

## Физические ограничения пространственного разрешения радиоальтиметров космического базирования

А. С. Запевалов

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

Анализируются ошибки восстановления характеристик морской поверхности по данным вертикального радиозондирования с космических аппаратов, вызванные групповой структурой поверхностных волн. Ошибки возникают, когда длина локального участка  $L$ , для которого рассчитываются характеристики волнового поля, становится сравнима с длиной группы волн  $L_G$ . Анализ проводится в рамках аналитической модели, описывающей волновой профиль. Модель позволяет задавать следующие характеристики: асимметрию распределения возвышений поверхности, число волн в группе и фактор групповитости. Путём численного моделирования показано, что при значимой высоте волн 1 м локальный уровень может отличаться на несколько сантиметров от среднего уровня, если  $L < L_G$ . К близким по величине ошибкам определения уровня приводят изменения асимметрии распределения возвышений локального участка морской поверхности. Величина ошибки зависит от соотношения длины участка и длины группы волн. Ошибки определения уровня линейно растут с ростом значимой высоты волн. Групповая структура также является источником ошибок определения значимой высоты волн. Чтобы гарантированно получить погрешность определения значимой высоты волн не более 10%, необходимо, чтобы выполнялось условие: длина участка, для которого она рассчитывается, должна более чем в два раза превосходить длину группы волн.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, альтиметр, погрешность определения уровня, значимая высота волн, групповая структура волн

Одобрена к печати: 25.09.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-63-70

### Введение

Достигнутая к настоящему времени точность и пространственное разрешение альтиметрических измерений уровня моря заметно ограничивают круг океанографических задач, которые решаются на основе данных, получаемых с космических аппаратов (Баскаков, Егоров, 2008). В настоящее время основным физическим фактором, определяющим ошибки альтиметрических измерений уровня морской поверхности, принято считать изменение её состояния (Hausman, Lotnicki, 2010). Этот фактор имеет несколько составляющих. К первой относятся ошибки, связанные с отклонениями распределений возвышений морской поверхности от распределения Гаусса (Zapevalov, 2012). Изменчивость статистических моментов возвышений морской поверхности приводит к изменению формы отражённого радиоимпульса, что, в свою очередь, приводит к ошибкам определения уровня (Pokazeev et al., 2013). Вторая составляющая связана с тем, что интенсивность отражения радиоволн меняется вдоль профиля доминантной волны (Rodriguez, Martin, 1994). Ещё одна составляющая связана с отклонением используемых при расчётах технических характеристик альтиметра от реальных (Gómez-Enri et al., 2006).

Использование альтиметров с синтезированной апертурой позволило значительно улучшить пространственное разрешение определения уровня морской поверхности (Bonekamp et al., 2016). При улучшении пространственного разрешения необходимо учитывать ещё один физический фактор, влияющий на точность определения уровня. Дистанционное определение уровня морской поверхности осуществляется в рамках предположения, что статистики возвышений поверхности являются постоянными в пределах области, освещаемой радаром (Brown, 1977). Если размеры области сравнимы с длиной группы волн, предположение о постоянстве статистик перестаёт выполняться. Следует также отметить, что в приближенной зоне

существование групповой структуры приводит к нерегулярным изменениям среднего уровня поверхности (Goda, 1987).

Целью настоящей работы является анализ ограничений точности и пространственного разрешения радиоальтиметрического определения характеристик морской поверхности, обусловленных групповой структурой поверхностных волн.

### Моделирование групповой структуры поверхностных волн

Характерной особенностью поля морских поверхностных волн является их групповая структура. Рассмотрим двумерное волновое поле, где  $t$  — время,  $x$  — пространственная координата. Представим профиль волны  $\xi(x, t)$  в виде произведения несущей волны и огибающей (Роказеев et al., 2015). Профиль волны является асимметричным, распределение возвышений морской поверхности — квазигaussian (Запезалов, 2011). Чтобы учесть это обстоятельство, зададим несущую волну в форме:

$$\eta(x, t) = \exp\left[-\rho_0 \sin^2\left(\frac{k_0 x - \omega_0 t}{2}\right)\right], \tag{1}$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  и  $\omega_0$  — волновое число и циклическая частота несущей волны;  $\lambda_0$  — длина несущей волны; параметр  $\rho_0$  определяет асимметрию несущей волны. Между собой параметры  $k_0$  и  $\omega_0$  связаны дисперсионным соотношением для гравитационных поверхностных волн на глубокой воде  $\omega^2 = gk$ , где  $g$  — гравитационное ускорение.

Огибающую зададим в подобной выражению (1) форме:

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

где параметры  $\rho_1$  и  $\rho_2$  определяют форму огибающей и число волн в группе соответственно. В окончательном виде профиль волны имеет вид:

$$\xi(x, t) = \alpha G(x, t) \left[ \eta(x, t) - \overline{\eta(x, t)} \right], \tag{3}$$

где  $\alpha$  — параметр, определяющий высоты волн; черта сверху означает осреднение.

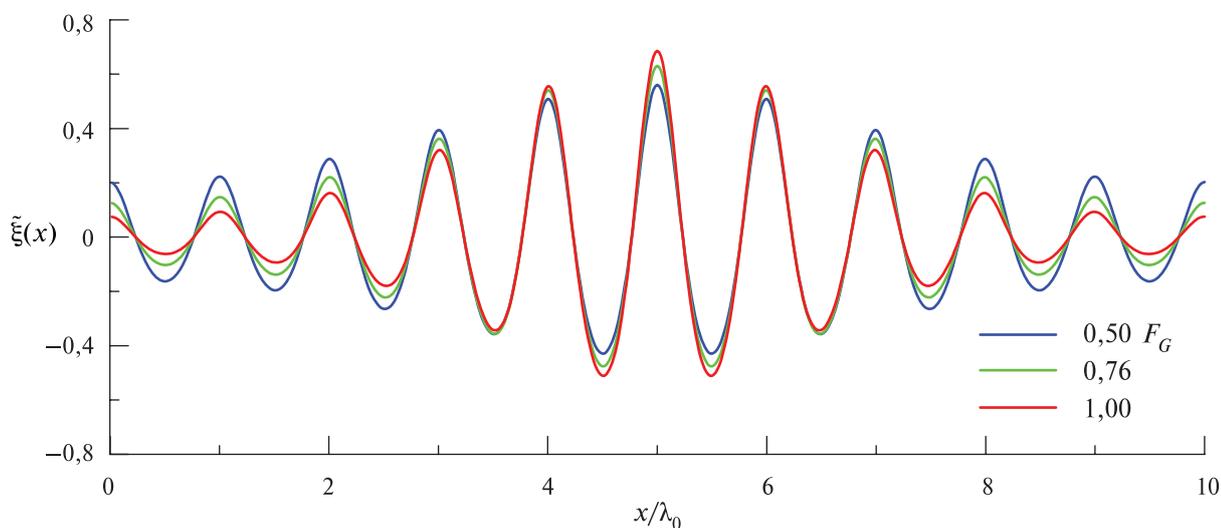


Рис. 1. Групповая структура поверхностных волн

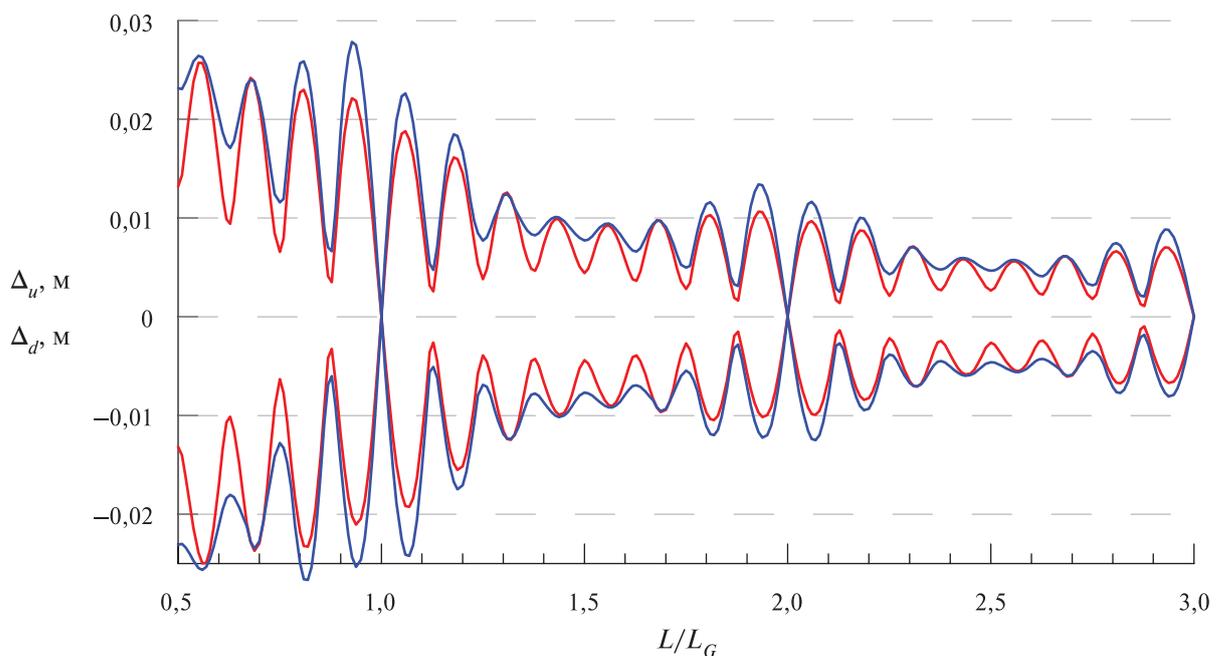
Вид профилей волн, построенных по описываемой уравнениями (1)–(3) модели при разных факторах групповитости  $F_G$ , показан на *рис. 1* (см. с. 64). Физический смысл фактора групповитости аналогичен глубине модуляции в радиотехнике. Значения параметра  $F_G$ , определённые в натуральных экспериментах, в основном лежат в пределах от 0,5 до 1. Для Чёрного моря среднее значение фактора групповитости — 0,76 (Косьян и др., 2003; Преснухин, 2009). Представленные профили  $\tilde{\xi}(x)$  нормированы на значимую высоту волн  $h_s$ , равную средней высоте одной трети самых высоких волн.

### Ошибки определения уровня морской поверхности

Если линейный размер участка  $L$ , для которого оценивается уровень поверхности, сравним или меньше длинны группы волн, то могут возникать ошибки двух типов. Первый тип: средний уровень поверхности на этом участке не соответствует уровню невозмущённой поверхности. Второй тип связан с ошибками расчёта уровня поверхности, вызванными изменением второго и третьего статистических моментов распределения возвышений поверхности на этом участке.

Использование альтиметров с синтезированной апертурой позволяет определять уровень участков морской поверхности с линейными размерами, составляющими несколько сотен метров (Bonekamp et al., 2016), что сравнимо с длиной группы волн. Длина группы волн  $L_G$  определяется числом волн в группе и их длиной, которая зависит от условий формирования волнового поля (Hasselmann et al., 1973).

В зависимости от положения участка относительно огибающей группы волн его средний уровень может быть выше или ниже уровня невозмущённой поверхности. Введём обозначение  $\Delta_u$  — максимальное смещение среднего уровня участка вверх и  $\Delta_d$  — вниз. Изменения параметров  $\Delta_u$  и  $\Delta_d$  в зависимости от отношения  $L/L_G$  показаны на *рис. 2*. В случае, когда длина участка  $L$  равна длине группы волн или является кратной ей,  $\Delta_u = \Delta_d = 0$ . Расчёты проведены для значимой высоты волн, равной 1 м. Если значимая высота возрастает, то пропорционально увеличиваются параметры  $\Delta_u$  и  $\Delta_d$ . При увеличении фактора групповитости абсолютные значения параметров  $\Delta_u$  и  $\Delta_d$  растут.



*Рис. 2.* Отклонения среднего уровня  $\Delta_u$  и  $\Delta_d$  участка длиной  $L$  от уровня невозмущённой поверхности: красный и синий цвета соответствуют значениям фактора групповитости, равным 0,5 и 1,0

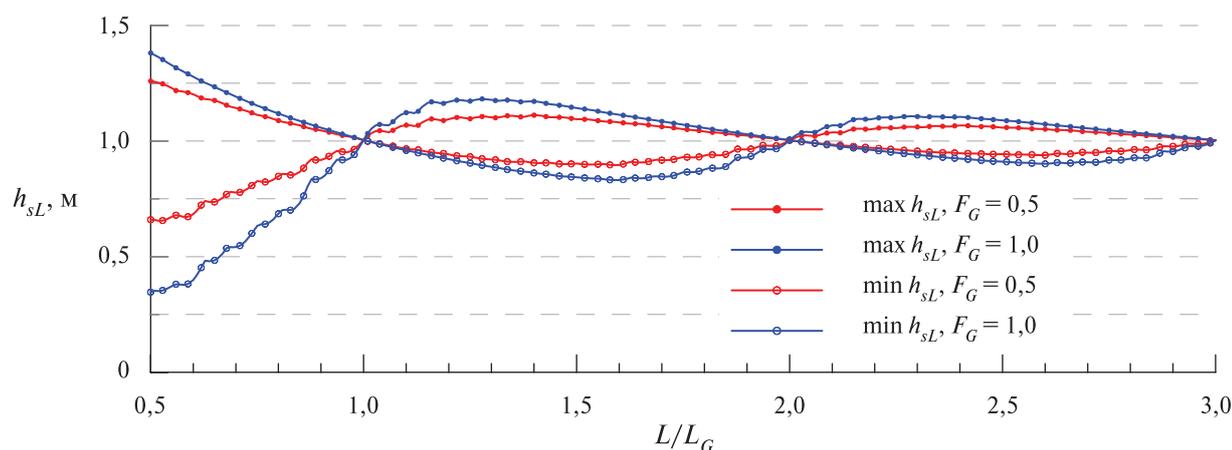


Рис. 3. Зависимости пределов изменения значимой высоты  $h_{sL}$  от отношения  $L/L_G$

### Ошибки определения значимой высоты волн

Значимая высота волн  $h_s$  является одной из основных характеристик морской поверхности, определяющих её состояние. Оценка точности дистанционно определяемых параметров волнового поля осуществляется путём сравнения с данными *in situ* измерений волнографических буёв (Queffeuou, 2004). В настоящее время погрешность определения параметра  $h_s$  доведена до приемлемой для океанологии величины и составляет около 10% (Лаврова и др., 2011). При оценке точности измерения значимой высоты обычно рассматриваются инструментальная погрешность и погрешности, обусловленные неточным совпадением в пространстве и во времени измерений характеристик поверхностных волн со спутников и с буёв (Queffeuou, 2004). Если линейные размеры участка, для которого рассчитывается значимая высота волн, сравнимы с длиной группы волн, то его локальная характеристика  $h_{sL}$  может отличаться от средней  $h_s$ .

Второй статистический момент возвышения, а соответственно, значимая высота волн  $h_{sL}$ , рассчитанные для участка длиной  $L$ , зависят от отношения  $L/L_G$ . Пределы, в которых могут меняться параметры  $h_{sL}$  при заданном значении  $L/L_G$ , показаны на рис. 3. Чтобы гарантированно получить погрешность определения значимой высоты волн не более 10%, необходимо выполнение условия  $L/L_G > 2$ .

### Ошибки определения уровня, вызванные асимметрией распределения возвышений

Морское волнение является слабо нелинейным процессом. Как следствие, распределение возвышений морской поверхности отличается от распределения Гаусса (Zapevalov et al., 2011). Значения асимметрии распределения возвышений в основном лежат в пределах от 0 до 0,4 (Jha, Winterstein, 2000).

Как и при оценке значимой высоты волн, определённые для небольших участков морской поверхности значения асимметрии  $A_L$  могут значительно отличаться от средних значений  $A$ . Пределы, в которых меняется асимметрия  $A_L$ , показаны на рис. 4 (см. с. 67). Расчёты проводились для значений фактора групповитости  $F_G$ , равных 0,5 и 1,0, которым соответствовали значения асимметрии 0,27 и 0,35. Отклонения параметра  $A_L$  от среднего возрастают с ростом фактора групповитости.

Изменения асимметрии распределения возвышений морской поверхности приводят к ошибкам радиоальтиметрического определения её уровня (Zapevalov, 2012). Чтобы оценить эти ошибки, воспользуемся моделью отражённого от квазигауссовой морской поверхности импульса (Науне, 1980).

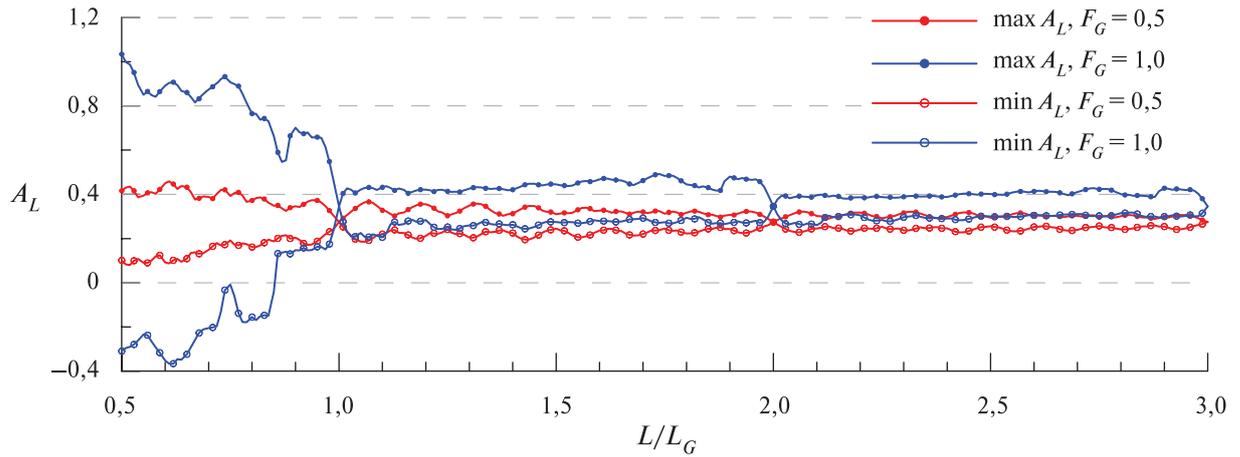


Рис. 4. Зависимости пределов изменения асимметрии  $A_L$  от отношения  $L/L_G$

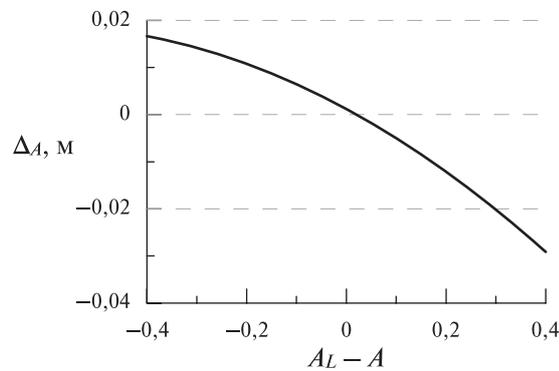


Рис. 5. Зависимости ошибки  $\Delta_A$  от разности локальной  $A_L$  и средней  $A$  асимметрий

Не приводя полного описания модели, укажем, что она включает следующие основные параметры: высоту орбиты космического аппарата  $R$ , ширину луча антенны  $\theta_0$ , ширину сжатого радиоимпульса  $d$ . Она также включает волновые параметры: значимую высоту волн  $h_s$ , асимметрию и эксцесс распределения возвышений поверхности. Как и в указанной работе, расчёты проведём при значениях параметров, соответствующих параметрам альтиметра, установленного на космическом аппарате SEASAT-1:  $R = 8 \cdot 10^5$  м,  $\theta_0 = 1,6^\circ$  и  $d = 1,327$  нс.

Отклонения уровня морской поверхности  $\Delta_A$ , рассчитанного по модели (Hayne, 1980), вызванные отличием локальной асимметрии  $A_L$  от среднего значения  $A$ , показаны на рис. 5. Расчёты проводились при значимой высоте 1 м. Если значимая высота возрастает, то пропорционально возрастают отклонения  $\Delta_A$ .

## Заключение

Проведённый анализ показал, что при приближении пространственного разрешения радиоальтиметров космического базирования к масштабам, сравнимым с длиной группы волн, возникают физические ограничения точности определения характеристик морской поверхности (уровня и значимой высоты волн). Ограничения вызваны отклонениями от средних значений уровня и статистических характеристик возвышений локального участка. Если длина участка, для которого оценивается уровень, меньше длины группы волн, то при значимой высоте волн 1 м ошибка может составлять несколько сантиметров. С ростом значимой высоты волн пропорционально растёт указанная ошибка. Чтобы погрешность определения значимой высоты волн не превышала 10%, необходимо выполнение условия: длина участка, для которого она рассчитывается, должна более чем в два раза превосходить длину группы волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН по теме № 0827-2014-0011.

## Литература

1. Баскаков А. И., Егоров В. И. Перспективный высокоточный спутниковый альтиметр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 225–228.
2. Запелалов А. С. Старшие кумулянты возвышений морской поверхности // Метеорология и гидрология. 2011. № 9. С. 78–85.
3. Косьян Р. Д., Подымов И. С., Пыхов Н. В. Динамические процессы береговой зоны моря. М.: Науч. мир, 2003. 320 с.
4. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
5. Преснухин А. В. Групповая структура ветровых волн в Каспийском море // Литодинамика донной контактной зоны океана: Материалы международной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора В. В. Лонгинова. 14–17 сент. 2009, Москва. 2009. С. 31–33.
6. Bonekamp H., Montagner F., Santacesaria V., Loddo C. N., Wannop S., Tomazic I., O'Carroll A., Kwiatkowska E., Scharroo R., Wilson H. Core operational Sentinel-3 marine data product services as part of the Copernicus Space Component // Ocean Science. 2016. No. 12. P. 787–795.
7. Brown G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. V. AP-25. P. 67–74.
8. Goda Y. Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum // Proc. IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins. 1–4 Sept., Lausanne, Switzerland. 1987.
9. Gómez-Enri J., Gommenginger C. P., Challenor P. G., Srokosz M. A., Drinkwater M. R. ENVISAT radar altimeter tracker bias // Marine Geodesy. 2006. V. 29. P. 19–38.
10. Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D. E., Enke K., Ewing J. A., Gienapp H., Hasselmann D. E., Kruseman P., Meerburg A., Mller P., Olbers D. J., Richter K., Sell W., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. 1973. V. 8. No. 12. 95 p.
11. Hausman J., Lotnicki V. Sea state bias in radar altimetry revisited // Marine Geodesy. 2010. V. 33. Iss. 1. P. 336–347.
12. Hayne G. S. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1980. V. AP-28. P. 687–692.
13. Jha A. K., Winterstein S. R. Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. ASME, Paper No. OMAE 00–6125. 2000.
14. Pokazeev K. V., Zapevalov A. S., Pustovoytenko V. V. The simulation of a radar altimeter return waveform // Moscow University Physics Bulletin. 2013. V. 68. No. 5. P. 420–425. DOI:10.3103/S0027134913050135.
15. Pokazeev K. V., Zapevalov A. S., Pustovoytenko V. V. A nonlinear model of sea surface waves // Moscow University Physics Bulletin. 2015. V. 70. No. 3. P. 213–215.
16. Queffelec P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters // Marine Geodesy. 2004. V. 27. P. 495–510.
17. Rodriguez E., Martin J. M. Estimation of the electromagnetic bias from retracked TOPEX data // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. Iss. C12. P. 24971–24979.
18. 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. V. 48. No. 2. P. 200–206.
19. 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. V. 51. No. 3. P. 407–414.

## Physical limitations of the spatial resolution of space radioaltimeters

A. S. Zapevalov

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*  
*E-mail: sevzepter.mail.ru*

Errors of recovery of the sea surface characteristics according to vertical radio sounding from spacecraft caused by the group structure of surface waves are analyzed. Errors occur when the dimensions of the local region  $L$  for which the characteristics of the wave field are determined become comparable with the length of the wave group  $L_G$ . The analysis is carried out in the framework of the analytical model describing the wave profile. The model allows to specify the following characteristics: the skewness of surface elevations, the number of waves in the group and the groupiness factor. Numerical simulations show that at a significant wave height of 1 m, the local level can differ by a few centimeters from the mean level, if  $L < L_G$ . Changes in skewness of the elevations of the local region of the sea surface lead to similar errors in the determination of the level. The magnitude of the error depends on the ratio of the length of the local region and the length of the wave group. The errors in determining the level increase linearly with increasing significant wave height. The group structure is also a source of errors in determining the significant wave height. To ensure that you receive the error in determining the significant wave height no more than 10%, it is necessary to provide the following condition: the length of the local region for which it is calculated should be more than two times exceed the length of a group of waves.

**Keywords:** remote sensing, altimeter, level error, significant wave height, wave group structure

Accepted: 25.09.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-63-70

### References

1. Baskakov A. I., Egorov V. I., Perspektivnyi vysokotochnyi sputnikovyi al'timetr (Advanced high-precision satellite altimeter), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 113–119.
2. Zapevalov A. S., Starshie kumulyanty vozvysheniia morskoi poverhnosti (High-order cumulants of sea surface elevations), *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, Vol. 36, No. 9, pp. 624–629.
3. Kos'yan R. D., Podymov I. S., Pyhov N. V., *Dinamicheskie protsessy beregovoi zony morya (Dynamic processes of the coastal zone of the sea)*, Moscow: Nauchnyi mir, 2003, 320 p.
4. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii (Integrated satellite monitoring of the Russia's seas)*, Moscow: IKI RAN, 2011, 472 p.
5. Presnuhin A. V., Gruppovaya struktura vetrovykh voln v Kaspiiskom more (Group structure of wind waves in the Caspian Sea), *Proc. Int. Conf. dedicated to 100<sup>th</sup> birthday of Prof. V. V. Longinov, 14–17 September 2009, Moscow, 2009*, pp. 31–33.
6. Bonekamp H., Montagner F., Santacesaria V., Loddo C. N., Wannop S., Tomazic I., O'Carroll A., Kwiatkowska E., Scharroo R., Wilson H., Core operational Sentinel-3 marine data product services as part of the Copernicus Space Component, *Ocean Science*, 2016, No. 12, pp. 787–795.
7. Brown G. S., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, Vol. AP-25, pp. 67–74.
8. Goda Y., Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Proc. IAHR Seminar on Wave Anal. and Gen. in Lab. Basins*, Lausanne, Switzerland, 1987.
9. Gómez-Enri J., Gommenginger C. P., Challenor P. G., Srokosz M. A., Drinkwater M. R., ENVISAT radar altimeter tracker bias, *Marine Geodesy*, 2006, Vol. 29, pp. 19–38.
10. Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D. E., Enke K., Ewing J. A., Gienapp H., Hasselmann D. E., Kruseman P., Meerburg A., Miller P., Olbers D. J., Richter K., Sell W., Walden H., Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*, 1973, Vol. 8, No. 12, 95 p.

11. Hausman J., Lotnicki V., Sea state bias in radar altimetry revisited, *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33, Issue 1, pp. 336–347.
12. 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.
13. Jha A. K., Winterstein S. R., Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data, *Proc. 19th Intl. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp.*, ASME, Paper No. OMAE 00–6125, 2000.
14. 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, DOI:10.3103/S0027134913050135.
15. Pokazeev K. V., Zapevalov A. S., Pustovoytenko V. V., A nonlinear model of sea surface waves, *Moscow University Physics Bulletin*, 2015, Vol. 70, No. 3, pp. 213–215.
16. Queffelec P., Long-term validation of wave height measurements from altimeters, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, pp. 495–510.
17. Rodriguez E., Martin J. M., Estimation of the electromagnetic bias from retracked TOPEX data, *J. Geoph. Res.*, 1994, Vol. 99, Issue C12, pp. 24971–24979.
18. 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.
19. 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. 407–414.