

**Сергей А. Лебедев**



*Геофизический Центр РАН*

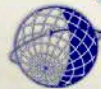


*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*



*Майкопский государственный технологический университет*

**Игорь В. Гусев**



*Геофизический Центр РАН*



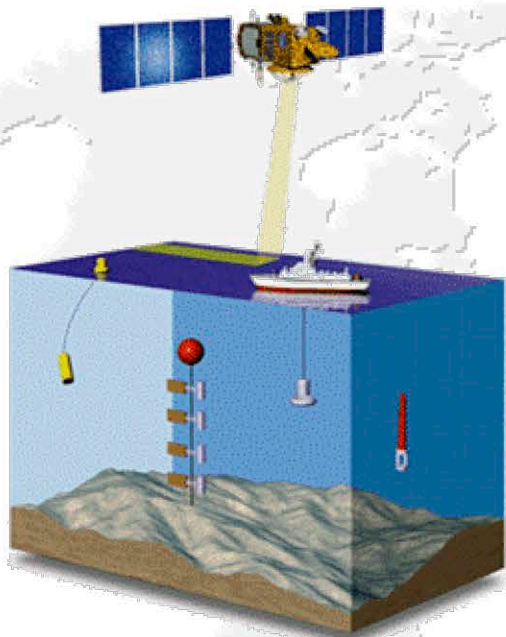
*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения*

# **Калибровка значимых высот волн, рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии, по результатам волнового реанализа**





# Мотивация



Данные спутниковой альтиметрии, как и любые данные дистанционного зондирования нуждаются в калибровке. В настоящее время развита технология калибровки данных альтиметрических измерений высоты морской поверхности как на стационарных, так и временных полигонах, оснащённых современной техникой проведения *in situ* измерений уровня моря. Проведение калибровки значимых высот волн (Significant Wave Height – SWH), полученных из данным спутниковой альтиметрии в результате их обработки различными алгоритмами ретрекинга, в настоящее время на полигонах калибровки измерений высот морской поверхности затруднено, так как в большинстве свое они расположены вблизи береговой линии.

По этой причине калибровка SWH проводится на стационарных волномерных буйах, расположенных в открытом океане. В Черном 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 буйами отсутствуют, а эпизодические *in situ* измерения не позволяют качественно провести калибровку SWH. По этой причине калибровка SWH проводилась по данным реанализа волнового поля BLKSEA\_MULTYEAR\_WAV\_007\_006.





# Моделирование волнового режима Черного моря

В настоящее время существует большое количество различных моделей волнения Черного моря, которые представляют собой адаптацию основных дискретных спектральных моделей.

Среди таких моделей наиболее широкое распространение получили следующие:

- WAM (Wave Model) разработана международной группой ученых WAMDI (Wave Modeling Group) в 1988 г. Применяется в оперативной практике Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF).
- WaveWatch разработана в Национальном центре прогнозирования окружающей среды США (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) и используется для диагноза и прогноза волнения в центре прогнозов Национальной службы погоды США (National Weather Service – NWS);
- SWAN (Simulating Waves Near Shore) создана в Дельфтском технологическом институте (Нидерланды) и предназначена для расчета волн в мелководных прибрежных районах.

# Моделирование волнового режима Черного моря

Основные модели ветрового режима Черного моря.

Модель	Пространственное разрешение	Временной шаг фиксации расчетов, МИН	Атмосферный форсинг	Источник
MIKE 21 SW	нерегулярная сетка	3600	NCEP/NCAR	Divinsky, Kosyan, 2017
SWAN	1,3 км × 1,83 км	30, 60	ERA-Interim	Akpınar et al., 2012
SWAN	5 км × 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 км × 4,5 км	30	SKIRON	Ратнер и др., 2017
VAGBULH1	0,25° × 0,25°	7200	ARPEGE	Kortcheva et al., 2000
WAM	3 км × 3 км	60	ERA5	Ciliberti et al., 2021
WAM Cycle 4	7 км × 7 км	1800	REMO	Cherneva et al., 2008
WaveWatch III	9 км × 9 км	1800	GFS-0,25°; GFS-0,5°	Мысленков, Столярова, 2016
WaveWatch III	10 км × 10 км	1800	ЦЛИАБ; GFS	Зеленько и др., 2014



# Верификация модельных расчетов волнового режима Черного моря

Анализ результатов калибровки SWH выполнялся на основе следующих статистических характеристик разностей между данными спутниковой альтиметрии и измеренными значениями волномерными буями или результатам модельных расчетов:

- средние высоты волн, измеренными значениями волномерными буями или рассчитанные по модели:

$$MH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i,$$

- средние высоты волн, рассчитанные по данным альтиметрических измерений:

$$Mh_{swh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{swh_i},$$

- среднее отклонение разницы измерений (*Mean Estimate – ME* или *bias*):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - h_{swh_i}),$$

- стандартное отклонение (*Standard Deviation – SD*) разницы измерений:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i - h_{swh_i} - ME)^2},$$

# Верификация модельных расчетов волнового режима Черного моря

- среднеквадратичная ошибка (*Root Mean Square Error – RSME*):

$$RMSE = \sqrt{ME^2 + SD^2},$$

- индекс рассеяния или индекс дисперсии (*Scatter Index – SI*):

$$SI = RMSE / Mh_{swh},$$

- коэффициент корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (H_i - MH)(h_{swh_i} - Mh_{swh})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (H_i - MH)^2 (h_{swh_i} - Mh_{swh})^2}},$$

- коэффициенты линейной регрессии:

$$h_{swh\_model} = b + a \cdot h_{swh\_alt},$$

- коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_{swh} - f(h_{swh}))^2}{\sum_{i=1}^N (h_{swh} - \bar{h}_{swh})^2},$$

где  $f(h_{swh})$  – значение SWH, рассчитанной по линии регрессии. В случае двух переменных коэффициент детерминации равен квадрату коэффициента корреляции.



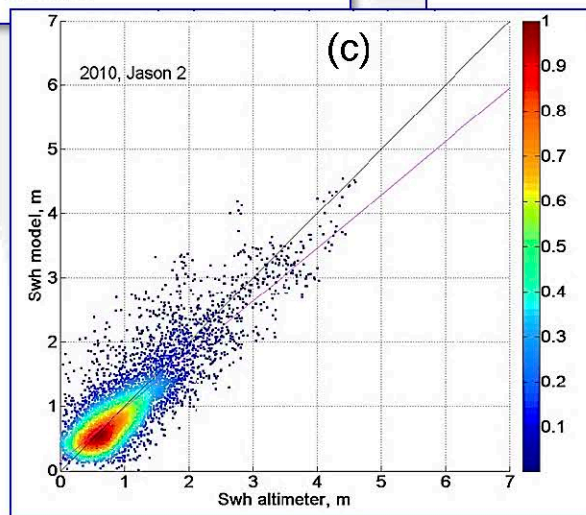
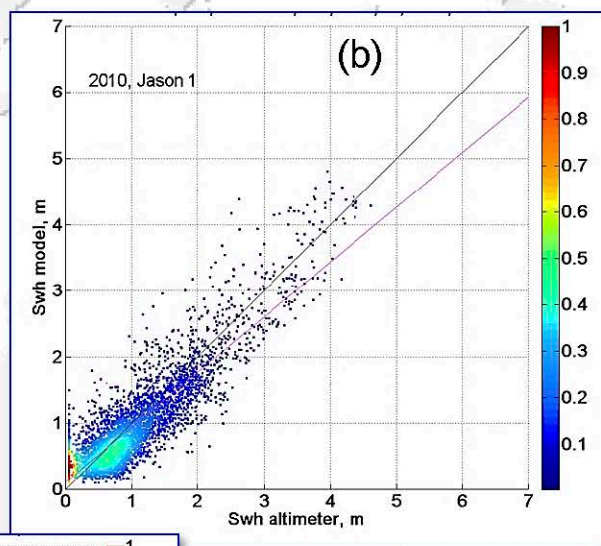
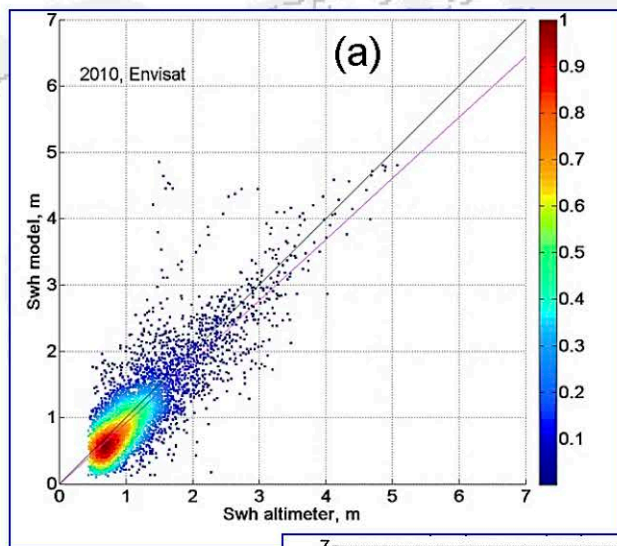
# Верификация модельных расчетов волнового режима Черного моря

Результаты калибровки результатов модельных расчетов SWH по альтиметрическим измерениям на акватории Черного моря<sup>1</sup>

Модель	Спутник	Временной интервал	T, мин	N	Коэффициенты линии регрессии		ME	SD	RMSE	SI	R	Источник
					b	a						
VAGBULH1	ERS-2	07/1996 – 07/1996		13289			-0,19	0,63			0,873	Kortcheva et al., 2000
SWAN	ENVISAT	01/2010 – 12/2011	10–15				-0,095		0,387	0,334	0,834	Myslenkov, Chernyshova, 2016; Мысленков и др., 2017
	Jason-1						-0,061		0,372	0,363	0,880	
	Jason-2						0,029		0,399	0,443	0,851	
SWAN	TOPEX/Poseidon	01/2002 – 04/2002	10	4009			0,02		0,40	0,38	0,78	Rusu et al., 2014]
	ERS-2			5348			-0,01		0,36	0,36	0,78	
	Jason-1			3665			0,03		0,39	0,36	0,75	
	GFO			4353			0,03		0,39	0,32	0,77	
SWAN	Jason-2	01/2012 – 12/2015		63315	0,02	0,78	-0,21	0,32	0,39	0,36	0,90	Рагнер и др., 2017
WAM	Jason-1	01/2002 – 12/2013	30	209615			0,0325		0,170	0,174	0,968	Ciliberti et al., 2021
	Jason-2	01/2008 – 12/2017		147081			-0,00618		0,236	0,234	0,934	
	Jason-3	01/2016 – 12/2018		52222			-0,076		0,263	0,256	0,916	
	Jason-1/2/3	01/2002 – 12/2018		408918			0,00475		0,209	0,213	0,947	

<sup>1</sup> T – временной интервал между альтиметрическими измерениями и результатами модельных расчётов (мин), N – число измерений.

# Верификация модельных расчетов волнового режима Черного моря



Диаграммы рассеивания  
альтиметрических измерений SWH  
спутником ENVISAT (a), Jason-1 (b)  
и Jason-2 (c) результатов расчетов  
по модели волнения Черного моря  
SWAN (Myslenkov, Chernyshova,  
2016).



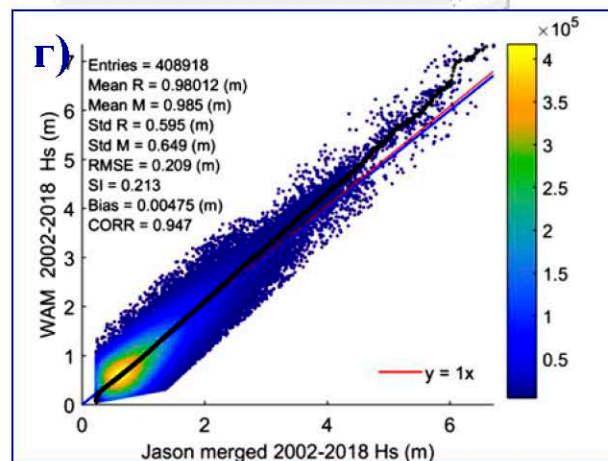
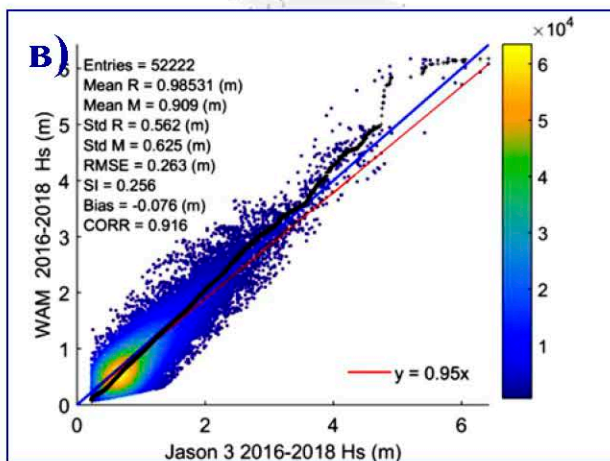
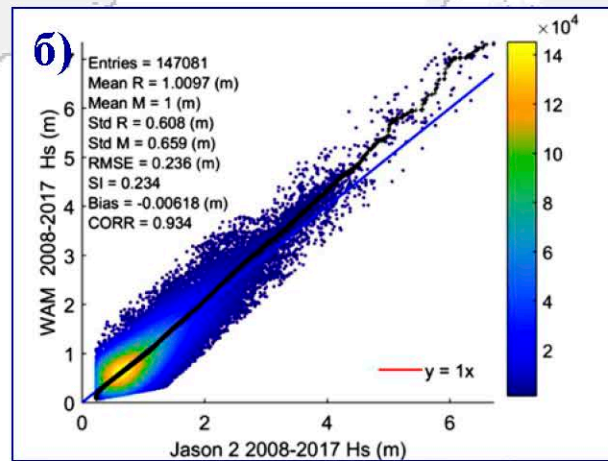
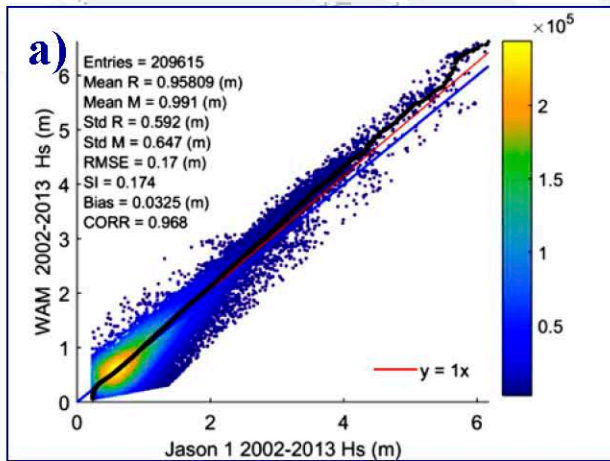
# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и № 13

Для калибровки SWH по данным альтиметрических измерений в качестве модельных расчетов был выбран массив реанализа волнового поля BLKSEA\_MULTITYEAR\_WAV\_007\_006 с сайта Службы мониторинга морской среды «Коперник» (Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS) (<https://marine.copernicus.eu>).

Расчеты проводились по модели WAM с пространственным разрешением  $\sim 3$  км ( $1/27^\circ$  по широте,  $1/36^\circ$  по долоте) начиная с 1973 года по настоящее время. В качестве атмосферного форсинга используется реанализ атмосферы ERA-5 ECMWF. Валидация результатов расчетов проводилась по данным альтиметрических измерений спутников Jason-1, Jason-2 и Jason-3 за период 2002–2018.



# Калибровка SWH по данным волнового поля BLKSEA\_MULTIYEAR\_WAV\_007\_006



Диаграммы  
 рассеивания  
 альтиметрических  
 измерений SWH и  
 результатов расчетов  
 по модели WAM  
 реанализа волнового  
 поля (а) – спутник  
 Jason-1 (2002–2013);  
 (б) – спутник Jason-2  
 (2008–2017);  
 (в) – спутник Jason-1  
 (2016–2018);  
 (г) – спутники Jason-  
 1/2/3 (2002–2018).



# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и № 13

Комплексный анализ показывает, что расчеты по модели WAM реанализа волнового поля хорошо согласуются с альтиметрическими измерениями. Это позволяет провести калибровку SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и № 13. Для этого первоначально была проведена фильтрация данных альтиметрических измерений SWH.

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 использовалась маска «вода–суша», построенная по цифровой модели рельефа ETOPO1 с учетом параметров модели волнения, которая использовалась при создании волнового реанализа .
3. Отбрасывались данные измерений на расстоянии менее 10 км от береговой линии.



# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и № 13

4. Для двухчастотных альтиметров отбраковывались данные не удовлетворяющие условию  $|h_{swh\_band\_1} - h_{swh\_band\_2}| < 1$ .
5. Значимые высоты волн отвечающие условию  $h_{swh} < 0,2$  отбраковывались.
6. Данные альтиметрических измерений отбраковываются если:

$$|h_{swh} - \bar{h}_{swh}| / \sigma_{h_{swh}} > 2,$$

где  $\bar{h}_{swh}$  – среднее значение SWH на участке трека, который отобран для калибровки,  $\sigma_{h_{swh}}$  – 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  $\sigma_{h_{swh}} / h_{swh} > 0,5$ .
8. Сглаживание данных вдоль трека фильтром Гаусса

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

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



# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12 и № 13

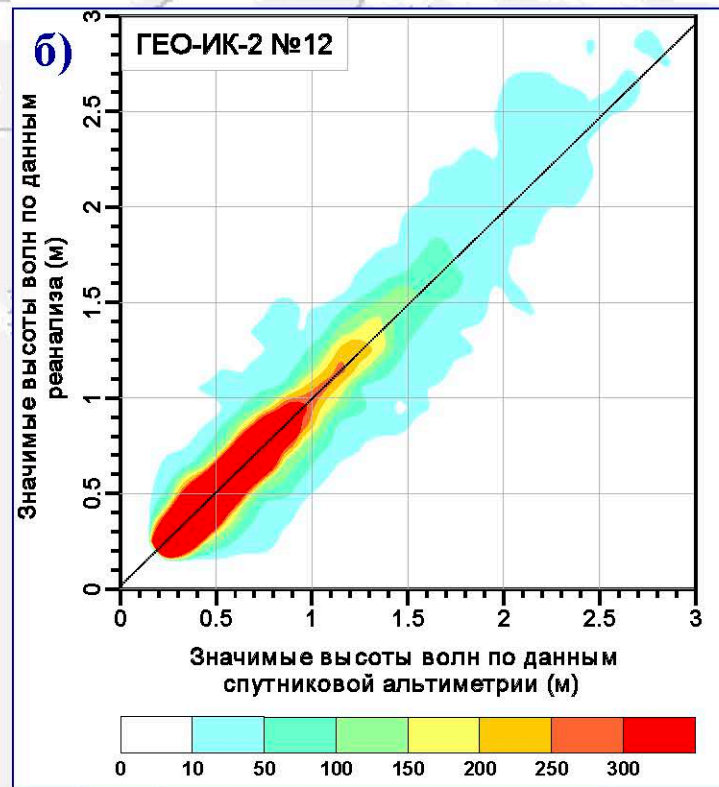
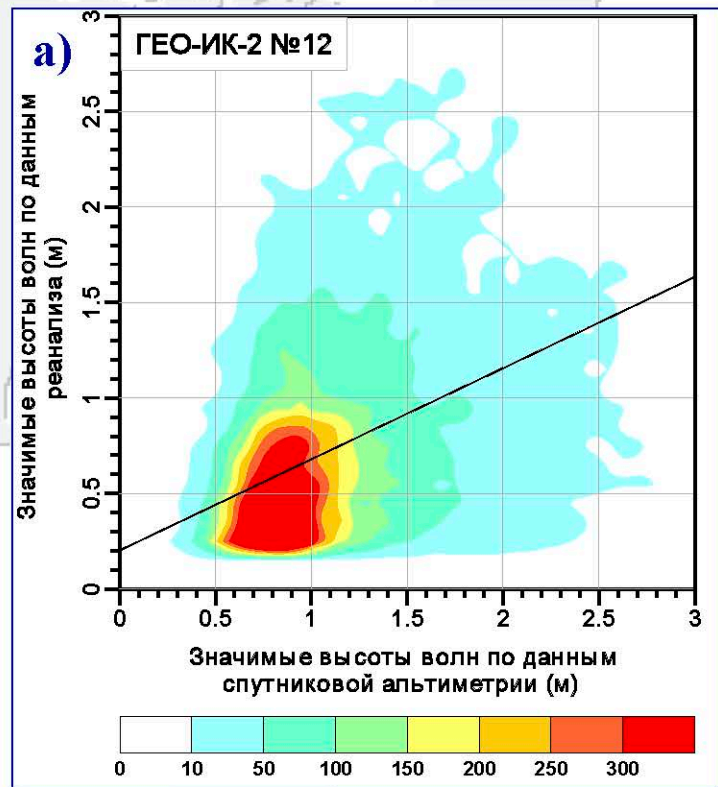
Спутник	Число измерений	Коэффициенты линии регрессии		ME	SD	RMSE	SI	R	R <sup>2</sup>
		b	a						
GEOSAT Фаза А	7444	0,0710	0,9183	0,0086	0,2236	0,2237	0,2297	0,9151	0,8218
GEOSAT Фаза В	13413	0,0517	0,9375	0,0129	0,2308	0,2311	0,2235	0,9201	0,8859
ERS-1 Фаза А	2883	0,0089	0,9839	0,0058	0,1482	0,1483	0,1614	0,9658	0,9910
ERS-1 Фаза В	1899	0,0042	0,9948	0,0020	0,2188	0,2188	0,1860	0,9425	0,9882
ERS-1 Фаза С	12841	0,0179	0,9756	0,0070	0,1664	0,1665	0,1629	0,9623	0,9712
ERS-1 Фаза D	878	-0,0243	1,0287	-0,0025	0,1725	0,1726	0,1844	0,9429	0,9979
ERS-1 Фаза E	1711	0,0194	0,9742	0,0000	0,1265	0,1265	0,1686	0,9500	0,9979
ERS-1 Фаза F	1659	0,0164	0,9830	0,0012	0,1472	0,1472	0,1431	0,9660	0,9973
ERS-1 Фаза G	9403	0,0208	0,9745	0,0043	0,1764	0,1765	0,1794	0,9510	0,9819
TOPEX Фаза А	119344	0,0250	0,9641	0,0073	0,1815	0,1816	0,2016	0,9425	0,9192
TOPEX Фаза N	1240	0,0591	0,9123	-0,0017	0,1432	0,1432	0,2187	0,8867	0,9995
TOPEX Фаза В	37754	0,0288	0,9586	0,0073	0,1942	0,1943	0,2224	0,9357	0,9760
POSEIDON Фаза А	9615	0,0288	0,9533	0,0099	0,1639	0,1642	0,1980	0,9390	0,9958
ERS-2 Фаза А	91516	0,0196	0,9736	0,0044	0,1747	0,1748	0,1913	0,9498	0,9680
GFO-1 Фаза А	78380	0,0630	0,9208	0,0120	0,2550	0,2553	0,2697	0,8891	0,9537
JASON-1 Фаза А	88923	0,0334	0,9528	0,0085	0,1875	0,1877	0,2109	0,9349	0,9762
JASON-1 Фаза В	76630	0,0317	0,9548	0,0081	0,1896	0,1897	0,2152	0,9330	0,9817
JASON-1 Фаза С	13672	0,0332	0,9548	0,0063	0,1888	0,1889	0,2162	0,9277	0,9968
ENVISAT Фаза В	68740	0,0230	0,9697	0,0056	0,1746	0,1747	0,1856	0,9519	0,9879
ENVISAT ФАЗА С	6808	0,0080	0,9903	0,0011	0,1644	0,1644	0,1761	0,9546	0,9989
JASON-2 Фаза А	54471	0,0260	0,9657	0,0045	0,1800	0,1801	0,2033	0,9420	0,9907
JASON-2 Фаза В	4295	0,0265	0,9692	0,0066	0,2010	0,2011	0,1874	0,9398	0,9991
CRYOSAT2 Фаза А	3791	0,0335	0,9478	0,0087	0,1782	0,1784	0,2206	0,9459	0,9994
SARAL Фаза А	21093	0,0287	0,9597	0,0050	0,2175	0,2175	0,2602	0,9134	0,9950
SARAL Фаза В	37082	0,0301	0,9584	0,0057	0,2165	0,2166	0,2522	0,9132	0,9933
JASON-3 Фаза А	43684	0,0173	0,9769	0,0030	0,1666	0,1666	0,1890	0,9501	0,9954
<b>ГЕО-ИК-2 № 12</b>	<b>26113</b>	<b>0,0304</b>	<b>0,9596</b>	<b>0,0029</b>	<b>0,1751</b>	<b>0,1751</b>	<b>0,2125</b>	<b>0,9429</b>	<b>0,9972</b>
<b>ГЕО-ИК-2 № 13</b>	<b>20737</b>	<b>0,0238</b>	<b>0,9669</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,1786</b>	<b>0,1786</b>	<b>0,2146</b>	<b>0,9396</b>	<b>0,9986</b>

Двадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»  
14-18 ноября 2022, Москва, Институт космических исследований РАН





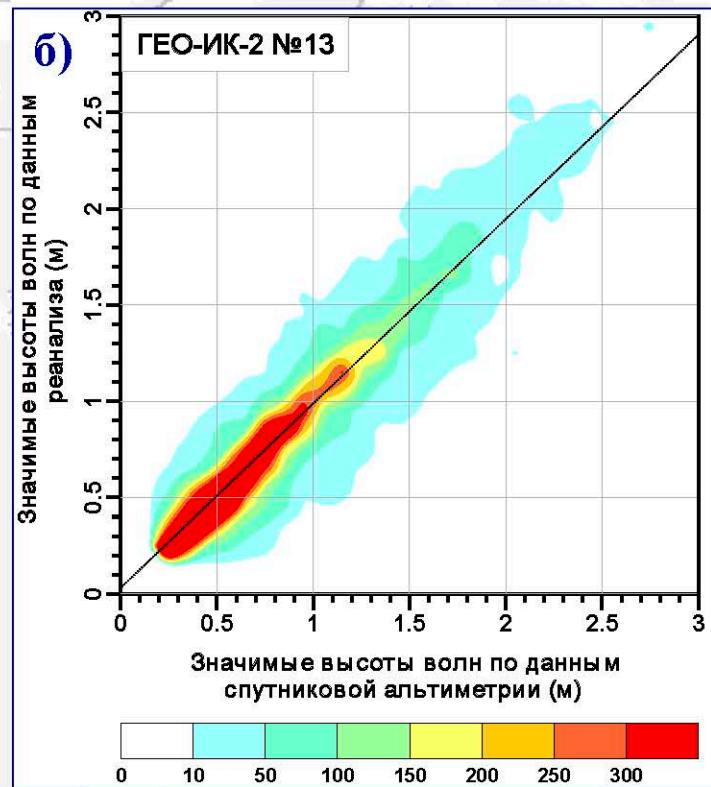
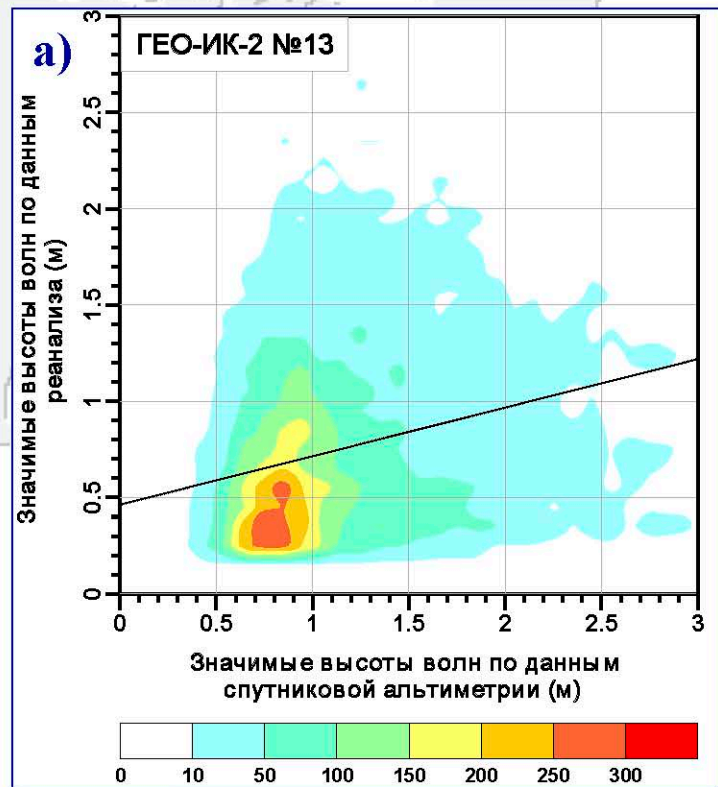
# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 12



Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений SWH спутника ГЕО-ИК-2 №12 за январь 2019 г. – декабрь 2020 г. до (а) и (б) после отбраковки данных и данных реанализа волнового поля .

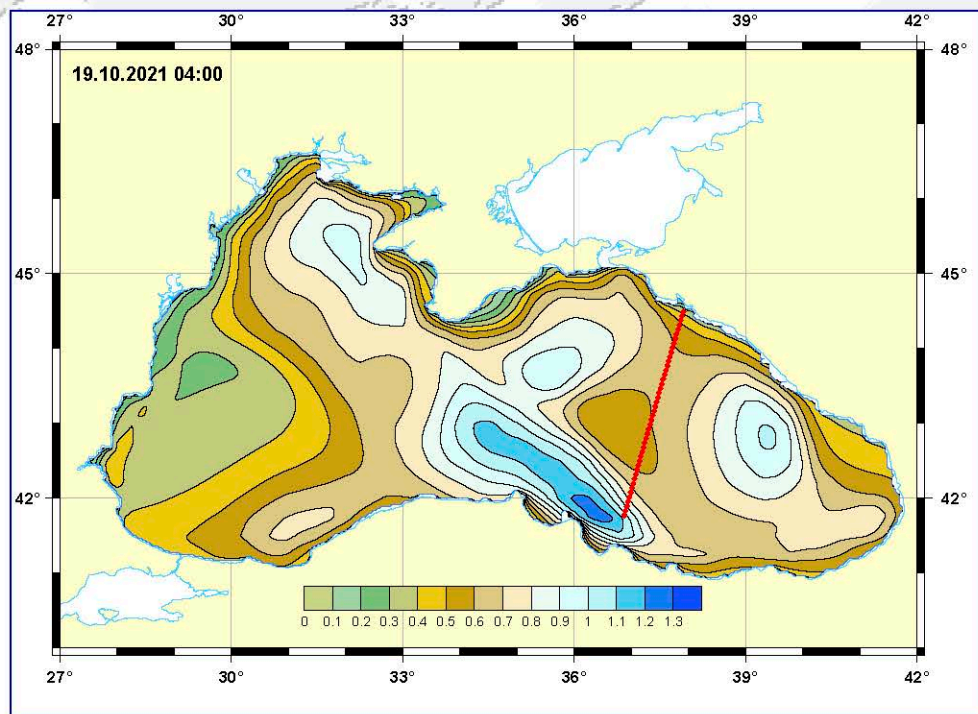


# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13



Диаграммы рассеивания альтиметрических измерений SWH спутника ГЕО-ИК-2 №12 за январь 2019 г. – декабрь 2020 г. до (а) и (б) после отбраковки данных и данных реанализа волнового поля .

# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 вдоль трека



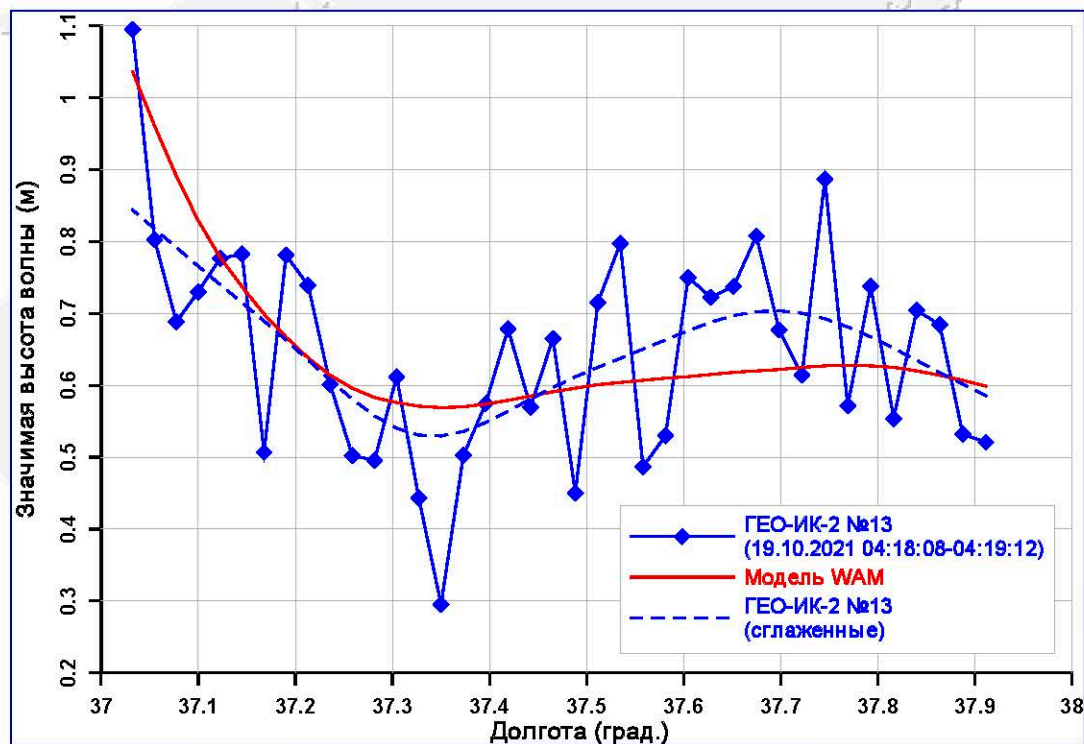
*Карта SWH, рассчитанных по модели волнового реанализа на 19 октября 2021 на 4 часа. Красными точками показано положение альтиметрических измерений вдоль трека спутника «ГЕО-ИК-2» №13.*

Согласно волновому реанализу 19 октября 2021 на 4 часа на акватории Черного моря, когда проводилась калибровка SWH по данным ГНСС буя наблюдалась следующая синоптическая картина. SWH более 0,3 м наблюдались вдоль всего российского побережья Кавказа и побережья Турции, за исключением района от Синопа до мыса Бафра, где наблюдался сильный шторм со значимыми высотами волн более 0,9 м.



# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 вдоль трека

Можно констатировать, что данные альтиметрических измерений SWH и результаты модельных расчетов хорошо согласуются между собой. Так по альтиметрическим измерениям в точке, ближайшей к положению ГНСС буя, SWH составила 0,521 м, а по данным модельных расчетов – 0,599 м. Что хорошо согласуется друг с другом.



*Изменчивость вдоль трека SWH, измеренных альтиметром спутника «ГЕО-ИК-2» №13 на 19 октября 2021 года с 04:18:08 – 04:19:12 без сглаживания (сплошная синяя линия с маркерами), со сглаживанием (штриховая синяя линия) и рассчитанных по модели WAM волнового реанализа (красная линия).*

# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 по данным измерений ГНСС буя

Второй способ калибровки значимых высот волн можно провести по анализу данных морского буя с ГНСС приемников, который 19 октября 2021 года располагался вблизи одного из альтиметрических измерений спутника «ГЕО-ИК-2» №13.

Для расчета значимых высот волн по данным буя в начале по показаниям ГНСС буя определялась высота волны, как разница между ближайшими локальными максимумом и минимумом. Далее полученные высоты волн сортировались в порядке возрастания и по следующей формуле определялась значимая высота волны (Давидан и др., 1974):

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



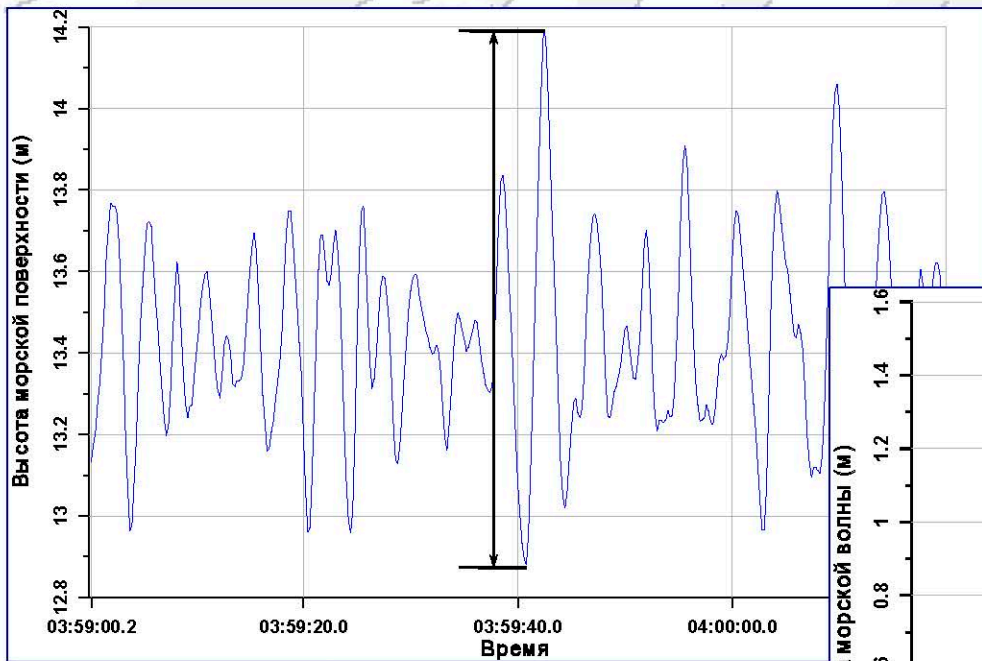
# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 по данным измерений ГНСС буя

Второй способ калибровки значимых высот волн можно провести по анализу данных морского буя с ГНСС приемников, который 19 октября 2021 года располагался вблизи одного из альтиметрических измерений спутника «ГЕО-ИК-2» №13.

Для расчета значимых высот волн по данным буя в начале по показаниям ГНСС буя определялась высота волны, как разница между ближайшими локальными максимумом и минимумом. Далее полученные высоты волн сортировались в порядке возрастания и по следующей формуле определялась значимая высота волны:

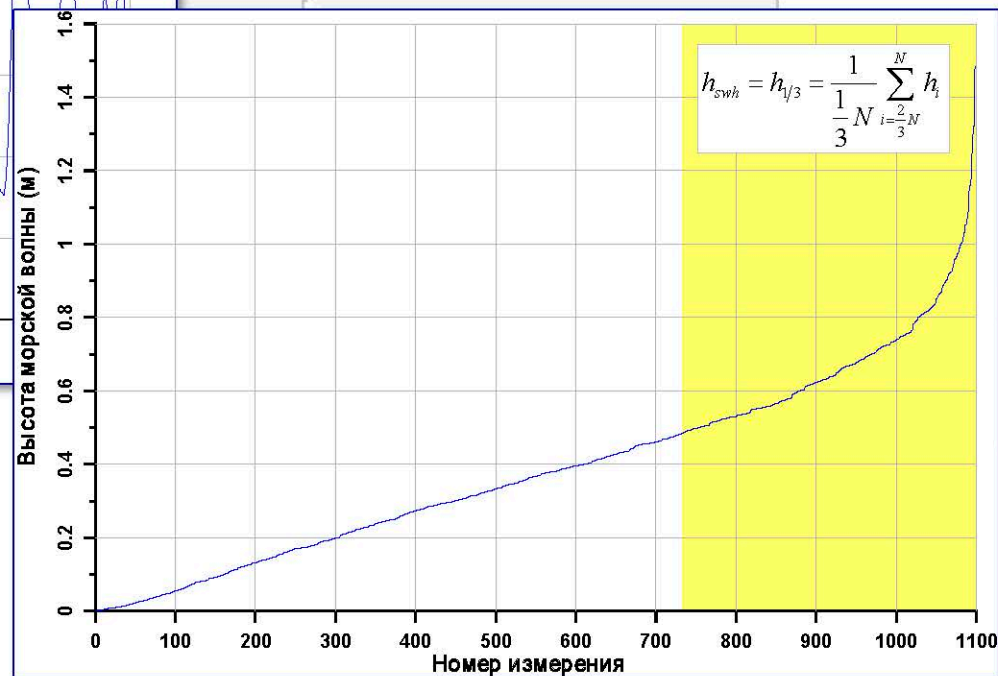
$$h_{swh} = h_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{i=\frac{2}{3}N}^N h_i.$$

# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 по данным измерений ГНСС буя



*Временная изменчивость показаний ГНСС буя за первые 80 секунд. Показан алгоритм определения высоты волны.*

*Высоты волны отсортированные в порядке возрастания. Жёлтым выделена область по которой рассчитывалась значимая высота волны.*





# Калибровка SWH по данным альтиметрических измерений спутников «ГЕО-ИК-2» № 13 по данным измерений ГНСС буя

Таким образом полученное по измерениям ГНСС буя за время 47 минут (41000 измерений) было вычислено 1098 высот волн. Точность подобных расчетов составляет 10% по причине изменения положения вертикальной оси буя.

Значимая высота волны составила  $h_{swh} = 0,576$  м, что хорошо согласуется с альтиметрическими измерениями (0,521 м) и модельными расчетами (0,599 м), полученными интерполяцией значимой высоты волн в точку положения ГНСС буя.

Используя уравнение линейной регрессии зависимости для спутника «ГЕО-ИК-2» №13 уточненная значимая высота волны рассчитанная по модели WAM составляет 0,575 м.

# Заключение

- Коэффициент корреляции между данными дистанционного зондирования и модельными расчетами для двух российских спутников ГЕО-ИК-2 №12 и № 13 составил 0,943 и 0,940 соответственно, а коэффициент детерминации 0,997 и 0,999.
- Измерения морского буя с ГНСС приемников, который 19 октября 2021 года располагался вблизи одного из альтиметрических измерений спутника ГЕО-ИК-2 №13, показали хорошее совпадение *in situ* измерений (0,576 м) с альтиметрическими измерениями (0,521 м) и модельными расчетами (0,599 м).

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ № 19-55-80021 БРИКС\_т «Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС»*





**Спасибо за внимание**

