

Todo list

Стилистика речи!	2
????	10
ГДЕ?	10
ЧЕГО?	10
КАКИМИ?	10
ОТКУДА?	10
УЖАСНЫЙ РУССКИЙ	13
Я НЕ ПОНИМАЮ ЧТО НАПИСАНО	13
“ПОСЧИТАННЫЕ” КАКИМ ОБРАЗОМ, ПО МОДЕЛИ?	14

Содержание

Todo list	1
1 Оптические и радиолокационные исследования нефтяныхslickов	2
1.1 Нефтяные плёнки природного происхождения	2
1.2 Катастрофические нефтяные загрязнения	6
1.3 Контрасты СКН и УЭПР нефтяных slickов	16
1.4 Выводы по главе	19
Литература	21

Глава 1

Оптические и радиолокационные исследования нефтяных сливков

Стилистика речи!

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 ??, 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.

1.1 Нефтяные плёнки природного происхождения

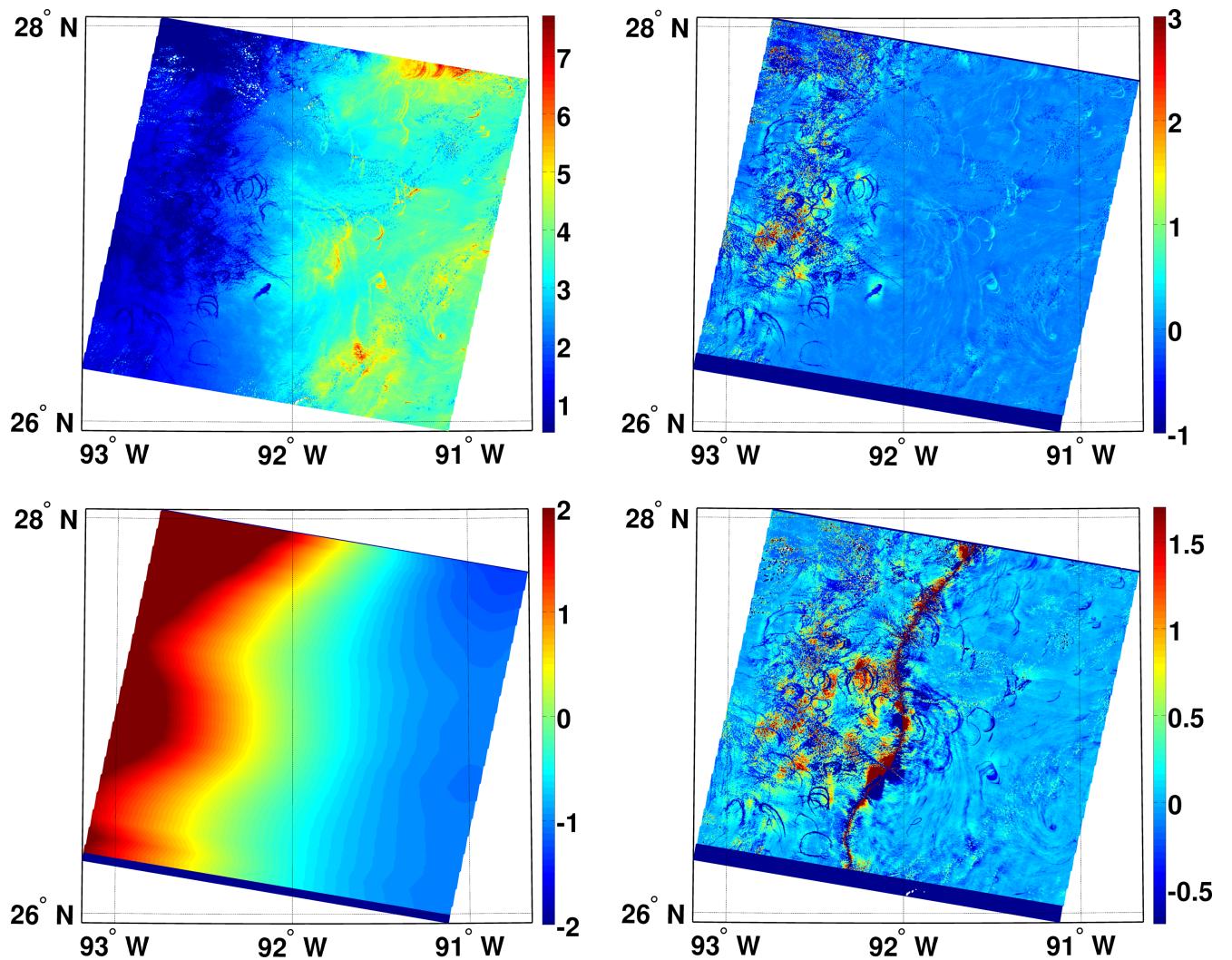
Для начала обратимся к изображениям MODIS Мексиканского залива, отражающим интересные особенности яркости солнечного блика, относящиеся к разливам нефтепродуктов природного происхождения. Изучая эти изображения, Ху с соавторами [Hu et al., 2009], обнаружили, что контрасты поверхностных сливков в солнечном блике бывают как яркими, так и тёмными. Контрасты сливков, как говорится в статье [Hu et al., 2009], зависят от угла между направлением визирования и направлением зеркального отражения θ_m . В рассматриваемом

случае контрасты сликов 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 1.1 (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 1.1 (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 (??). 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 1.1 (нижний левый) показывает передаточную функцию, рассчитанную по уравнениям (??), (??) и (??) для сглаженного поля яркости солнечного блика. Контрасты \tilde{s}^2/s_0^2 , полученные по полю яркости, изображены на Рисунке 1.1 (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 сликов составляют $\tilde{s}^2/s_0^2 \approx 0.3–0.4$, что эквивалентно уменьшению СКН внутри слика в 1.5 раза. Эта оценка ниже оценки, приведённой Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954b] (2-2.5 раза), для поверхностных сликов, 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 30mH/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-



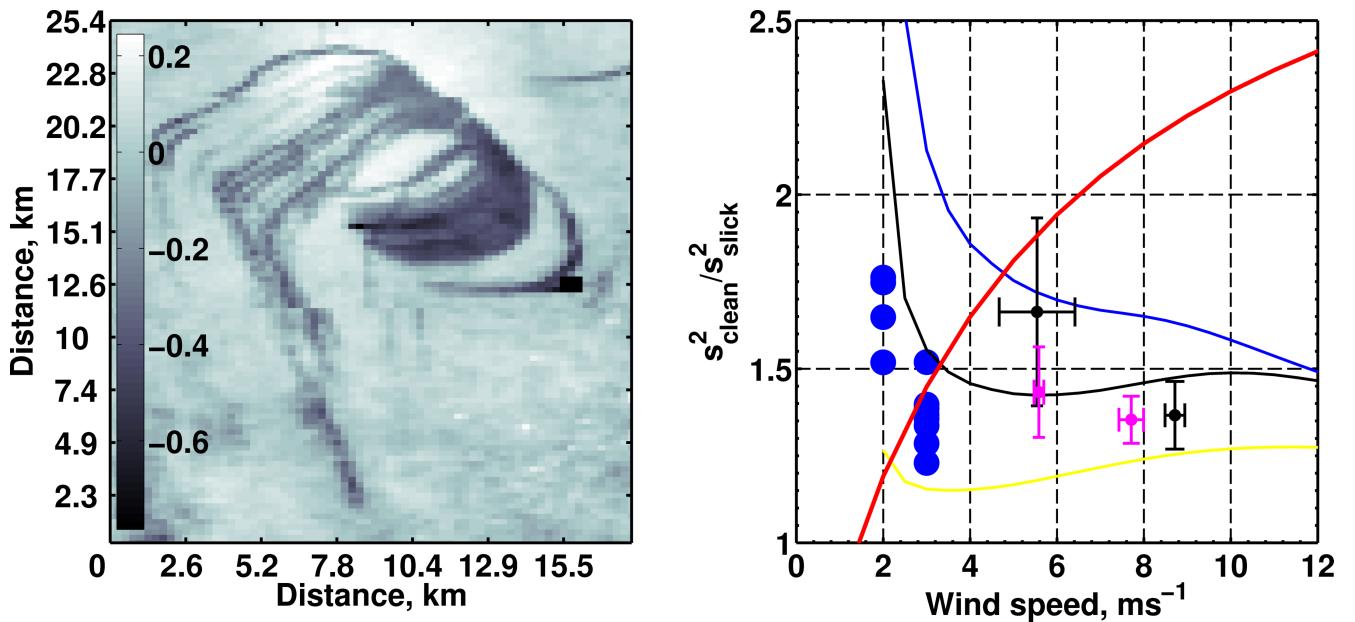
(верхний левый) Фрагмент изображения с прибора MODIS/Terra (Июнь, 2, 2005, 16:55 GMT) на длине волны 645нм (красный канал) Мексиканского залива с особенностями проявления нефтяных сликов в солнечном блике. (верхний правый) Контрасты яркости \tilde{B}/B . (нижний левый) Передаточная функция. (нижний правый)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

Рисунок 1.1 – Фрагмент изображения, полученного с прибора MODIS/Terra (Июнь, 2, 2005, 16:55 GMT)

ет подавление коротких ветровых волн, меньшее значение упругости должно приводить к меньшим контрастам в смыслах (см. раздел 1.3 и Рисунок 1.10 ниже).

На Рисунке 1.2 (слева) показан увеличенный фрагмент Рисунка 1.1 (нижний левый), содержащий “индивидуальные” нефтяные слики, а на Рисунке 1.2 (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 1.2 (справа), при малых скоростях ветра, наблюдаемые контрасты СКН нефтяных слик находятся в соответствии с контрастами, обнаруженными Коксом и Манком [Cox and Munk, 1954a,b] для слик из смеси рыбьего жира, но при умеренных ветрах ($>4\text{ m/s}$). Отсюда можно заключить, что контрасты нефтяных слик систематически ниже контрастов рыбьего жира.



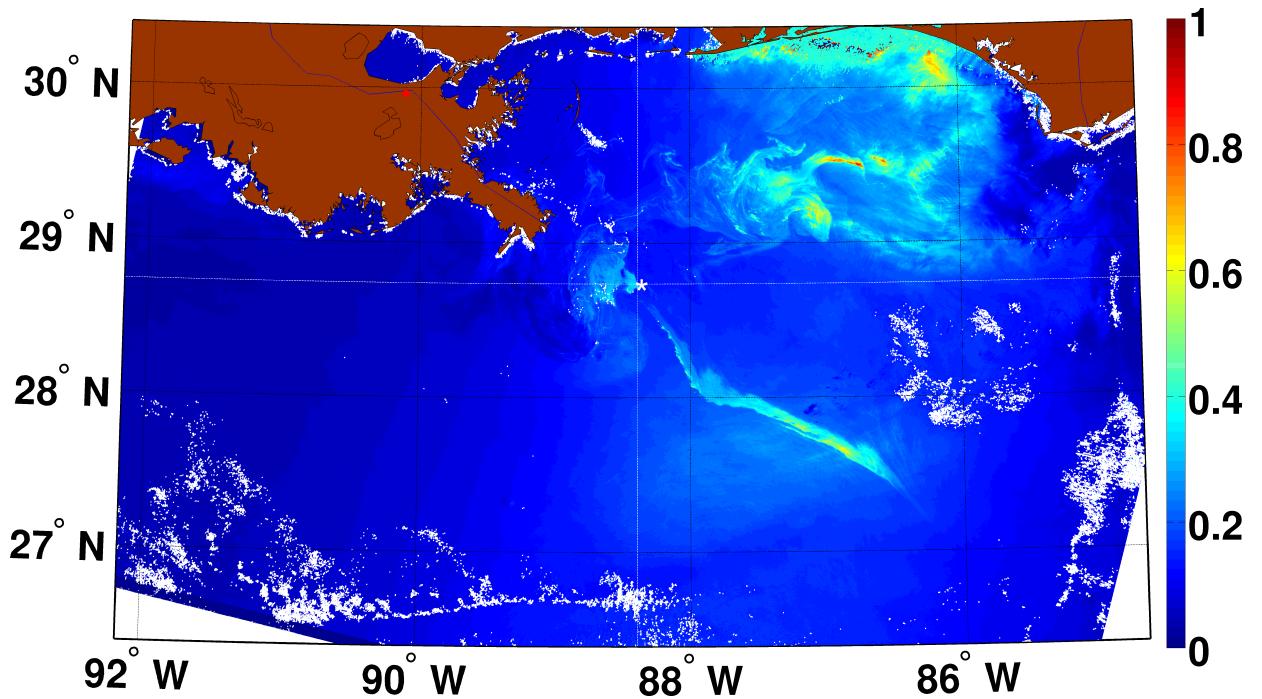
(слева) Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 1.1, содержащем “индивидуальные” нефтяные слики. (справа) Контрасты СКН нефтяных слик, полученных по изображению MODIS на Рисунке 1.1 (синие точки при скоростях ветра 2-3 м/с), по изображению MERIS на Рисунках 1.6 и 1.8 (фиолетовые точки с ошибками), и по изображениям MODIS (чёрные точки с ошибками). Красной кривой показаны контрасты СКН рыбьего жира из результатов Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a,b]. Желтая, чёрная и синяя кривые отражают результаты моделирования контрастов СКН, вызванных тонкими поверхностными сликами с 5, 15 и 30 мН/м, соответственно

Рисунок 1.2 – Увеличенный фрагмент контрастов СКН, изображённых на Рисунке 1.1, содержащем “индивидуальные” нефтяные слики, и зависимость контрастов от скорости ветра

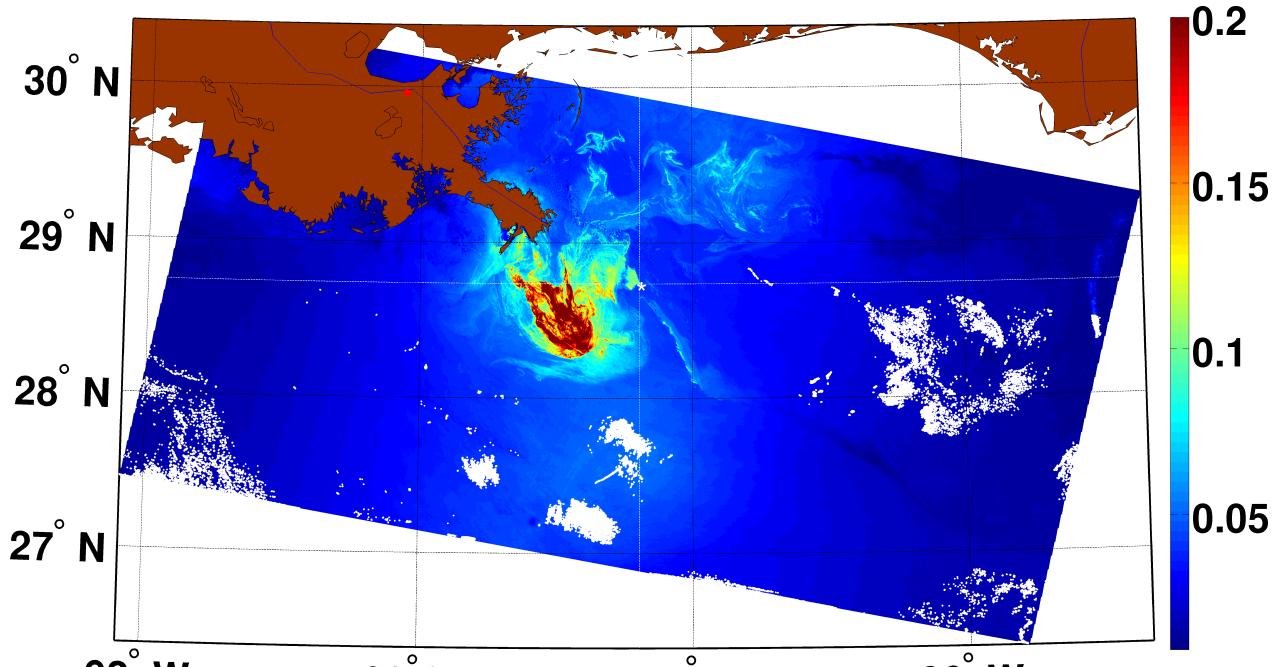
1.2 Катастрофические нефтяные загрязнения

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 1.3 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 1.3, 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 ??, раздел ??). Поля средней яркости солнечного блика B_0 (масштаб осреднения $30 \times 30 \text{ км}^2$) для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунках 1.4, а и 1.4, б. Передаточная функция для данных MODIS, показана на Рисунке 1.4, в, напрямую рассчитывается из осреднённого поля яркости (следуя уравнениям (??), (??) и (??)). 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 (??). Передаточная функция для данных MERIS приведена на Рисунке 1.4, г.



(а)

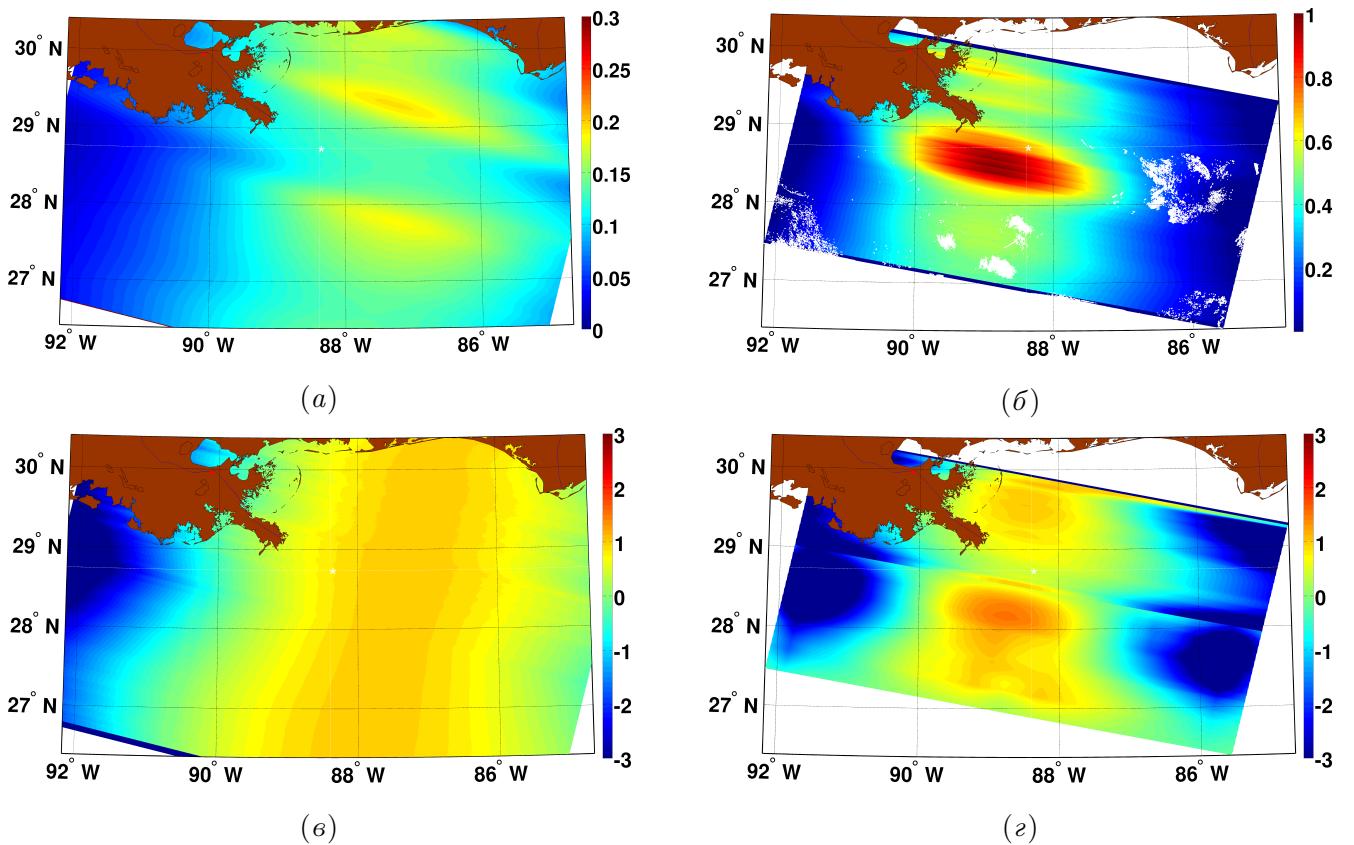


(б)

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° СШ, 88.38° ЗД

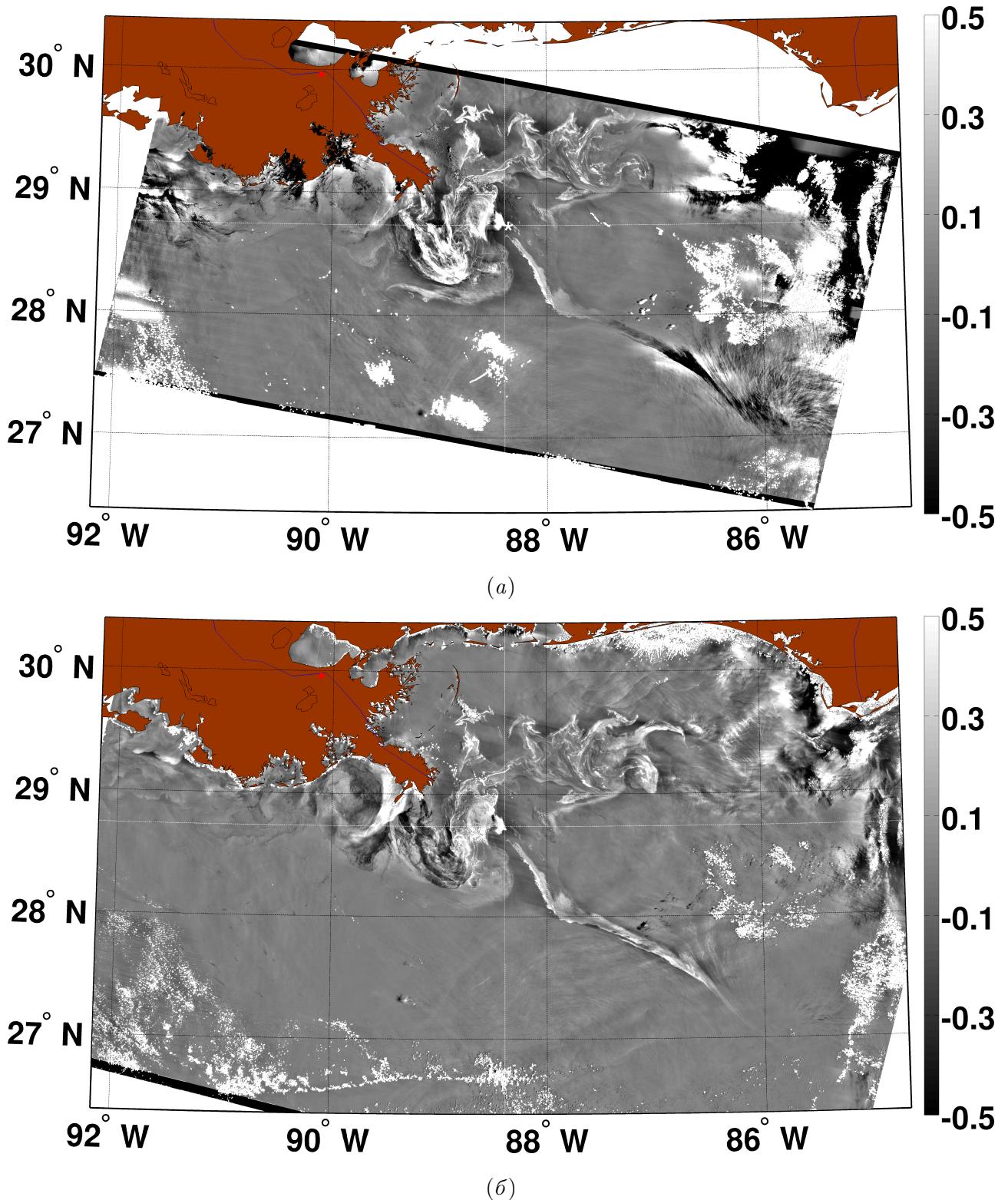
Рисунок 1.3 – Фрагмент исходного изображения MERIS/Envisat в красном канале (681 нм), полученное 24 Мая 2010, 16:17 GMT (а) и композитное изображение двух снимков MODIS/Terra в красном канале (645 нм), полученное 24 Мая 2010, 16:45 и 16:50 GMT (б)



Усреднённая яркость B_0 изображений MERIS и MODIS (а) и (б), соответственно. Передаточная функция T , определяемая из уравнений (??) для MERIS и (??), (??) и (??) для MODIS (в) и (г), соответственно. Наклонный линейный разрыв в поле T (г) около 28.50° СШ появился в результате “склеивания” двух изображений MODIS/Terra, полученных в 16:45 и в 16:50 GMT

Рисунок 1.4 – Усреднённая яркость B_0 с изображений MERIS и MODIS, а также передаточная функция T

Контрасты яркости солнечного блика \tilde{B}/B_0 для данных MERIS и MODIS представлены на Рисунке 1.5. Поля контрастов хорошо согласуются. Хотя есть и некоторые отличия. В районе 87° ЗД на обоих изображениях отчётливо видна “нефтяная струя”, которая проявляется в виде светлых контрастов на изображении MERIS (Рисунок 1.5, а), но в поле контрастов MODIS (Рисунок 1.5, б) яркость струи меняется от светлой к тёмной. Если обратиться к Рисунку 1.4, б, можно заметить, что передаточная функция T меняет знак в этом районе, что соответствует зоне инверсии контрастов яркости. Нефтяная струя пересекает зону инверсии контрастов и, поэтому, сигнатуры в контрастах яркости солнечного блика также меняют свой знак.



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

Рисунок 1.5 – Контрасты яркости солнечного блика \tilde{B}/B_0

На Рисунке 1.6 приведены контрасты СКН \tilde{s}^2/s_0^2 , полученные по изображениям яркости в солнечном блике MERIS и MODIS (Рисунок 1.5), с использованием передаточной функции,

представленной на Рисунке 1.4. 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 1.2 (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 1.6 должны рассматриваться как артефакты, вызванные другими факторами.

КАКИМИ?

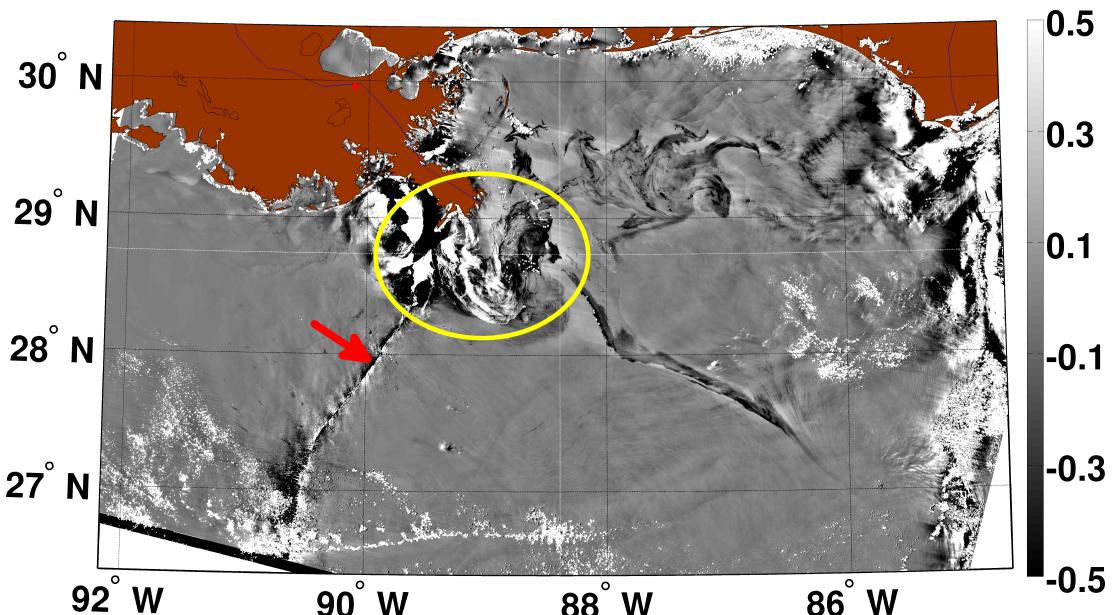
Отсюда

ОТКУДА?

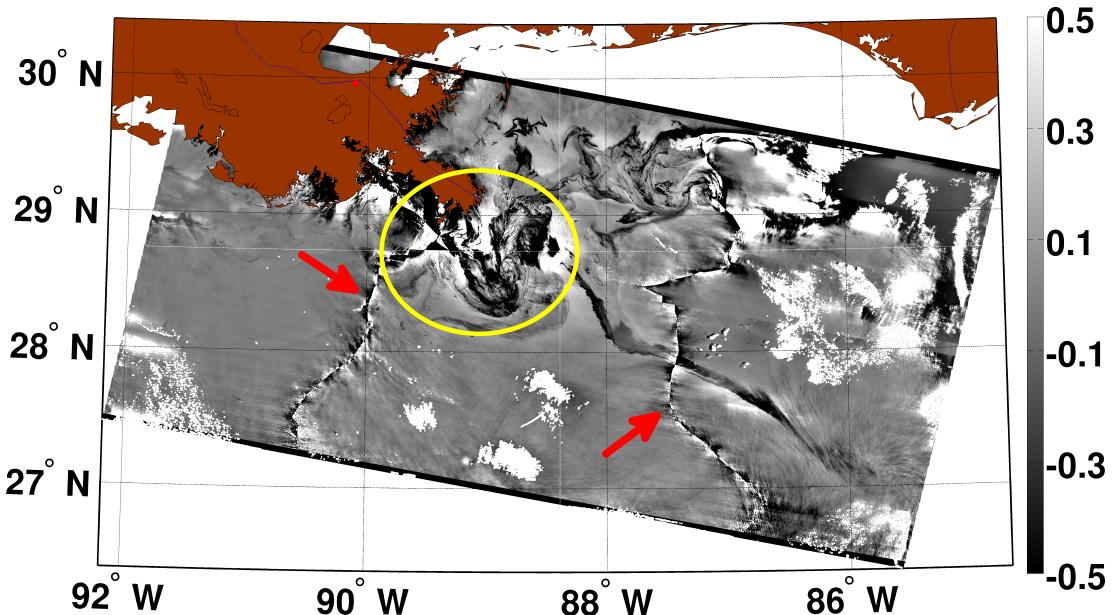
можно предположить, что толщина нефтяной плёнки в этом районе значительно больше длины волны красного света (640-680нм), т.е. толщина порядка 1 микрона и более. В таком случае, оптические свойства самой нефти доминируют над яркостью морской поверхности, покрытой этой нефтью. Предложенный алгоритм не 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 1.7 представлены восстановленная по данным PCA 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 1.8. Контрасты СКН получены при помощи метода, описанного выше.



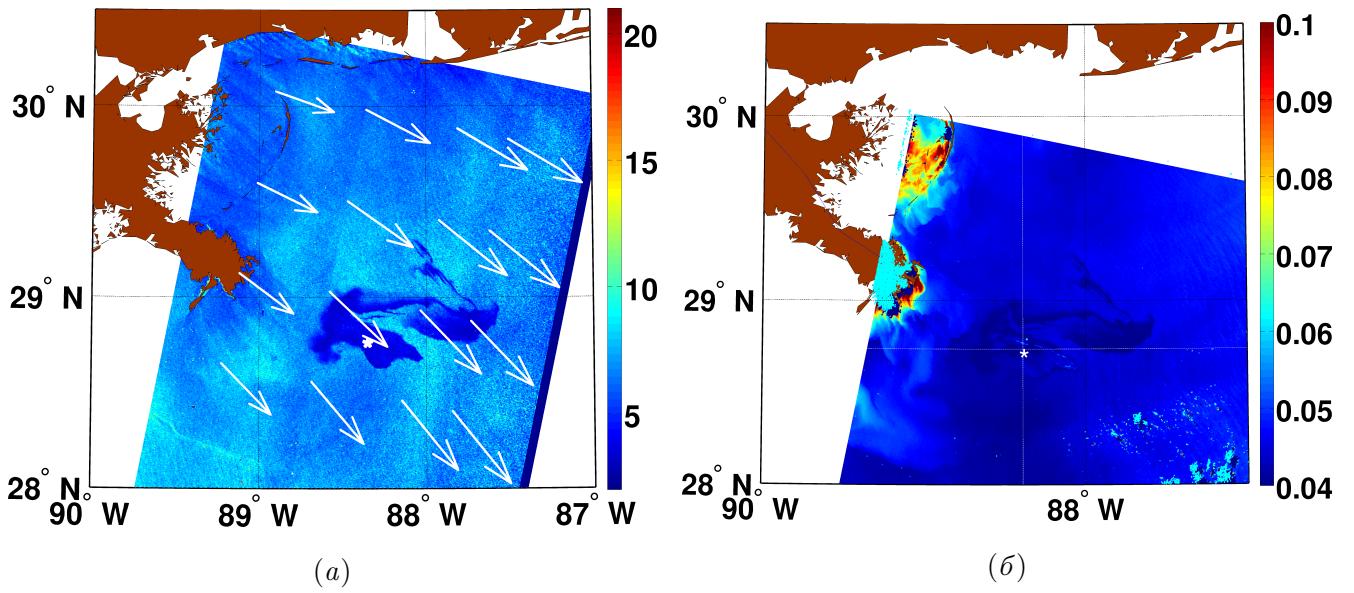
(a)



(б)

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

Рисунок 1.6 – 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 1.7 – 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 1.8 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 1.9. 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

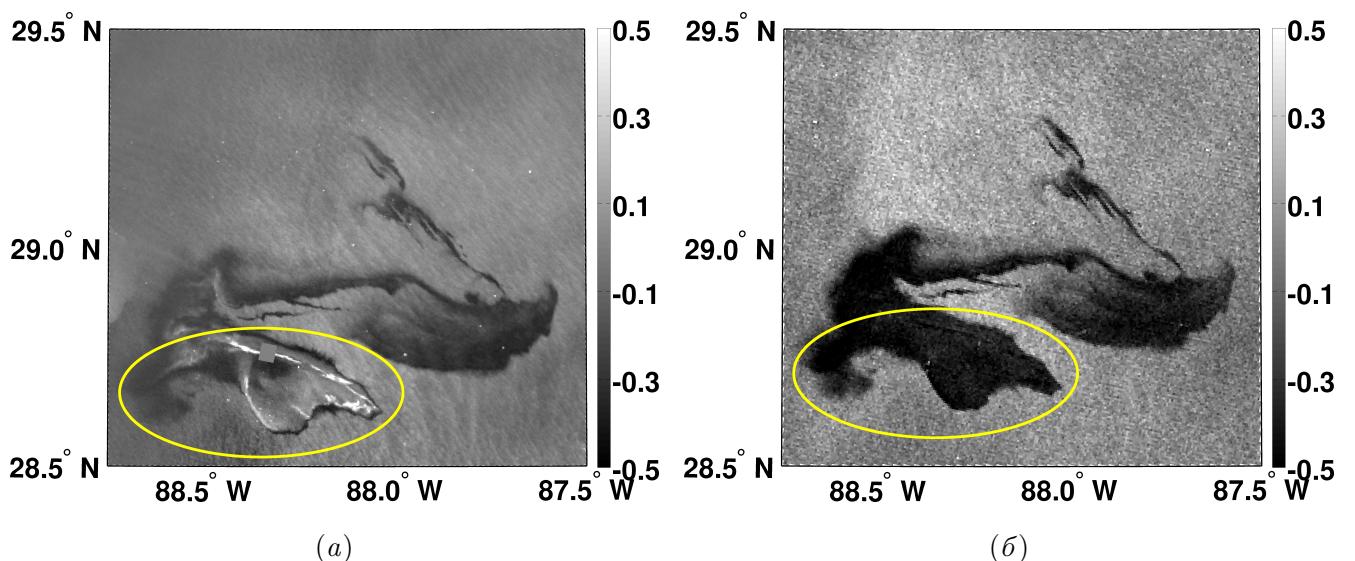
Контрасты СКН, усреднённые по части этого изображения также приводятся на Рисунке 1.2 (справа). Отмечу, что тот же слик также наблюдался прибором MODIS получасом позже, однако, здесь это изображение не приводится. Обработка этого спутникового снимка даёт аномалии СКН, очень похожие на представленные на Рисунке 1.8, осреднённые значения также приводятся на Рисунке 1.2 (справа).

Усреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура из Рисунка 1.8, *a* приведены на Рисунке 1.9 (справа). Две других оценки контрастов УЭПР на Рисунке 1.9

(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 1.3. В обоих случаях, скорость ветра была восстановлена по изображениям ASAR с использованием алгоритма CMOD-4 (см., например, Рисунок 1.7, а). Посчитанные оценки контрастов УЭПР, чётко демонстрируют их сильную зависимость от скорости ветра.

“ПОСЧИТАННЫЕ” КАКИМ ОБРАЗОМ, ПО МОДЕЛИ?

Анализируя контрасты УЭПР на Рисунке 1.9 (справа) и контрасты СКН на Рисунке 1.2(справа) можно отметить, что при слабых и умеренных скоростях ветра, нефтяные слики лучше видны на PCA изображениях, нежели на оптических.

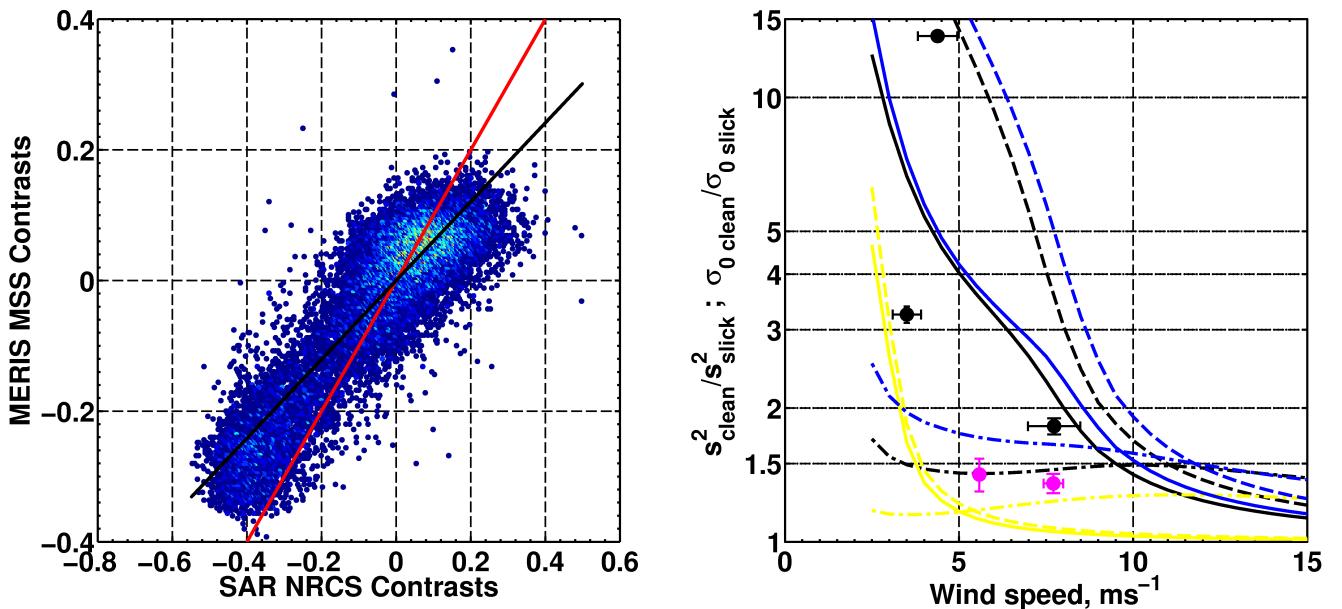


Изображения содержат нефтяной разлив и представлены в терминах УЭПР (линейные единицы) и контрастов СКН. Толщина нефтяной плёнки в области внутри жёлтого контура значительно больше длины волны красного света

Рисунок 1.8 – Увеличенные фрагменты изображений ASAR (а) и MERIS (б), представленных на Рисунке 1.7

Возвращаясь к Рисунку 1.8, 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 1.8. Красная линия – отношение один к одному, а чёрная – линейная аппроксимация данных: $\tilde{s}^2 / s^2 \approx 0.6 \cdot \tilde{\sigma}_0 / \sigma_0$. Чёрная точка с погрешностью в районе значения скорости ветра 7.5м/с – усреднённые контрасты УЭПР нефтяного слика (справа) вне жёлтого контура на Рисунке 1.8. 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 1.6, а, для нефтяной струи, и на Рисунке 1.8, б для области вне жёлтого контура.

Точка-пунктирные линии – модельные данные RIM контрастов СКН нефтяного слика для $E=5, 15, 30\text{mH/m}$ (жёлтая, чёрная и синяя линии, соответственно). Результаты RIM симуляций контрастов УЭПР нефтяного слика в рамках “чисто” Брэгговской модели рассеяния и полной модели УЭПР, учитывающей эффект обрушений волн на обратное рассеяние радиолокационного сигнала приводятся в виде пунктирных и сплошных линий, соответственно. Пояснения к цветам линий контрастов УЭПР такие же как и у СКН

Рисунок 1.9 – Контрасты СКН и контрасты УЭПР нефтяного слика вне жёлтого контура, изображённого на Рисунке 1.8

1.3 Контрасты СКН и УЭПР нефтяных сликов

В результате полученных и представленных на Рисунке 1.2 (справа) контрастов СКН, предполагается, что они соответствуют тонким, в сравнении с длиной волны красного света, нефтяным плёнкам. Их толщина, конечно, значительно меньше длин капиллярных волн, тогда механизм гашения поверхностных волн тонкими нефтяными плёнками может быть описан в рамках классической теории Марангони [Levich, 1962]. В этом случае, модуль упругости является единственным и до сих пор остаётся плохо изученным параметром, характеризующий свойства подавления тонких нефтяных плёнок.

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

$$\beta_\nu(k)B(k) - B(k)[B(k)/\alpha]^n + I_{wb}(k) = 0, \quad (1.1)$$

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

$$\beta_\nu = c_\beta(u_*/c)^2 \cos\varphi |\cos\varphi| - 4\nu k^2/\omega, \quad (1.2)$$

представляющая разность между вкладом энергии (первый член л.ч.) и вязкой диссипации (второй член л.ч.), φ – угол между векторами скорости ветра и волнового числа, c , ω and k фазовая скорость, частота и вектор волнового числа, соответственно, c_β – “постоянная” скорости роста ветра (соответствует параметризации Стюарта [Stewart, 1974]), u_* - динамическая скорость, ν - эффективный коэффициент вязкости, учитывающий влияние поверхностной плёнки (для чистой поверхности он соответствует молекулярному коэффициенту вязкости воды ν_0). В уравнении (1.1) утверждается, что коротковолновый спектр следует из баланса различных источников и стоков энергии, представленных в (1.1) притоком ветровой энергии и вязкой диссипацией (первый член), нелинейные потери энергии, включая обрушения

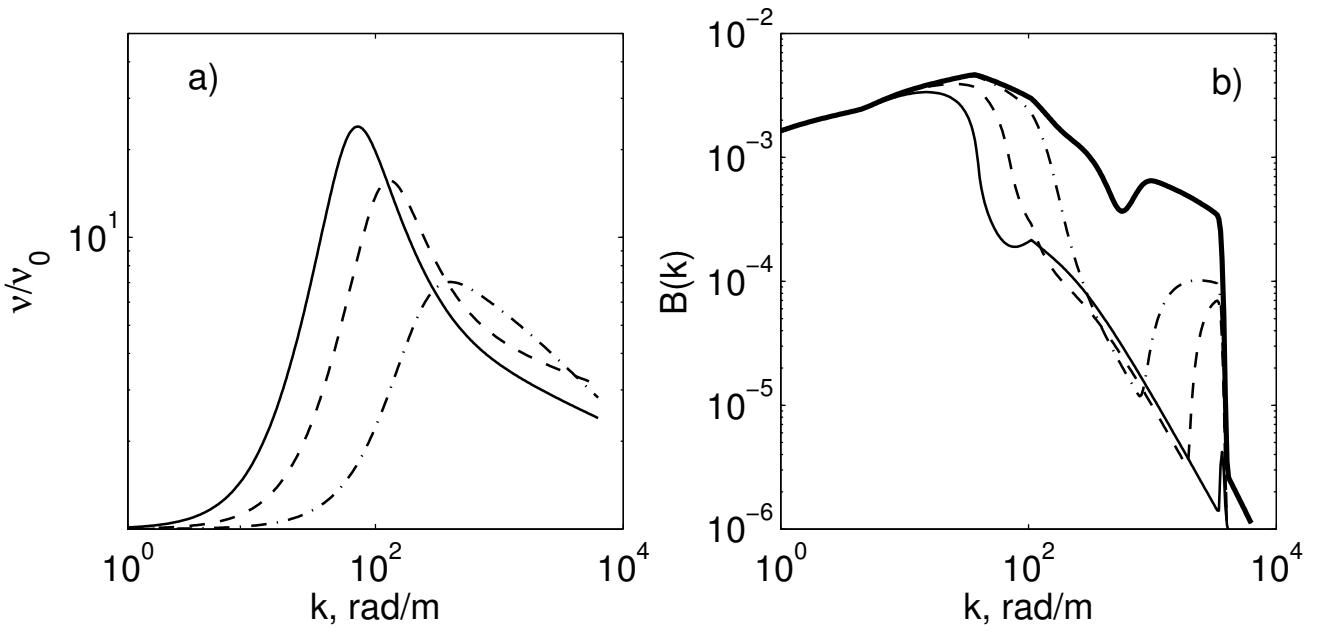
волн (второй член) и генерацию связанных (паразитных капилляров) и свободных коротких волн, в результате обрушения более длинных ветровых волн (третий член). Форма волнового спектра следует из решения уравнения (1.1) (подробнее см. [Kudryavtsev et al., 2005]).

Коэффициент эффективной вязкости поверхности воды, покрытой тонкой поверхностной плёнкой с упругостью $E = 5, 15, \text{ и } 30 \text{ мН/м}$, нормированной на коэффициент вязкости воды представлен на Рисунке 1.10, 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 (1.1) и приводит к подавлению спектральной энергии в высокочастотной части спектра. Всенаправленные спектры (проинтегрированные по всем направлениям) в присутствии поверхностных плёнок показаны на Рисунке 1.10, 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 (1.2), когда вязкая диссипация (зависящая от E) превышает вклад ветровой энергии. Волновое число спектральной отсечки k_{cut} может быть рассчитан из решения уравнения $\beta_v(k_{cut}) = 0$ в, например, направлении ветра. СКН морской поверхности выражается через всенаправленный спектр насыщения как

$$s^2 = \int_k B(k) d\ln k \quad (1.3)$$

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 $E=5 \text{ и } 15 \text{ мН/м}$. Эти пики являются следствием генерации паразитных капилляров в результате обрушения коротких гравитационных волн. Для $E=30 \text{ мН/м}$, 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 (1.1), совместно с определённым по (1.3) СКН. Жёлтая, чёрная и синяя кривые на Рисунке 1.2 (справа) показывают результаты моделирования контрастов СКН для плёнок с упругостями $E = 5, 15, \text{ и } 30 \text{ мН/м}$. Несмотря на то, что разброс данных достаточно большой, модельные расчёты для $E = 15 \text{ мН/м}$ дают наилучшее соответствие с данными.



(a) Коэффициент гашения волн, ν , масштабированный на вязкость воды, ν_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 1.10 – Коэффициент затухания волн и всенаправленный спектр насыщения ветровых волн для различных условий

И полученное значение упругости отличается от $E = 4\text{мН/м}$, использованное в работах по изучению нефтяных сливков (Станислав Ермаков, из личного общения).

На Рисунке 1.9 (справа) представлены результаты симуляции на модели RIM контрастов УЭПР (в-диапазон, ВВ поляризация, направление визирования против ветра и угол падения 30°) для поверхности, покрытой нефтяными плёнками, с упругостями $E = 5, 15$, и 30мН/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 σ_{0b} представляет вклад обрушений волн в обратное рассеяние РЛ-сигнала. Подробнее эти механизмы описаны в 1 главе и в [Kudryavtsev et al., 2005]. Для первой модели, контрасты УЭПР соответствуют контрастам волнового спектра на Брэгговском волновом числе k_{br} (см. спектр на Рисунке 1.10, 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 1.10, 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 1.10, б и 1.9 (справа) для плёнок с $E = 15$ и 30mH/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 1.8, а, представлены на Рисунке 1.9 (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 оказываются одинаков (см. Рисунок 1.10, а). Тогда, в таком случае по контрастам УЭПР не удается разделить поверхностные слики с различной упругостью. В результате сложной формы спектральных контрастов на Рисунке 1.10, 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 15mH/m .

1.4 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 сливков могут быть как положительными так и отрицательными Знак контраста зависит от Хотя это явление является естественным

“строгим” следствием модели формирования кон трастов 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 слики в поле СКН проявляются в виде областей отрицательных аномалий СКН. Также нами было обнаружено, что контрасты сливков нефтепродуктов несколько ниже контрастов сливков биологического происхождения, как говорится в работе Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a; ?; ?]. 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 слинах. 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 et al., 2005; Кудрявцев и др., 2008]. Из оценок было получено, чтобы модельные контрасты соответствовали наблюдаемым, эффективный коэффициент упругости должен соответствовать $E=15\text{mH/m}$.

- Синхронные ASAR PCA изображения предоставляют возможность дать оценку подобиям и различиям между оптическими и РЛ-изображениями одних и тех же нефтяных разливов. Оптические и РЛ-контрасты одного и того же слика очень хорошо коррелируют, за исключением области, покрытой толстой (относительно длины волны) нефтяной плёнкой. Изменения УЭПР в нефтяном слике сильнее, нежели изменения СКН. Этот факт даже усиливается при малых скоростях ветра, когда РЛ-контрасты значительно сильнее, чем аномалии, полученные из оптических данных. 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 PCA контрастов сливков, можно сделать качественное заключение о толщине пленки.

Литература

- 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.
- Brekke Camilla, Solberg Anne H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // [Remote Sensing of Environment](#). — 2005. — mar. — Vol. 95, no. 1. — P. 1–13. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704003724>.
- 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>.
- Levich Veniamin Grigorevich. Physicochemical Hydrodynamics / Ed. by New York Wiley. — Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1962. — Vol. 1 of Prentice-Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. — P. 700. — ISBN: 0136744400. — URL: <http://www.amazon.co.uk/Physicochemical-Hydrodynamics-V-G-Levich/dp/0136744400>.
- On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations / Vladimir N. Kudryavtsev, D. Akimov, Johnny A. Johannessen, Bertrand Chapron // [Journal of Geophysical Research](#). — 2005. — jul. — Vol. 110, no. C07016. — P. 1–27. — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004JC002505.shtml>.

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

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

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