## Моделирование двулучевой функции отражательной способности морской поверхности

Н.Е. Лебедев<sup>1а</sup>, В.В. Пустовойтенко<sup>1b</sup>, К.В. Показеев<sup>2a</sup>, О.Н. Мельникова<sup>2b</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт, Севастополь E-mails: <sup>1a</sup>nick\_leb@mail.ru; <sup>1b</sup>v2pust@mail.ru <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва E-mails: <sup>2a</sup>sea@phys.msu.ru; <sup>2b</sup>olamel@yandex.ru

Анализируются ограничения, существующие при традиционном моделировании двулучевой функции отражательной способности морской поверхности с привлечением распределения Грама-Шарлье. Формально оно имеет вид бесконечного ряда; на практике, однако, возможно найти с ограниченной точностью лишь относительно небольшое количество коэффициентов членов ряда. Вследствие этого подобные распределения оказываются применимыми только в некотором диапазоне уклонов морской поверхности, за пределами которого они содержат ошибки, вплоть до появления отрицательных значений. Адекватно описываемый распределением Грама-Шарлье диапазон уклонов морской поверхности уже, чем это необходимо для аналитического описания ее изображений, получаемых с помощью установленных на космических аппаратах оптических сканеров. Предложено использовать комбинированную модель плотности вероятностей уклонов, которая в области их малых значений стремится к распределению Грама-Шарлье, а за пределами этой области - к распределению Гаусса. На основе комбинированной модели плотности вероятностей уклонов, свободной от недостатков распределения Грама-Шарлье с малым числом членов, построена усовершенствованная двулучевая функция отражательной способности морской поверхности. Комбинированная модель позволяет описать зеркальное отражение солнечного света во всем диапазоне возможных углов падения и отражения.

**Ключевые слова:** оптические изображения, двулучевая функция отражательной способности, уклоны морской поверхности, распределение Грама-Шарлье, комбинированная модель.

#### Введение

Важной составляющей системы мониторинга Мирового океана являются сканеры оптического диапазона, позволяющие решать широкий круг экологических, океанологических и геофизических задач (Коротаев и др., 2004; Бородин и др., 2007; Митягина, Лаврова, 2012). К числу основных физических механизмов, формирующих восходящее излучение моря на уровне спутника, относятся отражение взволнованной поверхностью в направлении на спутник прямого и рассеянного атмосферой солнечного излучения и отражение взволнованной поверхностью в произвольных направлениях прямого солнечного излучения, далее рассеянного атмосферой в сторону спутника (Лебедев, 2013). Их аналитическое описание требуется знания так называемой двулучевой функции отражательной способности морской поверхности (bidirectional reflectance distribution function, BRDF), для построения которой необходимо корректное описание морской поверхности (Nakajima, Tanaka, 1983).

В настоящее время основные аппроксимации, описывающие распределения уклонов морской поверхности построены на основе распределения вероятностей Грама-Шарлье с конечным числом членов (далее для краткости, но с учетом этого обстоятельства - распределение Грама-Шарлье) (Su et al., 2002; Cavalli et al., 2006). Недостатком этих аппроксимаций является то, что они позволяют построить двулучевую функцию отражательной способности только в ограниченном диапазоне углов отражения (Запевалов, Лебедев, 2013). Этот диапазон оказывается недостаточным для аналитического описания изображений по данным спутниковых оптических сканеров, в частности, сканеров MODIS, установленных на космических аппаратах Тегга и Aqua, во всем диапазоне углов измерений.

Распределение Грама-Шарлье описывает распределение уклонов морской поверхности только в области изменения уклонов (Cox, Munk, 1954)

$$-2.5\sigma_{u} < \xi_{u} < 2.5\sigma_{u}, \quad -2.5\sigma_{c} < \xi_{c} < 2.5\sigma_{c}, \quad (1)$$

где индексы u и c соответствуют продольной и поперечной относительно направления ветра компоненте уклонов;  $\sigma$  – среднеквадратическая величина компоненты уклонов. За пределами области (1) распределение Грама-Шарлье определено некорректно и даже может иметь отрицательные значения (Tatarskii, 2003). Проблема ограниченного диапазона уклонов морской поверхности стоит не только при анализе рассеяния света, но и при анализе рассеяния радио- и акустических волн (Запевалов, Пустовойтенко, 2010; Запевалов, 2007). Один из вариантов решения этой проблемы рассмотрен в работе (Запевалов, Пустовойтенко, 2010), где в задачах рассеяния радиоволн морской поверхностью предложено использовать комбинированную модель компонент уклонов морской поверхности. В области (1) комбинированная модель соответствует распределению Грама-Шарлье, а за ее пределами приближается к распределению Гаусса.

Целью настоящей работы является построение двулучевой функции отражательной способности морской поверхности на основе комбинированной модели плотности вероятностей ее уклонов.

#### Двулучевая функция отражательной способности морской поверхности

Зеркальное отражение солнечного света в направлении космического аппарата имеет место, если для ортогональных компонент уклонов морской поверхности одновременно выполняются условия (Bréon, Henriot, 2006)

$$\xi_x = -\frac{\sin\theta_s + \sin\theta_r \cos\phi}{\cos\theta_s + \cos\theta_r}, \quad \xi_y = -\frac{\sin\theta_r \sin\phi}{\cos\theta_s + \cos\theta_r}, \quad (2)$$

311

где  $\theta_s$  – зенитный угол солнечного света, падающего на морскую поверхность;  $\theta_r$  – зенитный угол света, отраженного в направлении космического аппарата;  $\phi$  – азимутальный угол между направлениями падающего и отраженного луча света. Условия (2) получены для случая, когда прямоугольная система координат, в которой определены компоненты уклонов, ориентирована таким образом, что ось *OX* совпадает с азимутальным направлением падающих солнечных лучей. В этом случае отрицательные значения компоненты уклона  $\xi_x$  соответствуют поверхности, обращенной к Солнцу.

Основной характеристикой, описывающей отражение солнечного света от морской поверхности, является двулучевая функция отражательной способности (размерностью стерадиан<sup>-1</sup>), равная отношению отражённой яркости к освещённости на уровне поверхности (Torrance, Sparrow, 1967). В англоязычных работах данную функцию принято обозначать акронимом BRDF (bidirectional reflectance distribution function). Для выбранной системы координат функцию BRDF можно представить в форме (Bréon, Henriot, 2006)

$$BRDF = \frac{\pi Fr(\beta)P(\xi_x,\xi_y)}{4\cos\theta_r\cos\theta_s\cos^4\theta_n},$$
(3)

где  $\beta = 0.5 \arccos(\cos\theta_s \cos\theta_r + \sin\theta_s \sin\theta_r \cos\phi)$ ;  $Fr(\beta) - коэффициент отражения Френе$  $ля для яркости; <math>P(\xi_x, \xi_y) - двумерная$  плотность вероятностей компонент уклонов морской поверхности;  $\theta_n = \operatorname{arctg}(\sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2})$ .

#### Двумерные распределения уклонов морской поверхности

При моделировании отражения солнечного света морской поверхностью, как правило, распределения ее уклонов представляют в виде распределения Гаусса или распределения Грама-Шарлье. Компоненты уклонов  $\xi_u$  и  $\xi_c$  ориентируют вдоль и поперек направления ветра. Величины  $\xi_u$ ,  $\xi_c$  выражаются через  $\xi_x$ ,  $\xi_y$  и  $\phi_w$ - угол поворота от солнечного азимута к вектору скорости ветра преобразованием поворота

$$\xi_u = \xi_x \cos(\phi_w) + \xi_y \sin(\phi_w), \quad \xi_c = -\xi_x \sin(\phi_w) + \xi_y \cos(\phi_w).$$

В принятых обозначениях двумерное распределение Гаусса для уклонов, соответствующих линейному анизотропному волновому полю, имеет вид

$$P_G(\xi_c,\xi_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{\tilde{\xi}_c^2 + \tilde{\xi}_u^2}{2}\right),$$

где  $\sigma_u^2$  и  $\sigma_c^2$  – дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов;  $\tilde{\xi}_u = \xi_u / \sigma_u$ ,  $\tilde{\xi}_c = \xi_c / \sigma_c$ .

Различного рода нелинейные механизмы приводят к отклонениям распределений уклонов морской поверхности от распределения Гаусса, что необходимо учитывать при анализе отражения света (Мельникова и др., 2008; Запевалов, Показеев, 2004). Двумерные распределения уклонов нелинейного анизотропного поля поверхностных волн описывают с помощью распределения Грама-Шарлье (Cox, Munk, 1954; Bréon, Henriot, 2006)

$$P_{G-C}(\xi_{c},\xi_{u}) = P_{G}(\xi_{x},\xi_{y}) \bigg[ 1 - \frac{1}{2}C_{21}H_{2}(\widetilde{\xi}_{c})H_{1}(\widetilde{\xi}_{u}) - \frac{1}{6}C_{03}H_{3}(\widetilde{\xi}_{u}) + \frac{1}{24}C_{40}H_{4}(\widetilde{\xi}_{c}) + \frac{1}{4}C_{22}H_{2}(\widetilde{\xi}_{c})H_{2}(\widetilde{\xi}_{u}) + \frac{1}{24}C_{04}H_{4}(\widetilde{\xi}_{u})\bigg],$$

$$(4)$$

где  $H_3$  и  $H_4$  – ортогональные полиномы Чебышева-Эрмита третьего и четвертого порядков, соответственно. Первый индекс коэффициента  $C_{ij}$  соответствует поперечной компоненте уклона, второй продольной. Коэффициенты  $C_{03}$  и  $C_{30}$  являются асимметрией распределения соответствующих компонент уклонов, коэффициенты  $C_{04}$  и  $C_{40}$  – эксцессом. Вследствие симметричности распределения уклонов в поперечном направлении,  $C_{30} = C_{12} = C_{13} = C_{31} = 0$ .

Если бы уклоны морской поверхности имели распределение Гаусса, то функция BRDF могла бы быть построена для любых значениях углов падения и отражения солнечного света. Проблема возникает, если, учитывая наблюдаемые в натурных экспериментах отклонения от распределения Гаусса, строить функцию BRDF с помощью распределения Грама-Шарлье (Запевалов, Лебедев, 2013).

Далее при моделировании плотности вероятностей уклонов морской поверхности будем использовать их статистические оценки из работы (Bréon, Henriot, 2006), рассчитанные по оптическим изображениям, полученным с помощью сканера POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances) в диапазоне скоростей ветра от 0 до 15 м/с. Скорость ветра определялась по данным скаттерометра NSCAT (NASA Scatterometer). Сканер и скаттерометр установлены на космическом аппарате ADEOS-1.

Статистические характеристики уклонов описываются выражениями  $\sigma_c^2 = 0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$ ,  $\sigma_u^2 = 0,001 + 0,00316W \pm 0,0005$ ,  $C_{21} = -0,0009W^2 \pm 0,01$ ,  $C_{03} = -0,45[1 + \exp(7 - W)]^{-1} \pm 0,01$ ,  $C_{40} = 0,3 \pm 0,05$ ,  $C_{22} = 0,12 \pm 0,03$ ,  $C_{04} = 0,4 \pm 0,1$ , где W, м/с – скорость приводного ветра на высоте 10 м. Зависимости дисперсий  $\sigma_u^2$  и  $\sigma_c^2$  от скорости ветра практически совпадают с подобными зависимостями, полученными в работе (Cox, Munk, 1954).

### Комбинированная модель распределения уклонов морской поверхности

Комбинированная модель построена на основе синтеза распределения Грамма-Шарлье и распределения Гаусса (Запевалов, Пустовойтенко, 2010). В области (1) она соответствует распределению Грама-Шарлье, а за пределами этой области стремится к распределению Гаусса. Учитывая (4), двумерную комбинированную модель можно представить в форме

$$\begin{split} P_{C}(\xi_{c},\xi_{u}) &= P_{G}(\xi_{x},\xi_{y}) \bigg\{ 1 + \frac{1}{24} C_{40} H_{4}(\widetilde{\xi}_{c}) F(\widetilde{\xi}_{c}) + \bigg[ -\frac{1}{6} C_{03} H_{3}(\widetilde{\xi}_{u}) + \frac{1}{24} C_{04} H_{4}(\widetilde{\xi}_{u}) \bigg] F(\widetilde{\xi}_{u}) + \\ &+ \bigg[ -\frac{1}{2} C_{21} H_{2}(\widetilde{\xi}_{c}) H_{1}(\widetilde{\xi}_{u}) + \frac{1}{4} C_{22} H_{2}(\widetilde{\xi}_{c}) H_{2}(\widetilde{\xi}_{u}) \bigg] F(\widetilde{\xi}_{c}) F(\widetilde{\xi}_{u}) \bigg\}, \end{split}$$

где двухпараметрическая функция  $F(\tilde{\xi}) = \exp\left[-\left(|\tilde{\xi}|/d\right)^n\right]$  выполняет роль фильтра. Параметр *d* определяет область, внутри которой  $F(\tilde{\xi}) \approx 1$ ; параметр *n* определяет скорость, с которой функция *F* стремится к нулю за пределами этой области. Выбор параметров фильтра проанализирован в работе (Запевалов, 2012), где показано, что целесообразно принять d = 3,4 и n = 3.

Сечения двумерных моделей распределений уклонов, построенных для линейных (модель  $P_G(\xi_c, \xi_u)$ ) и нелинейных (модели  $P_{G-C}(\xi_c, \xi_u)$  и  $P_C(\xi_c, \xi_u)$ ) полей поверхностных волн, заметно отличаются, что хорошо видно на *рис.* 1. Расчеты проведены для ситуации, когда скорость ветра равна 5 м/с; для не зависящих от скорости ветра коэффициентов  $C_{22}$ ,  $C_{40}$  и  $C_{04}$  приняты их средние значения. За пределами области (1) видно сильное отличие моделей  $P_C(\xi_c, \xi_u)$  и  $P_{G-C}(\xi_c, \xi_u)$ . На сечении  $\tilde{\xi}_c = 0$  в модели  $P_{G-C}(\xi_c, \xi_u)$  при  $\tilde{\xi}_u < -2,5$  появляются отрицательные значения, что демонстрирует очевидное ограничение аппроксимации (4). Модель  $P_C(\xi_c, \xi_u)$ , всегда положительная, такого ограничения не имеет.



Рис. 1. Сечения двумерных распределений  $P_{G-C}(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u)$  (точки),  $P_C(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u)$  (сплошная линия) и  $P_G(\tilde{\xi}_c, \tilde{\xi}_u)$  (пунктир) для  $\tilde{\xi}_c = 0, \pm 2, \pm 3$ 

## Двунаправленная функция рассеяния

Вид функций BRDF, построенных в логарифмическом масштабе при двух значения угла падения (30° и 60°) и W = 10 м/с, показан на *рис. 2*. При расчете BRDF использовались известные выражения, описывающие зависимость коэффициента отражения Френеля от угла падения (Ландау, Лифшиц, 1982). Для каждого угла падения функция BRDF строилась при трех направлениях ветра: ветер по направлению, поперек и навстречу падающих солнечных лучей. Направление ветра показано стрелкой.



Рис. 2. Функция BRDF для показанных стрелками трех направлений ветра 10 м/с: верхний ряд – угол падения θ<sub>s</sub> = 30°; нижний ряд – θ<sub>s</sub> = 60°. Штриховыми окружностями показаны соответственно углы θ<sub>r</sub> = 30° и θ<sub>r</sub> = 60°. Синий трапециевидный контур – область, внутри которой изображение формируется уклонами поверхности, удовлетворяющим условию (1). Точечная окружность соответствует углам θ<sub>r</sub>, предельным для визирования сканерами MODIS.

Для наглядности при построении *рис.* 2 мы ограничились диапазоном значений функции BRDF, в котором ее значения меняются не более чем на десять порядков. При малых значениях BRDF восходящее излучение на уровне спутника формируется не отражением от морской поверхности, а рассеянием солнечного излучения в сторону спутника, происходящим в водной толще и атмосфере (Коротаев, 2004; Лебедев, 2013).

Область внутри пунктирного круга соответствует азимутальным и зенитным углам восходящего излучения, которое может попадать на приёмник оптического сканера MODIS спутников Aqua и Terra (высота орбиты 705 км, сканирование поверхности Земли ведется перпендикулярно направлению спутникового трека в угловом секторе  $\pm 55^{\circ}$  от надира (Xiong, Barnes, 2006)). Синим трапециевидным контуром на каждом фрагменте *рис. 2* показана область, только в пределах которой выполняется условие (1) и где функция BRDF может быть построена по распределению уклонов вида Грама-Шарлье.

Сравнивая область, выделенную на *рис. 2* синим контуром, и область азимутальных и зенитных углов, при которых формируется оптическое изображение на спутниках Aqua и Тегга, можно сделать вывод, что спутниковые снимки могут содержать участки, где распределение Грама-Шарлье для анализа уклонов морской поверхности использовать нельзя.



Рис. 3. Спутниковое изображение фрагмента морской поверхности с зоной солнечного блика, находящегося восточнее спутникового трека Tr и с указанием положения пар линий, между которыми выполняются условия (1), для скоростей ветра 1, 5 и 10 м/с, направленного поперек (а, пунктиры и штрих-пунктиры) либо вдоль (b, сплошные линии) азимута солнца.

На *рис. 3* представлен фрагмент изображения морской поверхности 30°... 44° с.ш. × 8°...26° в.д., полученного 2-м каналом (0,858 мкм) сканера MODIS спутника Terra 25.07.2008 в 08h 05' UTC, с зоной солнечного блика, находящегося восточнее спутникового трека Tr, и нанесены пары линий, между которыми выполняются условия (1), для скоростей ветра 1, 5 и 10 м/с, направленного поперек (а, пунктиры и штрих-пунктиры) либо вдоль (b, сплошные линии) азимута солнца. Так, пара линий 5а ограничивает участок поверхности, для которого выполняются условия (1) при ветре 5 м/с, направленном поперек азимута солнца.

Таким образом, при небольших скоростях ветра для значительной части зоны солнечного блика условия (1) могут не выполняться.

Как показывают *рис. 2, 3*, особенно критичным выбор модели морской поверхности оказывается при больших углах падения. При использовании предлагаемой комбинированной модели уклонов морской поверхности, функции BRDF можно построить при любых значениях азимутальных и зенитных углов восходящего излучения.

#### Заключение

В настоящее время основными моделями плотности вероятностей уклонов в задачах рассеяния и отражения электромагнитных волн морской поверхностью являются модели, построенные на конечных рядах Грама-Шарлье. Их недостатком является то, что они позволяют описать уклоны в относительно узком диапазоне, заданном выражением (1). В частности, это не позволяет аналитически описывать изображения, получаемые с оптических сканеров MODIS спутников Aqua и Terra, при всех возможных азимутальных и зенитных углах восходящего излучения, попадающего на фотоприёмник сканера.

В настоящей работе для моделирования двулучевой функции отражательной способности морской поверхностью предложен новый подход на основе применения комбинированной модели уклонов морской поверхности. В области (1) комбинированная модель соответствует распределению Грама-Шарлье, а за ее пределами стремится к распределению Гаусса. Это позволяет описать зеркальное отражение солнечного света во всем диапазоне возможных углов падения и отражения.

## Литература

- 1. Бородин С.В., Давыдова Е.П., Калинин Е.И., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В. Комплексный оперативный спутниковый мониторинг Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2007. С. 109–111.
- 2. Запевалов А.С. К расчету коэффициента рассеяния высокочастотного звука на морской поверхности // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 5. С. 687–694.
- 3. Запевалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана, 2014. № 1. С. 28–33.
- 4. Запевалов А.С., Показеев К.В. Статистика уклонов морской поверхности и ее приложение к задачам лазерного зондирования // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2004. № 5. С. 70–73.
- 5. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 2. С. 110-121.
- 6. Запевалов А.С. Статистические модели взволнованной морской поверхности. Для задач дистанционного зондирования // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 69 с.
- 7. *Коротаев 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.
- 8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред М.: Наука, 1982. 620 с.
- Лебедев Н.Е. Определение скорости приводного ветра и степени загрязненности морской поверхности по излучению, регистрируемому спутниковыми оптическими сканерами в зоне солнечного блика // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2013. Вып. 27. С. 49–54.
- 10. *Мельникова О.Н., Нивина Т.А., Показеев К.В.* Влияние вихрей в отрывном потоке на рост нелинейных ветровых волн // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2008. Т. 63, № 3. С. 77–78.
- 11. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю*. Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 269–288.
- 12. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geoph. Res. 2006. V. 111. N C6. P. C06005.

- 13. Cavalli R.M.; Pignatti S.; Zappitelli E. Correction of Sun Glint Effect on MIVIS Data of the Sicily Campaign in July 2000 // Annals Of Geophysics. 2006. V. 49. N 1. P. 277–286.
- 14. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44. № 11. P. 838-850.
- 15. *Nakajima T., Tanaka M.* Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere ocean system // J. Quant. Spect. Rad. Trans. 1983. V. 29. P. 521–537.
- 16. Su, W., Charlock T.P., Rutledge K. Observations of reflectance distribution around sunglint from a coastal ocean platform // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 7369–7383.
- Tatarskii V.I. Multi-Gaussian representation of the Cox–Munk distribution for slopes of wind-driven waves // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. P. 1697–1705.
- Torrance K.E., Sparrow E.M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces // J. Optical Society of America. 1967. V. 57. N. 9. P. 1105–1114.
- 19. Xiong X., Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization // Advances In Atmospheric Sciences. 2006. V. 23. № 1. P. 69–79.

# Simulation of the sea surface bidirectional reflectance distribution function

N.E. Lebedev<sup>1a</sup>, V.V. Pustovoitenko<sup>1b</sup>, K.V. Pokazeev<sup>2a</sup>, O.N. Melnikova<sup>2b</sup>

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol E-mails: <sup>1a</sup>nick\_leb@mail.ru; <sup>1b</sup>v2pust@mail.ru <sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow E-mails: <sup>2a</sup>sea@phys.msu.ru; <sup>2b</sup>olamel@yandex.ru

Analyzed are limitations existing in traditional sea surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF) modeling involving Gram - Charlier slopes distribution. Formally, it has the form of an infinite series, but in practice, however, only a relatively small number of series terms coefficients could be found with limited precision. As a consequence, such distributions are applicable only in a certain range of sea surface slopes beyond which they have errors, up to appearance of negative values. Range of sea surface slopes which is adequately described by Gram - Charlier distribution is narrower than is necessary for the analytic description of sea surface images obtained by spacecraft - mounted optical scanners. The combined slopes probability density model is proposed which tends either to Gram - Charlier distribution in region of small slopes values or to Gaussian distribution outside this region. On the basis of this combined slopes probability density model, free from disadvantages of Gram - Charlier distribution function was built. This combined model allows to describe a mirror reflection of sunlight in the whole range of possible incident and reflected angles.

**Keywords:** optical images, bidirectional reflectance distribution function, sea surface slopes, Gram-Charlier distribution, combined model.

#### References

- Borodin S.V., Davydova E.P., Kalinin E.I., Pustovoitenko V.V., Stanichnyi, S.V. Kompleksnyi operativnyi sputnikovyi monitoring Chernogo morya (Complex operational satellite monitoring of the Black Sea), *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2007, pp. 109–111.
- Zapevalov A.S. K raschetu koeffitsienta rasseyaniya vysokochastotnogo zvuka na morskoi poverkhnosti (On the calculation of the scattering coefficient of high frequency sound from the sea surface), *Akusticheskii zhurnal*, 2007, Vol. 53, No. 5, pp. 687–694.
- Zapevalov A.S., Lebedev N.E. Modelirovanie statisticheskikh kharakteristik poverkhnosti okeana pri distantsionnom zondirovanii v opticheskom diapazone (Simulation of the sea surface statistical characteristics at the remote sensing in the optical range), Optika atmosfery i okeana, 2014, No. 1, pp. 28–33.
- Zapevalov A.S., Pokazeev K.V. Statistika uklonov morskoi poverkhnosti i ee prilozhenie k zadacham lazernogo zondirovaniya (Sea surface slopes statistics and its application to problems of laser sensing), *Vestnik Moskovskogo universiteta*. *Ser. 3. Fizika, astronomiya*, 2004, No. 5, pp. 70–73.
- Zapevalov A.S., Pustovoitenko V.V. Modelirovanie plotnosti veroyatnostei uklonov morskoi poverkhnosti v zadachakh rasseyaniya radiovoln (Modeling of the sea surface slopes probability density in tasks of radio waves scattering), *Izvestiya* VUZov. Radiofizika, 2010, Vol. 53, No. 2, pp. 110–121.

- Zapevalov A.S. Statisticheskie modeli vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti. Dlya zadach distantsionnogo zondirovaniya (Statistical models of the rough sea surface. For remote sensing tasks), Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 69 p.
- Korotaev G.K., Pustovoitenko V.V., Radaikina L.N. Distantsionnoe zondirovanie morei i okeanov. Razvitie rabot v oblasti sputnikovoi okeanologii (Remote sensing of the oceans and seas. Development of work in the field of satellite Oceanology), *Razvitie morskikh nauk tekhnologii v Morskom gidrofizicheskom institute za 75 let.* Sevastopol: MGI, 2004, pp. 585–625.
- 8. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* (Electrodynamics of continuous media), Moscow: Nauka, 1982. 620 p.
- Lebedev N.E. Opredelenie skorosti privodnogo vetra i stepeni zagryaznennosti morskoi poverkhnosti po izlucheniyu, registriruemomu sputnikovymi opticheskimi skanerami v zone solnechnogo blika (Determination of wind speed and degree of contamination of the sea surface by radiation measured by satellite optical scanners in the area of sun glint), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol: MGI NANU, 2013, Issue 27, pp. 49–54.
- 10. Mel'nikova O.N., Nivina T.A., Pokazeev K.V. Vliyanie vikhrei v otryvnom potoke na rost nelineinykh vetrovykh voln (On the amplification of wind nonlinear waves due to the vortexformation in separated flow), *Vestnik Moskovskogo universite- ta. Ser. 3. Fizika, astronomiya.* 2008, Vol. 63, No. 3, pp. 77–78.
- 11. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu. Mnogoletnii kompleksnyi sputnikovyi monitoring neftyanykh zagryaznenii poverkhnosti Baltiiskogo i Kaspiiskogo morei (Long-term complex satellite monitoring of the surface oil pollution of the Baltic and Caspian seas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 269–288.
- 12. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions, *J. Geoph. Res.*, 2006, Vol. 111, No. C6, pp. C06005.
- 13. Cavalli R.M.; Pignatti S.; Zappitelli E. Correction of Sun Glint Effect on MIVIS Data of the Sicily Campaign in July 2000, *Annals Of Geophysics*, 2006, Vol. 49, No. 1, pp. 277–286.
- 14. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter, *J. Optical. Soc. America*, 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838-850.
- 15. Nakajima T., Tanaka M. Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere ocean system, *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*, 1983, Vol. 29, pp. 521–537.
- 16. Su, W., Charlock T.P., Rutledge K. Observations of reflectance distribution around sunglint from a coastal ocean platform, *Appl. Opt.*, 2002, Vol. 41, pp.7369–7383.
- 17. Tatarskii V.I. Multi-Gaussian representation of the Cox–Munk distribution for slopes of wind-driven waves, J. Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, Vol. 20, pp. 1697–1705.
- 18. Torrance K.E., Sparrow E.M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *J. Optical Society of America*, 1967, Vol. 57, No. 9, pp. 1105–1114.
- 19. Xiong X., Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization, *Advances In Atmospheric Sciences*, 2006, Vol. 23, No. 1, pp. 69–79.