

Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика

Рассмотрен новый подход к интерпретации оптических спутниковых изображений океана в зоне солнечного блика, который основан на оценке передаточной функции, связывающей контрасты яркости изображения и контрасты дисперсии уклонов морской поверхности (*MSS*). При выводе выражений для передаточной функции предполагается, что яркость блика формируется одним лишь зеркальным отражением солнечного света от морской поверхности, а возмущения *MSS* малы по сравнению со средними значениями дисперсии уклонов поверхности. В результате анализа получено поле контрастов *MSS*, во многом аналогичное спутниковым *SAR*-изображениям. Выполнен анализ изображений Черного моря, полученных со спутников *Aqua* и *Terra* в весенне-летний период 2013 г., в области солнечного блика в каналах 645 и 858 нм. Рассчитаны поля контрастов яркости изображений и контрастов *MSS* с пространственным разрешением 250 м. Сделан вывод, что метод дает возможность наблюдать проявления внутренних волн, мезомасштабных вихреобразных структур, фронтов, особенностей прибрежной динамики, а также позволяет обнаруживать антропогенные слики и движущиеся суда.

Ключевые слова: солнечный блик, спутниковые изображения, шероховатость морской поверхности, среднеквадратичный уклон, обработка изображений.

Введение

Спутниковые радиолокационные изображения высокого разрешения (*SAR*) имеют широкое применение для мониторинга морской поверхности и подповерхностных процессов, однако такие изображения являются чрезвычайно дорогостоящими. В данной работе рассмотрен альтернативный подход, позволяющий получать ту же информацию, но из свободно доступных спутниковых изображений видимого диапазона. Вариации яркости в зоне солнечного блика, как и вариации обратного рассеяния в микроволновом диапазоне, отражают одно и то же явление - изменчивость шероховатости морской поверхности. Поэтому зоны солнечного блика на оптических изображениях, непригодные для стандартного анализа цвета океана, в действительности могут служить аналогом спутниковых радиолокационных данных.

Методика использования солнечного блика для извлечения информации об уклонах поверхностных волн, впервые реализованная в 1924 г. В.В. Шулейкиным [1] и блестяще приложенная в 1954 г. Коксом и Манком [2] к исследованию статистических характеристик морской поверхности, послужила основой для разработки в конце 80-х гг. в Морском гидрофизическом институте НАН Украины метода оценки калиброванных спектров поверхностных волн по фотографиям моря с самолета [3, 4]. Впоследствии метод был развит как с целью оценки спектров наиболее коротких ветровых волн [5, 6], так и в приложении к оптическим спутниковым изображениям моря в зоне солнеч-

ного блика. Описание подхода к интерпретации структуры поля яркости оптического спутникового изображения в зоне блика приведено в [7]. Там же подход был успешно применен для идентификации нефтяных разливов в Мексиканском заливе. В [8] показано, что получаемая таким путем информация во многом эквивалентна спутниковым радиолокационным данным с синтезированием апертуры (SAR).

Однако возможности метода зависят как от географической широты (из-за формы и интенсивности зоны блика), так и от времени пролета спутников, данные с которых могут быть доступными. На рис. 1 (см. цветную вкладку ниже) показан характерный вид зоны блика для области Черного моря в дневное время. Как правило, в отличие от открытого океана форма зоны блика оказывается весьма неопределенной из-за наложения фрагментов суши и облаков. Цель данной работы – реализовать метод для условий Черного моря, приложить его к интерпретации оптических изображений *MODIS/Terra* и *MODIS/Aqua* и продемонстрировать возможности нового подхода.

Подход к анализу зоны солнечного блика

Кратко изложим теоретическую формулировку метода, детальное описание которого приведено в работах [7, 8]. Рассмотрим поле яркости морской поверхности $B(x, y)$ в зоне блика, пренебрегая восходящим излучением и излучением неба, отраженным от поверхности. Тогда яркость определяется только зеркальным отражением солнечного света [2, 9]:

$$B = \frac{\rho E_s}{4 \cos \mathcal{G}_v \cos^4 \beta} P(Z_x, Z_y), \quad (1)$$

где E_s – солнечная постоянная; ρ – коэффициент отражения Френеля; \mathcal{G}_v – зенитный угол обзора; P – двумерная функция вероятности морских уклонов z_x и z_y ; Z_x и Z_y – значения уклонов морской поверхности, удовлетворяющие условию зеркального отражения солнечного света, принятого спутником:

$$\begin{aligned} Z_x &= -\frac{\sin \mathcal{G}_s \cos \varphi_s + \sin \mathcal{G}_v \cos \varphi_v}{\cos \mathcal{G}_s + \cos \mathcal{G}_v}, \\ Z_y &= -\frac{\sin \mathcal{G}_s \sin \varphi_s + \sin \mathcal{G}_v \sin \varphi_v}{\cos \mathcal{G}_s + \cos \mathcal{G}_v}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь \mathcal{G}_s – зенитный угол солнца; φ_v и φ_s – азимутальные углы спутника и солнца; $\tan \beta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}$. Функция распределения уклонов P в общем случае не является гауссовой [2, 9, 10].

Поле яркости B можно разложить на сумму крупномасштабной фоновой части B_0 и возмущений \tilde{B} : $B = B_0 + \tilde{B}$. Поле B_0 соответствует яркости на масштабах ширины солнечного блика L (~ 100 км), поле \tilde{B} содержит детали изображения на значительно меньших масштабах, $l \ll L$ (~ 10 км), которые

можно интерпретировать как яркостные проявления океанических явлений. Запишем распределение плотности вероятности P в безразмерной форме:

$$P(Z_x, Z_y) = s^{-2} p(\xi, \eta), \quad (3)$$

где $\xi = Z_x/s$, $\eta = Z_y/s$ – нормированные уклоны морской поверхности; s^2 – дисперсия уклонов (MSS); p – нормированная функция распределения уклонов. Вариации s^2 так же, как и другие статистические характеристики морских уклонов, могут быть представлены как сумма среднего значения s_0^2 и возмущений \tilde{s}^2 ($s^2 = s_0^2 + \tilde{s}^2$), изменчивость которых характеризуется масштабами L и l . Тогда в линейном приближении получаем связь между контрастами яркости и MSS :

$$\ln\left(\frac{B_0 + \tilde{B}}{B_0}\right) = -T \frac{\tilde{s}^2}{s_0^2}, \quad (4a)$$

$$T = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln \xi} + \frac{\partial \ln p}{\partial \ln \eta} \right). \quad (4б)$$

Передаточная функция T может быть найдена эмпирически. С помощью уравнения (1) из наблюдаемых крупномасштабных градиентов яркости солнечного блика можно получить градиенты p , входящие в уравнение (4б):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln p}{\partial \ln \xi} &= Z_x \frac{\nabla_x \ln(B_0 \cos \vartheta_b) \cdot \nabla_y Z_y - \nabla_y \ln(B_0 \cos \vartheta_b) \cdot \nabla_x Z_y}{\Delta} - \frac{4Z_x^2}{1 + Z_x^2 + Z_y^2}, \\ \frac{\partial \ln p}{\partial \ln \eta} &= Z_y \frac{\nabla_y \ln(B_0 \cos \vartheta_b) \cdot \nabla_x Z_x - \nabla_x \ln(B_0 \cos \vartheta_b) \cdot \nabla_y Z_x}{\Delta} - \frac{4Z_y^2}{1 + Z_x^2 + Z_y^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где (∇_x, ∇_y) – градиенты в направлениях (x, y) ; $\Delta = \nabla_x Z_x \cdot \nabla_y Z_y - \nabla_y Z_x \cdot \nabla_x Z_y$. Таким образом, получаем подход к восстановлению контрастов MSS без дополнительных предположений о распределении уклонов поверхности.

Применимость исходной формулы (1) к интерпретации спутниковых изображений была тщательно проверена в работе [9]. Отметим, что рассматриваемый метод восстановления аномалий MSS аналогичен методу оценки двумерного спектра уклонов поверхности по фотографиям солнечного блика, который был предложен в [3, 4]. Его развитием явилась методика оценки спектров самых коротких поверхностных волн [5], результаты применения которой были верифицированы в [6] с помощью всех доступных данных. Этот факт можно рассматривать как косвенное подтверждение правильности обсуждаемого подхода. Ряд результатов, серьезно подтверждающих работоспособность метода, приведен в [7, 8]. В частности, в работе [8] продемонстрировано совпадение полей контрастов MSS , рассчитанных с помощью обсу-

ждаемого метода, и радиолокационных контрастов на квазисинхронном SAR-изображении той же области океана.

Рассматриваемый метод позволяет оценить контрасты MSS , но для получения абсолютных величин среднеквадратичного уклона необходима дополнительная информация. Например, если известно крупномасштабное поле скорости ветра, то величина s_0^2 может быть найдена по формуле Кокса и Манка [2]. Однако получение только лишь поля контрастов MSS уже дает существенную полезную информацию. Дело в том, что передаточная функция T значительно изменяется на масштабах зоны блика, поэтому одним и тем же величинам контрастов MSS соответствуют проявления в виде сильно различающихся контрастов яркости. Более того, в зоне блика передаточная функция меняет знак, что приводит к появлению линий инверсии контрастов $T(x, y) = 0$ [3, 4, 7]. В результате одна и та же океаническая особенность, например нефтяной разлив, проявляется в виде относительно темной области с одной стороны линии инверсии и яркой области – с другой стороны. Около зеркальной точки, в центральной части блика, где $T > 0$, более шероховатая поверхность будет выглядеть темнее, а на периферии блика, где $T < 0$, – ярче. Подчеркнем, что проявления океанических особенностей в оптическом спутниковом изображении локализованы в зоне блика, т. е. на фоне существенного крупномасштабного градиента яркости, что также осложняет идентификацию особенностей. Переход от яркости изображения к физической величине контрастов MSS дает возможность наблюдать вариации шероховатости морской поверхности в «чистом» виде, удобном для интерпретации спутниковых данных с научными или прикладными целями.

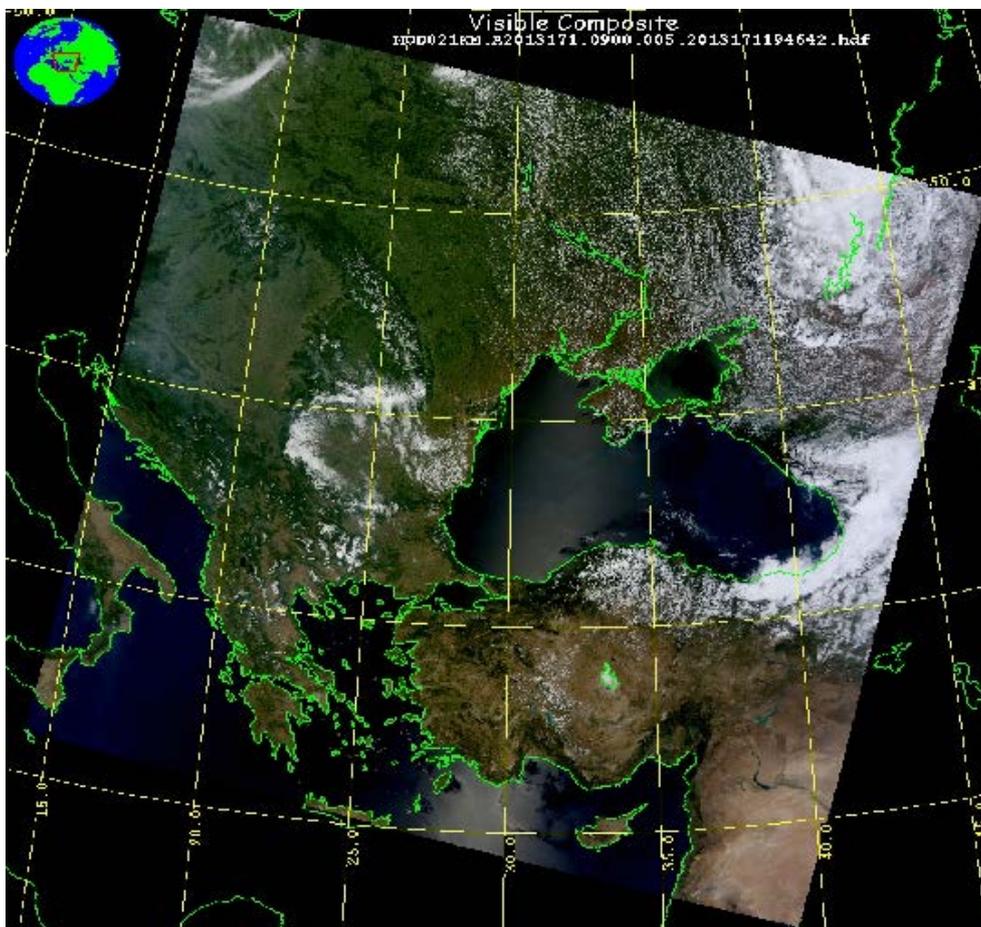
Использованные данные и алгоритм обработки

На оптических спутниковых изображениях содержатся отчетливые области повышенной яркости шириной $\sim 30^\circ$, они расположены около точки зеркального отражения Солнца. В этих зонах блика невозможно провести стандартные процедуры анализа цвета океана, однако удобно идентифицировать и изучать особенности поля шероховатости морской поверхности. Для анализа изменений шероховатости наиболее приемлем красный цветовой канал, т. к. свет этого диапазона поглощается тонким поверхностным слоем воды, поэтому восходящим из толщи океана излучением можно пренебречь. Кроме того, сигнал этого канала не зависит от температуры воды. Будем использовать данные *MODIS Level 1B* с разрешением 250 м в каналах 645 и 858 нм.

Благодаря конструкции сканирующего зеркала изображение *MODIS* представляет собой совокупность полос. Каждая из полос формируется с помощью 40 детекторов с полем обзора вдоль трека $\sim 0,8^\circ$, поперек трека – 110° . Геометрия съемки такова, что поле обзора одной полосы составляет 2330 км в направлении поперек трека и 10 км – вдоль трека в надире. Каждая полоса обеспечивает двумерное поле яркости поверхности, при наличии которого можно применить описанный выше метод. В этом случае в качестве ∇_x и

∇_y в уравнении (5) используются градиенты в направлениях вдоль и поперек полосы.

Пример исходного изображения со спутника *Terra* приведен на рис. 1. «Серые» области шириной в несколько градусов в западной части Черного моря, а также на востоке Средиземного соответствуют зонам солнечного блика. Поясним алгоритм обработки яркости, пользуясь фрагментом этого изображения в канале 858 нм. Алгоритм состоит из следующих шагов.



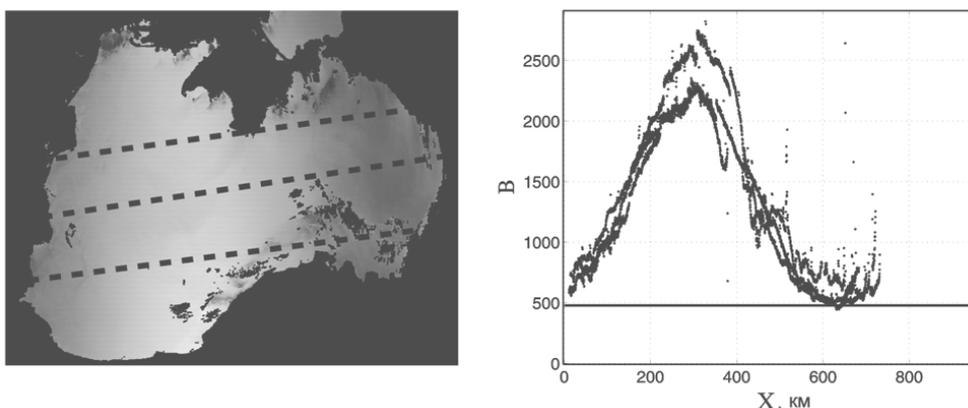
Р и с. 1. Изображение *MODIS/Terra*, 20 июня 2013 г., 09:00 GMT

1. На выделенный фрагмент изображения накладывается маска берега и облаков, которую можно взять из дополнительных источников, например из специальных продуктов *MODIS*. Эти точки в дальнейшем не будут принимать участия в обработке поля яркости изображения.

2. Поскольку яркость изображения формируется не только прямым отражением солнечного света в блике, но и другими факторами, включая отраженное излучение атмосферы, то для применения формулы (1) и следующих из нее выражений нужно исключить «фоновую» яркость, не связанную с

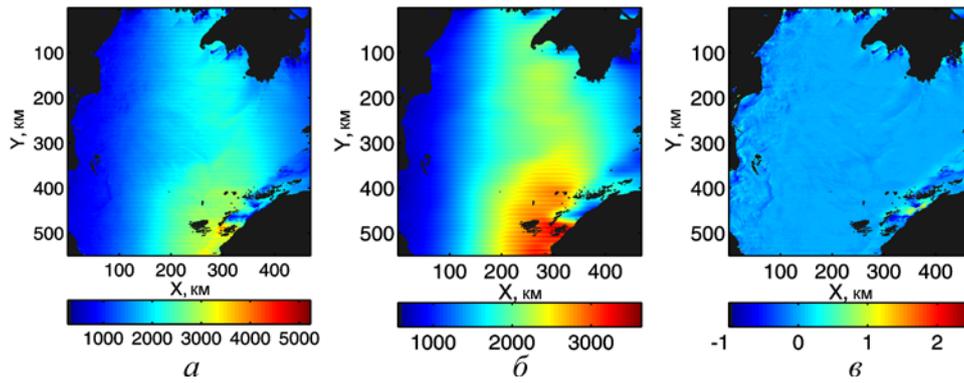
бликом. Для этого необходимо проанализировать поле яркости вне зоны блика. Однако не всегда удается выделить достаточно крупный участок поверхности Черного моря, свободный от блика и облаков, поэтому надежная оценка распределения яркости «фонового» поля часто затруднительна.

Одним из наиболее простых подходов является вычитание «постоянной подставки» к квазигауссовому распределению яркости в сечении блика. Построим несколько разрезов поля яркости в направлении поперек блика (рис. 2, а). Как видно из рис. 2, б, сечением блика действительно является функция, близкая к гауссиане, выходящая на некоторый «постоянный» уровень вне зоны блика (в данном случае ~ 480 единиц яркости). Будем считать этот уровень, B^* , величиной излучения, не связанного с прямым отражением солнечного света от морской поверхности. Далее проанализируем поле яркости $B - B^*$. Отметим, что полученный уровень фоновой яркости не является универсальным, т. е. он может изменяться в зависимости от времени и области съемки, поэтому описанная процедура проводится независимо для каждого изображения.



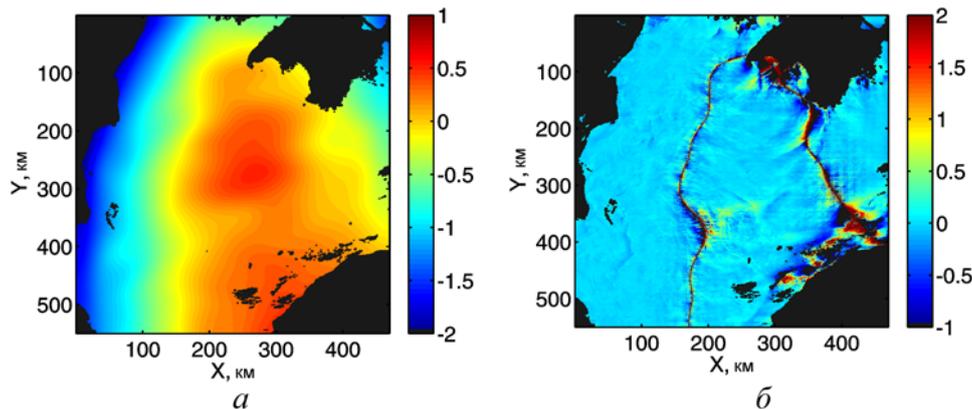
Р и с. 2. Изображение *MODIS/Terra* (20 июня 2013 г., 09:00 GMT): а – фрагмент изображения в канале 858 нм с нанесенной маской берега и облаков; б – профили яркости изображения вдоль отрезков, показанных штриховыми линиями на фрагменте а

3. Для дальнейшей обработки удобно вырезать из изображения прямоугольную область, охватывающую зону солнечного блика (рис. 3, а). В этой области рассчитывается поле средней яркости B_0 (рис. 3, б). Характерной особенностью изображений *MODIS*, проявляющейся в зоне блика, является «пилообразная» структура яркости, связанная с тем, что сканирование каждой полосы происходит со сдвигом во времени и пространстве (при переходе от одной полосы к другой спутник смещается примерно на 10 км в течение 5 мин). В связи с этим среднее поле яркости, контрасты и передаточная функция рассчитываются отдельно внутри каждой полосы. После вычитания из исходного поля B (рис. 3, а) среднего поля B_0 (рис. 3, б) получаем равномерное поле контрастов $(B - B_0)/B_0$ (рис. 3, в), не содержащее скачков при переходах между полосами.



Р и с. 3. Поле яркости фрагмента изображения B (a), поле средней яркости B_0 (b), поле контрастов яркости $(B - B_0)/B_0$ (c)

4. По формулам (4б) и (5) внутри каждой полосы рассчитывается передаточная функция T . Так как эта процедура проводится независимо в каждой полосе, иногда на границах отсутствует плавный переход. В этих случаях передаточная функция дополнительно сглаживается. Сглаженная передаточная функция, рассчитанная по градиентам яркости, показана на рис. 4, a , полученная с ее помощью оценка поля контрастов MSS – на рис. 4, b .



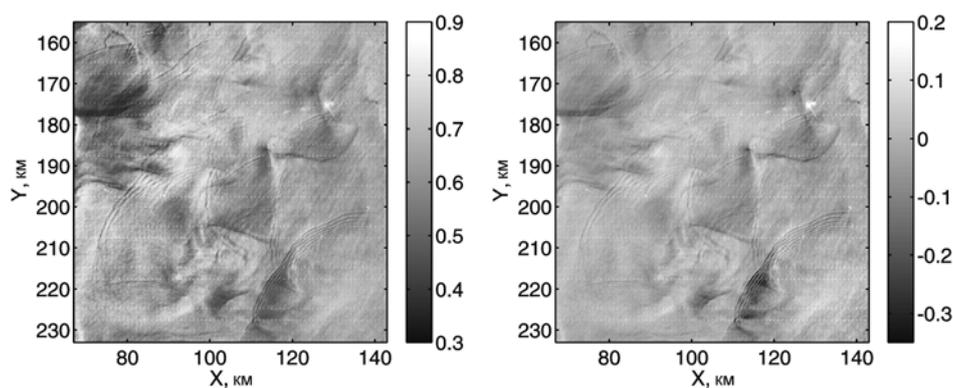
Р и с. 4. Передаточная функция T (a) и рассчитанное с ее помощью поле контрастов MSS (b)

Как следует из рис. 4, a , на данном участке изображения находятся две линии инверсии, на которых функция T меняет знак. В соответствии с выражением (4а) между этими линиями, т. е. в «центре» солнечного блика, где $T > 0$, области с повышенной шероховатостью выглядят менее ярко и наоборот – слики, подавляющие короткие волны, будут ярче, чем области вокруг них. Слева и справа от линий инверсии, т. е. на периферии блика, контрасты яркости по знаку будут соответствовать контрастам MSS . Линии инверсии выделяются также в рассчитанном поле контрастов MSS в виде сконцентри-

рованных вдоль них беспорядочных аномалий. Эти аномалии не несут в себе информацию, они возникают из-за деления контрастов яркости на стремящуюся к нулю передаточную функцию.

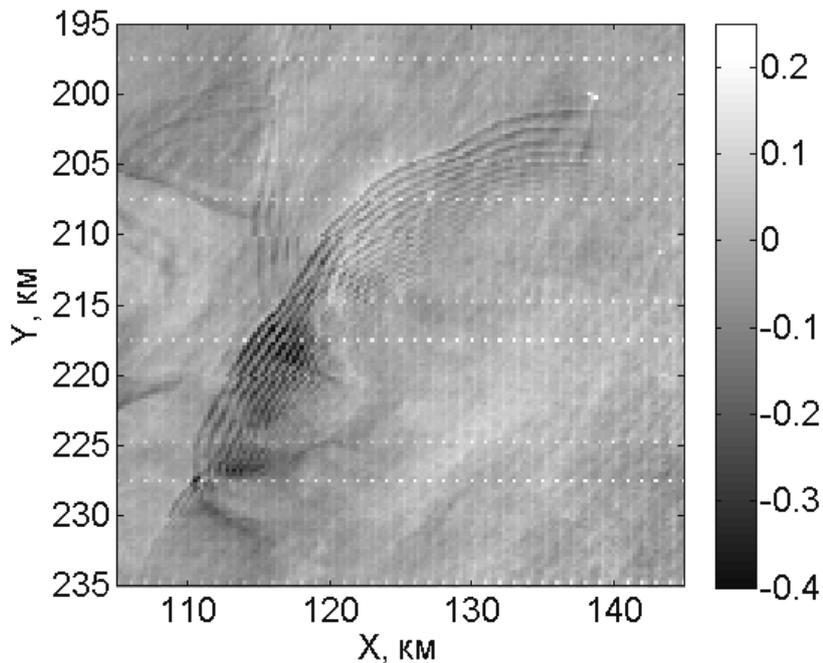
Интерпретация спутниковых изображений

На рис. 5 приведен увеличенный фрагмент обсуждаемого изображения, расположенный в его левой верхней части около берега. Показаны фрагмент поля контрастов яркости из рис. 3, *в* и соответствующий фрагмент поля контрастов *MSS* из рис. 4, *б*. На рисунках отчетливо видны многочисленные структуры, связанные как с усилением, так и с подавлением шероховатости морской поверхности. Обилие подобных структур, подобных приведенным как по форме, так и по масштабам, можно видеть на *SAR*-изображениях океана (см., напр., [8, 11]). В данном случае изображения контрастов яркости и *MSS* довольно похожи, т. к. выделенная область находится вдали от «центра» блика, где $T < 0$. Анализ контрастов яркости в таких областях служит простым инструментом для качественного исследования механизмов изменения шероховатости морской поверхности.



Р и с. 5. Контрасты яркости (слева) и контрасты *MSS* (справа) на увеличенных фрагментах рис. 3, *в* и 4, *б*

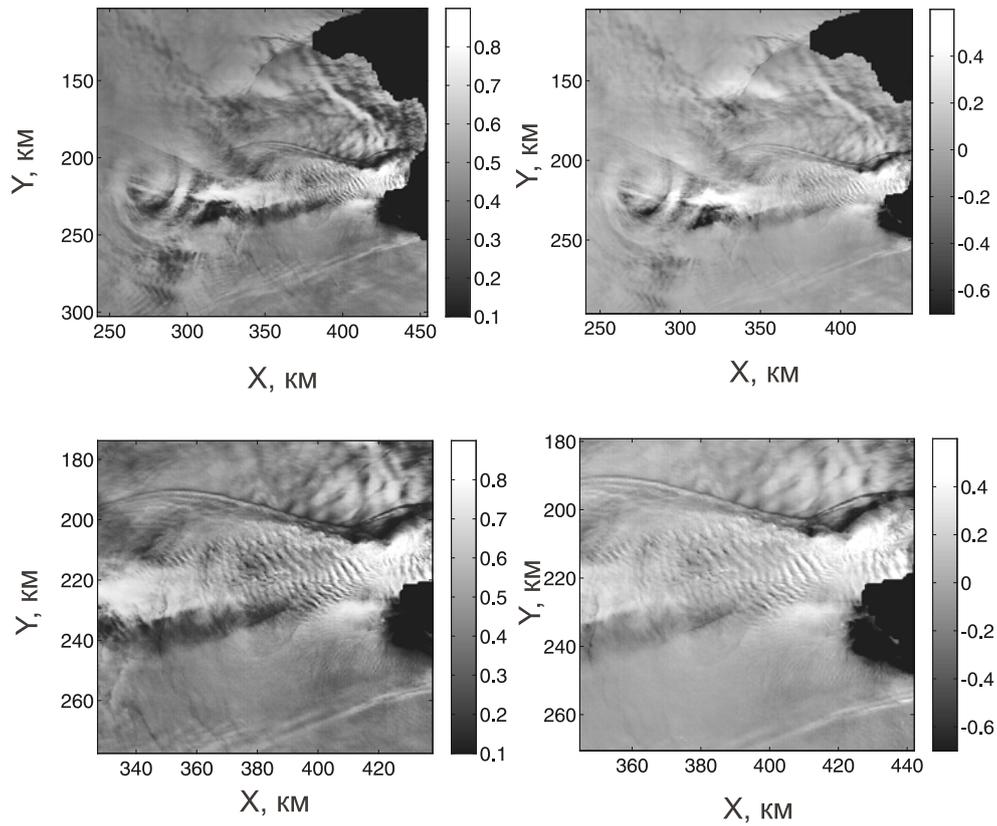
На рис. 6 более детально показана система внутренних волн, которую можно различить на рис. 5. Наблюдаемая картина весьма сходна с классическими радиолокационными изображениями проявлений внутренних волн (см., напр., [11]). По изображению можно оценить размеры волнового пакета, количество периодов, среднюю длину волн, направление их движения и контрасты *MSS* в формируемых волнами зонах дивергенции и конвергенции. Значения контрастов соответствуют примерно двукратному изменению величин дисперсии уклонов на различных фазах волны.



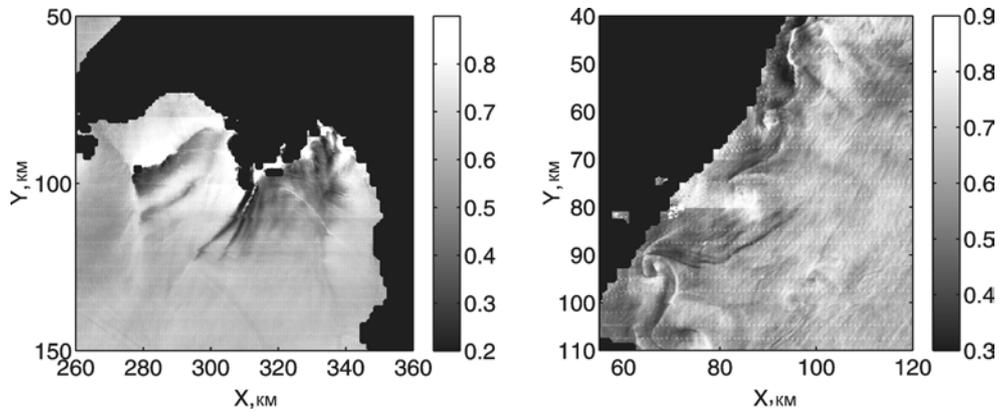
Р и с. 6. Контрасты *MSS*, вызванные пакетом внутренних волн

На рис. 7 приведены результаты обработки фрагмента изображения Черного моря к западу от Крымского п-ова (*MODIS/Aqua*, 10 мая 2013 г.). Можно видеть многообразие океанических явлений, проявившихся в контрастах яркости солнечного блика. В 200 км к западу от Севастополя видна вихреобразная структура диаметром ~ 50 км. В работе [8] подобная структура была проинтерпретирована как проявление мезомасштабного вихря в океане. Возможно, в данном случае наблюдается проявление Севастопольского антициклона, поскольку структура расположена в области его существования [12]. На рисунках также можно видеть проявления множества волновых процессов. В нижнем ряду приведены увеличенные фрагменты верхнего ряда рисунков, показывающие структуру волнового пакета неясного происхождения с гребнями волн, простирающимися от Севастопольского антициклона до Крыма. Контрасты *MSS* в разных областях перечисленных структур изменяются от $-0,6$ до $0,6$.

В прибрежных областях Черного моря в зоне блика часто обнаруживаются специфические явления, известные по радиолокационным наблюдениям. Такие явления могут быть связаны с неравномерностью поля ветра (струи и затенения) вблизи гор и других особенностей орографии, с фронтами на границах речных и антропогенных стоков, с неустойчивостью течений в области резкого перепада глубин и т. д. Рис. 8 демонстрирует проявления прибрежной динамики вблизи юго-западного побережья Крымского п-ова (слева) и прибрежных вихревых структур – у западного берега Черного моря (справа).

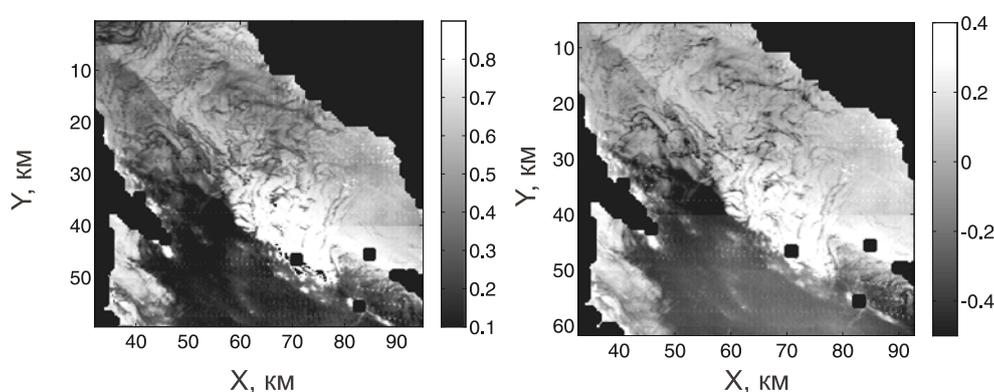


Р и с. 7. Фрагменты изображения *MODIS/Aqua*, 10 мая 2013 г., 10:50 GMT, около Крымского п-ова: контрасты яркости (слева) и контрасты *MSS* (справа)



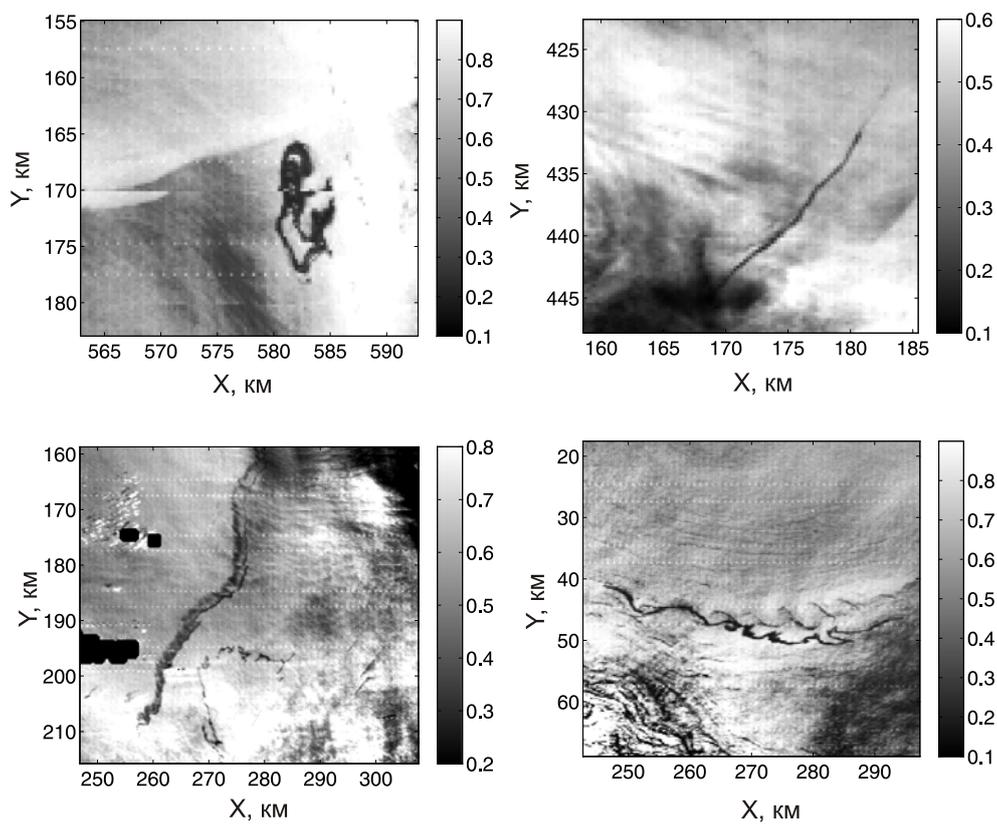
Р и с. 8. Проявления прибрежной динамики в контрастах *MSS* (увеличенные фрагменты изображения *MODIS/Terra*, 20 июня 2013 г., 09:00 GMT)

Отдельная важная прикладная задача, которая может быть решена с помощью предложенного подхода, состоит в идентификации нефтяных загрязнений морской поверхности. Наиболее подходящими для мониторинга даже самых незначительных изменений шероховатости являются области изображений на границе блика, включая окрестности штилевой зоны. Пример такой ситуации показан на рис. 9. Темная область в нижней части изображения соответствует зоне штиля. Вблизи границы темной области, где шероховатость поверхности моря мала ввиду отсутствия ветра, выделяются многочисленные темные нитевидные участки длиной ~ 10 км и шириной несколько сотен метров. Судя по величинам контрастов *MSS* (от $-0,2$ до $-0,4$), это могут быть как естественные минеральные слики, так и следы несильных загрязнений от проходящих в этом районе судов. В данном случае структура показанных полей неотличима от структуры *SAR*-изображений со сликами в условиях слабого ветра (см., напр., [13]).

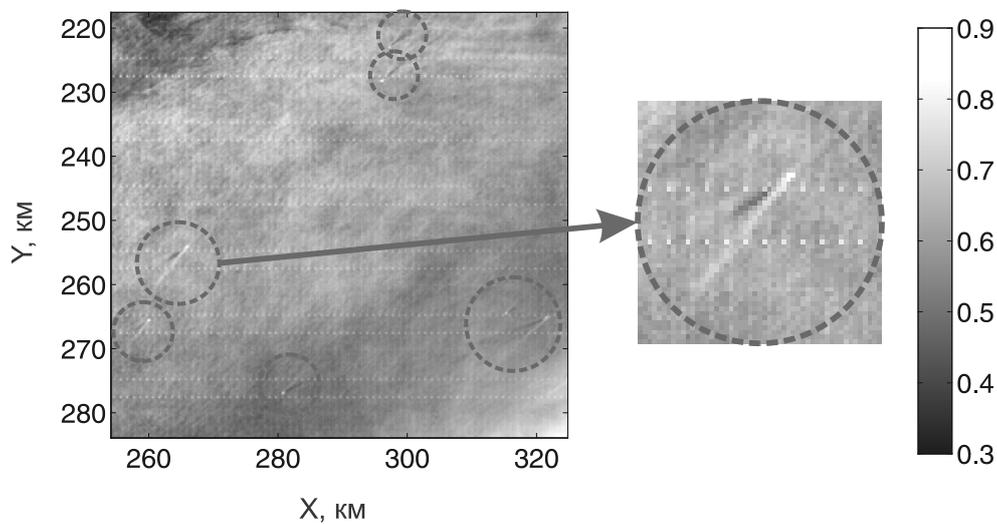


Р и с. 9. Снимки на границе штилевой области у северо-западного побережья Черного моря (*MODIS/Terra*, 4 июня 2013 г., 09:00 GMT): контрасты яркости (слева) и контрасты *MSS* (справа), темная область в нижней части изображения – зона штиля

Вывод об антропогенном характере сликов с большей уверенностью можно сделать для изображений на рис. 10, полученных в различных участках Черного моря различными спутниками: *MODIS/Terra*, 23 мая 2013 г., 08:35 GMT (слева вверху), *MODIS/Aqua*, 10 мая 2013 г., 10:50 GMT (справа вверху), *MODIS/Terra*, 13 июля 2013 г., 09:05 GMT (слева внизу) и *MODIS/Terra*, 22 июня 2013 г., 08:50 GMT (справа внизу). Помимо характерной «неестественной» формы наблюдаемых структур такое заключение подтверждается повышенными значениями контраста *MSS*, достигающими величины $-0,7$.



Р и с. 10. Примеры структур, связанных с загрязнениями морской поверхности



Р и с. 11. Вариации яркости изображения морской поверхности, вызванные движением судов (MODIS/Terra, 22 июня 2013 г., 08:50 GMT)

Несмотря на относительно невысокое разрешение оптических изображений по сравнению с радиолокационными изображениями *SAR*, предложенная методика в некоторых случаях позволяет также решить задачу обнаружения движущихся судов, размеры которых могут быть намного меньше 250 м (минимальный размер пиксела изображения *MODIS*). Это оказывается возможным благодаря характерному следу длиной до 10 км, идущему за судном вдоль направления его движения. Пример участка моря с большим количеством судов приведен на рис. 11. След всегда состоит из двух расходящихся от судна зон – с пониженной и повышенной шероховатостью (см. увеличенный фрагмент рисунка). При этом само судно, как правило, выглядит в виде яркой точки.

Заключение

Новый подход к интерпретации оптических спутниковых изображений океана в зоне солнечного блика, предложенный в работе [7], был реализован для региона Черного моря и апробирован на снимках *MODIS/Terra* и *MODIS/Aqua*, сделанных в весенне-летний период 2013 г. В рамках подхода информация извлекается из фрагментов изображений, формируемых прямыми отражениями Солнца от морской поверхности, которые обычно не используются в целях мониторинга океана. Крупномасштабные вариации яркости в зоне солнечного блика несут информацию о передаточной функции, связывающей контрасты яркости изображения и контрасты *MSS*. Выходом анализа является поле контрастов *MSS*, во многом аналогичное спутниковым *SAR*-изображениям. Однако в отличие от чрезвычайно дорогостоящих радиолокационных данных в предложенном методе используются свободно доступные оптические спутниковые изображения.

Для реализации подхода разработан алгоритм и создан комплекс компьютерных программ обработки спутниковых данных. Пространственный масштаб Черного моря меньше масштаба зоны блика на изображениях, что представляло определенные трудности при реализации метода. «Пилообразный» характер полей яркости в зоне блика, специфический для устройства *MODIS*, также требовал специального учета при выполнении обработки. В результате был сделан анализ всех изображений Черного моря, полученных со спутников *Aqua* и *Terra* в весенне-летний период 2013 г. и содержащих зону блика в приемлемых условиях облачности.

Полученные поля контрастов *MSS* демонстрируют богатую картину, насыщенную проявлениями мезомасштабных процессов на морской поверхности, сравнимую по информативности с радиолокационными данными. Метод дает возможность наблюдать параметры внутренних волн, мезомасштабные вихреобразные структуры, фронты, антропогенные слики, особенности прибрежной динамики. Метод также позволяет обнаруживать движущиеся суда. Новый подход открывает дополнительные возможности мониторинга со спутников морских и прибрежных акваторий. Выполненная работа позволяет сделать вывод о перспективности данного подхода при исследовании и мониторинге Черного моря.

Авторы выражают благодарность С.В. Станичному (МГИ НАН Украины) за полезные консультации по работе со спутниковыми данными и А.Г. Мясоедову (РГГМУ, Санкт-Петербург) – за помощь при разработке алгоритма и любезное предоставление авторской программы распаковки данных *MODIS*. Работа выполнена в рамках совместного проекта РФФИ и Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации (ДАПНИ) Украины «Исследование ветрового волнения оптическими и поляризационными радиолокационными методами и развитие новых подходов к анализу спутниковых наблюдений морской поверхности» (проект № Ф53.6/051) при частичной поддержке по проекту *COCONET* Седьмой рамочной программы ЕС (*Grant Agreement* № 287844, *FP7/2007-2013*) и национальных проектов Правительства Российской Федерации «Мега-Грант» (*Grant* 11.G34.31.0078) и ДАПНИ Украины «Полигон-2» (договор № М/281-2013 от 18 июня 2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shoulejkin Was*. A new method of investigating sea waves // *Nature*. – 1924. – 114, № 2866. – P. 498 – 499. – doi:10.1038/114498a0.
2. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // *J. Opt. Soc. Am.* – 1954. – 44. – P. 838 – 850.
3. *Большаков А.Н., Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н.* Двумерные спектры возвышений поверхностных волн по данным аэрофотосъемки // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. – 1990. – 26, № 6. – С. 652 – 658.
4. *Большаков А.Н., Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н. и др.* Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика. Сопоставление с контактными данными // *Исследование Земли из космоса*. – 1990. – № 1. – С. 20 – 27.
5. *Kosnik M.V., Dulov V.A.* Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // *Meas. Sci. Techn.* – 2011. – 22. – P. 015504 (9p.). – doi:10.1088/0957-0233/22/1/015504.
6. *Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N.* Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // *J. Geophys. Res.: Oceans*. – 2013. – 118. P. 4380 – 4394. - doi:10.1002/jgrc.20296.
7. *Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B. et al.* Joint sun-glitter and radar imagery of surface slicks // *Rem. Sens. Envir.* – 2012. – 120. – P. 123 – 132. – doi:10.1016/j.rse.2011.06.029.
8. *Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B. et al.* Imaging mesoscale upper ocean dynamics using synthetic aperture radar and optical data // *J. Geophys. Res.* – 2012. – 117, C04029. – P. 1 – 13. – doi:10.1029/2011JC007492.
9. *Bréon F.M., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // *Ibid.* – 2006. – 111, C06005. – doi:10.1029/2005JC00334.
10. *Chapron B., Kerbaol V., Vandemark D. et al.* Importance of peakedness in sea surface slope measurements and applications // *Ibid.* – 2000. – 105, C7. – P. 17195 – 17202.

11. *Marmorino G.O., Thompson D.R., Graber H.C. et al.* Correlation of oceanographic signatures appearing in synthetic aperture radar and interferometric synthetic aperture radar imagery with in situ measurements // *Ibid.* – 1997. – 102, С8. – P. 18723 – 18736.
12. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 212 с.
13. *Малиновский В.В., Иванов В.А., Сандвен С., Дулов В.А.* Наблюдения загрязнения поверхности моря по радиолокационным данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – Вып. 13. – С. 99 – 110.

¹Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: dulov1952@gmail.com

Материал поступил
в редакцию 03.10.13

²Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург

³Лаборатория спутниковой океанографии, институт Ифремер,
Франция

АНОТАЦІЯ Розглянуто новий підхід до інтерпретації оптичних супутникових зображень океану в зоні сонячного відблиску, який заснований на оцінці передавальної функції, яка зв'язує контрасти яскравості зображення та контрасти дисперсії ухилів морської поверхні (*MSS*). При виведенні виразів для передавальної функції припускається, що яскравість відблиску формується одним лише дзеркальним відбиттям сонячного світла від морської поверхні, а збурення *MSS* малі в порівнянні із середніми значеннями дисперсії ухилів поверхні. В результаті аналізу отримане поле контрастів *MSS*, багато в чому аналогічне супутниковим *SAR*-зображенням. Виконано аналіз зображень Чорного моря, отриманих із супутників *Aqua* і *Terra* у весняно-літній період 2013 р., в області сонячного відблиску в каналах 645 і 858 нм. Розраховані поля контрастів яскравості зображень і контрастів *MSS* із просторовим дозволом 250 м. Зроблений висновок, що метод дає можливість спостерігати прояви внутрішніх хвиль, мезомасштабних вихорообразних структур, фронтів, особливостей прибережної динаміки, а також дозволяє знаходити антропогенні слики та рухомі судна.

Ключові слова: сонячний відблиск, супутникові зображення, шорсткість морської поверхні, середньоквадратичний ухил, обробка зображень.

ABSTRACT A new approach to optical satellite image interpretation in sun glitter area is discussed. The approach is based on estimation of the transfer function relating image brightness contrasts and mean square slope variations (*MSS*). The expressions for the transfer function are derived in the assumption that the surface brightness field in the sun glitter area is formed only by the sky radiance specularly reflected from the sea surface, and *MSS* variations are small comparably to the mean values of *MSS*. In result, the field of *MSS* variations similar to satellite *SAR* images is obtained. The analysis is performed for the images of the Black Sea in sun glitter regions in 645 nm and 858 nm channels obtained from *Aqua* and *Terra* satellites during spring and summer, 2013. The brightness contrasts and *MSS* variations are calculated with spatial resolution 250 m. It is concluded that the method allows observing the manifestation of internal waves, mesoscale vortex structures, features of coastal dynamics, anthropogenic slicks and moving ships.

Keywords: sun glitter, satellite images, sea surface roughness, mean square slope, image processing.