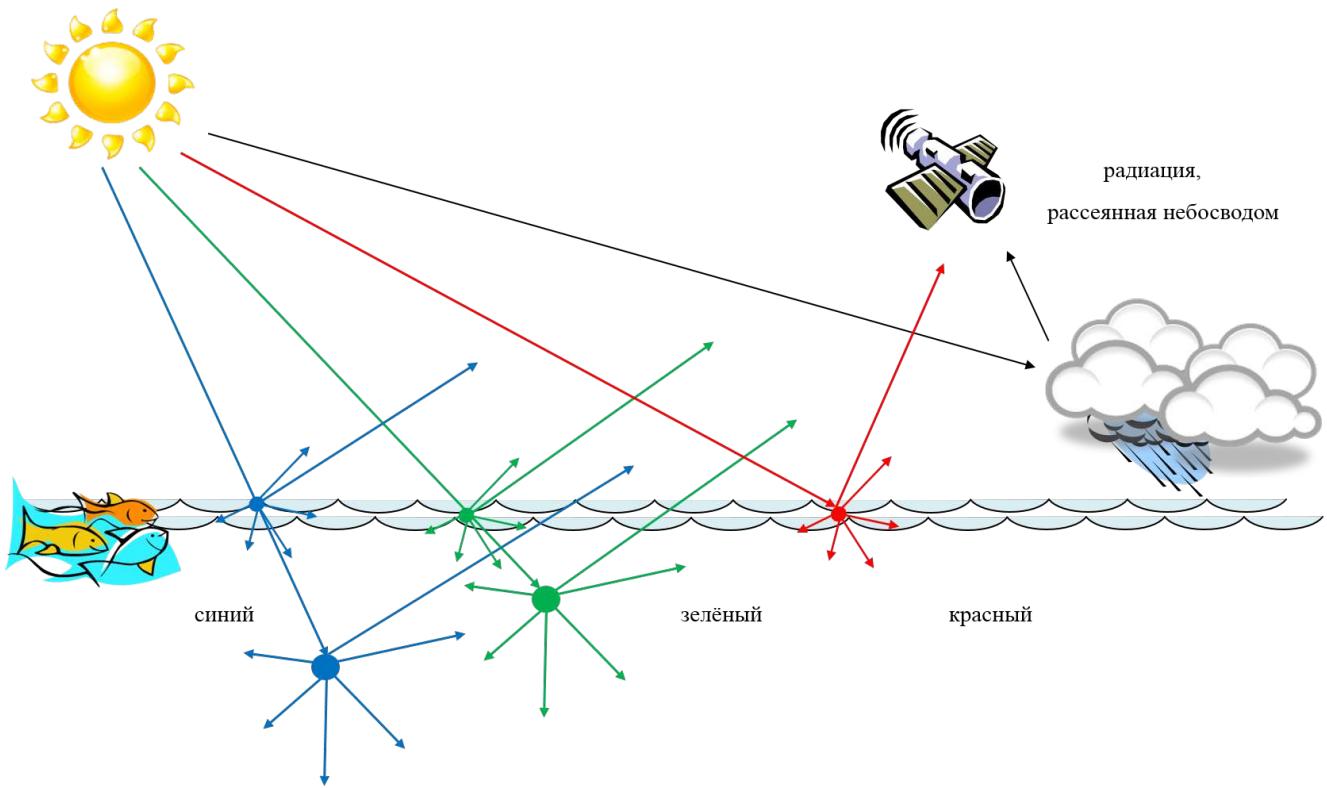


*Солнечный блик в середине дня должен был быть виден как симметричное яркое пятно, но ветер, течения, слики и проходящие суда сформировали на морской поверхности множество уклонов, благодаря которым мы наблюдаем сложную картину зеркальных отражений – множество “солнечных зайчиков”, которые, сливаясь воедино, формируют неподражаемую картину*

Рисунок 1.1 – Солнечный блик в Севастопольской бухте, 31 декабря 2008г.

Фотоны, попадающие в водную среду, взаимодействуют с молекулами воды, органическим веществом, растворенным в воде, клетками микроводорослей, взвешенными веществами (такими как минеральная взвесь, детрит) и планктонными организмами (такими как бактерии и зоопланктон).

Большая часть солнечной энергии поглощается водой и превращается в тепло, но часть фотонов оказывается рассеянной, в том числе, и в направлении раздела вода-воздух. В результате фотон может покинуть водную среду и достигнуть удаленного датчика. Величина вероятности рассеяния зависит как от размера рассеивающего компонента и его комплексного показателя преломления, так и от энергии фотона. Спектральное распределение све-



*Солнечный свет проникает в толщу воды, частично поглощается ею, а также рассеивается и отражается, в том числе и в направлении дистанционного датчика.*

*Обратим внимание, что свет в красном канале поглощается в “тонком” поверхностном слое океана [Jerlov, 1976], и, таким образом, не так чувствителен к “цвету” водного столба, а также не чувствителен к поверхностной температуре*

Рисунок 1.2 – Схематическое изображение компонент солнечного излучения регистрируемого спутниковым датчиком

та, вышедшего из воды, зависит от положения Солнца, состояния облачности и природных свойств самой воды и веществ, в ней находящихся.

Восприятие цвета воды человеческим глазом определяется спектральным распределением света, восходящего из-под поверхности воды. Так чистые океанические воды имеют голубой цвет, а прибрежные воды могут быть зеленоватыми, бурьими или желтоватыми в зависимости от наличия в воде микроводорослей, неорганических взвесей и растворенных органических веществ [Pozdnyakov and Graß 1, 2003].

Вышеизложенный принцип рассеяния радиации в верхнем слое океана лежит в основе спутниковых оптических методов исследования цвета океана.

## 1.2 Оптические исследования океана из Космоса

Оптические методы – традиционные и широко используемые спутниковые методы исследования Океана. Некоторые характеристики наиболее часто используемых оптических спектрометров приводятся в Таблице 1.1. В работе использованы данные дистанционного зондирования, полученные в оптическом диапазоне двумя спектрометрами MODIS и MERIS (Таблицы 1.1, 1.2). В значительной мере специализированные под задачи дистанционного зондирования Мирового океана, эти приборы установлены на искусственных спутниках Земли, летающих на околополярной орбите. Это обеспечивает возможность получать ежедневные данные по всей поверхности Земли. Работа спутников обеспечивается наземными службами, которые получают исходные данные со спутника по радиоканалу, проводят их первичную обработку и распространяют готовые данные зондирования через Интернет или адресно рассылают их на CD потребителям.

Одно из основных применений данных, полученных с помощью спутниковых оптических сканеров, – изучение оптических характеристик верхнего слоя океана (цвет океанической воды, содержание фитопланктона и минеральной взвеси, биогеохимические характеристики), а также температуры его поверхности (см., например, [Doerffer and Schiller, 2007; Korosov et al., 2009]).

В этом случае солнечная радиация, отраженная от морской поверхности, является шумом по отношению к радиации рассеянной в верхнем слое океана. В областях солнечного блика отражённая радиация составляет значительную часть регистрируемого излучения, что, в свою очередь, порождает большие трудности при создании алгоритмов восстановления “цвета” океана. Так, например, для маскирования пикселей изображений MERIS морской поверхности, содержащих яркости солнечного блика, создан специальный алгоритм, включённый в стандартные алгоритмы атмосферной коррекции продуктов MERIS [Montagner et al., 2003].

На Рисунке 1.3, *a* приводится пример “глобальной” маски блика от 21 марта 2004 года для MODIS/Aqua, а на Рисунке 1.3, *b* для SeaWiFS. Из приведённых примеров видно, что огромная часть объёма данных на значительных акваториях не может быть использована, маскируется для конечного пользователя и, таким образом, “выбрасывается в мусорный ящик”.

Основной целью работы является разработка методов и алгоритмов, дающих возможность использовать данные о яркости океанической поверхности внутри солнечного блика, для исследования океанографических явлений по их поверхностным проявлениям.

Датчик	SeaWiFS	MODIS	MERIS	AVHRR
Спутник	SeaStar	Aqua, Terra	ENVISAT	NOAA
Год запуска	1997	2000, 2001	2002	1987
Полоса обзора, км	2800	2300	1150	2580
Среднее спектральное разрешение, нм	20	10	10	500
Спектральный диапазон, нм	412 – 865	405 – 14385	390 – 1040	590 – 12000
Количество каналов	8	36	15	5
Пространственное разрешение в надире, км	1.1	0.25 0.5 1.1	0.3 1.2	1.1

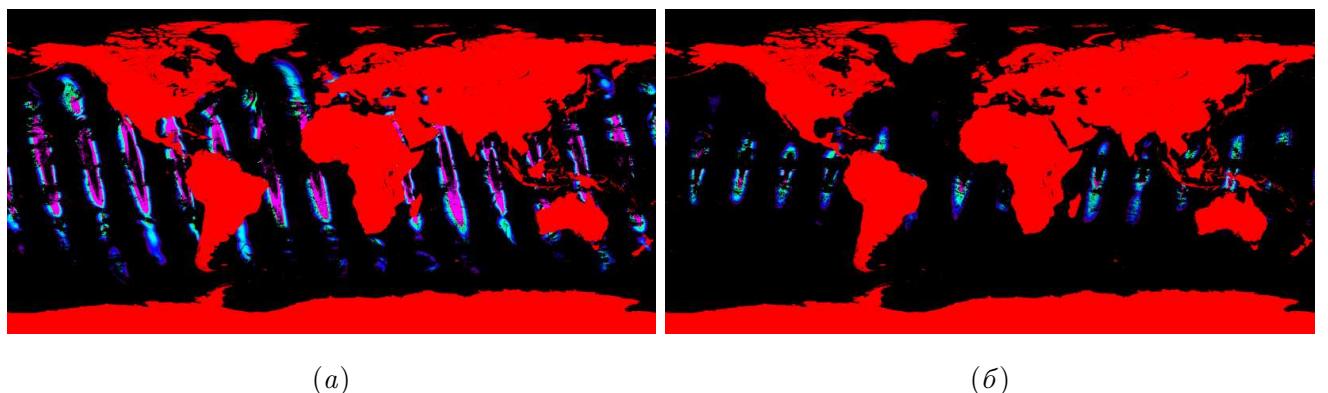
Таблица 1.1 – Основные характеристики некоторых спутниковых спектрометров

Номера каналов	Спектральный диапазон (мкм)	Пространств. разрешение (м)	Полоса обзора (км)	Повторяемость съемки одной территории
1-2	0.62 - 0.88	250	2300	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки
3-7	0.46 - 2.16	500	2300	
8-19	0.41 - 0.97	1000	2300	
20-25	3.66 - 4.55	1000	2300	
26	1.36 - 1.39	1000	2300	
27-36	6.54 - 14.39	1000	2300	

Таблица 1.2 – Основные характеристики спектрометра MODIS

### 1.2.1 Солнечный блик как источник информации о поверхностных явлениях

Как было отмечено, основные океанографические приложения оптических спутниковых данных связаны с изучением цвета океана. С одной стороны, отражённый от морской поверхности солнечный свет составляет основной вклад восходящей радиации и создаёт значительные трудности для разработчиков алгоритмов восстановления цвета океана. Однако, в солнечном блике содержится ценная информация о статистических характеристиках шероховатости морской поверхности, её среднеквадратичном наклоне (СКН), асимметрии и эксцессе, как было впервые показано в работе Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b], а также Бреоном и Хенриотом [Bréon and Henriet, 2006].



*Внушительная часть данных оптического диапазона на значительных акваториях не может быть использована и потому маскируется*

Рисунок 1.3 – “Глобальная” маска блика от 21 Марта 2004 года для MODIS/Aqua и SeaWiFS

Большинство явлений на поверхности океана, как, например, биогенные и нефтяные плёнки, внутренние волны (ВВ), кильватерные струи за судном, спиралевидные вихри, оказывают локальное влияние на шероховатость поверхности, что и приводит к их проявлениям в оптических данных. Существует много работ, посвящённых спутниковым наблюдениям поверхностных сливков в солнечном блике, например [Adamo et al., 2005; Chust and Sagarminaga, 2007; Hu et al., 2009]. Хеннингс и др. [Hennings et al., 1994] представили результаты наблюдений поверхностных проявлений рельефа дна на мелководье по спутниковым изображениям солнечного блика. Авторы работ [Apel et al., 1975; Artale et al., 1990; Mitnik et al., 2000] наблюдали и изучали проявления нелинейных ВВ в солнечном блике. Джексон и Алперс [Jackson and Alpers, 2010] использовали данные прибора MODIS в солнечном блике для определения пространственного распределения ВВ по всемирному Океану.

Очевидно, что контрасты яркости в солнечном блике вызваны пространственными вариациями “шероховатости” морской поверхности, вследствие воздействия океанических процессов на ветровые волны. В случае с поверхностными сликами, амплитуда наблюдаемых контрастов связана с типом плёнки (биогенного происхождения или нефти), а также, вероятно, с толщиной нефтяной плёнки, образующей слик. Таким образом, количественная интерпретация контрастов яркости в солнечном блике может существенно приблизить нас к лучшему пониманию механизмов подавления коротких волн.

На данный момент существует несколько исследований, посвящённых проблеме восстановления аномалий шероховатости по изображениям солнечного блика. Бурдюгов с соавторами [Burdyugov et al., 1987] использовали модель Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a] для восстановления контрастов СКН по вариациям яркости в солнечном блике, применив этот подход к аэрофотографиям поверхностных слик, образованных прохождением серии ВВ. Также ранее был предложен метод восстановления двумерного спектра возвышений поверхностных волн по изображениям солнечного блика (см., например, [Stilwell, 1969; Bolshakov et al., 1990a]). В работе [Bolshakov et al., 1990b] эти данные использовались для исследования эволюции и трансформации двумерного спектра ветрового волнения.

Насколько известно, в отличие от определения “фоновых” статистических свойств уклонов морской поверхности, спутниковые изображения солнечного блика никогда ранее не использовались для количественных оценок аномалий СКН шероховатости морской поверхности. Поскольку яркость в солнечном блике, как и её контрасты, вызванные теми или иными явлениями, зависят от геометрии наблюдения и положения Солнца, возникают определённые трудности с интерпретацией. Так контрасты СКН могут проявляться как в виде тёмных, так и ярких аномалий яркости (см., например, [Hu et al., 2009] для нефтяных слик; [Matthews, 2005; Munk et al., 1987] для кильватерных струй и ВВ; [Munk et al., 2000] для вихрей; [Jackson and Alpers, 2010] для ВВ и нефтяных загрязнений). Это свойство следует непосредственно из геометрии наблюдения, когда зеркальные точки располагаются по разные стороны зон инверсии контрастов, как показано в работах [Burdyugov et al., 1987] и [Jackson and Alpers, 2010].

## 1.3 Модель изображения морской поверхности в области солнечного блика

При условии, что океан мог бы оказаться совершенно спокойным, а его поверхность невозмущённой, то на поверхности сформировался бы единственный солнечный блик с центром в зеркальной точке. Однако, в природе мы часто наблюдаем другую картину, когда множество “солнечных зайчиков” формируют сложную “бликующую” картину на взволнованной водной глади.

В этом случае, излучение, приходящее в приёмник, формируется совокупностью зеркальных отражений от склонов поверхностных волн, распределённых по морской поверхности.

Для исследования солнечного блика наиболее предпочтителен красный канал, поскольку свет в красном канале поглощается в “тонком” поверхностном слое океана [Jerlov, 1976], и, таким образом, менее чувствителен к “цвету” водного столба, а также не чувствителен к поверхностной температуре.

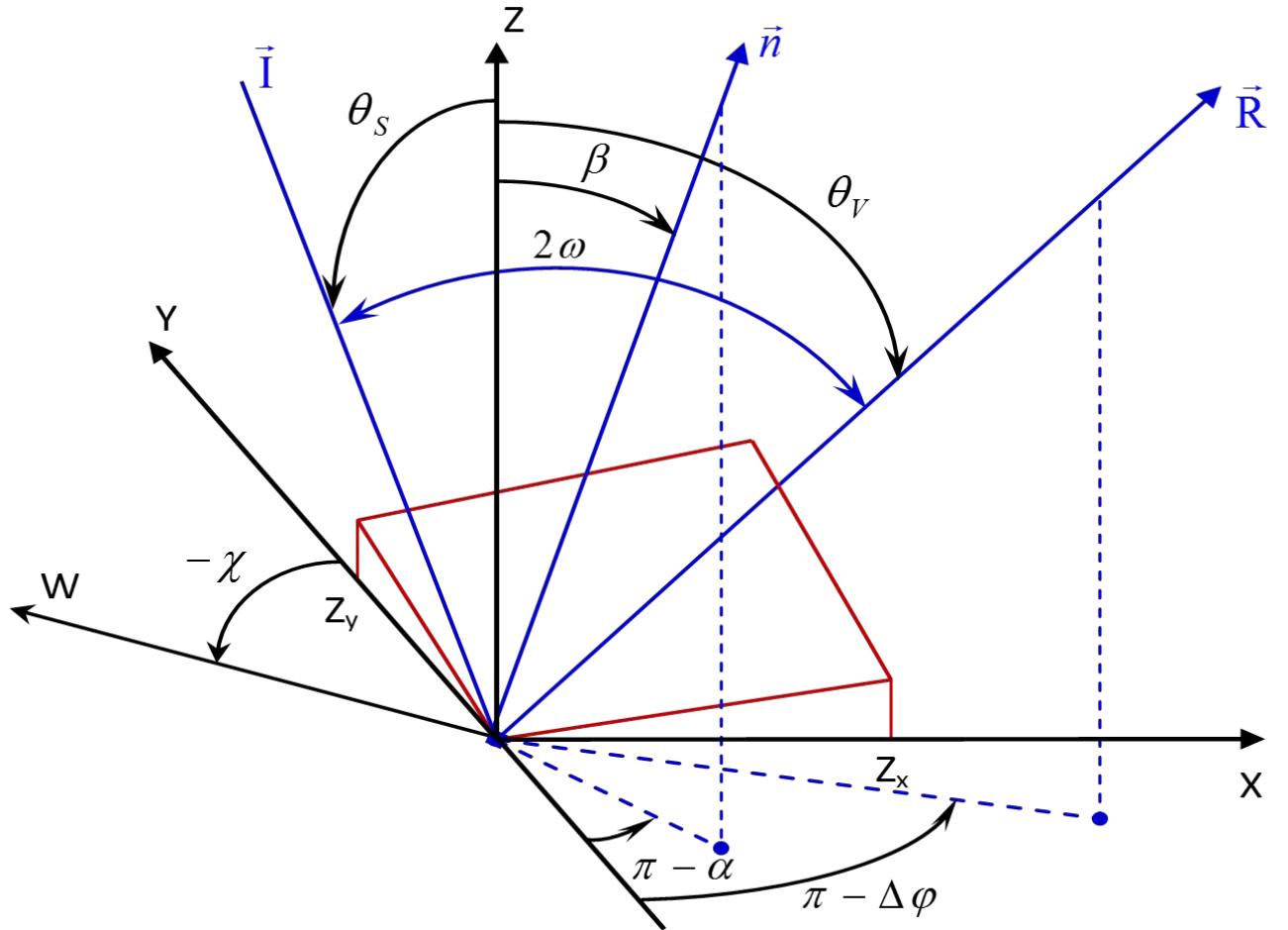
Солнечный блик несёт в себе очень ценную информацию о статистических характеристиках морской поверхности – среднеквадратичном наклоне (СКН), асимметрии и кривизне, что было отчётливо показано в пионерских работах Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b, 1956], а также описано в недавней работе [Bréon and Henriot, 2006], в которой авторы использовали огромный массив спутниковых данных оптического диапазона. Поскольку количество отражённой радиации в районе солнечного блика зависит от СКН, любое явление, наблюдаемое на поверхности океана (как слики, внутренние волны, фронты течений, вихри, грибовидные структуры и др.), приводящее к вариациям СКН, возможно наблюдать в контрастах яркости.

### 1.3.1 Основные соотношения

Геометрия зеркального отражения солнечного излучения от уклонов взволнованной поверхности океана приведена на Рисунке 1.4. Зеркальные отражения должны удовлетворять двум условиям:

- угол падения равен углу отражения;
- луч падающий ( $I$ ), луч отражённый ( $R$ ) и перпендикуляр ( $n$ ) к отражающей поверхности в точке излома луча всегда лежат в одной плоскости

$$[(\vec{R} - \vec{I}) \times \vec{n}] = 0 \text{ или } (\vec{R} - \vec{I}) = 2\vec{n} \cos \omega \quad (1.1)$$



Система координат выбрана таким образом, что ось  $z$  сонаправлена с азимутом Солнца,  $\theta_s$ ,  $\theta_V$  – зенитные углы Солнца и сенсора, соответственно,  $\varphi_V$  – азимут сенсора. Уклон описывается зенитным  $\beta$  и азимутальным  $\alpha$  углами (отсчитываемого по часовой от Солнца).  $W$  – модуль скорости ветра,  $\chi$  – направление ветра,  $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_V$

Рисунок 1.4 – Геометрия отражения солнечного блика

Яркость  $B$  изображения морской поверхности в солнечном блике определяется функцией распределения уклонов  $P(Z_x, Z_y)$ , присутствующих на поверхности волн [Cox and Munk, 1954a,b]. Исходя из геометрии отражения и опуская подробные выкладки, эту зависимость можно представить в следующем виде [Cox and Munk, 1954a,b; Большаков и др., 1988]:

$$B = \frac{\rho E_0}{4 \cos \theta_v \cos^4 \beta} P(Z_x, Z_y), \quad (1.2)$$

где  $B$  – отраженная от поверхности моря яркость;

$E_0$  – освещённость поверхности моря прямыми солнечными лучами;

$\rho$  – коэффициент отражения Френеля;

$\theta_v$  – зенитный угол наблюдения;

$P(Z_x, Z_y)$  – двумерная функция плотности распределения вероятности (ПРВ) наклонов морской поверхности;

$Z_x$  и  $Z_y$  – наклоны морской поверхности, удовлетворяющие условиям зеркального отражения солнечного излучения в приемную апертуру прибора, которые связаны с “геометрией наблюдения и освещенностью” морской поверхности следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s + \sin \theta_v \cos \varphi_v}{\cos \theta_s + \cos \theta_v}, \\ Z_y &= \frac{\sin \theta_s \sin \varphi_s + \sin \theta_v \sin \varphi_v}{\cos \theta_s + \cos \theta_v}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где

$\theta_s$  – зенитный угол Солнца;  $\varphi_v$  и  $\varphi_s$  – азимутальные углы наблюдения и Солнца, соответственно и

$$\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}, \quad (1.4)$$

Уравнение (1.2) рассматривается как основное, и все предположения относительно формирования яркости поверхности в солнечном блике относятся к заданию вида функции плотности распределения вероятности наклонов морской поверхности. Кокс и Манк [Cox and Munk, 1954a,b] в 1954 году, а позднее авторы статей [Chapron et al., 2000; Ebuchi, 2002], а также [Bréon and Henriot, 2006], предложили моделировать  $P(Z_x, Z_y)$  в виде рядов Грамма-Шарлье. Подгоняя модель (1.2) с  $P(Z_x, Z_y)$ , заданной в виде рядов Грамма-Шарлье, к измеряемой яркости блика, Кокс и Манк [Cox and Munk, 1954a,b] получили фундаментальные статистические характеристики наклонов морской поверхности – среднеквадратичный наклон, их асимметрию и эксцесс, а также выявили их зависимость от скорости ветра.

### 1.3.2 Связь вариаций яркости с вариациями СКН

Соотношение (1.2) предоставляет возможность исследовать поверхностные проявления различных процессов (как, например, слики или особенности течений), приводящие к вариациям СКН, и, как следствие, к изменениям яркости на “внутренних” масштабах солнечного блика, т.е. на масштабах много меньших “ширины” самого блика.

Представим плотность распределения вероятностей  $P$  в (1.2) в следующем “нормированном” виде:

$$P(Z_x, Z_y) = s^{-2} p(\xi, \eta), \quad (1.5)$$

где  $\xi = Z_x/s$  и  $\eta = Z_y/s$ ,  $s^2$  – среднеквадратичный наклон морской поверхности, а  $p$  – “безразмерная” плотность вероятностей. Очевидно, что являясь функцией  $\xi$  и  $\eta$ , функция  $p$  зависит от анизотропии наклонов морской поверхности относительно вектора ветра, а также нелинейных особенностей наклонов – их асимметрии и эксцесса. Отметим, что если вероятность наклонов задана в виде Гауссова распределения или рядом Грамма–Шарлье, тогда безразмерная функция  $p$  (1.5) может быть легко определена. Однако, как будет показано ниже, при наличии информации о двумерном поле яркости, необходимость в задании какой-либо модели вероятности наклонов отпадает, т.к. её “реальный” вид может быть определен по форме блика.

Мы предполагаем, что СКН,  $s^2$ , как и другие характеристики уклонов морской поверхности, могут быть представлены в виде суммы среднего значения  $\bar{s}^2$  и его вариаций  $\tilde{s}^2$ :

$$s^2 = \bar{s}^2 + \tilde{s}^2. \quad (1.6)$$

Вариации  $\tilde{s}^2$  относятся к внутреннему пространственному масштабу  $l$ , который значительно меньше масштабов блика  $L$ :  $l \ll L$ . Аналогично, поле яркости  $B$  анализируемых изображений, разлагается на две составляющих: крупномасштабную –  $\bar{B}$  и мелкомасштабную –  $\tilde{B}$ , т.е.  $B = \bar{B} + \tilde{B}$ . Поле  $\bar{B}$  соответствует вариациям яркости на масштабах солнечно блика, а поле  $\tilde{B}$  – вариациям яркости на внутренних (намного меньших) масштабах, связанных с вариациями СКН, которые можно рассматривать как поверхностные проявления того или иного океанического явления.

Далее черта над средними значениями будет упущена, т.е. например  $\bar{s}^2 \rightarrow s^2$ . Из уравнений (1.2) и (1.5) легко получить линеаризованное отношение между малыми вариациями яркости солнечного блика  $\tilde{B}$  и СКН  $\tilde{s}^2$ :

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{B}}{B} &= -T \frac{\tilde{s}^2}{s^2} \\ T &= 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\xi}{p} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\eta}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right), \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $T$  – это передаточная функция.

Чтобы получить выражение (1.7) мы предположили, что вариации СКН  $\tilde{s}^2$  являются доминирующими, т.е. их величина намного больше, чем вариации других статистических характеристик наклонов поверхности, в частности, асимметрии и кривизны. Другими словами, мы предполагаем, что величина относительных вариаций СКН  $\tilde{s}^2/s^2$  значительно

больше относительных вариаций нормированных моментов уклонов морской поверхности  $c_{mn} = \overline{z_x^m z_y^n} / s^{m+n}$ :  $\tilde{s}^2 / s^2 \gg \tilde{c}_{mn} / c_{mn}$ . Это предположение следует из данных, полученных Коксом и Манком, в ходе измерений характеристик чистой поверхности и поверхности, покрытой пленкой [Cox and Munk, 1954a,b]. По их наблюдениям, отношение СКН чистой к загрязнённой, сливовой поверхности при скоростях ветра 4 – 15 м/с составляет  $(s^2)_{clean} / (s^2)_{slick} \approx 2$ , в то время как для нормированных моментов  $c_{20}$  (компоненты СКН по направлению ветра) и  $c_{02}$  (компоненты СКН, перпендикулярные ветру) эти же отношения,  $(c_{20})_{clean} / (c_{20})_{slick}$  и  $(c_{02})_{clean} / (c_{02})_{slick}$ , варьируются в пределах  $1 \pm 0.1$ . Эти оценки показывают, что, несмотря на сильное подавление СКН в областях, покрытых сликами, коэффициенты анизотропии уклонов меняются незначительно.

Выражение (1.7) является основным соотношением алгоритма восстановления контрастов СКН морской поверхности по оптическим изображениям блика. Возможны два варианта использования (1.7):

1. восстановление контрастов СКН на основе (1.7) по 2D изображениям блика без априорного задания модели  $P(Z_x, Z_y)$ ;
2. восстановление контрастов СКН на основе (1.7) при использовании некоторой модели  $P(Z_x, Z_y)$ .

Первый вариант будет применен к анализу данных MODIS, а второй – данных MERIS.

### 1.3.3 Восстановления СКН по полям яркости

#### 2D поля яркости

При наличии 2D поля яркости солнечного блика передаточная функция  $T$  в (1.7) может быть определена по усредненным градиентам яркости, которые берутся непосредственно из изображения солнечного блика (см., например, Рисунок 1.6). Используя формулу (1.2), градиенты безразмерной плотности вероятности наклонов  $p$  в (1.7) находятся из градиентов крупномасштабной яркости солнечного блика следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\xi}{p} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= \frac{\xi}{B} \frac{\partial B}{\partial \xi} - \frac{4Z_x^2}{1+Z_x^2+Z_y^2} \\ \frac{\eta}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} &= \frac{\eta}{B} \frac{\partial B}{\partial \eta} - \frac{4Z_y^2}{1+Z_x^2+Z_y^2} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Градиент яркости в (1.8) в пространстве  $(\xi, \eta)$  можно выразить через градиенты поля в двух ортогональных направлениях ( $\nabla_l B$  и  $\nabla_n B$ ) как:

$$\begin{aligned}\frac{\xi}{B} \frac{\partial B}{\partial \xi} &= Z_x \frac{\nabla_l \ln(B \cos \theta_v) \cdot \nabla_n Z_y - \nabla_n \ln B \cdot \nabla_l Z_y}{\Delta} \\ \frac{\eta}{B} \frac{\partial B}{\partial \eta} &= Z_y \frac{\nabla_n \ln(B \cos \theta_v) \cdot \nabla_l Z_x - \nabla_l \ln B \cdot \nabla_n Z_x}{\Delta},\end{aligned}\quad (1.9)$$

где дискриминант  $\Delta$ :

$$\Delta = \nabla_l Z_x \cdot \nabla_n Z_y - \nabla_n Z_x \cdot \nabla_l Z_y \quad (1.10)$$

В этом случае уравнения (1.7), (1.8) и (1.9) представляют алгоритм восстановления контрастов СКН по измеренной яркости и её вариациями, вызванными произвольными поверхностными явлениями океана, на внутренних масштабах солнечного блика. Предложенный алгоритм свободен от предположений априорного задания модели вероятности наклонов и может применяться для анализа изображений любого типа, содержащих двумерное поле яркости в солнечном блике.

## 1D поля яркости

В ряде случаев (см., например, раздел 1.3 по формированию изображений сканером MERIS) поля яркости морской поверхности имеют характер 1D поля (Рисунок 1.7, (б)). В этом случае определение передаточной функции  $T$  по измеренным градиентам яркости, в соответствии с уравнением (1.7), – невозможно, и для ее определения необходимо задание модели Р.

В качестве первого приближения мы можем предположить, что плотность распределения вероятности (ПРВ) наклонов может быть аппроксимирована двумерным Гауссовым распределением. В этом случае “безразмерная” плотность наклонов равна:

$$p(Z_x, Z_y) = \frac{s^2}{2\pi s_u s_c} \exp \left[ -\frac{s_y^2 Z_x^2 - 2s_{xy}^2 Z_x Z_y + s_x^2 Z_y^2}{2s_u^2 s_c^2} \right], \quad (1.11)$$

где компоненты СКН в системе координат поперёк и вдоль трека ( $s_x^2$  и  $s_y^2$ , соответственно) соотносятся с компонентами СКН поперёк и вдоль направления ветра ( $s_c^2$  и  $s_u^2$ , соответственно) как:

$$\begin{aligned}s_x^2 &= s_u^2 \cos^2 \varphi + s_c^2 \sin^2 \varphi \\ s_y^2 &= s_c^2 \cos^2 \varphi + s_u^2 \sin^2 \varphi \\ s_{xy}^2 &= (s_u^2 - s_c^2) \cos \varphi \sin \varphi\end{aligned}, \quad (1.12)$$

где  $\varphi$  – направление ветра. Пусть  $\alpha = s_c^2/s_u^2$  – параметр анизотропии уклонов. Тогда “безразмерное” распределение (1.11) можно переписать в виде:

$$p(\xi, \eta) = \frac{1 + \alpha}{2\pi\alpha^{1/2}} \exp \left[ -a_2\xi^2 + a_{12}\xi\eta - a_1\eta^2 \right], \quad (1.13)$$

где коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_{12}$ :

$$\begin{aligned} a_1 &= (1 + \alpha)(\cos^2 \varphi + \alpha \sin^2 \varphi)/(2\alpha) \\ a_2 &= (1 + \alpha)(\alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)/(2\alpha) . \\ a_{12} &= (1 - \alpha^2) \sin 2\varphi/(2\alpha) \end{aligned} \quad (1.14)$$

Если распределение морских уклонов изотропно ( $\alpha = s_c^2/s_u^2 = 1$ ), тогда коэффициенты (1.14) принимают вид:  $a_1 = a_2 = 1$  и  $a_{12} = 0$ .

Мы уже ввели предположение, что основной отклик морской поверхности на её возмущения того или иного происхождения происходит через усиление или же подавление СКН, в то время как другие статистические моменты, нормированные на СКН, изменяются незначительно. Следуя этому предположению, положим, что изменения коэффициента анизотропии  $\alpha$  несущественны и, таким образом, передаточная функция (1.12) с (1.13) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{B}}{B} &= -T \frac{\tilde{s}^2}{s^2} \\ T &= 1 - a_2\xi^2 + a_{12}\xi\eta - a_1\eta^2 , \end{aligned} \quad (1.15)$$

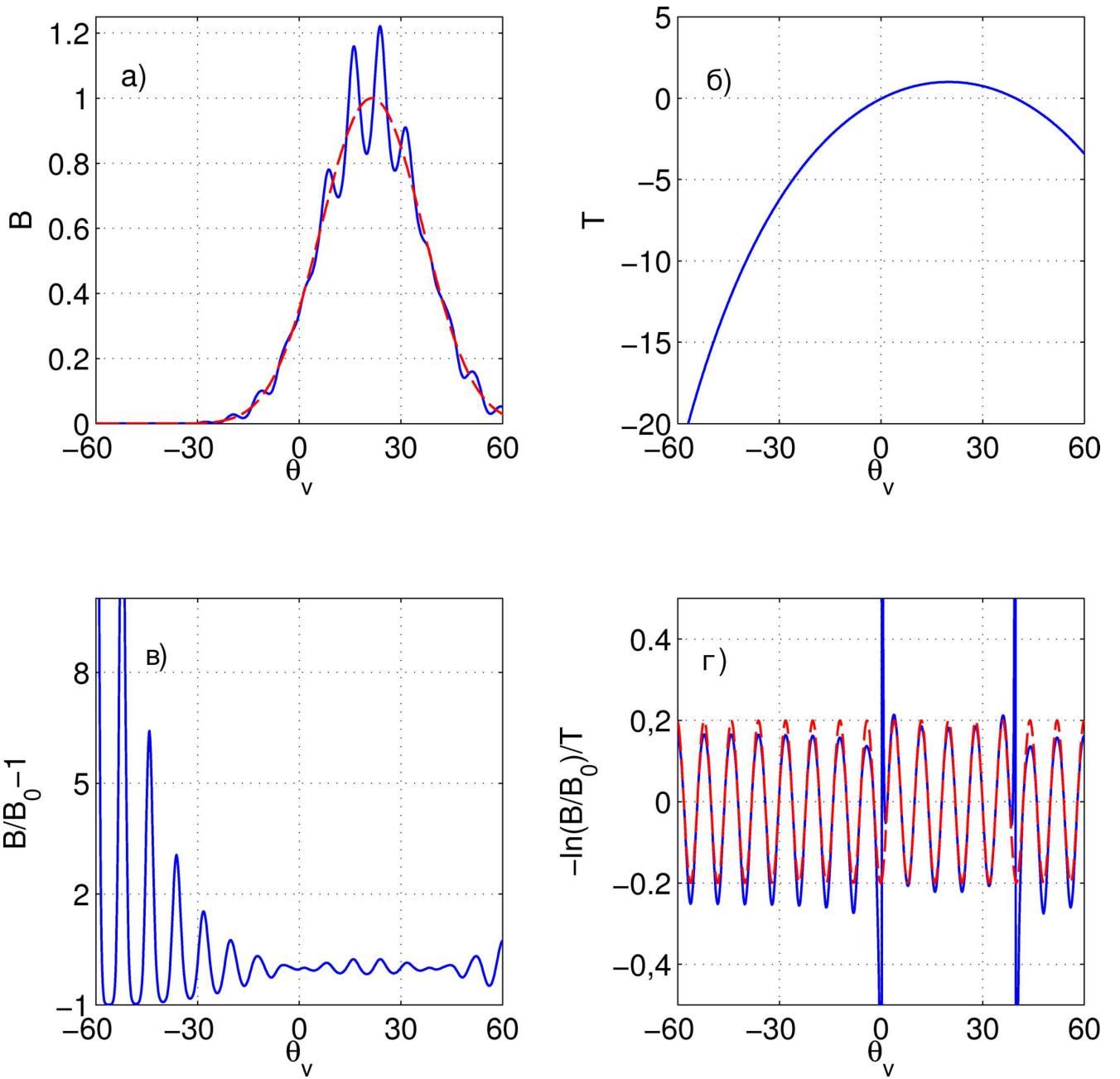
где, напомним,  $\xi = Z_x/s$  и  $\eta = Z_y/s$ . Итак, чтобы получить контрасты СКН из яркостей солнечного блика, необходимо задать направление ветра  $\varphi$  (из тех или иных источников метеоданных), и определить по анализируемому изображению средние значение СКН  $s^2$ . При известном среднем значении СКН, коэффициент анизотропии  $\alpha$  может быть определен по эмпирическим соотношениям, предложенным Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954a]. Однако отметим, что, поскольку зависимость  $\alpha$  от скорости ветра слаба, для практических приложений величина  $\alpha$  может считаться независящей от ветра и быть задана как:  $\alpha = 0.7$ . Значения зеркальных уклонов  $Z_x$  и  $Z_y$  находятся по известной солнечно-спутниковой геометрии съёмки.

### 1.3.4 Пример восстановления СКН модельного блика

Пример с передаточной функцией (1.15) для изотропной Гауссовой функции ПРВ ( $\alpha = s_c^2/s_u^2 = 1$ ) представлен на Рисунке 1.5. СКН морской поверхности был задан периодическими осцилляциями по отношению к фоновым значениям:

$$s^2 = s_0^2 [1 + \varepsilon \cos(2\pi x/l)], \quad (1.16)$$

где  $l$  – длина волны отклонений СКН, а  $\varepsilon$  – амплитуда вариаций СКН. Представленные расчёты выполнены для сравнительно “больших” вариаций СКН ( $\varepsilon = 0.2$ ) относительно фоновых значений  $s_0^2 = 3 \cdot 10^{-2}$ . Азимут и зенит Солнца, соответственно равны  $\varphi_s = 0$ ,  $\theta_s = 20^\circ$ , а угол наблюдения  $\theta_v$  меняется в пределах от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ . Отражённая яркость солнечного блика для однородной и возмущённой поверхности (для СКН, заданного уравнением (1.16)) приводится на Рисунке 1.5. Как следует из Рисунка 1.5, (в), “малые” ( $\pm 20\%$ ) вариации СКН могут приводить к относительно большой модуляции яркости. Передаточная функция (1.15) представлена на Рисунке 1.5, (б), где видны зоны инверсии контрастов около  $\theta_v = 0^\circ$  и  $\theta_v = 40^\circ$ . Рисунок 1.5, (г) демонстрирует результаты восстановления вариаций СКН. Несмотря на сравнительно большие исходные модулированные значения СКН, заданные уравнениями (1.7), (1.8) и (1.9), восстановленные достаточно близко к ним, как в центре, так и на периферии блика. Сингулярное поведение восстановленных значений СКН возле зон инверсии контрастов является следствием стремления передаточной функции к нулю в этих областях.



(а) Яркость солнечного блика (в относительных единицах) для спокойной  $B_0$  (пунктирная линия) и возмущённой  $B$  (сплошная линия) поверхности с СКН, заданным уравнением (1.16), в зависимости от угла наблюдения  $\theta_v$  (в градусах); (б) передаточная функция (1.15); (в) относительные вариации яркости  $(B - B_0)/B_0$ ; (г) сплошная линия – вариации СКН, восстановленные по вариациям яркости, представленным на Рисунке 1.5, (в) с использованием передаточной функции  $T$ , показанной на Рисунке 1.5, (б), пунктирная линия – исходные вариации СКН

Рисунок 1.5 – Пример моделирования солнечного блика с передаточной функцией (1.15), для изотропной Гауссовой функции ПРВ

## 1.4 Применение метода к анализу данных MODIS и MERIS

В данной работе основное внимание посвящено анализу спутниковых данных, получаемых с оптических сканеров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), в том числе различиям и сходствам в подходах восстановления контрастов СКН по их изображениям.

Сканеры MODIS установлены на двух спутниках Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) Terra и Aqua. Сенсор MERIS, установленный на борту спутника Envisat, принадлежит Европейскому космическому агентству (ЕКА). Данные, получаемые с этих приборов, широко используются в научных исследованиях и различных практических приложениях. Эти данные общедоступны в сети интернет. Европейское космическое агентство (ЕКА) распространяет данные MERIS через “роллинг” архивы. Обычно файлы появляются на серверах уже через 3– 6 часов после получения их спутником и удаляются через 10 дней (отсюда название “роллинг” архива). Данные MODIS доступны для скачивания с сайта <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>

Данные сканера MODIS представлены 36-ю каналами в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах, с пространственным разрешением 250м, 500м и 1км и точностью привязки, по меньшей мере, 50м [Salomonson et al., 1989; Wolfe et al., 2002]. В свою очередь, данные прибора MERIS формируются 15-ю каналами с длинами волн от 390нм до 1040нм, с пространственным разрешением 300м и 1км, а точность привязки достигает 170м [Goryl and Saunier, 2004].

Отличительной особенностью спутниковых изображений, полученных с приборов MODIS и MERIS в дневное время над водными бассейнами, являются серебристо-серые эллипсы отражённой солнечной радиации (солнечный блик), наблюдаемые при углах зеркального отражения около 30– и градусов. Именно эти районы солнечного блика, где невозможны исследования оптических характеристик вод океана (цвета океана) [Esaias et al., 1998], могут быть использованы для исследования “шероховатости поверхности океана” и проявления в ней различных океанических явлений.

Напомним, что для исследования солнечного блика наиболее предпочтителен красный канал, поскольку свет в красном канале поглощается в “тонком” поверхностном слое океана [Jerlov, 1976], и, таким образом, не так чувствителен к “цвету” водного столба, а также не чувствителен к поверхностной температуре.

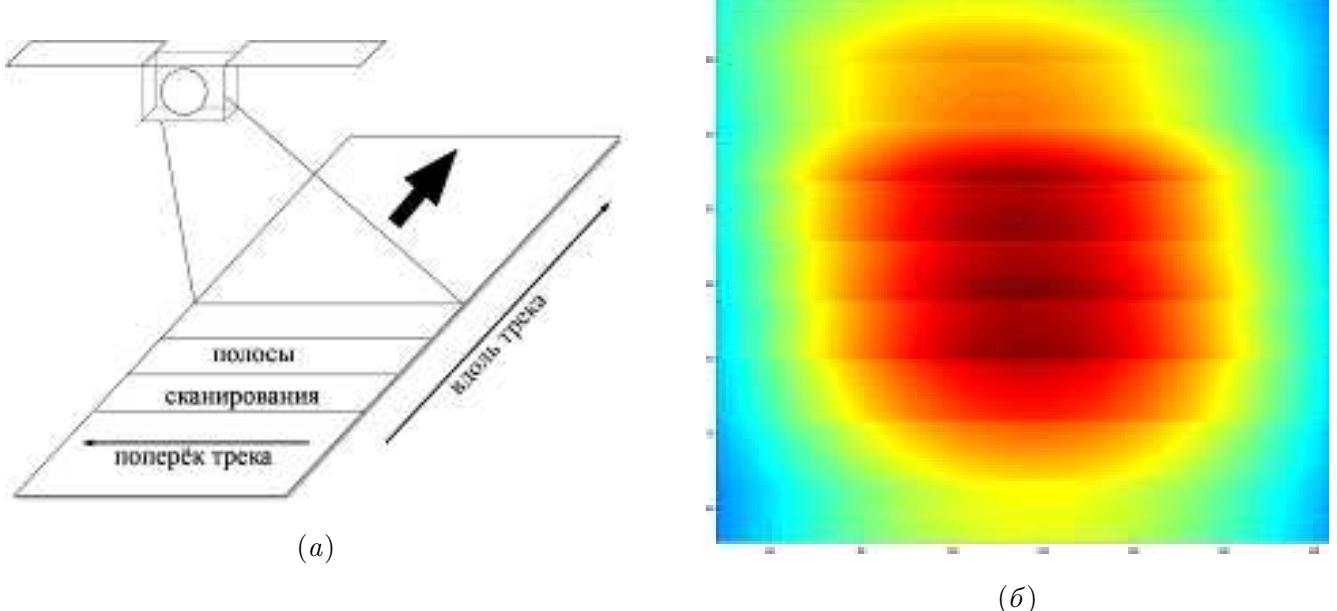
Именно поэтому в работе используются данные уровня 1B, разрешением 250м первого (645нм) и второго (850нм) каналов для инструмента MODIS и данные восьмого (681нм) и

тринадцатого (865нм) каналов MERIS высокого разрешения, сопровождаемые геолокационными данными и геометрией съемки.

MODIS является сканирующим спектрометром. Благодаря конструкции сканирующего зеркала, получаемые изображения представляют собой композицию полос 2330км длиной и около 10км шириной в надире. Каждая такая полоса формируется 40 детекторами с полем зрения вдоль и поперек траектории полета около  $0.8^\circ$  и  $110^\circ$ , соответственно. Таким образом, каждая отдельная полоса содержит двумерное поле отраженной яркости. Внутри области солнечного блика эти особенности формирования изображений MODIS могут создавать ступенчатые изменения (эффект “пилы”, от англ. “saw” effect) отражённой от поверхности воды солнечной радиации при переходе от полосы к полосе (Рисунок 1.6). Поэтому в предлагаемом алгоритме исходное изображение MODIS в области солнечного блика делится на полосы и в дальнейшем двумерное поле яркости в каждой из полос обрабатывается отдельно.

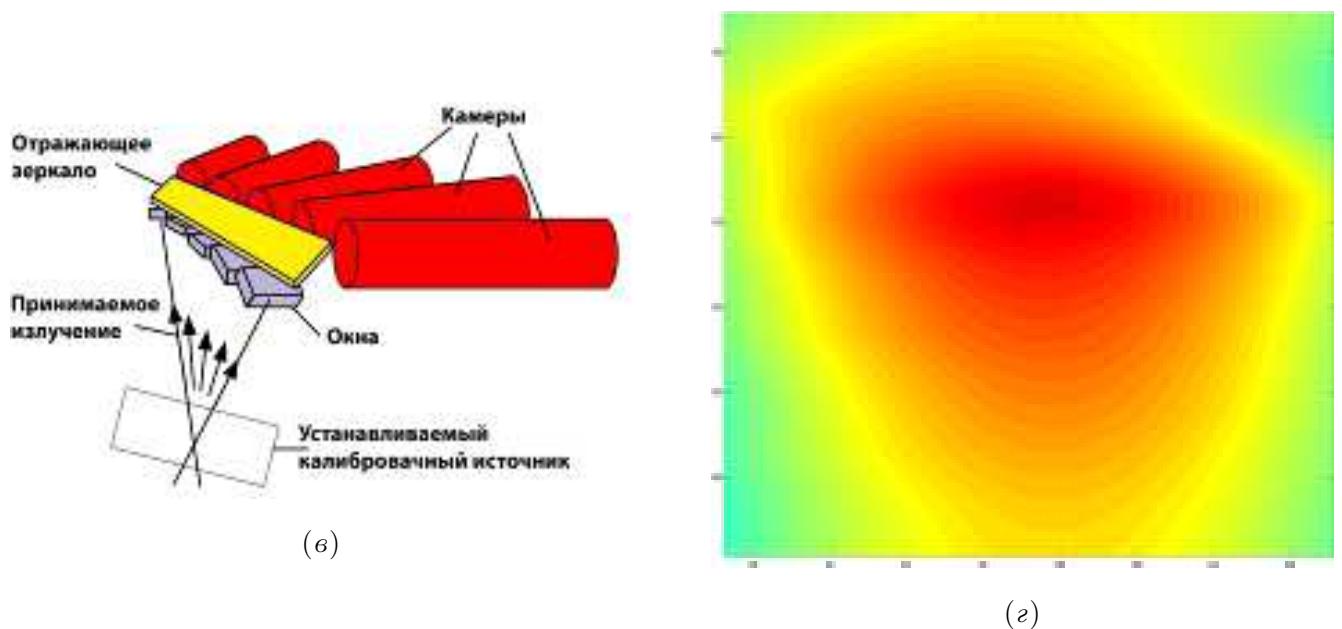
MERIS – спектрометр с постоянным сканированием. Он ведёт сканирование земной поверхности при помощи ПЗС матриц, обеспечивающих обзор поперёк траектории полета, а изображение вдоль полета формируется благодаря движению спутника. MERIS обладает широким углом обзора ( $68.5^\circ$ ) и шириной полосы 1150км в надире. Угол обзора в  $68.5^\circ$  обеспечивается пятью одинаковыми оптическими камерами (Рисунок 1.7).

Угол обзора кросстрэк у каждой из камер  $14^\circ$ . Угол обзора каждого пикселя составляет  $0.019^\circ$ . Благодаря широкому углу обзора всего инструмента  $68.5^\circ$ , пространственное разрешение поперёк движения спутника колеблется в пределах от 0.26 км в надире до 0.39 км по краям снимка. Разрешающая способность съёмки Земной поверхности вдоль движения спутника составляет 0.29 км.



*Хорошо видна “полосообразная” структура изображения в области солнечного блика с явно выраженнымами двумерными градиентами яркости вдоль и поперек траектории полета спутника*

Рисунок 1.6 – (а) Схематическая геометрия поля зрения прибора MODIS. (б) фрагмент изображения MODIS/Terra, 24 мая 2010г., 16ч. 45мин., район разлива нефтепродуктов в результате взрыва нефтяной платформы “Deepwater Horizon” в Мексиканском заливе



*В отличие от изображения MODIS на Рисунке 1.6, (б), в данном случае поле яркости в солнечном блике не имеет полос сканирования*

Рисунок 1.7 – (а) Схематическое устройство прибора MERIS/Envisat (б) фрагмент изображения MERIS, 24 мая 2010г., 16ч. 17мин., в Мексиканском заливе

## 1.5 Программа восстановления СКН по полям яркости

Ниже приводится пошаговая процедура чтения, обработки и восстановления СКН на примере спутниковых снимков MODIS и MERIS района течения Гольфстрим у берегов Флориды.

### 1.5.1 Среда и языки программирования

Все разработанные алгоритмы, процедуры загрузки, чтения и обработки спутниковой и другой вспомогательной информации, описанные в диссертации, реализованы на языках программирования Matlab (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>) и, частично, Python (<http://www.python.org/>). На программу, реализующую предложенный алгоритм, получен патент [?]: “GLAMOROS: Оценка контрастов поверхностных проявлений океанических явлений по изображениям солнечного блика”.

MATLAB (сокращение от англ. “Matrix Laboratory”, в русском языке произносится как Матлаб) – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете.

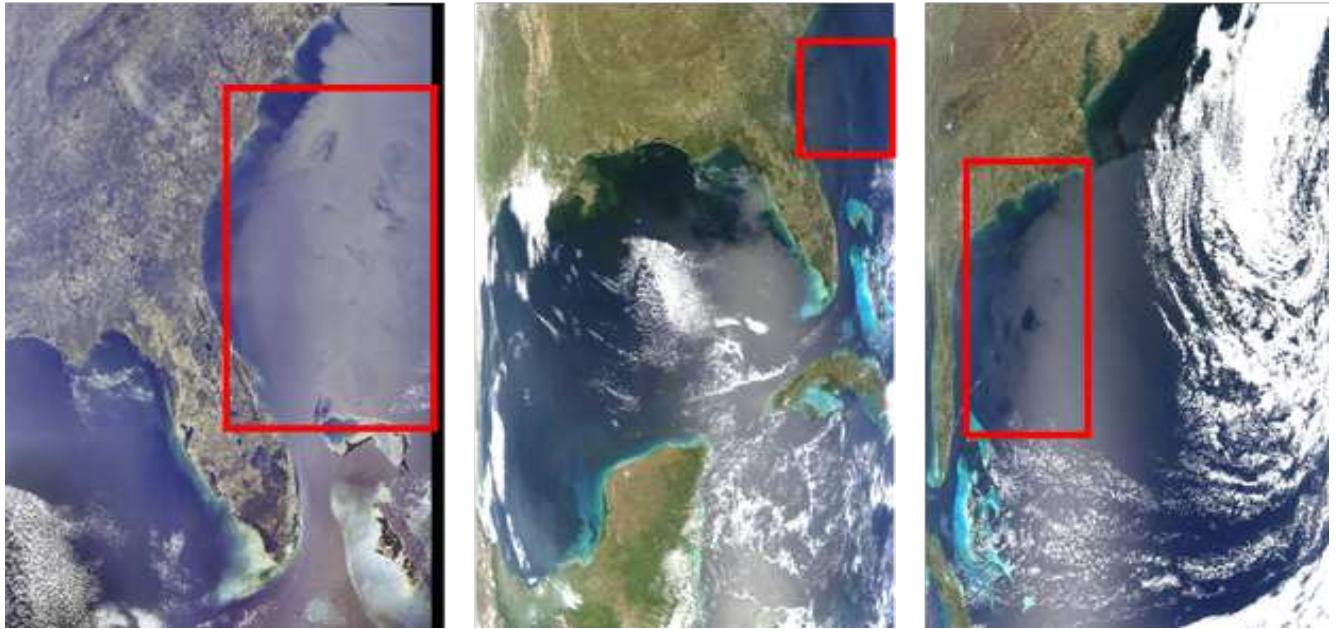
Python (англ. Python – питон, произносится пайтон; в русском языке распространено название питон) – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода.

### 1.5.2 Данные MODIS и MERIS, используемые в примере

Для демонстрации возможностей разработанного алгоритма применим его к изображениям района течения Гольфстрим. Течение Гольфстрим достаточно хорошо изучено и характеризуется разнообразием проявляемой на спутниковых изображениях мезомасштабной динамики (вихри, грибовидные структуры, температурные фронты, внутренние волны, зыбь и многие другие явления проявления океанической динамики).

Данные MERIS, а также MODIS/Terra и MODIS/Aqua в районе исследования были получены 01 Апреля 2010 г. в 15 ч. 42 мин., 16 ч. 30 мин. и 18 ч. 05 мин., соответственно.

RGB композитные изображения MODIS/Terra, MERIS и MODIS/Aqua района исследования приведены на Рисунке 1.8,. Отчётливо видно, что солнечный блик на псевдо-цветных оптических изображениях проявляется в виде серебристых эллипсов.



Слева направо: MERIS, MODIS/Terra и MODIS/Aqua в районе исследования были получены 01 Апреля 2010 г. в 15 ч. 42 мин., 16 ч. 30 мин. и 18 ч. 05 мин., соответственно. Красным контуром отмечены области, по которым будет приведён пример работы разработанного подхода, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения

Рисунок 1.8 – Псевдо-цветные RGB изображения района течения Гольфстрим у берегов Флориды

### 1.5.3 Процедура восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям

Обобщение этапов процедуры восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям MODIS и MERIS представлено в виде линейной алгоритмической структуры на Рисунке 1.9. Эта процедура состоит из следующих этапов:

1. Вспомогательные данные
  - 1.1. Загрузка и чтение данных, включая данные геолокации и геометрии наблюдений
  - 1.2. Создание маск земли и облаков
  - 1.3. Построение полей ветра
2. Выбор района исследования в красном канале
3. Построение контрастов яркости
  - 3.1. Определение среднего поля яркости

### 3.2. Построение поля флуктуаций

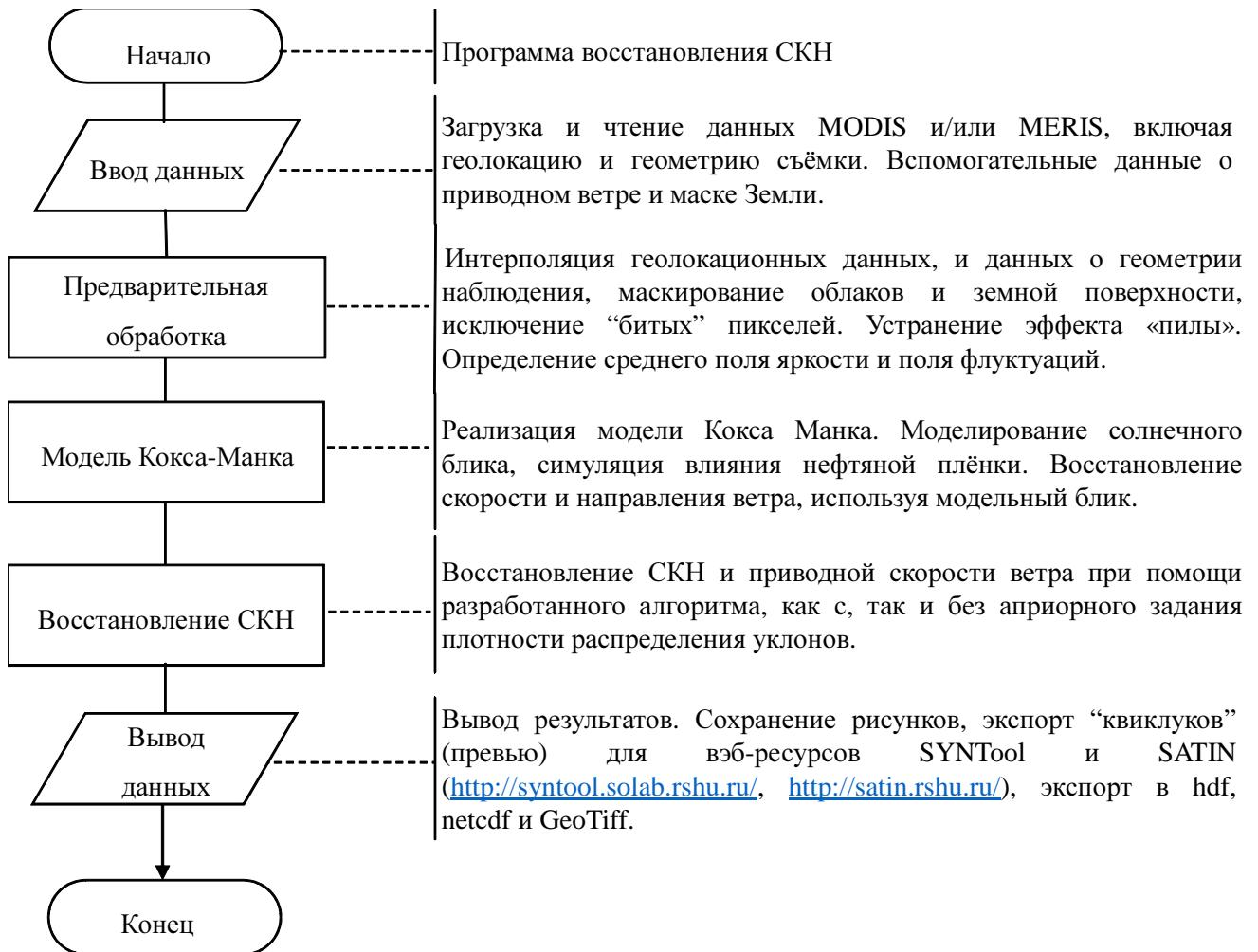
### 3.3. Устранение эффекта “пилы” для MODIS

4. Нахождение передаточной функции связи контрастов яркости и контрастов СКН

5. Восстановление СКН

6. Построение карт зон инверсии контрастов

7. Расчёт карт локальных наклонов морской поверхности



*Линейная алгоритмическая структура, отражающая основные аспекты процедуры восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям MODIS и MERIS*

Рисунок 1.9 – Блок-схема алгоритма восстановления СКН

## Вспомогательные данные

Прежде чем приступать непосредственно к обработке данных, были написаны скрипты для загрузки и чтения данных MODIS и MERIS, включая файлы с геолокацией и геометрией съёмки, а также вспомогательные данные о приводном ветре и маске Земли.

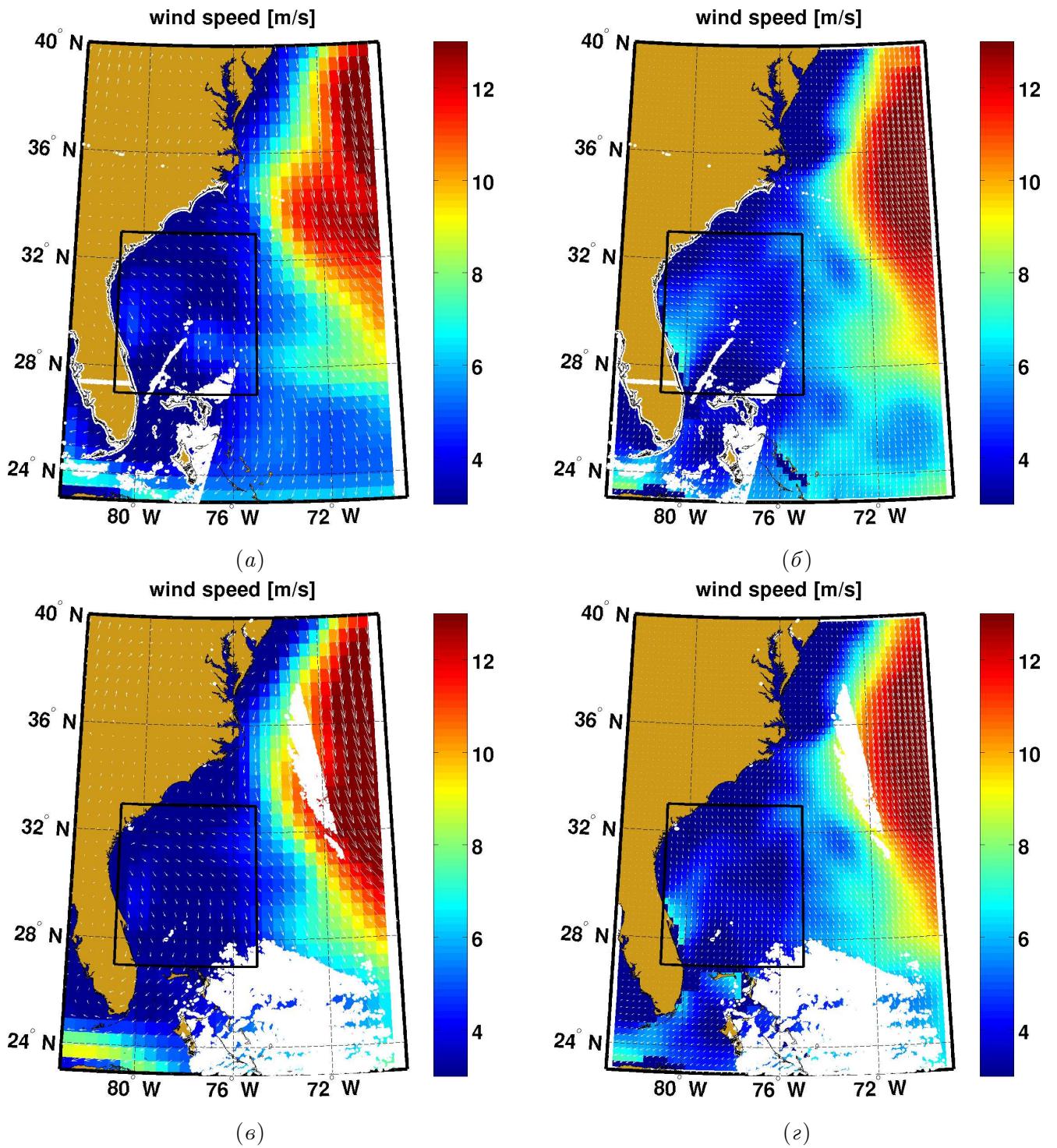
В качестве маски земли использовались данные GTOPO30 [[USGS, 1996](#)]. GTOPO30 - цифровая модель рельефа (англ. Global 30 Arc-Second Elevation Data Set), разработанная в геологической службе США (англ. USGS - United States Geological Survey).

В качестве источника данных о скорости и направлении приводного ветра использовались модельный ветер NCEP GFS [[Saha et al., 2006](#)] и ветер, интерполированный с различных скаттерометров, Blended Sea Winds [[Zhang et al., 2006](#)].

Функционирование глобальной системы прогнозирования GFS (англ. Global Forecast System), осуществляется NCEP (англ. National Centers for Environmental Prediction, Национальные центры для предсказания окружающей среды), которые являются подразделением NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований), NWS (National Weather Service, Национальная служба погоды), США. GFS модель обновляется четыре раза в день (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC) на 384 часа. Начиная с июля 2010 года модель обновляется с разрешением в 27км (ранее 35км) на 192 часа и затем с меньшим разрешением до 384 часов. Файлы с данными GFS, которые на данный момент предоставляются NOAA, имеют разрешение в 0.5 градуса (примерно 50км) что является действительным разрешением прогнозов обозримых на этом или других сайтах использующих тот же источник.

Альтернативным продуктом с полями скорости ветра является Blended Sea Winds – продукт NOAA, содержащий как скорость и направление ветра и ветровые напряжения, с пространственным разрешением  $0.25^\circ$ . Описание и данные доступны в статье [[Zhang et al., 2006](#)] и соответствующих ссылках.

Карты полей ветра в районе исследования приведены на Рисунке 1.10.

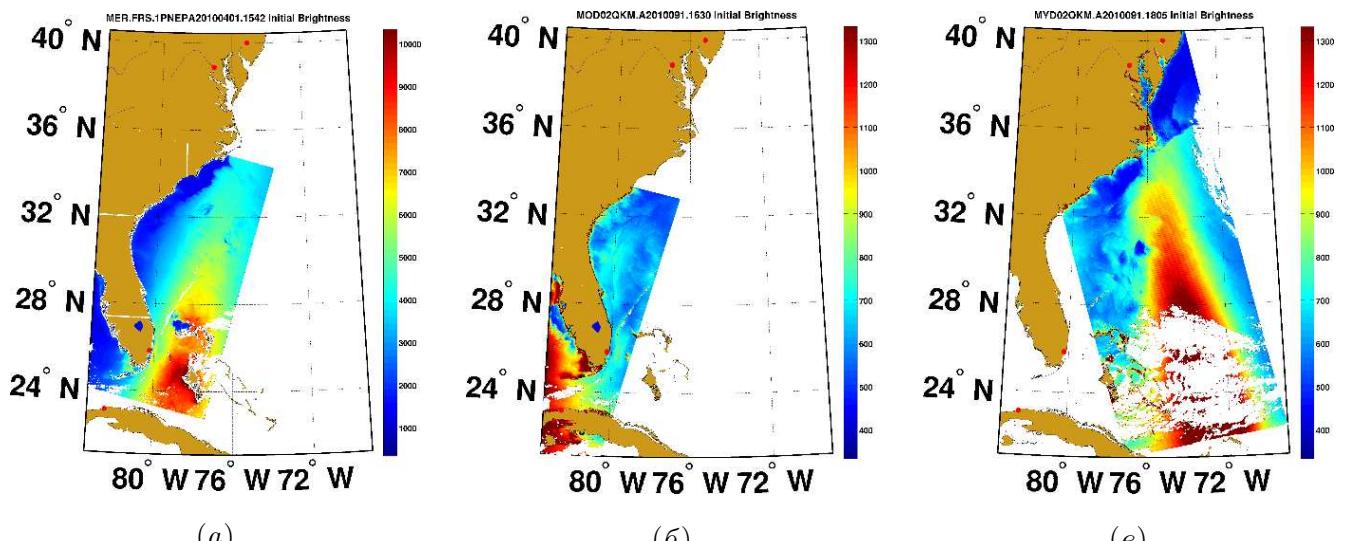


(a) и (в) – скорость и направление ветра в 15 и 18 часов 01 Апреля 2010г., соответственно, взятые из модели NCEP GFS. (б) и (г) – скорость и направление ветра в 15 и 18 часов 01 Апреля 2010г., соответственно, построенные по данным Blended Sea Winds. Здесь и далее, чёрным контуром выделен район выбранный для дальнейшего исследования, коричневым цветом нанесена маска Земли, а белым – облаков.

Рисунок 1.10 – Карты полей ветра в районе исследования, построенные по данным NCEP GFS и Blended Sea Winds

На представленных картах полей ветра, отчётливо видно что разрешающая способность данных NCEP GFS ( $0^\circ$ ) ниже Blended Sea Winds ( $0.25^\circ$ ). Также стоит отметить, что скорость и направление ветра существенно не изменились за три часа, и, соответственно, за время наблюдения этого района приборами MERIS и MODIS спутников Envisat и Aqua/Terra. Средняя скорость в районе исследования составляла около 3-5 м/с. Эти значения помогут нам в дальнейшем анализировать обработанные изображения.

На Рисунке 1.11 приводится область исследования, “вырезанная” из исходных изображений MERIS, MODIS/Terra и MODIS/Aqua, в красных (865нм для MERIS и 850нм для MODIS) каналах, соответственно. Для примера взяты достаточно большие фрагменты трёх изображений, чтобы показать общий вид района. Далее из этих фрагментов будет выбрана лишь небольшая область у Восточного побережья США, отмеченная красным контуром на Рисунке 1.8, чтобы проиллюстрировать многообразие явлений на поверхности Океана и показать, как работает предложенный алгоритм и программы обработки в разных ситуациях. Геометрия наблюдений отличается на всех трёх примерах. Мы чётко видим блик на изображениях MERIS и MODIS/Aqua, а на фрагменте MODIS/Terra блик находится вне области исследования, а если быть точнее, в Мексиканском заливе, со стороны западного побережья Флориды, как видно из Рисунка 1.7,. Для случая с MODIS/Terra, несмотря на то, что мы находимся на периферии блика, всё равно наблюдаем градиенты яркости, которые достаточны, чтобы проводить обработку изображения с применением предложенного подхода.



(a) MERIS, (б) MODIS/Terra, (в) MODIS/Aqua. Изображения получены 01 Апреля 2010 г. в 15 ч. 42 мин., 16 ч. 30 мин. и 18 ч. 05 мин., соответственно

Рисунок 1.11 – Фрагменты изображений MERIS, MODIS/Terra и MODIS/Aqua в красных (865нм для MERIS и 850нм для MODIS) каналах

Таким образом, дальнейшая обработка изображений будет проведена по району, выделенному красным контуром на Рисунке 1.8. Выбранная область исследования, между  $27^{\circ}$  и  $33^{\circ}$  С.Ш. и  $69^{\circ}$  и  $83^{\circ}$  З.Д., приведена на Рисунке 1.11.

Прежде чем применить алгоритм к изображениям, производится интерполяция геолокационных данных и данных о геометрии наблюдения, маскирование облаков и земной поверхности, исключение “битых” пикселей. Далее, для восстановления СКН с помощью разработанного алгоритма без априорного задания плотности распределения уклонов, следя выражениям (1.6) и (1.7), необходимо исходные яркости изображения в красном канале представить в виде суммы среднего значения  $\bar{B}$  (см. Рисунок 1.14) и вариаций  $\tilde{B}$  (см. Рисунок 1.15).

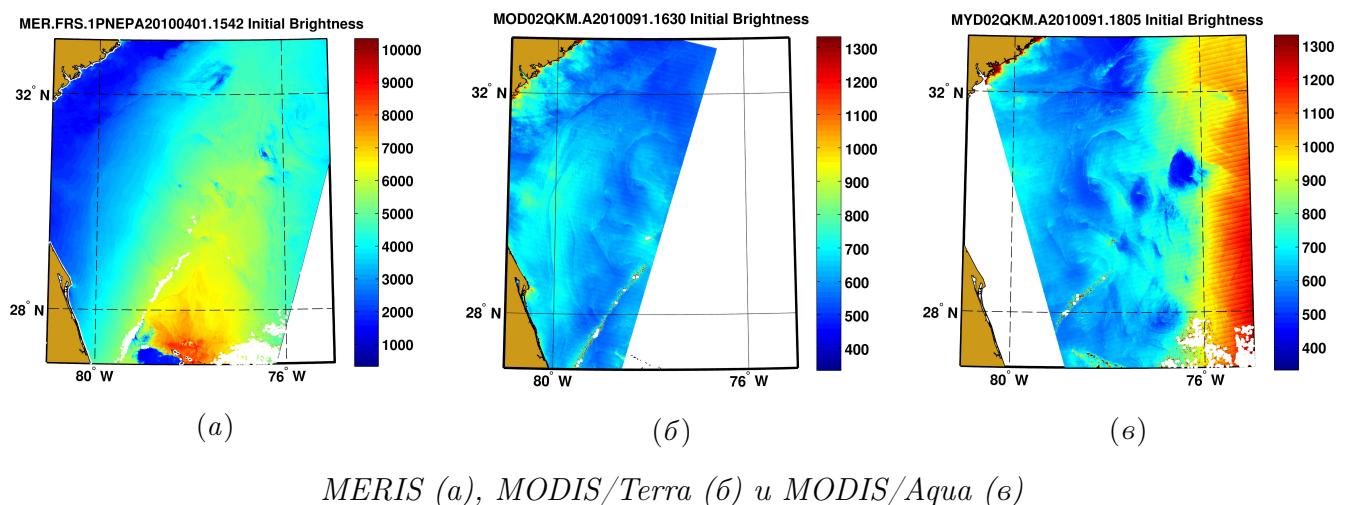
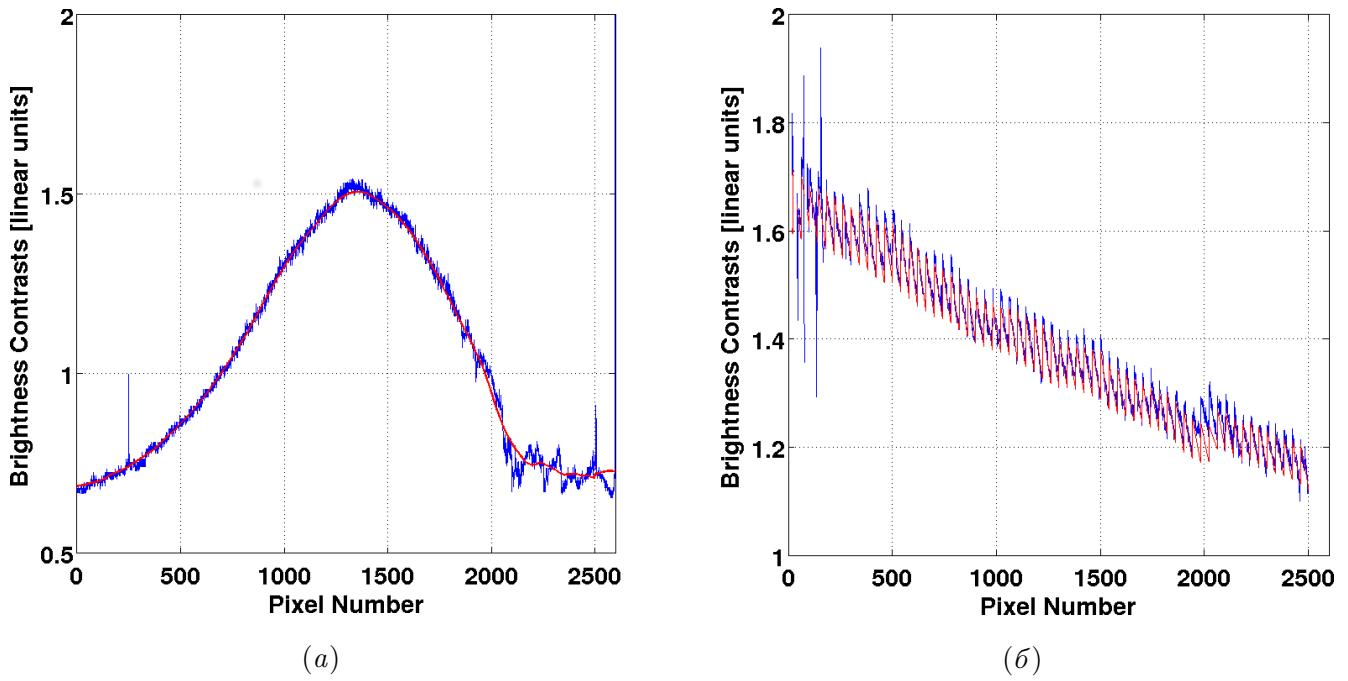


Рисунок 1.12 – Область исследования на изображениях MERIS (а), MODIS/Terra (б) и MODIS/Aqua (в) в красных каналах

На Рисунке 1.13 представлен пример сечения вдоль (б) и поперёк (а) блика, взятого для изображения MODIS/Aqua, на Рисунке 1.11, (а). На сечении, взятом вдоль блика (б) отчётливо видна “пилообразная” структура, описанная в разделе 1.3. Также из рисунка видно наличие 2D поля яркости солнечного блика, благодаря чему передаточная функция в (1.7) может быть определена по усредненным градиентам яркости, которые берутся непосредственно из изображения солнечного блика, путём осреднения скользящим средним, с задаваемым окном.

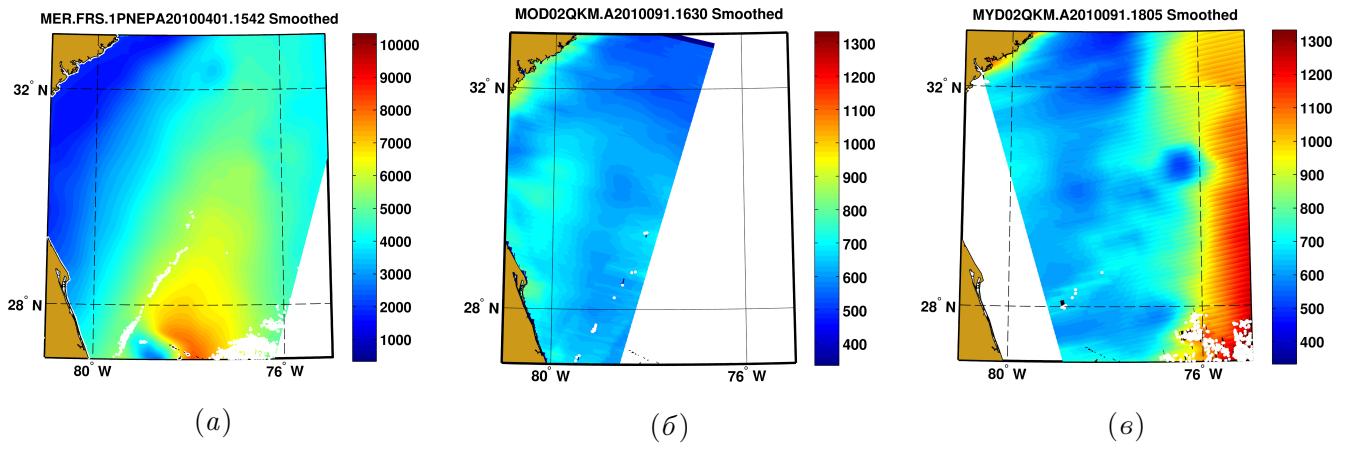


Пример сечения вдоль (б) и поперёк (а) блика, взятое для контрастов яркости изображения MODIS/Aqua вдоль одной из строк и столбца исходной матрицы изображения. Исходное изображение в красном канале представлено на Рисунке 1.11, (а). Синим цветом изображены исходные яркости в красном канале, а красным – усреднённые. На сечении, взятом вдоль блика (б), отчётливо видна “пилообразная” структура (см. раздел 1.3), которая устраняется в результате обработки

Рисунок 1.13 – Сечения контрастов яркости вдоль (б) и поперёк (а) блика

Вместе с определением среднего поля яркости и поля флуктуаций, разработанный способ разделения исходных яркостей также позволил добиться устранения эффекта “пилы”.

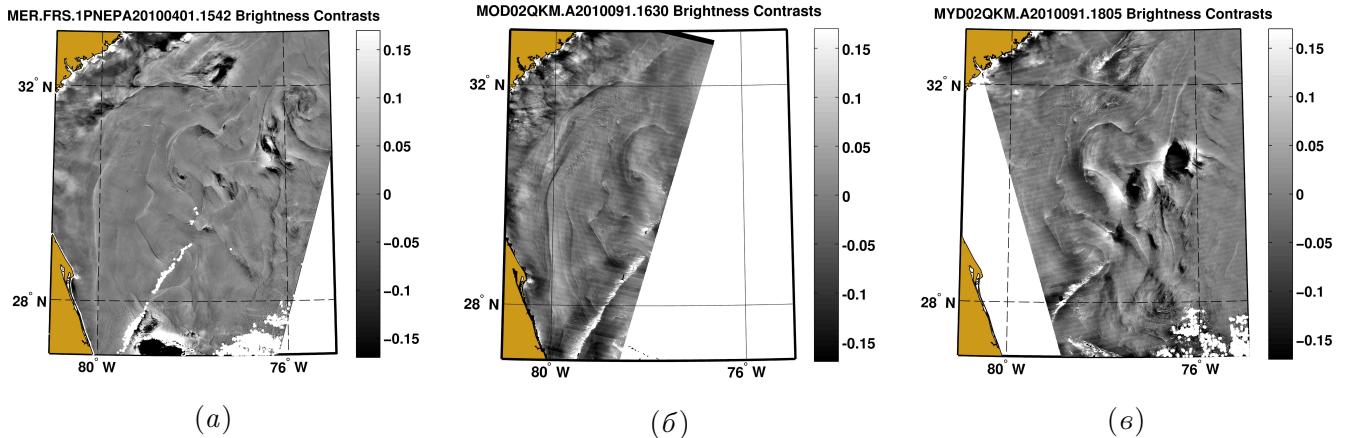
Поля средней яркости солнечного блика (масштаб осреднения 30x30 км<sup>2</sup>) для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунке 1.14.



MERIS (a), MODIS/Terra (б) и MODIS/Aqua (в)

Рисунок 1.14 – Средняя яркость солнечного блика (масштаб осреднения 30x30км<sup>2</sup>)

Контрасти яркости солнечного блика  $\tilde{B}/B_0$ , получаемые после устранения эффекта “пильы”, представлены на Рисунке 1.15.

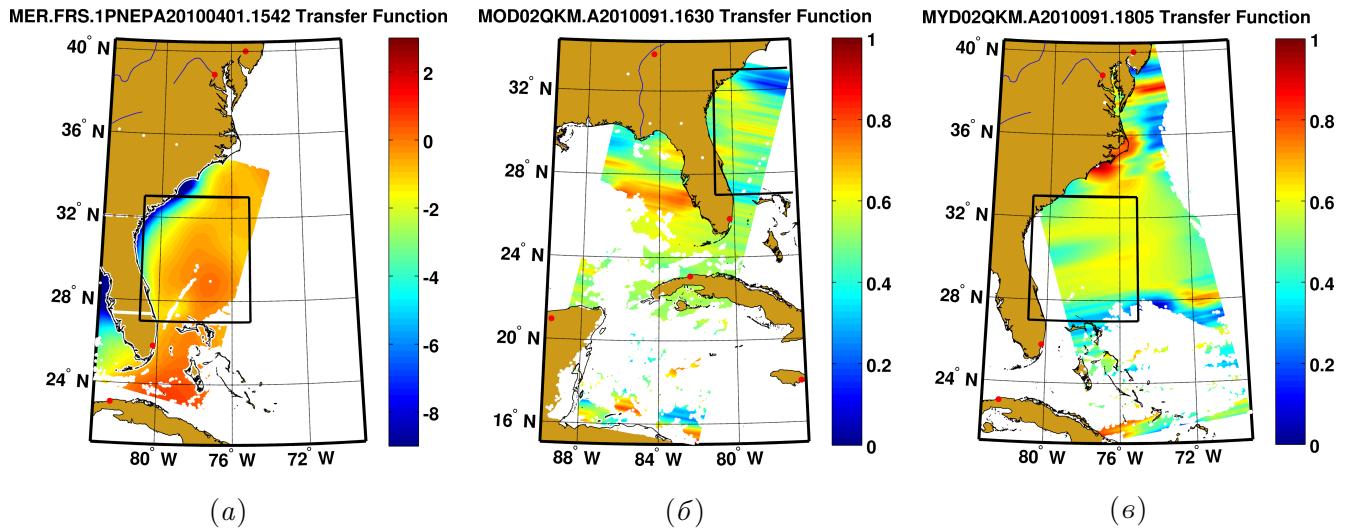


MERIS (a), MODIS/Terra (б) и MODIS/Aqua (в)

Рисунок 1.15 – Контрасти яркости солнечного блика  $\tilde{B}/B_0$

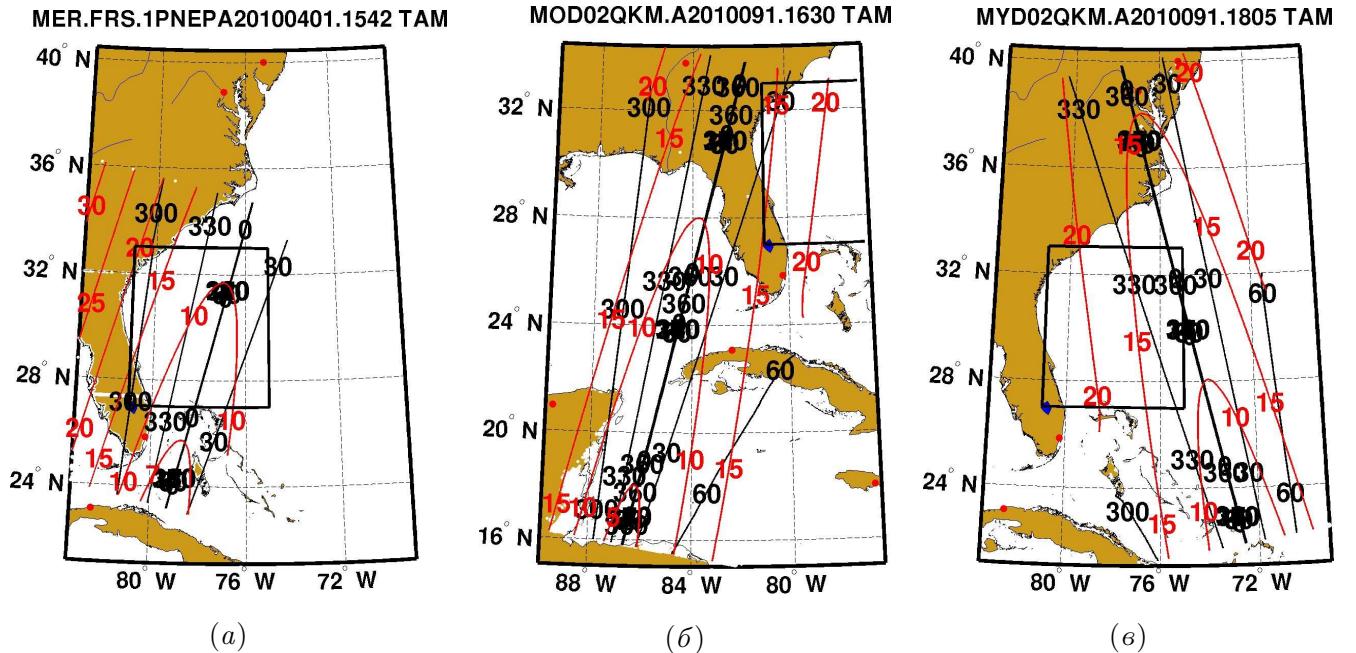
Передаточная функция, рассчитанная по уравнению (1.7), для сглаженного поля яркости солнечного блика изображена на Рисунке 1.16. При рассмотрении изображений передаточной функции можно заметить, что поле, полученное по данным MERIS, более однородно и в большей степени напоминает эллипс (Рисунок 1.16, а), нежели на изображениях передаточной функции MODIS (Рисунки 1.16, б, 1.16, в). Объяснить наблюдаемое возможно, если обратиться к геометрии наблюдений. На Рисунках 1.17 и 1.18 представлены карты локальных наклонов поверхности, обеспечивающих зеркальное отражение и карты зон инверсии

контрастов, соответственно. Обратимся сначала к рассмотрению локальных наклонов поверхности.



*MERIS (a), MODIS/Terra (б) u MODIS/Aqua (в)*

Рисунок 1.16 – Передаточная функция для связи контрастов вариаций яркости (Рисунок 1.15) и контрастов СКН (Рисунок 1.16)



*MERIS (а), MODIS/Terra (б) u MODIS/Aqua (в).*

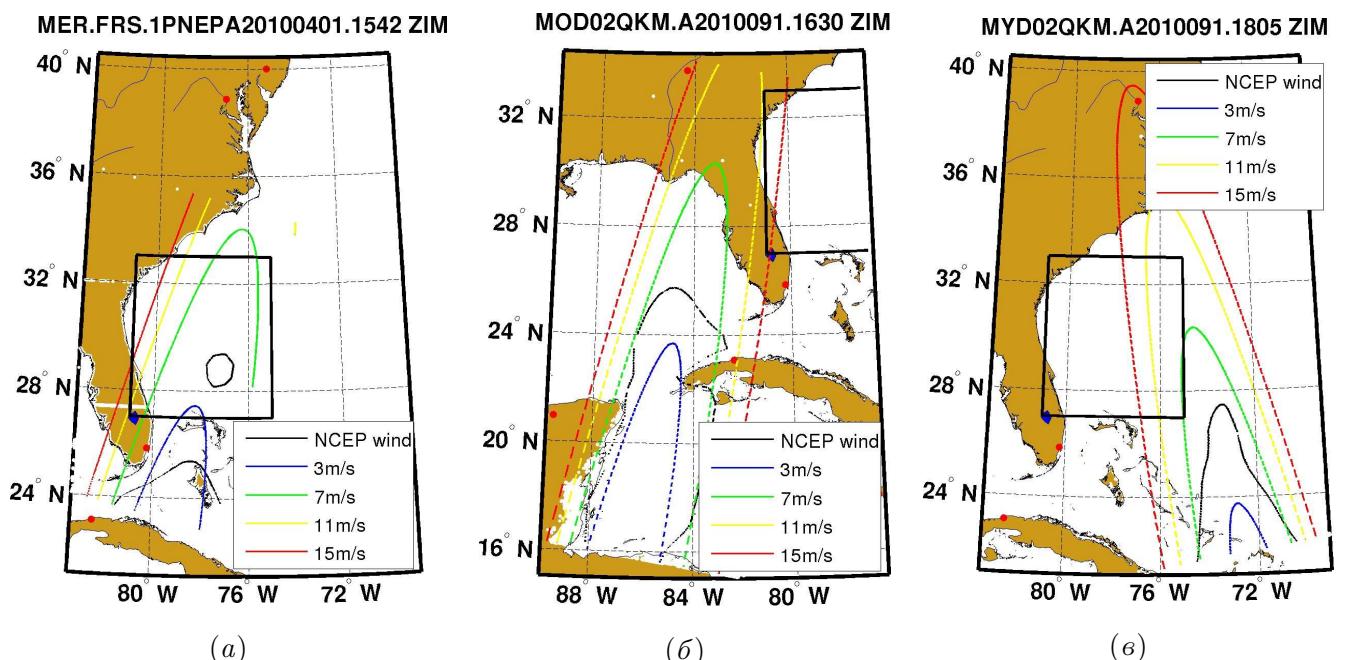
*Красные линии – зенитный угол, чёрные – азимут на Солнце*

Рисунок 1.17 – Карты локальных наклонов поверхности, обеспечивающие зеркальное отражение и , обусловленные геометрией наблюдений и положением солнца

Карты локальных наклонов поверхности характеризуют геометрию отражения/наблюдения, т.е. геометрию солнечного блика. Например при угле тильтирования (красные линии)  $0^\circ$  образуется центральная зеркальная точка, а при возрастании этого угла, блик “расплывается”. Азимут (чёрные линии) отвечает за форму эллипса блика, так, например, блик больше всего вытянут в направлении  $0^\circ$  или  $180^\circ$ .

По приведённым на Рисунке 1.18 картам зон инверсии контрастов, можно отследить изменение зон инверсии контрастов при различных ветрах (цветные изолинии на Рисунке 1.18). Для данного примера были выбраны скорости ветра 3, 7, 11 и 15 м/с, а также скорость ветра, построенная по данным NCEP GFS. При подробном рассмотрении этих изображений можно сделать вывод о том, что область нашего исследования находится вне зоны инверсии контрастов. Рассмотрение поведения передаточной функции непосредственно в зоне инверсии контрастов и объяснение причин их возникновения подробно приводится в Главе 2.

На Рисунке 1.17, б и Рисунке 1.18, б приводятся карты локальных наклонов поверхности и положения зон инверсии контрастов для изображения MODIS/Terra, соответственно. Фрагмент изображения покрывает большую часть Мексиканского залива, чтобы показать насколько далеко от центра блика находится область исследования.



MERIS (a), MODIS/Terra (б) и MODIS/Aqua (в).

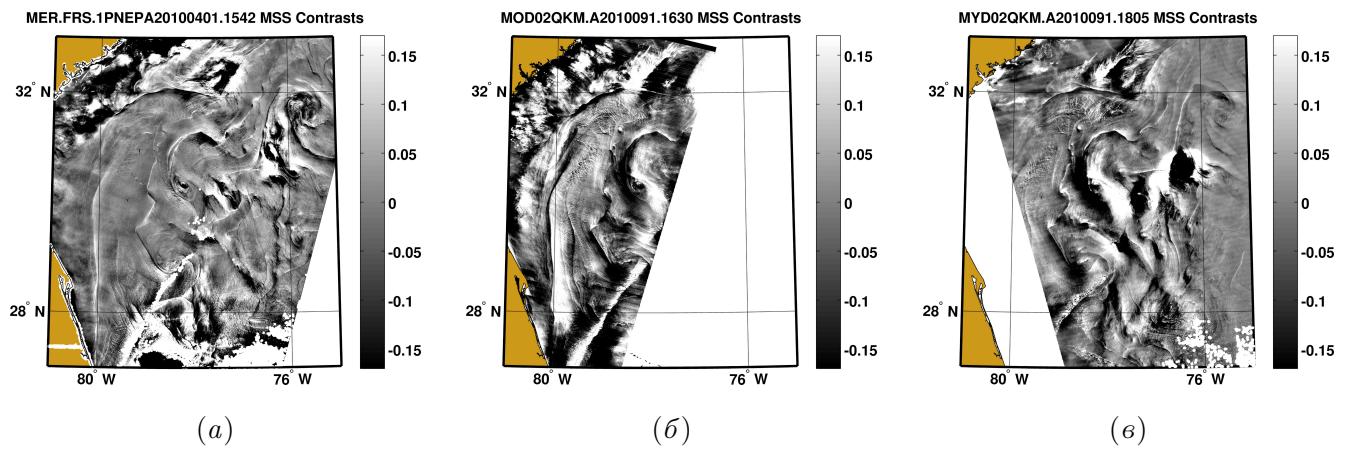
Чёрная кривая - зона инверсии контрастов, рассчитанная для скорости ветра по модели NCEP, синяя, зелёная, жёлтая и красная - для 3, 7, 11 и 15 м/с, соответственно

Рисунок 1.18 – Карты зон инверсии контрастов для различных скоростей ветра

Расчёт карт локальных наклонов поверхности проводился, исходя из уравнения (1.4), используя формулы для расчёта уклонов (1.3). Карты зон инверсии контрастов находятся из решения урвнений (1.7), (1.15), в которых передаточная функция равна 0.

Карты локальных наклонов поверхности и карты зон инверсии контрастов позволяют не только упростить анализ сложных изображений, но и значительно повысить достоверность и точность количественных оценок наблюдаемых явлений.

Если следовать вышеприведённым шагам выполнения программы, реализующей разработанный алгоритм, в итоге мы получим контрасты СКН, приведённые на Рисунке 1.19.



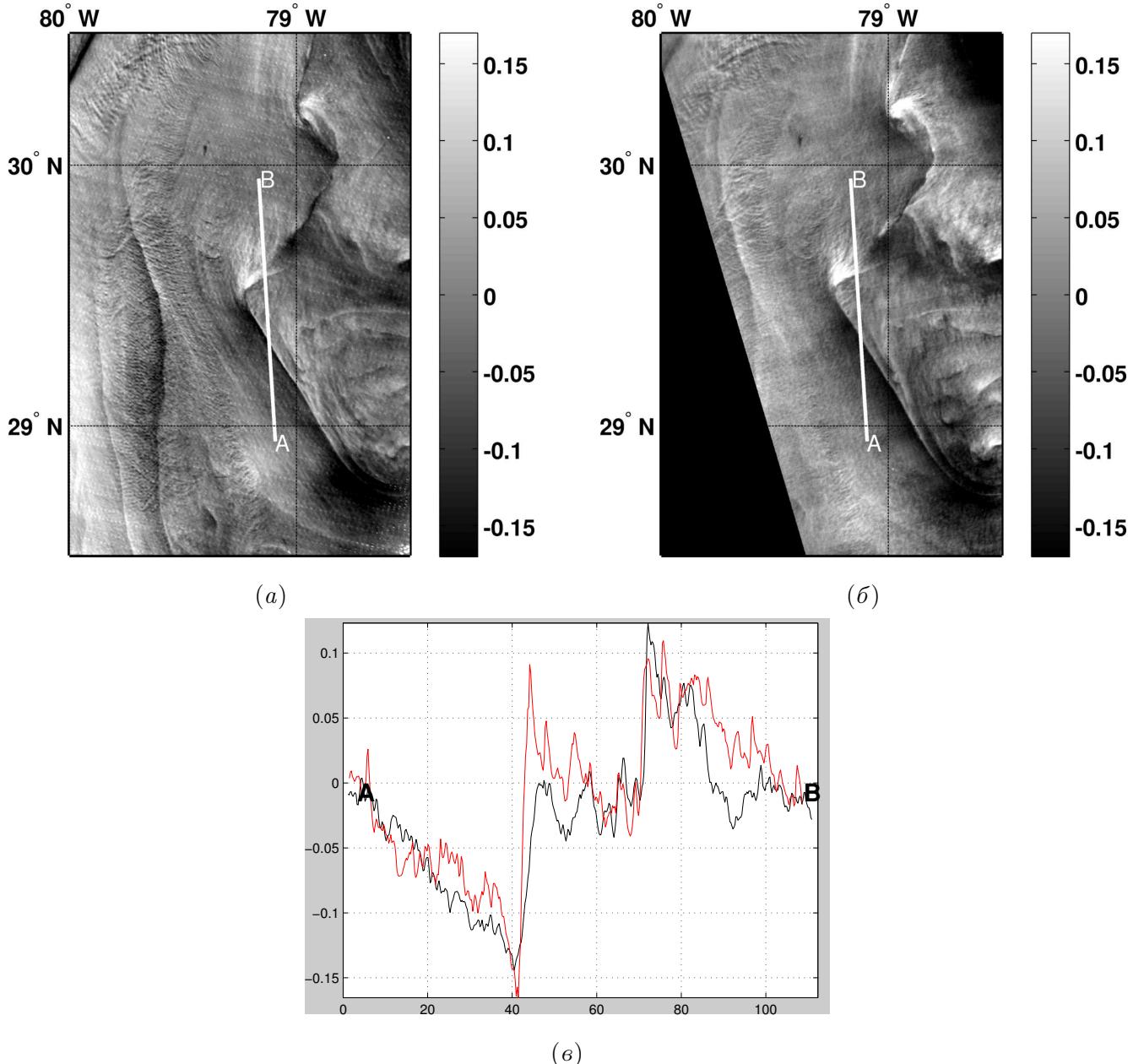
MERIS (a), MODIS/Terra (b) и MODIS/Aqua (c)

Рисунок 1.19 – Контрасты СКН  $\tilde{s}^2/s_0^2$

Рассмотрим ещё один любопытный пример. Возьмём сечения контрастов яркости  $\tilde{B}/B_0$  изображений MODIS Terra и Aqua. На Рисунке 1.20, *a* приведена увеличенная область с проведённым сечением по изображению MODIS Terra, представленного в полном масштабе на Рисунке 1.15, *e*, а на Рисунке 1.20, *b* – MODIS Aqua. Сначала рассмотрим геометрию наблюдения данного района приборами MODIS, установленными на разных спутниках, в чём помогут рисунки с картами локальных наклонов поверхности. Первое, что стоит отметить, разность азимутальных углов наблюдения в районе сечения составляет около  $100^\circ$ , т.е. наблюдения приборами одной и той же области на поверхности океана производятся практически под прямым углом. Во-вторых, угол тильтирования в районе сечения варьируется около  $20^\circ$ , а это значит, что мы находимся вне зоны инверсии контрастов, при скорости ветра около 3-5 м/с.

На Рисунке 1.20, *b* изображены сами сечения, взятые по изображениям MODIS Aqua (чёрная кривая) и Терра (красная кривая). Обращаю внимание читателей, что формы сечений очень похожи. Это является следствием того, что распределение уклонов морской поверхно-

сти азимутально практически изотропно ( $\alpha = s_c^2/s_u^2 = 1$ ). А это, в соответствии с моделью формирования яркости морской поверхности Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a], приводит к тому, что наблюдаемые контрасты яркости и СКН не зависят от азимута наблюдений (относительно Солнца).



*Изображения MODIS/Terra (a) и MODIS/Aqua (б) контрастов яркости с проведённым сечением (в)*

Рисунок 1.20 – Сечения контрастов яркости  $\tilde{B}/B_0$

## 1.6 Выводы по главе

В данной главе описан метод восстановления пространственных вариаций СКН морской поверхности по солнечному блику, регистрируемому оптическими сканерами из космоса. Вариации СКН связаны с поверхностными проявлениями различных процессов, происходящих в верхнем слое океана, например, искусственными и биологическими сликами, внутренними волнами, границами мезо-масштабных течений и фронтальными разделами. С этой точки зрения, предложенный метод может рассматриваться как определенный шаг в направлении развития методов диагностики океана из космоса.

Алгоритм восстановления основан на связи вариаций яркости и контрастов СКН через передаточную функцию, а также линейном разложении исходной яркости на две составляющие: крупномасштабную и мелкомасштабную.

Показано, что вариации СКН являются доминирующими. Основной отклик морской поверхности на её возмущения того или иного происхождения происходит через усиление или же подавление СКН, в то время как другие статистические моменты, нормированные на СКН, изменяются незначительно. Это утверждение следует из того факта, что несмотря на сильное подавление СКН в областях, покрытых сликами, коэффициенты анизотропии уклонов меняются незначительно.

Продемонстрировано, что в случае 2D поля яркости, передаточная функция может быть определена напрямую по усредненным градиентам яркости, непосредственно из 2D поля яркости солнечного блика без априорного задания модели ПРВ.

В тех случаях, когда 2D поля яркости недоступно, предлагаемый алгоритм основан на априорном задании некоторой модели ПРВ.

Обнаружено, что восстановленные значения контрастов бывают положительными или отрицательными. Область смены знака контраста яркости называется зоной инверсии контрастов. Происхождение этой зоны инверсии контрастов следует из определения передаточной функции. При этом сингулярное поведение восстановленных значений СКН возле зон инверсии контрастов следует из стремления передаточной функции к нулю в этих областях.

Разработанный подход применим для любых спутниковых оптических данных, в частности данных, получаемых с оптических сканеров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), которые широко используются для решения научных и прикладных задач.

В качестве дополнительного полезного “продукта” реализации предложенного метода восстановления СКН являются реконструированные вариации скорости ветра.

Определены границы применимости предложенного алгоритма, обусловленного геометрией наблюдений и положения солнца. Для чего построены карты локальных наклонов поверхности, а также карты зон инверсии контрастов.

Установлено, что наблюдаемые контрасты яркости и СКН не зависят от азимута наблюдений (относительно Солнца).

Разработан комплекс программ для:

- загрузки, чтения и обработки оптических (MODIS, MERIS) и радиолокационных (ASAR, RADARSAT-1,2), а также вспомогательных данных о приводном ветре и маске Земли;
- интерполяции геолокационных данных, данных о геометрии наблюдений;
- маскирования облаков и земной поверхности, исключения “битых” пикселей;
- устранения эффекта “пилы” и определения среднего и флюктуационного полей яркости;
- восстановления СКН и приводной скорости ветра при помощи разработанного алгоритма, как с, так и без априорного задания плотности распределения уклонов;

Предложенные алгоритмы и методики реализованы и апробированы в Лаборатории Спутниковой Океанографии (ЛСО) РГГМУ, в виде элементов спутникового информационного портала SATIN (от англ. *SATellite Data Search and Manage INformation Portal*), предназначенного для поиска, получения, отображения, распространения и хранения данных дистанционного зондирования (<http://satin.rshu.ru/>), а также как элемент разрабатываемой синергетической платформы SYNTTool (<http://syntool.solab.rshu.ru/>) ЛСО РГГМУ.

## Глава 2

# Оптические и радиолокационные исследования нефтяных сливков

Ещё более полувека назад Кокс и Манк [Cox and Munk, 1954a,b], использовали самолётные фотографии солнечного блика для изучения влияния искусственных плёнок на значения СКН. Позже, возможность наблюдения поверхностных сливков по оптическим изображениям солнечного блика из космоса была продемонстрирована в многочисленных работах, например [Brekke and Solberg, 2005; Chust and Sagaminaga, 2007; Hu et al., 2009].

В этой главе показываются возможности нового разработанного метода, описанного в Главе 1, для численного восстановления аномалий СКН по яркости морской поверхности, покрытой нефтяными плёнками, в солнечном блике. Также приводится совместный анализ полученных результатов с данными радиолокаторов с синтезированием апертуры (PCA), и раскрываются преимущества синергетического подхода в исследовании поверхностных сливков.

### 2.1 Нефтяные плёнки природного происхождения

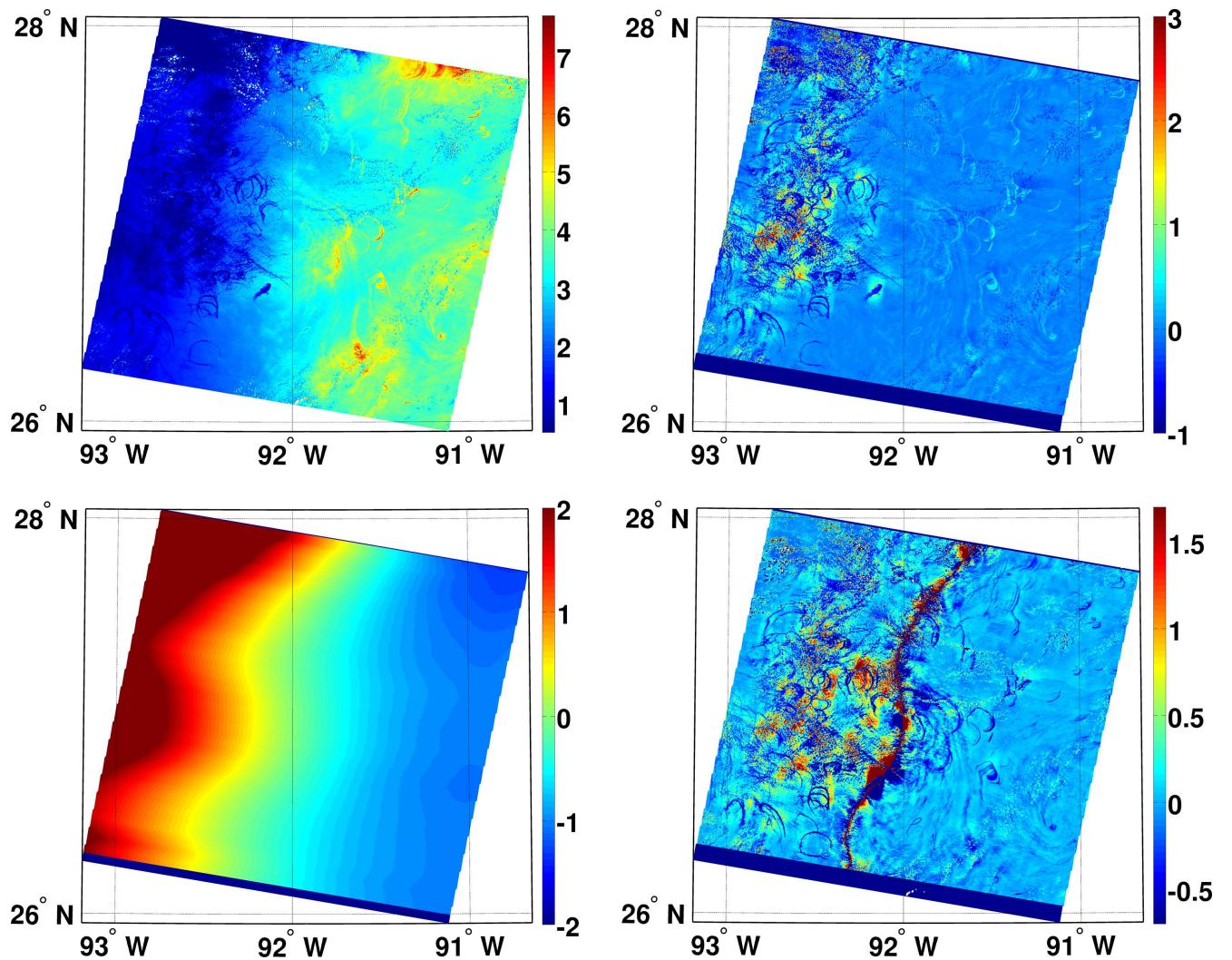
Для начала обратимся к изображениям MODIS Мексиканского залива. На одном из приведённых ниже изображений яркости солнечного блика (Рисунок 2.1) различимы следы разлива нефтепродуктов природного происхождения. Изучая эти изображения, Ху с соавторами [Hu et al., 2009], обнаружили, что контрасты поверхностных сливков в солнечном блике бывают как яркими, так и тёмными. Контрасты сливков, как говорится в статье [Hu et al., 2009], зависят от угла между направлением визирования и направлением зеркального отражения  $\theta_m$ . В рассматриваемом случае контрасты сливков меняли знак при  $\theta_m \approx 12^0$ , оставаясь по-

ложительными при меньших углах и отрицательными – при больших. Хотя Ху и соавторы в своей статье [Hu et al., 2009] описали наблюдаемое явление, но не смогли обобщить его и рекомендовали провести дальнейшие исследования. Обобщение этого явления и описание причин его возникновения было проделано в данной работе.

Фрагмент исходного изображения MODIS (MODIS/Terra, 2 Июня 2005, 16:55 GMT), анализированного в [Hu et al., 2009] приведён на Рисунке 2.1 (верхний левый). На данном изображении видно большое количество закрученных структур. Эти структуры и есть слики, образованные из природно-сформировавшейся нефти, выделяющейся естественным образом из так называемых грифонов на морском дне. Контрасты яркости  $\tilde{B}/B_0$ , представленные на Рисунке 2.1 (верхний правый), имеют различные знаки по разным сторонам 92-го градуса западной долготы. Происхождение этой зоны, так называемой зоны инверсии контрастов, следует из определения передаточной функции (1.7). Как уже утверждалось ранее, возникновение воображаемой линии, делящей область солнечного блика на две части, где вариации СКН приводят к отрицательным и положительным контрастам, следует из решения уравнения:  $T(x, y) = 0$ .

Рисунок 2.1 (нижний левый) показывает передаточную функцию, рассчитанную по уравнениям (1.7), (1.8) и (1.9) для сглаженного поля яркости солнечного блика. Контрасты  $\tilde{s}^2/s_0^2$ , полученные по полю яркости, изображены на Рисунке 2.1 (нижний правый). В окрестности зоны инверсии контрастов, где передаточная функция стремится к нулю:  $T \rightarrow 0$ , она проявляется как область сингулярных, очень больших значений, и, как следствие, не имеет физического значения.

После применения алгоритма, контрасты, ассоциируемые с нефтяными сликами, теперь систематически отрицательны. Также можно отметить другие особенности в контрастах СКН (как отрицательные, так и положительные), вызванные вариациями в поле ветра на внутренних масштабах блика. Контрасты СКН нефтяных сликсов составляют  $\tilde{s}^2/s_0^2 \approx 0.3\text{--}0.4$ , что эквивалентно уменьшению СКН внутри слика в 1.5 раза. Эта оценка ниже оценки, приведённой Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954b] (2-2.5 раза), для поверхностных сликсов, образованных смесью рыбьего жира, моторного масла и дизельного топлива. Также стоит обратить внимание, что упругость такой поверхности плёнки меньше упругости смеси рыбьего жира, которая составляет около  $30\text{mH/m}$  и, предположительно больше упругости нефтепродуктов, которая плохо изучена (одно из предложенных значений  $E=4\text{mH/m}$ , из личного общения с С. Ермаковым). Поскольку упругость поверхностных плёнок определяет подавление коротких ветровых волн, меньшее значение упругости должно приводить к меньшим контрастам в сликсах (см. раздел 2.3 и Рисунок 2.10 ниже).

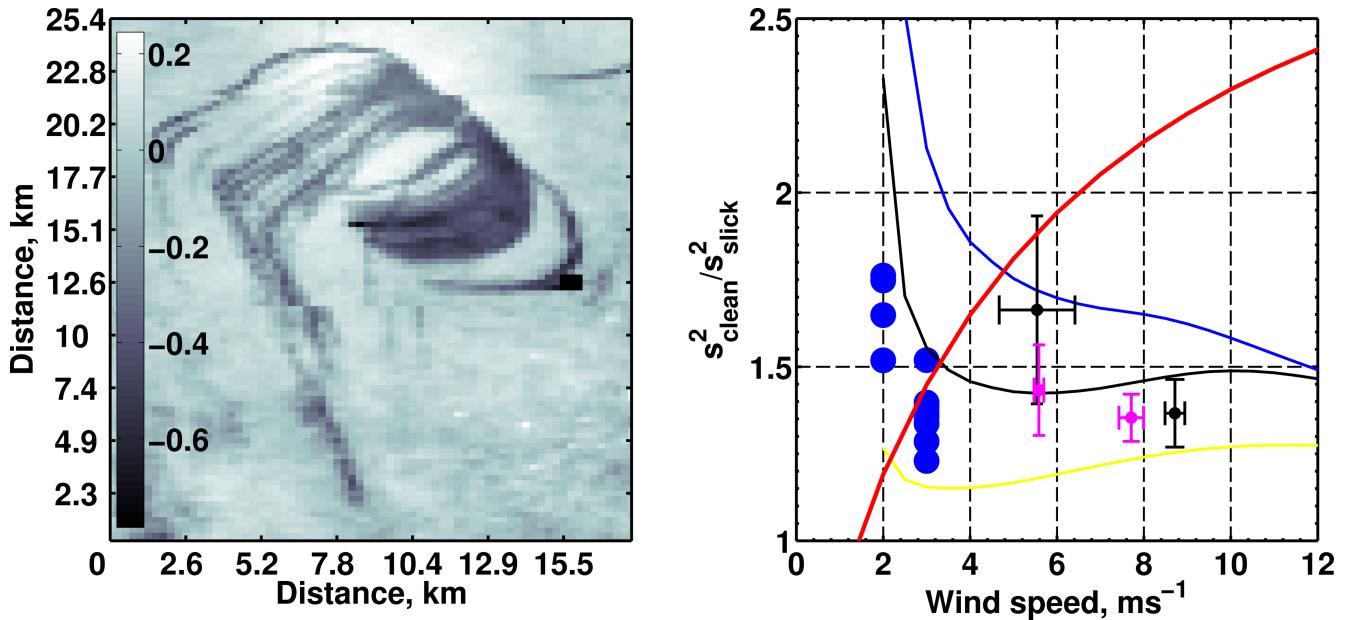


(верхний левый) Фрагмент изображения с прибора MODIS/Terra (Июнь, 2, 2005, 16:55 GMT) на длине волны 645нм (красный канал) Мексиканского залива с особенностями проявления нефтяных сликов в солнечном блике. (верхний правый) Контрасти яркости  $\tilde{B}/\bar{B}$ . (нижний левый) Передаточная функция. (нижний правый) Восстановленные контрасти СКН

Рисунок 2.1 – Фрагмент изображения, полученного с прибора MODIS/Terra (Июнь, 2, 2005, 16:55 GMT)

На Рисунке 2.2 (слева) показан увеличенный фрагмент Рисунка 2.1 (нижний левый), содержащий “индивидуальные” нефтяные сликки, а на Рисунке 2.2 (справа) представлена зависимость контрастов СКН от скорости ветра по 12-и выбранным нефтяным сликам. Оценки скорости ветра были проведены по значениям  $s_0^2$ , используя эмпирические соотношения Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b]. Также на Рисунке 2.2 приведены контрасти СКН биогенных сликков, полученные Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954b], которые определены как отношение регрессионных прямых СКН для чистой и сливковой поверхности моря.

Как следует из Рисунка 2.2 (справа), при малых скоростях ветра, наблюдаемые контрасты СКН нефтяных слик находятся в соответствии с контрастами, обнаруженными Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954a,b] для слик из смеси рыбьего жира, но при умеренных ветрах ( $>4\text{ м/с}$ ). Отсюда можно заключить, что контрасты нефтяных слик систематически ниже контрастов рыбьего жира.



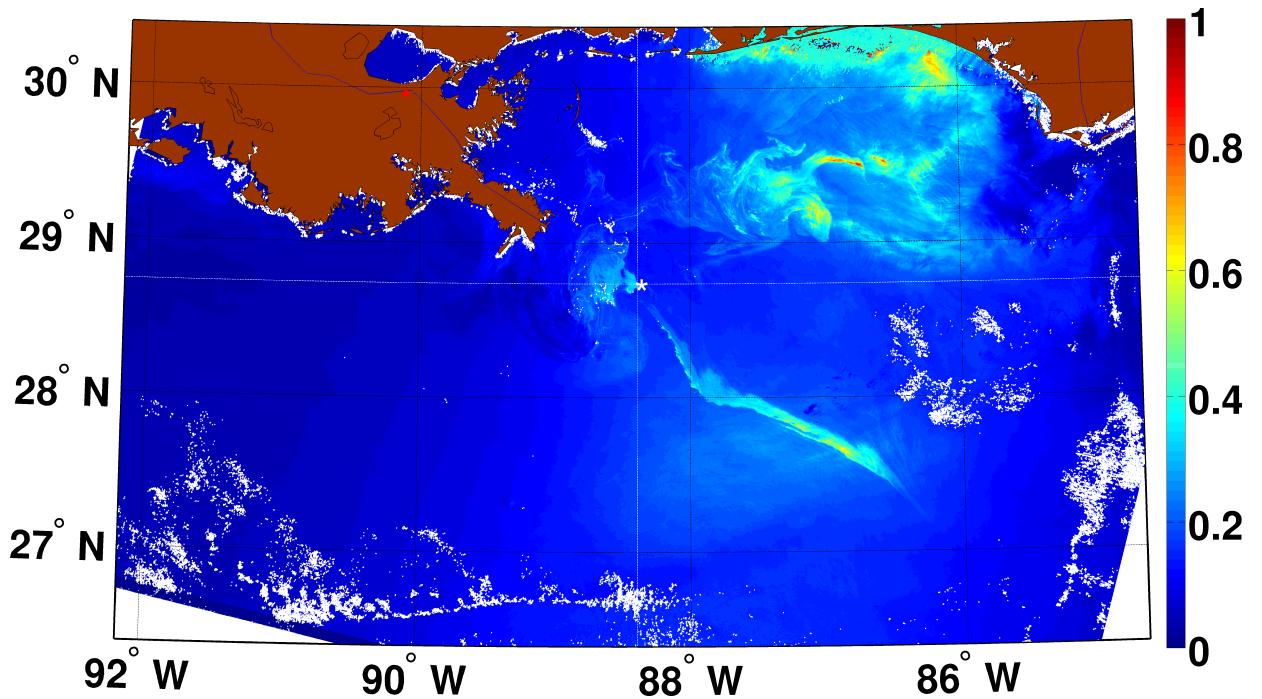
(слева) Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 2.1, содержащем “индивидуальные” нефтяные сликки. (справа) Контрасты СКН нефтяных слик, полученных по изображению MODIS на Рисунке 2.1 (синие точки при скоростях ветра 2-3 м/с), по изображению MERIS на Рисунках 2.6 и 2.8 (фиолетовые точки с ошибками), и по изображениям MODIS (чёрные точки с ошибками). Красной кривой показаны контрасты СКН рыбьего жира из результатов Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b]. Желтая, чёрная и синяя кривые отражают результаты моделирования контрастов СКН, вызванных тонкими поверхностными сликами с 5, 15 и 30 мН/м, соответственно

Рисунок 2.2 – Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 2.1, содержащем “индивидуальные” нефтяные сликки, и зависимость контрастов от скорости ветра

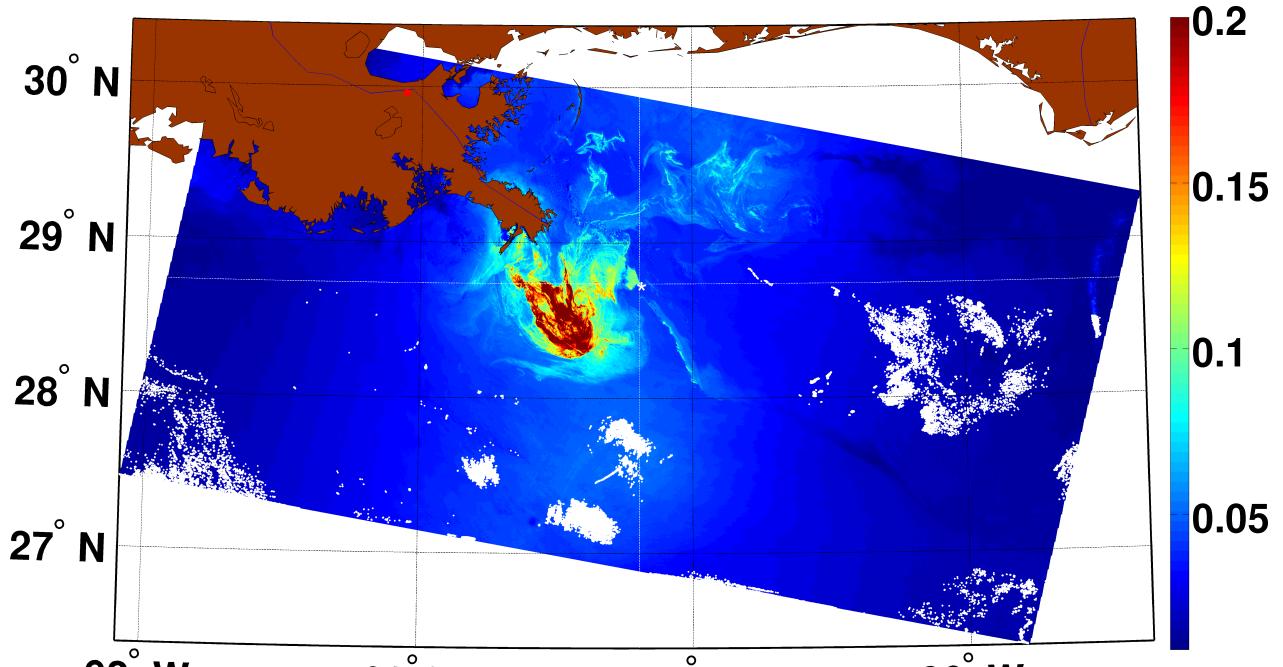
## 2.2 Катастрофические нефтяные загрязнения

Катастрофический разлив нефти в результате взрыва на нефтяной платформе Дипвотер Хорайзон (англ. Deepwater Horizon) в Мексиканском заливе выбран для дальнейшей иллюстрации работы предложенного метода. На Рисунке 2.3 приводятся изображения MODIS (MODIS/Terra, Май, 24, 2010, 16:45 GMT) и MERIS (MERIS/Envisat, Май 24, 2010, 16:17 GMT) в красных каналах (645нм и 681н, соответственно). Стоит отметить, что одно изображение MODIS/Terra полностью не покрывает нефтяной slick. Поэтому на Рисунке 2.3, б приводится композит двух изображений MODIS/Terra, полученных 16:45 и 16:50 GMT. Разница во времени между рассматриваемыми снимками MERIS и MODIS около получаса, поэтому стоит полагать, что “геометрия” нефтяного загрязнения на поверхности океана не должна была сильно измениться за этот промежуток. Также, в качестве подтверждения наших предположений относительно геометрии наблюдения, в результате разных условий наблюдения и положения Солнца, сигнатуры нефтяного загрязнения на изображениях MODIS и MERIS в солнечном блике всё-таки отличаются.

Рассматриваемые изображения обработаны по методологии, изложенной в предыдущей главе (см. Глава 1, раздел 1.3). Поля средней яркости солнечного блика  $B_0$  (масштаб осреднения  $30 \times 30 \text{ км}^2$ ) для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунках 2.4, а и 2.4, б. Передаточная функция для данных MODIS, показана на Рисунке 2.4, г, напрямую рассчитывается из осреднённого поля яркости (следуя уравнениям (1.7), (1.8) и (1.9)). Обратите внимание, что на рисунке проявляется наклонная линейная неоднородность, образованная в результате слияния двух изображений MODIS/Terra. Для оценки передаточной функции данных MERIS использовалось направление ветра по данным NCEP, а затем проводился расчёт СКН, используя уравнение (1.15). Передаточная функция для данных MERIS приведена на Рисунке 2.4, д.



(а)

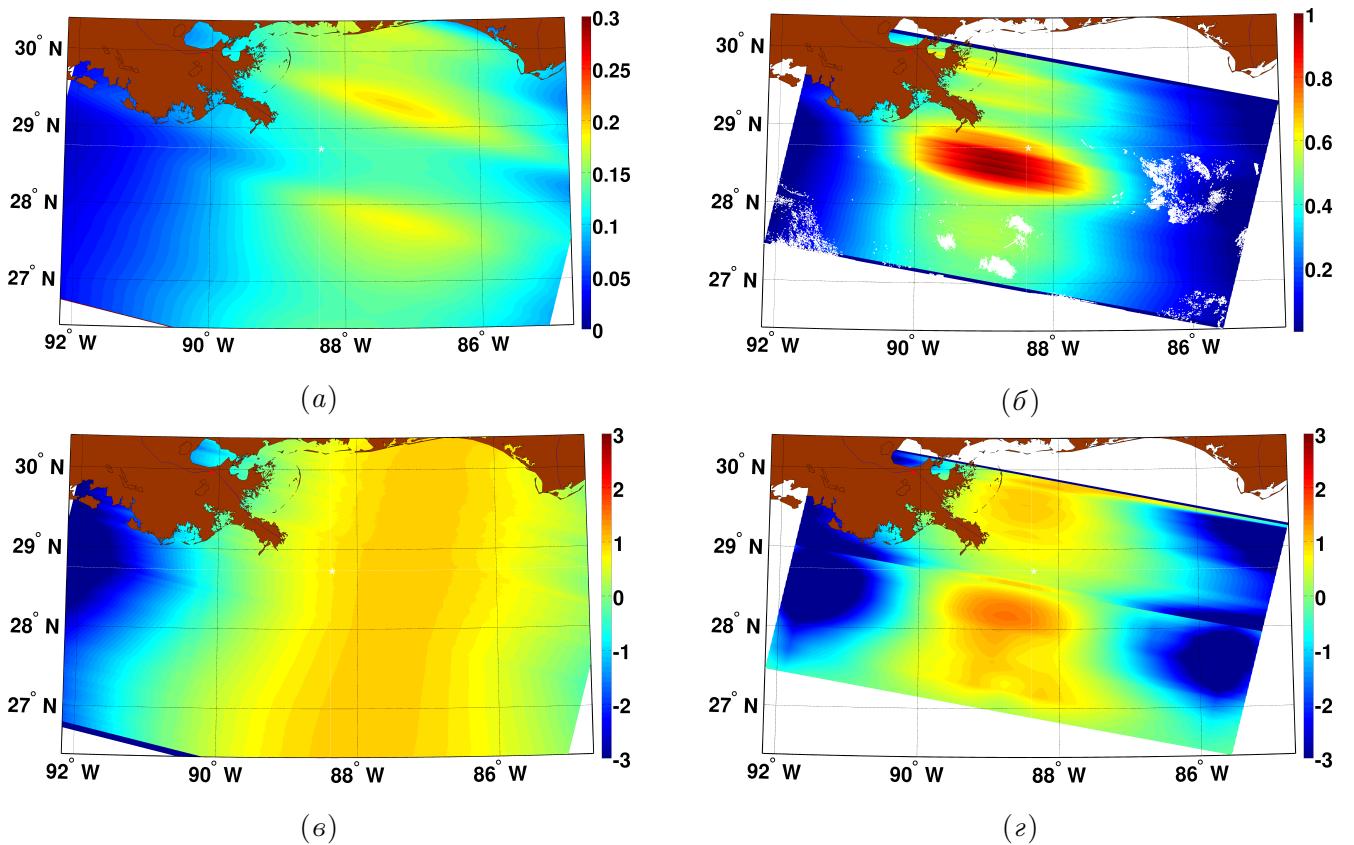


(б)

Цветовая шкала приведена в относительных единицах и характеризует яркость изображений. Мaska облаков выделена белым цветом, а маска земли коричневым.

Координаты нефтяной платформы Deepwater Horizon:  $28.73^{\circ}$  СШ,  $88.38^{\circ}$  ЗД

Рисунок 2.3 – Фрагмент исходного изображения MERIS/Envisat в красном канале (681 нм), полученное 24 Мая 2010, 16:17 GMT (а) и композитное изображение двух снимков MODIS/Terra в красном канале (645 нм), полученное 24 Мая 2010, 16:45 и 16:50 GMT (б)

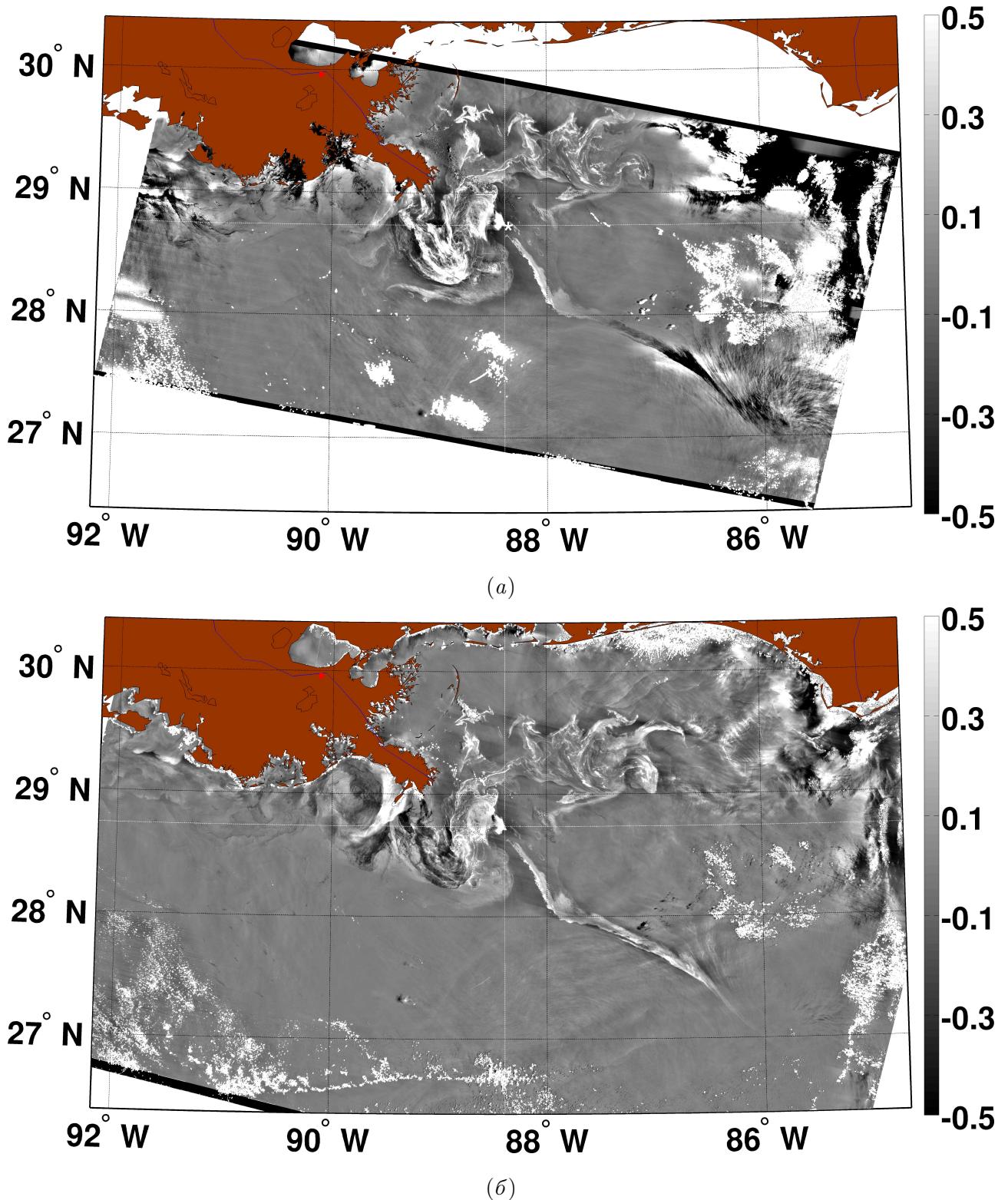


Усреднённая яркость  $B_0$  изображений MERIS и MODIS (а) и (б), соответственно.

Передаточная функция  $T$ , определяемая из уравнений (1.15) для MERIS и (1.7), (1.8) и (1.9) для MODIS (в) и (г), соответственно. Наклонный линейный разрыв в поле  $T$  (г) около  $28.50^\circ$  СШ появился в результате “склеивания” двух изображений MODIS/Terra, полученных в 16:45 и в 16:50 GMT

Рисунок 2.4 – Усреднённая яркость  $B_0$  с изображений MERIS и MODIS, а также передаточная функция  $T$

Контрасты яркости солнечного блика  $\tilde{B}/B_0$  для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунке 2.5. Поля контрастов хорошо согласуются. Хотя есть и некоторые отличия. В районе  $87^\circ$  ЗД на обоих изображениях отчётливо видна “нефтяная струя”, которая проявляется в виде светлых контрастов на изображении MERIS (Рисунок 2.5, а), но в поле контрастов MODIS (Рисунок 2.5, б) яркость струи меняется от светлой к тёмной. Если обратиться к Рисунку 2.4, б, можно заметить, что передаточная функция  $T$  меняет знак в этом районе, что соответствует зоне инверсии контрастов яркости. Нефтяная струя пересекает зону инверсии контрастов и, поэтому, сигнатуры в контрастах яркости солнечного блика также меняют свой знак.



*Проявление нефтяного разлива в контрастах яркости солнечного блика  $\tilde{B}/B_0$ , на изображениях MERIS (a) и MODIS (b)*

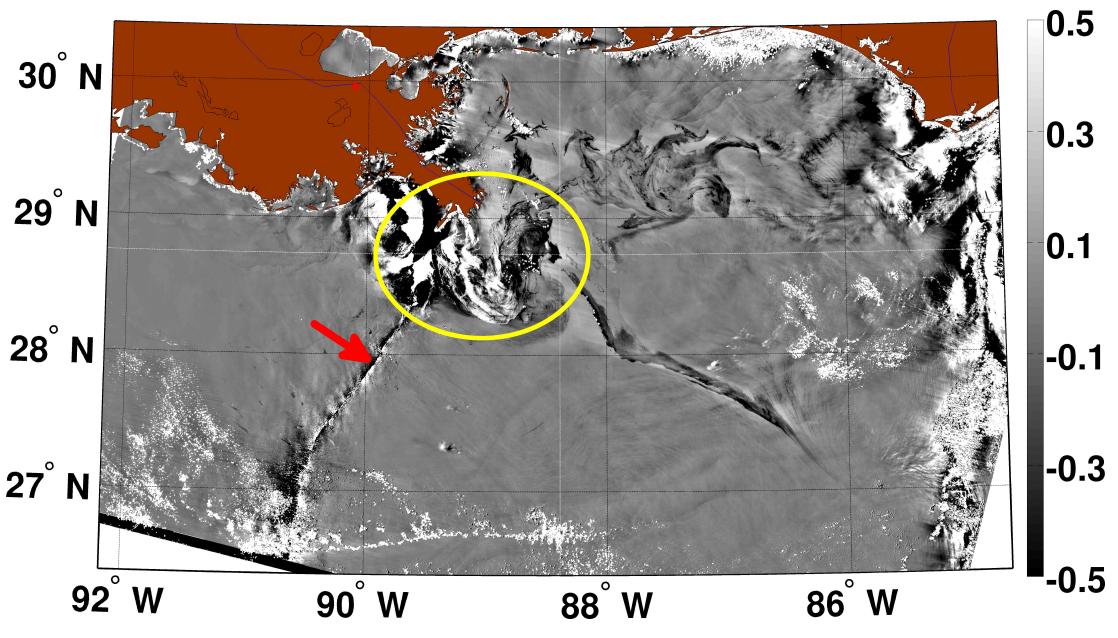
Рисунок 2.5 – Контрасты яркости солнечного блика  $\tilde{B}/B_0$

На Рисунке 2.6 приведены контрасты СКН  $\tilde{s}^2/s_0^2$ , полученные по изображениям яркости в солнечном блике MERIS и MODIS (Рисунок 2.5), с использованием передаточной функции,

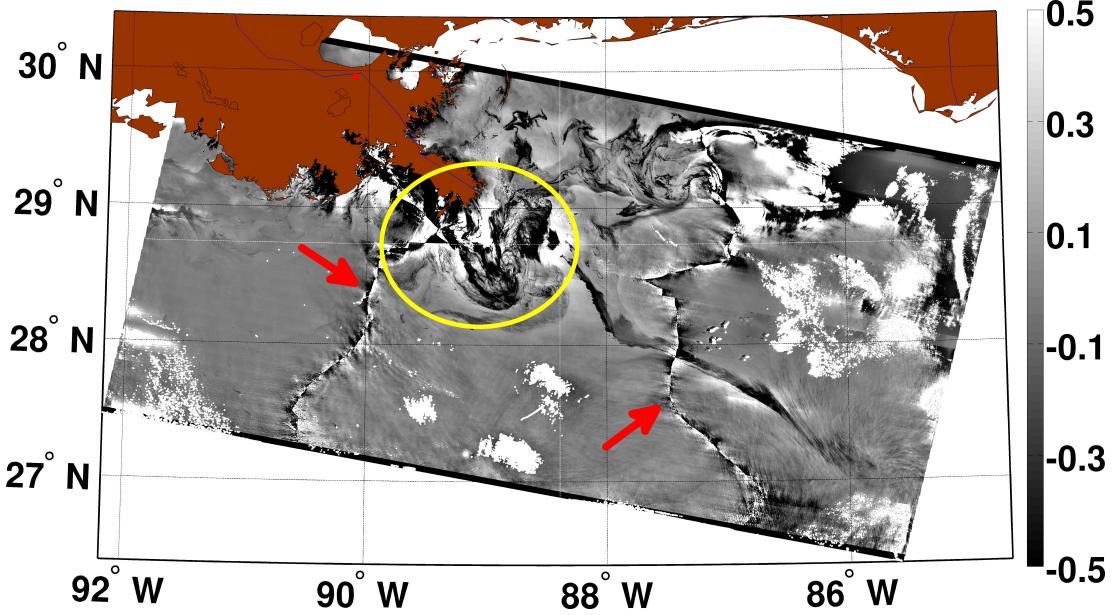
представленной на Рисунке 2.4. В результате анализа полученных изображений, было обнаружено, что аномалии СКН, полученные с применением двух различных алгоритмов к двум независимым изображениям, дают очень схожие результаты. Это подтверждает надежность предложенной методологии. Усреднённые контрасты СКН в нефтяной струе, полученные по изображениям MODIS и MERIS, показаны на Рисунке 2.2 (справа).

Стоит также отметить несколько отличий, наблюдаемых на обработанных изображениях (Рисунок 2.6). Во-первых, линейные особенности (отмеченные красными стрелками), с очень низкими значениями контрастов СКН, связаны с зонами инверсии контрастов. Другое отличие, состоит в наблюдении отрицательных и положительных вариаций контрастов на изображении в области, заключённой в жёлтый контур, близ устья реки Миссисипи. Более того, эти положительные/отрицательные значения на обоих изображениях не перекрываются. Учитывая тот факт, что нефтяная плёнка подавляет короткие волны и СКН, “яркие” особенности СКН на Рисунке 2.6 должны рассматриваться как артефакты, вызванные какими-то другими факторами. Предположим, что толщина нефтяной плёнки в этом районе значительно больше длины волны красного света (640-680нм), т.е. толщина порядка 1 микрона и более. В таком случае, оптические свойства самой нефти доминируют над яркостью морской поверхности, покрытой этой нефтью. Предложенный алгоритм не учитывает этот эффект, поэтому смена знака и изменение магнитуды восстановленных контрастов некорректны и не несут физического смысла.

Чтобы подробнее продемонстрировать эффект изменения толщины нефти, рассмотрим случай синхронной съёмки приборами MERIS и ENVISAT ASAR. На Рисунке 2.7 представлены восстановленная по данным PCA скорость ветра (с использованием алгоритма СМОД-4) и яркость морской поверхности в красном канале MERIS над Мексиканским заливом 26 Апреля 2010. Нефтяной разлив виден на обоих изображениях. Увеличенные области этого района в терминах поля УЭПР (линейные единицы) и контрастов СКН представлены на Рисунке 2.8. Контрасты СКН получены при помощи метода, описанного в Главе 1.



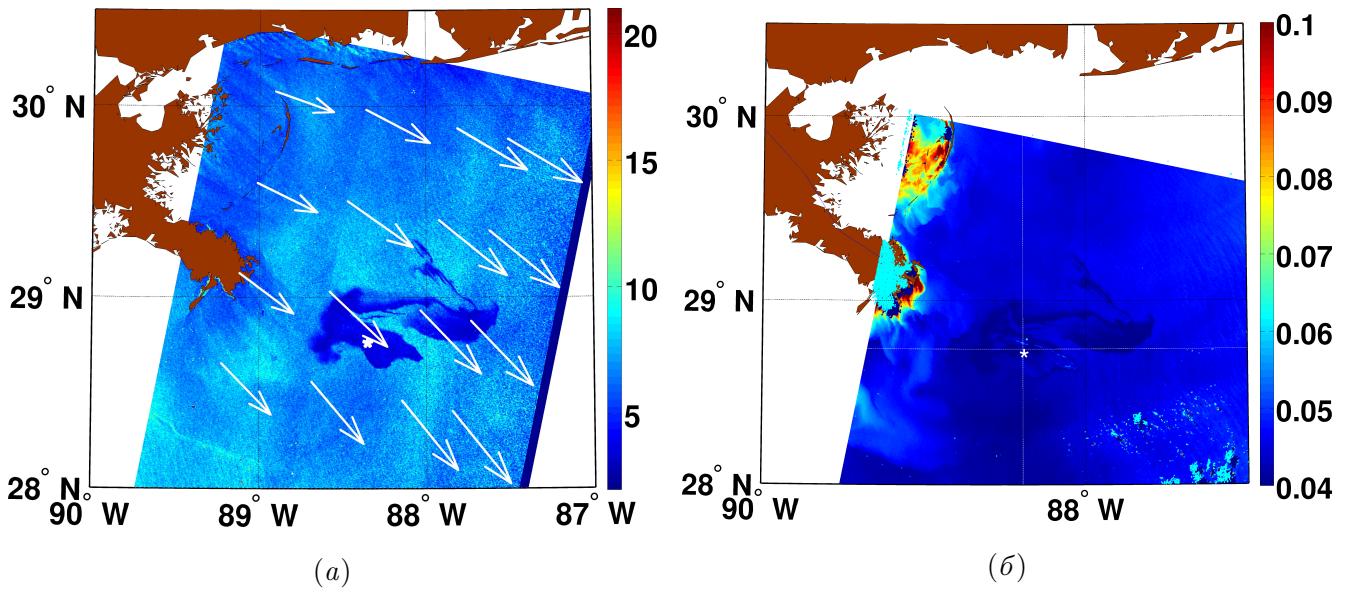
(a)



(b)

*Красными стрелками обозначены области инверсии контрастов, где восстановленный СКН имеет сингулярные значения и не несёт физического смысла. Яркие участки контрастов СКН, обведённые жёлтым контуром, не относятся к особенностям шероховатости морской поверхности, но, скорее всего, являются индикаторами проявления оптических свойств нефтяной плёнки. Таким образом, толщина нефтяной плёнки в этой области (внутри контура) может быть значительно большей длины волн красного света*

Рисунок 2.6 – Аномалии СКН  $\tilde{s}^2/s^2$ , восстановленные по данным прибора MERIS (а) и MODIS (б)



На изображении MERIS видно проявление нефтяного разлива в Мексиканском заливе в красном канале 26 Апреля 2010г. ASAR представлено в виде скорости ветра, рассчитанной по УЭПР с использованием модели CMOD-4. Белые стрелки на PCA изображении показывают направление ветра NCEP

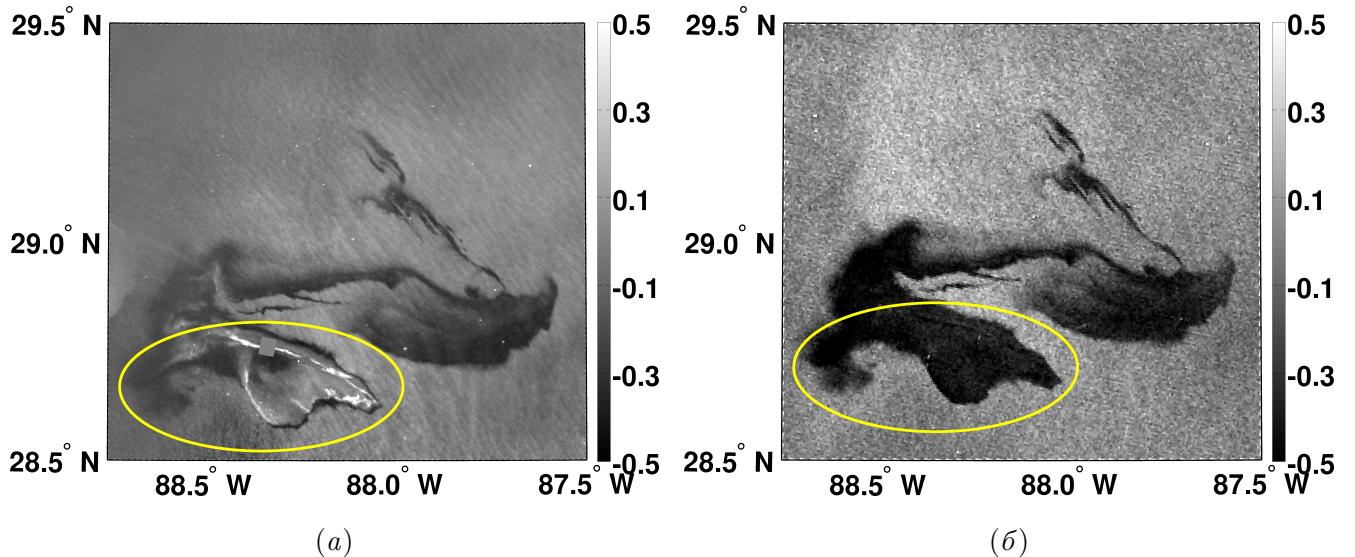
Рисунок 2.7 – Изображения (а) ASAR (15:58 GMT), и (б) MERIS (15:56 GMT)

Из Рисунка 2.7 видно, что нефтяные разливы имеют схожую геометрию, однако, полученные значения контрастов УЭПР и СКН могут значительно различаться. Разделим области, изображённого на Рисунке 2.8 разлива, на 2 части – внутри и вне жёлтого контура. При этом контрасты СКН и УЭПР “вне” жёлтого контура визуально хорошо коррелируют. Точечная диаграмма контрастов СКН и УЭПР изображена на Рисунке 2.9. Контрасты СКН хорошо коррелируют с УЭПР, а значения СКН несколько ниже УЭПР с коэффициентом отношения около 0.6:  $\tilde{s}^2/s^2 \approx 0.6 \cdot \tilde{\sigma}_0/\sigma_0$ .

Контрасты СКН, усреднённые по части этого изображения также приводятся на Рисунке 2.2 (справа). Отмету, что тот же слик также наблюдался прибором MODIS получасом позже, однако, здесь это изображение не приводится. Обработка этого спутникового снимка даёт аномалии СКН, очень похожие на представленные на Рисунке 2.8, усреднённые значения также приводятся на Рисунке 2.2 (справа).

Усреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура из Рисунка 2.8, а приведены на Рисунке 2.9 (справа). Две других оценки контрастов УЭПР на Рисунке 2.9 (справа) при меньших скоростях ветра получены по данным PCA ASAR, датируемых 25 Мая 2010, 15:47 GMT (здесь не показаны), т.е. на следующий день после получения обсуждаемых изображений MERIS и MODIS на Рисунке 2.3. В обоих случаях, скорость ветра была

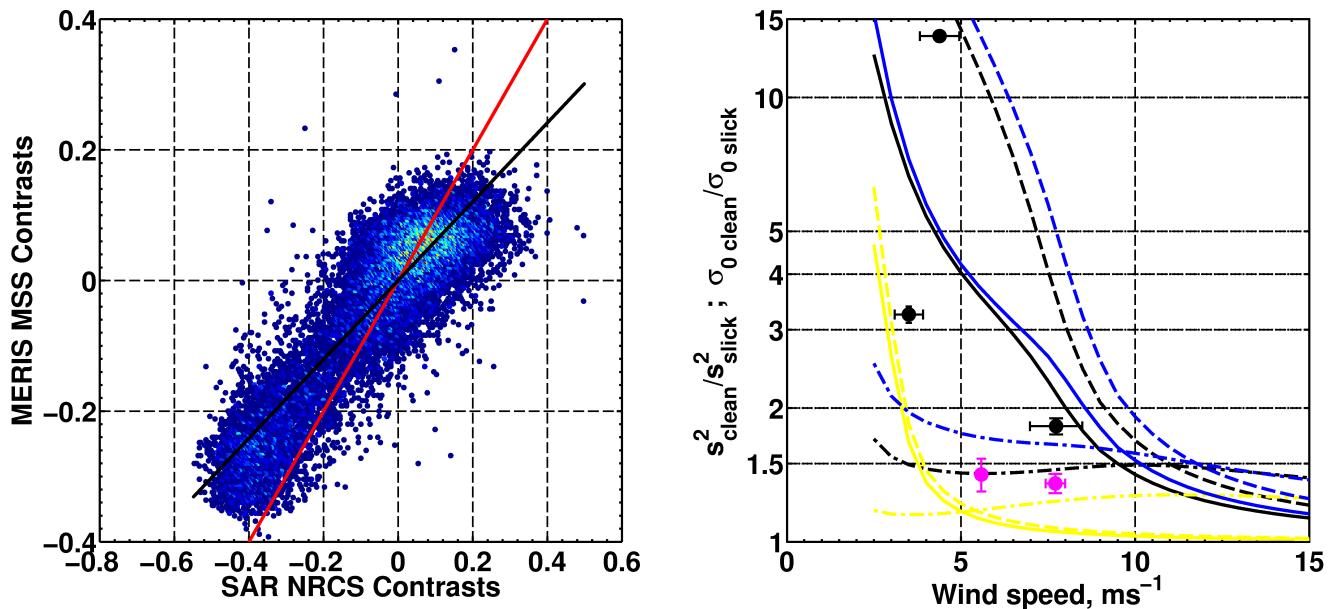
восстановлена по изображениям ASAR с использованием алгоритма CMOD-4 (см., например, Рисунок 2.7, а). Представленные контрасты УЭПР, демонстрируют их сильную зависимость от скорости ветра. Анализируя контрасты УЭПР на Рисунке 2.9 (справа) и контрасты СКН на Рисунке 2.2(справа) можно отметить, что при слабых и умеренных скоростях ветра, нефтяные слики лучше видны на PCA изображениях, нежели на оптических.



*Изображения содержат нефтяной разлив и представлены в терминах УЭПР (линейные единицы) и контрастов СКН. Толщина нефтяной плёнки в области внутри жёлтого контура значительно больше длины волны красного света*

Рисунок 2.8 – Увеличенные фрагменты изображений ASAR (а) и MERIS (б), представленных на Рисунке 2.7

Возвращаясь к Рисунку 2.8, область внутри жёлтого контура оказывается аномальной. В то время как УЭПР всё ещё подавляется в этой области, контрасты СКН обладают сильной изменчивостью, и некоторые из участков проявляются очень ярко. И, безусловно, данные PCA указывают, что короткое ветровое волнение значительно подавляется в этой области. Соответственно, яркие участки контрастов СКН никак не относятся к особенностям шероховатости морской поверхности, но, скорее всего, являются индикаторами проявления оптических свойств нефтяной плёнки. Таким образом, толщина нефтяной плёнки в этой области (внутри контура) может быть значительно большей длины волны красного света. Тогда, можно предположить, что яркие линейные детали, хорошо различимые внутри жёлтого контура, скорей всего относятся к цвету самой нефти.



Отношение контрастов СКН и контрастов УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура (слева), изображённого на Рисунке 2.8. Красная линия – отношение один к одному, а чёрная – линейная аппроксимация данных:  $\tilde{s}^2/s^2 \approx 0.6 \cdot \tilde{\sigma}_0/\sigma_0$ . Чёрная точка с погрешностью в районе значения скорости ветра 7.5м/с – усреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика (справа) вне жёлтого контура на Рисунке 2.8. Две другие чёрные точки – контрасты УЭПР того же нефтеразлива, но полученные по изображению ASAR, датируемым 25 Мая 2010, 15:47 GMT (здесь не показано). Розовые точки – усреднённые контрасты СКН, полученные по изображению MERIS, показанному на Рисунке 2.6, а, для нефтяной струи, и на Рисунке 2.8, б для области вне жёлтого контура. Точки-пунктирные линии – данные симуляции модели формирования радиолокационных изображений (RIM) контрастов СКН нефтяного слика для  $E=5, 15, 30\text{mH/m}$  (жёлтая, чёрная и синяя линии, соответственно). Результаты RIM симуляций контрастов УЭПР нефтяного слика в рамках “чисто” Брэгговской модели рассеяния и полной модели УЭПР, учитывающей эффект обрушений волн на обратное рассеяние радиолокационного сигнала приводятся в виде пунктирных и сплошных линий, соответственно. Пояснения к цветам линий контрастов УЭПР такие же как и у СКН

Рисунок 2.9 – Контрасты СКН и контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура, изображённого на Рисунке 2.8

## 2.3 Контрасты СКН и УЭПР нефтяных сликов

В результате полученных и представленных на Рисунке 2.2 (справа) контрастов СКН, предполагается, что они соответствуют тонким, в сравнении с длиной волны красного света, нефтяным плёнкам. Их толщина, конечно, значительно меньше длин капиллярных волн, тогда механизм гашения поверхностных волн тонкими нефтяными плёнками может быть описан в рамках классической теории Марангони [Levich, 1962]. В этом случае, модуль упругости является единственным и до сих пор остаётся плохо изученным параметром, характеризующий свойства подавления тонких нефтяных плёнок.

Нефтяная плёнка влияет на ветровые волны через изменение коэффициента затухания волн. Соотношение для коэффициента затухания волн в присутствии поверхностных тонких плёнок даётся в [Levich, 1962], а также воспроизведено в [Kudryavtsev et al., 2005]. Вязкая диссипация играет ключевую роль в сохранении энергии капиллярно-гравитационных волн. В результате, поверхностные плёнки увеличивают энергию диссипации, а также влияют как на коротковолновой спектр, так и на СКН. Следуя модели формирования радиолокационных изображений (RIM) (см. подробнее Приложение A с описанием модели), предложенной в [Kudryavtsev et al., 2005] и [Johannessen et al., 2005], уравнение баланса энергии в равновесном диапазоне гравитационных и капиллярно-гравитационных волн записывается следующим образом:

$$\beta_\nu(k)B(k) - B(k)[B(k)/\alpha]^n + I_{wb}(k) = 0, \quad (2.1)$$

где  $B(k)$  - спектр насыщения ветровых волн,  $\alpha$  и  $n$  - модельные параметры,  $I_{wb}$  - скорость передачи энергии коротким волнам в результате обрушения более длинных волн (включая генерацию паразитных капилляров),  $\beta_\nu$  - скорость эффективного роста

$$\beta_\nu = c_\beta(u_*/c)^2 \cos\varphi |\cos\varphi| - 4\nu k^2/\omega, \quad (2.2)$$

представляющая разность между вкладом энергии (первый член л.ч.) и вязкой диссипации (второй член л.ч.),  $\varphi$  – угол между векторами скорости ветра и волнового числа,  $c$ ,  $\omega$  and  $k$  фазовая скорость, частота и вектор волнового числа, соответственно,  $c_\beta$  – “постоянная” скорости роста ветра (соответствует параметризации Стюарта [Stewart, 1974]),  $u_*$  – динамическая скорость,  $\nu$  – эффективный коэффициент вязкости, учитывающий влияние поверхностной плёнки (для чистой поверхности он соответствует молекулярному коэффициенту вязкости воды  $\nu_0$ ). В уравнении (2.1) утверждается, что коротковолновый спектр следует из баланса

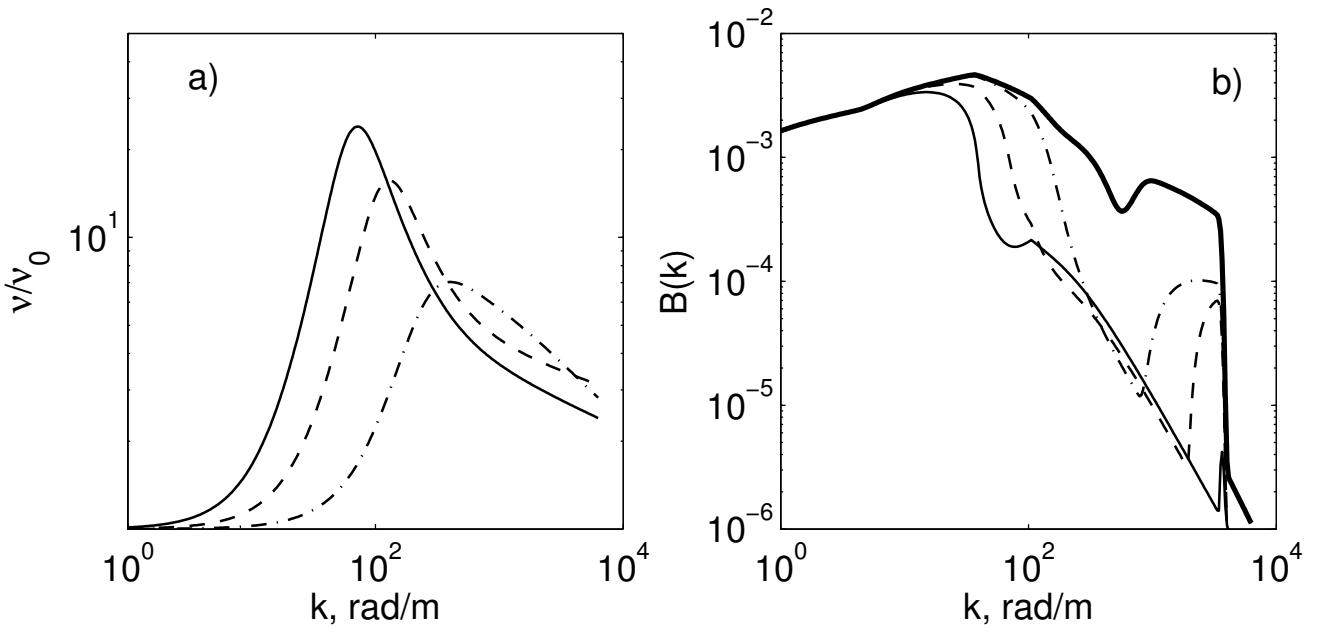
различных источников и стоков энергии, представленных в (2.1) притоком ветровой энергии и вязкой диссипацией (первый член), нелинейные потери энергии, включая обрушения волн (второй член) и генерацию связанных (паразитных капилляров) и свободных коротких волн, в результате обрушения более длинных ветровых волн (третий член). Форма волнового спектра следует из решения уравнения (2.1) (подробнее см. [Kudryavtsev et al., 2005]).

Коэффициент эффективной вязкости поверхности воды, покрытой тонкой поверхностной плёнкой с упругостью  $E = 5, 15, \text{ и } 30 \text{ mH/m}$ , нормированной на коэффициент вязкости воды представлен на Рисунке 2.10, а. С увеличением упругости плёнки, магнитуда коэффициента эффективной вязкости увеличивается и его пик смещается в сторону более длинных волн. По-видимому, увеличение вязкой диссипации нарушает баланс энергии (2.1) и приводит к подавлению спектральной энергии в высокочастотной части спектра. Всенаправленные спектры (прointегрированные по всем направлениям) в присутствии поверхностных плёнок показаны на Рисунке 2.10, б. Интересной особенностью этих спектров является отсечка спектра, следующая за низкочастотны сдвигом эффективной вязкости с увеличением упругости. Видимо, эта спектральная отсечка относится к пересечению нуля эффективной скоростью роста (2.2), когда вязкая диссипация (зависящая от  $E$ ) превышает вклад ветровой энергии. Волновое число спектральной отсечки  $k_{cut}$  может быть рассчитан из решения уравнения  $\beta_v(k_{cut}) = 0$  в, например, направлении ветра. СКН морской поверхности выражается через всенаправленный спектр насыщения как

$$s^2 = \int_k B(k) d\ln k \quad (2.3)$$

Как следует из этого уравнения, СКН должен быть чувствителен к волновому числу спектральной отсечки. Тогда его можно использовать для оценки упругости нефтяной плёнки по контрастам СКН в сложке. Также стоит обратить внимание на локальный высокочастотные спектральные пики в спектре насыщения для плёнок с упругостями  $E=5 \text{ и } 15 \text{ mH/m}$ . Эти пики являются следствием генерации паразитных капилляров в результате обрушения коротких гравитационных волн. Для  $E=30 \text{ mH/m}$ , эти короткие гравитационные волны значительно подавляются плёнкой, которая предотвращает генерацию паразитных капилляров.

Упругость тонкой плёнки нефтепродуктов мало изучена, поэтому, для оценки свойств нефтяной плёнки по наблюдаемым контрастам СКН, мы предлагаем использовать спектральную модель (2.1), совместно с определённым по (2.3) СКН. Жёлтая, чёрная и синяя кривые на Рисунке 2.2 (справа) показывают результаты моделирования контрастов СКН для плёнок с упругостями  $E = 5, 15, \text{ и } 30 \text{ mH/m}$ . Несмотря на то, что разброс данных достаточно



(a) Коэффициент гашения волн,  $\nu$ , масштабированный на вязкость воды,  $\nu_0$ , для плёнок различной эластичности,  $E$ ,:  $E=5\text{мН/м}$  (штрих-пунктир),  $E=15\text{мН/м}$  (пунктир), и  $E=30\text{мН/м}$  (сплошная). (б) Всенаправленный спектр насыщения ветровых волн для чистой поверхности (жирная сплошная, исходный спектр), и для поверхности, покрытой плёнкой с упругостью  $E=5\text{мН/м}$  (штрих-пунктир),  $E=15\text{мН/м}$  (пунктир), и  $E=30\text{мН/м}$  (тонкая сплошная)

Рисунок 2.10 – Коэффициент затухания волн и всенаправленный спектр насыщения ветровых волн для различных условий

большой, модельные расчёты для  $E = 15\text{мН/м}$  дают наилучшее соответствие с данными. И полученное значение упругости отличается от  $E = 4\text{мН/м}$ , использованное в работах по изучению нефтяных сликов (Станислав Ермаков, из личного общения).

На Рисунке 2.9 (справа) представлены результаты симуляции на модели RIM контрастов УЭПР (в-диапазон, ВВ поляризация, направление визирования против ветра и угол падения  $30^\circ$ ) для поверхности, покрытой нефтяными плёнками, с упругостями  $E = 5, 15$ , и  $30\text{мН/м}$ . Контрасты УЭПР рассчитывались для двух моделей рассеяния: “чисто” Брэгговского рассеяния УЭПР  $\sigma_{0\text{br}}^{pp}$ , и композитной модели, учитывающей радиолокационное рассеяние от обрушающихся волн  $\sigma_0^{pp} = \sigma_{0\text{br}}^{pp} + \sigma_{0b}$ , где  $\sigma_{0b}$  представляет вклад обрушений волн в обратное рассеяние РЛ-сигнала. Подробнее эти механизмы описаны в 1 главе и в [Kudryavtsev et al., 2005]. Для первой модели, контрасты УЭПР соответствуют контрастам волнового спектра на Брэгговском волновом числе  $k_{br}$  (см. спектр на Рисунке 2.10, б,  $k_{br} = 10^2\text{рад/м}$ ). Для другой же модели, контрасты УЭПР сочетают подавление Брэгговского волнового спектра

и обрушений волн. Следуя модели RIM, диапазон обрушающихся волн, обеспечивающих не-брэгговское рассеяние, определяется как  $k < k_R/10$ . Для радиолокатора С-диапазона, это соответствует длинам волн  $> 60\text{cm}$ . Как следует из Рисунка 2.10, б, эти волны не подвержены влиянию гашения нефтяной плёнкой, и контрасты УЭПР, предсказанные моделью, ниже, чем в случае “чисто” Брэгговской модели рассеяния. Если волновой спектр при  $k = k_{br}$  значительно подавляется в области слика (как это видно из Рисунков 2.10, б и 2.9 (справа) для плёнок с  $E = 15$  и  $30\text{mH/m}$ ), Брэгговский механизм рассеяния отключается и УЭПР формируется в основном за счёт обрушений. В таком случае, отношение УЭПР для чистой и сливковой поверхностей,  $\sigma_{0\text{clean}}^{pp}/\sigma_{0\text{slick}}^{pp}$ , в основном соответствует обратному отношению не-Брэгговской УЭПР к полной УЭПР чистой поверхности, т.е.  $\sigma_{0\text{clean}}^{pp}/\sigma_{0\text{slick}}^{pp} \approx \sigma_0^{pp}/\sigma_{0b}$ .

Осреднённые контрасты УЭПР для нефтяных сливков из Рисунка 2.8, а, представлены на Рисунке 2.9 (справа) вместе со средними контрастами УЭПР, полученным по данным ASAR того же района 25 Мая 2012, 15:47 GMT. Экспериментальные оценки хорошо соответствуют модельным расчётом для  $E=15\text{mH/m}$  и  $E=30\text{mH/m}$ . Однаковые значения контрастов УЭПР возникают потому, что коэффициент подавления волн при  $k_{br} = 10^2\text{рад/m}$  для таких значений упругости оказывается одинаков (см. Рисунок 2.10, а). Тогда, в таком случае по контрастам УЭПР не удается разделить поверхностные сликки с различной упругостью. В результате сложной формы спектральных контрастов на Рисунке 2.10, б, можно заключить, что контрасты УЭПР должны сильно зависеть от “геометрии” РЛ-наблюдений (длины волны, угла наблюдения, направления визирования), что делает практически трудно разрешимой задачу разделения и интерпретации плёнок различного происхождения (биогенные плёнки, нефтяные и др. слики). Напротив, контрасты СКН зависят от спектральной отсечки, которая напрямую связана с упругостью поверхностной плёнки, а значит и с её происхождением. С этой точки зрения, оптические данные наблюдения поверхностных сливков могут дать нам возможность разделить плёнки биогенного происхождения (ожидаемая упругость  $25\text{-}30\text{mH/m}$ ) и слики нефтепродуктов, которые (следуя нашим оценкам) имеют упругость около  $15\text{mH/m}$ .

## 2.4 Выводы по главе

Предложенный в главе 1 подход применён к анализу проявления нефтяных сликов естественного и происхождения и катастрофического нефтяного разлива в изображениям солнечного блика, полученным приборами MODIS и MERIS.

Показано, что контрасты яркости сликов могут быть как положительными, так и отрицательными. Это свойство следует непосредственно из геометрии наблюдения, когда зеркальные точки располагаются по разные стороны зон инверсии контрастов. Хотя это явление является естественным “строгим” следствием модели формирования контрастов СКН в блике, этот факт в зарубежной литературе отмечается как неожиданный.

В результате анализа обработанных спутниковых изображений разными методами, показано, что разработанные алгоритмы дают возможность оценить пространственное распределение поверхностных загрязнений, и оценить контрасты СКН, которые определяются физико-химическими свойствами поверхностных пленок..

Если толщина нефтяной плёнки мала, относительно длины волны красного цвета, нефтяные сликки в поле СКН проявляются в виде областей отрицательных аномалий СКН. Также нами было обнаружено, что контрасты сликов нефтепродуктов несколько ниже контрастов сликов биологического происхождения, как говорится в работе Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b, 1956]. Этот результат можно объяснить различной упругостью нефти и рыбьего жира.

Было обнаружено, что в тех районах нефтяных загрязнений где толщина нефтяной плёнки значительно превышает длину волны красного света, полученные значения аномалий СКН противоречат ожидаемому эффекту подавления коротковолнового волнения в сликках. Сделан вывод что в этом случае доминируют оптические свойства нефти (её цвет), что не учитывалось в методе

Наблюдаемые контрасты СКН были проанализированы с помощью модель формирования радиолокационных изображений (RIM), предложенной в работе [Kudryavtsev et al., 2005; Кудрявцев и др., 2008]. Из оценок было получено, чтобы модельные контрасты соответствовали наблюдаемым, эффективный коэффициент упругости должен соответствовать  $E=15\text{mH/m}$ .

Синхронные ASAR PCA изображения предоставляют возможность дать оценку подобиям и различиям между оптическими и РЛ-изображениями одних и тех же нефтяных разливов. Оптические и РЛ-контрасты одного и того же слика очень хорошо коррелируют, за исключением области, покрытой толстой (относительно длины волны) нефтяной плёнкой. Изменения

УЭПР в нефтяном слике сильнее, нежели изменения СКН. Этот факт даже усиливается при малых скоростях ветра, когда РЛ-контрасты значительно сильнее, чем аномалии, полученные из оптических данных. Также симуляции РСА особенностей в модели RIM показали, что значение упругости  $E=15\text{мН/м}$  также обеспечивает хорошее соответствие модельных оценок и измерений.

Показано, что при совместном анализе СКН и РСА контрастов сликов, можно сделать качественное заключение о толщине пленки.

# Глава 3

## Исследование суб- и мезомасштабной динамики океана по оптическим и радиолокационным изображениям

В предыдущих главах была описана модель формирования изображения морской поверхности в области солнечного блика и применена к анализу оптических данных MODIS и MERIS. Если вариации СКН проявляются в блике, можно предположить, что трансформация спектра ветровых волн и, связанных с ним СКН, на течениях произвольной природы так же должно позволять наблюдать динамику океана на изображениях солнечного блика. В этой главе рассматриваются примеры исследования суб- и мезомасштабной динамики Океана по данным спутниковых оптических и радиолокационных сенсоров.

### 3.1 Внутренние волны

Подход тестируется на ВВ – как простейшем типе течений. В качестве примера рассматривается район западно-экваториальной Атлантики, напротив устья реки Амазонки, который является областью регулярного возникновения очень мощных внутренних волн (ВВ), формируемых полусуточными приливными волнами (см. например, [Ivanov et al., 1993]). Экспериментальные исследования ВВ и их влияния на обрушения ветровых волн, проведенные в этом районе, представлены в работе [Дулов и др., 1986]. В этих экспериментах было обнаружено, что интенсивность ВВ коррелировала с фазами Луны, т.е. генерация ВВ имела явно приливное происхождение. В периоды интенсификации ВВ, амплитуды ВВ достигали 100м, а при прохождении ВВ (в направлении на Северо-восток, противоположному ветру)

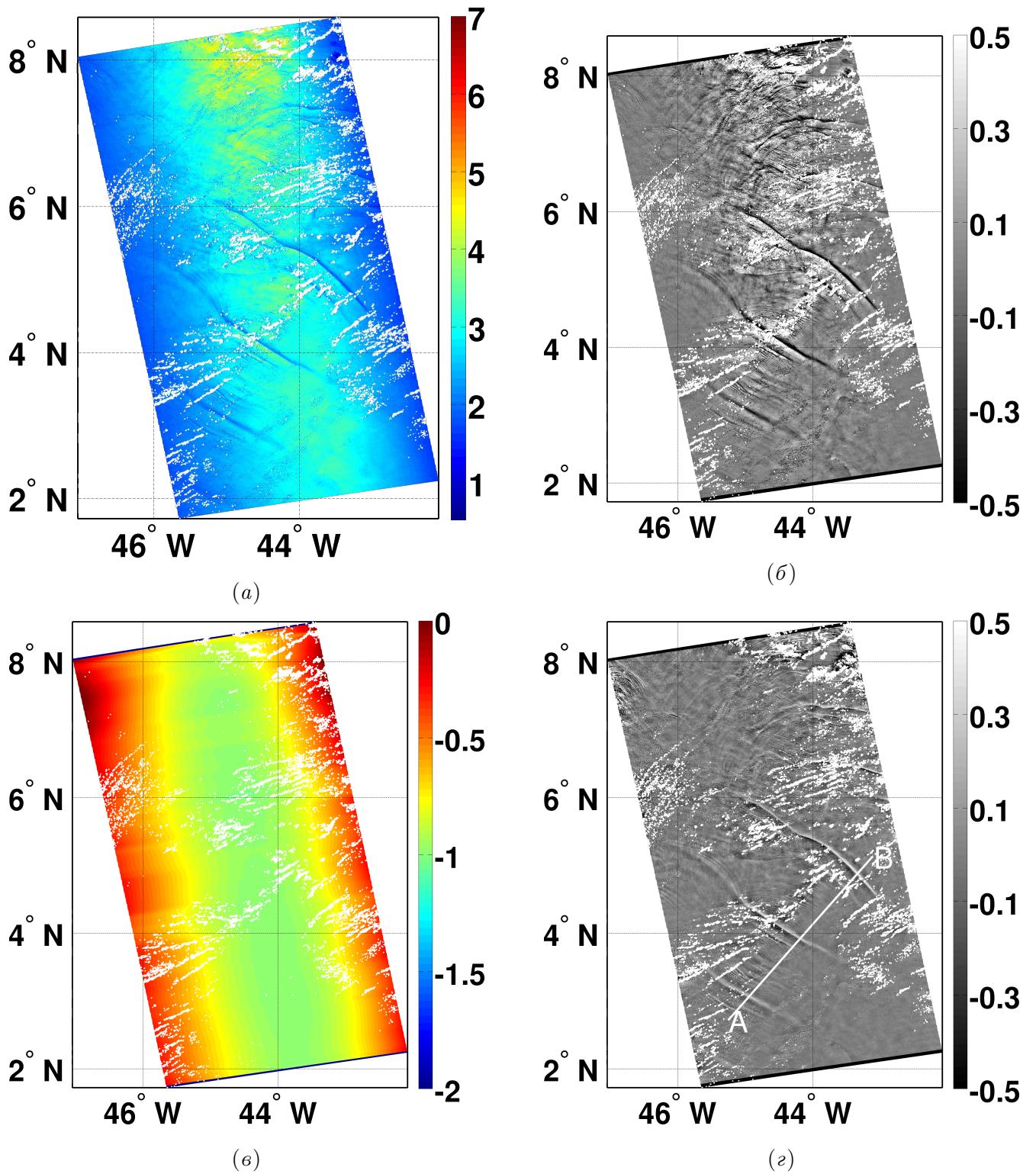
на поверхности возникали коррелированные со смещениями термоклина области сильной интенсификации обрушения ветровых волн. Усиление обрушения (в несколько раз по отношению к фоновым значениям) возникало при заглублении термоклина, и почти исчезало при поднятии термоклина, т.е. усиление/подавление обрушения ветровых волн происходило в зонах конвергенции/дивергенции течений индуцированных ВВ на морской поверхности.

Исходное изображение MODIS/Aqua этого района, полученное 26 апреля 2009, 16:20 показано на Рисунке 3.1, *a*.

Несмотря на то, что наблюдаемая область частично покрыта облаками, на снимке легко различимы солнечный блик и линейчатые вариации яркости внутри блика (поверхностные проявления ВВ). Также, на Рисунке 3.1 приводятся поля относительных вариаций яркости  $\tilde{B}/\bar{B}$  (Рисунок 3.1, *b*) и передаточная функция  $T$  (Рисунок 3.1, *e*). Очевидно, что поле относительных вариаций яркости уже содержит признаки ВВ в солнечном блике. Но, в отличие от примера с нефтяным разливом в Мексиканском заливе, в данном случае передаточная функция не имеет зоны инверсии контрастов. Поэтому, как следует из уравнения (1.7) знак  $\tilde{B}/\bar{B}$  противоположен знаку контрастов СКН.

На Рисунке 3.1, *e* приводятся контрасты СКН, отражающие поверхностные проявления ВВ. Поле ВВ имеет характер чередующихся цугов ВВ, распространяющихся в северо-восточном направлении. В начале каждого из цугов идет уединенная волна (солитон).

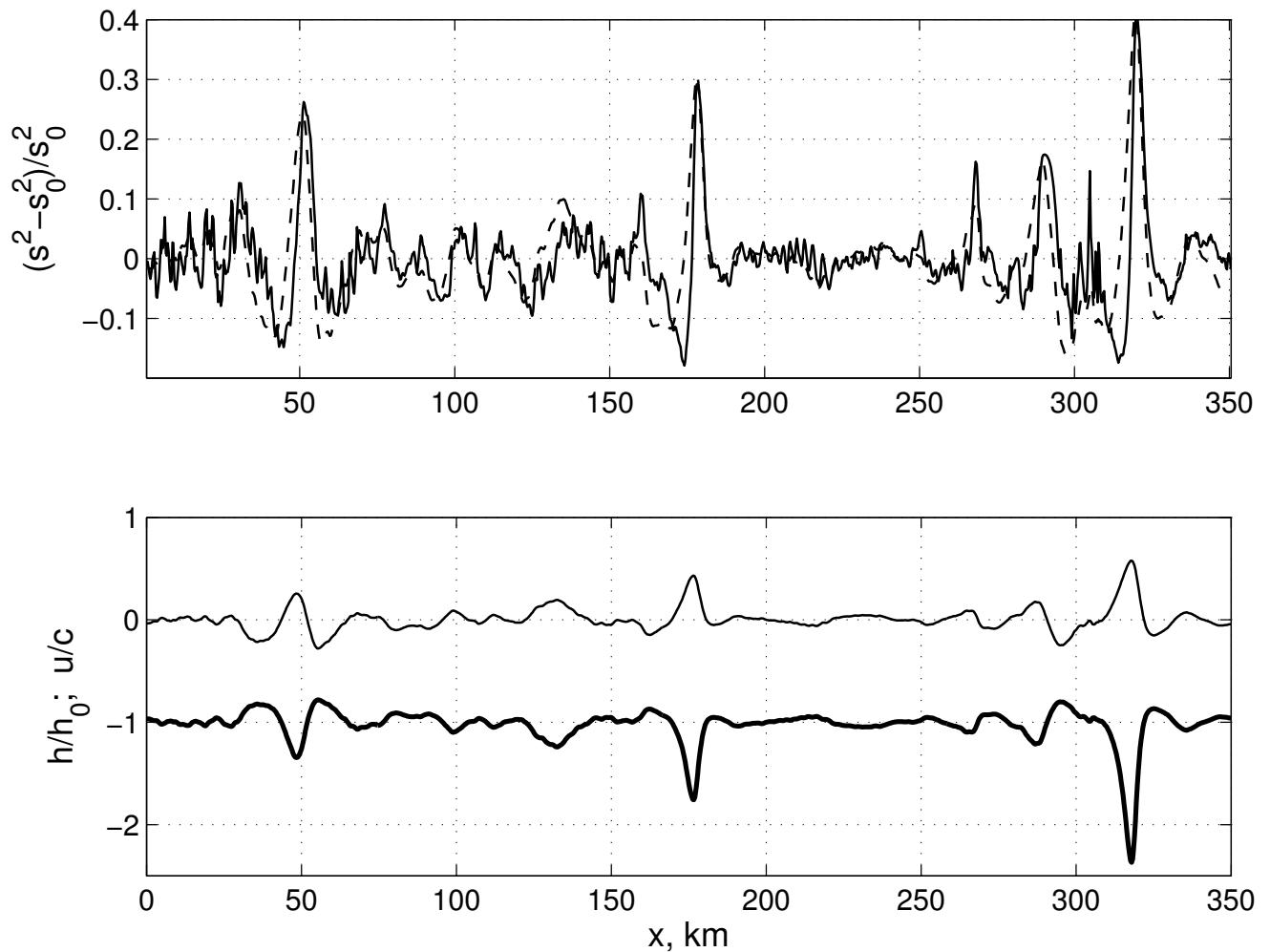
Расстояние между ведущими солитонами в цугах примерно равно 130-150 км. Следом за ведущими солитонами распространяются пакеты более коротких ВВ с длинами волн порядка 1 км. Поскольку предполагается, что источником генерации ВВ в данном районе являются полусуточные приливные волны, по расстоянию между цугами легко оценить фазовую скорость ВВ, которая составляет примерно 3,5 м/с.



(a) Фрагмент исходного изображения MODIS/Aqua (26 апреля 2009, 16:20) в красном канале (645 нм) района устья реки Амазонки с признаками BB. (б) Контрасты яркости  $\tilde{B}/\bar{B}$ . (в) Передаточная функция  $T$ , заданная уравнениями (1.7), (1.8) и (1.9). (г) Контрасты  $CKH \tilde{s}^2/s^2$ . Белые области на изображениях – маска облаков. Линия A-B обозначает положение сечения, показанного на Рисунке 3.2

Рисунок 3.1 – Фрагмент исходного изображения MODIS/Aqua, обработанный с применением подхода, предложенного в Главе 1

Профиль вариаций СКН вдоль сечения А-В (отмеченного на Рисунке 3.1, *в*) представлен на Рисунке 3.2, вверху. Распределение солитонов ВВ в вариациях СКН имеет “биполярную” форму, с положительными и отрицательными аномалиями СКН. Возвращаясь к форме солитона ВВ, можно заключить, что повышение/уменьшение СКН имеет место в зонах конвергенции/дивергенции поверхностных течений, вызванных ВВ. Поведение контрастов СКН очень схоже с пространственными вариациями обрушений ветровых волн вызванных ВВ, которые были проанализированы в работе [Дулов и др., 1986].



(вверху) Профиль контрастов СКН (сплошная линия) вдоль сечения А-В, показанного на Рисунке 3.1, *в*. Пунктирная линия отражает RIM моделирование. (внизу) Смещение термоклина ВВ-ой (жирная линия) и скорость течения на поверхности, вызванное ВВ (тонкая линия)

Рисунок 3.2 – Профиль контрастов СКН и RIM моделирование сечения, проходящего через ВВ на Рисунке 3.1, *в*

Для анализа наблюдаемых вариаций СКН нами были проведены модельные расчёты с использованием модели формирования радиолокационных изображений (RIM), предложенной в работе [Kudryavtsev et al., 2005]. (см. Приложение A с описанием модели) В качестве первого предположения можно положить, что наблюдаемое увеличение/уменьшение СКН морской поверхности однозначно связано с конвергенцией/дивергенцией поверхностных течений, вызванных ВВ, т.е.  $K_s \equiv \tilde{s}^2/s_0^2 \propto \partial u/\partial x$ . Коэффициент пропорциональности в этом уравнении есть функция скорости ветра и параметров ВВ. Для заданных условий, его можно задать подгоночной константой  $c_u$ , которая определяется сравнением наблюдаемым и модельным СКН. Тогда, поверхностная скорость определяется как

$$u(x) = c_u \int_0^x (K_s - \langle K_s \rangle) dx, \quad (3.1)$$

где  $\langle K_s \rangle$  - “низкочастотные” колебания СКН (вызванные, например, вариациями скорости ветра), которые не видны на представленных данных, но, приводящие к “искусственному” вкладу в  $u(x)$ , благодаря кумулятивному интегрированию. Эти “низкочастотные” осцилляции были вычтены из исходных данных СКН.

Далее, поверхностная скорость течений, определенная соотношением (3.1), задавалась в качестве входного параметра для модельных расчетов поверхностных проявлений ВВ по модели RIM. В этих расчетах средняя скорость ветра принята равной  $7\text{ м/с}$ , направление ветра – противоположным направлению распространения ВВ, а фазовая скорость ВВ задана как  $c=3.5\text{ м/с}$ . Значение постоянной  $c_u$  выбиралась таким образом, чтобы значения вариаций СКН в пиках (над солитонами ВВ) соответствовало бы наблюдаемым значениям. Модельные контрасты СКН показаны на Рисунке 3.2, верхний график. Как следует из этого рисунка (Рисунок 3.2), профиль модельных контрастов согласуется с наблюдаемым полем вариаций СКН. Это факт позволяет заключить, что наблюдаемые модуляции СКН, в действительности, определяются конвергенцией и дивергенцией течений, индуцируемой ВВ на поверхности, образованных ВВ.

Поле поверхностной скорости  $u(x)$ , индуцируемое ВВ, а так же как соответствующая глубина залегания термоклина  $h(x)$  (рассчитанная с использованием формулы  $u/c = (h - h_0)/h$ , где  $h_0$  - невозмущённая глубина) приведены на Рисунке 3.2, нижний график. Полагая  $h_0=100\text{ м}$ , амплитуды смещения термоклина  $h - h_0$  для двух ведущих солитонов составляют  $120\text{ м}$  и  $80\text{ м}$ , что согласуется с данными измерений (Dulov et al., 1986) в этом районе.

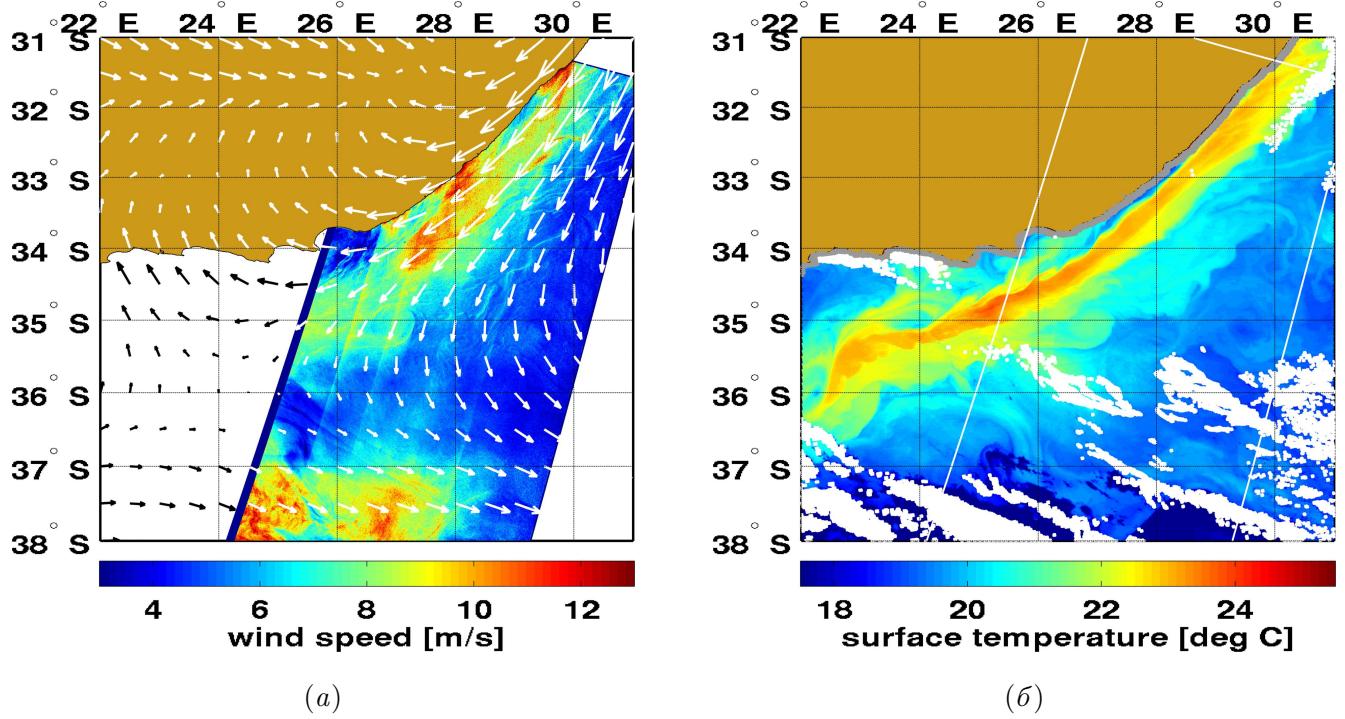
## 3.2 Мезомасштабные течения

### 3.2.1 Наблюдения

Данное исследование основано на синергетике изображений MODIS и ASAR района течения мыса Игольный (Рисунок 3.3). Этот район характеризуется интенсивным течением, которое обеспечивает разнообразие мезомасштабной динамики (вихри, грибовидные структуры, температурные фронты, внутренние волны, зыбь и многие другие явления проявления океанической динамики). Основные продукты данных MODIS – параметры цвета океана и температура морской поверхности. Данные ASAR могут быть эффективно использованы при изучении полей ветра, нефтяных разливов и направления течений.

Данные ASAR и MODIS/Aqua в районе исследования были получены 18 ноября 2007 г. В 7 ч. 24 мин. и 12 ч. 05 мин., соответственно. На Рисунке 3.3 приводятся два основных продукта ASAR и MODIS – поле ветра, полученное по изображению ASAR WS, с использованием алгоритма CMOD4, и поле ТПО, полученное по данным MODIS [Brown and Minnett, 1999].

Поле ТПО раскрывает разнообразие мезо- и крупномасштабных особенностей на поверхности основного течения мыса Игольный. Подобные особенности можно наблюдать и в поле концентрации хлорофилла, полученного по данным MODIS (не приводится здесь). Наличие сильного приводного ветра проявляет сильную атмосферную изменчивость, в данном районе скорость ветра варьируется от 4 м/с до 13 м/с. С другой стороны на данных поля ветра ASAR легко различимы квазилинейные структуры (между 34 и 36 градусом южной широты и 26 и 30 градусом восточной долготы), которые можно трактовать как особенности проявления океанического течения. Далее приводится более глубокий анализ этих данных.



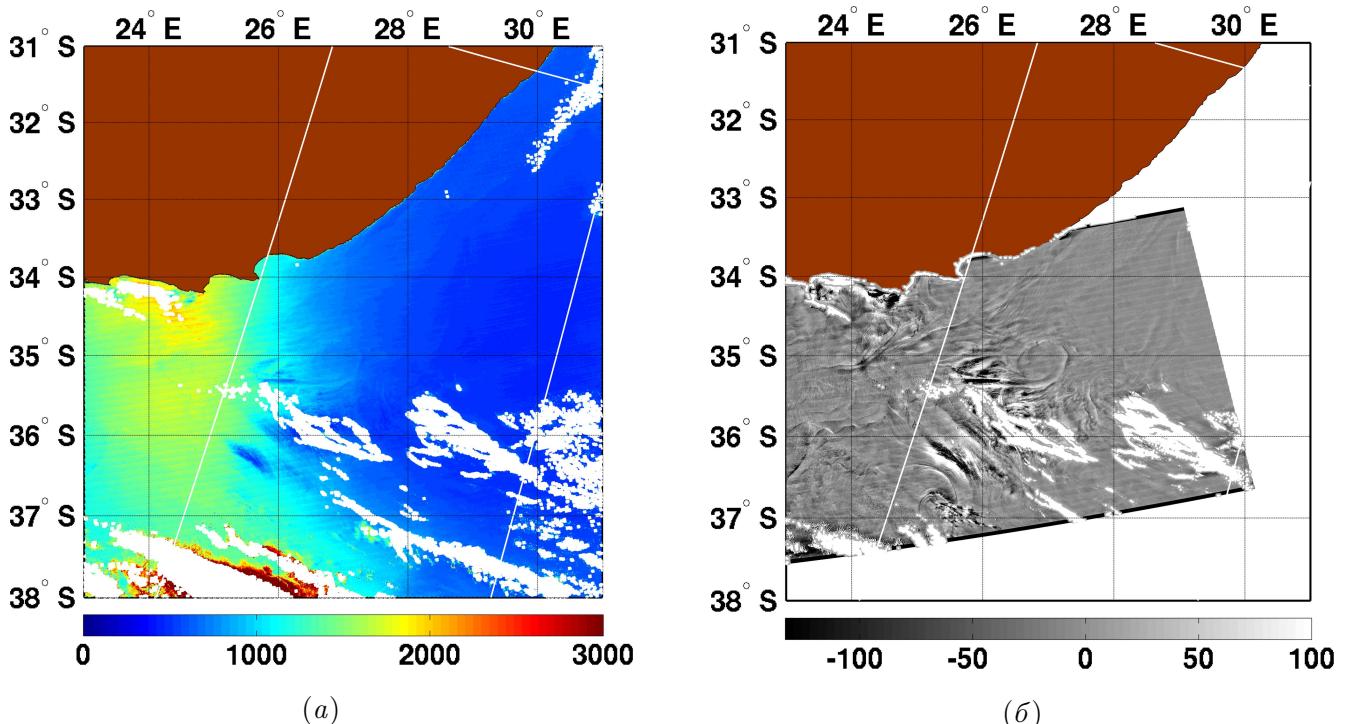
(a) Поле ветра, полученное по изображению ASAR WS, с использованием алгоритма CMOD4. Направление ветра взято из модели NCEP. (б) поле поверхностной температуры океана, полученное по данным MODIS. Белые области - маска облаков. Юг Африканского континента выделен коричневым цветом

Рисунок 3.3 – Поле ветра и поле поверхностной температуры океана

На исходном изображении MODIS/Aqua района мыса Игольный, красный канал разрешением 250м, приведённое на Рисунке 3.4, *a*, легко различимы облака и солнечный блик. К интересным особенностям этого изображения стоит отнести полосчатую структуру изображения в области солнечного блика, присущую изображениям MODIS. Об особенностях формирования изображений MODIS, приводящих к подобной структуре изображения, рассказано в разделе 1.4, а также в статьях [Myasoedov et al., 2010; Myasoedov and Kudryavtsev, 2010]. Также стоит обратить внимание на правый край солнечного блика, где выделяется структура, похожая на океанический вихрь.

Используя алгоритм, впервые предложенный авторами в [Kudryavtsev et al., 2010; Myasoedov et al., 2010], а также описанный в [Myasoedov and Kudryavtsev, 2010], исходное изображение раскладывается на составляющие: усреднённые яркости  $\bar{B}$  (масштаб осреднения  $30 \times 30 \text{ км}^2$ ) и их вариации  $\tilde{B}$ . Последние приведены на Рисунке 3.4, *b*. Здесь и далее мы опускаем детали восстановления СКН, напомним лишь, что данные MODIS и MERIS обра-

батывались в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 1.3 (см. также раздел 3.2 [Myasoedov and Kudryavtsev, 2010]).



(a) Исходное изображение MODIS/Aqua района мыса Игольный, красный канал разрешением 250м, полученное 18 Ноября 2007г., 12ч. 05мин. и вариации яркости (б). Обратите внимание на полосчатую структуру изображения MODIS, присущую снимкам областей солнечного блика, и особенно заметную на исходном изображении. Белые области – маска облаков

Рисунок 3.4 – Исходное изображение MODIS/Aqua района мыса Игольный и восстановленные контрасты СКН

На Рисунке 3.5, а изображены контрасты СКН, полученные из вариаций яркости, приведённых на Рисунке 3.4, б). Контрасты СКН “статистически однородны” на всём районе наблюдения, за исключением локальных областей, покрытых облаками, где отраженная яркость в солнечном блике “загрязнена” тенями от облаков и большими значениями яркости отражённой радиации непосредственно от самих облаков.

Таким образом, в подобных районах, предложенный алгоритм не годен и к восстановленным контрастам СКН стоит относиться с осторожностью. В остальном, метод подчёркивает проявления линейные особенности фронтов, меандров и вихрей. Типичные значения магнитуды контрастов СКН около 20-30% и масштабами проявления структур от 1 до 10км.

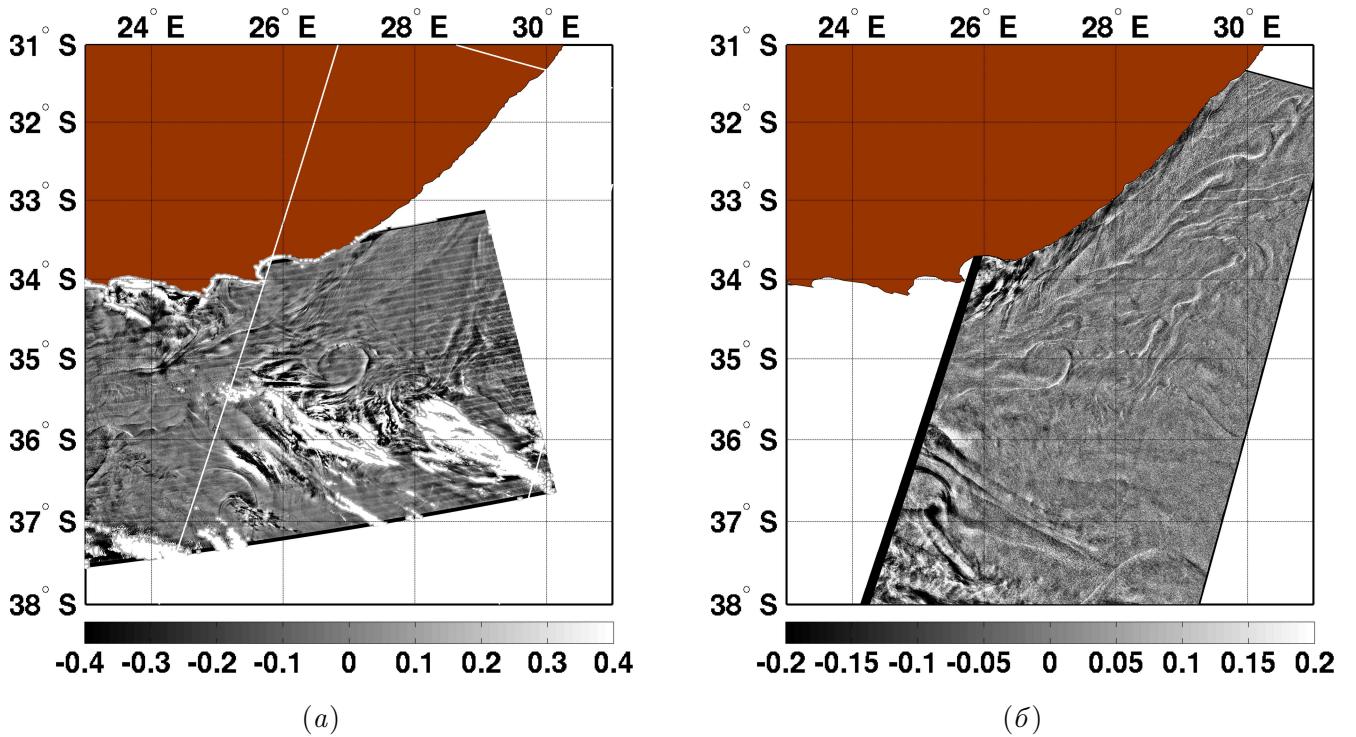


Рисунок 3.5 – (а) Поле контрастов СКН полученное из поля вариаций яркости, представленных на Рисунке 3.4, *б* и поле контрастов УЭПР РСА (б)

Поле контрастов УЭПР РСА (Рисунок 3.5, *б*),  $K_{\sigma_0} = (\sigma_0 - \bar{\sigma}_0)/\bar{\sigma}_0$ , представлено как отношение разности исходного и осреднённого к среднему полю вариаций УЭПР. Осреднение производилось скользящим средним с пространственным разрешением скользящего окна  $30 \times 30 \text{ км}^2$ . При первом же визуальном сравнении поля контрастов СКН и поля контрастов УЭПР РСА наблюдается высокий уровень соответствия между двумя изображениями. Йоханнессен и др. в своей работе обосновали, что особенности на изображения РСА отражают поле дивергенции поверхностного течения. Таким образом, подобие полей контрастов СКН и УЭПР РСА, позволяет утверждать, что поле контрастов СКН также отслеживает поле дивергенции поверхностного течения.

### 3.2.2 Процедура реконструкции квазигеострофической и агеострофической циркуляции по ТПО

Адвективная составляющая Экмановского переноса и диабатическое перемешивание в Экмановском слое являются одними из основных механизмов генерации вторичной агеострофической циркуляции (ВАЦ), в непосредственной близости от океанических фронтов [Klein and Hua, 1990; Garrett and Loder, 1981; Thompson, 2000; Nagai et al., 2006]. Не так давно обсуждался и другой механизм [McWilliams et al., 2009], выполненный по аналогии с

само индуцированным фронтогенезом, для ускорения и обострения температурных фронтов, связанных с исходной ВАЦ. Детальное рассмотрение всех возможных механизмов, безусловно, выходит за рамки настоящего исследования. Тем не менее, чтобы проинтерпретировать совпадающие особенности температурных фронтов и аномалии шероховатости морской поверхности, мы ограничим наш анализ модельным приближением, основываясь на формировании ВАЦ только за счёт первого механизма. Таким образом, мы предполагаем, что полное поле океанического течения можно представить в виде суммы квазигеострофического течения (КГТ)  $U$ , ветрового течения  $u^e$  (которое также может включать инерционное течение), и ВАЦ  $u^a$ , в результате взаимодействия Экмановского течения с КГТ и диабатического перемешивания в слое Экмана. Тогда уравнение для полного поля течения выражается как  $u = U + u^e + u^a$ .

В первом приближении числа Россби, основные уравнения, описывающие динамику течения ВАЦ (подробнее см. [Klein and Hua, 1990; Garrett and Loder, 1981; Thompson, 2000; Nagai et al., 2006]) представляются в виде:

$$\begin{aligned} u_\beta^e \partial U_1 / \partial x_\beta - f u_2^a &= \nu_t \partial^2 U_1 / \partial x_3^2 \\ u_\beta^e \partial U_2 / \partial x_\beta + f u_1^a &= \nu_t \partial^2 U_2 / \partial x_3^2 \end{aligned}, \quad (3.2)$$

где  $\nu_t$  - турбулентная вязкость, предполагается постоянной с глубиной (в верхнем перемешенном слое Экмана),  $f$  параметр Кориолиса, и  $\beta = 1, 2$ . В уравнении (3.2), пространственный масштаб изменчивости ветрового поля намного превышает поперечны масштаб фронта. С учётом уравнения сохранения “термического ветра”:  $\partial U_1 / \partial x_3 = (g/f) \partial \rho / \partial x_2$ ,  $\partial U_2 / \partial x_3 = -(g/f) \partial \rho / \partial x_1$ , и уравнения состояния океана  $\rho = \rho_0(1 - \alpha T)$ , решение уравнения (3.2) в терминах ВАЦ даёт

$$\begin{aligned} u_1^a &= -f^{-1} u_\beta^e \frac{\partial U_2}{\partial x_\beta} + (\nu_t g \alpha / f^2) \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) \\ u_2^a &= f^{-1} u_\beta^e \frac{\partial U_1}{\partial x_\beta} + (\nu_t g \alpha / f^2) \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) \end{aligned}, \quad (3.3)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, а  $\alpha$  - коэффициент термического расширения. Первый член в уравнении (3.3) описывает генерацию ВАЦ в результате адвективного взаимодействия Экмановского течения с КГТ (механизм предложен [Klein and Hua, 1990]), в то время как второй член учитывает фрикционный эффект в Экмановском слое (механизм описан [Garrett and Loder, 1981]). Оба этих механизма приводят к возникновению дивергенции в окрестности термического фронта, что напрямую следует из уравнения. (3.3):

$$\nabla \cdot u = -f^{-1} u_\beta^e \frac{\partial}{\partial x_\beta} \Omega + (\nu_t g \alpha / f^2) \frac{\partial}{\partial x_3} \Delta T, \quad (3.4)$$

где  $\Omega_z = \partial U_2 / \partial x_1 - \partial U_1 / \partial x_2 \equiv \Delta\psi$  - завихренность КГТ,  $\psi$  - функция тока и  $\Delta T$  - Лапласиан поля поверхностной температуры. Соотношение л.ч. уравнения (3.4) с первым членом его п.ч. представляет решение, полученное в [Klein and Hua, 1990] для Экмановского адвективного механизма, а уравнение со вторым членом п.ч. уравнения (3.4) – решение [Garrett and Loder, 1981]. для диабатического механизма перемешивания при генерации ВАЦ. Таким образом, уравнение (3.4), можно рассматривать как обобщённое решение, объединяющее оба механизма генерации ВАЦ в результате взаимодействия КГТ со слоем Экмана.

Для простоты, далее предполагается, что ветровое течение представляется в виде суммы классической скорости течения Экмана  $u^e = [\tau_2/(fh), -\tau_1/(fh)]$  и скорости инерционного течения  $u^i(t)$ :

$$u^e = [\tau_2/(fh), -\tau_1/(fh)] + u^i(t), \quad (3.5)$$

где  $\tau = v_*^2 [\cos \phi_w, \sin \phi_w]$ ,  $v_*$  - фрикционная скорость в воде,  $\phi_w$  - направление вектора скорости ветра,  $h = (\nu_t/f)^{1/2}$  - глубина слоя Экмана, а инерционная скорость  $u^i(t)$  может быть описана, используя временную изменчивость скорости ветра. Выражение для турбулентной вязкости  $\nu_t$  следует из сходства морского и атмосферного пограничного (планетарного) слоя Экмана. Для устойчиво стратифицированного пограничного слоя турбулентная вязкость  $\nu_t = \gamma \kappa v_* L$ , где  $\gamma \approx 0.2$  - постоянная,  $\kappa \approx 0.4$  - постоянная Кармана, а  $L$  - масштаб длины Обухова (см., например, [Brown, 1982]). Выражая  $L$  через частоту Брента-Вяйсяля для верхнего слоя океана как  $L = v_*^3 / (\kappa \nu_t N^2)$ , получаем турбулентную вязкость:

$$\nu_t = \gamma^{1/2} v_*^2 / N, \quad (3.6)$$

тогда глубина слоя Экмана:

$$h = \gamma^{1/4} v_* / \sqrt{f N}. \quad (3.7)$$

Оценка  $h$  для скорости ветра 10 м/с и  $f = 10^{-4}$ :  $h \approx 28$  м, если соотношение Прандтля  $N/f = 10$ , и  $h \approx 90$  м, если  $N/f = 1$ .

Чтобы дать определение дивергенции поверхностного течения (вызванную ВАЦ, в соответствии с уравнением (3.4)), необходимо ввести поле КГТ. На мезомасштабах (10-500 км) и субмезомасштабах (1-10 км), динамика океана такова, что, зачастую, в равновесно стратифицированном, быстро врачающемся потоке горизонтальные скорости, в среднем, значительно больше вертикальных. Таким образом, такое движение можно рассматривать как квази-двумерное, и его изучение проводить в рамках некоторых приближений. Основываясь

на поверхностной квазигеострофической (ПКГ, от англ. SQG) динамике [Held et al., 1995; Lapeyre and Klein, 2006], Изерн-Фонтанет с коллегами [Isern-Fontanet et al., 2008] предложили практический подход для восстановления поля скорости течения на масштабах от 30 до 300 километров по изображению ТПО. Рассматривая ПКГ, функция тока КГТ  $\widehat{\psi}(k, z)$  поле ТПО  $\widehat{T}_s(k)$  в пространстве Фурье связаны следующим соотношением:

$$\widehat{\psi}(k, z) = \frac{g\alpha\widehat{T}_s(k)}{fn_b k} \exp(n_0 kz), \quad (3.8)$$

где  $n = N/f$  отношение Прандтля для частот Брента-Вяйсяля  $N_0$  и  $N_b$ , определяющих, соответственно, мезо- и субмезомасштабные свойства потока. Определяя скорость КГТ через функцию тока  $\widehat{\psi}$ , как  $\widehat{U} = (-ik_y\widehat{\psi}, ik_x\widehat{\psi})$  (или в физическом пространстве  $U = (-\partial\psi/\partial x_2, \partial\psi/\partial x_1)$ ), тогда, используя уравнение (3.3), возможно определить поле ВАЦ.

В пространстве Фурье, компоненты ВАЦ, определённые уравнениями (3.3) и (3.8), и, дополненные оценками глубины слоя Экмана, по уравнению (3.7) и коэффициентом турбулентной вязкости из уравнения (3.6), выражаются через ТПО как:

$$\left(\widehat{u}_1^a, \widehat{u}_2^a\right) = \frac{\alpha}{\gamma^{1/4} n_b^{1/2}} \cdot \frac{gv_*}{f^2} \left[ s \cdot \sin(\phi_w - \phi) + i\gamma^{3/4} n_b^{1/2} \frac{v_* K}{|f|} \right] (K_1, K_2) \widehat{T}_s, \quad (3.9)$$

где  $s = \text{sign}(f)$ ,  $i$  - мнимая единица,  $\phi$  - направление вектора волнового числа  $K$ , и  $\gamma = 0.2$ , как и в предыдущих уравнениях. Второй член в квадратных скобках отражает значимость отношения механизма перемешивания к адвективному члену. Если предположить, что  $n_b = 10$  и  $f = 10^{-4}$  сек-1, тогда это отношение будет приблизительно равно 0.1 для скорости ветра 10 м/с и  $K = 2\pi/10^4$  рад/м. Для сравнения, это отношение приближается к единице для меньших масштабов, например,  $K = 2\pi/10^3$  рад/м. Эффективность механизма перемешивания возрастает как при уменьшении масштабов КГТ, так и при увеличении скорости ветра. Таким образом, при малых и умеренных скоростях ветра и масштабах течения порядка  $K \propto 10^{-3}$  рад/м и меньших, механизма Экмановского переноса (который в общем случае также включает инерционные течения) доминирует над генерацией ВАЦ. Из уравнения (3.9), получаем выражение для дивергенции поверхностного течения в пространстве Фурье  $\widehat{\nabla} \cdot u = iK_\beta \widehat{u}_\beta^a$ :

$$\widehat{\nabla} \cdot u = \frac{i\alpha}{\gamma^{1/4} n_b^{1/2}} \cdot \frac{gv_*}{f^2} \left[ s \cdot \sin(\phi_w - \phi) + i\gamma^{3/4} n_b^{1/2} \frac{v_* K}{|f|} \right] K^2 \widehat{T}_s. \quad (3.10)$$

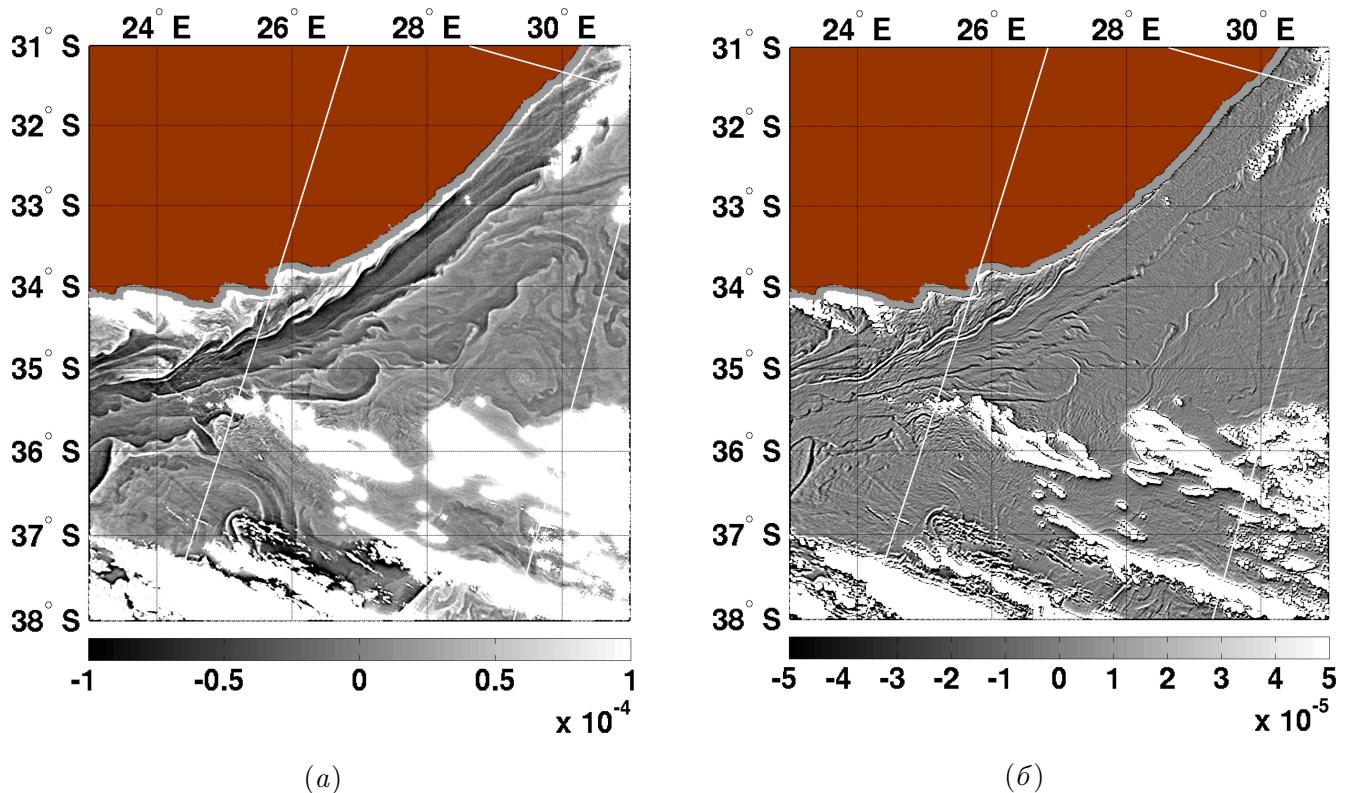
В результате перед нами уравнение, напрямую связывающее дивергенцию поверхностного течения с полем ТПО.

### 3.2.3 Особенности мезомасштабных течений, восстановленные по ТПО, и их связь с аномалиями РСА сигнала и СКН

Продолжим анализ данных, представленных в разделе 3.2.1. Сравнивая шероховатость СКН и особенности в УЭПР (показанные на Рисунке 3.5) с паттернами в поле ТПО (представлены на Рисунке 3.3), поражает удивительное качественное соответствие этих полей. Основные изменения шероховатости поверхности совпадают с локальными фронтами ТПО. В принципе, эти наблюдения не должны удивлять, поскольку известно, что океанические фронтальные зоны характеризуются интенсивными перекрестными фронтальными и вертикальными движениями (апвеллинг/даунвеллинг). В этом контексте, может быть использована модель восстановления поля поверхностных течений по изображению поля ТПО, в качестве дополнительного экспериментального свидетельства связи между аномалией шероховатости морской поверхности и полем дивергенции течения.

Поле ТПО, полученное по данным прибора MODIS (см. Рисунок 3.3, *b*) и поле, восстановленного по данным РСА, ветра (см. Рисунок 3.3, *a*) используются далее в качестве входных параметров для нахождения поля скорости поверхностного течения. Чтобы избавиться от крупномасштабной изменчивости ТПО, были отфильтрованы спектральные компоненты с  $K < 2\pi/100\text{rad/km}$ . Спектральное преобразование функции тока КГТ определено из уравнения (3.8), предполагая  $n_b = n_0 = 50$ . Стандартное отклонение полученных скоростей КГТ составляет около  $1\text{m/s}$ . Использование этих констант также помогает сравнивать полученные по РСА поверхностные скорости [Chapron et al., 2005; Johannessen et al., 2008] с измерениями Доплеровских сдвигов по дальности (не показано здесь). Фоновое Экмановское течение, уравнение (3.5), и ВАЦ, уравнение (3.3), рассчитаны для “среднего наблюдаемого” ветра, южного по направлению, и дующего со скоростью  $7\text{m/s}$ .

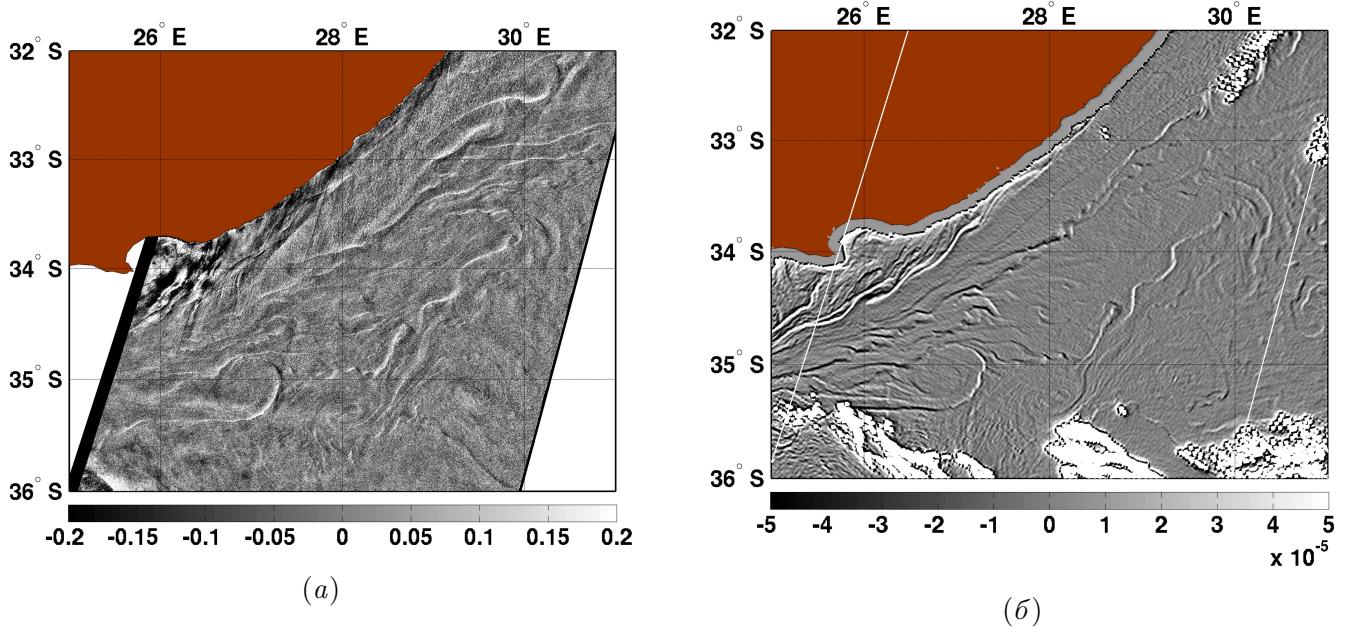
Завихренность поля КГТ и дивергенция поверхностного течения, восстановленные по наблюдаемому полу ТПО, показаны на Рисунке 3.6. Поле завихренности КГТ демонстрирует разнообразие мезомасштабных паттернов и наличие “основной струи”, представляющей течение мыса Игольный. При сравнении с дивергенцией поверхностного течения, можно обнаружить, что паттерны конвергенции/дивергенции повторяют градиенты поля завихренности КГТ, которое, в свою очередь, схоже с полем Лапласиана ТПО.



(а) Завихренность поверхности квазигеострофического течения (КГТ), полученное по полю ТПО, показанному на Рисунке 3.3, б, используя уравнение. (б) Поле поверхности дивергенции,  $\nabla \cdot u$ , относящееся ко вторичной агеострофической циркуляции, образующейся в результате взаимодействия Экмановской накачки (адвектический и механизм перемешивания) с КГТ (см. уравнения (3.4) и (3.10)). Стоит отметить, что поле дивергенции инвертировано (показано поле  $-\nabla \cdot u$ ). Таким образом, яркие объекты на изображении соответствуют зонам конвергенции, а тёмные – зонам дивергенции

Рисунок 3.6 – Завихренность поля КГТ и дивергенция поверхного течения, восстановленные по наблюдаемому полю ТПО

Присмотревшись к фрагменту PCA изображения на Рисунке 3.7, а (соответствующее области севернее 36° Ю.Ш. на Рисунке 3.5), где, предположительно, поле ветра однородно, изображенные PCA контрасты можно трактовать как поверхностные проявления мезомасштабной динамики океана. Соответствующее поле дивергенции поверхного течения представлено на Рисунке 3.7, б.



(a) Фрагмент поля УЭПР РСА, показанный ранее на Рисунке 3.5, и (б)

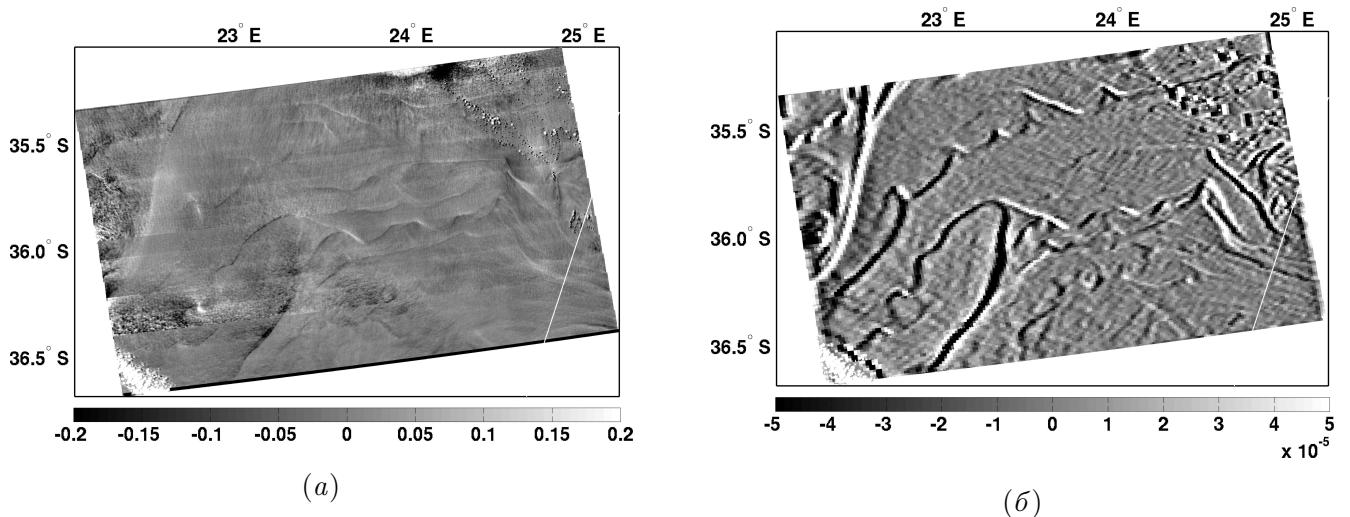
соответствующий фрагмент поля дивергенции поверхностного течения, показанного на Рисунке 3.6. Яркие области на рисунке (б) соответствуют конвергенции течения, а тёмные – дивергенции (дальнейше см. подпись к Рисунку 3.6)

Рисунок 3.7 – Фрагменты поля УЭПР РСА и дивергенции поверхностного течения

Визуальный осмотр изображений на Рисунке 3.7 показывает, что поля контрастов УЭПР и дивергенции имеют очень похожие текстуры. При этом не стоит забывать о 5-и часовой разнице при получении изображениями ASAR и MODIS. В общем и целом, яркие контрасты УЭПР соответствуют зонам конвергенции течения, в то время как тёмные контрасты представляют области дивергенции. Более того, это наблюдение можно рассматривать как экспериментальное подтверждение модельных открытий, представленных в работах [Kudryavtsev et al., 2005; Johannessen et al., 2005], и, упрощенных в уравнениях (1.5), (1.7), (1.8) и (1.9). Также, если существует связь между аномалиями УЭПР и дивергенцией течения, то явное хорошее соответствие между отклонениями РСА контрастов и полем дивергенции поверхностного течения означает, что наш подход для восстановления КГТ и ВАЦ работает должным образом и дает правдоподобные оценки поля поверхностного течения.

Аналогичный вывод может быть сделан для фрагмента поля контрастов СКН, изображенного на Рисунке 3.8, а (увеличенный фрагмент поля СКН на Рисунке 3.5). Поле дивергенции на Рисунке 3.8, б получено для локального северного ветра. Напомним, что направление ветра для этого рисунка противоположно выбранному для расчётов поля дивергенции, показанного на Рисунке 3.6, б. Исходя из уравнения (3.10), следует, что направление ветра влияет

на знак  $\nabla \cdot u$ , что объясняет различие между Рисунком 6 б и, соответствующим фрагментом, изображенным на Рисунке 3.6, б.



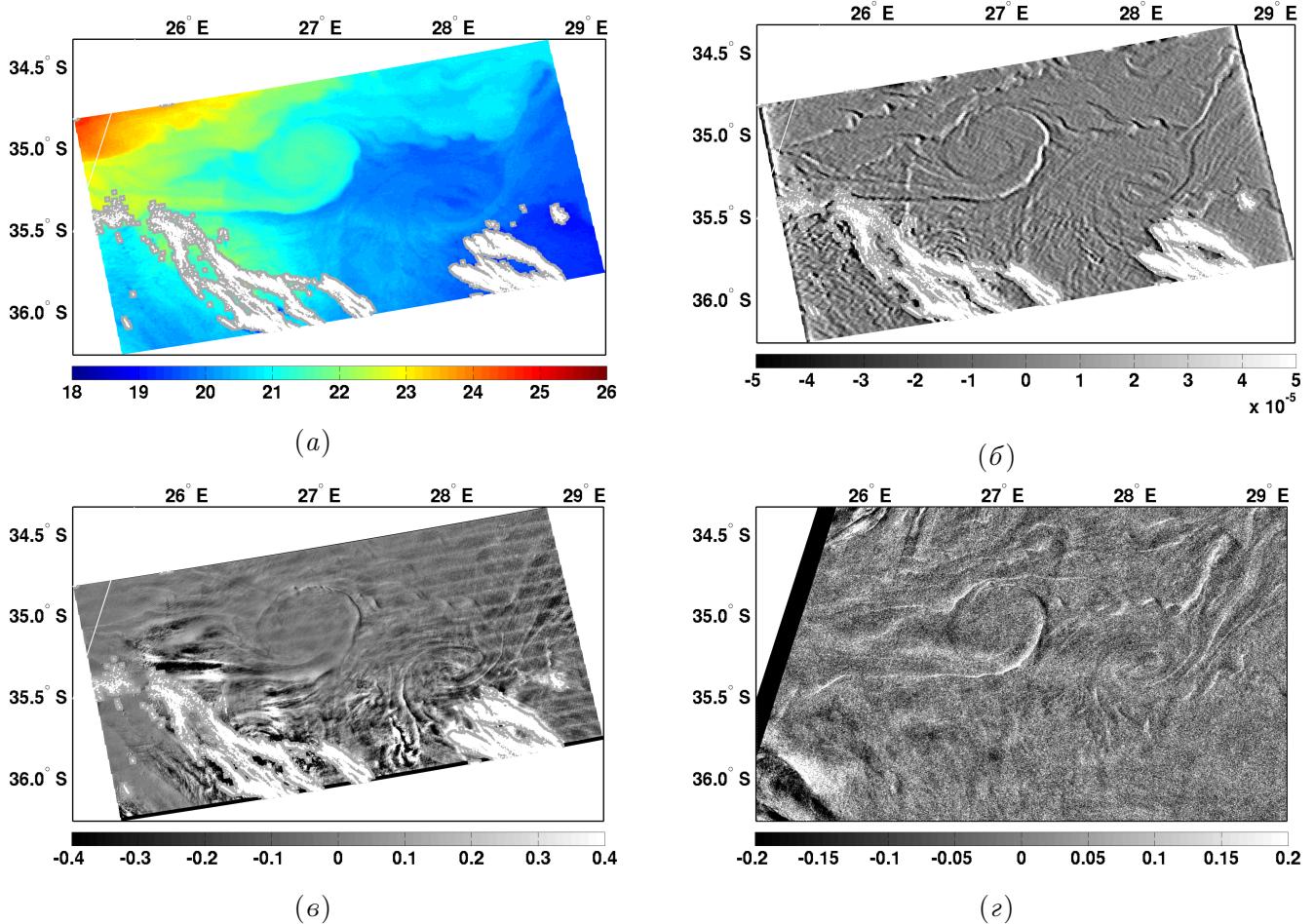
(а) Фрагмент поля контрастов СКН, показанный ранее на Рисунке 3.5 (конту́р фрагмента выделен жёлтым цветом). (б) Поле дивергенции поверхности течения.

Наблюдаемое различие между полями дивергенции поверхности течения на Рисунке 3.8, б и соответствующей областью на Рисунке 3.6, б, объясняется тем, что  $\nabla \cdot u$ , показанная на данном рисунке, рассчитывалась для локального Северного ветра, в то время как  $\nabla \cdot u$ , показанная на Рисунке 3.6, б в этом же районе, была рассчитана для Южного ветра (подробнее в тексте). Яркие области на рисунке (б) соответствуют конвергенции течения, а тёмные – дивергенции (дальнее см. подпись к Рисунку 3.6)

Рисунок 3.8 – Фрагменты поля контрастов СКН и дивергенции поверхности течения

На Рисунке 3.9, в поле ТПО (Рисунок 3.9, а), а также в поле дивергенции поверхности течения (Рисунок 3.9, б), отчётливо видна пара вихрей, образующих грибовидную структуру. Вместе с соответствующими полями СКН (Рисунок 3.9, в) и контрастами УЭПР PCA (Рисунок 3.9, г), изображающими ту же пару вихрей, рисунки отражают поражающие возможности синергетического метода. Текстурное соответствие поверхностных проявлений в наблюдаемых полях ТПО, УЭПР, СКН и конвергенции, в частности для антициклонического вихря, лишь усиливает численный анализ динамики верхнего слоя океана.

???



Поле ТПО MODIS (а), а также в поле дивергенции поверхностного течения (б), отчётливо видна пара вихрей диаметром 120 км, образующих грибовидную структуру. Соответствующие поля СКН (в) и контрасты УЭПР PCA в линейных единицах (г), изображают ту же пару вихрей. Рисунки отражают поражающие возможности синергетического метода. Яркие области на рисунке (б) соответствуют конвергенции течения, а тёмные – дивергенции (дальнее см. подпись к Рисунку 3.6, б)

Рисунок 3.9 – Фрагменты поля контрастов СКН и дивергенции поверхностного течения

### 3.3 Интерпретация данных наблюдений на основе модельных представлений

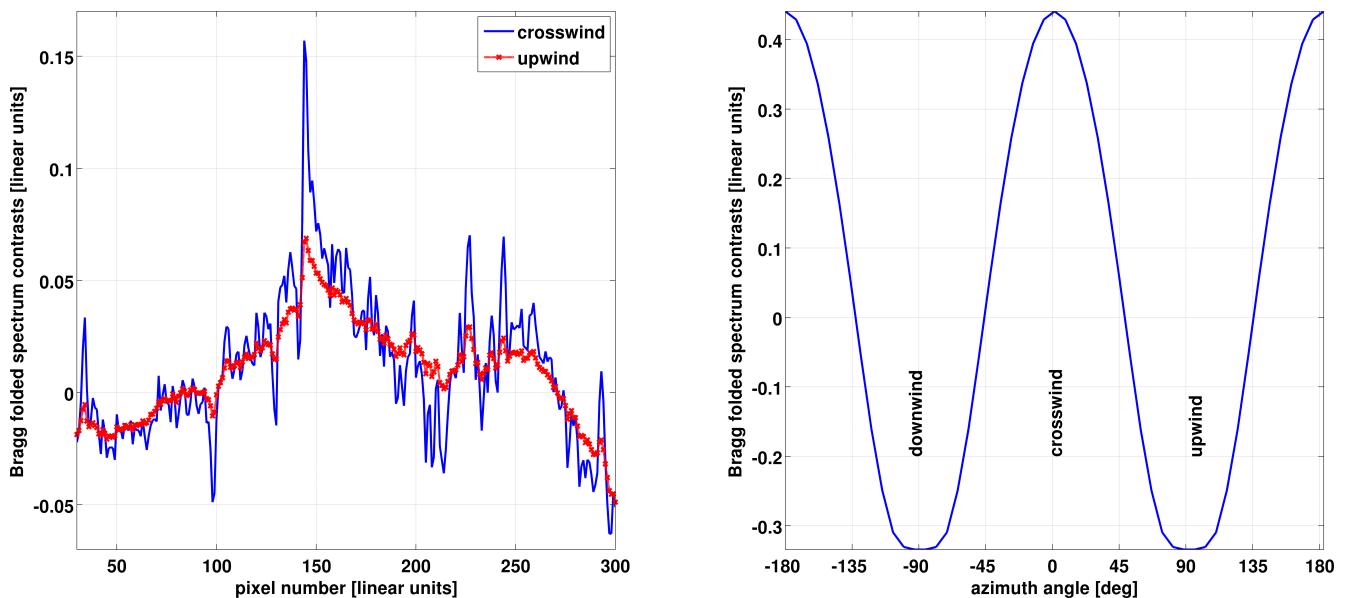
Поле поверхности течения (состоящее из суммы КГТ, Экмановского дрифта и ВАЦ), полученное по данным ТПО MODIS и полям ветра ENVISAT ASAR, используется в качестве входных параметров модели формирования РЛ-изображения RIM (от англ. Radar Imaging Model), для симулирования РСА УЭПР и СКН сигнатур, как изложено в [Kudryavtsev et al.,

2005; Johannessen et al., 2005]. RIM моделирует проявления особенностей поверхностного течения, температурных фронтов и сливков в терминах модуляции ветро-волнового спектра, СКН, обрушения ветровых волн и УЭПР.

Поле скорости поверхностного (именно КГТ по полю температуры) течения восстановленного по ..... приведено на рис.....

Функция тока

Завихренность и Дивергенция



(слева) Сечение через контрасты спектра брэгговских волновых чисел, нормированных на фоновый спектр, рассчитанные по модели RIM для бокового ветра (сплошная синяя линия) и направления визирования против ветра (красная линия с крестиками). (справа)

Контрасты спектра брэгговских волновых чисел для различных направлений ветра.

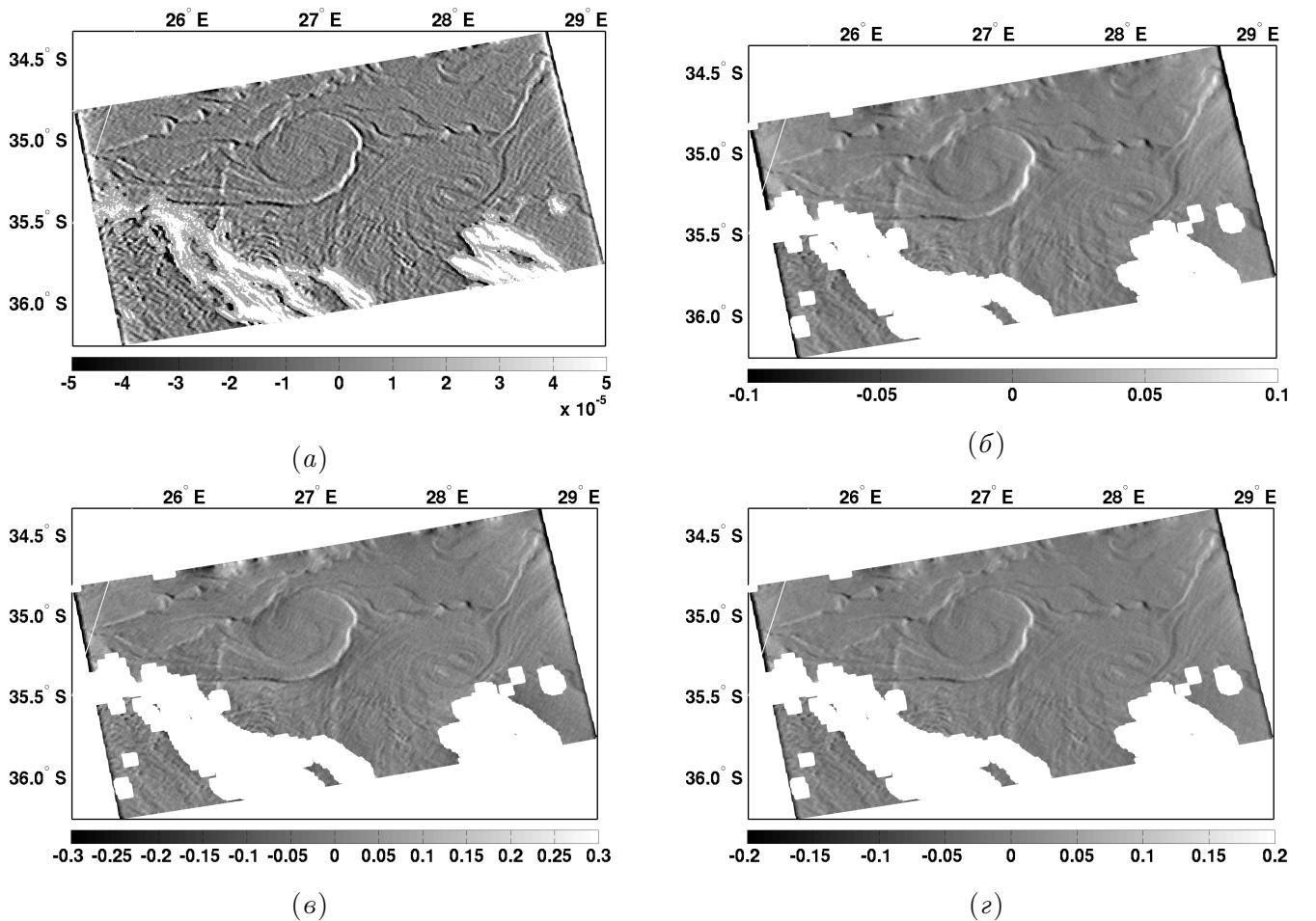
Отчётливо видно, что для бокового ветра вариации контрастов значительно выше, а для направлений против и по ветру – они минимальны

Рисунок 3.10 – Различия контрастов спектра брэгговских волновых чисел, рассчитанных для случая, приведённого на Рисунке 35, при различных направлениях ветра для случайного сечения

### 3.3.1 Результаты интерпретации данных

Поле течений представленное на рисунке (КГТ, Функция тока и т.д) использовались как входные параметры для расчёта трансформации эволюции спектр=ов волн а также СКН наклона по модели РИМ. Основные соотношения модели приведены в приложении. Смо-

делированные поверхностные проявления грибовидного вихря в терминах СКН, обрушений волн и контрастов УЭПР приводятся на Рисунке 35 для угла падения  $30^\circ$  и угла между вектором скорости ветра и направлением дальности  $20^\circ$ . Как и ожидалось, паттерны этих двумерных полей очень схожи со структурой поля конвергенции поверхностного течения. Если присмотреться, можно заметить, что увеличение контрастов всех трёх характеристик происходит в области конвергенции течения (яркие области в верхнем левом углу изображения), в то время, как подавление возникает в зонах дивергенции (тёмные области). Этот результат численного моделирования соответствует упрощённому решению, определяемому уравнениями (1.5), (1.7), (1.8) и (1.9). Стоит напомнить, что проявления особенностей мезомасштабных течений в УЭПР возникает в результате обрушений волн, обеспечивающих усиление/ослабление механических возмущений на поверхности в областях конвергенции/дивергенции. Это приводит к усилию/подавлению волн Брэгга и, тем самым, модуляции обратного рассеяния РЛ-сигнала. Сравнивая симулированные поля контрастов УЭПР и СКН с наблюдаемыми на Рисунке 33, можно заметить, что магнитуды модельных контрастов согласуются с наблюдаемыми значениями. Поскольку RIM была тщательно протестирована на имеющихся данных (см. [Kudryavtsev et al., 2005]), этот факт предполагает, что восстановленные поля дивергенции поверхностного течения могут рассматриваться как близкие к “реальным”. Также стоит отметить, что моделирование контрастов УЭПР для той же пары вихрей, без учёта влияния обрушений волн на УЭПР и модуляцию Брэгговских волн (“стандартная” релаксационная модель) даёт контрасты УЭПР по величине на 4 порядка меньше, нежели приведённые на Рисунке 35.



(а) Дивергенция поля поверхности течения, полученное по полю ТПО (Рисунок 33 а). Яркие области на рисунке (а) соответствуют конвергенции течения, а тёмные – дивергенции (дальнейше см. подпись к Рисунку 3.6, б). Другие рисунки – симуляции RIM модели поверхности проявлений грибовидной структуры, представленной в виде контрастов СКН (б), обрушения волн (в), и контрастов УЭПР (г)

Рисунок 3.11 – Фрагменты восстановленного по ТПО поля дивергенции поверхности течения и смоделированных характеристик: контрастов СКН, обрушений волн, и контрастов УЭПР

Сравнение численного моделирования RIM (приведённого на Рисунке 35) с упрощёнными выражениями в уравнениях (1.5), (1.7), (1.8) и (1.9) даёт возможность получить константу пропорциональности для дальнейшего использования упрощённых решений в практических целях. Мы пришли к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{s}^2}{s^2} &= -\frac{c_s}{u_*(k_c K)^{1/2}} \nabla \cdot u \\ \frac{\tilde{q}}{q_0} &= -c_q \ln \left( \frac{u_* k_b}{g^{1/2} K^{1/2}} \right) \frac{g}{u_*^2 k_b} \omega_b^{-1} \nabla \cdot u \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $c_s = 180$  и  $c_q = 470$  при  $k_c = (g/\gamma)^{1/2}$  и  $k_b = k_R/10$  ( $\gamma$  - поверхностное натяжение,  $k_R$  - волновое число радара).

В конечном счёте, анализ РСА и СКН сигнатур суб- и мезомасштабной динамики верхнего слоя океана отражает отчётливое текстурное сходство с полями конвергенции/дивергенции, хотя незначительные различия в контрастах паттернов всё же наблюдаются. Предположительно, причиной этому могут служить:

1. несовершенное восстановление поверхностного течения и поля дивергенции по данным ТПО MODIS;
2. неточности в поле локального ветра, ветровом дрейфе, Экмановском течении и оценках инерциальных течений;
3. пространственно-временная эволюция мезомасштабных особенностей за пятичасовой интервал между съёмками ASAR и MODIS.

Тем не менее, общее соответствие очень обнадёживает и прекрасно демонстрирует возможности для получения количественных оценок динамики верхнего слоя океана по мультисенсорным поверхностным проявлениям мезомасштабных особенностей.

### **3.4 Выводы по главе**

Показано что блик является инструментом исследования динамики. Это продемонстрировано на примере ВВ. Известно что ВВ являются идеальным объектом для тестирования любого метода .....

Помимо течений, поверхностные проявления ВВ также хорошо видны в модуляциях уклонов морской поверхности. Это также связано с усилением СКН в зонах конвергенции течения ВВ, в то время как подавление наблюдается в зонах дивергенции. Эта связь между аномалиями СКН и дивергенцией поверхностного течения ВВ идентична модуляциям обрушений ветровых волн, вызванных ВВ, наблюдавшихся Дуловым и др. в 1986 [[Дулов и др., 1986](#)] в этом же районе исследования.

В отличии от ВВ, вопрос о возможности идентификации мезомасштабных течений остается открытым. В данной работе предлагается синергетический подход основанный на .....

До сих пор численное понимание механизмов формирования РСА изображений шероховатости морской поверхности под воздействием полей дивергенции и конвергенции поверхностного течения было недостаточным. В данной главе предложен и применён новый синергетический подход для численного? анализа данных РСА и оптических спектрометров, включая инфракрасные каналы. НАДО ОБЪЯСНИТЬ В ЧЕМ ОН НОВЫЙ?

ИСХОДНЫМИ ЯВЛЯЕТСЯ КОМБИНАЦИЯ ПОЛЕЙ

- ТПО ПО ИК

- ЯРКОСТЬ В КРАСНОМ КАНАЛЕ

- УЭПР

На основании которых делается вывод о реализуемости спутниковой диагностикой

Очевидно, что применённый синергетический подход ясно демонстрирует прекрасное соответствие аномалий СКН, реконструированных по изображению солнечного блика (сформированных полным спектром волн, от капиллярных до энергонесущих), с аномалиями шероховатости, восстановленных по РСА изображению. Далее обнаружено, что оба поля находятся в пространственном соответствии с фронтальными областями, представляющими градиенты ТПО. Поскольку типичная фронтальная область состоит из вдоль-фронтальной струи течения с интенсивной перекрестно-фронтальной динамикой и вертикальными движениями, мы ожидали получить именно эти результаты, на основании [[Kudryavtsev et al., 2005](#); [Johannessen et al., 2005](#)].

- Основываясь на предположении, что циркуляция верхнего слоя океана квази двумерно, поле поверхностного квазигеострофического течения (КГТ) восстанавливается по снимку данных ТПО, следуя теории поверхностной квазигеострофической (ПКГ) динамики.

- Поскольку результирующее поле КГТ является бездивергентным, его прямое взаимодействие с ветровыми волнами приводит к слабому проявлению на поверхности особенностей мезомасштабного течения, как уже было показано в [Kudryavtsev et al., 2005; Johannessen et al., 2005]. Поэтому, скорее всего, механизм проявления несколько другой.

- Взаимодействие вызванных ветром в верхнем слое потоков с полем КГТ (путём Экмановского адвективного механизма, и диабатического механизма перемешивания, как предложено в [Klein and Hua, 1990; Garrett and Loder, 1981] приводит к генерации достаточно сильного агеострофического течения, которое, в свою очередь, приводит к большим конвергенционным и дивергенционным поверхностным потокам, проявления которых мы и наблюдаем. В соответствии с предлагаемым предположением, интенсивная перекрестно-фронтальная динамика возникает как близ резких горизонтальных градиентов поля завихренности КГТ, так и в районе сильных вертикальных градиентов поля скорости КГТ.

- В соответствии с вышеизложенным, можно рассматривать наблюдаемое поразительное соответствие между аномалиями шероховатости и градиентами ТПО в качестве “экспериментального подтверждения” того факта, что влияние дивергенции поверхностного течения на короткие ветровые волны есть основной механизм, приводящий к поверхностным проявлениям мезомасштабных особенностей течения в виде аномалий “шероховатости” морской поверхности.

- Помимо этого, стоит отметить, что корреляция между аномалиями шероховатости морской поверхности и модельной дивергенцией поверхностного течения наводит на мысль о надёжности модельного фреймворка для восстановления мезомасштабных поверхностных течений.

- Поле поверхностного течения, восстановленное по данным ТПО MODIS и ветру ASAR, также использовались в качестве входных параметров модели формирования РЛ-изображения RIM, для симулирования РСА УЭПР и СКН сигнатур. Реконструированное поле чётко отражает, что наблюдаемые аномалии на изображении РСА, вместе с аномалиями поля СКН, восстановленного по данным MODIS, представляют поверхностные проявления зон конвергенции и дивергенции океанического течения вдоль меандрирующих фронтов и вихрей.

## В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПОДХОДА ПОЯВЛЯЮТСЯ ПОЛЯ

### - ГЕОСТРОФИКИ

- ПОЛЯ РСА-ВЕТРА
- ПОЛНЫЕ ПОЛЯ ТЕЧЕНИЙ ГЕОСТРОФИКА + ВЕТРОВОЙ ДРЕЙФ + АГЕОСТРОФИЧЕСКАЯ
- ПОЛЯ ДИВЕРГЕНЦИИ ТЕЧЕНИЙ
- ПОЛЯ ЩЕРОХОВАТОСТИ (В ЧАСТНОСТИ мс) КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНЫ В ДРУГИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Т.е. в целом, в результате реализации подхода появляется новое качество.

Подытоживая, можно утверждать, что предложенный синергетический подход, объединяющий ТПО, яркость солнечного блика и данные РСА, дополненный и другими источниками других данных более низкого разрешения (например, альтиметров и скаттерометров), предоставляет согласующееся численное решение положения и интенсивности зон конвергенции/дивергенции (апвеллинга/даунвеллинга) поверхностного течения. А это, в свою очередь, важный и многообещающий шаг в сторону прогресса численной интерпретации и понимания динамики верхнего слоя океана по двумерным изображениям его поверхностных проявлений.

# Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

И какая-нибудь заключающая фраза.

# Список рисунков

1.1	Солнечный блик в Севастопольской бухте, 31 декабря 2008г.	9
1.2	Схематическое изображение компонент солнечного излучения регистрируемого спутниковым датчиком	10
1.3	“Глобальная” маска блика от 21 Марта 2004 года для MODIS/Aqua и SeaWiFS	13
1.4	Геометрия отражения солнечного блика	16
1.5	Пример моделирования солнечного блика с передаточной функцией (1.15), для изотропной Гауссовой функции ПРВ	23
1.6	(а) Схематическая геометрия поля зрения прибора MODIS. (б) фрагмент изображения MODIS/Terra, 24 мая 2010г., 16ч. 45мин., район разлива нефтепродуктов в результате взрыва нефтяной платформы “Deepwater Horizon” в Мексиканском заливе	26
1.7	(а) Схематическое устройство прибора MERIS/Envisat (б) фрагмент изображения MERIS, 24 мая 2010г., 16ч. 17мин., в Мексиканском заливе	26
1.8	Псевдо-цветные RGB изображения района течения Гольфстрим у берегов Флориды	28
1.9	Блок-схема алгоритма восстановления СКН	29
1.10	Карты полей ветра в районе исследования, построенные по данным NCEP GFS и Blended Sea Winds	31
1.11	Фрагменты изображений MERIS, MODIS/Terra и MODIS/Aqua в красных (865нм для MERIS и 850нм для MODIS) каналах	32
1.12	Область исследования на изображениях MERIS (а), MODIS/Terra (б) и MODIS/Aqua (в) в красных каналах	33
1.13	Сечения контрастов яркости вдоль (б) и поперёк (а) блика	34
1.14	Средняя яркость солнечного блика (масштаб осреднения 30x30км <sup>2</sup> )	35
1.15	Контрасты яркости солнечного блика $\tilde{B}/B_0$	35
1.16	Передаточная функция для связи контрастов вариаций яркости (Рисунок 1.15) и контрастов СКН (Рисунок 1.16)	36

1.17	Карты локальных наклонов поверхности, обеспечивающие зеркальное отражение и , обусловленные геометрией наблюдений и положением солнца . . . . .	36
1.18	Карты зон инверсии контрастов для различных скоростей ветра . . . . .	37
1.19	Контрасты СКН $\tilde{s}^2/s_0^2$ . . . . .	38
1.20	Сечения контрастов яркости $\tilde{B}/B_0$ . . . . .	39
2.1	Фрагмент изображения, полученного с прибора MODIS/Terra (Июнь, 2, 2005, 16:55 GMT) . . . . .	44
2.2	Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 2.1, содержащем “индивидуальные” нефтяные слики, и зависимость контрастов от скорости ветра . . . . .	45
2.3	Фрагмент исходного изображения MERIS/Envisat в красном канале (681нм), полученное 24 Мая 2010, 16:17 GMT (а) и композитное изображение двух снимков MODIS/Terra в красном канале (645нм), полученное 24 Мая 2010, 16:45 и 16:50 GMT (б) . . . . .	47
2.4	Усреднённая яркость $B_0$ с изображений MERIS и MODIS, а также передаточная функция $T$ . . . . .	48
2.5	Контрасты яркости солнечного блика $\tilde{B}/B_0$ . . . . .	49
2.6	Аномалии СКН $\tilde{s}^2/s^2$ , восстановленные по данным прибора MERIS (а) и MODIS (б) . . . . .	51
2.7	Изображения (а) ASAR (15:58 GMT), и (б) MERIS (15:56 GMT) . . . . .	52
2.8	Увеличенные фрагменты изображений ASAR (а) и MERIS (б), представленных на Рисунке 2.7 . . . . .	53
2.9	Контрасты СКН и контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура, изображённого на Рисунке 2.8 . . . . .	54
2.10	Коэффициент затухания волн и всенаправленный спектр насыщения ветровых волн для различных условий . . . . .	57
3.1	Фрагмент исходного изображения MODIS/Aqua, обработанный с применением подхода, предложенного в Главе 1 . . . . .	63
3.2	Профиль контрастов СКН и RIM моделирование сечения, проходящего через ВВ на Рисунке 3.1, в . . . . .	64
3.3	Поле ветра и поле поверхностной температуры океана . . . . .	67
3.4	Исходное изображение MODIS/Aqua района мыса Игольный и восстановленные контрасты СКН . . . . .	68

3.5 (а) Поле контрастов СКН полученнное из поля вариаций яркости, представленных на Рисунке 3.4, 6 и поле контрастов УЭПР РСА (б) . . . . .	69
3.6 Завихренность поля КГТ и дивергенция поверхностного течения, восстановленные по наблюдаемому полю ТПО . . . . .	74
3.7 Фрагменты поля УЭПР РСА и дивергенции поверхностного течения . . . . .	75
3.8 Фрагменты поля контрастов СКН и дивергенции поверхностного течения . . . . .	76
3.9 Фрагменты поля контрастов СКН и дивергенции поверхностного течения . . . . .	77
3.10 Различия контрастов спектра брэгговских волновых чисел, рассчитанных для случая, приведённого на Рисунке 35, при различных направлениях ветра для случайного сечения . . . . .	78
3.11 Фрагменты восстановленного по ТПО поля дивергенции поверхностного течения и смоделированных характеристик: контрастов СКН, обрушений волн, и контрастов УЭПР . . . . .	80
A.1 Источники и стоки энергии $Q(k)$ . . . . .	98
A.2 Генерация коротких поверхностных волн в результате обрушения волн . . . . .	100
A.3 Схема формирования РЛ-изображения . . . . .	104

# Список таблиц

1.1	Основные характеристики некоторых спутниковых спектрометров . . . . .	12
1.2	Основные характеристики спектрометра MODIS . . . . .	12

# Литература

Басс Фридрих Гершонович, Фукс Иосиф Моисеевич. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — "Наука, 1972. — С. 434. — URL: <http://books.google.ru/books?id=RoYZAAAAIAAJ>.

Радиолокационные методы исследования земли / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др. ; Под ред. Ю.А. Мельник. — Москва : Советское Радио, 1980. — С. 264.

Дулов В.А., Клюшников С.И., Кудрявцев В.Н. Влияние внутренних волн на интенсивность обрушений ветровых волн. Натурные наблюдения // Морской гидрофизический журнал. — 1986. — № 6. — С. 14–21.

Robinson Ian Stuart. Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography / Ed. by Springer-Verlag. — Springer/Praxis Publishing, 2004. — P. 669. — ISBN: 9783540426479. — URL: <http://eprints.soton.ac.uk/9866/>.

Jerlov Nils Gunnar. Marine Optics. — Elsevier Oceanography series, 5, 1976. — Vol. 21. — P. 231. — ISBN: 0444414908. — URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22115458>.

Pozdnyakov Dmitry V, Graß l H. Colour of Inland and Coastal Waters: A Methodology for Its Interpretation (Google eBook). — Springer/Praxis Publishing, 2003. — P. 170. — ISBN: 978-3-540-00200-0. — URL: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=jKVN4s5pZ1YC&pgis=1>.

Doerffer R, Schiller H. The MERIS Case 2 water algorithm // International Journal of Remote Sensing. — 2007. — Vol. 28, no. 3. — P. 517–535. — URL: <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/01431160600821127&magic=crossref>.

Semi-empirical Algorithm for the Retrieval of Ecology-Relevant Water Constituents in Various Aquatic Environments / Anton A Korosov, Dmitry V Pozdnyakov, Are Folkestad et al. // Algorithms. — 2009. — Vol. 2, no. 1. — P. 470–497. — URL: <http://www.mdpi.com/1999-4893/2/1/470/>.

Montagner F., Billat V., Bélanger S. ATBD 2.13 — SUN GLINT FLAG ALGORITHM // Physics. — 2003. — no. 4.

Cox Charles, Munk Walter. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter // *Journal of the Optical Society of America*. — 1954a. — Vol. 44, no. 11. — P. 838–850. — URL: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-44-11-838>.

Cox Charles, Munk Walter. Statistics of the sea surface derived from sun glitter // *Journal of Marine Research*. — 1954b. — Vol. 13. — P. 198–227.

Bréon F. M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — Vol. 111, no. C06005. — P. 1–10. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JC003343.shtml>.

Combined use of SAR and Modis imagery to detect marine oil spills / Maria Adamo, Giacomo De Carolis, Vito De Pasquale, Guido Pasquariello // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering / Ed. by Francesco Posa. — Vol. 5980. — Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2005. — oct. — P. 59800I–59800I–12. — URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=879662>.

Chust G, Sagarminaga Y. The multi-angle view of MISR detects oil slicks under sun glitter conditions // *Remote Sensing of Environment*. — 2007. — Vol. 107, no. 1-2. — P. 232–239. — URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425706004445>.

Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery / Chuanmin Hu, Xiaofeng Li, William G Pichel, Frank E Muller-Karger // *Geophysical Research Letters*. — 2009. — Vol. 36, no. 1. — P. 1–5. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008GL036119.shtml>.

Hennings Ingo, Matthews John, Metzner Margitta. Sun glitter radiance and radar cross-section modulations of the sea bed // *Journal of geophysical research*. — 1994. — Vol. 99, no. C8. — P. 16303–16326. — URL: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4200531>.

Observations of oceanic internal and surface waves from the Earth Resources Technology Satellite / John Ralph Apel, H M Byrne, J R Proni, R L Charnell // *Journal of Geophysical Research*. — 1975. — Vol. 80, no. 6. — P. 865–881. — URL: <http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0000097310&partnerID=40&rel=R8.0.0>.

Artale V, Levi D, Marullo S. Analysis of nonlinear internal waves observed by Landsat thematic mapper // Journal of Geophysical Research. — 1990. — Vol. 95, no. 90. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/1990/JC095iC09p16065.shtml>.

Manifestation of internal solitary waves on ERS SAR and SPOT images: Similarities and differences / Leonid Mitnik, Werner Alpers, Kun Shan Chen, A J Chen // International Geoscience And Remote Sensing Symposium Igarss. — Vol. 5. — 2000. — P. 1857–1859. — URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0034540532&partnerID=40&md5=50ddbc13a6e245367b4a2fe40a81f99e>.

Jackson Christopher R., Alpers Werner. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface // Journal of Geophysical Research. — 2010. — Vol. 115, no. C09019. — P. 15. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JC006037.shtml>.

Burdyugov V. M., Grodsky S.A., Kudryavtsev Vladimir N. Analysis of photographic images of the structure of the surface of the sea near a speck of light // Soviet Journal of Physical Oceanography. — 1987. — Vol. 1, no. 1. — P. 55–62. — URL: <http://www.refdoc.fr/Detailnotice?idarticle=38827647>.

Stilwell Denzil. Directional Energy Spectra of the Sea from Photographs // Journal of Geophysical Research. — 1969. — Vol. 74, no. 8. — P. 1974–1986. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/1969/JB074i008p01974.shtml>.

Spectra of Energy-Carrying Surface Waves Using Solar Highlight Images. Comparison with In-situ Data / A. N. Bolshakov, V. M. Burdyugov, S. A. Grodsky et al. // Earth Obs. Remote Sens. — 1990a. — Vol. 8. — P. 29–40. — URL: [http://scholar.google.ru/scholar?q=Spectra+of+energy+carrying+surface-waves+using+solar+highlight+images+%E2%80%94&btnG=&hl=ru&as\\_sdt=0#0](http://scholar.google.ru/scholar?q=Spectra+of+energy+carrying+surface-waves+using+solar+highlight+images+%E2%80%94&btnG=&hl=ru&as_sdt=0#0).

2-Dimensional surface elevation spectra from airphoto data / A. N. Bolshakov, V. M. Burdyugov, S.A. Grodsky, Vladimir N. Kudryavtsev // Izvestia Atmospheric and Oceanic Physics. — 1990b. — Vol. 26. — P. 652–658.

Matthews John. Stereo observation of lakes and coastal zones using ASTER imagery // Remote Sensing of Environment. — 2005. — Vol. 99, no. 1-2. — P. 16–30. — URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425705001689>.

Munk W H, Scully-Power P, Zachariasen F. Ships from space // Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. — 1987. — Vol. 412, no. 1843. — P. 231–254. — URL: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Ships+from+space#0>.

Spirals on the sea / W Munk, L Armi, K Fischer, F Zachariasen // Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. — 2000. — Vol. 456, no. 1997. — P. 1217–1280. — URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.2000.0560>.

Cox Charles, Munk Walter. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography of the University of California. — 1956. — Vol. 6, no. 9. — P. 401–488. — URL: <http://repositories.cdlib.org/sio/bulletin/6no9>.

Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика / А.Н. Большаков, В.М. Бурдюгов, В.М. Гродский, В.Н. Кудрявцев // Исследование Земли из Космоса. — 1988. — Т. 5. — С. 11–18.

Importance of peakedness in sea surface slope measurements and applications / Bertrand Chapron, V. Kerbaol, D. Vandemark, T. Elfouhaily // Journal of Geophysical Research. — 2000. — Vol. 105, no. C7. — P. 17195–17202. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2000/2000JC900079.shtml>.

Ebuchi Naoto. Probability distribution of surface wave slope derived using Sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — Vol. 3. — IEEE, 2002. — P. 1813–1815. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1026263>.

MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system / V V Salomonson, W L Barnes, P W Maymon et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 1989. — Vol. 27, no. 2. — P. 145–153. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=20292>.

Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science / Robert E Wolfe, Masahiro Nishihama, Albert J Fleig et al. // Remote Sensing of Environment. — 2002. — Vol. 83, no. 1-2. — P. 31–49. — URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425702000858>.

Goryl P, Saunier S. MERIS absolute geolocation status // ESA-GAEL report, contract. — 2004. — no. 15993/02.

An overview of MODIS capabilities for ocean science observations / W E Esaias, M R Abbott, I Barton et al. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 1998. — Vol. 36, no. 4. — P. 1250–1265. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=701076>.

USGS. GTOPO30: Global 30 Arc Second Elevation Data. — Online at <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30.html>. — 1996.

The NCEP Climate Forecast System / S. Saha, S. Nadiga, C. Thiaw et al. // *J. Climate*. — 2006. — aug. — Vol. 19, no. 15. — P. 3483–3517. — URL: <http://dx.doi.org/10.1175/jcli3812.1>.

Zhang Huai-Min, Bates John J, Reynolds Richard W. Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed // *Geophysical Research Letters*. — 2006. — Vol. 33, no. 17. — P. L17714. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL027086.shtml>.

Brekke Camilla, Solberg Anne H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. — 2005. — mar. — Vol. 95, no. 1. — P. 1–13. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704003724>.

Levich Veniamin Grigorevich. Physicochemical Hydrodynamics / Ed. by New York Wiley. — Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1962. — Vol. 1 of Prentice-Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. — P. 700. — ISBN: 0136744400. — URL: <http://www.amazon.co.uk/Physicochemical-Hydrodynamics-V-G-Levich/dp/0136744400>.

On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations / Vladimir N. Kudryavtsev, D. Akimov, Johnny A. Johannessen, Bertrand Chapron // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — jul. — Vol. 110, no. C07016. — P. 1–27. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004JC002505.shtml>.

On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection / Johnny A. Johannessen, Vladimir N. Kudryavtsev, D. Akimov et al. // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — Vol. 110, no. C07017. — P. 1–14. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004JC002802.shtml>.

Stewart R. W. The air-sea momentum exchange // *BoundaryLayer Meteorology*. — 1974. — Vol. 6, no. 1-2. — P. 151–167. — URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF00232481>.

Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками / В.Н. Кудрявцев, Н.А. Иванова, Л.А. Гущин, С.А. Ермаков. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2008. — Т. Препринт №765. — С. 30.

Ivanov V A, Pelinovsky E N, Talipova T G. The Long-Time Prediction of Intense Internal Wave Heights in the Tropical Region of the Atlantic // Journal of Physical Oceanography. — 1993. — Vol. 23, no. 9. — P. 2136–2142.

Brown Otis B, Minnett Peter J. MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm // [Time](#). — 1999. — Vol. 2, no. 3. — P. 33149–1098. — URL: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:MODIS+Infrared+Sea+Surface+Temperature+Algorithm+Algorithm+Theoretical+Basis+Document+Version+2.0#0>.

Sun glitter imagery of the ocean phenomena / Alexander G. Myasoedov, Vladimir N. Kudryavtsev, Bertrand Chapron, Johnny A. Johannessen. — Vol. ESA SP-679. — Frascati, Italy, 2010. — jan. — URL: <http://www.nerc.no/sites/www.nerc.no/files/SUNGLITTERIMAGERYOFTHEOCEANSURFACEPHENOMENA.pdf>.

Myasoedov Alexander G., Kudryavtsev Vladimir N. Quantification of the surface manifestation of ocean phenomena from sun glitter imagery. // Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. — 2010. — no. 16. — P. 94–115. — URL: [http://www.rshu.ru/university/notes/rggmu\\_ucheny\\_zapiski\\_16.pdf](http://www.rshu.ru/university/notes/rggmu_ucheny_zapiski_16.pdf).

Synergy of SAR and optical imagery in studies of meso-scale ocean dynamics / Vladimir N. Kudryavtsev, Alexander G. Myasoedov, Bertrand Chapron et al. — Vol. ESA SP-679. — Frascati, Italy, 2010. — jan. — P. 8. — URL: <http://www.nerc.no/sites/www.nerc.no/files/SYNERGYOFSARANDOPTICALIMAGERYINSTUDIESOFMESO-SCALEOCEANDYNAMICS.pdf>.

Klein Patrice, Hua Bach Lien. The mesoscale variability of the sea surface temperature: An analytical and numerical model // Journal of Marine Research. — 1990. — Vol. 48, no. 4. — P. 35. — URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/jmr/jmr/1990/00000048/00000004/art00004>.

Garrett C J R, Loder J W. Dynamical aspects of shallow sea fronts // Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences. — 1981. — Vol. 302, no. 1472. — P. 563–581. — URL: <http://www.jstor.org/stable/37038>.

Thompson Luanne. Ekman layers and two-dimensional frontogenesis in the upper ocean // *Journal of Geophysical Research*. — 2000. — Vol. 105, no. C3. — P. 6437–6451. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2000/1999JC900336.shtml>.

Nagai T, Tandon A, Rudnick D L. Two-dimensional ageostrophic secondary circulation at ocean fronts due to vertical mixing and large-scale deformation // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — Vol. 111, no. C9. — P. 1–18. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JC002964.shtml>.

McWilliams J C, Colas F, Molemaker M J. Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines // *Geophysical Research Letters*. — 2009. — Vol. 36, no. L18602. — P. 1–5. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2009GL039402.shtml>.

Brown R. A. On two-layer models and the similarity functions for the PBL // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1982. — dec. — Vol. 24, no. 4. — P. 451–463. — URL: <http://www.springerlink.com/content/k3474482346t65lh/>.

Surface quasi-geostrophic dynamics / Isaac M Held, Raymond T Pierrehumbert, Stephen T Garner, Kyle L Swanson // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1995. — Vol. 282, no. -1. — P. 1–20. — URL: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0022112095000012](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112095000012).

Lapeyre G, Klein P. Dynamics of the Upper Oceanic Layers in Terms of Surface Quasigeostrophy Theory // *Journal of Physical Oceanography*. — 2006. — Vol. 36, no. 2. — P. 165–176. — URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JPO2840.1>.

Three-dimensional reconstruction of oceanic mesoscale currents from surface information / Jordi Isern-Fontanet, Guillaume Lapeyre, Patrice Klein et al. // *Journal of Geophysical Research*. — 2008. — Vol. 113, no. C09005. — P. 17. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007JC004692.shtml>.

Chapron Bertrand, Collard Fabrice, Ardhuin Fabrice. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — Vol. 110, no. C7. — P. 1–17. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004JC002809.shtml>.

Direct ocean surface velocity measurements from space: Improved quantitative interpretation of Envisat ASAR observations / Johnny A. Johannessen, Bertrand Chapron, Fabrice Collard et al. // *Geophysical Research Letters*. — 2008. — Vol. 35, no. L22608. — P. 1–6. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035709.shtml>.

# Приложение А

## Основные соотношения модели RIM

### APPENDIX

Спектр ветрового волнения является фундаментальной характеристикой морской поверхности. Для решения поставленных в данной работе задач, нам необходима физическая модель спектра, которая основана на решении уравнения баланса энергии, которое удобней использовать в терминах волнового спектра действия (см., например, [Phillips, 1977]):

$$\frac{\partial N(k)}{\partial t} + (c_{gi} + u_i) \frac{\partial N(k)}{\partial x_i} - k_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial N(k)}{\partial k_i} = Q(k)/\omega, \quad (\text{A.1})$$

где  $c_{gi}$  и  $u_i$  – компоненты скорости групповых волн и поверхностного течения ( $i$  и  $j = 1, 2$ );  $\omega$  и  $k$  – собственная частота и вектор волновых чисел, взаимосвязанные дисперсионным соотношением:

$$\omega^2 = gk + \gamma k^3, \quad (\text{A.2})$$

где  $k = |k|$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\gamma$  – поверхностное напряжение, а  $Q(k)$  – источник энергии волн. Спектр высоты волн  $F(k)$ , энергетический спектр  $E(k)$  и спектр действия  $N(k)$  соотносятся друг с другом как:  $E(k) = (\omega^2/k)F(k)$  и  $N(k) = E(k)/\omega = (\omega/k)F(k)$ . Отметим, что спектр насыщения  $B(k)$  (или спектр кривизны поверхности) записывается как:  $B(k) = k^4 F(k)$ .

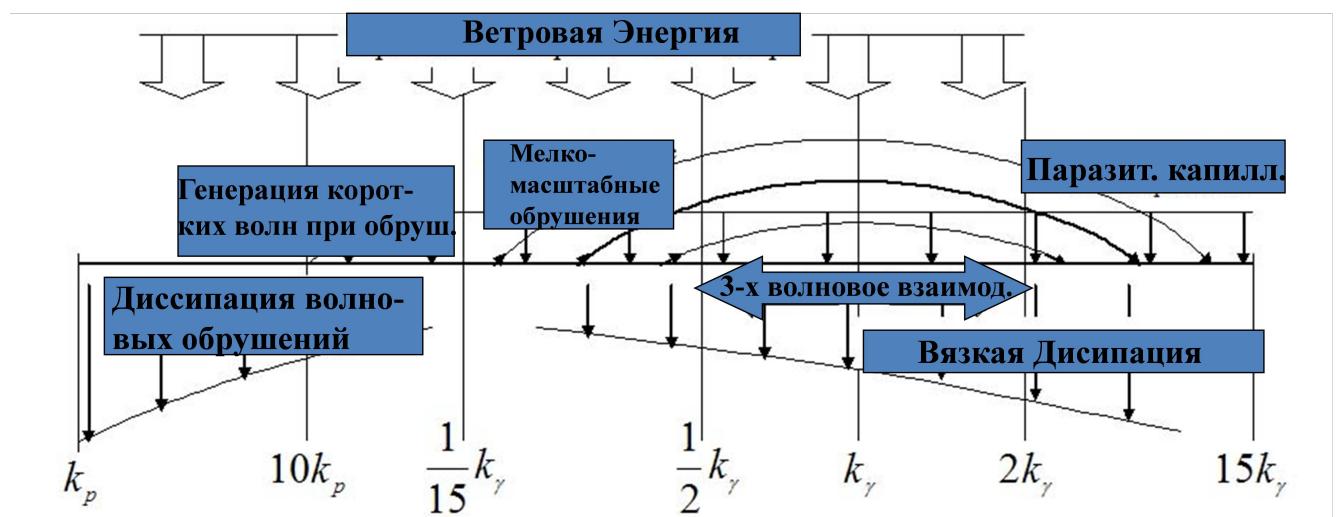
Источники и стоки энергии  $Q(k)$  (см. Рисунок ) состоят из ветровой “накачки”, эффектов вязкой диссипации, диссипации за счёт обрушений волн, взаимодействий волн и генерации паразитных капилляров в результате обрушения волн, и могут быть записаны следующим образом:

$$Q(k) = \beta_\nu(k)\omega E(k) - D(k) - Q^{nl}(k) + Q^{wb}(k), \quad (\text{A.3})$$

где  $\beta_\nu(k) = \beta(k) - 4\nu k^2/\omega$  – эффективная скорость роста, являющаяся разницей между скоростью роста ветра  $\beta(k)$  и скоростью вязкой диссипации ( $\nu$  – коэффициент вязкости). Здесь скорость роста

$$\beta(k) = C_\beta(u_*/c)^2 \cos \varphi |\cos \varphi|, \quad (\text{A.4})$$

где  $\varphi$  – угол между векторами скорости ветра и волнового числа;  $u_*$  – динамическая скорость,  $c$  – фазовая скорость;  $C_\beta$  – параметр, соответствующий параметризации Стюарта [Stewart, 1974]:  $C_\beta = 1.5(\rho_a/\rho_w)(\nu^{-1} \ln(\pi/kz_0) - c/u_*)$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_w$  – плотность воздуха и воды, соответственно,  $\nu = 0.4$ , а  $z_0$  – масштаб шероховатости.



Источники и стоки энергии состоят из ветровой “накачки”, эффектов вязкой диссипации, диссипации за счёт обрушений волн, взаимодействий волн и генерации паразитных капилляров в результате обрушения волн, и могут быть представлены через уравнение

Рис. А.1 – Источники и стоки энергии  $Q(k)$

Скорость диссипации энергии в результате обрушений волн  $D(k)$  в [Phillips, 1985] представляется в виде:

$$D(k) = bg^{-1}c^5\Lambda(k), \quad (\text{A.5})$$

где  $b$  – эмпирическая константа порядка 0.01, а  $\Lambda(k)$  – статистическая мера обрушений волн, введённая Филлипсом [Phillips, 1985], таким образом, что  $\Lambda(k)dk$  – общая длина на единицу площади обрушающегося фронта поверхностных волн в диапазоне волновых чисел от  $k$  до  $k + dk$ .

Член  $Q^{nl}(k)$  в характеризует источники и стоки энергии в результате резонансного четырёх-волнового (в гравитационном масштабе) и трёх-волнового (в капиллярно-гравитационном диапазоне) взаимодействия.

Член  $Q^{wb}(k) = Q_{pc}^{wb}(k) + Q_{sw}^{wb}(k)$  описывает генерацию коротких поверхностных волн в результате обрушения волн (см. Рисунок ). В зависимости от масштаба обрушающейся волны, определяются два механизма. В первом, в результате действия поверхностного натяжения, короткие обрушающиеся волны с  $k > k_{wb}$  (где  $k_{wb} \approx 2\pi/0.3\text{рад}/\text{м}$ ) не обрушаются, а генерируют группы паразитных капилляров. Таким образом, скорость генерации паразитных капилляров (описываемых членом  $Q_{pc}^{wb}(k)$ ) пропорциональна диссиpации энергии при переносе коротких гравитационных волн с волновыми числами  $k_g = k_\gamma^2/k$ , где  $k_\gamma = (g/\gamma)^{1/2}$  – волновое число минимума фазовой скорости. Описание этого механизма приводится в [Кудрявцев и др., 1999] и [Kudryavtsev и др., 2003], а выражение для  $Q_{pc}^{wb}(k)$  приводится ниже:

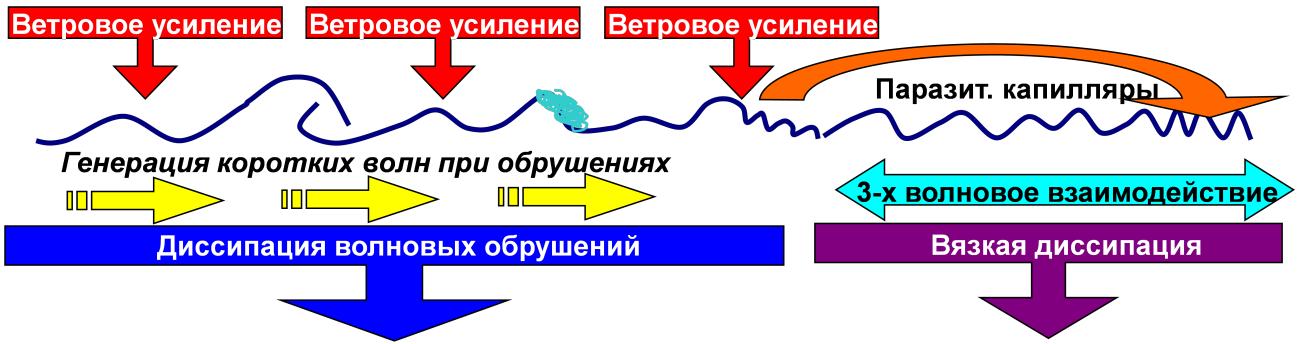
$$\begin{aligned} Q_{pc}^{wb}(k) &\equiv \omega^3 k^{-5} I_{pc}(k) \\ I_{pc}(k) &= b k_g^{-1} \Lambda(k_g) \phi(k/k_\gamma), \end{aligned} \tag{A.6}$$

где  $\phi(k/k_\gamma)$  – фильтрующая функция, ограничивающая действие источника  $I_{pc}(k)$  в пространстве волновых чисел  $k$ .

При действии второго механизма, гребни более длинных обрушающихся волн с волновыми числами  $k < k_{wb}$ , которые обрушаются и вызывают механические возмущения морской поверхности. Этот механизм описан в статье [Kudryavtsev, 2004]. Скорость генерации коротких волн  $Q_{sw}^{wb}(k)$  изотропна и описывается через характеристики обрушений длинных волн как [Kudryavtsev, 2004]:

$$\begin{aligned} Q_{sw}^{wb}(k) &\equiv \omega^3 k^{-5} I_{sw}(k) \\ I_{sw}(k) &= c_b \omega^{-1} \int_0^{k_m} \omega k'^{-1} \Lambda(k') dk', \end{aligned} \tag{A.7}$$

где  $c_b = 1.2 \cdot 10^{-2}$  – эмпирическая константа;  $k_m = \min(k/a_b, k_{wb})$  при  $a_b = 10$  – верхний предел интегрирования, определяющий интервал обрушающихся волн, генерирующих более короткие волны при волновом числе  $k$ .



*Создание “регулярных” серий паразитных капилляров в результате действия поверхности натяжения, при обрушении коротких волн с  $k > k_{wb}$  и, вызванная обрушением гребней более длинных волн, с волновыми числами  $k < k_{wb}$ , механическая пертурбация морской поверхности*

Рис. А.2 – Генерация коротких поверхностных волн в результате обрушения волн

## A.1 Приближённое решение задачи о трансформации волн

Предположим, что поля поверхностного течения и скорости ветра можно представить в пространстве Фурье:

$$z(x, t) = \int \hat{z}(K) \exp(i(K \cdot x - \Omega t)) dK, \quad (\text{A.8})$$

где  $z(x, t)$  – произвольная константа,  $\hat{z}(K)$  – её Фурье амплитуда (комплексная переменная), а  $K$  и  $\Omega$  – вектор волнового числа и частота, соответственно. Тогда линеаризованное решение уравнения баланса действия (??) с разложением на Фурье гармоники для малых вариаций спектра, вызванных поверхностным течением и приповерхностным ветром, выглядит следующим образом [Kudryavtsev и др., 2005]:

$$T(k, K) = \frac{\tau}{1 + i \cdot r} \left[ \omega^{-1} m_k^{ij} \hat{u}_{ij} + \hat{\beta} + \left( \hat{I}_{sw} + \hat{I}_{pc} \right) / B \right], \quad (\text{A.9})$$

где  $T(k, K) = \hat{N}(k) / N_0(k)$  – передаточная функция,  $N_0(k)$  – фоновый спектр морской поверхности, определяемый локальными свойствами среды,  $B$  – спектр волн в данной точке пространства,  $r$  – безразмерный релаксационный параметр:

$$r = \tau \omega^{-1} (c_{gj} K_j - \Omega), \quad (\text{A.10})$$

$m_k^{ij} = k_j \partial (\ln N_0) / \partial k_i$  – тензор нормированного градиента спектра по волновым числам,  $\widehat{u}_{ij}$  – Фурье амплитуда тензора градиента скорости течения  $\partial u_i / \partial x_j$ . Оператор  $m_k^{ij} \widehat{u}_{ij}$  в (??) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} m_k^{ij} \widehat{u}_{ij} = & m_k (\cos^2 \phi \cdot \widehat{u}_{ij} - \cos 2\phi \cdot \widehat{u}_{2,2}) + \\ & 1/2m_\phi \sin 2\phi \cdot (\widehat{u}_{2,2} - \widehat{u}_{1,1}) + \\ & 1/2m_k \sin 2\phi \cdot (\widehat{u}_{2,1} - \widehat{u}_{1,2}) - \\ & m_\phi (\sin^2 \phi \cdot \widehat{u}_{2,1} - \cos^2 \phi \cdot \widehat{u}_{1,2}) \end{aligned}, \quad (\text{A.11})$$

где  $m_k = \partial (\ln N) / \partial (\ln k)$ ,  $m_\phi = \partial (\ln N) / \partial \phi$ ,  $\phi$  – направление вектора волнового числа.

Члены  $\widehat{I}_{sw}$  и  $\widehat{I}_{pc}$  в (??) описывают эффект модуляции обрушений волн на коротких ветровых волнах и паразитных капиллярах.

Второй член в уравнении (??) описывает эффект влияния изменения скорости ветра на спектр волн. В частности, вариации скорости ветра могут возникать в результате трансформации атмосферного погранслоя над изменяющимся температурным фронтом в море. Также стоит отметить, что уравнение (??) описывает и модуляцию коротких волн более длинными поверхностными волнами, как например описывается в [Kudryavtsev, 2003].

Уравнение (??) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма второго рода. Такое уравнение решаемо численными методами, итерационно. Тем не менее, сначала рассмотрим некоторые граничные случаи (для стационарных течений,  $\Omega = 0$ ), иллюстрирующие некоторые характеристические свойства полного решения.

В случае если параметр  $r$  велик, поверхностные изменения пространственного масштаба малы, по сравнению с релаксационным масштабом  $l_r$ . Это наиболее вероятно для длинных гравитационных волн. Для  $r \gg 1$  (??) сокращается до:

$$T(k, K) = \frac{m_k^{ij} K_j \widehat{u}_i}{c_{gj} K_j} \propto -\frac{7}{2} \frac{V}{c_g}, \quad (\text{A.12})$$

где  $V$  – величина поверхностного течения. Это уравнение представляет трансформацию, когда поверхностные волны взаимодействуют с течением, как свободные волны и не чувствуют влияния ветра или других источников энергии. В таком случае, чем длиннее (и быстрее распространяются) поверхностные волны, тем меньше влияние поверхностного течения. Можно показать, что второй и третий член в уравнении (??) имеет порядок  $r^{-1} \widehat{u}_*/u_*$  и  $r^{-1} V/c_g$ , соответственно, и их можно опустить при  $r \gg 1$ .

Условие, когда  $r \ll 1$ , выполняется для коротких ветровых волн. Здесь влияние течения пренебрежимо мало (первый член в (??) можно опустить). Вариации спектра возникают в

результате локального влияния ветра и обрушений волн. Когда источником вариаций коротких волн является только ветер, (??) сокращается до:

$$T(k, K) \approx m_* \frac{\hat{u}_*}{u_*}, \quad (\text{A.13})$$

где  $m_*$  – спектральный показатель ветра. Таким образом, вариации в волновом спектре отражают пространственную неоднородность напряжений приводного ветра. Если же ветер однороден, единственным источником модуляции коротких волн становятся обрушения больших волн. Выдвигая предположение, что передаточная функция для обрушающихся волн имеет вид  $T \approx m_k^{ij} \hat{u}_{ij} \omega^{-1} \tau$ , модуляционная передаточная функция коротких волн может быть записана как:

$$T(k) \approx m_k \frac{n_g + 1}{n_g} \ln \left[ \frac{k}{a_b k_p} \right] \tau \omega^{-1} \hat{u}_{ij}, \quad (\text{A.14})$$

где  $a_b = 10$ . Чтобы вывести это уравнение, учитывался лишь первый член оператора в уравнении (??), дающий вклад в интеграл по  $\phi$ . В уравнении (??) есть две отличительные особенности. Во первых – только дивергенция поверхностного течения влияет на модуляцию коротких ветровых волн. А во вторых – модуляция сильнее при боковом ветре, поскольку  $\tau$  имеет угловую зависимость (подробнее см. [Kudryavtsev и др., 2005]). Последнее утверждение предполагает, что эффект поверхностного течения приводит к анизотропии коротких ветровых волн. Проведя модельные расчёты контрастов спектра брэгговских волновых чисел для разных направлений ветра (Рисунок 34), отчётливо видно, что для бокового ветра вариации контрастов значительно выше, а для направлений против и по ветру – они минимальны.

В (??) заведомо не был включён член, описывающий влияние поверхностных плёнок, которые могут значительно изменять коэффициент вязкой диссипации, и, таким образом, влияют на спектр волн (см., например, [Ermakov и др., 1992]). Этот механизм локализован в пространстве волновых чисел и в основном влияет на самые короткие ветровые волны, чья скорость релаксации очень велика. Поэтому можно предположить, что плёнки влияют на короткие волны локализовано в физическом пространстве и их вклад возможно учесть через изменённый коэффициент вязкости в фоновом спектре  $N_0(k)$ . Таким образом, вариации спектра насыщения волн в физическом пространстве принимают следующий вид:

$$B(k) = B_0(k) \left[ 1 + \int T(k, K) e^{i(K \cdot x - \Omega t)} dK \right], \quad (\text{A.15})$$

где эффект влияния ветра и течения включены в  $T(k, K)$ , а поверхностных плёнок – в  $B_0(k)$ .

## A.2 Трансформация СКН и обрушений волн

Для создания полной модели, необходимо количественно оценить спектр волн, а также его трансформации в присутствии пространственно-неоднородных течений, переменного ветра и поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые приводят к проявлению особенностей поверхностных течений на радиолокационных (РЛ) изображениях. Используя спектральную передаточную функцию (??), получим вариации компонентов СКН  $\Delta s_j^2$  в неоднородной среде [Kudryavtsev и др., 2005]:

$$\begin{aligned} s_j^2 &= s_{j0}^2 \left( 1 + \Delta s_j^2 / s_{j0}^2 \right), \\ \Delta s_j^2 &= \int T_j^s(K) e^{i(K \cdot x - \Omega t)} dK, \\ T_j^s(K) &= \iint_{k < k_d} T(k, K) \kappa_j^2 B(k) d\phi d(\ln k), \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

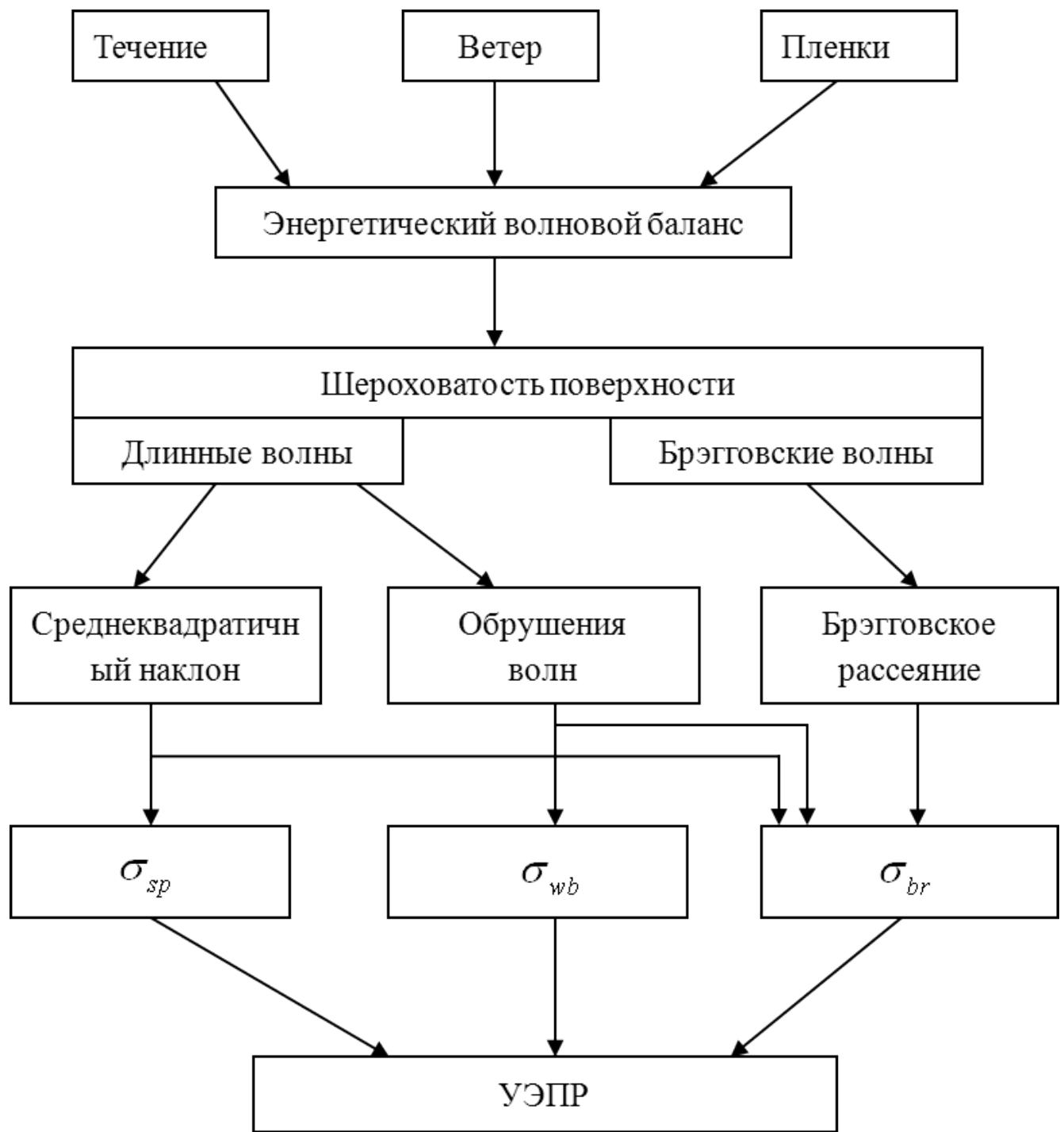
где нижний индекс “0” означает, что СКН относится к фоновому спектру  $B_0(k)$  в (??),  $\kappa_j^2 = k_j/k$  – единичный вектор волнового числа, а индекс  $j = 1, 2$ .

Область моря, покрытая обрушениями рассчитывается исходя из:

$$\begin{aligned} q &= q_0 \left( 1 + \Delta q / q_0 \right), \\ \Delta q &= \int T^q(K) e^{i(K \cdot x - \Omega t)} dK, \\ T^q(K) &= (n_g + 1) \iint_{k < k_d} T(k, K) \beta B(k) d\phi d(\ln k), \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

где верхний предел интегрирования относится к РЛ волновому числу как  $k_{wb}^R = \min(k_{wb}, 0.1k_r)$ .

На Рисунке A.3 представлена модель, отражающая механизмы, влияющие на обратное рассеяние радиолокационного сигнала, и формирование радиолокационных изображений.



*Структура механизмов модели, дающих вклад в образование радиолокационного изображения*

Рис. А.3 – Схема формирования РЛ-изображения

Примеры результата расчётов СКН и обрушений волн с использованием уравнений (??) и (??) по модели RIM приводятся на Рисунке 35.