

## Влияние нелинейности поверхностных волн на точность альтиметрических измерений уровня моря

А. С. Запевалов, А. В. Гармашов, А. С. Князьков

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

Анализируется ошибка альтиметрического определения уровня морской поверхности SB (*англ.* skewness bias), обусловленная отклонением распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса. Учитываются изменения второго, третьего и четвертого статистических моментов возвышений поверхности. Анализ проводится на основе *in situ* волновых измерений, выполненных на стационарной океанографической платформе, расположенной в прибрежной зоне Чёрного моря. Ошибка SB рассчитывалась в рамках модели Брауна (Brown, 1977). Определено, что для Чёрного моря значения ошибки SB в основном лежат в диапазоне от  $-0,2$  до  $1,6$  см. Показано, что для параметризации ошибки измерения уровня морской поверхности в дополнение к значительной высоте волн и скорости ветра целесообразно использовать крутизну волн  $\varepsilon$ . Ещё одним дополнительным предиктором может стать обратный возраст волн  $\zeta$ . Коэффициенты корреляции SB с указанными параметрами выше, чем коэффициенты корреляции SB с псевдовозрастом волн или периодом основных энергонесущих (доминантных) волн.

**Ключевые слова:** альтиметрия, морская поверхность, модель Брауна, ошибка SB, распределение возвышений поверхности

Одобрена к печати: 25.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-193-200

### Введение

Повышение точности альтиметрических измерений с космических аппаратов остаётся одной из главных задач современной спутниковой океанографии (Лебедев, Гусев, 2021; Ablain et al., 2017). Основным физическим механизмом, который влияет на ошибку определения уровня моря, является изменчивость состояния морской поверхности (*англ.* sea state bias — SSB) (Badulin et al., 2019; Cheng et al., 2019). Принято выделять три составляющих этой ошибки. Первая обусловлена различием отражений сверхвысокочастотных (СВЧ) радиоволн от гребней и впадин морских волн (Ghavidel et al., 2016), вторая составляющая связана с обработкой сигнала на борту космического аппарата (Gómez-Enri et al., 2006), третья вызвана отклонением распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса (Запевалов, 2012; Pires et al., 2016). В настоящей работе рассматривается ошибка третьего типа, которую в англоязычной литературе принято называть skewness bias и обозначать SB.

Форма отражённого от морской поверхности импульса альтиметра описывается моделью Брауна (Brown, 1977):

$$V(t) = \chi(t) * s(t) * q(t), \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $\chi(t)$  — форма импульса, отражённого от плоской поверхности;  $s(t)$  — форма зондирующего импульса;  $q(t)$  — функция, связанная с плотностью вероятности высот точек зеркального отражения; символ «\*» означает свёртку. Функция  $q(t)$  получена заменой переменной функции плотности вероятности возвышений морской поверхности  $P(\eta)$  с помощью соотношения  $\eta = ct/2$ , где  $c$  — скорость света.

Первоначально модель (1) была построена для гауссова распределения возвышений морской поверхности. Позже область её использования была расширена на случай, когда распределение является квазигауссовым и может быть описано с помощью усечённых рядов Грама–Шарлье (Показеев и др., 2013; Callahan, Rodriguez, 2004; Hayne, 1980). Отклонение

распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса приводит к смещению переднего фронта отражённого импульса альтиметра и, соответственно, к ошибке определения уровня моря (см., например, (Haune, 1980, Figure 6)). Этот эффект вызван тем, что медиана распределения возвышений морской поверхности не совпадает со средним уровнем поверхности (Pires et al., 2016).

В настоящей работе анализ SB проводится на основе прямых измерений статистических характеристик морских волн, проведённых на Чёрном море.

### Моделирование формы отражённого импульса

Функции  $\chi(t)$  и  $s(t)$ , описывающие технические характеристики альтиметра и условия измерений, зададим в форме:

$$\chi(t) = a \cdot \exp\left[-\frac{4c}{\gamma h} \cdot \cos(2\xi) \cdot t\right] I_0\left[2\sqrt{\frac{4c}{\gamma^2 h} \cdot \sin^2(2\xi) \cdot t}\right] H(t), \quad s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_r}} \exp\left[-\frac{t^2}{2D_r}\right],$$

где  $a$  — амплитуда;  $\gamma$  — ширина луча антенны;  $h$  — высота орбиты космического аппарата;  $\xi$  — абсолютное значение угла падения;  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя первого рода;  $H(t)$  — единичная функция Хевисайда; параметр  $D_r$  определяет ширину радиоимпульса. Соотношение  $\eta = ct/2$  является линейным, соответственно коэффициенты асимметрии и эксцесс  $P(\eta)$  и  $q(t)$  численно равны между собой. Понижение уровня морской поверхности приводит к увеличению времени прохождения радиоимпульса альтиметра. Следовательно, асимметрия функции  $q(t)$  должна иметь знак, противоположный знаку коэффициента асимметрии возвышения морской поверхности  $A_\eta$  (Haune, 1980).

Анализ будем проводить с помощью аппроксимации функции плотности вероятности возвышений морской поверхности, заданной с помощью усечённого ряда Грама — Шарлье (Запелалов и др., 2011), коэффициенты которого являются функциями статистических моментов (Кендалл, Стюарт, 1966):

$$P_{G-C}(\eta) = \frac{\exp\left[-\frac{\eta^2}{2D_\eta}\right]}{\sqrt{2\pi D_\eta}} \left[1 + \frac{A_\eta}{6} H_3\left(\frac{\eta}{\sqrt{D_\eta}}\right) + \frac{E_\eta}{24} H_4\left(\frac{\eta}{\sqrt{D_\eta}}\right)\right],$$

где  $D_\eta$  — дисперсия возвышений морской поверхности;  $H_i$  — полиномы Эрмита  $i$ -го порядка;  $E_\eta$  — эксцесс. Соответственно, функция  $q(t)$  имеет вид:

$$q(t) = \frac{\exp\left[-\frac{t^2}{2D_s}\right]}{\sqrt{2\pi D_s}} \left[1 - \frac{A_\eta}{6} H_3\left(\frac{t}{\sqrt{D_s}}\right) + \frac{E_\eta}{24} H_4\left(\frac{t}{\sqrt{D_s}}\right)\right], \quad (2)$$

где  $D_s = (4/c^2) D_\eta$ . При описании морских волн в качестве параметра, характеризующего их высоту, принято использовать значительную высоту  $H_s$ , равную средней высоте трети самых высоких волн. Параметры  $D_\eta$  и  $H_s$  связаны соотношением  $H_s = 4\sqrt{D_\eta}$ . Таким образом, смещение переднего фронта альтиметра определяют три параметра:  $A_\eta$ ,  $E_\eta$  и  $H_s$ , характеризующие состояние морской поверхности.

Для численных расчётов значения параметров  $\theta_w$ ,  $\sqrt{D_r}$  и  $h$  примем равными соответствующим параметрам альтиметра, установленного на спутнике Seasat-1:  $\theta_w = 1,6^\circ$ ;  $\sqrt{D_r} = 1,327$  нс и  $h = 8 \cdot 10^5$  м (Haune, 1980). Смещение переднего фронта на 0,1 нс соответствует изменению расчётного уровня поверхности на 1,5 см.

## Асимметрия и эксцесс возвышений морской поверхности

Для дальнейшего анализа будем использовать массив данных статистических характеристик поверхностных волн и скорости ветра, полученный по измерениям на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН (Запевалов, Гармашов, 2021). Глубина моря в точке, где установлена платформа, составляет примерно 30 м, что для черноморских волн, длина которых крайне редко превышает 60 м, соответствует условию «глубокой воды». В настоящей работе используются волновые измерения и измерения скорости ветра, которые с несколькими перерывами проводились в период с мая 2018 г. по январь 2019 г. Общий объём данных составляет более 17 000 сеансов измерений продолжительностью 20 мин. Особенности ветрового режима в окрестности стационарной океанографической платформы рассмотрены в работах (Ефимов, Комаровская, 2019; Соловьев, Иванов, 2007). Гистограммы средних за сеанс значительных высот волн  $H_s$  и скорости ветра  $U_{10}$ , измеренной на высоте 10 м, представлены на *рис. 1*.

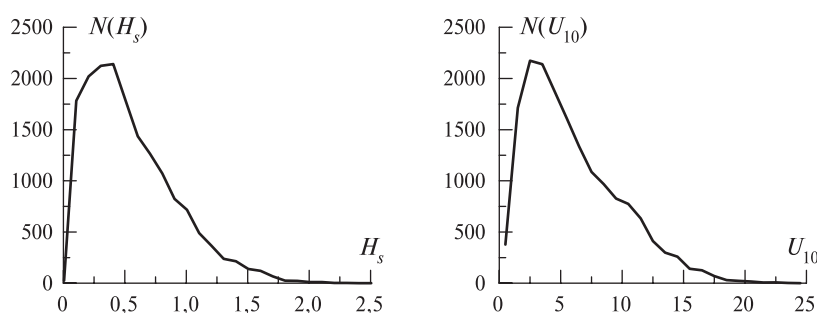


Рис. 1. Гистограммы значительной высоты волн  $N(H_s)$  и скорости ветра  $N(U_{10})$

Для параметризации нелинейных эффектов в морских волнах используются безразмерные параметры: обратный возраст волн и крутизна. Обратный возраст волн, характеризующий стадию развития волнового поля, принято определять как (Cavaleri et al., 2018)

$$\zeta = U_{10}/C_0,$$

где  $C_0$  — фазовая скорость доминантных волн. Чем больше значение  $\zeta$ , тем более ранней является стадия развития. Значение  $\zeta = 0,83$  соответствует полностью развитому волновому полю. При  $\zeta > 0,83$  преобладают ветровые волны, при  $\zeta < 0,83$  преобладает зыбь.

Крутизну волн определим как

$$\varepsilon = \sqrt{D_s} \cdot k_0,$$

где  $k_0$  — волновое число пика волнового спектра. Доминантные волны (волны с волновым числом  $k_0$ ) относятся к типу гравитационных волн, для которых на глубокой воде справедливо дисперсионное соотношение  $\omega^2 = gk$ , откуда следует  $\varepsilon = \sqrt{D_s} \cdot \omega_0^2/g$ , где  $\omega_0$  — частота доминантных волн;  $g$  — гравитационное ускорение.

## Численное моделирование ошибки измерения уровня

Обычно при параметрическом расчёте ошибок измерения уровня учитывается его зависимость от двух параметров: значительной высоты  $H_s$  и скорости ветра  $U_{10}$ . В работе (Pires et al., 2016) предложено использовать три предиктора, добавив средний период доминантных волн  $T_0$ . Все предикторы могут быть определены по данным альтиметрических измерений. В работе (Badulin et al., 2019) на основе анализа, проведённого в рамках теории подобия, предложено для оценки погрешности измерения уровня моря наряду с  $\varepsilon$  использовать безразмерный параметр  $\varsigma$  (псевдовозраст волн):

$$\zeta = \frac{gH_s}{U_{10}^2}.$$

Введём параметр  $\Delta t$ , равный разности расчётного времени прихода импульса, отражённого от идеализированной гауссовой поверхности и от морской поверхности. Тогда ошибка определения уровня, обусловленная нелинейностью морских волн, составляет  $SB = (C/2)\Delta t$ . Расчёт параметра  $\Delta t$  осуществляется с помощью модели (1) подстановкой в формулу (2) полученных по данным волновых измерений значительной высоты  $H_s$  и кумулянтов  $A_\eta$  и  $E_\eta$ .

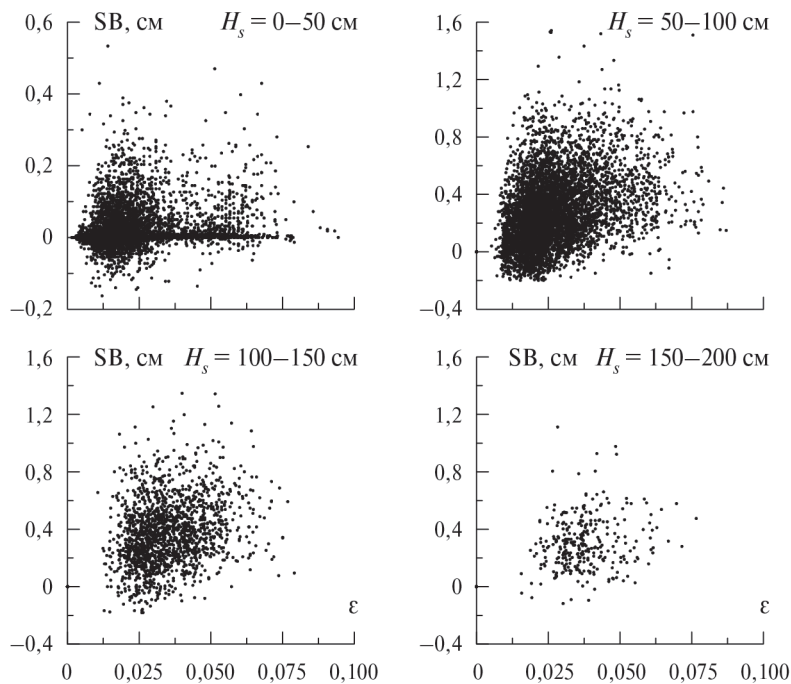


Рис. 2. Зависимость SB от крутизны волн  $\epsilon$

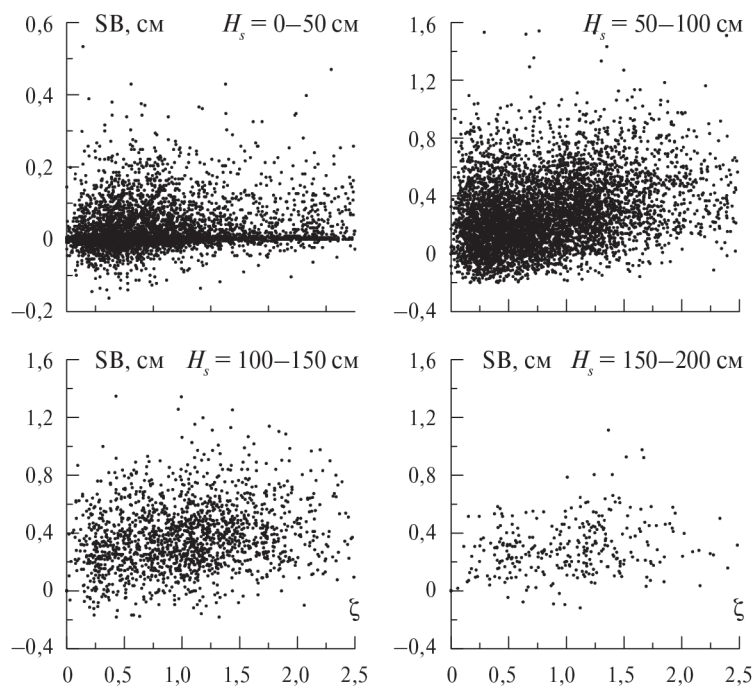


Рис. 3. Зависимость SB от обратного возраста волн  $\zeta$

Разобьём диапазон изменения  $H_s$  на четыре области, в каждой из которых проанализируем связь SB с предлагаемыми в работах (Badulin et al., 2019; Pires et al., 2016) предикторами для оценки ошибки определения уровня моря. Зависимости SB от  $\varepsilon$  и от  $\zeta$  в четырёх диапазонах  $H_s$  показаны на рис. 2 и 3 (см. с. 196). Значения SB для Чёрного моря в основном лежат в пределах от  $-0,2$  до  $1,6$  см. Здесь и далее исключены нехарактерные для открытого моря ситуации, когда обратный возраст волн  $\zeta$  превышает уровень 2,5.

Из таблицы следует, что коэффициент корреляции между SB и  $\varepsilon$  зависит от значительной высоты волн. Когда волнение слабое, корреляция низкая. Подобные зависимости наблюдаются и для других предикторов. Во всех диапазонах  $H_s$  имеет место неравенство  $r(\varepsilon, SB) > r(\zeta, SB)$ , которое является следствием того, что корреляция кумулянтов  $A_\eta$  и  $E_\eta$  с крутизной волн выше, чем корреляция с обратным возрастом (Запевалов, Гармашов, 2021). Коэффициент корреляции между  $\varepsilon$  и  $\zeta$  равен 0,65.

Коэффициенты корреляции ошибки определения уровня моря SB и предикторов  $\varepsilon$ ,  $\zeta$ ,  $\tau$ ,  $\tau^{-1}$  и  $T_0$

Коэффициенты корреляции	$H_s = 0-250$ см	$H_s = 0-50$ см	$H_s = 50-100$ см	$H_s = 100-150$ см	$H_s = 150-200$ см
$r(\varepsilon, SB)$	0,43	0,24	0,62	0,83	0,85
$r(\zeta, SB)$	0,32	0,21	0,56	0,78	0,82
$r(\tau, SB)$	0,15	-0,09	0,16	0,50	0,57
$r(\tau^{-1}, SB)$	0,10	0,04	0,41	0,68	0,76
$r(T_0, SB)$	0,24	0,01	0,47	0,76	0,81

Коэффициенты корреляции SB с предикторами  $\tau$ ,  $\tau^{-1}$  и  $T_0$  заметно ниже, чем с традиционно используемыми при анализе нелинейности морских волн параметрами  $\varepsilon$  и  $\zeta$ . Из данных, приведённых в таблице, следует, что если использовать псевдовозраст волн  $\tau$ , то лучше брать его обратную величину. Это связано ещё и с тем, что при слабых ветрах небольшие ошибки в измерении скорости ветра приводят к большим ошибкам определения параметра  $\tau$ .

## Заключение

Один из путей повышения точности определения уровня морской поверхности состоит в использовании при параметризации ошибки определения уровня моря SB дополнительных предикторов, которые могут быть рассчитаны по данным измерений с космических аппаратов.

Анализ, проведённый в рамках модели Брауна (1) с использованием данных прямых волнографических измерений, показал, что для Чёрного моря значения ошибки измерения уровня моря SB, вызванной нелинейностью поверхностных волн, в основном лежат в пределах от  $-0,2$  до  $1,6$  см. Наиболее высокая корреляция наблюдается между SB и крутизной волн  $\varepsilon$ , что указывает на целесообразность использования этого параметра в качестве дополнительного предиктора. В качестве второго дополнительного предиктора может быть использован обратный возраст волн  $\zeta$ . Коэффициент корреляции между параметрами  $\varepsilon$  и  $\zeta$  равен 0,65.

Коэффициенты корреляции SB с параметрами  $\varepsilon$  и  $\zeta$  выше, чем коэффициенты корреляции SB с псевдовозрастом волн или периодом доминантных волн.

Отметим, что представленные здесь статистические оценки справедливы для Чёрного моря. В районах с другим волновым климатом, в частности на акваториях, где наблюдаются более высокие волны, ошибки SB будут больше.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0555-2021-0003 по теме «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

## Литература

1. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофиз. журн.* 2019. Т. 35. № 2(206). С. 134–146. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-134-146.
2. *Запелов А. С.* Влияние асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности на точность альтиметрических измерений ее уровня // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана.* 2012. Т. 48. № 2. С. 224–231.
3. *Запелов А. С., Гармашов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофиз. журн.* 2021. Т. 37. № 4. С. 447–459. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-4-447-459.
4. *Запелов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е.* Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама–Шарлье // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 3. С. 432–439.
5. *Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Теория распределений: пер. с англ. / пер. В. В. Сазонова, А. Н. Ширяева; под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Наука, 1966. 587 с.
6. *Лебедев С. А., Гусев И. В.* Международный опыт калибровки данных спутниковой альтиметрии на стационарных и временных полигонах // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 2. С. 18–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35.
7. *Показеев К. В., Запелов А. С., Пустовойтенко В. В.* Моделирование формы отраженного импульса радиоальтиметра // *Вестн. Московского ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия.* 2013. № 5. С. 80–85.
8. *Соловьев Ю. П., Иванов В. А.* Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // *Морской гидрофиз. журн.* 2007. № 3. С. 42–61.
9. *Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A.* Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales // *Surveys in Geophysics.* 2017. V. 38. P. 7–31.
10. *Badulin S. I., Grigorieva V. G., Shabanov P. A., Sharmar V. D., Karpov I. O.* Sea state bias in altimetry measurements within the theory of similarity for wind-driven seas // *Advances in Space Research.* 2019. V. 68. No. 2. P. 978–988. DOI: 10.1016/j.asr.2019.11.040.
11. *Brown G. S.* The average impulse response of a rough surface and its applications // *IEEE Trans. Antennas Propagation.* 1977. V. AP-25. P. 67–74.
12. *Callahan P. S., Rodriguez E.* Retracking of Jason-1 data // *Marine Geodesy.* 2004. V. 27. P. 391–407. DOI: 10.1080/01490410490902098.
13. *Cavaleri L., Abdalla S., Benetazzo A., Bertotti L., Bidlot J.-R., Breivik Ø., Carniel S., Jensen R. E., Portilla-Yandun J., Rogers W. E., Roland A., Sanchez-Arcilla A., Smith J. M., Staneva J., Toledo Y., van Vledder G. Ph., van der Westhuysen A. J.* Wave modelling in coastal and inner seas // *Progress in Oceanography.* 2018. V. 167. DOI: 10.1016/j.pocean.2018.03.010.
14. *Cheng Y., Xu Q., Gao L., Li X., Zou B., Liu T.* Sea state bias variability in satellite altimetry data // *Remote Sensing.* 2019. V. 11. No. 10. Art. No. 1176. DOI: 10.3390/rs11101176.
15. *Ghavidel A., Schiavulli D., Camps A.* Numerical computation of the electromagnetic bias in GNSS-R altimetry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2016. V. 54. No. 1. P. 489–498. DOI: 10.1109/tgrs.2015.2460212.
16. *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. DOI: 10.1080/01490410600582296.
17. *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.
18. *Pires N., Fernandes M., Gommenginger C., Scharroo R.* A conceptually simple modeling approach for Jason-1 sea state bias correction based on 3 parameters exclusively derived from altimetric information // *Remote Sensing.* 2016. V. 8. No. 7. Art. No. 576. DOI: 10.3390/rs8070576.

## Influence of nonlinearity of surface waves on the error of altimetric measurements of sea level

A. S. Zapevalov, A. V. Garmashov, A. S. Knyazkov

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

*E-mail: sevzepter@mail.ru*

Sea state bias (SSB) caused by changes in the state of the sea surface is the main factor determining the error of remote measurement of sea level. In this paper, one of the three components of the SSB, due to the deviation of the distribution of sea surface elevations from the Gauss distribution, skewness bias (SB) is analyzed. Changes in the second, third and fourth statistical moments of surface elevation are taken into account. The analysis is carried out on the basis of in situ wave measurements performed on a stationary oceanographic platform located in the coastal zone of the Black Sea. It is shown that for the Black Sea, the SB mainly lies in the range from  $-0.2$  to  $1.6$  cm. It is shown that to parameterize the measurement error of the sea surface level, in addition to a significant wave height and wind speed, it is advisable to use dimensionless parameters: the steepness of the waves and the reverse age of the waves. The correlation coefficients of SB with these parameters are higher than the correlation coefficients of SB with the pseudo-age of waves or the period of the main energy-carrying (dominant) waves.

**Keywords:** altimetry, sea surface, Brown model, skewness bias, distribution of surface elevations

Accepted: 25.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-193-200

### References

1. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Disturbances in the Wind Speed Fields due to the Crimean Mountains, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 2, pp. 123–134, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-123-134.
2. 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, DOI: 10.1134/S0001433812020120.
3. Zapevalov A. S., Garmashov A. V., Skewness and kurtosis of the surface wave in the coastal zone of the black sea, *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28, No. 4, pp. 414–425, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-4-414-425.
4. 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, DOI: 10.1134/S0001437011030222.
5. Kendall M. J., Stewart A., *The Advanced Theory of Statistics, Vol. I. Distribution theory*, London: Butler and Tanner Ltd., 1958, 675 p.
6. Lebedev S. A., Gusev I. V., International experience in calibration of satellite altimetry data on the stationary and temporary calibration sites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 18–35 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35.
7. Pokazeev K. V., Zapevalov A. S., Pustovoytenko V. V., The simulation of a radar altimeter return waveform, *Moscow University Physics Bull.*, 2013, Vol. 68, Issue 5, pp. 420–425, DOI: 10.3103/S0027134913050135.
8. Solov'ev Yu. P., Ivanov V. A., Preliminary results of measurements of atmospheric turbulence over the sea, *Physical Oceanography*, 2007, No. 3, pp. 154–172.
9. Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A., Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales, *Surveys in Geophysics*, 2017, Vol. 38, pp. 7–31.
10. Badulin S. I., Grigorieva V. G., Shabanov P. A., Sharmar V. D., Karpov I. O., Sea state bias in altimetry measurements within the theory of similarity for wind-driven seas, *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 68, No. 2, pp. 978–988, DOI: 10.1016/j.asr.2019.11.040.
11. Brown G. S., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1977, Vol. AP-25, pp. 67–74.
12. Callahan P. S., Rodriguez E., Retracking of Jason-1 data, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, pp. 391–407, DOI: 10.1080/01490410490902098.
13. Cavaleri L., Abdalla S., Benetazzo A., Bertotti L., Bidlot J.-R., Breivik Ø., Carniel S., Jensen R. E., Portilla-Yandun J., Rogers W. E., Roland A., Sanchez-Arcilla A., Smith J. M., Staneva J., Toledo Y.,

- van Vledder G. Ph., van der Westhuysen A. J., Wave modelling in coastal and inner seas, *Progress in Oceanography*, 2018, Vol. 167, DOI: 10.1016/j.pocean.2018.03.010.
14. Cheng Y., Xu Q., Gao L., Li X., Zou B., Liu T., Sea state bias variability in satellite altimetry data, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 10, Art. No. 1176, DOI: 10.3390/rs11101176.
  15. Ghavidel A., Schiavulli D., Camps A., Numerical computation of the electromagnetic bias in GNSS-R altimetry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 1, pp. 489–498, DOI: 10.1109/tgrs.2015.2460212.
  16. 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, DOI: 10.1080/01490410600582296.
  17. Hayne G. S., Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1980, Vol. AP-28, pp. 687–692.
  18. Pires N., Fernandes M., Gommenginger C., Scharroo R., A conceptually simple modeling approach for Jason-1 sea state bias correction based on 3 parameters exclusively derived from altimetric information, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 7, Art. No. 576, DOI: 10.3390/rs8070576.