

А.Г. Мясоедов, В.Н. Кудрявцев

**ОЦЕНКА КОНТРАСТОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ
ОКЕАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ СОЛНЕЧНОГО БЛИКА**

A.G. Myasoedov, V.N. Kudryavtsev

**QUANTIFICATION OF THE SURFACE MANIFESTATION
OF OCEAN PHENOMENA
FROM SUN GLITTER IMAGERY**

Рассматривается метод восстановления пространственных вариаций средне-квадратичного наклона (СКН) морской поверхности по изображениям солнечного блика, получаемых со спутниковых оптических сканеров. В рамках предложенного алгоритма восстановление пространственных вариаций СКН по измеренным контрастам яркости в солнечном блике производится с помощью передаточной функции, которая может быть определена как эмпирически – по осредненной форме солнечного блика, так и теоретически – по априорно заданной модели распределения вероятности наклонов морской поверхности. Разработанный метод применён для количественного анализа поверхностных проявлений нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе и поверхностных проявлений внутренних волн в районе устья реки Амазонки. Результаты анализа продемонстрировали высокую эффективность предложенного метода для исследования поверхностных проявлений океанических явлений произвольного происхождения.

Ключевые слова: дистанционные наблюдения океана, солнечный блик, плотность распределения вероятностей наклонов, среднеквадратичный наклон морской поверхности, внутренние волны, нефтяные слики.

A method for retrieval of the spatial variations of the sea surface mean square slope (MSS) in sun glitter imagery, retrieved from satellite optical scanners is proposed. Under the proposed algorithm, reconstruction of the MSS spatial variations by measured sun glitter brightness contrasts is done with use of a transfer function which could be determined empirically – by the averaged shape of sun glint, as sure as theoretically – by a priori given sea surface slope probability distribution model. Developed method is applied for quantitative analysis of the oil spill surface manifestations in the Gulf of Mexico and internal waves (IWs) surface manifestations near the Amazon River mouth. Results of the analysis have demonstrated highly feasible approach for investigation of surface manifestations of arbitrary origin ocean phenomena.

Key words: ocean remote sensing, sun glint, sea surface slopes probability density function, sea surface mean square slope, internal waves, oil slicks.

Введение

Общеизвестно, что поверхностные проявления динамических процессов в океане (границы течений, вихри, фронтальные разделы, внутренние волны и др.) могут эффективно регистрироваться спутниковыми радиолокаторами синтезированной апертуры (РСА). Их проявления на РСА изображениях обусловлены взаимодействием ветровых волн с течениями, которое приводит к формированию пространственных контрастов элементов шероховатости морской поверхности рассеивающих радиоволны. С другой стороны, в настоящее время большинство спутников оборудовано оптическими сканерами, которые также потенциально можно использовать для исследования поверхностных проявлений на морской поверхности.

Одно из основных применений данных, полученных с помощью спутниковых оптических сканеров (таких, как MODIS и MERIS), – изучение оптических характеристик верхнего слоя океана и 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 and Billat, 2000].

С другой стороны, солнечный блик несёт в себе очень ценную информацию о статистических характеристиках морской поверхности – среднеквадратичном наклоне (СКН), асимметрии и кривизне, как было показано в пионерской работе Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a, 1954b и 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.

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 сликов по оптическим изображениям солнечного блика из космоса была продемонстрирована в многочисленных работах, см., например [Brekke and Solberg, 2005; Chust and Sagarminaga, 2007; Hu et al., 2008].

Следуя работам Кокса и Манка [Cox and Munk, 1954a, 1954b и 1956], в 1986 г. [Бурдюгов и др., 1986] был предложен метод по использованию фотографий солнечного блика для исследования количественных характеристик сликов на

морской поверхности, вызванных перераспределением пленок ПАВ полем поверхностных течений, индуцируемых внутренними волнами на поверхности. В работах [Митник и др., 2000; Jackson, 2007] продемонстрирована эффективность использования спутниковых оптических сканеров для изучения пространственного распределения внутренних волн в океане. Однако вопрос об определении количественных энергетических характеристиках ВВ по данным спутниковых сканеров, таких, например, как их амплитуда, остается открытым.

В работе [Большаков и др., 1990] был предложен оригинальный метод восстановления двумерного спектра возвышений поверхностных волн по фотографиям солнечного блика. Идеи, заложенные в этой работе, будут частично использованы в данном исследовании

Таким образом, предшествующие исследования показывают потенциальную возможность использования спутниковых изображений солнечного блика для изучения поверхностных проявлений океанической динамики, таких как поверхностные загрязнения, мезомасштабные течения, океанические фронты.

В данной работе предложен метод определения количественных характеристик проявления океанических явлений на морской поверхности в виде контрастов СКН по изображениям солнечного блика, получаемых с оптических сканеров из космоса (MODIS, MERIS и др.). Приводится анализ полученных полей СКН: определяется их зависимость от полей ветра, выявляются пространственные особенности полей СКН, которые могут быть интерпретированы как поверхностные проявления различных типов океанических явлений, таких как поверхностные загрязнения, мезомасштабные вихри, меандры и фронтальные зоны.

Особенности формирования изображений MODIS и MERIS

В данной работе мы акцентируем своё внимание на анализе спутниковых данных, получаемых с оптических сканеров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), показывая различие и сходство в подходах восстановления контрастов СКН по их изображениям.

Сенсоры MODIS установлены на двух спутниках наблюдения за Землей Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) Terra и Aqua. Сенсор MERIS, 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 ролинг архивы. Обычно файлы появляются на серверах уже через 3–6 ч после получения их спутником и удаляются через 10 дней (отсюда название «ролинг» архива). Данные MODIS доступны для скачивания с сайта <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>

Изображения инструмента MODIS формируются 36 каналами в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах, с пространственным разрешением 250 м, 500 м и 1 км и точностью привязки, по меньшей мере, 50 м [Salomonson et al., 1989; Wolfe et al., 2002]. В свою очередь, прибор MERIS измеряет отраженную Землей солнечную радиацию по 15 каналам с длинами волн от 390 до 1040 нм, с пространственным разрешением 300 м и 1 км, а точность привязки достигает 170 м [Saunier and Goryl, 2004].

Отличительной особенностью спутниковых изображений, полученных с прибора 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°. 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.

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.

В работе используются данные уровня 1В, разрешением 250 м первого (645 нм) и второго (850 нм) каналов для инструмента MODIS и данные восьмого канала (681 нм) MERIS высокого разрешения, сопровождаемые геолокационными данными и геометрией съемки.

MODIS является сканирующим спектрометром, и благодаря конструкции сканирующего зеркала получаемые изображения представляют собой композицию полос 2330 км длиной и около 10 км шириной в надире. Каждая такая полоса формируется 40 детекторами с полем зрения вдоль и поперек траектории полета около 0,8 и 110° соответственно. Таким образом, каждая отдельная полоса содержит двумерное поле отраженной яркости. Внутри бликовой области эти особенности формирования изображений MODIS могут создавать ступенчатые изменения отражённой от поверхности воды солнечной радиации при переходе от полосы к полосе (рис. 1). 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°) и шириной полосы в 1150 км в надире. Угол обзора в 68,5° обеспечивается пятью одинаковыми оптическими камерами (рис. 2).

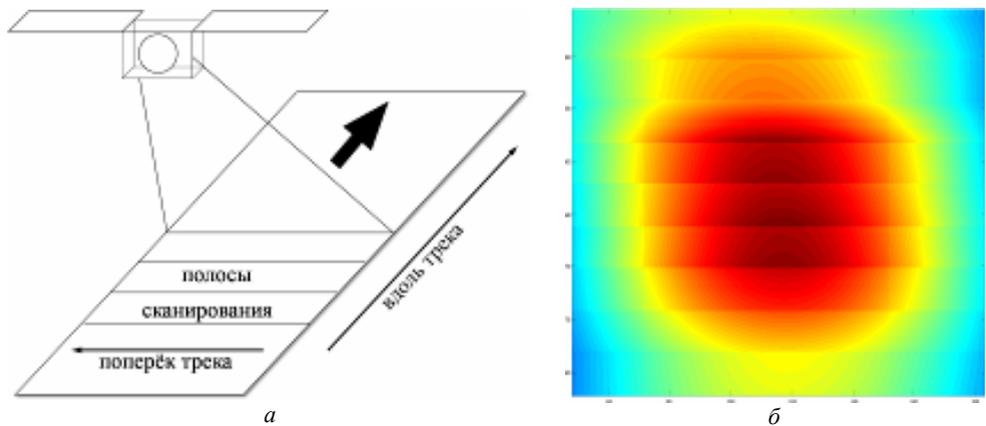


Рис. 1. *a* – схематическая геометрия поля зрения прибора MODIS; *б* – фрагмент изображения MODIS/Terra, 24 мая 2010 г., 16 ч 45 мин, района разлива нефтепродуктов в результате взрыва нефтяной платформы «Deepwater Horizon» в Мексиканском заливе. Хорошо видна «полозообразная» структура изображения в области солнечного блика с явно выраженными двумерными градиентами яркости вдоль и поперек траектории полета спутника

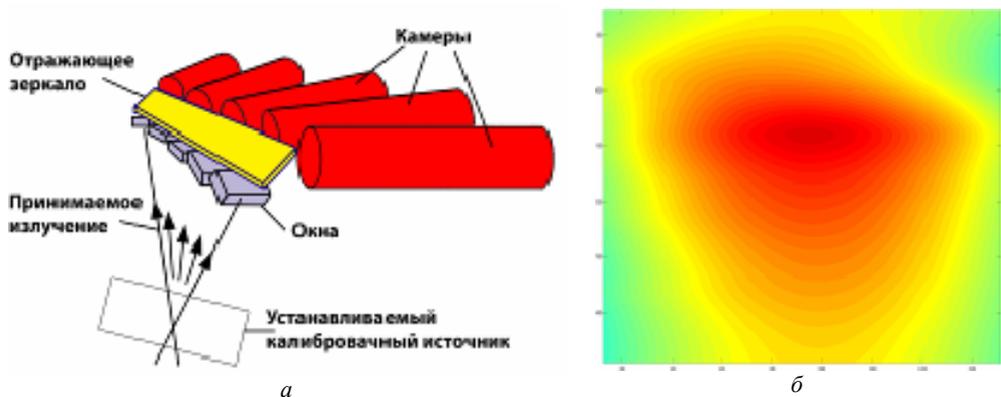


Рис. 2. *a* – схематическое устройство прибора MERIS/Envisat; *б* – фрагмент изображения MERIS, 24 мая 2010 г., 16 ч 17 мин, района разлива нефтепродуктов в результате взрыва нефтяной платформы «Deepwater Horizon» в Мексиканском заливе.

В отличие от изображения MODIS на рис. 1, *б*, в данном случае поле яркости в солнечном блике не имеет полос сканирования

Угол обзора у каждой из камер 14° . 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 надири до 0,39 км по краям снимка. Разрешающая способность съёмки земной поверхности вдоль движения спутника составляет 0,29 км (Official ESA web-site). В случае с данными MERIS, в силу особенностей формирования спутниковых снимков, алгоритм применим ко всей области солнечного блика, как на фотографических изображениях.

Физические основы метода

Модель формирования яркости блика

Яркость морской поверхности B , сформированная зеркальными отражениями солнечного излучения от морской поверхности, имеет следующий вид [Cox and Munk, 1954a,b]:

$$B = \frac{\rho E_0}{4 \cos \theta_v \cos^4 \beta} P(Z_x, Z_y), \quad (1)$$

где B – отраженная от поверхности моря яркость; E_0 – освещённость поверхности моря прямыми солнечными лучами; ρ – коэффициент отражения Френеля; θ_v – зенитный угол наблюдения; $P(Z_x, Z_y)$ – двумерная плотность распределения вероятности 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:

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{\sin \theta_s \cos \varphi_s + \sin \theta_v \cos \varphi_v}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \\ Z_y &= \frac{\sin \theta_s \sin \varphi_s + \sin \theta_v \sin \varphi_v}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \end{aligned} \quad (2)$$

где θ_s – зенитный угол Солнца; φ_s и φ_v – азимутальные углы наблюдения и Солнца, соответственно и

$$\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}. \quad (3)$$

Уравнение (2.1) 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 г., а позднее в статьях [Charpron et al., 2000; Ebuchi and Kizu, 2002], а также [Gréon and Henriot, 2006], авторы предложили моделировать $P(Z_x, Z_y)$ в виде рядов Грамма-Шарлье. Подгоняя модель (1) 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.

**Оценка контрастов СКН морской поверхности
по вариациям яркости солнечного блика**

Помимо выявления зависимости от скорости ветра, соотношение (1) предоставляет дополнительные возможности исследовать поверхностные явления на море (как, например, слики или особенности течений), приводящие к вариациям СКН, а 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) в следующем «нормированном» виде:

$$P(Z_x, Z_y) = s^{-2} p(\xi, \eta), \quad (4)$$

где $\xi = Z_x / s$ и $\eta = Z_y / s$, s^2 – среднеквадратичный наклон морской поверхности; p – “безразмерная” плотность вероятностей. Очевидно, что являясь функцией ξ и η , функция p зависит от анизотропии наклонов морской поверхности относительно вектора ветра, а также нелинейных особенностей наклонов – их асимметрии и «пиковатости». Отметим, что если вероятность наклонов задана в виде Гауссова распределения или рядом Грамма-Шарлье, тогда безразмерная функция p в (4) 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

$$s^2 = \bar{s}^2 + \tilde{s}^2. \quad (5)$$

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 составляющие: 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) и (4) легко получить линейризованное отношение между малыми вариациями яркости солнечного блика \tilde{B} и СКН \tilde{s}^2 :

$$\frac{\tilde{B}}{B} = -T \frac{\tilde{s}^2}{s^2};$$

$$T = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi}{p} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\eta}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right), \quad (6)$$

где T – передаточная функция.

Чтобы получить выражение (6), 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 кривизной. 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 измерений Кокса и Манка, характеристик поверхности в области чистой поверхности и поверхности покрытой пленкой [Cox and Munk, 1954a,b]. По их наблюдениям, отношение СКН чистой поверхности к загрязнённой сликом 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} (компонента СКН по направлению ветра) и c_{02} (компонента СКН перпендикулярная 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 (6) является основным соотношением алгоритма восстановления контрастов СКН морской поверхности по оптическим изображениям блика. Возможны два варианта использования (6):

а) восстановление контрастов СКН на основе (6) по 2D изображениям блика без априорного задания модели $P(Z_x, Z_y)$;

б) восстановление контрастов СКН на основе (6) при использовании некоторой модели $P(Z_x, Z_y)$.

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

Восстановление СКН по 2D полю яркости

При наличии 2D поля яркости солнечного блика передаточная функция T в (6) может быть определена по осредненным градиентам яркости, которые берутся непосредственно из изображения солнечного блика. Используя формулу (1), градиенты безразмерной плотности вероятности наклонов p в (6) находятся

из градиентов крупномасштабной яркости солнечного блика следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\xi}{p} \frac{\partial p}{\partial \xi} &= \frac{\xi}{B} \frac{\partial B}{\partial \xi} - \frac{4Z_x^2}{1+Z_x^2+Z_y^2} \\ \frac{\eta}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} &= \frac{\eta}{B} \frac{\partial B}{\partial \eta} - \frac{4Z_y^2}{1+Z_x^2+Z_y^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Градиент яркости в (7) в пространстве (ξ, η) можно выразить через градиенты поля в двух ортогональных направлениях $(\nabla_l B$ и $\nabla_n B)$ как

$$\begin{aligned} \frac{\xi}{B} \frac{\partial B}{\partial \xi} &= Z_x \frac{\nabla_l \ln(B \cos \theta_v) \cdot \nabla_n Z_y - \nabla_n \ln B \cdot \nabla_l Z_y}{\Delta} \\ \frac{\eta}{B} \frac{\partial B}{\partial \eta} &= Z_y \frac{\nabla_n \ln(B \cos \theta_v) \cdot \nabla_l Z_x - \nabla_l \ln B \cdot \nabla_n Z_x}{\Delta}, \end{aligned} \quad (8)$$

где дискриминант Δ :

$$\Delta = \nabla_l Z_x \cdot \nabla_n Z_y - \nabla_n Z_x \cdot \nabla_l Z_y \quad (9)$$

В этом случае уравнения (6), (7) и (8) 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.

Восстановление СКН по 1D полю яркости

В ряде случаев (см., например, формирование изображений сканером MERIS) поля яркости морской поверхности имеют характер 1D поля (рис. 2, б). В этом случае определение передаточной функции T по измеренным градиентам яркости, в соответствии с уравнением (6), – невозможно, и для ее определения необходимо задание модели P .

В качестве первого приближения мы можем предположить, что плотность распределения вероятности наклонов может быть аппроксимирована двумерным Гауссовым распределением. В этом случае «безразмерная» плотность наклонов равна

$$p(Z_x, Z_y) = \frac{s^2}{2\pi s_u s_c} \exp \left[-\frac{s_y^2 Z_x^2 - 2s_{xy}^2 Z_x Z_y + s_x^2 Z_y^2}{2s_u^2 s_c^2} \right], \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} s_x^2 &= s_u^2 \cos^2 \varphi + s_c^2 \sin^2 \varphi \\ s_y^2 &= s_c^2 \cos^2 \varphi + s_u^2 \sin^2 \varphi, \\ s_{xy}^2 &= (s_u^2 - s_c^2) \cos \varphi \sin \varphi \end{aligned} \quad (11)$$

где φ – направление ветра. Пусть $\alpha = s_c^2 / s_u^2$ – параметр анизотропии уклонов. Тогда «безразмерное» распределение (10) можно переписать в виде:

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

где коэффициенты a_1 , a_2 и a_{12} :

$$\begin{aligned} a_1 &= (1 + \alpha)(\cos^2 \varphi + \alpha \sin^2 \varphi) / (2\alpha) \\ a_2 &= (1 + \alpha)(\alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) / (2\alpha). \\ a_{12} &= (1 - \alpha^2) \sin 2\varphi / (2\alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

Если распределение морских уклонов изотропно ($\alpha = s_c^2 / s_u^2 = 1$), тогда коэффициенты (13) 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, полагаем, что изменения коэффициента анизотропии α незначительны и, таким образом, передаточная функция (11) с (12) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{B}}{B} &= -T \frac{\tilde{s}^2}{s^2}; \\ T &= 1 - a_2\xi^2 + a_{12}\xi\eta - a_1\eta^2, \end{aligned} \quad (14)$$

где, напомним, $\xi = Z_x / s$ и $\eta = Z_y / s$. Итак, чтобы получить контрасты СКН из яркостей солнечного блика, необходимо задать направление ветра φ (из тех или иных источников метеоданных) и определить по анализируемому изображению среднее значение СКН s^2 . При известном среднем значении СКН ко-

эффицент анизотропии α может быть определен по эмпирическим соотношениям, предложенным Коксом и Манком. Однако отметим, что так как зависимость α от скорости ветра слаба, для практических приложений величина α может считаться независимой от ветра и быть задана как: $\alpha = 0.7$. Значения зеркальных уклонов Z_x и Z_y находятся по известной солнечно-спутниковой геометрии съёмки.

Примеры работы метода

Нефтяные загрязнения в Мексиканском заливе

В качестве примера для тестирования работы алгоритма был выбран катастрофический случай нефтяного разлива в Мексиканском заливе после взрыва нефтяной платформы Deepwater Horizon 20 апреля 2010 г. Трёхканальная композиция фрагментов исходных изображений MODIS (MODIS/Terra, 24 мая 2010, 16:45 GMT) и MERIS (MERIS/Envisat, 24 мая 2010, 16:17 GMT) приведена на рис. 3. Стоит сразу отметить, что рассматриваемый нами случай не попал на один снимок сканера MODIS, поэтому изображение MODIS является комбинацией двух спутниковых снимков, сделанных в 16:45 и 16:50 GMT. Нефтяные разливы отчетливо видны на изображениях MERIS и MODIS в виде характерных темных и светлых областей, формируемых особенностями отражения солнечного света от поверхности океана, покрытого пленками нефтепродуктов.

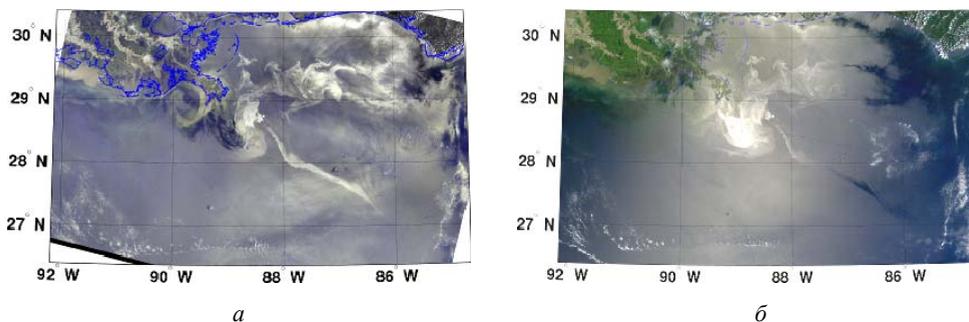


Рис. 3. Цветной композит увеличенной области изображений MERIS/Envisat района разлива нефтепродуктов в результате взрыва нефтяной платформы «Deepwater Horizon» в Мексиканском заливе 24 мая 2010 г., 16 ч 17 мин (а) и MODIS/Terra (б), датированное 24 мая 2010 г., 16 ч 45 мин

Те же фрагменты изображений в красных каналах (MERIS, 681 нм; MODIS, 645 нм) представлены на рис. 4. На первом шаге исходные яркости B были разделены на осреднённую и вариационную составляющие: $\tilde{B} = B - \bar{B}$. Далее, после определения передаточной функции T по соотношениям (6) (для данных MODIS) или (14) (для данных MERIS), контрасты яркости \tilde{B}/\bar{B} могут быть конвертированы в контрасты СКН \tilde{s}^2/s^2 .

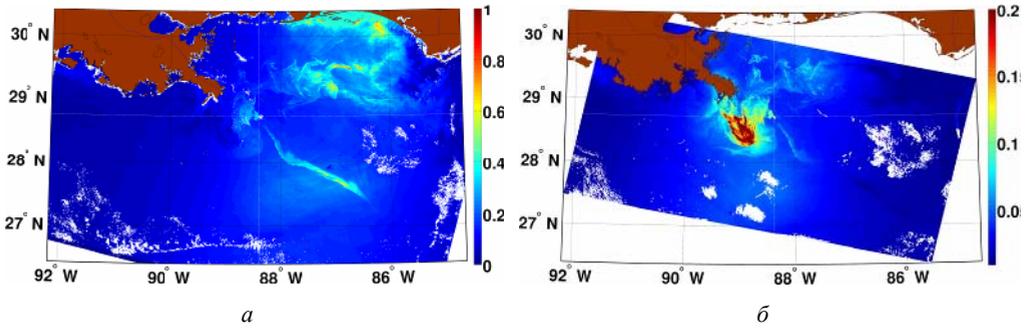


Рис. 4. *a* – исходные яркости в красном канале (681 нм) увеличенной области изображения MERIS/Envisat, 24 мая 2010 г., 16 ч 17 мин; *б* – 645 нм MODIS/Terra, 24 мая 2010 г., 16 ч 45 мин. Белым цветом выделена маска облаков, коричневым – маска Земли. Звёздочкой обозначено место катастрофы, с координатами 28.73°сш, 88.38°зд.

На рис. 5, *a, в* приведены поля средних яркостей солнечного блика, полученные после осреднения исходных изображений на масштабах $30 \times 30 \text{ км}^2$. В случае данных MODIS поле осредненной яркости далее используется для построения передаточной функции по соотношению (6) с (7) и (8). Соответствующее поле передаточной функции представлено на рис. 5, *г*.

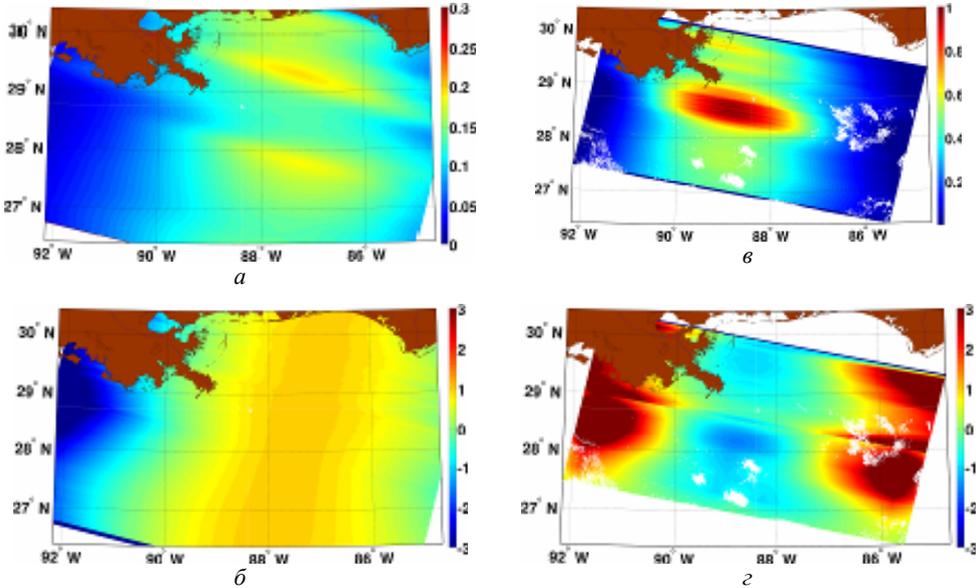


Рис. 5. *a, в* – усреднённые яркости \bar{B} MERIS и MODIS соответственно; *б, г* – передаточная функция T , заданная уравнениями (14)–(16) для MERIS и (6)–(8) для MODIS, соответственно. Поскольку изображение MODIS скомбинировано из двух спутниковых снимков, сделанных в 16:45 и 16:50, и обработка проводится в каждой полосе сканирования отдельно, на изображении передаточной функции прослеживается граница раздела двух снимков

Для определения передаточной функции (14) по данным MERIS необходимо задать направление ветра, и определить по изображениям осредненные значения СКН морской поверхности. Направление ветра можно взять из независимых источников – метеорологических моделей. Для анализируемого фрагмента изображение направления ветра задавалось по данным модели предсказания погоды глобального центра предсказания окружающей среды США (NCEP GFS), с сайта http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html. Средние значения СКН определялись по осредненному полю яркости солнечного блика путем «подгонки» модельного поля яркости (2.1) в наблюдаемое поле яркости блика.

Перепишем формулу (1), описывающую модельную яркость солнечного блика, с учётом (2.10) в виде:

$$Y = -X / s^2 + C, \quad (2.15)$$

где $Y = \ln(\bar{B} \cos \theta_v \cos^4 \beta)$, $X = a_2 Z_x^2 - a_{12} Z_x Z_y + a_1 Z_y^2$, а C – константа, очевидно включающая (под логарифмом) E_0 , ρ , α , другие константы, и s^2 . Среднее значение СКН в каждой k -й линии $(s^2)_k$ изображения в направлении перпендикулярном траектории полета можно легко определить, решая уравнение (15) методом наименьших квадратов:

$$(s^2)_k = - \frac{\sum_j (Y_{jk} - \bar{Y}_k) \cdot (X_{jk} - \bar{X}_k)}{\sum_j (X_{jk} - \bar{X}_k)^2}, \quad (2.16)$$

где черта обозначает их средние значения вдоль линии, перпендикулярной треку. Отметим также, что определенные таким образом средние значения s^2 дают нам возможность рассчитать по эмпирическим формулам Кокса и Манка (1954) осреднённые значения скорости ветра.

Как только значения s^2 найдены, значения передаточной функции T определяются по (14) при заданном направлении ветра и фиксированном значении параметра асимметрии наклонов поверхности $\alpha = 0.7$. Рассчитанное поле передаточной функции для данных MERIS представлено на рис. 5, б.

Поля контрастов яркости солнечного блика по данным MERIS и MODIS показано на рис. 6. В целом поля контрастов яркости, определенных по данным разных сканеров, похожи. Однако существует и ряд очевидных отличий, обусловленный различием геометрии наблюдений одной и той же акватории. В первую очередь это относится к полю яркости «нефтяной струи» в районе 87 ° з. д. На поле яркости MERIS (рис. 6, а) она выглядит как «яркая» струя, в то время как в поле яркости MODIS (рис. 6, б) контраст ее яркости меняет знак. Область смены знака контраста яркости называется зоной инверсии контрастов. Происхождение этой зоны инверсии контрастов следует из определения пере-

даточной функции в уравнениях (11) для MODIS и (14) для MERIS. Уравнение, определяющее линию, разделяющую солнечный блик на две части, в которых вариации СКН приводят к отрицательным и положительным контрастам яркости, задаётся следующим образом:

$$1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi}{p} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\eta}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0, \quad (2.17)$$

В случае изотропных гауссовых уклонов морской поверхности это уравнение сводится к следующему выражению:

$$1 - (Z_x^2 + Z_y^2) / s^2 = 0, \quad (2.18)$$

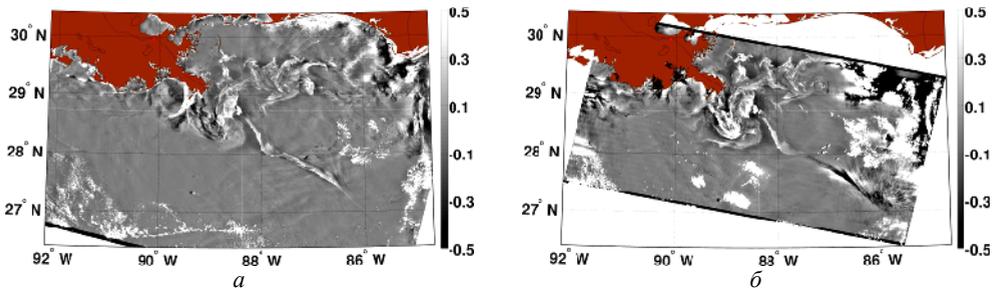


Рис. 6. *a, б* – контрасты яркости \tilde{B}/\bar{B} , полученные по данным MERIS и MODIS, соответственно

Пространственная кривая, указывающая положение зоны инверсии контрастов, определяется из решения уравнения (18). Тот факт, что зона инверсии видна в данных MODIS и не видна в данных MERIS, полученных 30-ю минутами ранее, объясняется тем, что положение зоны инверсии, как и форма солнечного блика, зависит в первую очередь от геометрии наблюдения, а также определяется скоростью и направлением ветра. В условиях «геометрии» наблюдений сканером MERIS зона инверсии сместилась за пределы солнечного блика, поэтому она и не наблюдается.

Контрасты СКН \tilde{s}^2 / s^2 , полученные из полей контрастов яркости, представлены на рис. 7. Поля контрастов СКН, связанные с проявлением нефтяных загрязнений, имеют отрицательные значения. Это объясняется известным фактом, что появление пленок нефтепродуктов на морской поверхности приводит к гашению коротких ветровых волн, дающих существенный вклад в СКН морской поверхности. Отметим, что поля контрастов СКН, восстановленные по данным MERIS и MODIS, имеют схожий вид. Важно, что величины контрастов СКН, восстановленных по разным изображениям, имеют одинаковый порядок величины, $\tilde{s}^2 / s^2 = -0,3 \dots -0,4$. Это свидетельствует о том, что предложенный метод восстановления контрастов СКН является «надежным», т.к. его применение в двух различных вариантах к двум независимым источникам данных дает один и тот же результат.

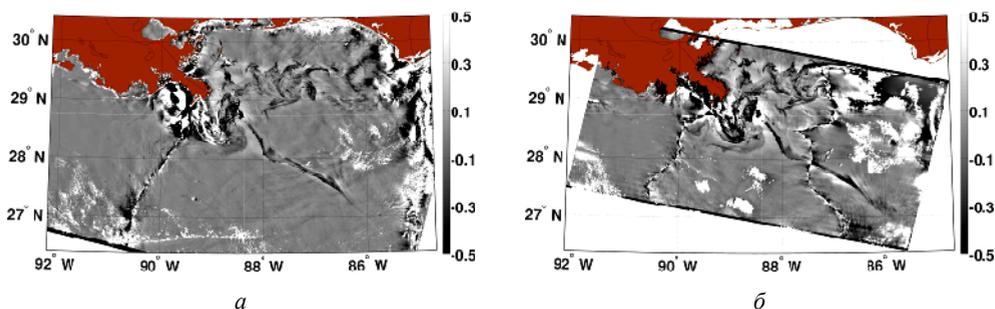


Рис. 7. *а, б* – контрасты СКН \tilde{s}^2/s^2 , полученные по данным MERIS и MODIS, соответственно. Контрастная линия, проявляющаяся на обоих изображениях, в районе 90 и 87° з.д. и есть зона инверсии контрастов

На обоих полях контрастов СКН обращает на себя внимание «линейные» области с аномально высокими значениями контрастов. Это зоны инверсии контрастов; в окрестности этих зон передаточная функция стремится к нулю $T \rightarrow 0$, поэтому эта зона проявляется в виде сингулярного поведения контрастов СКН, которые не имеют физического смысла.

Также интересным и стоящим более подробного исследования являются эффекты проявления контрастов яркости и СКН нефтяной плёнки в непосредственной близости от устья р. Миссисипи. Если сравнить контрасты яркости \tilde{B}/\bar{B} MERIS (рис. 6, *а*) с контрастами MODIS (рис. 6, *б*) и контрасты СКН \tilde{s}^2/s^2 (рис. 7), то видно, что контрасты яркости и СКН MODIS (рис. 6, *б* и рис. 7, *б*) на довольно большой части снимка (в районе 89° з. д. у устья Миссисипи) непрерывно отрицательны и обрамлены положительными вариациями. В то время как в контрастах яркости и СКН MERIS (рис. 6, *а*, и рис. 7, *а*) лишь часть этого же нефтяного пятна проявляется отрицательными контрастами яркости и СКН, а другая часть – положительными контрастами яркости и СКН, а цвет нефти.

Дело в том, что на проявления нефтяной плёнки на оптических изображениях влияет множество факторов. Цвет нефтяного пятна зависит и от длины волны отражённого нефтью солнечного излучения, которое регистрируется прибором, и от поглощённого и рассеянного в объёме нефти излучения, и от отражения водой, находящейся под плёнкой, а также от состава самой нефти. С подробным описанием и классификацией проявлений нефтяных плёнок на морской поверхности можно ознакомиться на сайте соглашения по взаимодействию в вопросах загрязнения Северного моря (BONN agreement) <http://www.bonnagreement.org/>. В табл. 1 приводятся пять уровней проявлений нефтяных плёнок, в соответствии с классификацией BONN соглашения. Аналогичная классификация принята и в Международной федерации загрязнения владельцев танкеров (ИТОПФ).

Таблица 1

Пять уровней проявлений нефтяных плёнок на морской поверхности

Код	Описание проявления	Интервал толщин, мкм	Литры на км ²
1	Серебряно-серые переливы	0,04–0,30	40–300
2	Радужный	0,30–5,0	300–5000
3	Металлический	5,0–50	5000–50 000
4	Разрывные истинные цвета нефти	50–200	50 000–200 000
5	Непрерывные истинные цвета нефти	более 200	более 200 000

В соответствии с этой классификацией нефтяной разлив можно отнести к коду 4 или 5. Для нефтяных плёнок, толщиной более 50 мкм, солнечный свет больше отражается самой плёнкой, нежели водной поверхностью. В результате, истинный цвет нефти будет доминировать над наблюдаемым, и коричневая нефть будет видна как коричневая, а чёрная – как чёрная. Поэтому в красном канале мы наблюдаем не выглаженную поверхность моря, а цвет самой нефтяной плёнки.

Поверхностные проявления внутренних волн

Район западно-экваториальной Атлантики, напротив устья р. Амазонки, является областью регулярного возникновения очень мощных внутренних волн (ВВ), формируемых полусуточными приливными волнами [см., например, Ivanov et al., 1993]. Экспериментальные исследования ВВ и их влияния на обрушения ветровых волн, проведенные в этом районе, представлены в работе [Dulov et al., 1986]. В этих экспериментах было обнаружено, что интенсивность ВВ коррелировала с фазами Луны, т.е. генерация ВВ имела явно приливное происхождение. В периоды интенсификации ВВ амплитуды ВВ достигали 100 м, а при прохождении ВВ (в направлении на северо-восток, противоположному ветру) на поверхности возникали коррелированные со смещениями термоклина области сильной интенсификации обрушения ветровых волн. Усиление обрушения (в несколько раз по отношению к фоновым значениям) возникало при заглублении термоклина, и почти исчезало при поднятии термоклина, т.е. усиление/подавление обрушения ветровых волн происходило в зонах конвергенции/дивергенции течений, индуцированных ВВ на морской поверхности.

Исходное изображение MODIS/Aqua этого района, полученное 21 сентября 2009, 16:20, показано на рис. 8, а.

Несмотря на то что наблюдаемая область частично покрыта облаками, на снимке легко различимы солнечный блик и линейчатые вариации яркости внутри блика (поверхностные проявления ВВ). Также на рис. 8 приводятся поля относительных вариаций яркости \tilde{B}/\bar{B} (рис. 8, б) и передаточная функция T (рис. 8, в). Очевидно, что поле относительных вариаций яркости уже содержит признаки ВВ в солнечном блике. Но, в отличие от примера с нефтяным разливом в Мексиканском заливе, в данном случае передаточная функция не имеет зоны инверсии контрастов. Поэтому, как следует из уравнения (6), знак \tilde{B}/\bar{B} противоположен знаку контрастов СКН.

На рис. 8, *в* приводятся контрасты СКН, отражающие поверхностные проявления ВВ. Поле ВВ имеет характер чередующихся цугов ВВ, распространяющихся в северо-восточном направлении. В начале каждого из цугов идет уединенная волна (солитон).

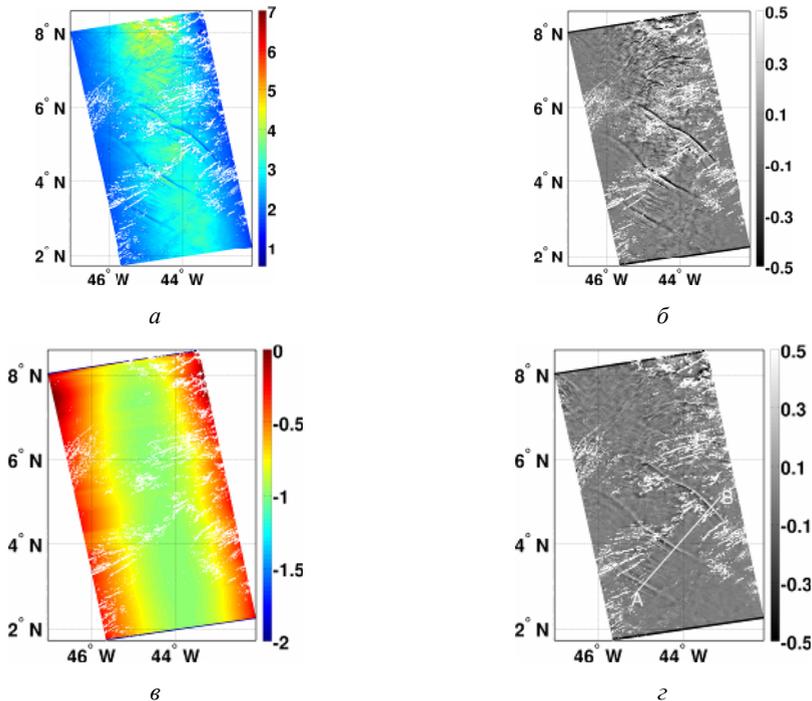


Рис. 8. *а* – фрагмент исходного изображения MODIS/Aqua (21 сентября 2009, 16:20) в красном канале (645 нм) района устья р. Амазонки с признаками ВВ; *б* – контрасты яркости \tilde{B}/\bar{B} ; *в* – передаточная функция T , заданная уравнениями (6)–(8); *г* – контрасты СКН $\tilde{\xi}^2/s^2$. Белые области на изображениях – маска облаков.

Линия А-В обозначает положение сечения, показанного на рис. 9

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

Профиль вариаций СКН вдоль сечения А-В (отмеченного на рис. 8, *в*) представлен на рис. 9 вверху. Распределение солитонов ВВ в вариациях СКН имеет «биполярную» форму с положительными и отрицательными аномалиями СКН. Возвращаясь к форме солитона ВВ, можно заключить, что повышение/уменьшение СКН имеет место в зонах конвергенции/дивергенции поверхностных течений, вызванных ВВ. Поведение контрастов СКН очень схоже

с пространственными вариациями обрушений ветровых волн, вызванных ВВ, которые были проанализированы в работе [Dulov et al., 1986].

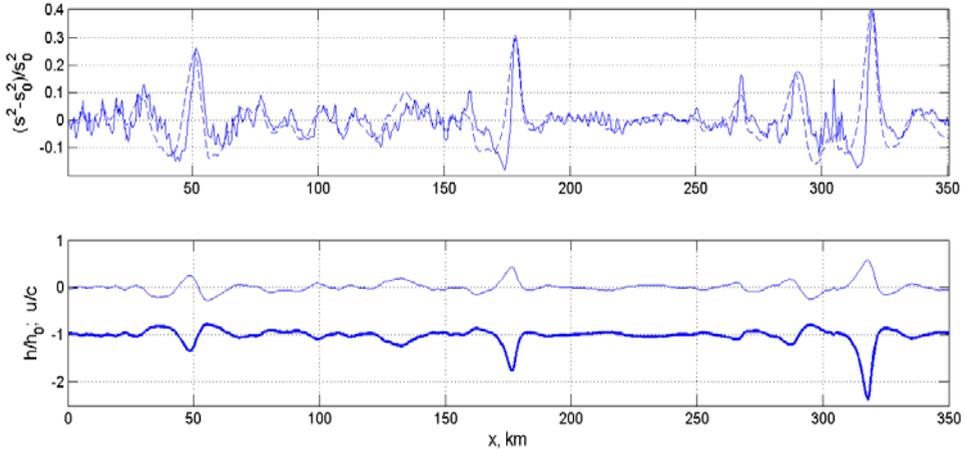


Рис. 9. Вверху – профиль контрастов СКН (сплошная линия) вдоль сечения А-В, показанного на рис. 8, в. Пунктирная линия отражает RIM моделирование; внизу – смещение термоклина ВВ-й (жирная линия) и скорость течения на поверхности, вызванное ВВ (тонкая линия)

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

$$u(x) = c_u \int_0^x (K_s - \langle K_s \rangle) dx, \quad (19)$$

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

Далее, поверхностная скорость течений, определенная соотношением (19), задавалась в качестве входного параметра для модельных расчетов поверхностных проявлений ВВ по модели RIM. В этих расчетах средняя скорость ветра

принята равной 7 м/с, направление ветра – противоположным направлению распространения ВВ, а фазовая скорость ВВ задана как $c = 3,5$ м/с. Значение постоянной c_u выбиралось таким образом, чтобы значения вариаций СКН в пиках (над солитонами ВВ) соответствовали бы наблюдаемым значениям. Модельные контрасты СКН показаны на рис. 9, верхний график. Как следует из этого рисунка, профиль модельных контрастов согласуется с наблюдаемым полем вариаций СКН. Этот факт позволяет заключить, что наблюдаемые модуляции СКН, в действительности, определяются конвергенцией и дивергенцией течений, индуцируемой ВВ на поверхности, образованных ВВ.

Поле поверхностной скорости $u(x)$, индуцируемое ВВ, а так же как соответствующая глубина залегания термоклина $h(x)$ (рассчитанная с использованием формулы $u/c = (h-h_0)/h$, где h_0 – невозмущённая глубина) приведены на рис. 9, нижний график. Полагая $h_0 = 100$ м, амплитуды смещения термоклина $h-h_0$ для двух ведущих солитонов составляют 120 и 80 м, что согласуется с данными измерений [Dulov et al., 1986] в этом районе.

Заключение

В данной работе предложен 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, искусственные и биологические слики, внутренние волны, границы мезомасштабных течений и фронтальные разделы. С этой точки зрения, предложенный метод может рассматриваться как определенный шаг в направлении развития методов диагностики океана из космоса.

Алгоритм восстановления использует передаточную функцию, связывающую контрасты яркости в солнечном блике с контрастами СКН. Определение передаточной функции напрямую основано на наблюдаемых градиентах яркости солнечного блика, что позволяет работать с различными оптическими спектрометрами.

В работе рассматриваются примеры применения алгоритма к изображениям, получаемым со сканеров MODIS и MERIS, данные с которых широко используются для решения научных и прикладных задач. В качестве примера приведен анализ поверхностных проявлений катастрофического нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе и внутренних волн в районе устья р. Амазонки. В результате анализа обработанных спутниковых изображений показано, что предложенный метод дает возможность оценить пространственное распределение поверхностных загрязнений и контрасты СКН, которые определяются физико-химическими свойствами поверхностных пленок.

Поверхностные проявления ВВ также хорошо видны в контрастах СКН. Усиление/подавление СКН имеет место в зонах конвергенции/дивергенции поверхностных течений, индуцируемых ВВ. Показано, что по наблюдаемым вариациям СКН можно решить обратную задачу – восстановить поле скорости ВВ и связанные с ними смещения термоклина.

Предложенный метод открывает новые возможности анализа оптических изображений океана из космоса. Можно ожидать, что совместное использование предложенного метода с данными радиолокационных измерений позволит существенно продвинуться в понимании физики проявления океанических явлений на поверхности и развития методов дистанционной диагностики океана из космоса.

Литература

1. Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н. Анализ структуры фотоизображений морской поверхности в районе солнечного блика // Мор. гидрофиз. журн, 1986, № 1.
2. Данные модели предсказания погоды глобального центра предсказания окружающей среды США (NCEP GFS): http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html
3. Agreement for cooperation in dealing with pollution of the North Sea by oil and other harmful substances, 1983. <http://www.bonnagreement.org/>
4. Bolshakov A.N., Burdyugov V.M., Grodskii S.A., Kudryavtsev V.N., Proshchenko V.G. Spectra of energy-containing surface waves determined from sunglitter images. Comparison with in situ data // Issledovaniye Zemli iz Kosmosa (English translation “Earth Observation from Space”), 1990, 1, 19-27.
5. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing, Remote Sens. Environ., 2005, 95, 1–13.
6. Bréon F.M., N. Henriot Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geophys. Res., 2006, 111, C06005, doi:10.1029/2005JC003343.
7. Chapron B., Kerbaol V., Vandemark D., Elfouhaily T. Importance of peakedness in sea surface slope measurements and applications // J. Geophys. Res., 2000, 105, 17,195–17,202.
8. Chust G., Sagarminaga Y. The multi-angle view of MISR detects oil slicks under sun glitter conditions, Remote Sens. Environ., 2007, 107, 232–239.
9. Cox C., Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter // J. Mar. Res., 1954, 13, 198–227.
10. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter. // J. Opt. Soc. Amer., 1954, 44, 838–850.
11. Cox C., Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography, C. E. ZoBell, R. A. Arthur, and D. L. Fox, Eds., vol. 6, No. 9, University of California Press, 1956, 401–488.
12. Doerffer R., Schiller H. The MERIS Case 2 water algorithm // Int. J. Remote Sens. 2007, 28, 3-4, 517-535, doi:10.1080/01431160600821127.
13. Dulov V., Klyushnikov S., Kudryavtsev V. Effect of Internal waves on intensity of wind wave breaking. Field observation // Мор. Гидрофиз. Ж. (English translation “Soviet Journal of Physical Oceanography”), 1986, 6, 14-21.
14. Ebuchi N., Kizu S. Probability distribution of surface slope derived using Sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers // J. Oceanogr., 2002, 58, 477–486.
15. Environmental impact of the Gulf War: An integrated preliminary assessment. Hosny Khordagu, Dhari Al-Ajmi. Environmental Management, vol. 17, N 4 / July, 1993M.
16. Esaias W.E. et al. An overview of MODIS capabilities for ocean science observations, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1998, 36, 4.

17. *Hu C., Li X., Pichel W.G., Muller-Karger F.E.* Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery // *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 36, L01604, doi:10.1029/2008GL036119.
18. *Ivanov V.A., Pelinovsky E.N., Talipova T.G.* The long-time prediction of intense internal wave heights in the tropical region of the Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, 23, 2136–2142.
19. *Jackson C.* Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. of Geophys. Res.*, 2007, 112, C11012, doi:10.1029/2007JC004220.
20. *Jerlov N.G.* (1976). *Marine Optics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Elsevier Oceanography Series, 14.
21. *Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Folkestad A., Pettersson L.H., Sorensen K., Shuchman R.* Semi-empirical algorithm for the retrieval of ecology-relevant water constituents in various aquatic environments // *Algorithms*, 2009, vol. 2, p. 470–497.
22. *Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J.A., Chapron B.* On radar imaging of current features. Part 1: Model and comparison with observations // *J. of Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, C07017.
23. *Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B., Johannessen J., Collard F.* (2010). Synergy of SAR and optical imagery in studies of meso-scale ocean dynamics. Proc. 3rd SeaSAR workshop “Advances in SAR Oceanography from ENVISAT, ERS and ESA third party missions”, ESA SP679.
24. *Mitnik L., Alpers W., Chen K.S., Chen A.J.* Manifestation of internal solitary waves on ERS SAR and SPOT images: Similarities and differences, paper presented at 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’00), Inst. of Electr. and Electron. Eng., New York, 2000.
25. *Montagner F., Billat V.* Sun glint flag algorithm, MERIS Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD) 2000, 2.13, 4 (1), 13-1.
26. *Myasoedov A., Kudryavtsev V., Chapron B., Johannessen J.* Sun glitter imagery of the ocean phenomena, Proc. 3rd SeaSAR workshop “Advances in SAR Oceanography from ENVISAT, ERS and ESA third party missions”, ESA SP679, 2010.
27. Official ESA web-site: <http://envisat.esa.int/instruments/meris/>
28. <http://envisat.esa.int/dataproducts/meris/CNTR3.htm>
29. *Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H.* MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, 27, 145–153.
30. *Saunier S., Goryl P.* MERIS absolute geo location status, GAEL Consultant, 2004.
31. *Wolfe R., Nishihama M., Fleig A., Kuiper J., Roy D., Storey J., Patt F.* Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83, 31–49.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах», контракт №П1677 от 21.09.2009.