

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2016. № 03. С. 18–28.

DOI: **10.7463/rdopt.0316.0847197**

Представлена в редакцию: 13.04.2016

Исправлена: 27.04.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 535.338.41

## Влияние групповой структуры поверхностных волн на точность определения уровня океана путем лазерного зондирования с космических аппаратов

Запевалов А. С.<sup>1,\*</sup>, Лебедев Н. Е.<sup>1</sup>

[\\*sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН,  
Севастополь, Россия

Анализируются погрешности определения уровня морской поверхности, обусловленные нелинейными эффектами в поле поверхностных волн. Рассмотрены эффекты двух физических механизмов, которые приводят к появлению групповой структуры поверхностных волн и к асимметрии распределения волновых возвышений морской поверхности. Показано, что величина погрешности определения уровня, вызванная групповой структурой, пропорциональна значимой высоте волн и зависит от отношения диаметра лазерного пятна на морской поверхности и длины доминантных энергонесущих волн. Наиболее заметно влияние волнения в ситуации, когда диаметр лазерного пятна на морской поверхности меньше длины доминантных морских волн.

**Ключевые слова:** лазерное зондирование, альтиметр, уровень морской поверхности, поверхностные волны

### Введение

Одним из важных свойств спутниковых альтиметрических систем является возможность восстановления, на основе получаемой с их помощью информации, динамического уровня водной поверхности. Получаемые данные в интегральном виде содержат информацию о стратификации всей толщи морской воды, в наклонах уровня содержится информация о величине скорости поверхностных геострофических течений [1, 2].

Определение уровня морской поверхности по данным зондирования в радио и оптическом диапазонах является сложной физической задачей. Во многом это связано с присутствием ветровых волн и зыби, высоты которых много больше изменений уровня [3]. Задача усложняется тем, что распределения возвышений морской поверхности является квазигауссовым, и их не известные а priori статистические моменты меняются в широких пределах [4, 5]. Погрешность, вызванная отклонениями распределений волновых возвы-

шений от распределения Гаусса, в радиоальтиметрии в англоязычных работах получила название “skewness bias” и может достигать величин порядка 10 см [6].

В последнее десятилетие большое внимание привлекают работы, посвященные лазерному зондированию морской поверхности с помощью аппаратуры, установленной на космических аппаратах [7]. Лазерное зондирование позволяет определять ряд характеристик морской поверхности, таких как дисперсия уклонов морской поверхности, уровень морской поверхности и его наклон [8, 9].

Существенным различием в применениях и интерпретации данных измерений радио и оптических альтиметров является различие площади облучаемой поверхности. При зондировании с космических аппаратов диаметры пятен на морской поверхности, освещаемых лидаром и радиоальтиметром, отличаются на 3 порядка. Диаметр пятна на невозмущенной морской поверхности лидара CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), установленного на космическом аппарате CALIPSO равен 70 м, что сопоставимо с длиной энергонесущих поверхностных волн [8; 10].

В статье путем численного моделирования проводится анализ влияния на точность определения уровня морской поверхности нелинейности морских доминантных волн. Проанализировано влияние групповой структуры поверхностных волн и отклонений распределений волновых возвышений морской поверхности от распределения Гаусса.

## 1. Модель морской поверхности

В настоящей работе рассматриваются два эффекта, вызванные нелинейностью поля поверхностных волн. Этими эффектами являются групповая структура поля поверхностных волн, возникающая в результате баланса дисперсии и нелинейности [11], и отклонения созданных ветровыми волнами и зыбью возвышений морской поверхности от распределения Гаусса, которые появляются в результате межволновых взаимодействий [12].

Характерной особенностью поля поверхностных волн является их групповая структура, которую необходимо учитывать при дистанционном зондировании, если линейные размеры облучаемой на морской поверхности площадки сравнимы с длиной доминантных волн.

Для дальнейшего анализа воспользуемся моделью профиля морской поверхности, предложенной в работе [13]. Она описывает групповую структуру поля поверхностных волн и отклонения распределений возвышений поверхности от распределения Гаусса. Модель имеет вид

$$\xi(x, t) = AG(x, t)\eta(x, t), \quad (1)$$

где  $x$  и  $t$  – пространственная и временная координаты соответственно;  $A$  – параметр, определяющий высоты волн;  $G(x, t)$  – огибающая группы волн;  $\eta(x, t)$  – несущая волна.

Огибающая группы волн и несущая волна описываются выражениями

$$G(x, t) = \exp \left[ -\rho_1 \left( \sin \left( \frac{k_0 x - (\omega_0 / 2)t}{2\rho_2} \right) \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$\eta(x,t) = \exp \left[ -\rho_a \left( \sin \left( \frac{k_0 x - \omega_0 t}{2} \right) \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число доминантной волны,  $\lambda_0$  – длина доминантной волны;  $\omega_0$  – циклическая частота доминантной волны; параметры  $\rho_1$  и  $\rho_2$  определяют форму огибающей и число волн в группе; параметр  $\rho_a$  определяет асимметрию распределения возвышений морской поверхности. Между собой параметры  $k_0$  и  $\omega_0$  связаны дисперсионным соотношением для гравитационных волн  $\omega^2 = gk$  на глубокой воде.

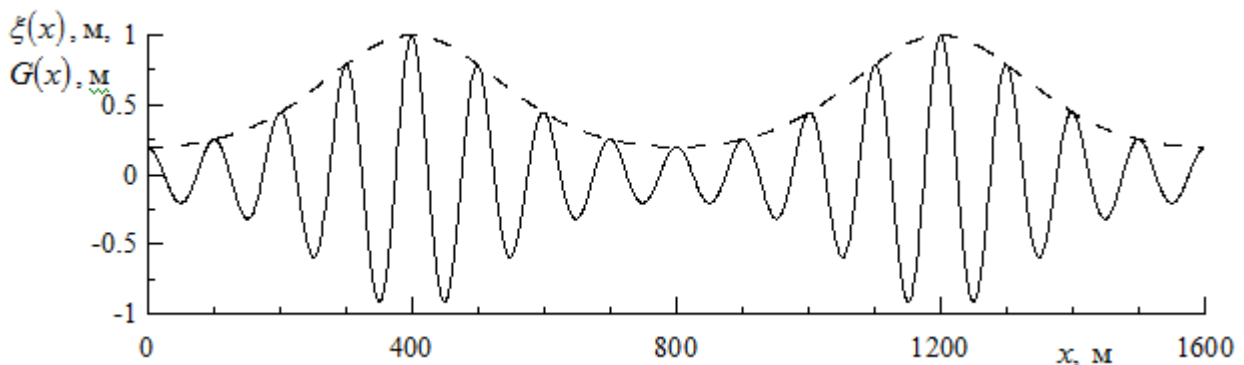
Определим параметры модели (1)-(3). При анализе групповой структуры волн, обычно, используются две интегральных характеристики: среднее число волн в группе и фактор групповитости [14, 15]

$$N_g = \overline{\omega_\eta} / \overline{\Omega_g}, \quad (4)$$

$$F_g = 1.41 \sigma_g / H_g, \quad (5)$$

где  $\sigma_g$  – стандартное отклонение огибающей от ее среднего значения;  $H_g$  – среднее значение огибающей;  $\overline{\omega_\eta}$  – средняя частота спектра волн;  $\overline{\Omega_g}$  – средняя частота спектра огибающей. Для Черного моря среднее значение  $N_g$  равняется 4. Фактор групповитости  $F_g$ , который задается с помощью параметр  $\rho_1$ , определяет глубину модуляции волн в группе, чем меньше  $F_g$ , тем глубже модуляция [13].

При моделировании морской поверхности в задаче определения уровня можно принять условие, что морская поверхность является замороженной, то есть в функциях, описывающих структуру морской поверхности, исключить зависимость от времени. Возможность принятия данного условия определяется тем, что скорость распространения поверхностных волн много меньше скорости перемещения подспутниковой точки. Группа волн и ее огибающая, построенные по модели, описываемой уравнениями (1)-(3), представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Групповая структура поверхностных волн: сплошная линия – модулированная по амплитуде волна  $\xi(x)$ ; штриховая линия – огибающая  $G(x)$

## 2. Эффекты групповой структуры поверхностных волн

Проанализируем составляющую погрешности измерения среднего уровня  $\Delta_G$ , которая определяется отклонением среднего уровня облученной лазером площадки от уровня невозмущенной поверхности.

В качестве параметра, характеризующего высоту поверхностных волн, в океанологии принято использовать значимую высоту волн  $h_s$ , равную средней высоте одной трети самых высоких волн. Параметр  $h_s$  связан с дисперсией возвышений морской поверхности  $\sigma_\xi^2$  отношением  $h_s = 4\sigma_\xi^2$ .

Изменения погрешности  $\Delta_G$  вдоль трассы космического аппарата, при разном отношении диаметра  $D$  облучаемой площадки на морской поверхности и длины доминантной поверхностной волны  $\lambda_0$  показаны на рис. 2. Расчеты проведены при  $h_s = 1$  м. Смещение максимумов  $\Delta_G$  с увеличением отношения  $D/\lambda_0$  вызвано различием амплитуд двух соседних волн в группе.

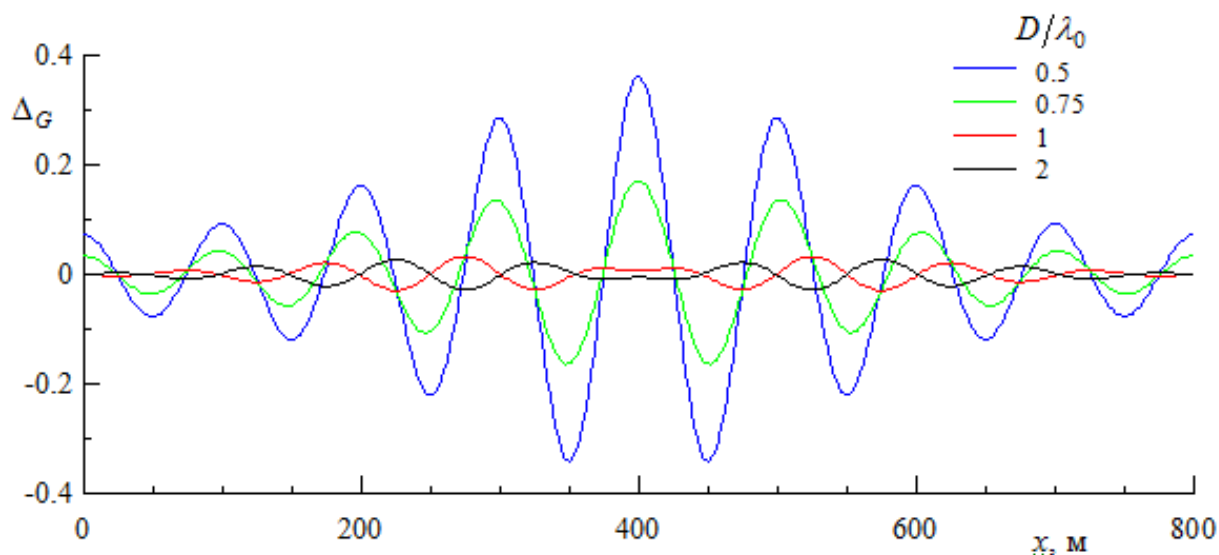


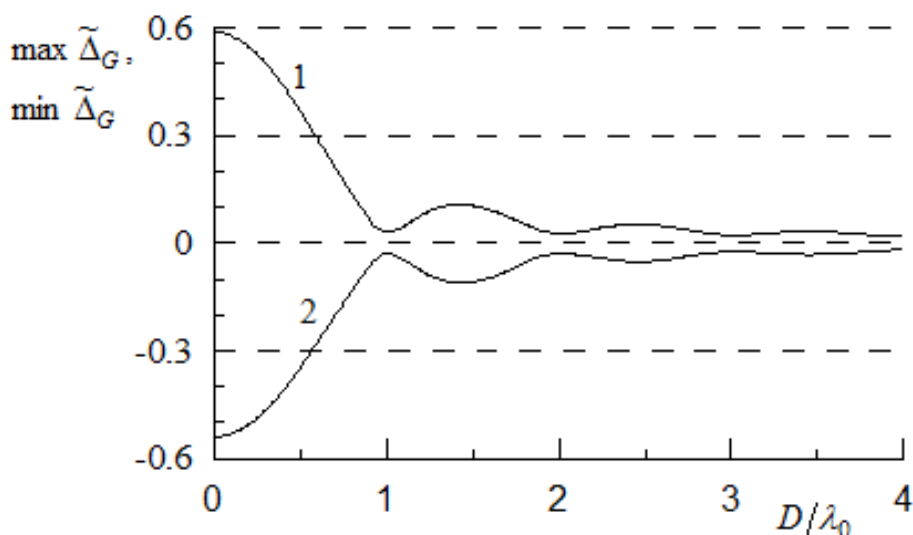
Рис. 2. Изменения погрешности  $\Delta_G$  вдоль профиля модулированной по амплитуде поверхностной волны.

Величина погрешности  $\Delta_G$ , как следует из рис. 2, меняется с изменением отношения  $D/\lambda_0$ . Также погрешность  $\Delta_G$  зависит от значимой высоте волн, возрастая прямо пропорциональна значимой высоте волн, поэтому целесообразно ввести относительную погрешность

$$\tilde{\Delta}_G = \Delta_G / h_s . \quad (6)$$

Зависимости максимального и минимального значений параметра  $\tilde{\Delta}_G$  ( $\max \tilde{\Delta}_G$  и  $\min \tilde{\Delta}_G$ ) от отношения  $D/\lambda_0$  показаны на рис. 3. Видно, что наиболее резкие изменения

происходят в области  $D/\lambda_0 < 1$ . Если отношение  $D/\lambda_0$  стремится к нулю, то погрешность приближается к  $0.6h_s$ . За пределами этой области наблюдается немонотонное уменьшение модуля максимальных и минимальных значений погрешности  $\Delta_G$  с локальными экстремумами при целочисленных значениях параметра  $D/\lambda_0$ .



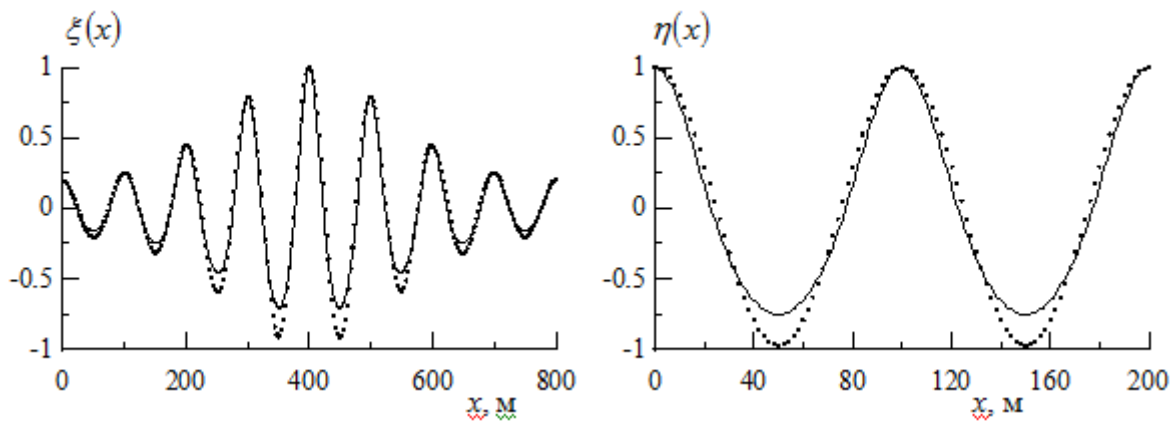
**Рис. 3.** Зависимости максимальных (кривая 1) и минимальных значений (кривая 2) погрешности  $\tilde{\Delta}_G$  от соотношения диаметра пятна  $D$  на морской поверхности и длины доминантных волн  $\lambda_0$

Представленные на рис. 3 зависимости  $\tilde{\Delta}_G = \tilde{\Delta}_G(D/\lambda_0)$  получены при близкой к нулевой асимметрии ( $A = 0.03$ ).

### 3. Эффекты асимметрии распределения возвышений морской поверхности

Измерения, выполненные с расположенной в Северном море платформе Ekofisk, установленной на глубина около 70 м, показали, что в ситуациях, когда значимая высот волн превышала 4.5 м, значения асимметрии и распределения возвышений морской поверхности лежат в пределах от -0.05 до 0.4 [5]. По данным измерений, выполненных на Черном море при значимой высоте, не превышающей 2.5 м, значения асимметрии распределения возвышений морской поверхности в среднем меняется от 0 до 0.2 [12].

Рассмотрим, как меняется погрешность  $\Delta_G$  если асимметрия распределения изменяется с ростом асимметрии  $A$ . Профили немодулированной и модулированной волны, соответствующие значениям асимметрии  $A=0.03$  и 0.4, представлены на рис. 4. С ростом асимметрии меняется волновой профиль: гребни волн становятся более заостренными, а впадины пологими, что соответствует данным натурных измерений.



**Рис.4.** Изменения профиля поверхностных волн при изменении параметра  $A$  : пунктир –  $A=0.03$ ; сплошная линия –  $A=0.4$ .

Чтобы оценить влияние асимметрии введем безразмерные характеристики, определяющую отношение максимальных значений погрешности при фиксированной значимой высоте волн и двух значениях асимметрии  $A_1$  и  $A_2$  и подобную характеристику для минимальных значений погрешности

$$\chi_{\max}(A_1, A_2) = \frac{\max[\Delta_G(D/\lambda_0, A_2)]}{\max[\Delta_G(D/\lambda_0, A_1)]}, \quad (7)$$

$$\chi_{\min}(A_1, A_2) = \frac{\min[\Delta_G(D/\lambda_0, A_2)]}{\min[\Delta_G(D/\lambda_0, A_1)]}. \quad (8)$$

Численный анализ показал, что при  $A_1 = 0$  и  $A_2 = 0.2$ , рост асимметрии может приводить к изменениям значений параметров  $\chi_{\max}$  и  $\chi_{\min}$  на 6 %, при  $A_1 = 0$  и  $A_2 = 0.4$  – изменения могут составлять 10-11 %.

## Заключение

Основные закономерности положения теории рассеяния радиоволн и света на морской поверхности были сформулированы в начале 70-х годов прошлого столетия. Тем не менее, проблема интерпретации данных дистанционного зондирования морской поверхности остается пока полностью не решенной. Основная причина связана с многообразием факторов, формирующих рельеф морской поверхности, и недостаточной изученностью этих факторов.

Морское волнение является основным фактором, приводящим к погрешности дистанционного определения уровня морской поверхности. В настоящей работе на основе численного моделирования и аналитической модели, описывающей топографическую структуру морской поверхности, проведен анализ влияния на точность определения уровня морской поверхности нелинейности доминантных волн. Проанализированы эффекты, вызванные групповой структуры поверхностных волн и отклонениями распределений волновых возвышений морской поверхности от распределения Гаусса. Показано, что

ошибки определения уровня морской поверхности прямо пропорциональны значимой высоте волн  $h_s$  и зависят от отношения диаметра  $D$  лазерного пятна на поверхности и длины доминантных волн  $\lambda_0$ . В области  $D/\lambda_0 < 1$  с уменьшением  $D/\lambda_0$  происходит резкий рост погрешности определения уровня, при  $D/\lambda_0$  стремящемся к нулю погрешность приближается к  $0.6h_s$ .

Асимметрия распределения возвышений морской поверхности, создаваемых поверхностными волнами влияет на уровень погрешности определения уровня морской поверхности. При изменении асимметрии от 0 до 0.4 погрешность может меняться на 0-11 %.

### Список литературы

1. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 1. Pp. 56–67. DOI: [10.1134/S0001437015010105](https://doi.org/10.1134/S0001437015010105)
2. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, no. 2. Pp. 167–216. DOI: [10.1016/j.pocean.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002)
3. Показеев К.В., Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование формы отраженного импульса радиоальтиметра // *Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2013. № 5. С. 80-85.
4. Guedes Soares C., Antão E.M. Comparison of the characteristics of abnormal waves on the North Sea and Gulf of Mexico // *Rogue Waves 2004: proceedings of a workshop organized by Ifremer and held in Brest, France, 20-21-22 October 2004 within the Brest Sea Tech Week*.
5. Jha A.K., Winterstein S.R. Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // *Proc. 19th Intl. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp., ASME*. 2000. Paper no. OMAE 00–6125.
6. Rodriguez E. Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1988. Vol. 93, no. C11. Pp. 14107-14120.
7. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 573 с.
8. 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 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. Vol. 8, no. 13. Pp. 3593-3601. DOI: [10.5194/acp-8-3593-2008](https://doi.org/10.5194/acp-8-3593-2008)
9. Городничев В.А., Белов М.Л. Оценка погрешности лазерного высотомера для измерения наклонов уровня океана // *Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн*. 2015. № 4. С. 36–46. DOI: [10.7463/rdopt.0415.0793187](https://doi.org/10.7463/rdopt.0415.0793187)

10. Пустовойтенко В.В., Запечалов А.С. Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – современное состояние, перспективы и проблемы // Сер. Современные проблемы океанологии. Севастополь. НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”. -- 2012. -- Вып. № 11. 218 с.
11. Юэн Г., Лейк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. Пер. с англ. Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 41. М.: Мир, 1987. 179 с.
12. Запечалов А.С., Большаков А.Н., Смоллов В.Е. Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама-Шарлье // Океанология. 2011. Т. 51, № 3. С. 432–439.
13. Запечалов А.С., Показеев К.В., Шумейко И.П., Ожиганова М.И. Моделирование пространственно-временных связей в поле морских доминантных волн в задачах гидроакустики // Процессы в геосредах. 2015. № 4. С. 28-33.
14. Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В. Динамические процессы береговой зоны моря // М.: Научный мир. 2003. 320 с.
15. Преснухин А.В. Групповая структура ветровых волн в Каспийском море // Литодинамика донной контактной зоны океана. Материалы международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.В. Лонгинова 2009. С. 31-33.



## A Surface Waves Group Structure Effect on the Ocean Level Accuracy Rate via Spacecraft Laser Sensing

A.S. Zapevalov<sup>1,\*</sup>, N.E. Lebedev<sup>1</sup>

\* [sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

---

**Keywords:** laser sensing, altimeter, sea surface level, surface wave

---

Sea waves are the main factor leading to remote measurement error of the sea surface level from the spacecraft. The fundamental difference between laser altimetry from the radio-altimeter is that the area irradiated by the laser surface is much less than the surface irradiated by the radar. The diameter of the laser spot on the sea surface is comparable to the length of the dominant sea waves and in some situations is considerably less. Laser sensing allows determines an average distance between the spacecraft and the plot of the excited surface. This plot can be displaced with respect to the unperturbed level surface. Displacement creates errors that correspond to the shifts both up and down the surface level.

The analysis was based on the numerical simulation. An analytical model describing topographic structure of the sea surface is used. The paper analyses the errors in determining the level of the sea surface caused by the nonlinear effects of the dominant waves. The effects created by the surface waves, which have a group structure, are explored. The work also studies the maximum values of the error affected by the distribution variances of wave elevation of the sea surface from the Gaussian distribution.

It is shown that the error of a determining level of the sea surface is in direct proportion to the significant wave height. They also depend on the ratio of the laser spot diameter on the surface to the length of the dominant sea waves. The most visible changes of the measurement error occur in the region where the diameter of the laser spot on the sea surface is less than the length of the dominant sea waves. If the ratio of spot diameter to the length of the dominant wave tends to zero, the uncertainty can reach 60 % of the significant wave height.

The skewness of distribution of sea surface elevations created by surface waves affects the level of uncertainty in determining the level of the sea surface. With changing the skewness from 0 to 0.4 the maximum error of the individual measurements can vary by 10-11 %.

The paper conducts analysis using the regular group structure model of the surface waves. The next step expects to involve a consideration of the intergroup variation of the wave characteristics.

## References

1. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data. *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 56–67. DOI: [10.1134/S0001437015010105](https://doi.org/10.1134/S0001437015010105)
2. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*. 2011. DOI: [10.1016/j.pocean.2011.01.002/](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002/)
3. Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovojtenko V.V. The simulation of a radar altimeter return waveform. *Vestnik MGU. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*, 2013, no. 5, pp. 80-85. (in Russian). (English version of journal: *Moscow University Physics Bulletin*, 2013, vol. 68, no. 5, pp. 420-425. DOI: [10.3103/S0027134913050135](https://doi.org/10.3103/S0027134913050135) )
4. Guedes Soares C., Antão E.M. Comparison of the characteristics of abnormal waves on the North Sea and Gulf of Mexico. *Rogue Waves 2004: proceedings of a workshop organized by Ifremer and held in Brest, France, 20-21-22 October 2004 within the Brest Sea Tech Week*.
5. Jha A.K., Winterstein S.R. Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data. *Proc. 19th Intl. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp., ASME*, 2000, paper no. OMAE 00–6125.
6. Rodriguez E. Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988. Vol. 93, № C11. P. 14107-14120.
7. Kozincev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoj lazernoj lokacii* [Pulse laser location fundamentals]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 573 p. (in Russian).
8. 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, no. 13, pp. 3593-3601. DOI: [10.5194/acp-8-3593-2008](https://doi.org/10.5194/acp-8-3593-2008)
9. Gorodnichev V.A., Belov M.L. Laser Altimeter Error for Measuring Ocean Surface Slopes. *Radiooptika. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. Zhurn. = Radiooptics*, 2015, no. 4, pp. 36–46. (in Russian). DOI: [10.7463/rdopt.0415.0793187](https://doi.org/10.7463/rdopt.0415.0793187)
10. Pustovojtenko V.V., Zapevalov A.S. [Operational oceanography: satellite altimetry — current status, prospects and problems]. *Seriya. Sovremennye problemy okeanologii* [Ser. Current problems in oceanology]. Sevastopol', NPTs “EKOSI-Gidrofizika”. 2012, vol. 11. 218 p. (in Russian).
11. YUehn G., Lejk B. [Nonlinear dynamics of gravitation waves in deep water]. *Novoe v zarubezhnoj nauke. Mekhanika* [New development in foreign science. Mechanics]. Moscow, Mir Publ. 1987, vol. 41. 179 p.
12. Zapevalov A.S., Bol'shakov A.N., Smolov V.E. Simulating of the probability density of sea surface elevations using the Gram-Charlier series. *Okeanologiya*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 432–439. (in Russian). (English version of journal: *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 407–414. DOI: [10.1134/S0001437011030222](https://doi.org/10.1134/S0001437011030222) )

13. Zapevalov A.S., Pokazeev K.V., SHumejko I.P., Ozhiganova M.I. Modeling spatial-temporal relations in the field of the dominant sea waves in problems of hydroacoustics. *Processy v geosredah*, 2015, no. 4, pp. 28-33. (in Russian).
14. Kos'yan R.D., Podymov I.S., Pyhov N.V. *Dinamicheskie processy beregovoj zony morey* [Dynamic processes in sea coastal zone]. Moscow, Nauchnyj mir Publ., 2003. 320 p.
15. Presnuhin A.V. [Group structure of wind waves in Caspian sea]. *Litodinamika donnoj kontaktnoj zony okeana. Materialy mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.V. Longinova* [Lithodynamics of ocean bottom contact zone. Proc. int. conf. dedicated to professor Loginov A.A. 100<sup>th</sup> anniversary]. Moscow, 2009, pp. 31-33. (in Russian).