

# Todo list

единицы измерения в Главе 1 textit . . . . .	3
Поменять/Проверить eq refs в Главе 2 . . . . .	38
единицы измерения в Главе 2 textit . . . . .	38
Нумерация Рисунков . . . . .	38
Нумерация Рисунков ... а, б, в . . . . .	38
Кавычки “” . . . . .	38
см. раздел 2.3 и Рисунок 24 ниже . . . . .	38
Цитирования citep . . . . .	38
Градусы ° . . . . .	38
???? . . . . .	46
ГДЕ? . . . . .	46
ЧЕГО? . . . . .	46
КАКИМИ? . . . . .	46
ОТКУДА? . . . . .	46
УЖАСНЫЙ РУССКИЙ . . . . .	49
Я НЕ ПОНИМАЮ ЧТО НАПИСАНО . . . . .	49
«ПОСЧИТАННЫЕ» КАКИМ ОБРАЗОМ, ПО МОДЕЛИ? . . . . .	50

# Содержание

Todo list . . . . .	1
1 Солнечный блеск как “инструмент” исследования Океана из Космоса . . . . .	3
1.1 Общие представления . . . . .	3

1.2	Оптические исследования океана из Космоса . . . . .	6
1.2.1	Солнечный блик как источник информации о поверхностных явлениях	8
1.3	Модель изображения морской поверхности в области солнечного блика . . . . .	10
1.3.1	Основные соотношения . . . . .	10
1.3.2	Связь вариаций яркости с вариациями СКН . . . . .	12
1.3.3	Восстановления СКН по полям яркости . . . . .	14
1.3.4	Пример восстановления СКН модельного блика . . . . .	16
1.4	Применение разработанного метода к данным MODIS и MERIS . . . . .	19
1.5	Программа восстановления СКН по полям яркости . . . . .	22
1.5.1	Среда и языки программирования . . . . .	22
1.5.2	Данные MODIS и MERIS, используемые в примере . . . . .	22
1.5.3	Процедура восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям . . . . .	23
1.6	Выходы по главе . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Оптические и радиолокационные исследования нефтяных сливов . . . . .</b>	<b>38</b>
2.1	Нефтяные плёнки природного происхождения . . . . .	39
2.2	Катастрофические нефтяные загрязнения . . . . .	41
2.3	Контрасты СКН и УЭПР нефтяных сливов . . . . .	52
2.4	Выходы по главе . . . . .	55
<b>Литература . . . . .</b>		<b>58</b>

# Глава 1

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

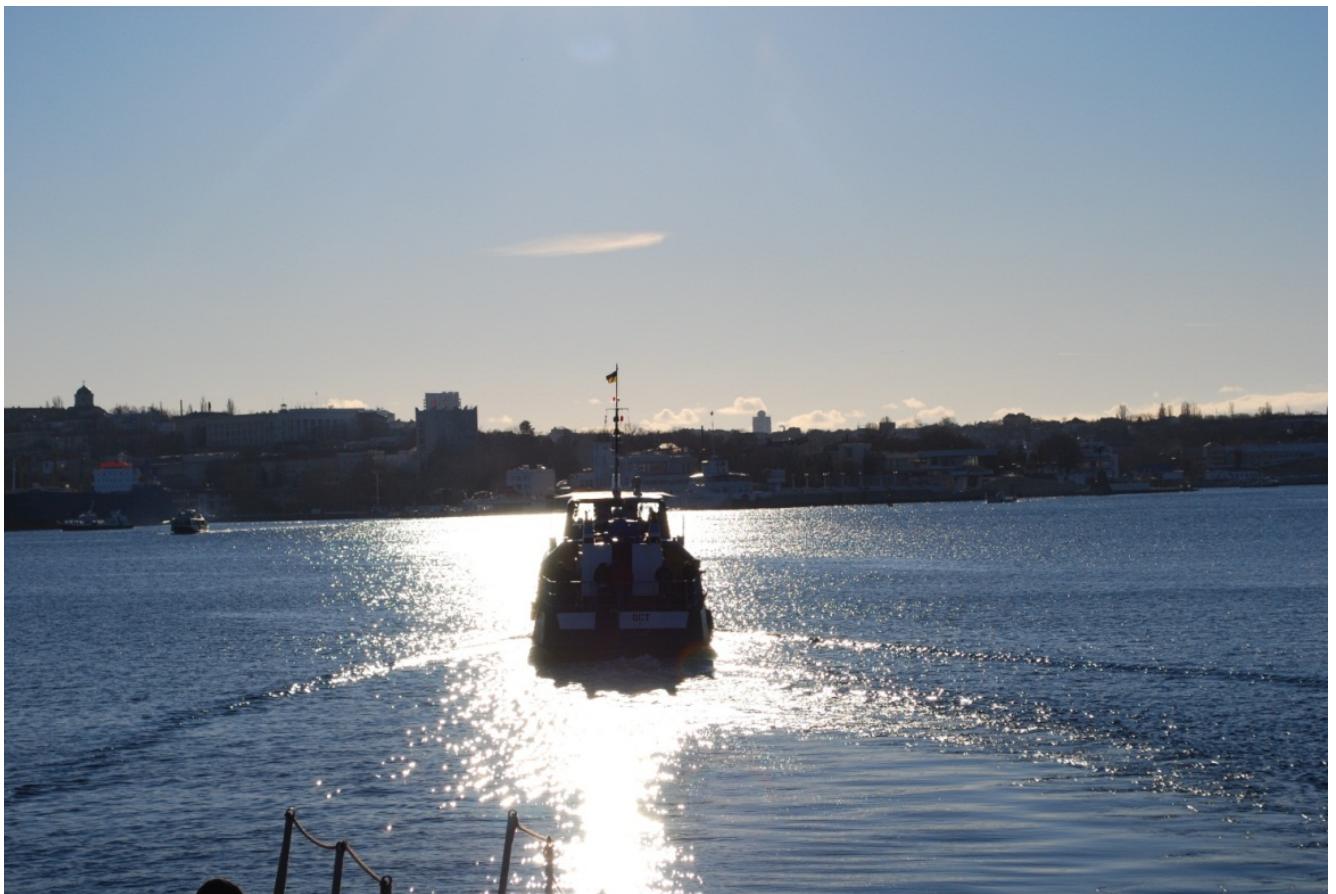
Морозным днем 31 декабря 2008 года я шёл на пароме по Севастопольской бухте и уже в который раз наблюдал всем хорошо известное явление – солнечный блик (см. Рисунок 1.1). Те, кто живут у моря, настолько привыкли наблюдать блики на морской поверхности, что их это давно не удивляет. Те же, кто приехал 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 ещё ни одна диссертация.

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

единицы измерения в Главе 1 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 удалённого датчика (см. Рисунок 1.2).

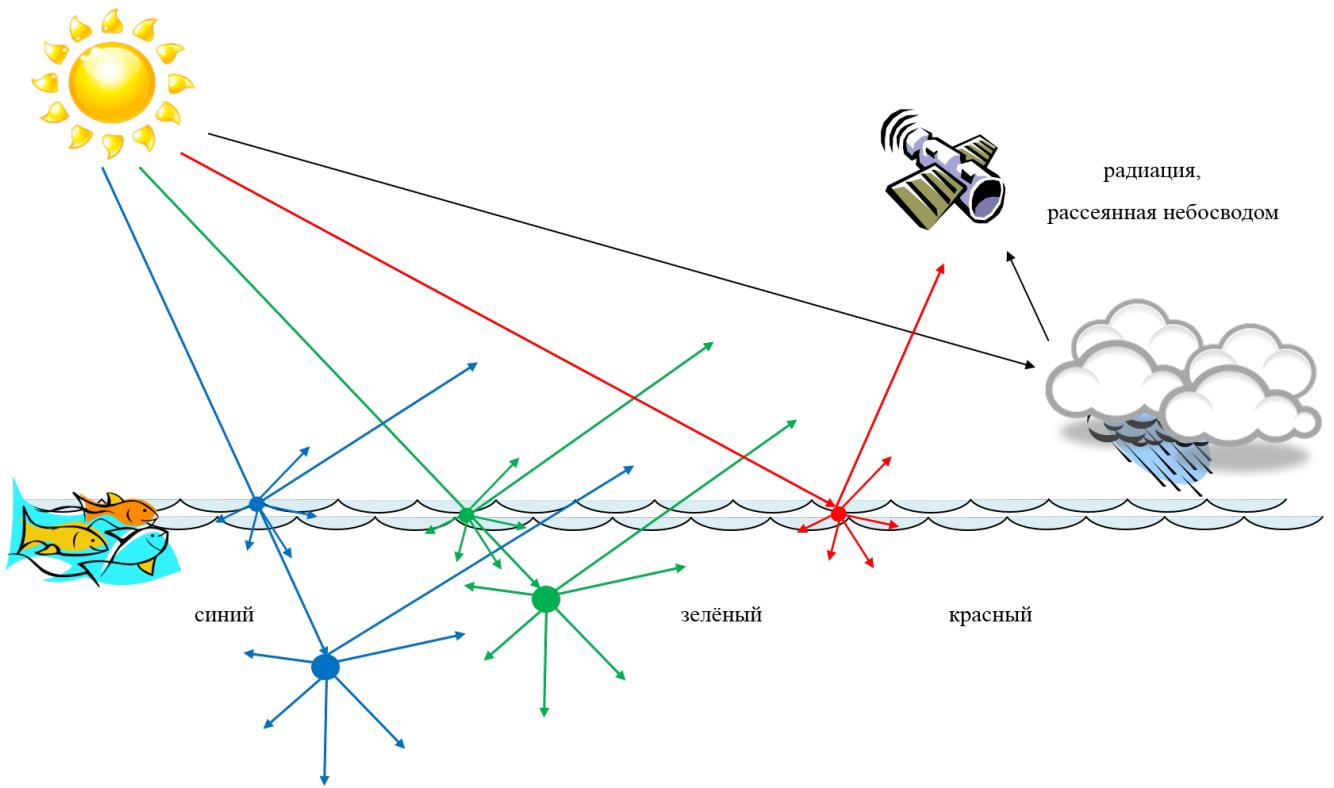


*Солнечный блик в середине дня должен был быть виден как симметричное яркое пятно, но ветер, течения, слики и проходящие суда сформировали на морской поверхности множество уклонов, благодаря которым мы наблюдаем сложную картину зеркальных отражений – множество “солнечных зайчиков”, которые, сливаясь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

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

Солнечный свет, проникая в толщу воды, рассеивается и поглощается водой, а также веществами, которые в ней растворены или взвешены. Фотоны, попадающие в водную среду, взаимодействуют с самими молекулами воды, органическим веществом, растворенным в воде, клетками микроводорослей, взвешенными веществами (такими как минеральная взвесь, детрит) и другими 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 l, 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 своей работе я использовал 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, позволяющих пользователям использовать данные об океанической поверхности внутри солнечного блика, которые раньше не представлялось возможным даже рассматривать для океанографических задач.

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

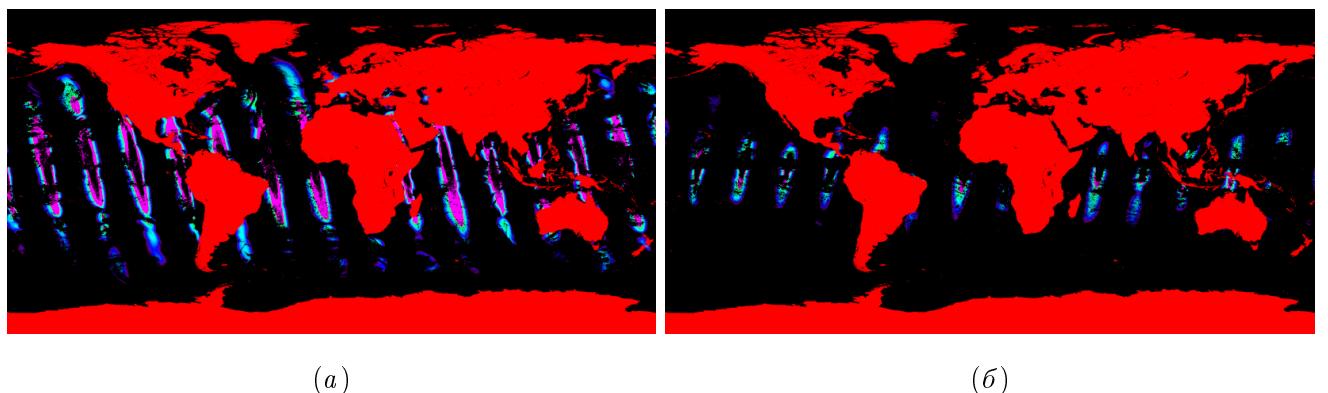
Таблица 1.1 – Основные характеристики некоторых спутниковых спектрометров

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 сигнатуры в солнечном блике вызваны пространственными вариациями шероховатости морской поверхности, вследствие взаимодействия океанических явлений с морской поверхностью. В случае с поверхностными плёнками, магнитуда наблюдаемых контрастов связана с типом слика (биогенного происхождения или нефти), а также, вероятно, с толщиной нефтяной плёнки, образующей слики. Таким образом, восстановление и численная интерпретация контрастов яркости в солнечном блике может существенно приблизить нас к лучшему пониманию механизмов подавления коротких волн.

На данный момент существует несколько статей, посвящённых проблеме восстановления аномалий шероховатости по высоко разрешающим изображениям солнечного блика. Бурдюгов с соавторами [Burdyugov et al., 1987] использовали модель Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a] для конвертирования сигнатур в солнечном блике в контрасти СКН, применив этот подход к аэрофотографиям поверхностных сливков, образованных прохождением серий ВВ. Также ранее обсуждался вопрос о реконструкции двумерного спектра возвышений поверхности волнения по изображениям солнечного блика (см., например, [Stilwell, 1969; Bolshakov et al., 1990a]). Эти данные использовались для исследования эволюции и трансформации двумерного спектра ветрового волнения [Bolshakov et al., 1990b].

В отличие от определения фоновых статистических свойств уклонов морской поверхности, насколько известно, спутниковые изображения солнечного блика никогда ранее не использовались для численных оценок аномалий СКН шероховатости морской поверхности. Поскольку яркость в солнечном блике, как и контрасти СКН, зависит от геометрии наблюдения и положения Солнца, возникают некоторые трудности с интерпретацией. Так контрасти СКН могут проявляться как сочетание тёмных/ярких, так и ярких/тёмных сигнатур (см., например, [Hu et al., 2009] для нефтяных сливков; [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 зеркальная точка наблюдается под разными углами, 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 горизонтальной зеркальной точке. Однако в природе мы часто наблюдаем другую картину, когда множество “солнечных зайчиков” формируют сложную “бликующую” картину на взволнованной водной глади.

Поскольку поверхность океана не является зеркальной, 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.

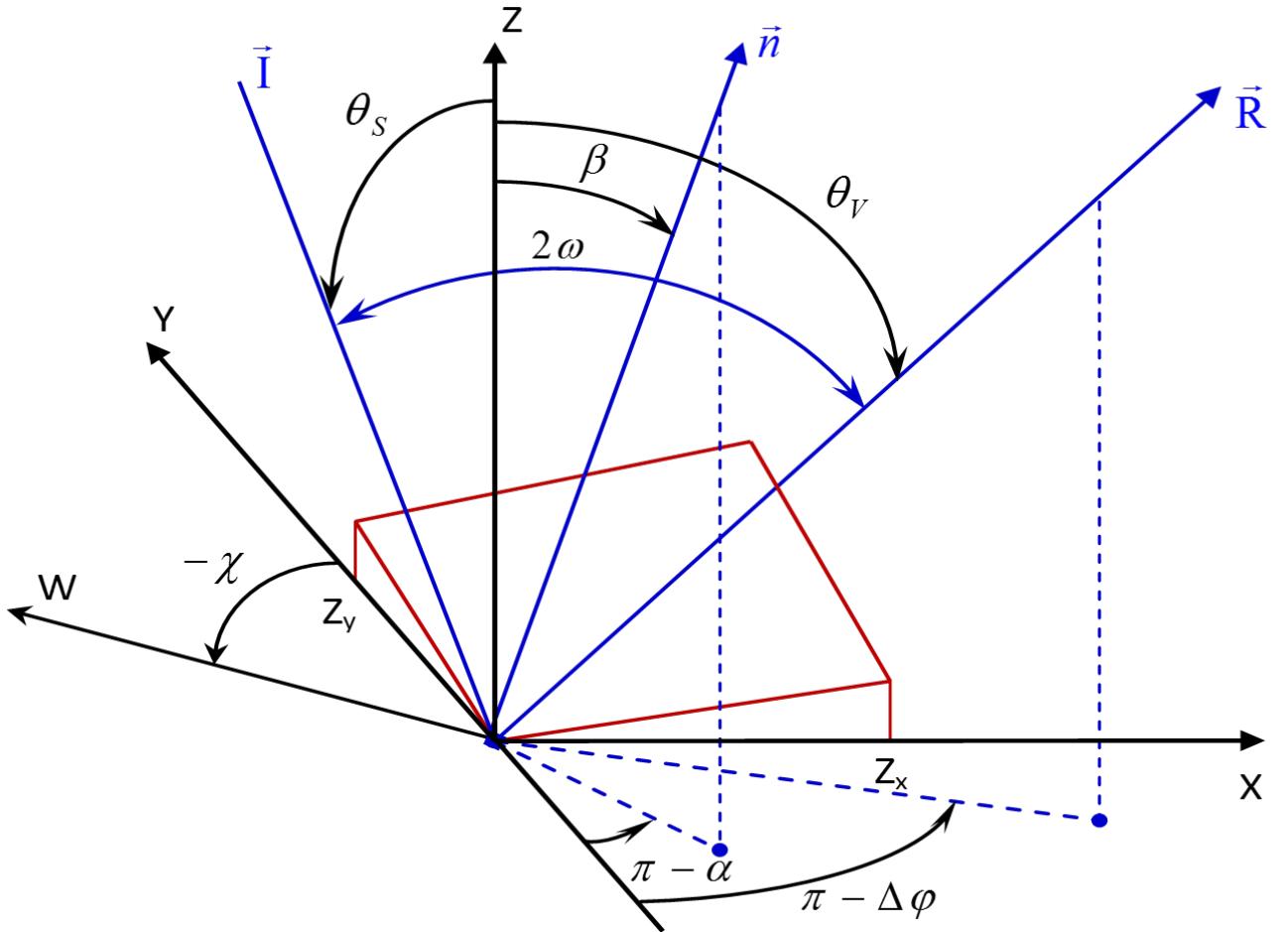
Солнечный блик несёт в себе очень ценную информацию о статистических характеристиках морской поверхности – среднеквадратичном наклоне (СКН), асимметрии и кривизне, что было отчётливо показано в пионерских работах Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b, 1956], а также описано в недавней работе [Bréon and 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 [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) можно рассматривать как фундаментальное, и все предположения относительно формирования яркости поверхности в солнечном блике относятся к предположению о виде 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

Помимо выявления зависимости от скорости ветра, соотношение (1.2) предоставляет дополнительные возможности исследовать поверхностные явления на море (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  $B$  обрабатываемых 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 солнечного 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, слизовой 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:

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

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.

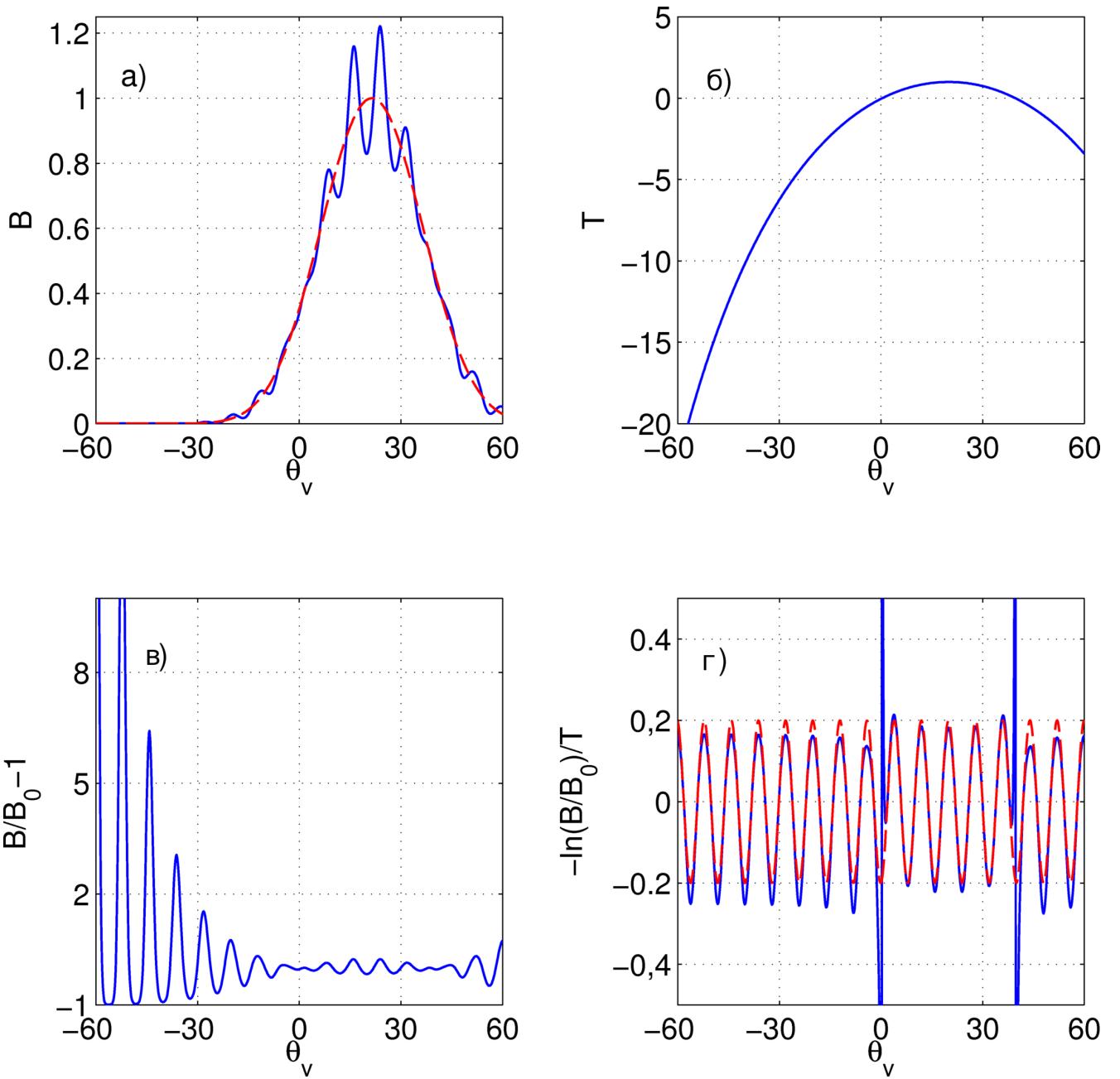
### 1.3.4 Пример восстановления СКН модельного блика

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  $\varphi_s = 0$ ,  $\theta_s = 20^0$ , 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  $\theta_v = 0^0$  и  $\theta_v = 40^0$ . 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. Тем не менее, на периферии блика можно заметить некоторый шум, при этом значения СКН, восстановленные на склоне, такие же, как и исходные. Сингулярное поведение восстановленных значений СКН возле зон инверсии контрастов следует из стремления передаточной функции к нулю в этих областях.

Ожидается, что окологауссова функция ПРВ имеет место при умеренных ветрах, но мгновенная ПРВ уклонов морской поверхности может кардинально отличаться. Поскольку “истинная” ПРВ определяет двумерную форму солнечного блика, соблазнительно определить передаточную функцию  $T$ , заданную уравнением (1.7) напрямую, без априорных предположений модели ПРВ.



(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 разработанного метода к данным 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.

Сенсоры MODIS установлены на двух спутниках наблюдения за Землей Национального управления США по аeronавтике 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 мире 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/>

Изображения инструмента MODIS формируются 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, прибор MERIS измеряет отраженную Землей солнечную радиацию по 15-и каналам 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.

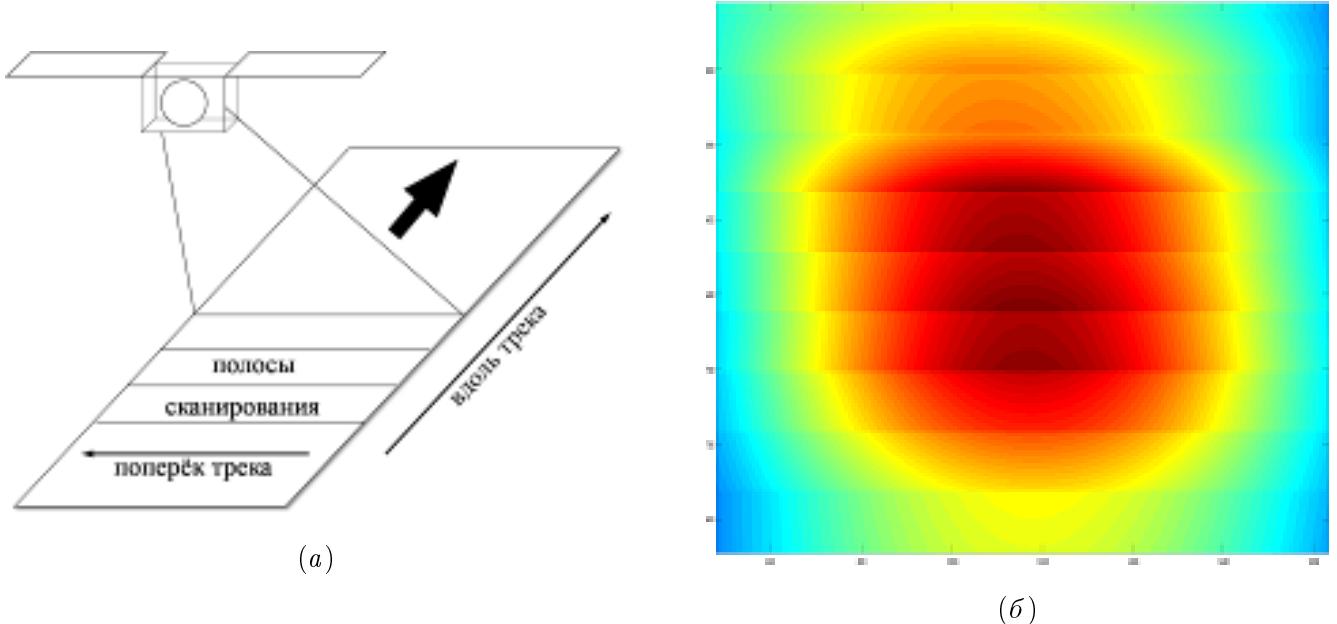
Еще раз повторим, что для исследования солнечного блика наиболее предпочтителен красный канал, поскольку свет в красном канале поглощается в “тонком” поверхностном слое океана [Jerlov, 1976], и, таким образом, не так чувствителен к “цвету” водного столба, а также не чувствителен к поверхностной температуре.

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, и, 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 бликовой области 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 инструмента MODIS в области солнечного блика делится на полосы и в дальнейшем двумерное поле яркости в каждой из полос обрабатывается отдельно.

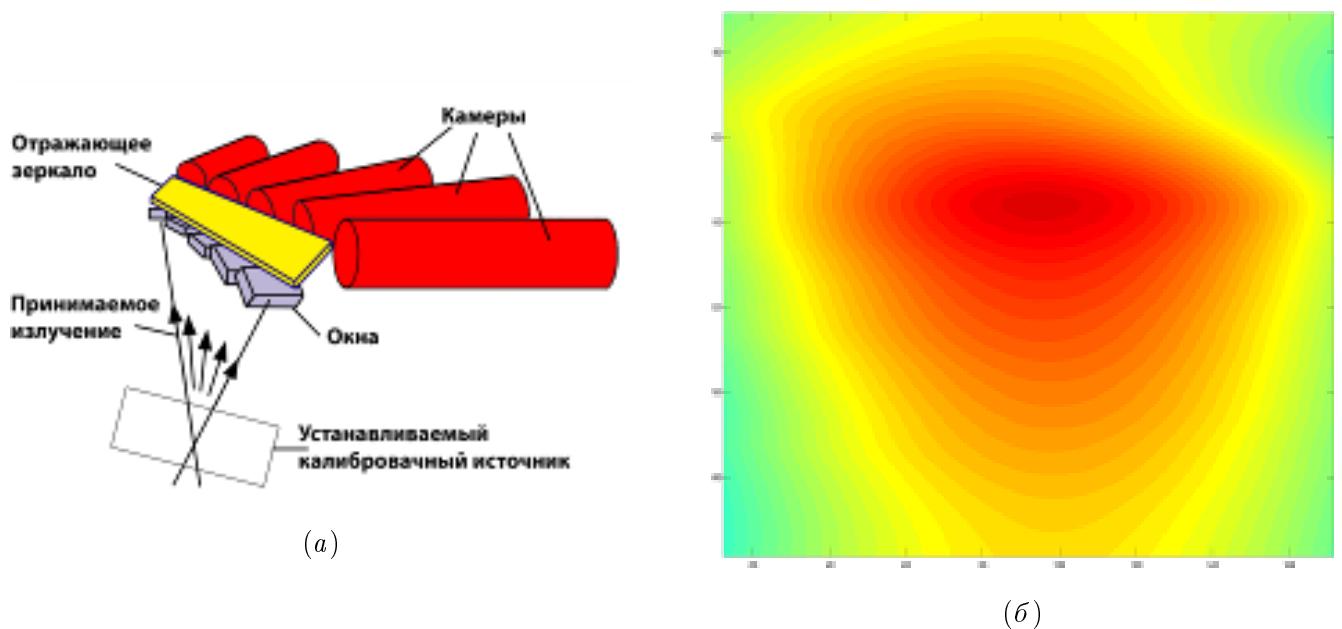
MERIS – спектрометр с постоянным сканированием. Он ведёт сканирование земной поверхности при помощи ПЗС матриц, обеспечивающих обзор поперёк траектории полета, а изображение вдоль полета формируется благодаря движению спутника. MERIS обладает широким углом обзора ( $68.5^\circ$ ) и шириной полосы 1150км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

Угол обзора 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. В случае с данными MERIS, в силу особенностей формирования спутниковых снимков, алгоритм применим ко всей области солнечного блика, как на фотографических изображениях.



*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

Для наглядности описания работы алгоритма 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 и не включённые в неё, 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 [Мясоедов и Кудрявцев, 2011]: “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 однотипный язык программирования, используемый в этом пакете.

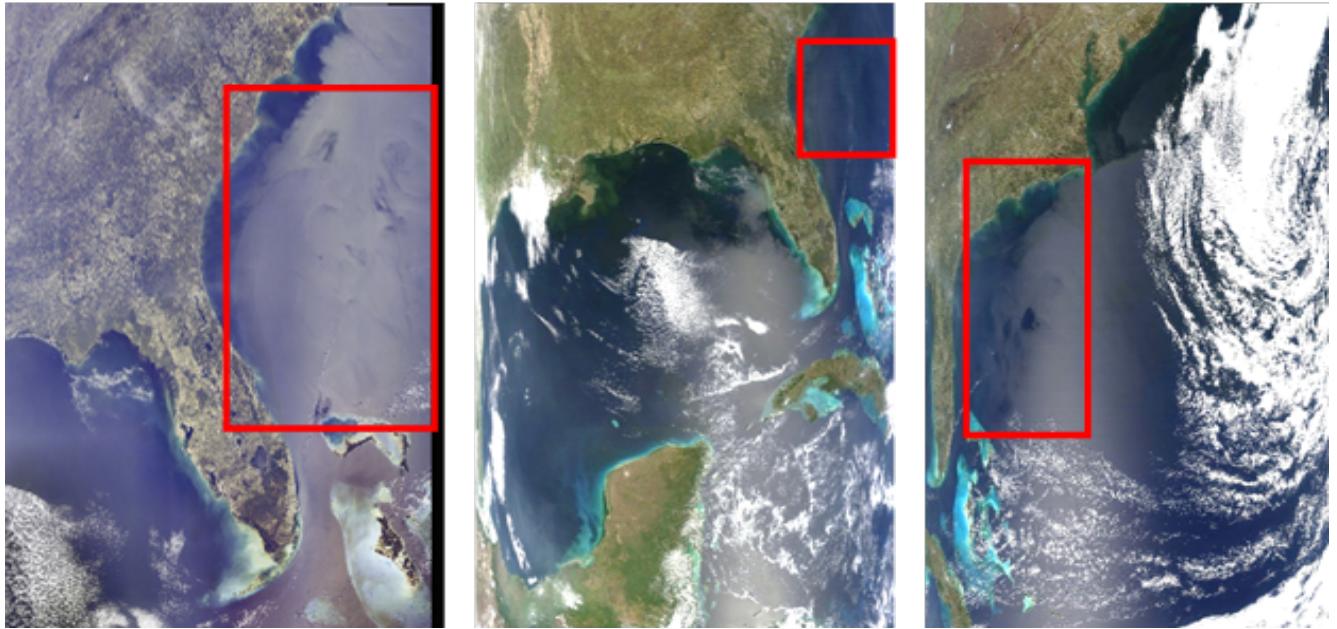
Python (англ. Python – питон, произносится пайтон; в русском языке распространено название питон) – высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода.

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

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

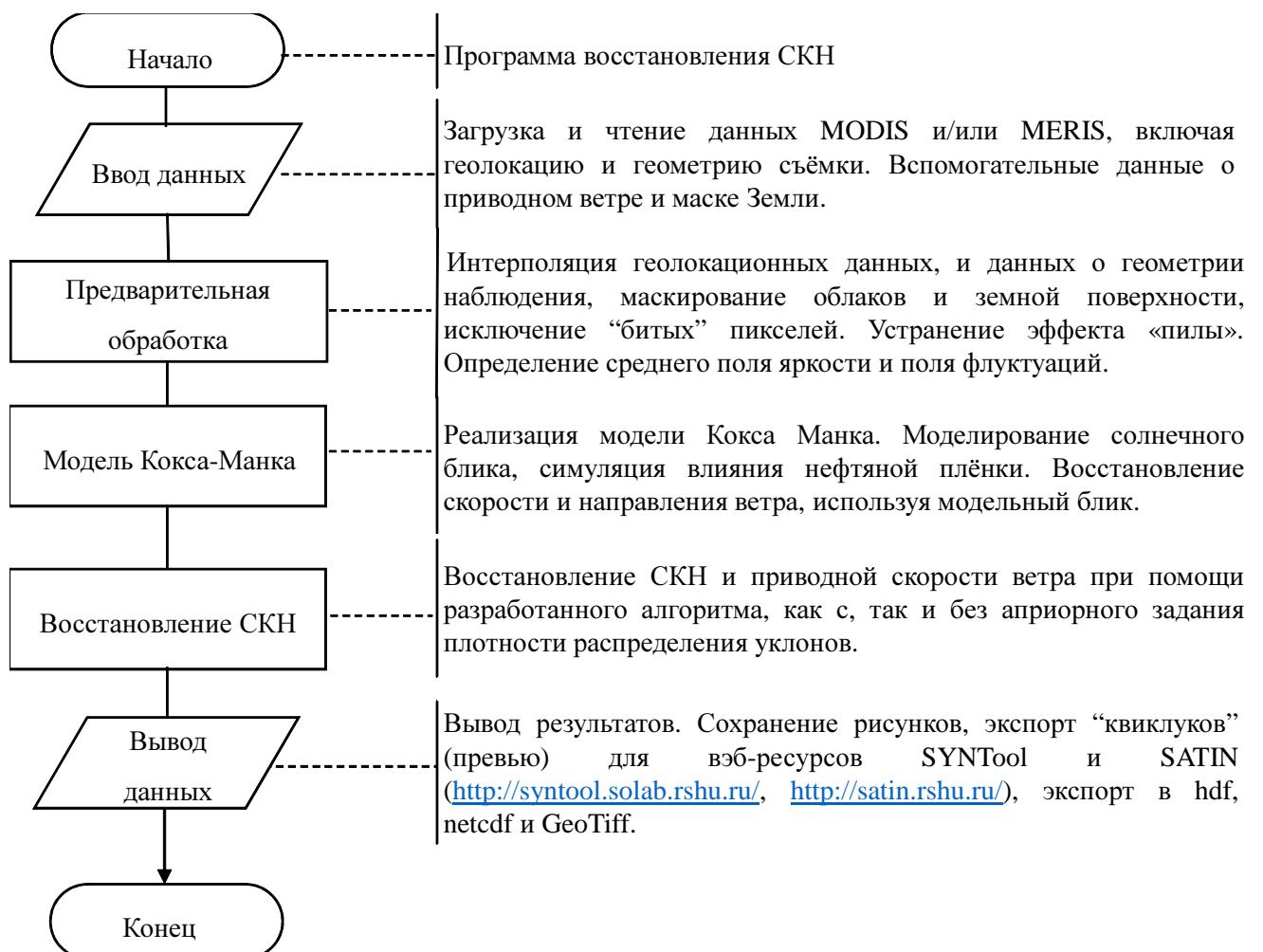
### 1.5.3 Процедура восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям

Обобщение этапов процедуры восстановления СКН по спутниковым оптическим изображениям MODIS и MERIS представлено в виде линейной алгоритмической структуры на Рисунке 1.9.

Следуя общей схеме процедуры восстановления СКН, представленной на Рисунке 1.9, применим методологию, изложенную в предыдущих разделах (подробнее см. раздел 1.3.3) к данным рассматриваемого примера:

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 флюктуаций
  - 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 (ЗИК)
7. Расчёт карт углов тильтирования и азимута (ТАК)



*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).

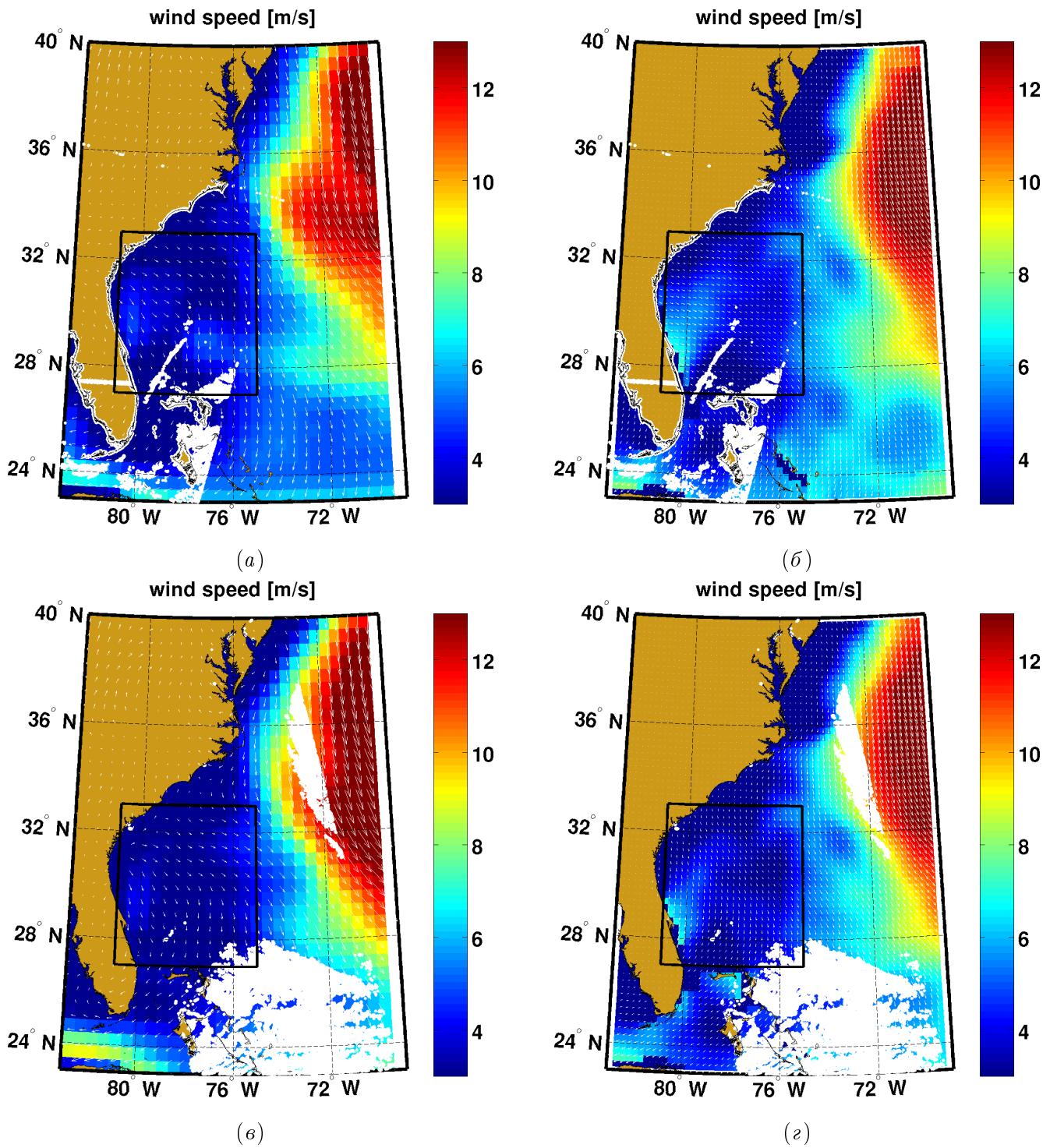
Данные о скорости и направлении приводного ветра можно использовать любые, при этом, чем точнее задаются эти параметры, тем точнее будет работать алгоритм восстановления СКН с априорным заданием плотности распределения вероятностей уклонов.

В данном исследовании применялся модельный ветер NCEP GFS [[Saha et al., 2006](#)] и ветер, интерполированные с различных скаттерометров, Blended Sea Winds [[Zhang et al., 2006](#)].

Глобальная система прогнозирования GFS (англ. Global Forecast System), оперируется 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.

Смешанные морские ветра (англ. 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.

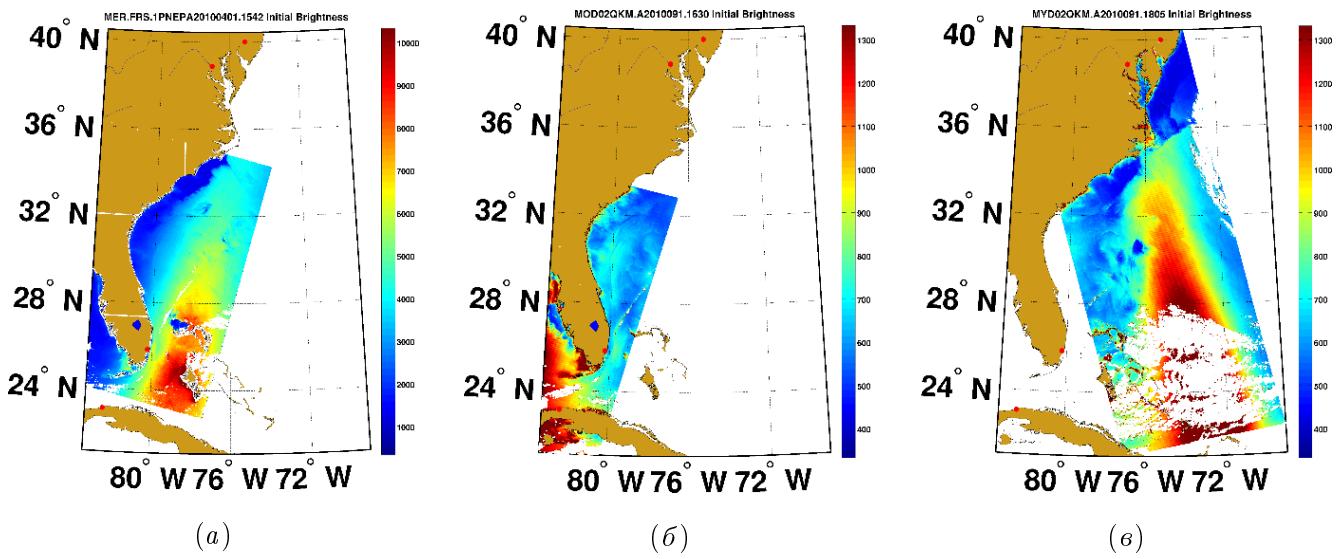


(a) и (в) – скорость и направление ветра в 15 и 18 часов 01 Апреля 2010г., соответственно, взятые из модели NCEP GFS. (б) и (г) – скорость и направление ветра в 15 и 18 часов 01 Апреля 2010г., соответственно, построенные по данным Blended Sea Winds. Здесь и далее, чёрным контуром выделен район выбраненный 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 видны отличия в разрешающей способности данных NCEP GFS и Blended Sea Winds, соответствующей 0.5 и  $0.25^\circ$ . 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 можно было увидеть множество удивительных явлений на поверхности Океана и показать, как удачно работает разработанный алгоритм и программы обработки в разных ситуациях. Так, например, можно отметить, что геометрия наблюдений отличается для всех трёх примеров. 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.

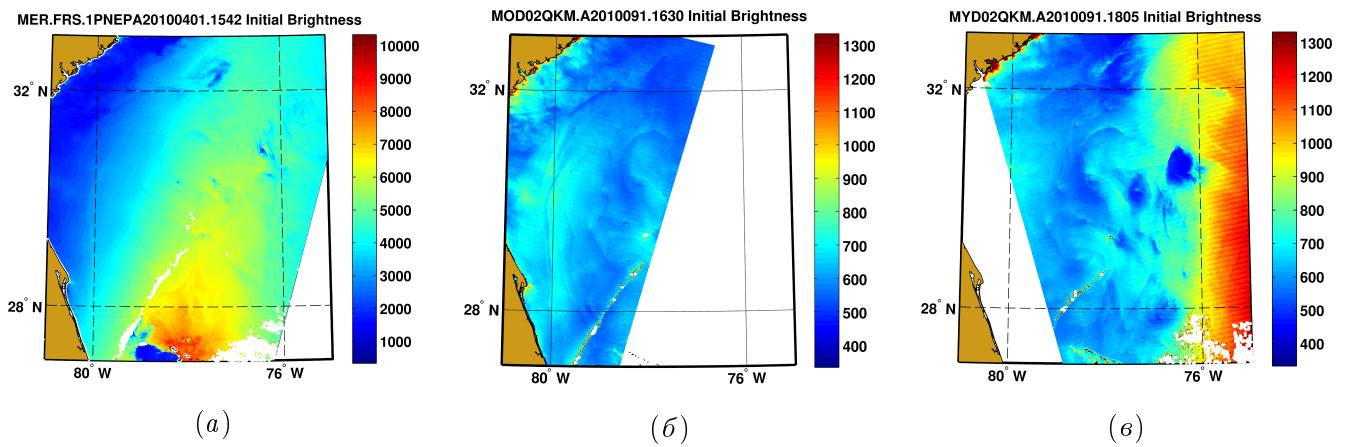


(а) MERIS, (б) MODIS/Terra, (в) MODIS/Aqua. Изображения получены 01 Апреля 2010 г.  
в 15 ч. 42 мин., 16 ч. 30 мин. и 18 ч. 05 мин., соответственно

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 в этом примере 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.

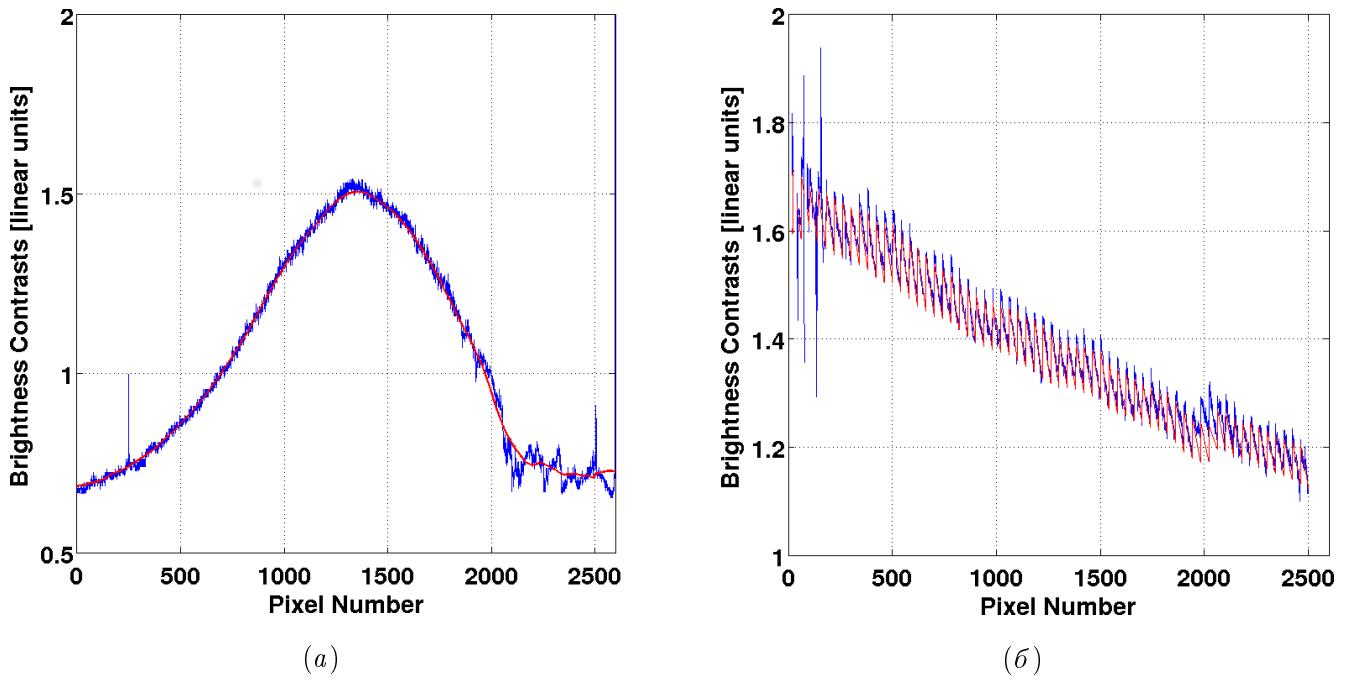
Для восстановления СКН при помощи разработанного алгоритма без априорного задания плотности распределения уклонов, следуя выражениям (1.6) и (1.7), необходимо исходные яркости изображения в красном канале представить в виде суммы среднего значения  $\bar{B}$  (см. Рисунок 1.14) и вариаций  $\tilde{B}$  (см. Рисунок 1.15). Прежде чем выполнить эту процедуру, производится интерполяция геолокационных данных и данных о геометрии наблюдения, маскирование облаков и земной поверхности, исключение “битых” пикселей.



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

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.

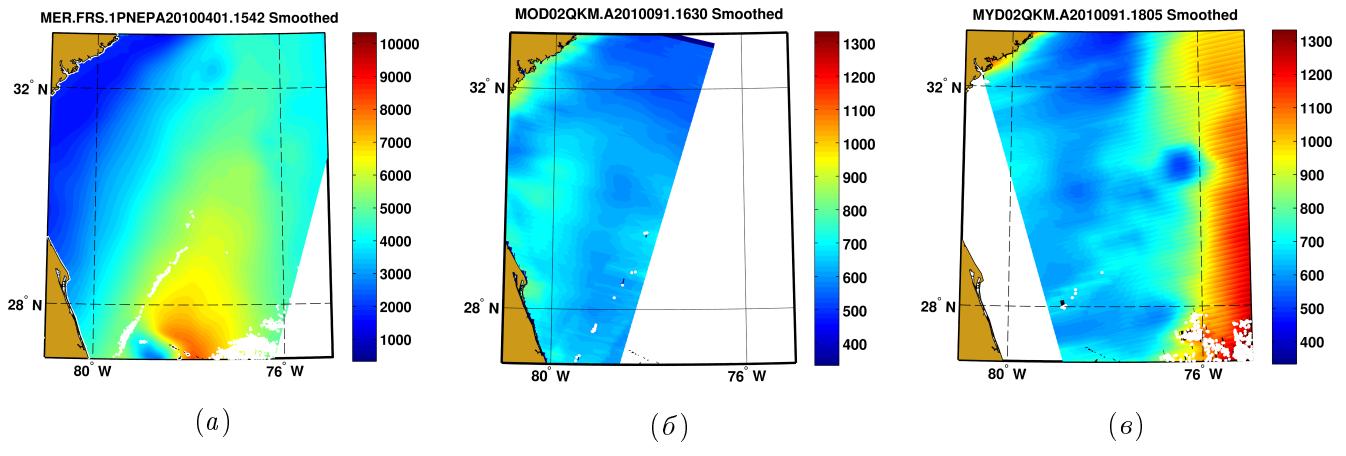


*Пример сечения вдоль (б) и поперёк (а) блика, взятое для контрастов яркости изображения MODIS/Aqua, представленного на Рисунке 1.11, (а). Синим цветом изображены исходные яркости в красном канале, а красным – усреднённые. На сечении, взятом вдоль блика (б), отчётливо видна “пилообразная” структура (см. 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 флюктуаций, разработанный способ разделения исходных яркостей также позволил добиться устранения эффекта “пилы”.

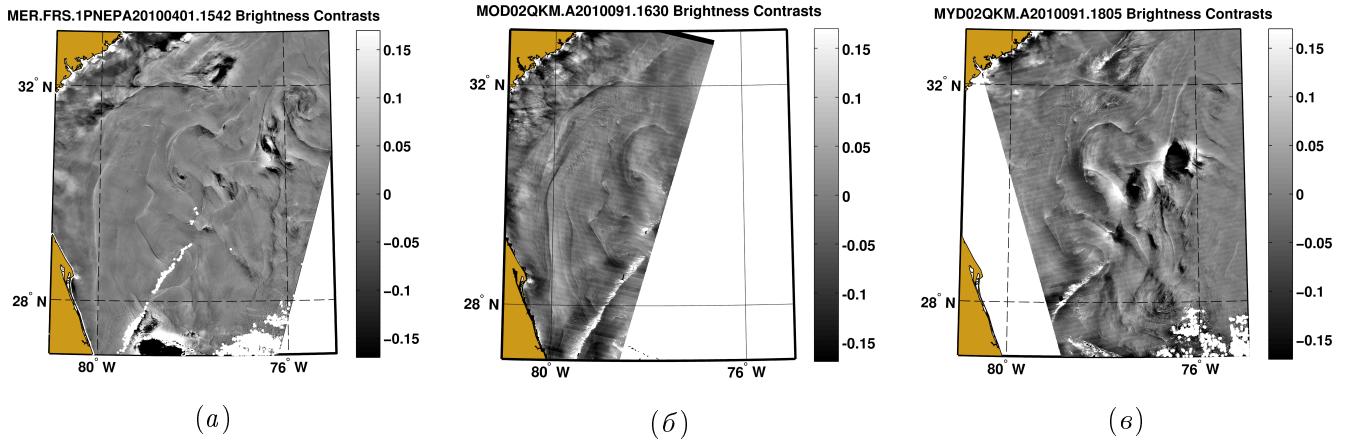
Поля средней яркости солнечного блика (масштаб осреднения 30x30 км<sup>2</sup>) для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунке 1.14.



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

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

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



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

Рисунок 1.15 – Контрасты 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, a), нежели на изображениях передаточной функции MODIS (Рисунки 1.16, б, 1.16, в). Объяснить наблюдаемое элементарно, если обратиться к геометрии наблюдений. На Рисунках 1.17 и 1.18 представлены карты углов тильтирования и азимута (ТАК) и карты зон инверсии контрастов (ЗИК), соответственно. Обратимся сначала к рассмотрению ТАК.

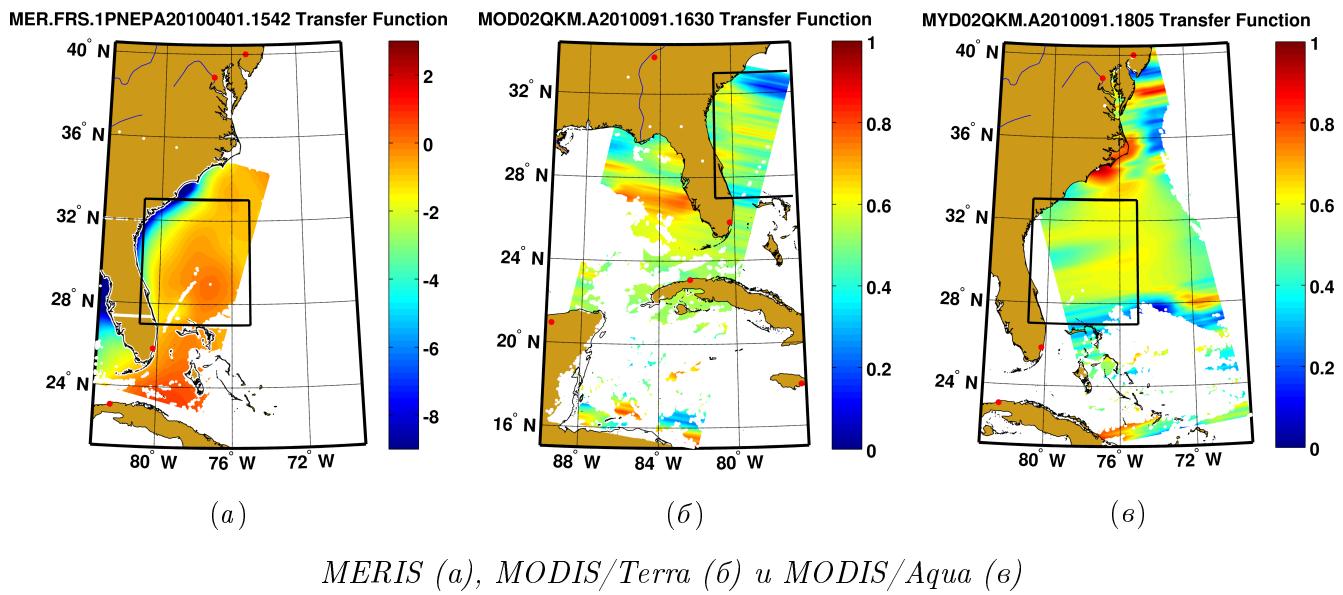


Рисунок 1.16 – Передаточная функция для связи контрастов вариаций яркости (Рисунок 1.15) и контрастов СКН (Рисунок 1.16)

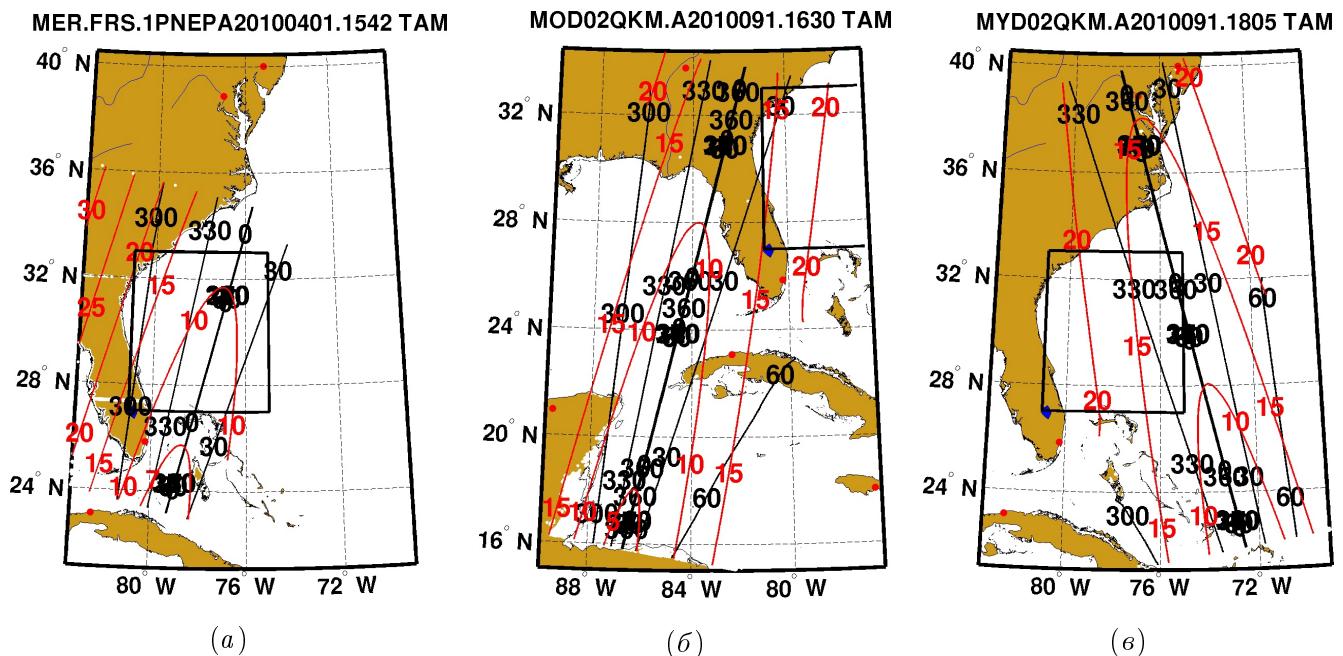


Рисунок 1.17 – Карты углов тильтирования и азимута (ТАК), обусловленные геометрией наблюдений и положением солнца

ТАК характеризуют геометрию отражения/наблюдения, т.е. геометрию солнечного блика. Например при угле тильтирования (красные линии)  $0^\circ$  образуется центральная зеркаль-

ная 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  $360^\circ$  и  $180^\circ$ .

По приведённым на Рисунке 1.18 ЗИК, 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 ТАК и положения зон инверсии контрастов для изображения MODIS/Terra, соответственно. Область на изображении специально охватывает большую часть Мексиканского залива, чтобы показать насколько далеко от центра блика находится область исследования.

Расчёт ТАК проводился, исходя из уравнения (1.4), используя формулы для расчёта уклонов (1.3), ЗИК же легко получить если приравнять передаточную функцию (1.7), (1.15) к 0.

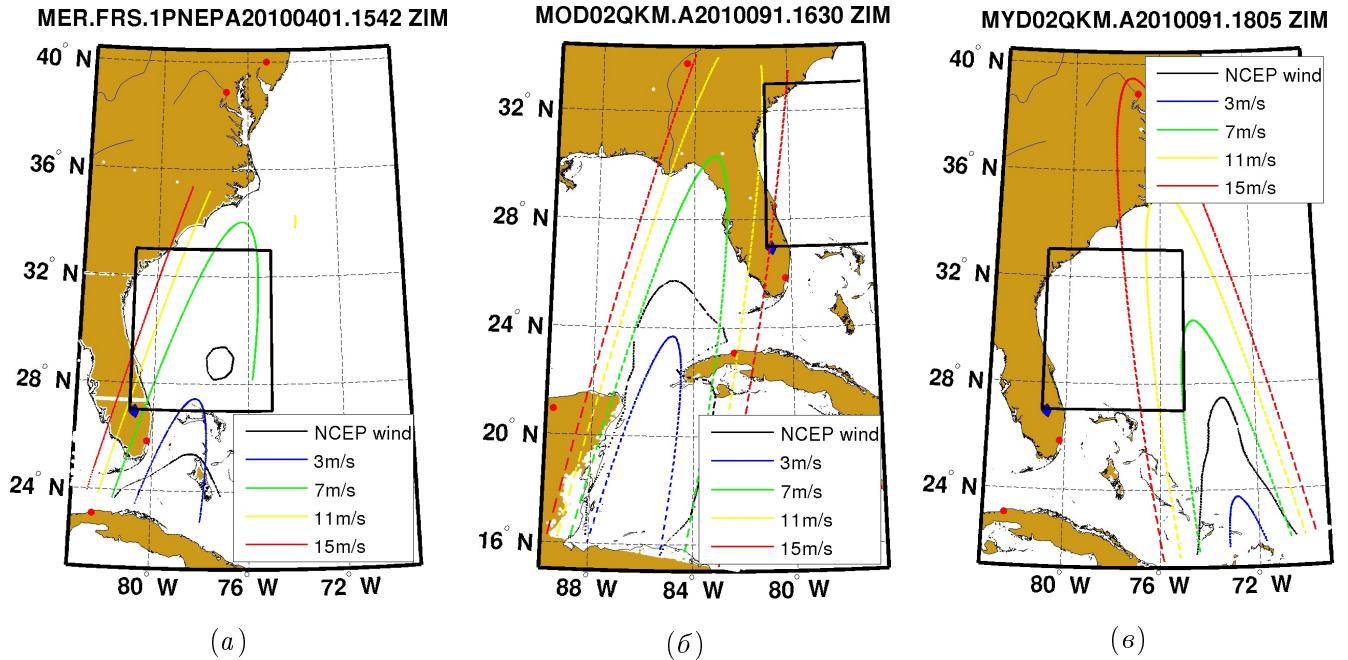
ТАК и ЗИК позволяют не только упростить анализ сложных изображений, но и значительно повысить достоверность и точность количественных оценок наблюдаемых явлений.

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

Рассмотрим ещё один любопытный пример. Возьмём сечения контрастов яркости  $\tilde{B}/B_0$  изображений MODIS Terra и Aqua. На Рисунке 1.20, а приведена увеличенная область с проведённым сечением по изображению MODIS Terra, представленного в полном масштабе на Рисунке 1.15, б, а на Рисунке 1.20, б – MODIS Aqua. Сначала рассмотрим геометрию наблюдения данного района приборами MODIS, установленными на разных спутниках, в чём помогут рисунки ТАК. 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, б изображены сами сечения, взятые по изображениям MODIS Aqua (чёрная кривая) и Terra (красная кривая). Сразу бросается в глаза, что формы сечений очень похожи. Это является следствием того, что распределение уклонов морской поверхности

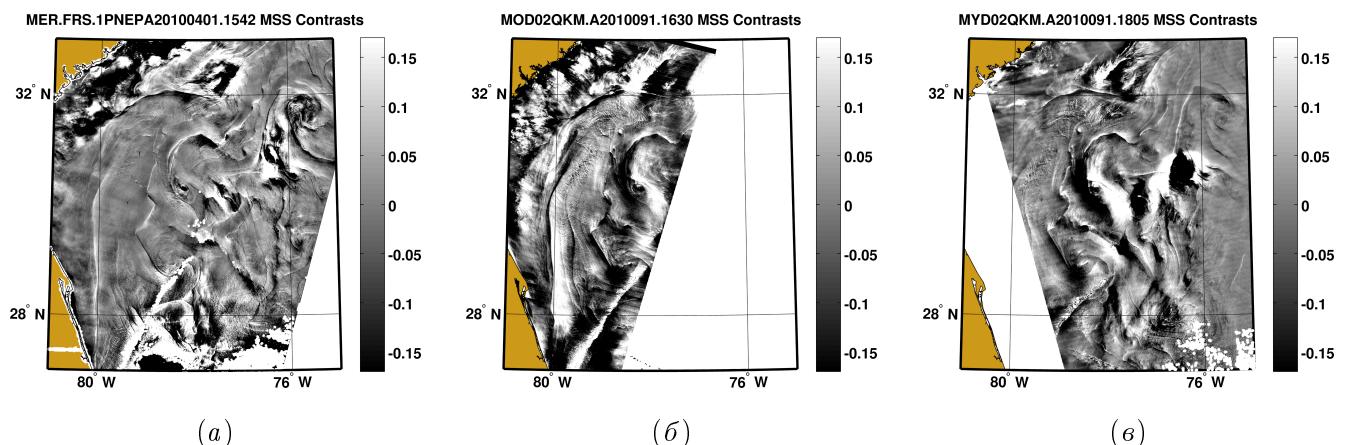
сти азимутально практически изотропно ( $\alpha = s_c^2/s_u^2 = 1$ ). А это, в соответствии с моделью формирования яркости морской поверхности Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a], приводит к тому, что наблюдаемые контрасты яркости и СКН не зависят от азимута наблюдений (относительно Солнца).



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

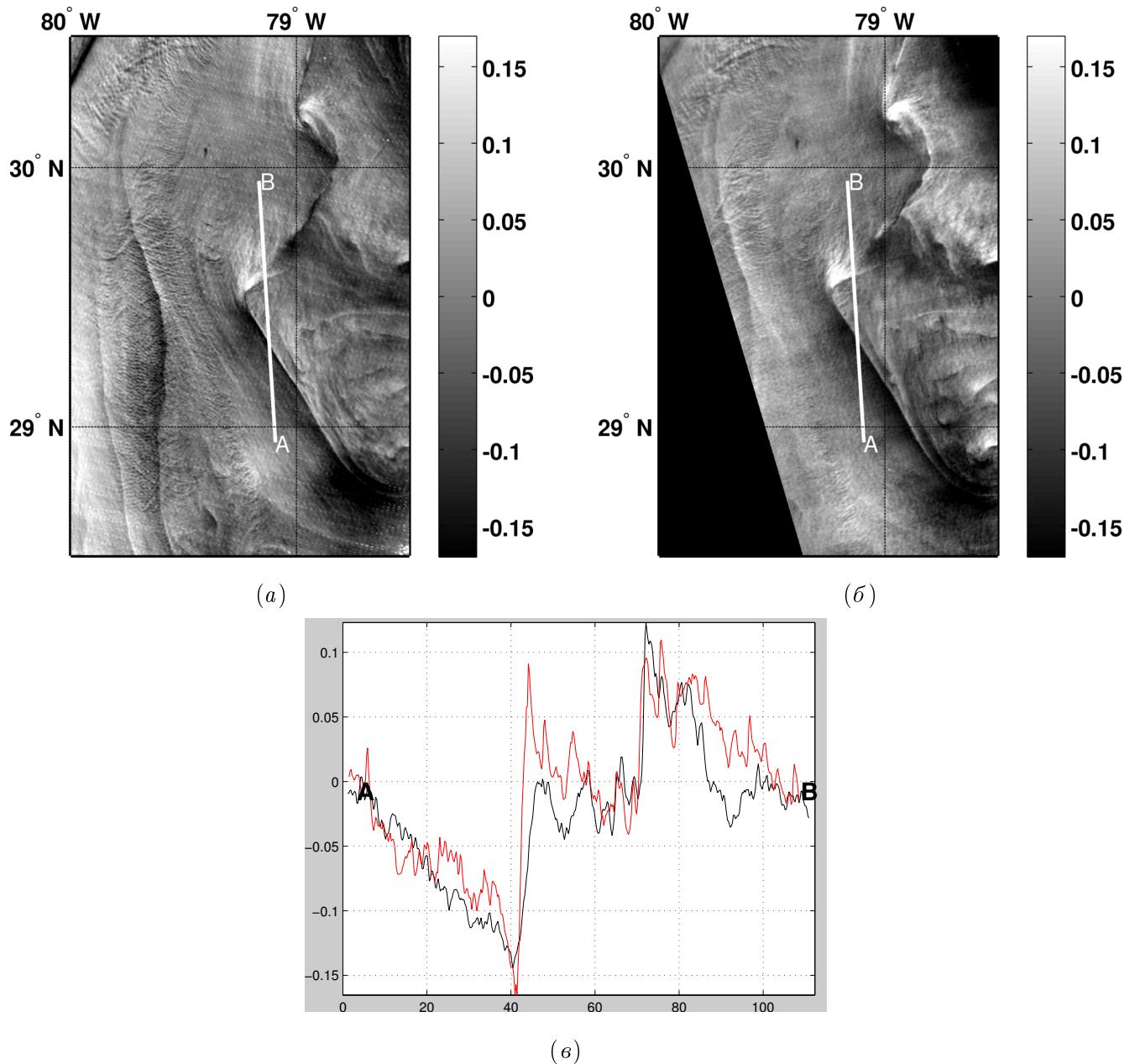
Чёрная кривая - ЗИК, рассчитанная для скорости ветра по модели *NCEP*, синяя, зелёная, жёлтая и красная - для 3, 7, 11 и 15 м/с, соответственно

Рисунок 1.18 – Карты зон инверсии контрастов (ЗИК) для различных скоростей ветра



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

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



*Изображения MODIS/Terra (а) 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 линейном разложении исходной яркости на две составляющих: 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.

Для связи вариаций яркости и СКН контрастов вводится передаточная функция.

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 углов тильтирования и азимута (ТАК), а также карты зон инверсии контрастов (ЗИК).

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*), предназначенног 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

Поменять/Проверить eq refs в Главе 2

единицы измерения в Главе 2 textit

Нумерация Рисунков

Нумерация Рисунков ... а, б, в

Кавычки “”

см. раздел 2.3 и Рисунок 24 ниже

Цитирования citer

Градусы °

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.

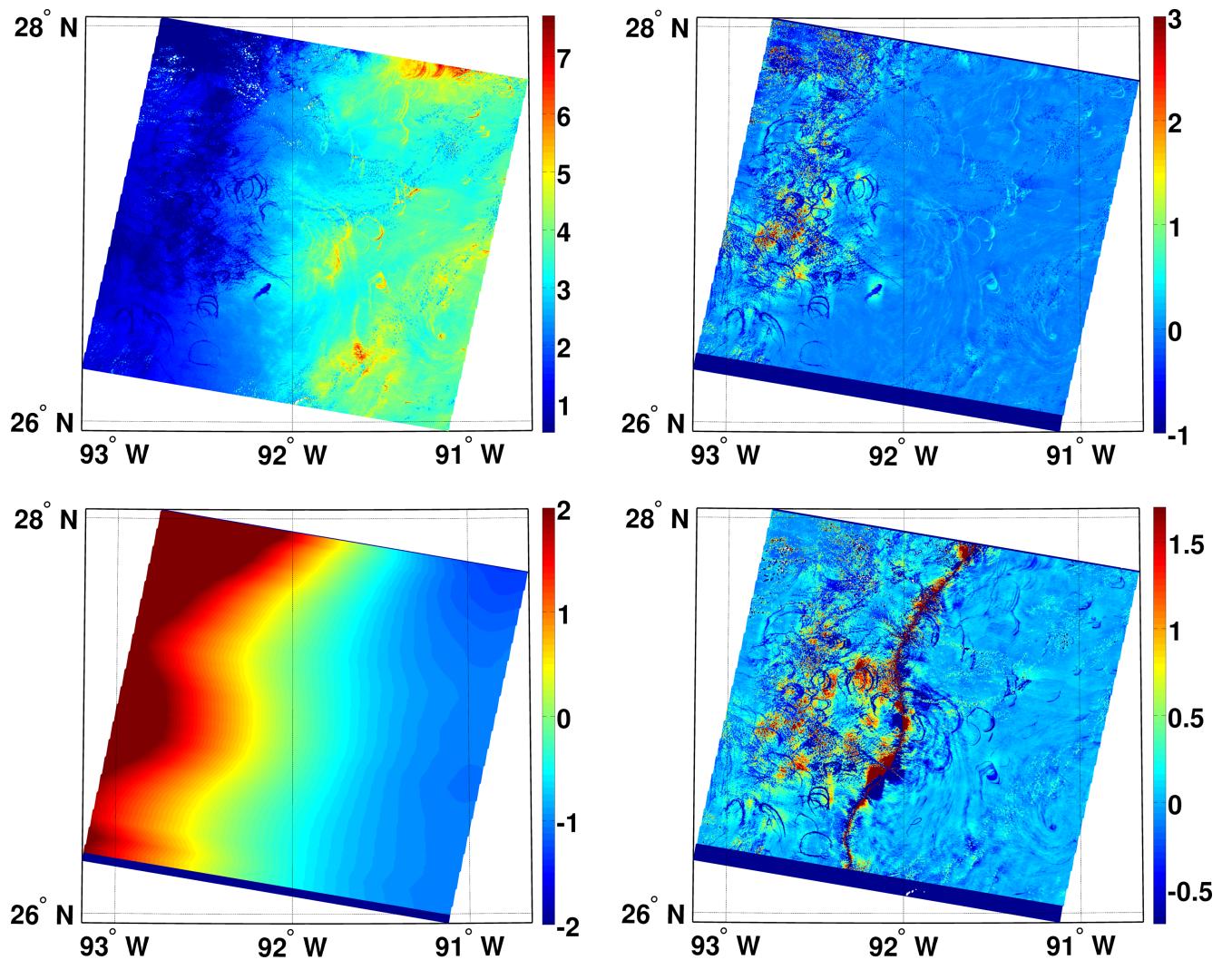
## 2.1 Нефтяные плёнки природного происхождения

Для начала обратимся к изображениям MODIS Мексиканского залива, отражающим интересные особенности яркости солнечного блика, относящиеся к разливам нефтепродуктов природного происхождения. Изучая эти изображения, Ху с соавторами [Hu et al., 2009], обнаружили, что контрасты поверхностных слик в солнечном блике бывают как яркими, так и тёмными. Контрасты слик, как говорится в статье [Hu et al., 2009], зависят от угла между направлением визирования и направлением зеркального отражения  $\theta_m$ . В рассматриваемом случае контрасты слик меняли знак при  $\theta_m \approx 12^0$ , оставаясь положительными 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 слик составляют  $\tilde{s}^2/s_0^2 \approx 0.3–0.4$ ,



(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 сливков в солнечном блике. (верхний правый) Контрасты яркости  $\tilde{B}/B$ . (нижний левый) Передаточная функция. (нижний правый) Восстановленные контрасты CKH

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

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 сливков, образованных смесью рыбьего жира, моторного масла и дизельного топлива. Также стоит обратить внимание, что упругость такой поверхностной 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 определя-

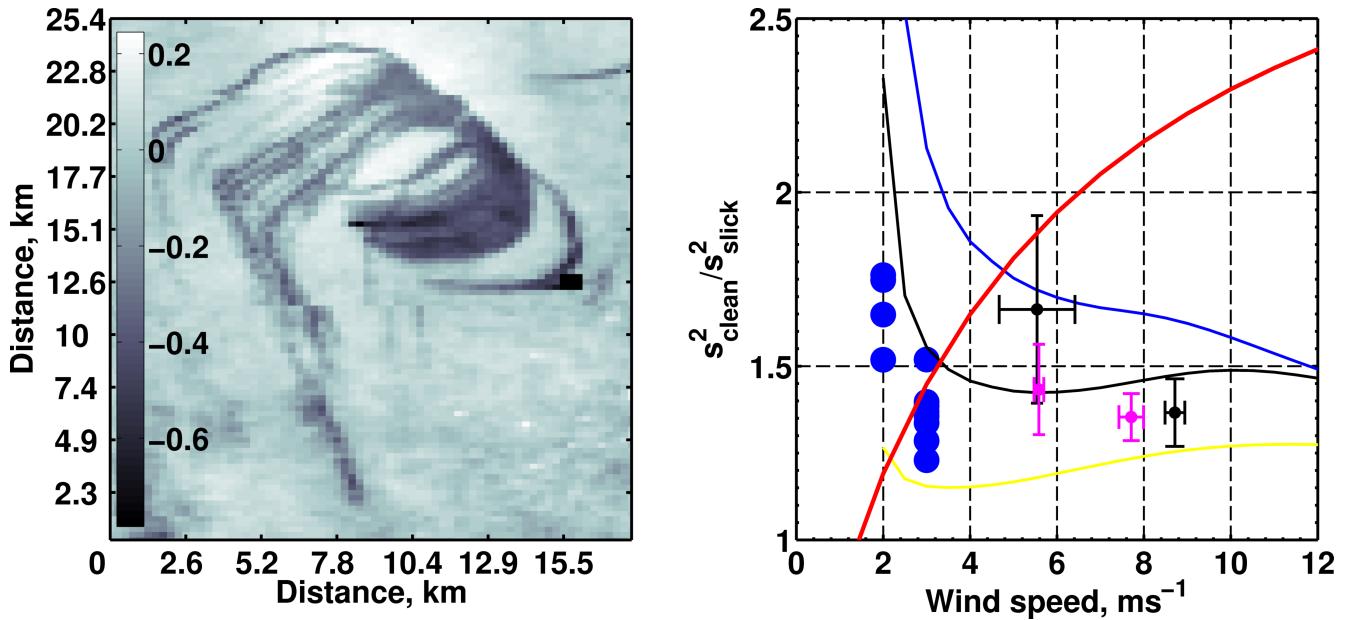
ет подавление коротких ветровых волн, меньшее значение упругости должно приводить к меньшим контрастам в сликах (см. раздел 2.3 и Рисунок 2.10 ниже).

На Рисунке 2.2 (слева) показан увеличенный фрагмент Рисунка 2.1 (нижний левый), содержащий «индивидуальные» нефтяные слики, 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 16 приведены контрасты СКН биогенных сликов, полученные Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954b], которые определены как отношение регрессионных прямых СКН для чистой и сливовой поверхности моря. Как следует из Рисунка 2.2 (справа), при малых скоростях ветра, наблюдаемые контрасты СКН нефтяных сликов находятся в соответствии с контрастами, обнаруженными Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954a,b] для сликов из смеси рыбьего жира, но при умеренных ветрах ( $>4\text{m}/\text{s}$ ). Отсюда можно заключить, что контрасты нефтяных сликов систематически ниже контрастов рыбьего жира.

## 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.

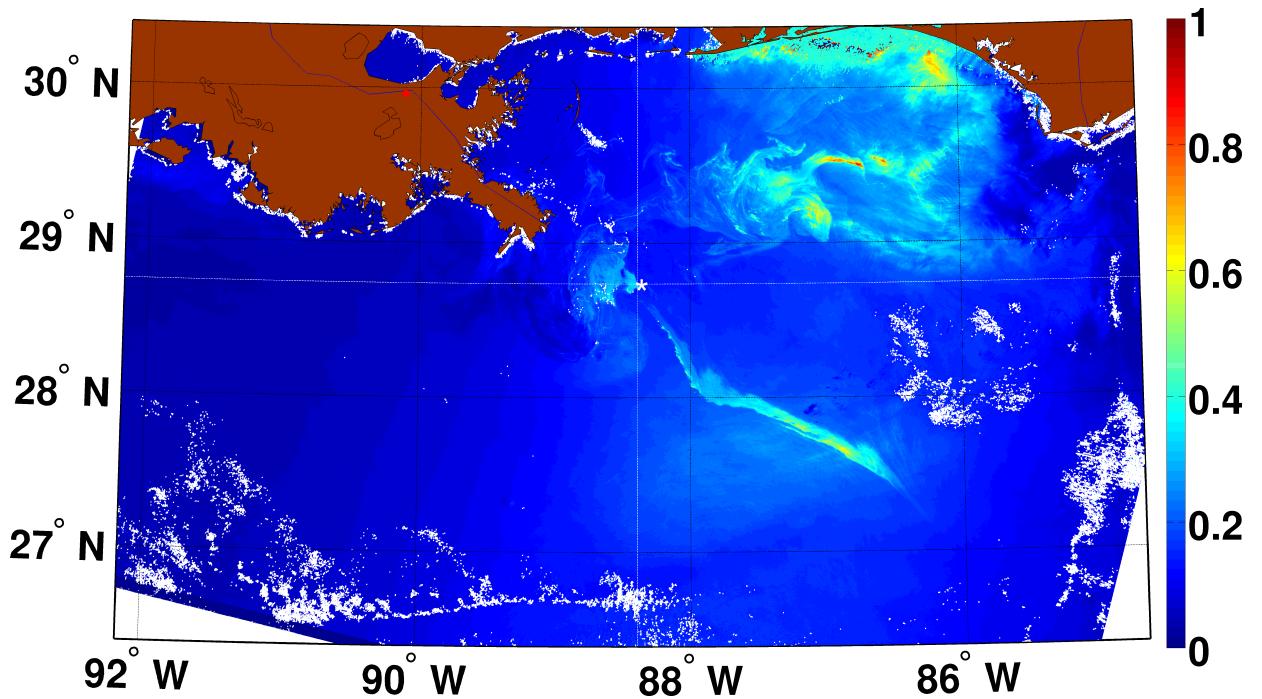
Рассматриваемые изображения обработаны по методологии, изложенной в предыдущей главе (см. Глава 1, раздел 1.3). Поля средней яркости солнечного блика  $B_0$  (масштаб осреднения  $30 \times 30 \text{ км}^2$ ) для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунках 2.4, а и 2.4, б. Передаточная функция для данных MODIS, показана на Рисунке 2.4, з, напрямую рассчи-



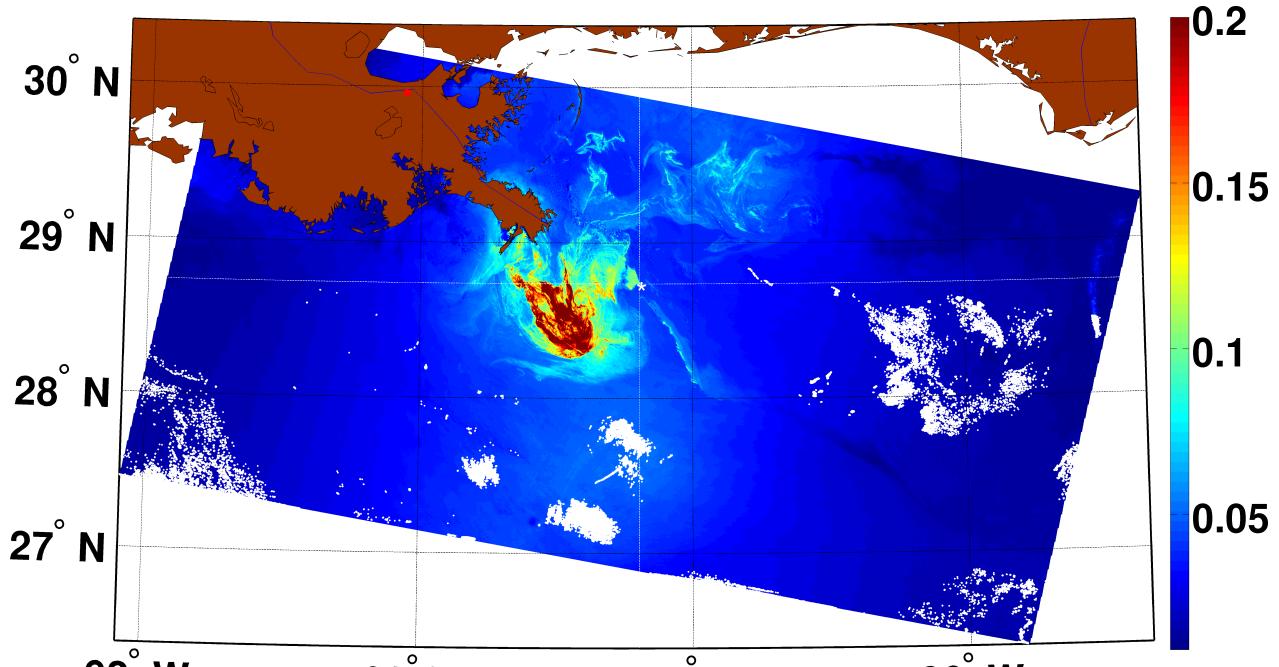
(слева) Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 2.1, содержащем «индивидуальные» нефтяные слики. (справа) Контрасты СКН нефтяных сливков, полученных по изображению MODIS на Рисунке 2.1 (синие точки при скоростях ветра 2-3 м/с), по изображению MERIS на Рисунках 2.6 и 2.8 (фиолетовые точки с ошибками), и по изображениям MODIS (чёрные точки с ошибками). Красной кривой показаны контрасты СКН рыбьего жира из результатов Кокса и Манка [Cox, Munk, 1954a, 1954b]. 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 слики, и зависимость контрастов от скорости ветра

тыается 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, б.



(а)

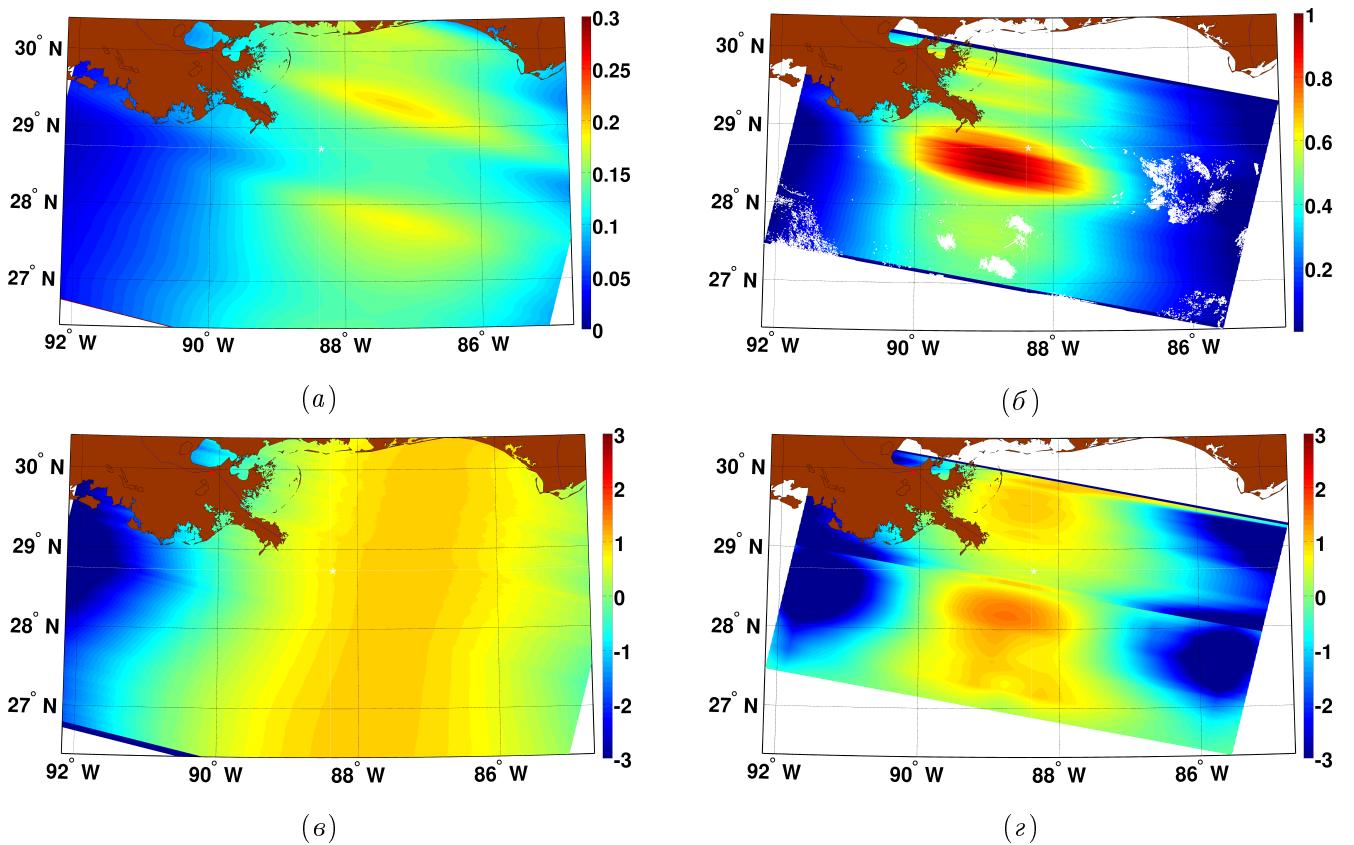


(б)

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

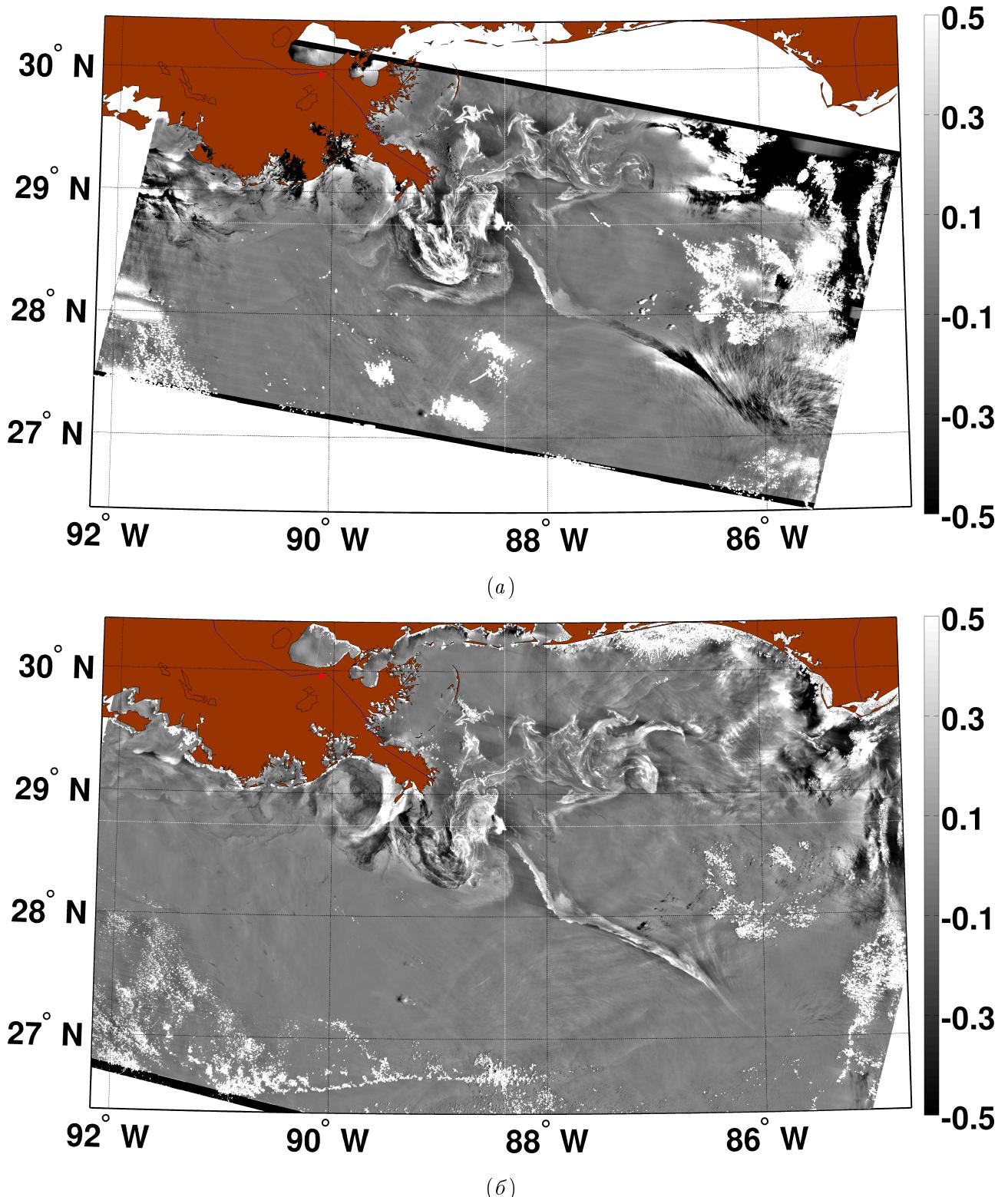
Рисунок 2.3 – Фрагмент исходного изображения MERIS/Envisat в красном канале ( $681\text{ нм}$ ), полученное 24 Мая 2010, 16:17 GMT (а) и композитное изображение двух снимков MODIS/Terra в красном канале ( $645\text{ нм}$ ), полученное 24 Мая 2010, 16:45 и 16:50 GMT (б)



Усреднённая яркость  $B_0$  изображений MERIS и MODIS (вверху слева) и (вверху справа), соответственно. Передаточная функция  $T$ , определяемая из уравнений (1.15) для MERIS и (1.7), (1.8) и (1.9) для MODIS (внизу слева) и (внизу справа), соответственно. Наклонный линейный разрыв в поле  $T$  (внизу справа) около  $28.50^\circ\text{СШ}$  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  $T$

Контрасти 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  $87^\circ\text{ЗД}$  на обоих изображениях отчётливо видна «нефтяная струя», которая проявляется в виде светлых контрастов на изображении MERIS (Рисунок 2.5, *a*), но в поле контрастов MODIS (Рисунок 2.5, *b*) яркость струи меняется от светлой к тёмной. Если обратиться к Рисунку 2.4, *b*, 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 (б)*

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, вычисленные по изображениям MERIS и MODIS, находятся в хорошем соответствии с магнитудами контрастов СКН того же порядка.

????

Аномалии СКН, полученные с применением двух различных алгоритмов к двум независимым изображениям, дают очень схожие результаты. Это подтверждает надежность предложенной методологии. Усреднённые контрасти СКН в нефтяной струе, полученные по изображениям MODIS и MERIS, показаны на Рисунке 2.2 (справа) вверху.

Стоит также отметить несколько отличий

ГДЕ?

. Во-первых, линейные особенности (отмеченные красными стрелками), с сингулярными значениями

ЧЕГО?

, 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 другими факторами.

КАКИМИ?

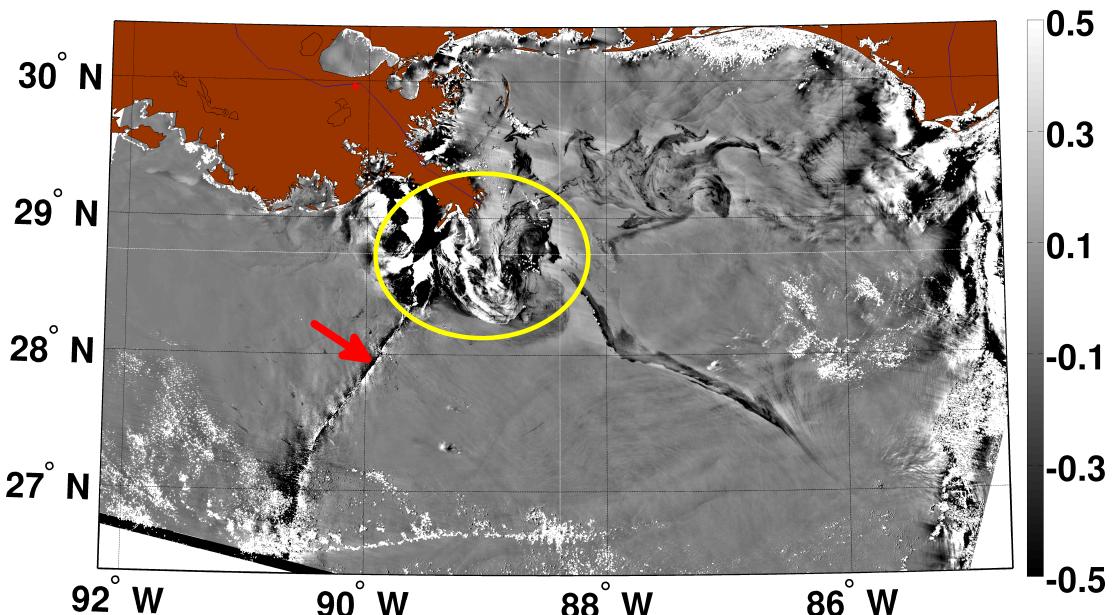
Отсюда

ОТКУДА?

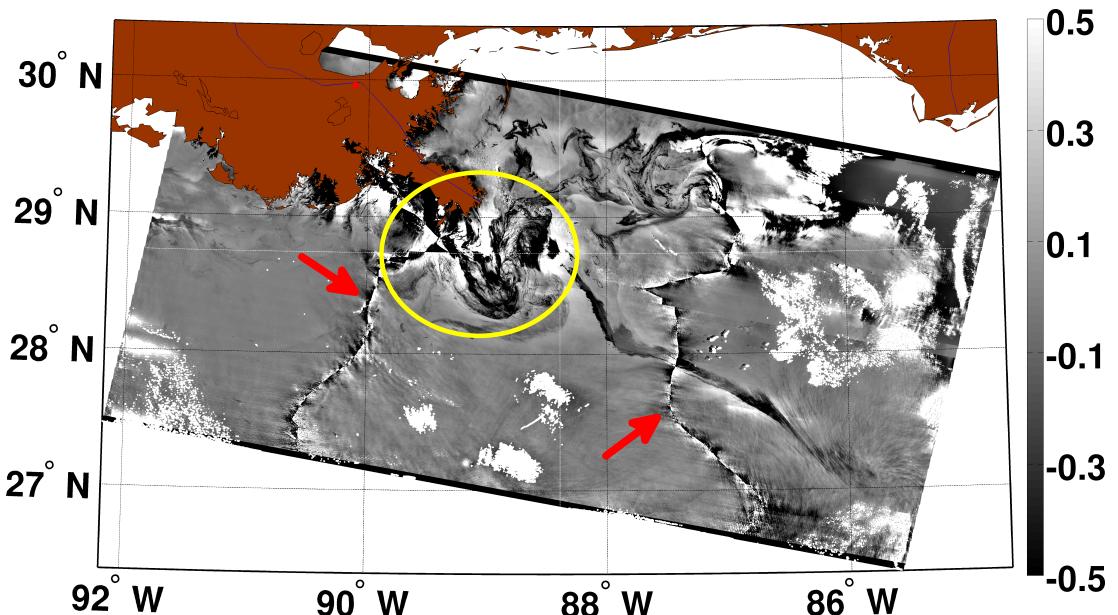
можно предположить, что толщина нефтяной плёнки в этом районе значительно больше длины волны красного света (640-680нм), т.е. толщина порядка 1 микрона и более. В таком случае, оптические свойства самой нефти доминируют над яркостью морской поверхности, покрытой этой нефтью. Предложенный алгоритм не 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 РСА скорость ветра (с использованием алгоритма CMOD-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 выше.



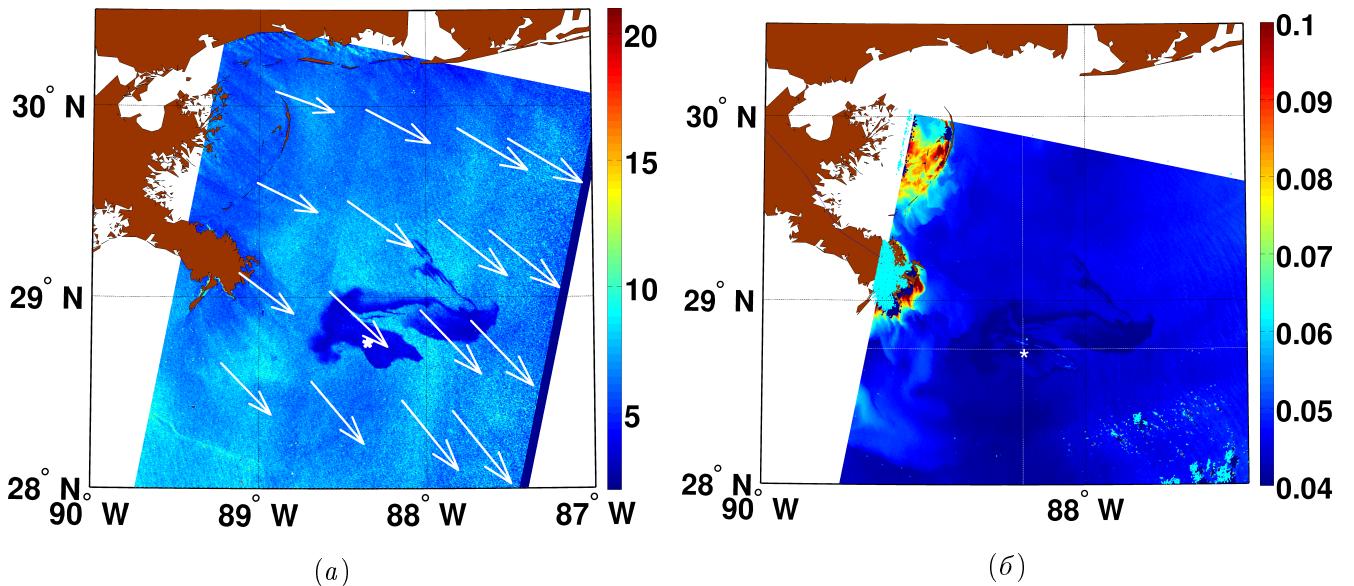
(a)



(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 пленки. Таким образом, толщина нефтяной пленки в этой области (внутри контура) может быть значительно большей длины волны 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 обработанных изображений видно, что сигнатуры разлива чётко раскрывают сходства в геометрии,

### УЖАСНЫЙ РУССКИЙ

но полученные значения контрастов 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. Очевидна хорошая корреляция КОГО с магнитудами контрастов СКН несколько ниже магнитуд УЭПР с коэффициентом отношения около 0.6:  $\tilde{s}^2/s^2 \approx 0.6 \cdot \tilde{\sigma}_0/\sigma_0$ .

### Я НЕ ПОНИМАЮ ЧТО НАПИСАНО

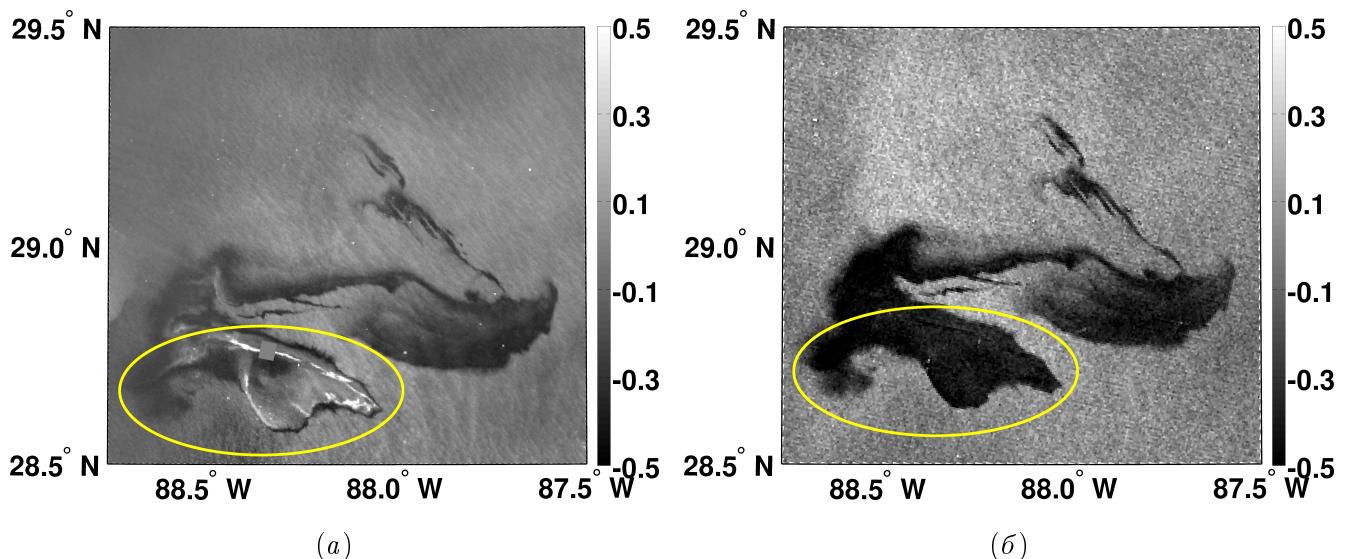
Контрасты СКН, усреднённые по части этого изображения также приводятся на Рисунке 2.2 (справа). Отмечу, что тот же слик также наблюдался прибором MODIS получасом позже, однако, здесь это изображение не приводится. Обработка этого спутникового снимка даёт аномалии СКН, очень похожие на представленные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

Усреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура из Рисунка 2.8, *a* 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). Посчитанные оценки контрастов УЭПР, чётко демонстрируют их сильную зависимость от скорости ветра.

### «ПОСЧИТАННЫЕ» КАКИМ ОБРАЗОМ, ПО МОДЕЛИ?

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.

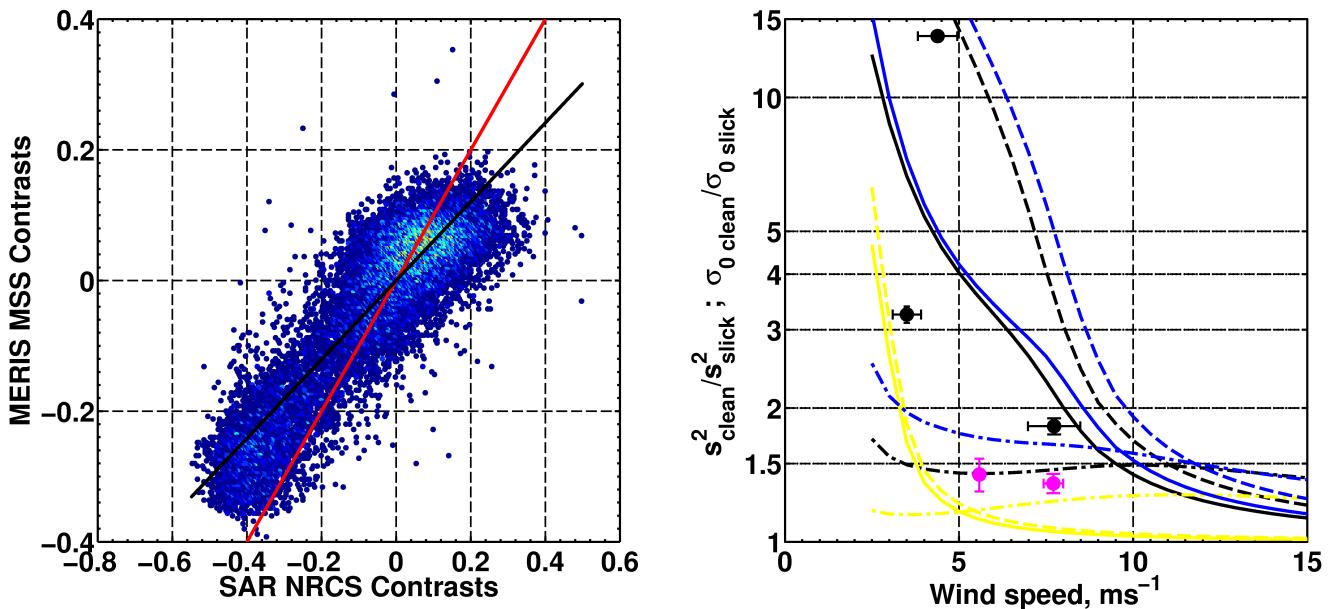


*Изображения содержат нефтяной разлив и представлены в терминах УЭПР (линейные единицы) и контрастов СКН. Толщина нефтяной плёнки в области внутри жёлтого контура значительно больше длины волны красного света*

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 7.5 м/с – осреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика (справа) вне жёлтого контура на Рисунке 2.8. Две другие чёрные точки – контрасты УЭПР того же нефтразлива, 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 – модельные данные RIM контрастов СКН нефтяного слика для  $E=5, 15, 30 \text{ мН/м}$  (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 и др., 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), предложенной в [Kudryavtsev и др., 2005] и [Johannessen и др., 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

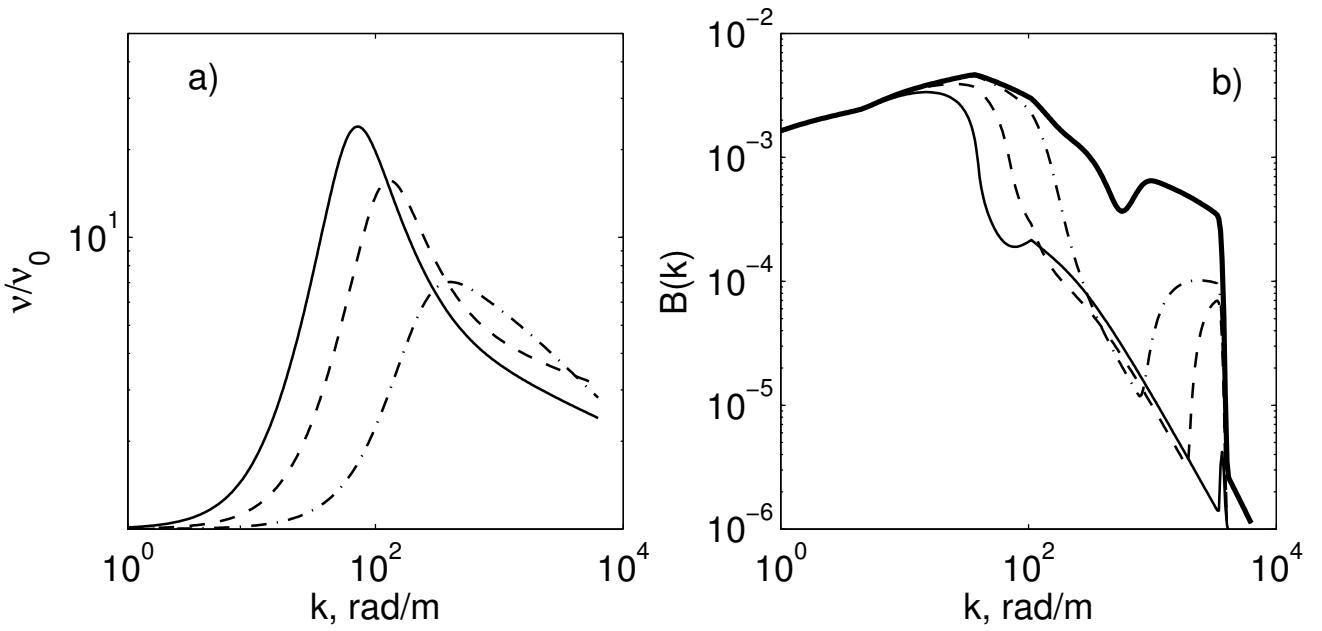
энергии и вязкой диссипацией (первый член), нелинейные потери энергии, включая обрушения волн (второй член) и генерацию связанных (паразитных капилляров) и свободных коротких волн, в результате обрушения более длинных ветровых волн (третий член). Форма волнового спектра следует из решения уравнения (2.1) (подробнее см. [Kudryavtsev и др., 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 (??), 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 слике. 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 (??) 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 до-



(а) 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

статочно 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 слоев (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 и др., 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 удаётся разделить поверхностные слики 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 сливков естественного и происхождения и катастрофического нефтяного разлива в изображениям солнечного блика, полученным приборами MODIS и MERIS.

Показано, что контрасты яркости сликсов могут быть как положительными так и отрицательными ..... Знак контраста зависит от ..... Хотя это явление является естественным «строгим » следствием модели формирования контрастов МСС 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 сликсы в поле СКН проявляются в виде областей отрицательных аномалий СКН. Также нами было обнаружено, что контрасты сликсов нефтепродуктов несколько ниже контрастов сликсов биологического происхождения, как говорится в работе Кокса и Манка [Cox, Munk, 1954a, 1954b, 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 сликсах. Сделан вывод что в этом случае доминируют оптические свойства нефти (её цвет), что не учитывалось в методе

- Наблюдаемые контрасты МСС были проанализированы с помощью модель формирования радиолокационных изображений (RIM), предложенной в работе [Kudryavtsev и др., 2005; Кудрявцев Иванова Ермаков ].. 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 сликса очень хорошо коррелируют, за исключением области, покрытой толстой (относительно длины волны) нефтяной плёнкой. Изменения УЭПР в нефтяном сликсе сильнее, нежели изменения СКН. Этот факт даже усиливается при малых скоростях ветра, когда РЛ-контрасты значительно сильнее, чем аномалии, полученные из оптических данных. Так же симуляции PCA особенностей в модели RIM показали, что значение упругости  $E=15\text{mH/m}$  также обеспечивает хорошее соответствие модельных оценок и измерений.

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

# Литература

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>  
[http://books.google.ru/books?id=tzwgrtnW\\_lYC&lpg=PP1&dq=inauthor%22NilsGunnarJerlov%22&hl=ru&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](http://books.google.ru/books?id=tzwgrtnW_lYC&lpg=PP1&dq=inauthor%22NilsGunnarJerlov%22&hl=ru&pg=PP1#v=onepage&q&f=false).

Pozdnyakov Dmitry V, Graßl 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 Igars*. — 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>.

Мясоедов А.Г., Кудрявцев В.Н. GLAMOROS: Оценка контрастов поверхностных проявлений океанических явлений по изображениям солнечного блика. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; заявитель и патентообладатель РГГМУ. – №20116108602011; заявл. 22.11.10; опубл. 20.01.11. — 2011.

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/S0034425704003724http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425704003724>.