

Инверсия контраста оптических изображений на границах естественных сликов и ряби

А.С. Запевалов, Н.Е. Лебедев, С.В. Станичный*

*Морской гидрофизический институт
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Поступила в редакцию 24.03.2016 г.

Анализируется инверсия оптических контрастов между зонами ряби и зонами сликов на морской поверхности, созданными естественными процессами. Показано, что в зависимости от зенитного угла Солнца и угла, при котором установленный на космическом аппарате оптический сканер «видит» границу слик–рябь, интенсивность отраженного света от области слика может быть как больше, так и меньше интенсивности света, отраженного от области ряби. Получены количественные оценки уклонов морской поверхности, при которых происходит инверсия оптического контраста слик–рябь.

Ключевые слова: оптические изображения, оптический контраст слик–рябь, распределение уклонов морской поверхности; optical image, optical contrast slick–ripples, distribution of the sea surface slopes.

Введение

Процессы, протекающие в верхнем слое океана и приводном слое атмосферы, изменяют уровень шероховатости морской поверхности, что позволяет проводить их исследования средствами дистанционного зондирования, установленными на космических аппаратах [1]. Одним из наглядных проявлений этих разных по своей физической природе процессов являются зоны поверхности, на которых короткие ветровые волны частично или полностью подавлены, – слики [2].

Слики возникают в результате естественных и антропогенных процессов. К числу естественных физических факторов, определяющих образование сликов, относятся: воздействие внутренних волн на морскую поверхность, снижение скорости ветра (штилевые слики), циркуляция Лэнгмюра, наличие биогенных пленок и ряд других [3, 4]. Слики антропогенного происхождения возникают, как правило, в результате разлива нефтепродуктов на морской поверхности.

В зоне слика происходит уменьшение энергии всех спектральных составляющих поверхностного волнения в широком диапазоне масштабов. Наибольшее изменение энергии поверхностных волн осуществляется в гравитационно-капиллярном диапазоне [5]. Одновременно с изменением энергии коротких поверхностных волн меняется характер распределения уклонов морской поверхности [6].

Созданные разными физическими механизмами слики оказывают значительное влияние на отражение морской поверхностью электромагнитных волн оптического и радиодиапазонов [7, 8]. Это позволяет строить системы мониторинга Мирового океана на основе средств дистанционного зондирования берегового и космического базирования [9, 10].

При радиозондировании морской поверхности при углах падения больше 20–25° уровень сигнала, отраженного от слика, ниже, чем отраженного от области ряби. На радиолокационных изображениях, полученных с помощью радиолокаторов бокового обзора, слики выглядят как темные области [2]. При малых углах падения наблюдается обратная ситуация: интенсивность отраженного в зоне слика сигнала выше, чем отраженного от области ряби. Объясняется это тем, что в зависимости от угла падения отраженный сигнал формируют разные физические механизмы. В первом случае сигнал формируется в результате резонансного рассеяния, во втором – в результате квазизеркального отражения [11].

При зондировании в оптическом диапазоне взаимодействие света и морской поверхности определяет один физический механизм – зеркальное отражение. Однако и в этом случае оптический контраст на границе слик–рябь в зависимости от угла падения может меняться. Целью настоящей статьи является определение характеристик морской поверхности, при которых наблюдается инверсия контраста оптического изображения на границе слик–рябь в ситуации, когда слики созданы естественными процессами.

* Александр Сергеевич Запевалов (sevzepter@mail.ru); Николай Евгеньевич Лебедев (nick_leb@mail.ru), Сергей Владимирович Станичный (sstanichny@mail.ru).

Формирование оптического изображения морской поверхности на борту космического аппарата

Оптические изображения морской поверхности формируют несколько физических механизмов, определяющих отражение и рассеяние излучения океаном и атмосферой в направлении на космический аппарат. К таким механизмам относятся: отражение морской поверхностью прямого солнечного излучения; отражение морской поверхностью рассеянного атмосферой солнечного излучения; рассеяние солнечного излучения атмосферой в сторону спутника. Роль физических механизмов меняется в зависимости от углов наблюдения и состояния морской поверхности [12]. В настоящей статье рассматривается только зеркальное отражение солнечного излучения, вклад которого преобладает в зоне солнечного блика.

Примем, что прямоугольная система координат, в которой определены уклоны морской поверхности, ориентирована таким образом, что ось OX совпадает с азимутальным направлением падающих солнечных лучей. Зеркальное отражение в направлении космического аппарата имеет место, если одновременно выполняются два условия:

$$\xi_x = -\frac{\sin\theta_s + \sin\theta_r \cos\varphi}{\cos\theta_s + \cos\theta_r}, \quad \xi_y = -\frac{\sin\theta_r \sin\varphi}{\cos\theta_s + \cos\theta_r}, \quad (1)$$

где θ_s и θ_r — зенитные углы падающего и отраженного лучей света соответственно; φ — азимутальный угол между направлениями падающего и отраженного лучей [13]. Отрицательные значения компоненты уклона ξ_x соответствуют поверхности, обращенной к Солнцу.

Зеркальное отражение солнечного света от морской поверхности описывается двунаправленной функцией рассеяния, которая определяет отношение яркости зеркально отраженного поверхностью излучения $I_r(\theta_r, \varphi)$ к плотности потока солнечного излучения $H_s(\theta_s, \varphi = 0)$ [13, 14]. Данную функцию принято обозначать акронимом BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function). Для выбранной системы координат функцию BRDF можно представить в форме

$$\text{BRDF} = \frac{I_r(\theta_r, \varphi)}{H_s(\theta_s, \varphi = 0)} = \frac{\pi Fr(\theta_i)P(\xi_x, \xi_y)}{4 \cos\theta_r \cos\theta_s \cos^4\beta}, \quad (2)$$

где $Fr(\theta_i)$ — коэффициент Френеля; $P(\xi_x, \xi_y)$ — двумерная плотность вероятностей компонент уклонов морской поверхности;

$$\theta_i = 0,5 \arccos^{-1}(\cos\theta_s \cos\theta_r + \sin\theta_s \sin\theta_r \cos\varphi);$$

$$\beta = \arctg\left(\sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}\right).$$

Из (2) получаем выражение, описывающее оптический контраст слик—рябь:

$$K(\theta_s, \theta_r, \varphi) = \frac{\text{BRDF}_S}{\text{BRDF}_R} = \frac{Fr_S(\theta_i)P_S(\xi_x, \xi_y)}{Fr_R(\theta_i)P_R(\xi_x, \xi_y)}, \quad (3)$$

где индексы S и R соответствуют области слика и области ряби.

Проанализируем формирование оптических контрастов на границе слик—рябь в двух предельных случаях: когда направление ветра совпадает с азимутальным направлением солнечных лучей и когда направление ветра ортогонально падающим лучам. Для компонент уклонов и их статистических характеристик введем обозначения: индекс u соответствует компоненте, ориентированной вдоль направления ветра, индекс s — компоненте, ориентированной поперек направления ветра.

Рассмотрим две ситуации. Первая, когда слик возникли в результате воздействия внутренних волн на поверхностные волны. Вторая — слик возникли в ситуации, когда скорость ветра мала, чтобы генерировать волны ряби (штилевые слик). Штилевые слик обычно наблюдаются при скорости ветра менее 0,8 м/с.

Контрасты в сliках, созданных внутренними волнами

Одним из первых исследований, в котором была показана возможность наблюдения из космоса проявлений внутренних волн на морской поверхности, явилась работа [15]. Было показано, что создаваемые внутренними волнами вариации скорости поверхностных течений приводят к изменениям тонкой топографической структуры морской поверхности. Эти изменения хорошо видны на изображениях морской поверхности, получаемых с помощью установленных на космических аппаратах приборов для дистанционного зондирования [16].

Из (3) следует, что контраст между сliком и рябью определяют две составляющие: изменения коэффициента Френеля и изменения плотности вероятностей уклонов морской поверхности. Если слик созданы вариациями скорости приповерхностного ветра или поверхностного течения, то изменениями коэффициента Френеля при фиксированных углах падения и отражения можно пренебречь.

До настоящего времени [13] основной моделью, описывающей двумерное распределение уклонов морской поверхности в приложениях, связанных с рассеянием радиоволн и света, является модель Сох—Мунк [6]. Она учитывает отклонения распределений уклонов от распределения Гаусса, которые оказывают заметное влияние на отражение света, как при вертикальном, так и при наклонном падении [7, 17]. Модель построена на основе рядов Грама—Шарлье, коэффициенты которых определены по аэрофотоснимкам морской поверхности в зоне солнечного блика.

Двумерное распределение компонент уклонов, ориентированных поперек и вдоль направления ветра, имеет вид

$$P(\xi_c, \xi_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{\xi_c^2 + \xi_u^2}{2}\right) \times \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}H_2(\tilde{\xi}_c)H_1(\tilde{\xi}_u) - \frac{1}{6}C_{03}H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24}C_{40}H_4(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{4}C_{22}H_2(\tilde{\xi}_c)H_2(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24}C_{04}H_4(\tilde{\xi}_u)\right], \quad (4)$$

где σ_c^2 и σ_u^2 – дисперсии поперечной и продольной компонент уклонов соответственно; C_{ij} – коэффициенты ряда Грама–Шарлье (первый индекс соответствует поперечной компоненте уклона, второй – продольной); H_i – полиномы Чебышева–Эрмита i -го порядка соответственно; $\tilde{\xi}_c = \xi_c/\sigma_c$; $\tilde{\xi}_u = \xi_u/\sigma_u$. Выражение (4) получено в рамках предположения, что распределение уклонов симметрично в поперечном относительно ветра направлении.

Для дальнейшего анализа воспользуемся результатами натурных исследований изменчивости тонкой топографической структуры морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению [18]. В ходе этих исследований были определены коэффициенты C_{ij} в зонах штилевых сликов и сликов, созданных внутренними волнами, а также в зонах ряби между сликами. Измерения проводились с помощью двумерного лазерного уклономера на океанографической платформе, установленной вблизи южного берега Крыма на глубине 30 м.

Статистические моменты уклонов морской поверхности, полученные в сликах, образованных внутренними волнами, и в зонах ряби приведены в таблице (W – скорость ветра).

На рис. 1 приведены сечения двумерной плотности вероятностей уклонов морской поверхности $P(\xi_c = 0, \xi_u)$ и $P(\xi_c, \xi_u = 0)$ в зонах слика и ряби, а также рассчитанные на их основе оптические контрасты слик–рябь. Инверсии оптического контраста соответствует переход параметра K через единицу.

Следует отметить, что модель (4) включает небольшое число членов ряда Грама–Шарлье. Подобные модели имеют ряд ограничений, в частности

они плохо воспроизводят плотность вероятностей на «крыльях» распределения [19]. При моделировании характеристик морской поверхности эти ограничения приводят к появлению отрицательных значений плотности вероятностей возвышений морской поверхности [20] и ее уклонов [21]. Область, в которой справедлива модель (4), определяется условиями [6]:

$$|\xi_u| < 2,5\sigma_u, \quad |\xi_c| < 2,5\sigma_c. \quad (5)$$

В нашем случае инверсия оптического контраста при зондировании вдоль ветра происходит при $|\xi_u| \approx 0,184$, в то время как для слика $2,5\sigma_u = 0,294$ (для области ряби $2,5\sigma_u = 0,417$). Параметр K_c переходит через единицу при $|\xi_c| \approx 0,150$, в то время как для области слика $2,5\sigma_c = 0,232$. Таким образом, условие (5) выполняется, и использование двумерной плотности вероятностей уклонов в форме (4) здесь вполне правомерно.

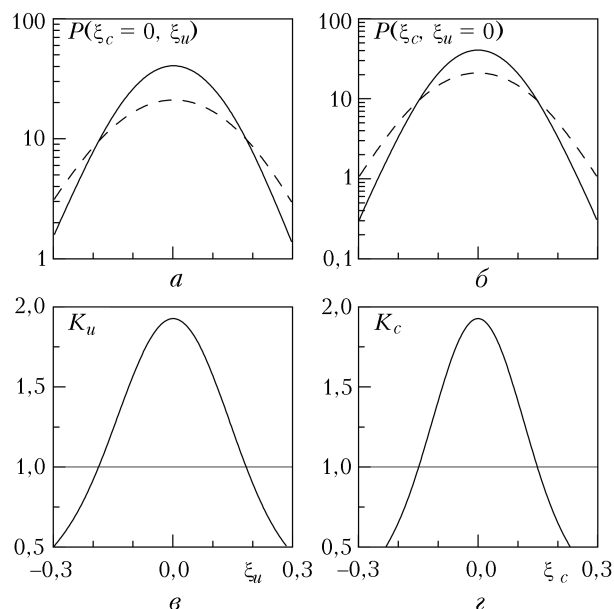


Рис. 1. Характеристики морской поверхности в зонах сликов, созданных внутренними волнами, и в зонах ряби: а, б – сечения двумерных плотностей вероятностей уклонов морской поверхности (сплошная линия – зона слика, штриховая – зона ряби); в, з – оптические контрасты слик–рябь

Характеристики уклонов в зонах ряби и в зонах сликов, созданных внутренними волнами и вариациями скорости ветра

Параметр	Рябь		Слики	
	$0,8 < W < 2,0$ м/с	$4,0 < W < 11$ м/с	От внутренних волн	Штилевые
$\sigma_c^2 \cdot 10^3$	$-4,27 + 6,09W \pm 1,71$	$-5,46 + 2,61W \pm 3,1$	$-10,51 + 6,92W \pm 0,94$	$1,72 \pm 0,5$
$\sigma_u^2 \cdot 10^3$	$-7,00 + 9,96W \pm 2,35$	$2,82 + 3,02W \pm 3,01$	$-12,63 + 8,73W \pm 1,5$	$2,6 \pm 1,2$
C_{21}	$0,02 \pm 0,10$	$-0,01 \pm 0,12$	$0,03 \pm 0,07$	$0,14 \pm 0,03$
C_{03}	$0,06 \pm 0,23$	$-0,02 \pm 0,27$	$-0,09 \pm 0,24$	$-0,13 \pm 0,11$
C_{04}	$0,40 \pm 0,42$	$0,48 \pm 0,51$	$0,32 \pm 0,51$	$0,14 \pm 0,39$
C_{22}	$0,23 \pm 0,32$	$0,09 \pm 0,13$	$0,08 \pm 0,16$	$0,04 \pm 0,19$
C_{40}	$0,33 \pm 0,48$	$0,35 \pm 0,42$	$0,32 \pm 0,45$	$0,14 \pm 0,52$

Штилевые слики

Наиболее часто ситуация штилевые слики – рябь наблюдается вблизи берега, когда слики образуются в области «ветровой тени». Ветровая тень возникает в результате обтекания воздушным потоком прибрежных возвышенностей и гор.

В таблице приведены характеристики уклонов в штилевом слике и в зоне ряби [18]. Характеристики в зоне ряби получены для скорости ветра 1,5 м/с.

При скорости ветра над зоной ряби, равной 1,5 м/с, инверсия оптического контраста, характеризуемая переходом параметра K_u через единицу, происходит при $\xi_u = -0,081$ или $\xi_u = 0,098$ (рис. 2).

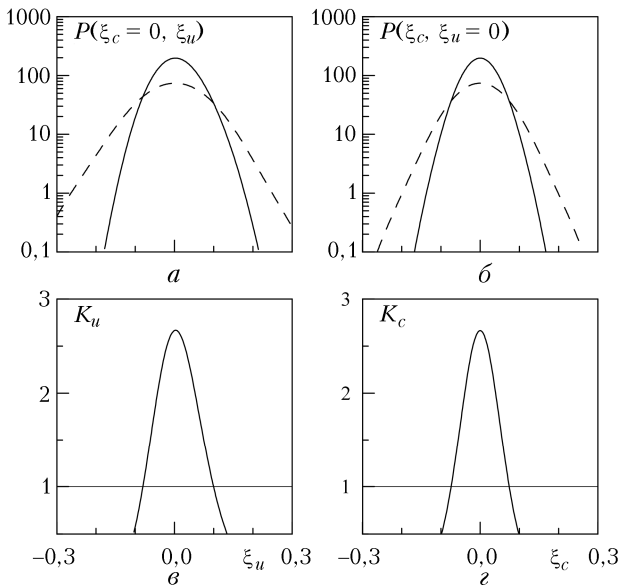


Рис. 2. Характеристики морской поверхности в зоне штилевого слика и в зонах ряби при скорости ветра 1,5 м/с: а, б – сечения двумерных плотностей вероятностей уклонов морской поверхности (сплошная линия – зона слика, штриховая – зона ряби); в, з – оптические контрасты слик–рябь

Несимметричность точек инверсии оптического контраста вызвана асимметрией распределений продольной компоненты уклонов. Асимметрия S_{03} в штилевых сликах выше, чем в сликах, созданных внутренними волнами. Параметр K_c переходит через единицу при $|\xi_c| \approx 0,072$. Отметим, что и в данном случае использование распределения (4) вполне правомерно, поскольку в зоне слика $2,5\sigma_u = 0,127$, $2,5\sigma_c = 0,104$.

Скорость ветра над сликом, созданным внутренней волной, и над зоной ряби меняется незначительно. Напротив, различия в скорости ветра над штилевыми сликами, образовавшимися в области ветровой тени, и над областью ряби могут быть велики. При скорости ветра над рябью 7 м/с ее энергия значительно возрастает и, соответственно, распределение уклонов морской поверхности становится более широким. Переход через единицу па-

раметра K_u происходит при $|\xi_u| \approx 0,12$, что близко к границе области, в которой применима модель (4) для продольной компоненты уклонов в слике. Переход через единицу параметра K_c происходит при $|\xi_c| \approx 0,084$.

Наблюдение инверсий оптического контраста с космического аппарата

Зная величины уклонов, при которых их плотности вероятностей в зонах слика и ряби равны, можно определить, при каких значениях угла $\theta_r = \theta_{rK}$ наблюдается инверсия контраста в зоне слик–рябь. Рассмотрим ситуацию, когда падающий солнечный луч и луч, отраженный в направлении космического аппарата, лежат в одной вертикальной плоскости. Расчеты проведем в двух предельных случаях, когда направление ветра совпадает или перпендикулярно азимутальному направлению падающего солнечного луча. При произвольном направлении ветра относительно азимутального направления солнечных лучей значения углов θ_{rK} будут иметь промежуточные значения.

Из простых геометрических построений нетрудно показать, что в указанной ситуации инверсия контраста происходит, если с космического аппарата граница слик–рябь видна под углом

$$\theta_{rK} = \theta_s + \arctg \xi_K, \quad (6)$$

где ξ_K – величина уклона, при которой плотности вероятностей в зонах слика и ряби равны. В случае, когда слики образованы внутренними волнами $\arctg \xi_K = 10,4^\circ$, если направление ветра совпадает с азимутальным направлением солнечных лучей; $\arctg \xi_K = 8,5^\circ$, если направление ветра перпендикулярно направлению солнечных лучей. Если регистрируются штилевые слики, то при условии, что над областью ряби скорость ветра равна 1,5 м/с, значения $\arctg \xi_K$ меняются от $4,1^\circ$ до $5,6^\circ$, при скорости ветра над рябью 7 м/с $\arctg \xi_K$ меняется от $4,8^\circ$ до $6,8^\circ$.

Заключение

Анализ оптических контрастов изображений, получаемых оптическими сканерами, проведен на основе прямых измерений уклонов морской поверхности в зонах сликов и ряби между ними. При расчетах для описания распределений уклонов использована модель, построенная на основе усеченного распределения Грама–Шарлье. Показано, что в зависимости от зенитного угла Солнца и углов, при которых установленный на космическом аппарате оптический сканер «видит» границу слик–рябь, интенсивность отраженного света от области слика может быть как больше, так и меньше интенсивности света, отраженного от области ряби. Инверсия оптического контраста возникает, когда уклоны участков морской поверхности, отражающих солнечный свет в направлении космического аппарата, имеют значения, при которых плотность вероятностей уклонов в зоне слика равна плотности вероятностей в зоне ряби.

В ситуации, когда слики на морской поверхности созданы внутренними волнами, инверсии оптических контрастов наблюдаются, если для уклона участка морской поверхности, отражающей свет в направлении космического аппарата, выполняется условие $|\xi_u| \approx 0,184$ (зондирование вдоль направления ветра) или $|\xi_c| \approx 0,150$ (зондирование поперек направления ветра).

При скорости ветра над зоной ряби, равной 1,5 м/с, инверсии оптических контрастов между штилевыми сликами и рябью наблюдаются при $\xi_u = -0,081$ или $\xi_u = 0,098$. Различие значений уклонов при зондировании вдоль и навстречу направления вектора скорости ветра обусловлено асимметрией распределений продольной компоненты уклонов, которая в штилевых сликах выше, чем в сликах, созданных внутренними волнами. При зондировании поперек направления ветра инверсия происходит при $|\xi_c| \approx 0,072$. Различия в скорости ветра над штилевыми сликами, образовавшимися в области ветровой тени, и над областью ряби могут быть велики. При скорости ветра над рябью 7 м/с инверсии наблюдаются при $|\xi_u| \approx 0,12$ и $|\xi_c| \approx 0,084$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-20020).

1. Кортаев Г.К., Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н. Дистанционное зондирование морей и океанов. Развитие работ в области спутниковой океанологии // Развитие морских наук технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет. Севастополь: МГИ, 2004. С. 585–625.
2. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
3. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 375 с.
4. Серебряный А.Н. Сливо- и сулообразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 275–286.
5. Христофоров Г.Н. Изменение структуры морского ветрового волнения в зоне поверхностного слика // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. С. 189–208.
6. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44, N 11. P. 838–850.
7. Запезалов А.С. Вероятность бликов зеркального отражения при наклонном зондировании морской поверхности // Океанология. 2005. Т. 45, № 1. С. 16–20.
8. Константинов О.Г., Новотрясов В.В. Поверхностные проявления внутренних волн по данным видеосистемы берегового базирования // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 34, № 3. С. 364–369.
9. Константинов О.Г., Павлов А.Н. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими

методами. Часть 3. Регистрация динамических процессов по сликам на морской поверхности // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 32–39; Konstantinov O.G., Pavlov A.N. Complex monitoring of the state of the sea water basins by optical methods. Part 3. Recording of dynamic processes by slicks on the sea surface // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 300–307.

10. Лебедев Н.Е. Определение толщины нефтяной пленки на морской поверхности по контрасту яркости в ближнем ИК-диапазоне // Процессы в геосредах. 2015. № 1(1). С. 48–53.
11. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves. A review // Bound.-Lay. Meteorol. 1978. V. 13, N 1–4. P. 61–85.
12. Запезалов А.С., Лебедев Н.Е., Показеев К.В. Влияние топографической структуры морской поверхности на погрешность определения приводного ветра спутниковыми оптическими сканерами // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 167–171; Zapavalov A.S., Lebedev N.E., Pokazeev K.V. The influence of the topographic structure of the sea surface on the error of determining the surface wind by satellite optical scanners // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 297–302.
13. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geoph. Res. C. 2006. V. 111, N 6. DOI: 10.1029/2005JC003343.
14. Запезалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 28–33; Zapavalov A.S., Lebedev N.E. Simulation of statistical characteristics of sea surface during remote optical sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 487–492.
15. Apel J.R., Byrne H.M., Proni J.R., Charnell R.L. Observations of oceanic internal and surface waves from the Earth resources technology satellite // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 6. P. 865–881.
16. Лаверова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. АН. 2011. Т. 436, № 3. С. 407–411.
17. Запезалов А.С., Показеев К.В. Статистика уклонов морской поверхности и ее приложение к задачам лазерного зондирования // Вестн. МГУ. Сер. 3. 2004. № 5. С. 200–212.
18. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С., Бабий М.В. Измерения параметров шероховатости морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1992. Т. 28, № 4. С. 424–431.
19. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений / Пер. с англ. М.: Наука, 1966. 587 с.
20. Запезалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама–Шарлье // Океанология. 2011. Т. 51, № 3. С. 432–439.
21. Запезалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Изв. вузов. Радиофиз. 2010. Т. 53, № 2. С. 110–121.

A.S. Zapavalov, N.E. Lebedev, S.V. Stanichny. Inversion of optical contrasts between ripple and slick areas.

The inversion of the optical contrasts between the ripple and slick areas created by natural processes is analyzed. It is shown that, depending on the solar zenith angle and the angle at which spacecraft-mounted optical scanner observes the slick–ripple areas border, the intensity of light reflected from the slick area may be either greater or less than the intensity of light reflected from the ripple area. The quantitative evaluations of the sea surface slopes corresponding to inversion of the slick–ripple areas optical contrast are obtained.