

## Влияние длительности зондирующего импульса лидара космического базирования на форму импульса, отраженного от морской поверхности

А.С. Запевалов, Н.Е. Лебедев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mails: sevzepter@mail.ru, nick\_leb@mail.ru*

Анализируются возможности и ограничения определения дисперсии уклонов морской поверхности путем импульсного лазерного зондирования с космических аппаратов. В настоящее время расчеты характеристик морской поверхности при лазерном зондировании со спутников проводятся на основе моделей, построенных для анализа сигналов оптических сканеров космического базирования. Рассмотрено влияние длительности зондирующего импульса на точность определения дисперсии уклонов в рамках линейной модели поля поверхностных волн, где высота точек зеркального отражения на морской поверхности распределена по закону Гаусса. Показана зависимость амплитуды регистрируемого лидаром сигнала от длительности зондирующего импульса. Этот эффект вызван тем, что в случае короткого импульса часть точек зеркального отражения, расположенных на разной высоте, может располагаться вне области, освещаемой этим импульсом, а также тем, что сигнал от расположенных на разной высоте точек зеркального отражения приходит в разные интервалы времени. Показано, что для измерения дисперсии уклонов морской поверхности с ошибкой  $\leq 5\%$  необходимо, чтобы длительность зондирующего импульса в два раза превышала время прохождения им расстояния, равно- го значимой высоте морских волн.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, лидар, морская поверхность, уклоны

*Одобрена к печати: 12.01.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-80-87*

### Введение

Среди моделей, используемых для анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования морской поверхности, полученных с помощью установленной на космических аппаратах аппаратуры, можно выделить два типа. Это модели, в рамках которых предполагается, что источник излучения работает в постоянном или в импульсном режимах. Модели первого типа используются при анализе рассеяния солнечного света морской поверхностью (Большаков и др., 1988; Bréon, Henriot, 2006; Zapavalov, Lebedev, 2014). Модели второго типа используются при анализе данных альтиметрических измерений (Hayne, 1980; Gómez-Enri et al., 2007; Zapavalov, 2012; Pokazeev et al., 2013).

Зондирующий импульс занимает в пространстве некоторую область, ограниченную телесным углом главного лепестка диаграммы направленности антенны. Протяженность импульса в направлении зондирования определяется его длительностью. Как правило, сжатый импульс радиоальтиметра имеет длительность несколько наносекунд, что соответствует протяженности импульса около одного метра (Пустовойтенко, Запевалов, 2012). Указанный пространственный масштаб сравним, а в некоторых ситуациях заметно меньше значимых высот волн в океане.

В 2006 был запущен спутник CALIPSO с лидаром CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), предназначенный для исследования атмосферного аэрозоля и облачности (Chand et al., 2008). Длительность импульсов, генерируемых лидаром CALIOP, равна 20 нс. Возможности установленной на спутнике аппаратуры позволили расширить

круг решаемых ее помощью задач и провести исследования связи дисперсии уклонов морской поверхности со скоростью ветра (Hu et al., 2008). Анализ данных лазерного зондирования морской поверхности проводился в рамках модели непрерывного источника излучения (Ginneken et al., 1998).

В настоящей работе анализируются условия, при которых использование модели непрерывного излучения для расчета дисперсии уклонов морской поверхности по данным импульсного лазерного зондирования является корректным.

### **Моделирование формы лазерного импульса, отраженного от морской поверхности**

В ситуации, когда морскую поверхность облучает непрерывно действующий источник, отраженный сигнал определяется распределением ее уклонов. Вклад в отраженный сигнал дают все элементы поверхности, удовлетворяющие условию зеркального отражения (Cox, Munk, 1954; Bréon, Henriot, 2008). При импульсном зондировании необходимо учитывать, что отражающие элементы, создаваемые короткими волнами, распространяющимися по поверхности более длинных волн, расположены на разной высоте. Если импульс короткий, то часть отражающих элементов может не попадать в область, освещенную в данный момент зондирующим импульсом. Протяженность импульса в направлении зондирования  $L$  определяется его длительностью  $\tau$ ,  $L = c\tau$ , где  $\tilde{n}$  – скорость света. Если протяженность импульса  $L$  равна высоте волны  $h$ , то одновременно будут облучены все отражающие элементы, находящиеся на ее поверхности, однако на фотоприемник свет, отраженный от впадины и от гребня, поступит с временной задержкой  $\Delta t = h/c$ . Чтобы одновременно зафиксировать отражение от всех элементов, расположенных на волне высотой  $h$ , необходимо выполнение условия  $\tau > 2h/c$ .

В качестве характеристики, определяющей высоты волн, в океанологии принято использовать значимую высоту  $h_s$ , равную среднему значению высоты одной трети самых высоких волн. Необходимо учесть, что в волновом поле присутствуют волны, высоты которых превышают высоту  $h_s$ . Исключим относительно редко наблюдаемые экстремальные волны, критерием которых является превышение в 2 раза значимой высоты волн (Кузнецов, Сапрыкина, 2012). Таким образом, чтобы одновременно зафиксировать отражение от всех элементов поверхности, необходимо выполнение условия:

$$\tau > a 2 h_s / c , \quad (1)$$

где  $a$  – безразмерный параметр. Значение параметра  $a$  определим ниже.

Модель, описывающая отраженный от морской поверхности радиоимпульс при вертикальном зондировании с космического аппарата, была предложена в работе (Brown, 1977). Она представляет свертку трех функций:

$$V(t) = \chi(t) * s(t) * q(t) , \quad (2)$$

где  $\chi(t)$  – форма импульса, отраженного от плоской поверхности;  $s(t)$  – форма зондирующего импульса;  $q(t)$  – функция, связанная с плотностью вероятностей высот точек зеркального отражения;  $t$  – время; символ " \* " означает свертку.

Одним из существенных отличий лазерного зондирования от радиозондирования является то, что поток лазерного излучения можно считать коллинеарным. При радиоальтиметрических измерениях область, облученная радиолокатором, сначала представляет собой расширяющийся круг, затем – пространство между двумя расширяющимися кольцами. При лазерном зондировании кривизной переднего фронта импульса можно пренебречь. На плоской поверхности освещаемая область представляет круг постоянного диаметра. Диаметры пятна на морской поверхности, освещаемые лидаром и радиоальтиметром, отличаются на 3 порядка (Hu et al., 2008; Пустовойтенко, Запевалов, 2012). Для спутника CALIPSO с высотой орбиты 705 км и лидара CALIOP радиус пятна на морской поверхности составляет примерно 35 м (Chand et al., 2008).

При лазерном зондировании кривизной переднего фронта импульса можно пренебречь, и отраженный импульс описывается сверткой двух функций:

$$I(t) = s(t) * q(t). \quad (3)$$

### **Зависимость формы отраженного импульса от длительности зондирующего импульса**

Рассмотрим простую модель, на основе которой проанализируем зависимость амплитуды отраженного импульса от длительности зондирующего. Примем, что вертикально направленный зондирующий импульс прямоугольной формы отражается от поверхности, возвышения которой равномерно распределены в диапазоне от 0 до  $z_0$ . Как и при анализе данных альтиметрических измерений положим, что плотность вероятностей распределения зеркальных точек по высоте совпадает с плотностью вероятностей возвышений на морской поверхности (Brown, 1977; Gómez-Enri et al., 2007). В этом случае плотность вероятностей распределения зеркальных точек по высоте описывается выражением:

$$P_R(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1/z_0, & 0 \leq z \leq z_0 \\ 0, & z > z_0 \end{cases}. \quad (4)$$

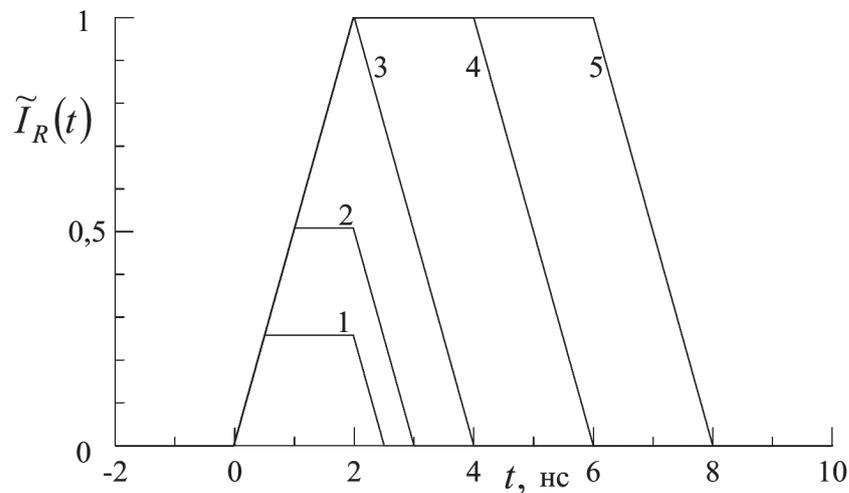
Переход от  $P_R(z)$  к функции  $q_R(t)$  осуществляется путем линейного преобразования  $t = z/c$  (Науне, 1980).

Введем для отраженных импульсов нормировку:

$$\tilde{I}(t, \tau) = I(t, \tau) / \max(I(t, \tau \geq \tau_0)), \quad (5)$$

где  $\tau_0 = 2z_0/c$ ,  $\max(I(t, \tau \geq \tau_0))$  – максимальное значение отраженного импульса при длительности зондирующего импульса больше или равной  $\tau_0$ .

Формы отраженных импульсов  $\tilde{I}_R(t)$ , построенные при разных длительностях зондирующего импульса, представлены на *рис. 1*. Индекс «R» означает, что характеристики импульса получены для распределения зеркальных точек по высоте в форме (4). Расчеты проводились при  $\tau_0 = 2$  нс. При  $\tilde{I}_R(t)$  импульс  $\tau < 2\tau_0$  имеет трапециевидную форму; его максимальное значение растет с увеличением  $\tilde{I}_R(t)$ . При  $\tau$  импульс  $\tau < 2\tau_0$  приобретает треугольную форму. Дальнейшее увеличение  $\tilde{I}_R(t)$  не приводит к росту максимального значения  $\tau$ , а его форма вновь становится трапециевидной. Формы отраженных импульсов определяются соотношением между длительностью зондирующего импульса и параметром  $\tilde{I}_R(t)$ .



*Рис. 1. Отраженные импульсы  $\tilde{I}_R(t, \tau)$ , рассчитанные для морской поверхности, распределение возвышений которой описывается выражением (5). Кривые 1–5 соответствуют длительностям зондирующего импульса 0,5, 1, 2, 4, 6 нс*

Для дальнейшего анализа воспользуемся линейной моделью поля морских поверхностных волн, в рамках которой волновое поле представлено в виде суммы большого числа независимых синусоидальных составляющих. Предполагается, что наблюдаемыми в реальном волновом поле слабыми межволновыми взаимодействиями можно пренебречь, и отклонения от распределения Гаусса малы (Zarevalov et al., 2011).

В случае, когда возвышения поверхности имеют дисперсию  $\sigma_z^2$  и описываются распределением Гаусса, функция  $q_G(t)$  имеет вид:

$$q_G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_t^2}\right), \quad (6)$$

где  $\sigma_t = 2\sigma_z/c$ ;  $t_0$  – время распространения луча лазера от космического аппарата до невозмущенной морской поверхности и обратно. Здесь и далее индекс «G» означает, что характеристики получены для распределения зеркальных точек по высоте в форме (6). Параметры  $h_s$  и  $\sigma_z$  связаны соотношением  $h_s = 4\sigma_z$ .

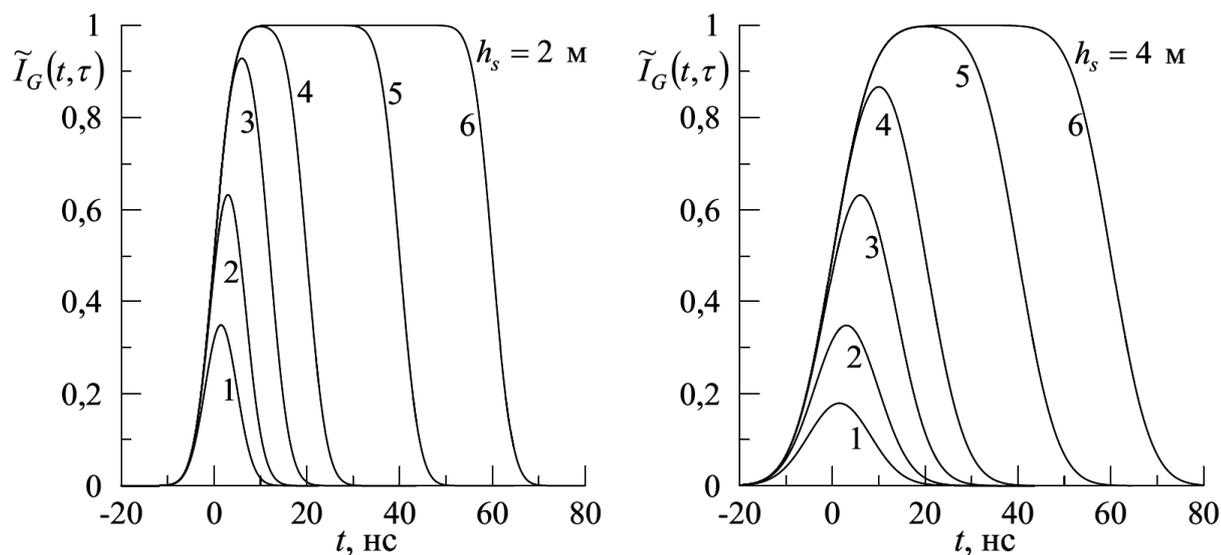


Рис. 2. Формы отраженных импульсов  $\tilde{I}_G(t, \tau)$ , рассчитанные для морской поверхности, распределение возвышений которой описывается распределением Гаусса. Кривые 1–6 соответствуют длительностям зондирующего импульса 3, 6, 12, 20, 40, 60 нс

Формы отраженных импульсов при разных длительностях зондирующего импульса и двух величинах значимой высоты для случая, когда распределению зеркальных точек соответствует функция (6), показаны на рис. 2. Здесь, как и при построении рис. 1, использовано нормирование амплитуд отраженных импульсов согласно (5).

Качественно изменения амплитуды  $\tilde{I}_G(t, \tau)$  и  $\tilde{I}_R(t)$  с ростом длительности зондирующего импульса подобны. В области небольших длительностей при их росте амплитуды отраженных импульсов растут. При некотором значении  $\tau$ , которое зависит от значимой высоты волн, амплитуды отраженных импульсов достигают максимума, и дальнейшее увеличение  $\tau$  практически не влияет на амплитуду.

Изменения амплитуды отраженного импульса определяются отношением длительности зондирующего импульса и характерного временного масштаба  $T$ , который зависит от распределения зеркальных точек по вертикали. Для распределения высот зеркальных точек в форме (4) характерный масштаб равен  $T_R = 2z_0/c$ , для распределения Гаусса его можно принять равным  $T_G = 2h_s/c$ .

Зависимости амплитуд импульсов  $\tilde{I}_R$  и  $\tilde{I}_G$  от безразмерных параметров  $\tau/T_R$  и  $\tau/T_G$  соответственно представлены на рис. 3.

Амплитуда импульса  $\tilde{I}_R$  линейно растет с ростом  $\tau/T_R$ , достигая единицы при  $\tau/T_R = 1$ . Зависимость амплитуды импульса  $\tilde{I}_G$  от  $\tau/T_G$  является нелинейной. При  $\tau/T_G = 1$  получаем  $\max \tilde{I}_G = 0,95$ . Возвращаясь к выражению (1), отметим, что в случае, когда распределение высот точек зеркального отражения описывается распределением Гаусса, при  $a = 1$  можно одновременно зафиксировать отражения 95% точек зеркального отражения. Таким образом, чтобы измерить дисперсию уклонов с относительной ошибкой  $\leq 5\%$ , необходимо, чтобы длительность зондирующего импульса превышала характерный временной масштаб  $T_G$ .

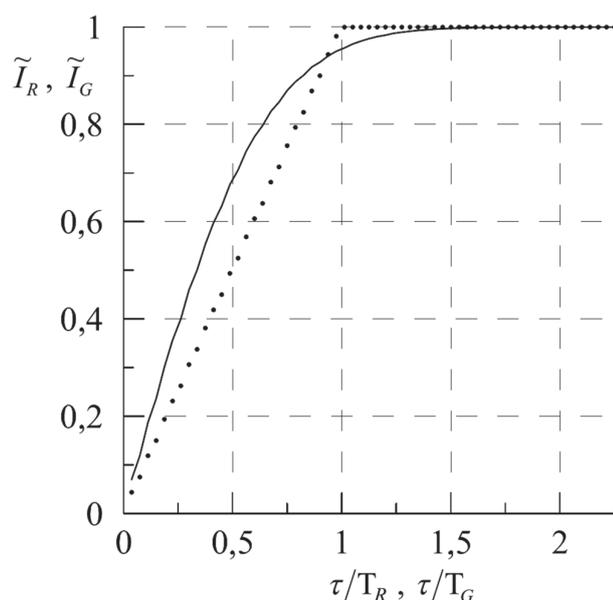


Рис. 3. Зависимости амплитуды отраженных импульсов  $\tilde{I}_R$  и  $\tilde{I}_G$  от безразмерных параметров  $\tau/T_R$  и  $\tau/T_G$ : пунктир –  $\tilde{I}_R = \tilde{I}_R(\tau/T_R)$ ; сплошная линия –  $\tilde{I}_G = \tilde{I}_G(\tau/T_G)$

### Заключение

Проанализированы возможности и ограничения определения дисперсии уклонов морской поверхности путем импульсного лазерного зондирования с космических аппаратов. Рассмотрено влияние длительности зондирующего импульса на точность определения дисперсии уклонов. Показано, что для корректного определения дисперсии уклонов необходимо, чтобы длительность зондирующих импульсов превышала некоторый характерный временной масштаб, который зависит от вида распределения точек зеркального отражения по высоте. Если зеркальные точки по высоте распределены по закону Гаусса, то для измерения дисперсии уклонов с относительной ошибкой  $\leq 5\%$  необходимо, чтобы длительность зондирующего импульса превышала временной масштаб  $T_G = 2h_s/c$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания МГИ РАН по теме № 0827-2014-0011.

### Литература

1. *Большаков А.Н., Бурдюгов В.М., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н.* Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика // Исследование Земли из космоса. 1988. № 5. С. 11–18.
2. *Кузнецов С., Сапрыкина Я.* Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 52–63.
3. *Пустовойтенко В.В., Запелов А.С.* Оперативная океанография: современное состояние, перспективы и проблемы спутниковой альтиметрии. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. 218 с.
4. *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. C06005.
5. *Brown G.S.* The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. Vol. AP-25. Issue 1. P. 67–74.

6. Chand D., Anderson T.L., Wood R., Charlson R.J., Hu Y., Liu Z., Vaughan M. Quantifying above-cloud aerosol using spaceborne lidar for improved understanding of cloudy-sky direct climate forcing // *J. of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. D13206.
7. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter // *J. Opt. Soc. Am.* 1954. Vol. 14. P. 838–850.
8. Ginneken B., Stavridi M., Koenderink J. Diffuse and Specular Reflectance from Rough Surface // *Appl. Optics*. 1998. Vol. 37. P. 130–139.
9. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. Vol. 24. P. 1102–1116.
10. Hayne G.S. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1980. Vol. AP-28. P. 687–692.
11. Hu Y., Stammes K., Vaughan M., Pelon J., Weimer C., Wu D., Cisewski M., Sun W., Yang P., Lin B., Omar A., Flittner D., Hostetler C., Trepte C., Winker D., Gibson G., Santa-Maria M. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements. // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. Vol. 8. P. 3593–3601.
12. Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. The simulation of a radar altimeter return waveform // *Moscow University Physics Bulletin*. September 2013. Vol. 68. No. 5. P. 420–425.
13. Zapevalov A.S., Bol'shakov A.N., Smolov V.E. Simulating of the probability density of sea surface elevations using the Gram–Charlier series // *Oceanology*. 2011. Vol. 51. No. 3. P. 406–413.
14. Zapevalov A.S., Lebedev N.E. Simulation of statistical characteristics of sea surface during remote optical sensing // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014. Vol. 27. Issue 6, P. 487–492.
15. Zapevalov A.S. Effect of skewness and kurtosis of sea-surface elevations on the accuracy of altimetry surface level measurements // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 200–206.

## Impact of the sounding pulse duration of a spaceborne lidar on the shape of the pulse reflected by the sea surface

A.S. Zapevalov, N.E. Lebedev

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*  
*E-mails: sevzpter@mail.ru, nick\_leb@mail.ru*

The possibilities and limitations for determining sea surface slopes dispersion are analyzed by means of spaceborne pulsed laser sounding. At present, calculations of sea surface characteristics from satellite laser sounding data are made on the basis of models built for analysis of spaceborne optical scanners signals. The influence of sounding pulse duration on the accuracy of the slopes dispersion determining is considered in the framework of a linear model of the surface waves field, in which the height of the specular reflection points on the sea surface has Gaussian distribution. The dependence of the detected lidar signal amplitude on duration of the sounding pulse is shown. This effect is due to the facts that in the case of short pulse, some portion of specular reflection points located at different heights may be disposed outside the area lightened by this pulse, and that these points being located at different heights reflect the sounding signal at different time intervals. It is shown that to measure the sea surface slopes dispersion with an error  $\leq 5\%$ , the sounding pulse duration must be twice the time of its passage through the distance equal to the significant height of the sea waves.

**Keywords:** remote sensing, lidar, sea surface, slopes

*Accepted: 12.01.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-80-87*

### References

1. Bolshakov A.N., Burdyugov V.M., Grodskiy S.A., Kudryavtsev V.N., *Opređenje spektra energonesuschih poverhnostnyih voln po izobrazheniyu solnechnogo blika (Determination of energy spectrum of surface waves on the image of the solar flare)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1988, No. 5, pp. 11–18.
2. Kuznetsov C., Sapryikina Ya., *Eksperimentalnyie issledovaniya vozniknoveniya voln-ubiys pri evolyutsii uzkoego spektra krutyih voln (Experimental study of the occurrence of freak waves during the evolution of a narrow spectrum of steep waves)*, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2012, Vol. 5, No. 1, pp. 52–63.

3. Pustovoytenko V.V., Zapevalov A.S., *Operativnaya okeanografiya: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy sputnikovoi al'timetrii* (Operational Oceanography: Current status, prospects and problems), Sevastopol: "EKOSI-Gidrofizika", 2012, 218 p.
4. 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, C06005.
5. Brown G.S., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1977, Vol. AP-25, Issue 1, pp. 67–74.
6. Chand D., Anderson T.L., Wood R., Charlson R.J., Hu Y., Liu Z., Vaughan M., Quantifying above-cloud aerosol using spaceborne lidar for improved understanding of cloudy-sky direct climate forcing, *J. of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, D13206.
7. Cox C., Munk W., Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter, *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, Vol. 14, pp. 838–850.
8. Ginneken B., Stavridi M., Koenderink J., Diffuse and Specular Reflectance from Rough Surface, *Appl. Optics*, 1998, Vol. 37, pp. 130–139.
9. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G., Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms, *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, Vol. 24, pp. 1102–1116.
10. Hayne G.S., Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1980, Vol. AP-28, pp. 687–692.
11. Hu Y., Stamnes K., Vaughan M., Pelon J., Weimer C., Wu D., Cisewski M., Sun W., Yang P., Lin B., Omar A., Flittner D., Hostetler C., Trepte C., Winker D., Gibson G., Santa-Maria M., Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, Vol. 8, pp. 3593–3601.
12. Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V., The simulation of a radar altimeter return waveform, *Moscow University Physics Bulletin*, 2013, Vol. 68, No. 5, pp. 420–425.
13. Zapevalov A.S., Bol'shakov A.N., Smolov V.E., Simulating of the probability density of sea surface elevations using the Gram–Charlier series, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 3, pp. 406–413.
14. Zapevalov A.S., Lebedev N.E., Simulation of statistical characteristics of sea surface during remote optical sensing, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, Vol. 27, Issue 6, pp. 487–492.
15. Zapevalov A.S., Effect of skewness and kurtosis of sea-surface elevations on the accuracy of altimetry surface level measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 200–206.