

## Калибровка альтиметрических измерений значимых высот волн по результатам волнового реанализа

С. А. Лебедев<sup>1,2,3</sup>, И. В. Гусев<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия  
E-mails: lebedev@wdcb.ru, giv-wr@yandex.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
Москва, Зеленоград, 124498, Россия

<sup>3</sup> Майкопский государственный технологический университет  
Майкоп, 385000, Россия

<sup>4</sup> АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
Московская обл., Королёв, 141070, Россия

В настоящее время развита технология калибровки данных альтиметрических измерений высоты морской поверхности как на стационарных, так и на временных полигонах, оснащённых современной техникой проведения *in situ* измерений уровня моря. Проведение калибровки значимых высот волн SWH (*англ.* Significant Wave Height), полученных по данным спутниковой альтиметрии, в настоящее время на полигонах калибровки измерений высот морской поверхности затруднено, так как в большинстве своём они расположены вблизи береговой линии. По этой причине калибровка SWH проводится на стационарных волномерных буйях, размещённых в открытом океане. В Чёрном море, где расположен полигон калибровки альтиметрических измерений российской космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2», провести калибровку SWH сложно, так как на его акватории измерения стационарными волномерными буйями отсутствуют, а эпизодические *in situ* измерения не позволяют провести калибровку качественно. По этой причине в настоящей работе предложен метод калибровки SWH по данным реанализа волнового поля. Было проведено сравнение SWH, рассчитанных по модели BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006, с результатами альтиметрических измерений 14 спутников для временного интервала 1985–2021 гг. Корреляционный анализ результатов показал хорошее соответствие данных дистанционного зондирования Земли и модельных расчётов, что дало возможность провести калибровку альтиметрических измерений российских спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13 по данным волнового реанализа. Для них коэффициент корреляции составил 0,943 и 0,940 соответственно, а коэффициент детерминации — 0,997 и 0,999. Измерения морского буя с ГНСС-приёмником (*англ.* GNSS — Global Navigation Satellite Systems), который 19 октября 2021 г. располагался вблизи одного из альтиметрических треков спутника «ГЕО-ИК-2» № 13, показали хорошее совпадение SWH *in situ* измерений (0,576 м) с альтиметрическими измерениями (0,521 м) и модельными расчётами (0,599 м). Таким образом, показано, что значимые высоты волн, рассчитанные по альтиметрическим измерениям, соответствуют точности измерений не хуже 10 %.

**Ключевые слова:** спутниковая альтиметрия, полигон калибровки, космическая геодезическая система, значимая высота волны, волновой реанализ

Одобрена к печати: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-248-264

### Введение

В настоящее время развита технология калибровки данных альтиметрических измерений высоты морской поверхности как на стационарных, так и на временных полигонах, оснащённых современной техникой проведения *in situ* измерений уровня моря (Лебедев, Гусев, 2021). Проведение калибровки значимых высот волн SWH (*англ.* Significant Wave Height), полученных из данных спутниковой альтиметрии в результате их обработки различными алгоритмами ретрекинга, в настоящее время на полигонах калибровки измерений высот морской поверхности затруднено, так как в большинстве своём они размещены вблизи береговой линии. По этой причине калибровка SWH проводится на стационарных волномерных буйях, расположенных в открытом океане.

Общая точность расчёта значимых высот волн по данным альтиметрических измерений сравнима с измерениями на стационарных волномерных буях и составляет не более 10 % (Caires, Sterl, 2003; Carter et al., 1992; Cotton, Carter, 1994; Dobson et al., 1987; Ebuchi, Kawamura, 1994; Fedor, Brown, 1982; Gower, 1996; Janssen et al., 2007; Queffeuilou, 2004; Ray, Beckley, 2003; Ribal, Young, 2019; Sepulveda et al., 2015; Shaeb et al., 2015; Yang, Zhang, 2019; Ye et al., 2015; Young, 1998; Zieger et al., 2009).

В Чёрном море, где расположен полигон калибровки альтиметрических измерений российской космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2», провести калибровку SWH сложно, так как на его акватории отсутствуют стационарные волномерные буи, а эпизодические *in situ* измерения не позволяют качественно провести калибровку значимых высот волн в связи с особенностями его волнового режима.

Общий характер ветро-волновых процессов Чёрного моря зависит от сезонной и пространственной изменчивости атмосферных полей. В зимний период над морем господствующими ветрами являются северные и северо-восточные; летом преобладают ветры переменных направлений. На побережье Чёрного моря повторяемость ветров связана также с местными географическими особенностями. Так, в отдельных прибрежных районах моря наблюдаются сильные местные ветры, из которых наиболее известна новороссийская бора. В Крыму, на Черноморском побережье Кавказа и у южных берегов наблюдаются фены (ветры, дующие с гор). Для прибрежных районов Чёрного моря характерна также бризовая циркуляция (Давидан и др., 1974).

Значительные размеры моря, большие глубины, слабая изрезанность береговой черты способствуют, несмотря на редкую повторяемость сильных ветров, развитию штормового волнения. При этом в прибрежной зоне режим волнения очень изменчив и зависит от особенностей конкретного района.

Поэтому для калибровки SWH, получаемых из обработки альтиметрических измерений российских спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13, предлагается метод сравнения их с данными волнового реанализа. По сути, это становится обратной задачей, потому что, как правило, результаты модельных расчётов верифицируются по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

## Моделирование волнового режима Чёрного моря

В настоящее время существует большое количество различных моделей волнения, которые представляют собой адаптацию основных дискретных спектральных моделей. Среди таких моделей наиболее широкое распространение получили следующие:

- WAM (*англ.* Wave Model) (The WAMDI..., 1988) — разработана международной группой учёных WAMDI (*англ.* Wave Modeling Group) в 1988 г. под руководством К. Хассельманна (*англ.* K. Hasselmann). Применяется в оперативной практике Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF);
- WaveWatch — разработана в Национальном центре прогнозирования окружающей среды США (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — NCEP) Г. Толманом (*англ.* G. Tolman) с коллегами (The WAVEWATCH III..., 2016) и используется для диагноза и прогноза волнения в центре прогнозов Национальной службы погоды США (*англ.* National Weather Service — NWS);
- SWAN (*англ.* Simulating Waves Near Shore) (SWAN..., 2010) — была создана в Дельфтском технологическом институте (Нидерланды) (*англ.* Delft University of Technology, *нид.* Technische Universiteit Delft) и предназначается для расчёта волн в мелководных прибрежных районах.

Все эти модели открыты для широкого круга пользователей информационно-телекоммуникационной сети интернет и активно применяются при моделировании волнения как в Мировом океане, так и в окраинных и внутренних морях и водоёмах.

Модели волнения Чёрного моря, построенные на основе вышперечисленных, включая оригинальные (авторские) разработки, различаются между собой пространственным разрешением и атмосферным форсингом (табл. 1).

Верификация всех этих моделей осуществлялась по данным альтиметрических измерений значимых высот волн на акватории Чёрного моря (см. табл. 1).

Таблица 1. Основные модели ветрового режима Чёрного моря

Модель	Пространственное разрешение	Временной шаг фиксации расчётов, мин	Атмосферный форсинг	Источник
MIKE 21 SW	Нерегулярная сетка	3600	NCEP/NCAR	(Divinsky, Kosyan, 2017)
SWAN	1,3×1,83 км	30, 60	ERA-Interim	(Akpınar et al., 2012)
SWAN	5×5 км	3600	NCEP/NCAR	(Arkhipkin et al., 2014)
SWAN	Нерегулярная сетка	15	NCEP/NCAR	(Myslenkov, Chernyshova, 2016)
SWAN	Нерегулярная сетка	3600	GFS-0,25°; GFS-0,5°	(Мысленков и др., 2017)
SWAN	0,08×0,08°	10	WRF	(Rusu et al., 2014)
SWAN	4,5×4,5 км	30	SKIRON	(Патнер и др., 2017)
VAGBULH1	0,25×0,25°	7200	ARPEGE	(Kortcheva et al., 2000)
WAM	3×3 км	60	ERA5	(Ciliberti et al., 2021)
WAM Cycle 4	7×7 км	1800	REMO	(Cherneva et al., 2008)
WaveWatch III	9×9 км	1800	GFS-0,25°; GFS-0,5°	(Мысленков, Столярова, 2016)
WaveWatch III	10×10 км	1800	ПЛАВ; GFS	(Зеленько и др., 2014)

Примечание: SW — *англ.* SpectralWaves; NCAR — *англ.* National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы, США; GFS — *англ.* Global Forecast System; WRF — *англ.* Weather Research and Forecast; ПЛАВ (ПолуЛагранжев перенос Абсолютного Вихря).

### Верификация модельных расчётов значимых высот волн по данным альтиметрических измерений на акватории Чёрного моря

Анализ результатов верификации (и калибровки) значимых высот волн выполняется на основе следующих статистических характеристик разности между данными модельных расчётов и измерениями спутниковой альтиметрии:

- среднее по времени значение значимых высот волн  $SWH_i$ ,  $\overline{SWH} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SWH_i$ , рассчитанных по модели и интерполированных в точки проведения альтиметрических измерений, где  $N$  — число измерений вдоль трека;
- среднее по времени значение значимых высот волн  $swh_i$ ,  $\overline{swh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N swh_i$ , рассчитанных по данным альтиметрических измерений;
- среднее отклонение разницы измерений (*англ.* Mean Estimate — ME, или bias)  $ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (SWH_i - swh_i)$ ;
- стандартное отклонение SD разницы измерений,  $SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (SWH_i - swh_i - ME)^2}$  (*англ.* Standard Deviation);
- среднеквадратичная ошибка RSME (*англ.* Root Mean Square Error)  $RMSE = \sqrt{ME^2 + SD^2}$ ;
- индекс рассеяния или индекс дисперсии (*англ.* Scatter Index — SI)  $SI = RMSE / \overline{swh}$ ;
- коэффициент корреляции  $R = \frac{\sum_{i=1}^N (SWH_i - \overline{SWH}) \cdot (swh_i - \overline{swh})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (SWH_i - \overline{SWH})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (swh_i - \overline{swh})^2}}$ ;

- коэффициенты  $a$  и  $b$  линейной регрессии  $SWH = b + a \cdot swh$ ;

- коэффициент детерминации  $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (swh_i - f(swh_i))^2}{\sum_{i=1}^N (swh_i - \overline{swh})^2}$ , где  $f(swh_i)$  — значение значимой высоты волны, рассчитанной по линии регрессии.

В случае двух переменных коэффициент детерминации равен квадрату коэффициента корреляции.

В работах (Мысленков и др., 2017; Ратнер и др., 2017; Ciliberti et al., 2021; Kortcheva et al., 2000; Myslenkov, Chernyshova, 2016; Rusu et al., 2014) представлены результаты верификации модельных расчётов значимых высот волн по данным альтиметрических измерений на акватории Чёрного моря (табл. 2).

Приведённое в работе (Myslenkov, Chernyshova, 2016) сравнение результатов расчётов высот значимых волн по модели SWAN с данными альтиметрических измерений спутников Envisat, Jason-1, -2 (рис. 1) показало, что средняя разница между ними (ME) изменяется в пределах от  $-0,095$  до  $0,029$  м, а стандартное отклонение (SD) — от  $0,372$  до  $0,399$  м, что хорошо согласуется с точностью альтиметрических измерений.

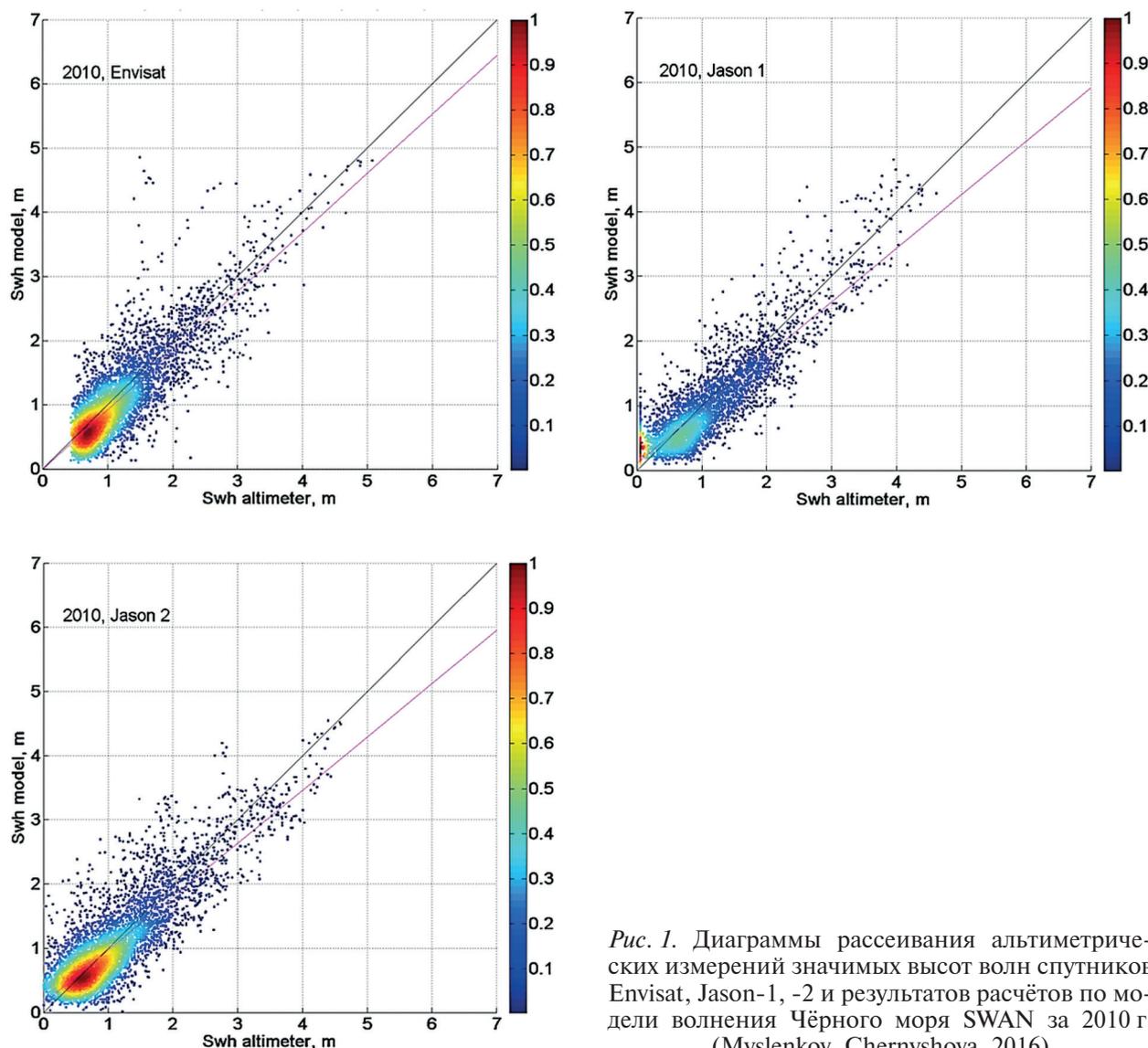


Рис. 1. Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений значимых высот волн спутников Envisat, Jason-1, -2 и результатов расчётов по модели волнения Чёрного моря SWAN за 2010 г. (Myslenkov, Chernyshova, 2016)

Таблица 2. Результаты верификации модельных расчётов значимых высот волн по альтиметрическим измерениям на акватории Чёрного моря

Модель	Спутник	Временной интервал	T, мин	N	Коэффициенты линии регрессии		ME, м	SD, м	RMSE, м	SI	R	Источник
					b	a						
VAGBULH1	ERS-2	июль 1996 г. – июль 1996 г.		13 289			-0,19	0,63			0,873	(Kortcheva et al., 2000)
SWAN	Envisat	январь 2010 г. – декабрь 2011 г.	10–15				-0,095		0,387	0,334	0,834	(Мысленков и др., 2017; Myslenkov, Chernyshova, 2016)
	-0,061						0,372		0,363	0,880		
	0,029						0,399		0,443	0,851		
SWAN	TOPEX/Poseidon	январь 2002 г. – апрель 2002 г.	10	4 009			0,02		0,400	0,380	0,780	(Rusu et al., 2014)
	ERS-2			5 348			-0,01		0,360	0,360	0,780	
	Jason-1			3 665			0,390		0,360	0,750		
	GFO			4 353			0,390		0,320	0,770		
SWAN	Jason-2	январь 2012 г. – декабрь 2015 г.		63 315			-0,21	0,32	0,390	0,360	0,900	(Pattner и др., 2017)
WAM	Jason-1	январь 2002 г. – декабрь 2013 г.	30	209 615			0,0325		0,170	0,174	0,968	(Ciliberti et al., 2021)
	Jason-2	январь 2008 г. – декабрь 2017 г.		147 081			-0,00618		0,236	0,234	0,934	
	Jason-3			52 222			0,263		0,256	0,916		
	Jason-1, -2, -3			408 918			0,209		0,213	0,947		

Примечание: ERS — *англ.* European Remote Sensing; Envisat — *англ.* Environmental Satellite; TOPEX/Poseidon — *англ.* Topography Experiment/Poseidon; GFO — *англ.* Geodetic Satellite Follow-On; T — временной интервал между альтиметрическими измерениями и результатами модельных расчётов (мин); N — число измерений

Наименьшее значение коэффициента корреляции из трёх рассматриваемых спутников — 0,834 (спутник Envisat, см. *табл. 2*). Это объясняется тем, что никаких критериев отбора на альтиметрические измерения значимых высот волн не накладывалось или, по крайней мере, никакой информации об этом в данной и других работах не содержится.

В работе (Rusu et al., 2014) для сопоставления значений значимых высоты волн, рассчитанных также по модели SWAN, использовались данные измерений спутников TOPEX/Poseidon, ERS-2, Jason-1 и GFO. Среднее отклонение разницы измерений (ME) и стандартное отклонение (SD) для спутника Jason-1 отличаются, и коэффициент корреляции ( $R$ ) ниже. Это объясняется использованием различных атмосферных форсингов, а также разными временными интервалами сравнения (см. *табл. 2*). Сравнение результатов расчётов также по модели SWAN с данными спутника Jason-2 (Ратнер и др., 2017) показало более высокое значение коэффициента корреляции ( $R$ ), чем в работах (Мысленков и др., 2017; Myslenkov, Chernyshova, 2016): 0,9 и 0,851 соответственно. В данном случае интервал сравнения был в два раза больше: четыре и два года соответственно (см. *табл. 2*).

Сравнение результатов расчётов по модели VAGBULH1 с данными альтиметрических измерений спутника ERS-2 за июль 1996 г. показало, что в среднем результаты расчётов на 0,19 м ниже. Стандартное отклонение (SD) между значимыми высотами волн составило 0,63 м (см. *табл. 2*). Это хорошо согласуется с результатами калибровки по данным волномерных буёв (0,56 м) (Guillaume, 1990).

В целом можно констатировать, что результаты модельных расчётов режима волнения на акватории Чёрного моря хорошо согласуются с альтиметрическими измерениями. Этот факт позволяет поставить обратную задачу и провести по данным модельных расчётов калибровку данных SWH тех спутников, которые не были задействованы в калибровке моделей.

### **Калибровка значимых высот волн по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13**

Для калибровки значимых высот волн по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13 в качестве модельных расчётов был выбран массив реанализа волнового поля BLKSEA\_MULTITYEAR\_WAV\_007\_006 с сайта Службы мониторинга морской среды «Коперник» (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS) (<https://marine.copernicus.eu>). Волновой реанализ представляет собой результаты расчётов по модели WAM с пространственным разрешением  $\sim 3$  км ( $1/27^\circ$  по широте,  $1/36^\circ$  по долготе) начиная с 1973 г. по настоящее время. В качестве атмосферного форсинга используется реанализ атмосферы ERA-5 ECMWF (Ciliberti et al., 2021).

Валидация результатов волнового реанализа проводилась по данным альтиметрических измерений спутников Jason-1, -2, -3 за период 2002–2018 гг. Результаты этого сравнения приведены на *рис. 2* (см. с. 254) и *табл. 2*. Коэффициент корреляции ( $R$ ) между данными SWH спутников Jason-1, -2, -3 и результатами волнового реанализа BLKSEA\_MULTITYEAR\_WAV\_007\_006 изменялся в пределах от 0,916 до 0,968. Анализ вдоль трековых данных также показывает хорошее соответствие между результатами модельных расчётов и альтиметрическими измерениями.

Это позволяет провести калибровку данных альтиметрических измерений значимых высот волн спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13 по данным волнового реанализа BLKSEA\_MULTITYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021) с достаточно высокой точностью.

### **Отбор данных альтиметрических измерений «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13**

Для калибровки первоначально были проведены отбор и сглаживание данных альтиметрических измерений значимых высот волн (временной интервал использованных данных указан в *табл. 3*) по следующим критериям:

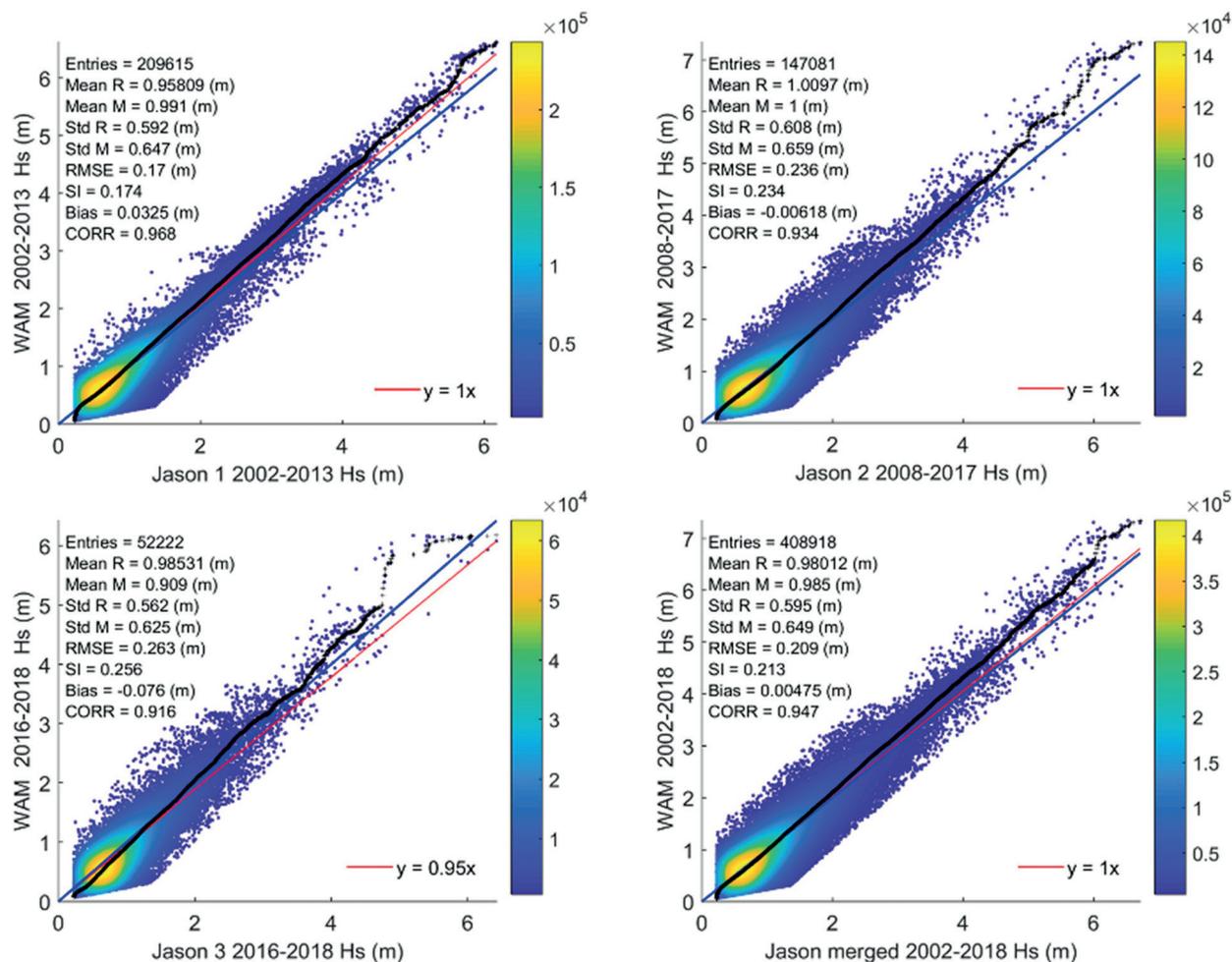


Рис. 2. Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений значимых высот волн и результатов модельных расчётов реанализа волнового поля Чёрного моря BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (модель WAM) для спутников: Jason-1 (2002–2013); Jason-2 (2008–2017); Jason-3 (2016–2018); Jason-1, -2, -3 (2002–2018) (Ciliberti et al., 2021)

1. Использовались данные односекундного осреднения, которые формируются на основе 0,1- или 0,05-секундных данных.
2. Отбрасывались данные в случае проведения измерений над сушей и льдом с использованием соответствующего флага в исходных данных. Дополнительно применялась маска «вода – суша», построенная по цифровой модели рельефа ETOPO1 (англ. Earth topography 1 arc minute) с учётом параметров модели волнения, которая использовалась при создании волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021).
3. Данные измерений на расстоянии менее 10 км от береговой линии не рассматривались.
4. Для альтиметров, работающих на двух частотах  $F_1$  и  $F_2$ , отбраковывались данные, не удовлетворяющие условию  $|swh_{F_1} - swh_{F_2}| < 1$  м.
5. Значимые высоты волн, отвечающие условию  $swh < 0,2$  м, исключались.
6. Данные альтиметрических измерений отбраковывались, если  $|swh - \overline{swh}| / \sigma_{swh} > 2$ , где  $swh$  — среднее значение значимых высот волн на участке трека, который отобран для калибровки;  $\sigma_{swh}$  — среднеквадратичное отклонение значимых высот волн на этом же интервале осреднения.
7. При наличии существенных выбросов в ряде измерений вдоль трека данные со всего трека отбрасывались, если  $\sigma_{swh} / swh > 0,5$ .

8. Проводилось сглаживание данных вдоль трека фильтром Гаусса:

$$swh(i) = \sum_{l=-n}^n swh(i-l) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{l^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $l = 1$  — радиус размывания и  $\sigma = 2,0$  — стандартное отклонение распределения Гаусса.

В точке проведения альтиметрических измерений ближайшие по времени данные модельных расчётов интерполировались методом билинейной интерполяции. После этого выполнялось прямое сравнение альтиметрических измерений и результатов модельных расчётов.

Таблица 3. Результаты калибровки альтиметрических измерений значимых высот волн по результатам волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021)

Спутник	Временной интервал	Число измерений	Коэффициенты линии регрессии		ME, м	SD, м	RMSE, м	SI	R	R <sup>2</sup>
			b	a						
GEOSAT (фаза А)	март 1985 г. — сентябрь 1986 г.	7 444	0,071	0,918	0,009	0,224	0,224	0,230	0,915	0,822
GEOSAT (фаза В)	ноябрь 1986 г. — декабрь 1989 г.	13 413	0,052	0,938	0,013	0,231	0,231	0,224	0,920	0,886
ERS-1 (фаза А)	август 1991 г. — декабрь 1991 г.	2 883	0,009	0,984	0,006	0,148	0,148	0,161	0,966	0,991
ERS-1 (фаза В)	декабрь 1992 г. — март 1992 г.	1 899	0,004	0,995	0,002	0,219	0,219	0,186	0,943	0,988
ERS-1 (фаза С)	апрель 1992 г. — декабрь 1993 г.	12 841	0,018	0,976	0,007	0,166	0,167	0,163	0,962	0,971
ERS-1 (фаза D)	декабрь 1993 г. — апрель 1994 г.	878	-0,024	1,029	-0,003	0,173	0,173	0,184	0,943	0,998
ERS-1 (фаза E)	апрель 1994 г. — сентябрь 1994 г.	1 711	0,019	0,974	0,000	0,127	0,127	0,169	0,950	0,998
ERS-1 (фаза F)	сентябрь 1994 г. — март 1995 г.	1 659	0,016	0,983	0,001	0,147	0,147	0,143	0,966	0,997
ERS-1 (фаза G)	март 1995 г. — июнь 1996 г.	9 403	0,021	0,975	0,004	0,176	0,177	0,179	0,951	0,982
TOPEX (фаза А)	сентябрь 1992 г. — август 2002 г.	119 344	0,025	0,964	0,007	0,182	0,182	0,202	0,943	0,919
TOPEX (фаза N)	сентябрь 2002 г. — октябрь 2005 г.	1 240	0,059	0,912	-0,002	0,143	0,143	0,219	0,887	1,000
TOPEX (фаза В)	август 2002 г. — сентябрь 2002 г.	37 754	0,029	0,959	0,007	0,194	0,194	0,222	0,936	0,976
Poseidon (фаза А)	октябрь 1992 г. — июль 2002 г.	9 615	0,029	0,953	0,010	0,164	0,164	0,198	0,939	0,996
ERS-2 (фаза А)	апрель 1995 — июль 2011 г.	91 516	0,020	0,974	0,004	0,175	0,175	0,191	0,950	0,968
GFO-1 (фаза А)	январь 2000 г. — сентябрь 2008 г.	78 380	0,063	0,921	0,012	0,255	0,255	0,270	0,889	0,954
Jason-1 (фаза А)	январь 2002 г. — январь 2009 г.	88 923	0,033	0,953	0,009	0,188	0,188	0,211	0,935	0,976
Jason-1 (фаза В)	февраль 2009 г. — март 2012 г.	76 630	0,032	0,955	0,008	0,190	0,190	0,215	0,933	0,982
Jason-1 (фаза С)	май 2012 г. — июнь 2013 г.	13 672	0,033	0,955	0,006	0,189	0,189	0,216	0,928	0,997
Envisat (фаза В)	май 2002 г. — октябрь 2010 г.	68 740	0,023	0,970	0,006	0,175	0,175	0,186	0,952	0,988

Спутник	Временной интервал	Число измерений	Коэффициенты линии регрессии		ME, м	SD, м	RMSE, м	SI	R	R <sup>2</sup>
			<i>b</i>	<i>a</i>						
Envisat (фаза С)	октябрь 2010 г. – апрель 2012 г.	6 808	0,008	0,990	0,001	0,164	0,164	0,176	0,955	0,999
Jason-2 (фаза А)	июль 2008 г. – октябрь 2016 г.	54 471	0,026	0,966	0,005	0,180	0,180	0,203	0,942	0,991
Jason-2 (фаза В)	октябрь 2016 г. – май 2017 г.	4 295	0,027	0,969	0,007	0,201	0,201	0,187	0,940	0,999
CryoSat-2 (фаза А)	июль 2010 г. – декабрь 2021 г.	3 791	0,034	0,948	0,009	0,178	0,178	0,221	0,946	0,999
SARAL (фаза А)	март 2013 г. – июль 2016 г.	21 093	0,029	0,960	0,005	0,218	0,218	0,260	0,913	0,995
SARAL (фаза В)	июль 2016 г. – декабрь 2021 г.	37 082	0,030	0,958	0,006	0,217	0,217	0,252	0,913	0,993
Jason-3 (фаза А)	февраль 2016 г. – декабрь 2021 г.	43 684	0,017	0,977	0,003	0,167	0,167	0,189	0,950	0,995
«ГЕО-ИК-2» № 12	январь 2018 г. – июнь 2021 г.	26 113	0,030	0,960	0,003	0,175	0,175	0,213	0,943	0,997
«ГЕО-ИК-2» № 13	январь 2019 г. – декабрь 2021 г.	20 737	0,024	0,967	0,004	0,179	0,179	0,215	0,940	0,999

Примечание: SARAL — *англ.* Satellite with ARGos (*англ.* Advanced Research and Global Observation Satellite) and ALtika (высотомер в Ка-диапазоне).

### Результаты калибровки альтиметрических измерений по данным волнового реанализа

Для того чтобы убедиться в хорошем соответствии значимых высот волн реанализа волнового поля BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021) альтиметрическим измерениям, было проведено сравнение данных всех спутников. Результаты такого статистического анализа представлены в табл. 3. Из неё хорошо видно, что для спутника Jason-3 и спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13, имеющих на борту близкие по своим характеристикам альтиметры, коэффициенты корреляции достаточно близки: 0,950, 0,943 и 0,940 соответственно.

Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений значимых высот волн спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13 и данных реанализа волнового поля BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021) показывают хорошее соответствие измеренных и рассчитанных данных (рис. 3, см. с. 257).

### Результаты калибровки альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и 13 вдоль трека

Согласно волновому реанализу BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021), 19 октября 2021 г. на 04:00 МСК (московское время), когда проводилось сравнение SWH, рассчитанных по альтиметрическим измерениям спутника «ГЕО-ИК-2» № 13, с данным измерений ГНСС-буя (*англ.* GNSS — Global Navigation Satellite Systems), на акватории Чёрного моря наблюдалась синоптическая картина, показанная на рис. 4 (см. с. 258). Значимые высоты волн более 0,3 м фиксировались вдоль всего российского побережья Кавказа и побережья Турции, за исключением района от Синопа до м. Бафра, где наблюдался сильный шторм со значимыми высотами волн более 0,9 м.

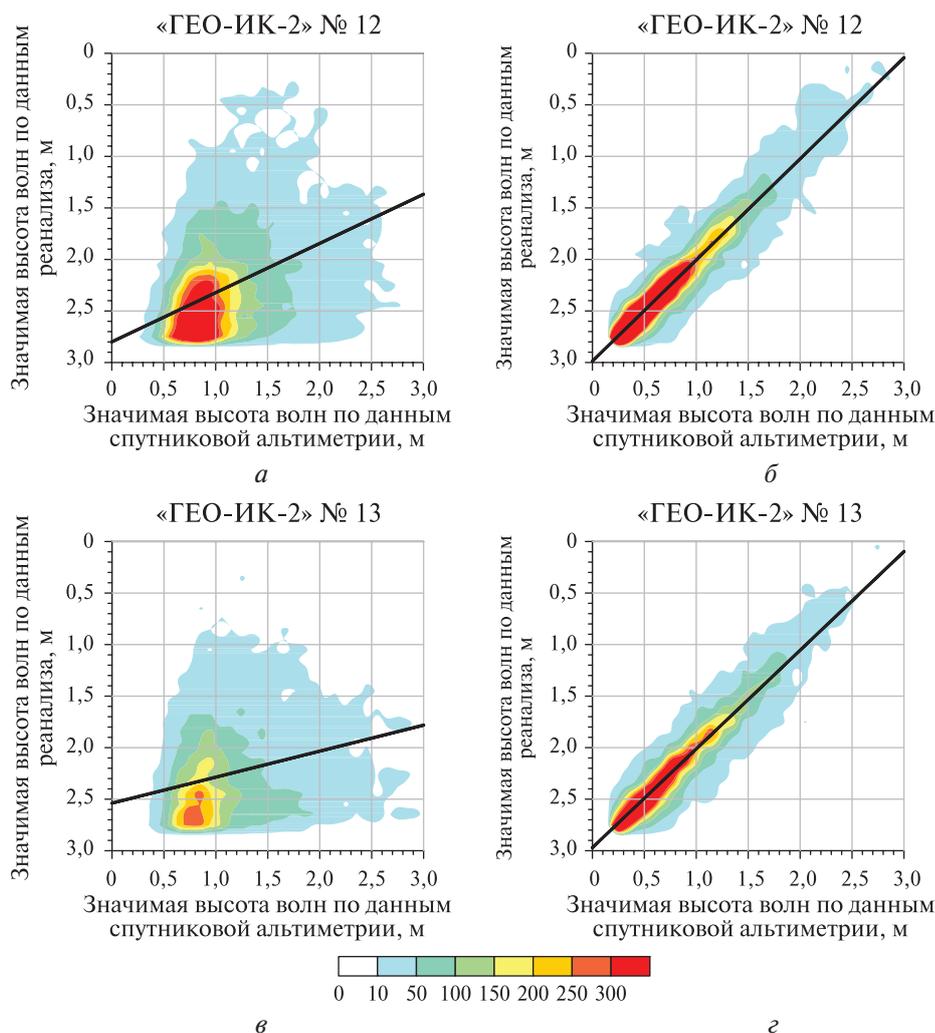


Рис. 3. Диаграммы рассеивания данных реанализа волнового поля Чёрного моря BLKSEA\_MULTI-YEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021) и альтиметрических измерений значимых высот волн спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 (за январь 2018 г. – июнь 2021 г.) и № 13 (за январь 2019 г. – декабрь 2022 г.) до (а, в) и после (б, г) отбраковки данных ДДЗ

Анализ изменчивости значимых высот волн, измеренных альтиметром спутника «ГЕО-ИК-2» № 13 вдоль трека 19 октября 2021 г. с 04:18:08 до 04:19:12 МСК (рис. 5, см. с. 258), показывает, что в открытом море разница между данными ДДЗ и модельными расчётами в среднем составляет  $0,06 \pm 0,12$  м для несглаженных данных и  $0,05 \pm 0,07$  м — для сглаженных. У турецкого побережья данные альтиметрических измерений в области, где значимые высоты волн составляли более 1,1 м, отбрасывались на основании критерия отбора.

Можно констатировать, что данные альтиметрических измерений значимых высот волн и результаты модельных расчётов хорошо согласуются между собой. Так, по альтиметрическим измерениям в точке, ближайшей к положению ГНСС-буя, значимая высота волны составила 0,52 м, а по данным модельных расчётов — 0,60 м.

### Результаты калибровки альтиметрических измерений по данным измерений ГНСС-буя

Калибровку значимых высот волн можно провести также по анализу данных морского буя с ГНСС-приёмником, который 19 октября 2021 г. на 04:00 МСК располагался вблизи одного из треков альтиметрических измерений спутника «ГЕО-ИК-2» № 13 в районе  $37^{\circ} 55'$  в.д. и  $44^{\circ} 20' 59''$  с.ш. (рис. 6, см. с. 259).

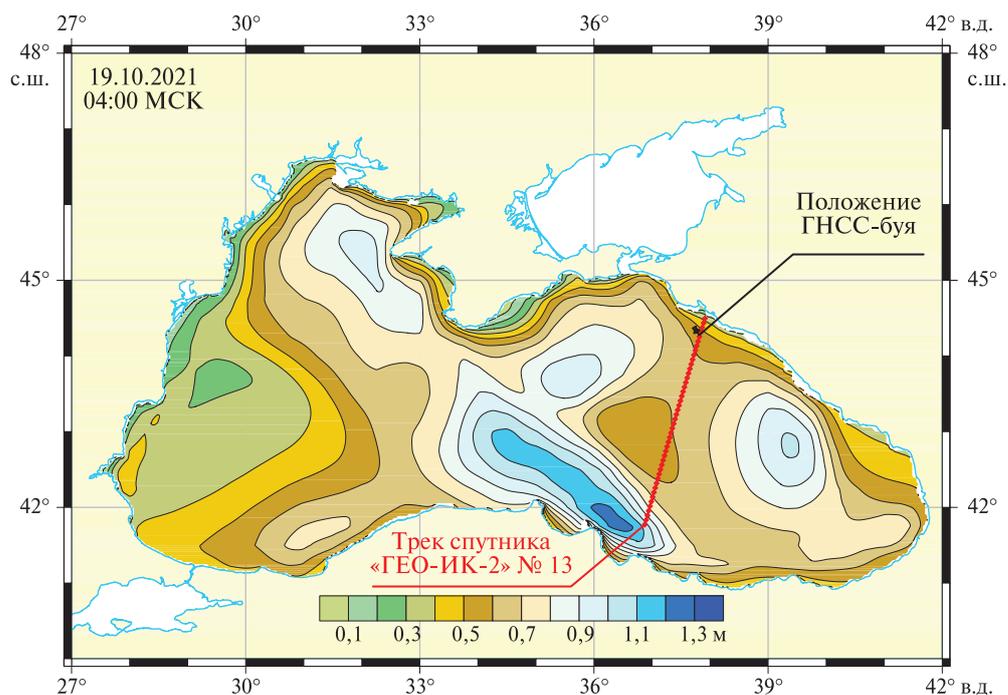


Рис. 4. Карта значимых высот волн, рассчитанных по модели волнового реанализа (Ciliberti et al., 2021) на 19 октября 2021 г., 04:00 МСК. Красными точками показано положение альтиметрических измерений вдоль трека спутника «ГЕО-ИК-2» № 13

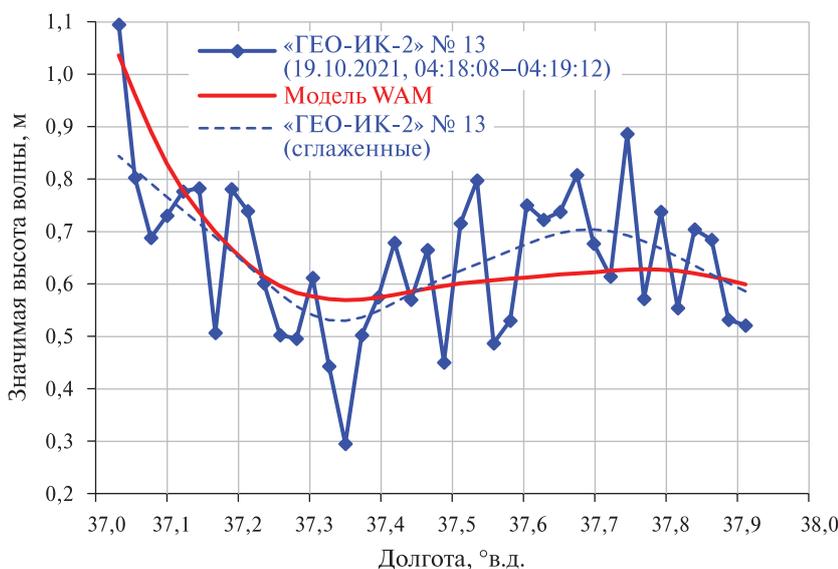


Рис. 5. Изменчивость вдоль трека значимых высот волн, измеренных 19 октября 2021 г. с 04:18:08 до 04:19:12 МСК альтиметром спутника «ГЕО-ИК-2» № 13 без сглаживания (сплошная синяя линия с маркерами), со сглаживанием (штриховая синяя линия) и рассчитанных по модели WAM волнового реанализа BLKSEA\_MULTYEAR\_WAV\_007\_006 (красная линия) (Ciliberti et al., 2021)

Для расчёта значимых высот волн по данным буя вначале по показаниям ГНСС-буя определялась высота волны как разница между ближайшими локальными максимумом и минимумом (рис. 7, см. с. 259). Далее полученные высоты волн сортировались в порядке возрастания, и по следующей формуле определялась значимая высота волны (Давидан и др., 1974):

$$swh = h_{1/3} = \frac{1}{(1/3)N} \sum_{i=(2/3)N}^N h_i.$$



Рис. 6. Проведение *in situ* ГНСС-измерений в акватории Чёрного моря 19 октября 2021 г.

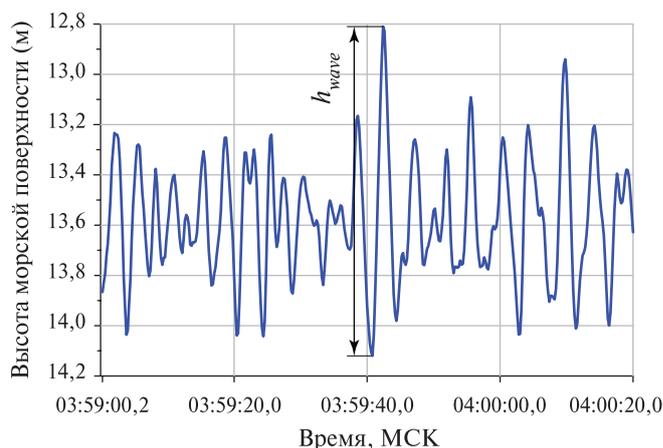


Рис. 7. Временная изменчивость показаний ГНСС-буя за первые 80 с после начала записи измерений

Таким образом, по измерениям ГНСС-буя за время 47 мин (41 000 измерений) было вычислено 1098 высот волн. Точность подобных расчётов составляет 10 % по причине изменения положения вертикальной оси буя (Грязин, Бердюгин, 2006). Значимая высота волны составила  $sw_h = 0,58$  м, что хорошо согласуется с альтиметрическими измерениями (0,52 м) и данными волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (0,60 м), полученными интерполяцией значимой высоты волн в точку положения ГНСС-буя. С использованием уравнения линейной регрессии зависимости для спутника «ГЕО-ИК-2» № 13 (см. табл. 3) уточнённая значимая высота волны из данных волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (Ciliberti et al., 2021) составляет 0,58 м.

Таким образом, имеется три значения значимой высоты волны: 0,52 м — по данным альтиметрических измерений с точностью 10 %; 0,56 м — из данных волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (модель WAM) с учётом линейной регрессии; 0,58 м — по результатам измерений высот морской поверхности с помощью ГНСС-буя.

## Заключение

Предложенная в работе схема верификации значимых высот волн, полученных из спутниковых альтиметрических измерений, по модельным данным волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 (модель WAM) показала свою работоспособность на основе анализа полученных статистических оценок для 12 зарубежных и двух российских радиовысотометров. Хорошие, в статистическом смысле, коэффициенты корреляции (выше 0,9) практически для всех рассмотренных спутников позволили авторам сделать вывод о допущении использования модели волнового реанализа для вычисления «эталонных» значений SWH с целью калибровки значимых высот волн, получаемых из обработки отражённых сигналов спутников «ГЕО-ИК-2». Для подтверждения предложенного метода калибровки были дополнительно выполнены контрольные *in situ* ГНСС-измерения в подспутниковой точке трека «ГЕО-ИК-2» № 13, обработка которых позволила определить реальную величину SWH. Результаты расчёта значимой высоты волны по модели волнового реанализа BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 с учётом линейной регрессии для спутника «ГЕО-ИК-2» № 13 прекрасно согласуются с результатами обработки ГНСС-измерений, а отличие результатов альтиметрических измерений не превышает 10 %, что соответствует заявленной ранее точности.

Положительные результаты, полученные в данной работе, дают авторам уверенность в необходимости продолжения начатых исследований после развёртывания в 2023 г. полноценного полигона калибровки космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2» на акватории Чёрного моря, в составе которого планируется использовать несколько морских ГНСС-буёв.

Проведённое в работе исследование открывает также перспективу использования измерений системы «ГЕО-ИК-2» не только для решения возложенных на неё геодезических задач, но и для океанографических исследований, например для изучения волнового режима Мирового океана.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-5-80021 БРИКС\_Т «Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС» и в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утверждённого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

## Литература

1. Грязин Д. Г., Бердюгин А. В. Волномерные буи в ряду современной волномерной аппаратуры // Научно-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. 2006. № 31. С. 233–240.
2. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветер и волны в океанах и морях: справ. данные. Л.: Транспорт, 1974. 359 с.
3. Зеленько А. А., Струков Б. С., Реснянский Ю. Д., Мартынов С. Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Тр. Гос. океаногр. ин-та. 2014. № 215. С. 90–101.
4. 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.
5. Мысленков С. А., Столярова Е. В. Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения // Тр. Гидрометеорол. научно-исследоват. центра Российской Федерации. 2016. № 362. С. 55–65.
6. Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорол. прогнозов. 2017. № 44. С. 126–135.
7. Ратнер Ю. Б., Фомин В. В., Иванчик А. М., Иванчик М. В. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофиз. журн. 2017. № 5. С. 56–66. DOI: 10.22449/0233-7584-2017-5-56-66.
8. Akpinar A., van Vledder G. P., Kömürcü M. İ., Özger M. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea // Continental Shelf Research. 2012. V. 50–51. P. 80–99. DOI: 10.1016/j.csr.2012.09.012.
9. Arkhipkin V. S., Gippius F. N., Koltermann K. P., Surkova G. V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. V. 14. No. 11. P. 2883–2897. DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014.
10. Caires S., Sterl A. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation // J. Geophysical Research: Oceans. 2003. V. 108. No. C3. Art. No. 3098. DOI: 10.1029/2002JC001491.
11. Carter D. J. T., Challenor P. G., Srokosz M. A. An assessment of Geosat wave height and wind speed measurements // J. Geophysical Research: Oceans. 1992. V. 97. No. C7. P. 11383–11392. DOI: 10.1029/92JC00465.
12. Cherneva Z., Andreeva N., Pilar P., Valchev N., Petrova P., Soares C. G. Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea // Coastal Engineering. 2008. V. 55. No. 11. P. 881–893. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.02.028.
13. Ciliberti S. A., Grégoire M., Staneva J., Palazov A., Coppini G., Lecci R., Peneva E., Matreata M., Marinova V., Masina S., Pinarci N., Jansen E., Lima L., Aydoğdu A., Creti S., Stefanizzi L., Azevedo D., Causio S., Vandenbulcke L., Capet A., Meulders C., Ivanov E., Behrens A., Ricker M., Gayer G., Palermo F., Ilicak M., Gunduz M., Valcheva N., Agostini P. Monitoring and Forecasting the Ocean State and Biogeochemical Processes in the Black Sea: Recent Developments in the Copernicus Marine Service // J. Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. No. 10. Art. No. 1146. DOI: 10.3390/jmse9101146.
14. Cotton P. D., Carter D. J. T. Cross calibration of TOPEX, ERS-I, and GEOSAT wave heights // J. Geophysical Research: Oceans. 1994. V. 99. No. C12. P. 25025–25033. DOI: 10.1029/94JC02131.
15. Divinsky B. V., Kosyan R. D. Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research. 2017. V. 136. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.008.

16. *Dobson E., Monaldo F., Goldhirsh J., Wilkerson J.* Validation of Geosat altimeter-derived wind speeds and significant wave heights using buoy data // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1987. V. 92. No. C10. P. 10719–10731. DOI: 10.1029/JC092iC10p10719.
17. *Ebuchi N., Kawamura H.* Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan // *J. Oceanography*. 1994. V. 50. No. 4. P. 479–487. DOI: 10.1007/BF02234969.
18. *Fedor L.S., Brown G.S.* Waveheight and wind speed measurements from the SEASAT radar altimeter // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1982. V. 87. No. C5. P. 3254–3260. DOI: 10.1029/JC087iC05p03254.
19. *Gower J.F.R.* Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/Poseidon and moored buoys off the west coast of Canada // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1996. V. 101. No. C2. P. 3817–3829. DOI: 10.1029/95jc03281.
20. *Guillaume A.* Statistical tests for the comparison of surface gravity wave spectra with application to model validation // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 1990. V. 7. No. 4. P. 551–567. DOI: 10.1175/1520-0426(1990)007<0551:STFTCO>2.0.CO;2.
21. *Janssen P.A.E.M., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J.R.* Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. V. 24. No. 9. P. 1665–1677. DOI: 10.1175/JTECH2069.1.
22. *Kortcheva A., Kortchev G., Lefevre J.M.* Operational numerical wind-wave model for the Black Sea // *Mediterranean Marine Science*. 2000. V. 1. No. 1. P. 65–70. DOI: 10.12681/mms.11.
23. *Myslenkov S., Chernyshova A.* Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // *Russian J. Earth Sciences*. 2016. V. 16. No. 5. Art. No. ES5002. 12 p. DOI: 10.2205/2016ES000579.
24. *Queffelec P.* Long-term validation of wave height measurements from altimeters // *Marine Geodesy*. 2004. V. 27. No. 3–4. P. 495–510. DOI: 10.1080/01490410490883478.
25. *Ray R.D., Beckley B.D.* Simultaneous ocean wave measurements by the Jason and TOPEX satellites, with buoy and model comparisons // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 367–382. DOI: 10.1080/714044527.
26. *Ribal A., Young I.R.* 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations // *Scientific Data*. 2019. V. 6. No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1038/s41597-019-0083-9.
27. *Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C.* Wind and wave modelling in the Black Sea // *J. Operational Oceanography*. 2014. V. 7. No. 1. P. 5–20. DOI: 10.1080/1755876X.2014.11020149.
28. *Sepulveda H.H., Queffelec P., Ardhuin F.* Assessment of SARAL/AltiKa wave height measurements relative to buoy, Jason-2, and Cryosat-2 data // *Marine Geodesy*. 2015. V. 38. No. sup1. P. 449–465. DOI: 10.1080/01490419.2014.1000470.
29. *Shaeb K.H.B., Anand A., Joshi A.K., Bhandari S.M.* Comparison of near coastal significant wave height measurements from SARAL/AltiKa with wave rider buoys in the Indian region // *Marine Geodesy*. 2015. V. 38. No. sup1. P. 422–436. DOI: 10.1080/01490419.2015.1029655.
30. SWAN scientific and technical documentation. SWAN Cycle III Version 41.31 AB. Delft: Delft Univ. Technology, 2010. 144 p.
31. The WAMDI Group. The WAM model — A third generation ocean wave prediction model // *J. Physical Oceanography*. 1988. V. 18. No. 12. P. 1775–1810. DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.
32. The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG). User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 5.16. Tech. Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 2016. 361 p. <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf>.
33. *Yang J., Zhang J.* Validation of Sentinel-3A/3B satellite altimetry wave heights with buoy and Jason-3 data // *Sensors*. 2019. V. 19. No. 13. Art. No. 2914. DOI: 10.3390/s19132914.
34. *Ye X., Lin M., Xu Y.* Validation of Chinese HY-2 satellite radar altimeter significant wave height // *Acta Oceanologica Sinica*. 2015. V. 34. No. 5. P. 60–67. DOI: 10.1007/s13131-015-0667-y.
35. *Young I.R.* An intercomparison of GEOSAT, TOPEX and ERS1 measurements of wind speed and wave height // *Ocean Engineering*. 1998. V. 26. No. 1. P. 67–81. DOI: 10.1016/S0029-8018(97)10016-6.
36. *Zieger S., Vinoth J., Young I.R.* Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. V. 26. No. 12. P. 2549–2564. DOI: 10.1175/2009JTECHA1303.1.

## Calibration of significant waves height altimetric measurements by wave reanalysis

S. A. Lebedev<sup>1,2,3</sup>, I. V. Gusev<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> *Geophysical Center RAS, Moscow 119296, Russia*  
E-mails: lebedev@wdcb.ru, giv-wr@yandex.ru

<sup>2</sup> *National Research University of Electronic Technology*  
Zelenograd 124498, Moscow, Russia

<sup>3</sup> *Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia*

<sup>4</sup> *AO Central Research Institute for Mechanical Building*  
Korolev 141070, Moscow Region, Russia

At present, a technology has been developed for calibrating data from altimetry measurements of the sea surface height both at stationary and temporary calibration sites, equipped with modern technology for *in situ* sea level measurements. It is currently difficult to calibrate significant wave height (SWH) obtained from satellite altimetry data at the sea surface height measurement calibration sites, since most of them are located near the coastline. For this reason, SWH calibration is carried out on fixed wave buoys located in the open ocean. In the Black Sea, where the calibration site for altimetry measurements of the Russian space geodetic system Geo-ИК-2 is located, it is difficult to calibrate SWH, since there are no measurements by stationary wave-gauging buoys in its water area, and episodic *in situ* measurements do not allow high-quality calibration. For this reason, in this paper, we propose a method for calibrating SWH based on wave field reanalysis data. The SWH calculated using the BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006 model was compared with the results of altimetry measurements of 14 satellites for the time interval 1985–2021. The correlation analysis of the results showed a good agreement between the remote sensing data and model calculations, which made it possible to calibrate the altimetry measurements of the Russian Geo-ИК-2 satellites No. 12 and No. 13 according to wave reanalysis data. For them, the correlation coefficient was 0.943 and 0.940, respectively, and the determination coefficient was 0.997 and 0.999. Measurements of a sea buoy with a GNSS receiver, which was located on October 19, 2021, near one of the altimetry tracks of the Geo-ИК-2 satellite No. 13, showed good agreement between SWH *in situ* measurements (0.576 m) and altimetry measurements (0.521 m) and model calculations (0.599 m). Thus, it is shown that SWH calculated from altimetry measurements correspond to a measurement accuracy of less than 10 %.

**Keywords:** satellite altimetry, calibration range, space geodetic system, significant wave height, wave reanalysis

Accepted: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-248-264

## References

1. Gryazin D. G., Berdyugin A. V., Wallpower buoys among modern wave equipment, *Scientific and Technical J. Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, No. 31, pp. 233–240 (in Russian).
2. Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A., *Veter i volny v okeanakh i moryakh* (Wind and waves in the oceans and seas), Leningrad: Transport, 1974, 359 p. (in Russian).
3. Zelenko A. A., Strukov B. S., Resnyanskii Yu. D., Martynov S. L., The forecast system of wind waves in the oceans and seas of Russia, *Proc. State Oceanographic Institute*, 2014, Vol. 215, pp. 90–101 (in Russian).
4. 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.
5. Myslenkov S. A., Chernyshova E. V., The forecast of wind excitement in the Black Sea using the prognostic winds of the wind of various spatial resolution, *Proc. Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2016, No. 362, pp. 55–65 (in Russian).
6. Myslenkov S. A., Chernyshova E. V., Arkhipkin V. S., The system of prediction of wind excitement in the Black Sea with details in the shelf zones, *Results of Testing New and Improved Technologies, Models and Methods of Hydrometeorological Forecasts*, 2017, No. 44, pp. 126–135 (in Russian).

7. Ratner Yu. B., Fomin V. V., Ivanchik A. M., Ivanchik M. V., System of the wind wave operational forecast by the Black Sea Marine Forecast Center, *Physical Oceanography*, 2017, No. 5, pp. 51–59, DOI: 10.22449/1573-160X-2017-5-51-59.
8. Akpınar A., van Vledder G. P., Kömürçü M. İ., Özger M., Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea, *Continental Shelf Research*, 2012, Vol. 50–51, pp. 80–99, DOI: 10.1016/j.csr.2012.09.012.
9. Arkhipkin V. S., Gippius F. N., Koltermann K. P., Surkova G. V., Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, Vol. 14, No. 11, pp. 2883–2897, DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014.
10. Caires S., Sterl A., Validation of ocean wind and wave data using triple collocation, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, Vol. 108, No. C3, Art. No. 3098, DOI: 10.1029/2002JC001491.
11. Carter D. J. T., Challenor P. G., Srokosz M. A., An assessment of Geosat wave height and wind speed measurements, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1992, Vol. 97, No. C7, pp. 11383–11392, DOI: 10.1029/92JC00465.
12. Cherneva Z., Andreeva N., Pilar P., Valchev N., Petrova P., Soares C. G., Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea, *Coastal Engineering*, 2008, Vol. 55, No. 11, pp. 881–893, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.02.028.
13. Ciliberti S. A., Grégoire M., Staneva J., Palazov A., Coppini G., Lecci R., Peneva E., Matreata M., Marinova V., Masina S., Pinardi N., Jansen E., Lima L., Aydoğdu A., Creti' S., Stefanizzi L., Azevedo D., Causio S., Vandenbulcke L., Capet A., Meulders C., Ivanov E., Behrens A., Ricker M., Gayer G., Palermo F., Ilicak M., Gunduz M., Valcheva N., Agostini P., Monitoring and Forecasting the Ocean State and Biogeochemical Processes in the Black Sea: Recent Developments in the Copernicus Marine Service, *J. Marine Science and Engineering*, 2021, Vol. 9, No. 10, Art. No. 1146, DOI: 10.3390/jmse9101146.
14. Cotton P. D., Carter D. J. T., Cross calibration of TOPEX, ERS-I, and GEOSAT wave heights, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 25025–25033, DOI: 10.1029/94JC02131.
15. Divinsky B. V., Kosyan R. D., Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years, *Continental Shelf Research*, 2017, Vol. 136, pp. 1–19, DOI: 10.1016/j.csr.2017.01.008.
16. Dobson E., Monaldo F., Goldhirsh J., Wilkerson J., Validation of Geosat altimeter-derived wind speeds and significant wave heights using buoy data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, Vol. 92, No. C10, pp. 10719–10731, DOI: 10.1029/JC092iC10p10719.
17. Ebuchi N., Kawamura H., Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan, *J. Oceanography*, 1994, Vol. 50, No. 4, pp. 479–487, DOI: 10.1007/BF02234969.
18. Fedor L. S., Brown G. S., Waveheight and wind speed measurements from the SEASAT radar altimeter, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1982, Vol. 87, No. C5, pp. 3254–3260, DOI: 10.1029/JC087iC05p03254.
19. Gower J. F. R., Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/Poseidon and moored buoys off the west coast of Canada, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1996, Vol. 101, No. C2, pp. 3817–3829, DOI: 10.1029/95jc03281.
20. Guillaume A., Statistical tests for the comparison of surface gravity wave spectra with application to model validation, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, Vol. 7, No. 4, pp. 551–567, DOI: 10.1175/1520-0426(1990)007<0551:STFTCO>2.0.CO;2.
21. Janssen P. A. E. M., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J. R., Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, Vol. 24, No. 9, pp. 1665–1677, DOI: 10.1175/JTECH2069.1.
22. Kortcheva A., Kortchev G., Lefevre J. M., Operational numerical wind-wave model for the Black Sea, *Mediterranean Marine Science*, 2000, Vol. 1, No. 1, pp. 65–70, DOI: 10.12681/mms.11.
23. Myslenkov S., Chernyshova A., Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements, *Russian J. Earth Sciences*, 2016, Vol. 16, No. 5, Art. No. ES5002. 12 p., DOI: 10.2205/2016ES000579.
24. Queffelec P., Long-term validation of wave height measurements from altimeters, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, No. 3–4, pp. 495–510, DOI: 10.1080/01490410490883478.
25. Ray R. D., Beckley B. D., Simultaneous ocean wave measurements by the Jason and TOPEX satellites, with buoy and model comparisons, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 367–382, DOI: 10.1080/714044527.
26. Ribal A., Young I. R., 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations, *Scientific Data*, 2019, Vol. 6, No. 1, pp. 1–15, DOI: 10.1038/s41597-019-0083-9.
27. Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C., Wind and wave modelling in the Black Sea, *J. Operational Oceanography*, 2014, Vol. 7, No. 1, pp. 5–20, DOI: 10.1080/1755876X.2014.11020149.
28. Sepulveda H. H., Queffelec P., Arduin F., Assessment of SARAL/AltiKa wave height measurements relative to buoy, Jason-2, and Cryosat-2 data, *Marine Geodesy*, 2015, Vol. 38, No. sup1, pp. 449–465, DOI: 10.1080/01490419.2014.1000470.

29. Shaeb K. H. B., Anand A., Joshi A. K., Bhandari S. M., Comparison of near coastal significant wave height measurements from SARAL/AltiKa with wave rider buoys in the Indian region, *Marine Geodesy*, 2015, Vol. 38, No. sup1, pp. 422–436, DOI: 10.1080/01490419.2015.1029655.
30. *SWAN scientific and technical documentation, SWAN Cycle III Version 41.31 AB*, Delft: Delft Univ. Technology, 2010, 144 p.
31. The WAMDI Group, The WAM model A third generation ocean wave prediction model, *J. Physical Oceanography*, 1988, Vol. 18, No. 12, pp. 1775–1810, DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.
32. The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), *User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 5.16, Tech. Note 329*, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 2016, 361 p., available at: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf>.
33. Yang J., Zhang J., Validation of Sentinel-3A/3B satellite altimetry wave heights with buoy and Jason-3 data, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 13, Art. No. 2914, DOI: 10.3390/s19132914.
34. Ye X., Lin M., Xu Y., Validation of Chinese HY-2 satellite radar altimeter significant wave height, *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, Vol. 34, No. 5, pp. 60–67, DOI: 10.1007/s13131-015-0667-y.
35. Young I. R., An intercomparison of GEOSAT, TOPEX and ERS1 measurements of wind speed and wave height, *Ocean Engineering*, 1998, Vol. 26, No. 1, pp. 67–81, DOI: 10.1016/S0029-8018(97)10016-6.
36. Zieger S., Vinoth J., Young I. R., Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, No. 12, pp. 2549–2564, DOI: 10.1175/2009JTECHA1303.1.