

Сергей А. Лебедев



Геофизический Центр РАН

Игорь В. Гусев



*Майкопский государственный
технологический университет*

Алексей В. Сакович



*Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»*

Александр О. Слободянюк



*Центральный научно-
исследовательский институт
машиностроения (ЦНИИ.маш)*

РАСЧЁТ ПОПРАВКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ РОССИЙСКИМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ



Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



Поправка на состояние подстилающей поверхности

Поправка на состояние подстилающей поверхности dh_{SSB} имеет три составляющих:

- поправка SB (Skewness Bias), связанная с асимметрией распределения возвышений, следовательно, и уклонов морской поверхности (отклонение распределений от распределения Гаусса);
- поправка на электромагнитное смещение EMB (ElectroMagnetic Bias), физическим механизмом которой является изменчивость интенсивности рассеяния радиоволн вдоль профиля длинных поверхностных волн (доминантных волн), что приводит к разнице между средним уровнем моря и средней рассеивающей поверхностью;
- поправка TB (Tracker Bias), связанная с предварительной обработкой данных альтиметра на борту спутника.



Поправка SB (Skewness Bias)

Поправка SB (dh_{SB}) требует знания величины асимметрии распределения возвышений и уклонов морской поверхности (A), которая функционально не связана ни с одной величиной, рассчитываемой при обработке данных спутниковой альтиметрии (коэффициент обратного рассеяния σ_0 и значимая высота волны h_{SWH}). По этой причине данную поправку определить достаточно сложно. Существующие функциональные зависимости поправки dh_{SB} асимметрии распределения выведены исходя из теоретического анализа. Некоторые из них подтверждены лабораторными и натурными экспериментами. В общем виде эти зависимости можно записать как $dh_{SB} = A \cdot h_{SWH} / k$.

В работах (Jackson, 1979; Srokosz, 1986; Lagerloef, 1987; Rodriguez, 1988) на основе анализа распределения Грама-Шарлье возвышений морской поверхности (одномерный случай) для нелинейного приближения предложена зависимость с коэффициентом $k = 4$ и $k = 24$ соответственно. Нелинейная зависимость поправки dh_{SB} предложена в работе (Parsons, Miller, 1990).

В большинстве моделей расчета поправки dh_{SSB} первой и третьей составляющими (dh_{SB} и dh_{TB}) пренебрегают, поэтому считают, что поправка на состояние подстилающей поверхности равна поправке на электромагнитное смещение dh_{EMB} .



Поправка на электромагнитное смещение EMB (ElectroMagnetic Bias)



Различие между средней ВМП, средней поверхностью рассеяния и медианной поверхностью рассеяния

Мощность отражённого сигнала альтиметра на единицу площади поверхности во впадинах волн (нижняя часть волны, расположенная ниже спокойного уровня моря) больше, чем у гребней волн (верхняя часть волны, выступающая над спокойным уровнем моря). Это смещение ещё более усиливается за счёт мелкомасштабной ряби, увеличивающей шероховатость поверхности моря вблизи гребней волн, а, следовательно, и диффузное рассеивание зондирующего импульса альтиметра.



Поправка на электромагнитное смещение EMB (ElectroMagnetic Bias)



Chesapeake Bay Light Tower

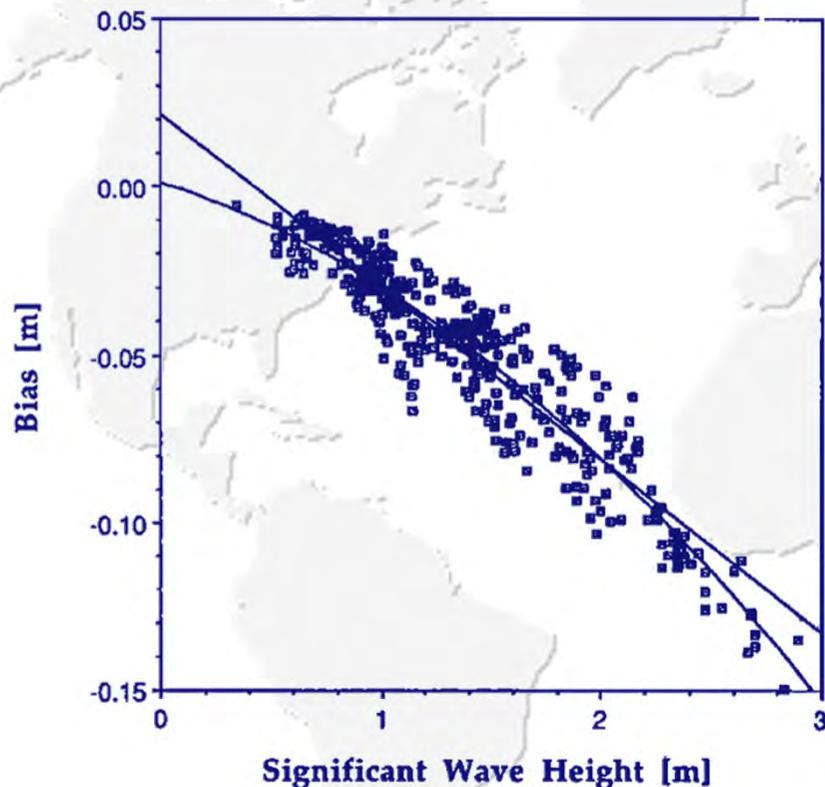
Впервые этот эффект наблюдался при тестировании радара-альтиметра на маяке Chesapeake Bay Light Tower, расположенном в Чесапикском заливе Атлантического океана на расстоянии 15 миль (24 км) от мыса Генри (штат Вирджиния, США).

В эксперименте сравнивались результаты расчётов средних возвышений морской поверхности, рассчитанных

- по данным трех струнных волнографа, расположенных в засвеченной альтиметром области, диаметр которой составлял 1 м, со временем осреднения 0,1 с;
- по данным альтиметра, с рабочей частотой 14 ГГц (*Ku* диапазон), с длительностью зондирующего импульса 1 нс, с частотой повторения импульсов 60 кГц, с полосой пропускания приёмника 103 мГц.



Экспериментальные измерения dh_{EMB}



Зависимость электромагнитного смещения dh_{EMB} от значимой высоты волны h_{SWH} по результатам эксперимента в Чесапикском заливе Атлантического океана, проводимого с 19 сентября по 12 октября 1988 года. Линии аппроксимации соответствуют зависимостям

$$-dh_{EMB} = 0,0216 - 0,0517 \cdot h_{SWH}$$

$$R^2 = 0,873$$

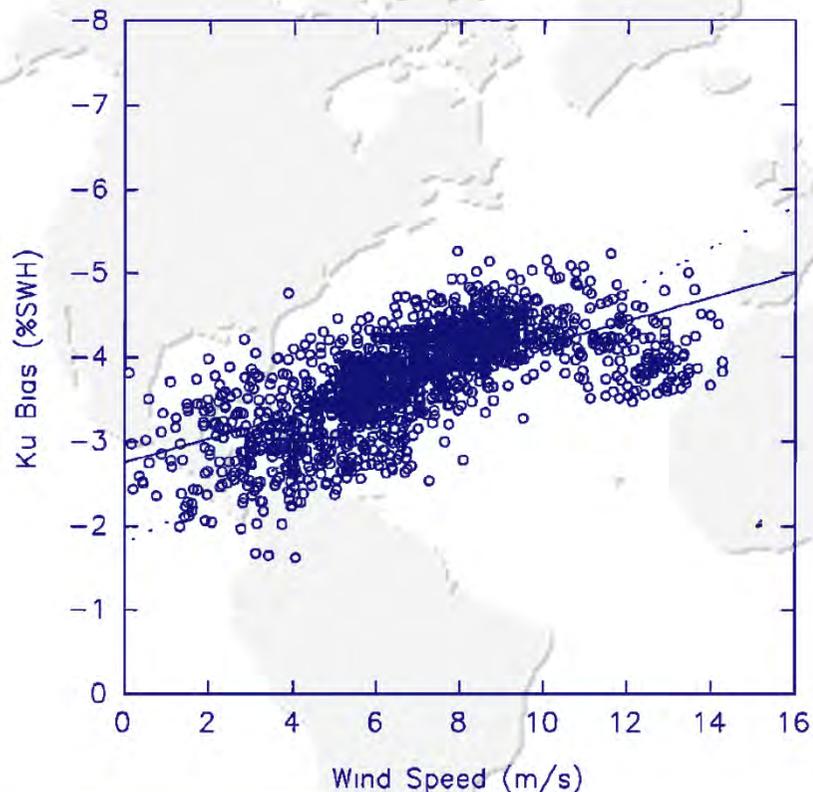
и

$$-dh_{EMB} = 0,001 \cdot h_{SWH} - 0,21 \cdot h_{SWH}^2 - 0,0104 \cdot h_{SWH}^3$$

$$R^2 = 0,887$$



Экспериментальные измерения dh_{EMB}



Зависимость нормированного электромагнитного смещения (dh_{EMB}/h_{SWH}) от скорости приводного ветра U_{25} на высоте 25 м (м/с) по результатам эксперимента в Мексиканском заливе по данным за 6 месяцев (декабрь 1989 г. – май 1990 г.). Линия аппроксимации соответствует зависимости:

$$\beta = \frac{dh_{EMB}}{h_{SWH}} = -2,76 - 0,139 \cdot U_{25}$$

$$R^2 = 0,417$$



Зависимость поправки dh_{EMB} от частоты зондирующего сигнала

Результаты всех многочисленных экспериментов по расчёту электромагнитного смещения показали, что его величина в первую очередь зависит от рабочей частоты радиовысотомера. В работе (*Bar et al., 1997*) представлена подобная зависимость:

$$\beta = \frac{dh_{EMB}}{h_{SWH}} = (3,0 - 0,0617 \cdot F)(1 \pm 0,5)\%$$
$$R^2 = 0,887$$

где β – безразмерный коэффициент (нормированное электромагнитное смещение);

F – рабочая частота радиовысотомера;

R^2 – коэффициент детерминации.



Модели расчета поправки dh_{EMB} для спутниковых данных

Исследования электромагнитного смещения проводилось как с помощью теоретических моделей, так и экспериментальным путём. Теоретические исследования отражение зондирующего проводились с использованием законов геометрической оптики или теорий физической оптики. В последнем случае в отражении учитывались вклады коротких волн, а также зависимости от часты зондирующего сигнала альтиметра. Однако полное понимание физического явления электромагнитного смещения ещё не достигнуто. Поэтому современные модели dh_{EMB} в основном основаны на эмпирических подходах.

Согласно теории и экспериментальным данным со стационарных платформ, электромагнитное смещение dh_{EMB} зависит от многих параметров

$$\beta = \frac{dh_{EMB}}{h_{SWH}} = F(h_{SWH}, A, E, \lambda, U, s),$$

где h_{SWH} – значимая высота волны; β – безразмерный коэффициент (нормированное электромагнитное смещение); A – асимметрия плотности распределения возвышений морской поверхности; E – эксцесс плотности распределения; λ – длина доминирующей волны (зыби); U – скорость ветра; s – уклон доминирующей волны.



Модели расчета поправки dh_{EMB} для спутниковых данных

$$\beta = \frac{dh_{EMB}}{h_{SWH}} = F(h_{SWH}, A, E, \lambda, U, s)$$

Однако, такие параметры как: асимметрия плотности распределения возвышений морской поверхности (A), эксцесс плотности распределения (E), длина доминирующей волны (зыби) (λ) и уклон доминирующей волны (s) по данным дистанционного зондирования определить невозможно. По этой причине строятся параметрические модели зависимости электромагнитного смещения dh_{EMB} или нормированного электромагнитного смещения β от значимой высоты волны и скорости приводного ветра или коэффициента обратного рассеяния.



Параметрические модели dh_{EMB}

Общая формулировка для поправки на состояние подстилающей поверхности принимает вид

$$\beta = \frac{dh_{ssb}}{h_{ssh}} = a_1 + a_2 h_{swh} + a_3 U_{10} + a_4 h_{swh}^2 + a_5 U_{10}^2 + a_6 h_{swh} U_{10}$$

В зарубежной литературе принято различать одно, двух, трёх и четырёх параметрические модели. Однако такое разделение не соответствует названию моделей, так как в самой формуле используются только два параметра: значимая высота волны и скорость приводного ветра на высоте 10 м, которая обычно рассчитывается по коэффициенту обратного рассеяния. Правильнее называть модели по степени аппроксимирующего полинома:

- модель первого порядка – коэффициенты $a_4 = a_5 = a_6 = 0$,
- модель второго порядка – один из коэффициентов a_2 , или a_3 не равен нулю одновременно один из коэффициентов a_4 , a_5 или a_6 также не равен нулю.



Параметрические модели dh_{EMB}

В работе (Pires et al., 2016; Pires et al., 2018) двухпараметрические модели предлагается уточнять с помощью третьего параметра. В дополнение к значимой высоте волны (h_{SWH}) и скорости приводного ветра на высоте 10 м (U_{10}) вводится третий параметр – средний период волны (T_{mean}). В общем виде это записывается как:

$$\beta = \frac{dh_{SSB}}{h_{SWH}} = f_1(h_{SWH}) + f_2(U_{10}) + f_3(T_{mean})$$

В надире коэффициент обратного рассеяния σ_0 в приближении геометрической оптики связан с обратной величиной среднеквадратичного наклона ($Slope_{mean}$) длинных океанских волн – $\sigma_0 \sim Slope_{mean}^{-1}$. В свою очередь, наклон средней волны эквивалентен отношению некоторой меры высоты волны h_{SWH} к длине волны λ_{mean} – $Slope_{mean} \sim h_{SWH} / \lambda_{mean}$, а средняя длина волны связана с её периодом (T_{mean}) для глубоководных гравитационных волн на больших глубинах дисперсионным соотношением – $\lambda_{mean} \sim T_{mean}^2$. Таким образом:

$$T_{mean} \propto (\sigma^0 h_{swh}^2)^{0,25}$$



Алгоритм расчета поправки dh_{EMB} для спутниковых данных

Измеренная альтиметром высота морской поверхности (h_{SSH}) с учётом всех поправок на тропосферу и ионосферу, а также всех геофизических поправок (включая поправку обратного барометра) представляет собой суперпозицию высоты геоида (h_{geoid}), динамической топографии океана (h_{dt}), поправки на состояние морской поверхности (dh_{SSB}) и некоторый шум измерений (w):

$$h_{SSH} = h_{geoid} + h_{dt} + dh_{SSB} + w$$

В контексте оценки dh_{SSB} изменение динамической топографии h_{dt} для временного интервала $t_2 - t_1$ рассматривается как шум и объединяется вместе с разницей шумов w , образуя единый член ε с нулевым средним значением:

$$h_{SSH} \Big|_{t_2} - h_{SSH} \Big|_{t_1} = dh_{SSB} \Big|_{t_2} - dh_{SSB} \Big|_{t_1} + \varepsilon$$

Это уравнение является основным для всех методов оценки dh_{SSB} , основанных только для данных альтиметра.



Параметрические модели поправки dh_{EMB} для различных спутников

$$\beta = \frac{dh_{SSB}}{h_{SWH}} = a_1 + a_2 h_{SWH} + a_3 U_{10} + a_4 h_{SWH}^2 + a_5 U_{10}^2 + a_6 h_{SWH} U_{10}$$

Спутник (Альтиметр)	Коэффициенты						Название модели
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
SEASAT (ALT)	-0,02803	0,0441					BM2
	0,03265	0,0794		0,0389			BM3
		0,0593		0,0476			BM2
GEOSAT (GRA)	0,0066		0,0015				BM2
	0,0056		0,00091				BM2
	0,0327	-0,0022	0				BM2
	0,0245	-0,0034	0,00122				BM3
	0,035	0,00018					BM2
	-0,025		-0,00145			0,0002	BM3
ERS-1 (RA)	-0,047		-0,0035		0,000160		BM3
	-0,075043	0,000098	0,001413		-0,001790		BM4
ERS-2 (RA)	-0,048		-0,0026		0,000126		BM3
	-0,068219	0,000082	0,001465		-0,001701		BM4
GFO-1 (GFO-RA)	-0,055742	0,000153	0,002743		-0,003756		BM4
TOPEX/ Poseidon (NRA (TOPEX))	0,0029		0,0038		-0,000155		BM3
	0,0047		0,0038		-0,00016		BM3
	0,0036		-0,0045		0,00019		BM3
	-0,037			0,00029			BM2
	-0,019	0,0027	-0,0037		0,00014		BM4



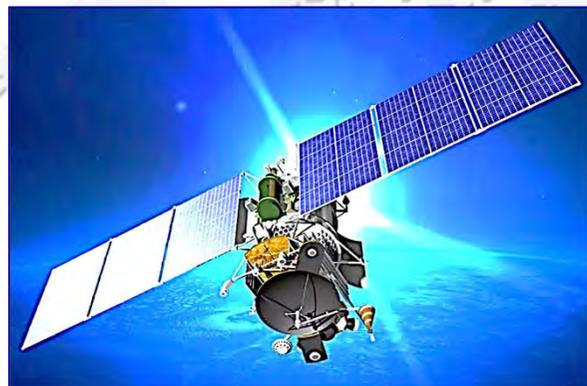
Параметрические модели поправки dh_{EMB} для различных спутников

$$\beta = \frac{dh_{SSB}}{h_{SWH}} = a_1 + a_2 h_{SWH} + a_3 U_{10} + a_4 h_{SWH}^2 + a_5 U_{10}^2 + a_6 h_{SWH} U_{10}$$

Спутник (Альтиметр)	Коэффициенты						Название модели
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
TOPEX/ Poseidon (NRA (TOPEX))	-0,021	0,0028	-0,0037		0,00014		BM4
	-0,030		-0,00358		0,00011		BM3
	-0,030578	0,000127	0,002776		-0,002962		BM4
	-0,032113	0,000101	0,002992		-0,002780		BM4
TOPEX/ Poseidon (Poseidon)	-0,059			0,00016			BM2
	-0,040		-0,0025		0,00012		BM3
	-0,047	0,0010	-0,0023		0,00011		BM4
	-0,062778	0,000057	0,001894		-0,001194		BM4
Jason-1 (Poseidon-2)	0,0317	0,0038	-0,00052		-0,000018		BM4
	-0,0200	-0,0106	0,0027		-0,000095		BM4
	-0,034376	0,000083	0,001746		-0,001969		BM4
ENVISAT (RA-2)	-0,052849	0,000068	0,001746		-0,001713		BM4
Jason-2 (Poseidon-3)	0,0398	0,0023	-0,0014		-0,000059		BM4
	-0,0625	-0,0032	0,0020		-0,000029		BM4
Jason-3 (Poseidon-3B)	0,0347	0,0034	-0,000722		0,0000263		BM4
	-0,0966	0,0029	0,0035		0,0001034		BM4
Sentinel-3A (SRAL)	0,0068	0,0039	-0,0027		0,0000936		BM4
	-0,0381	-0,000579	-0,000078		0,0000274		BM4



Российский космический аппарат «ГЕО-ИК-2» №12



ХАРАКТЕРИСТИКИ «ГЕО-ИК-2»

Производитель	АО «РЕШЕТНЁВ»
Заказчик	Минобороны России
Метод наблюдений	Альтиметрия
Дата запуска КА №12Л («Космос-2517»)	4 июня 2016 г.
Срок активного существования	5 лет
Тип орбиты	Околокруговая солнечно-синхронная
Высота орбиты	954 км
Наклонение	99,28°
Фактическая масса КА №12Л	887 кг



Параметрическая модель для российских космических аппаратов

$$dh_{SSB} = a_0 + h_{SWH} (a_1 + a_2 h_{SWH} + a_3 U + a_4 U^2)$$

Результаты расчётов для Мирового океана

	По точкам пересечения (метод 1)			По точкам вдоль треков изомаршрутной программы (метод 2)	
Временной интервал (год)	2018	2019	2018–2019	2018	2019
Количество точек	84 677	89 054	174 157	23 070 827	15 939 198
Коэффициенты модели					
a_0	0,00057	0,00189	0,00123	0,01214	0,02868
a_1	-0,06288	-0,06212	-0,06252	-0,07136	-0,06260
a_2	0,00303	0,00282	0,00293	0,00328	0,00240
a_3	0,00094	0,00114	0,00104	0,00054	0,00016
a_4	-0,00004	-0,00005	-0,00004	-0,00003	0,00000



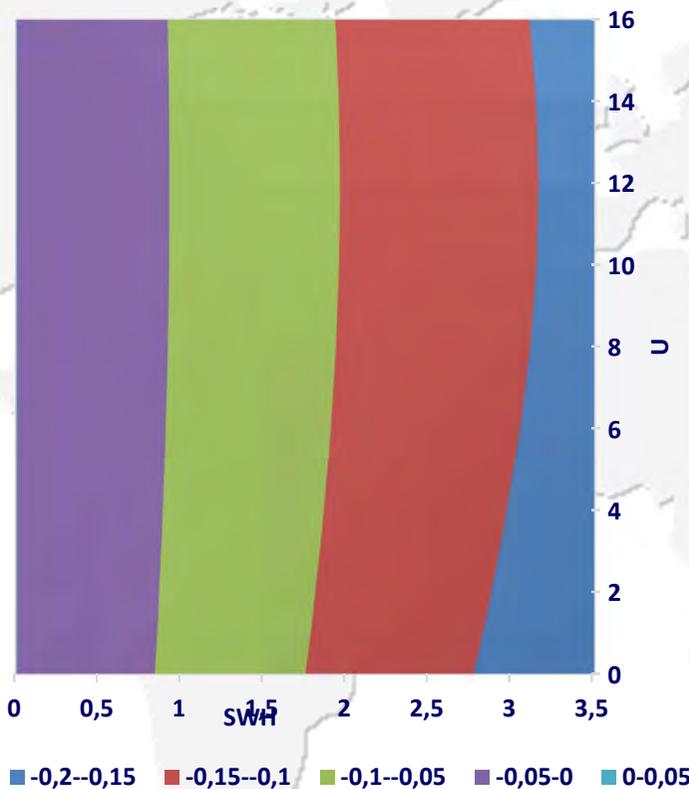
Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

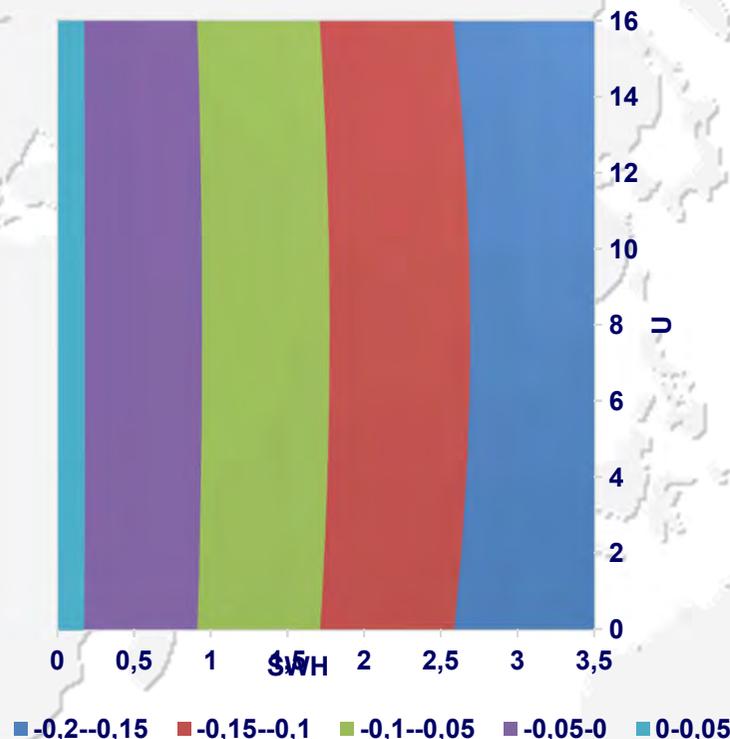


Параметрическая модель для российских космических аппаратов

Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Зависимость dh_{SSB} от SWH и U

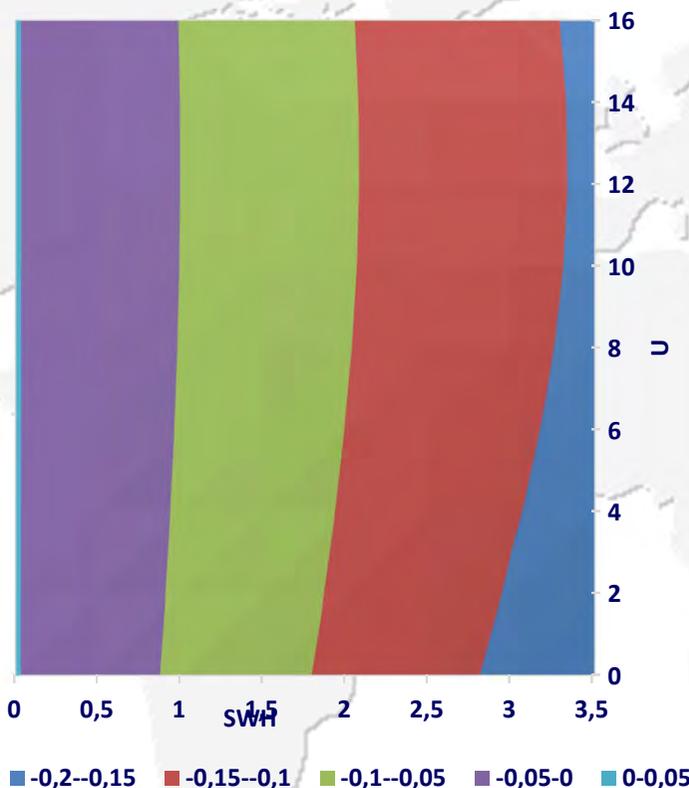


Результаты расчётов dh_{SSB} для Мирового океана по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (справа) за 2018 год

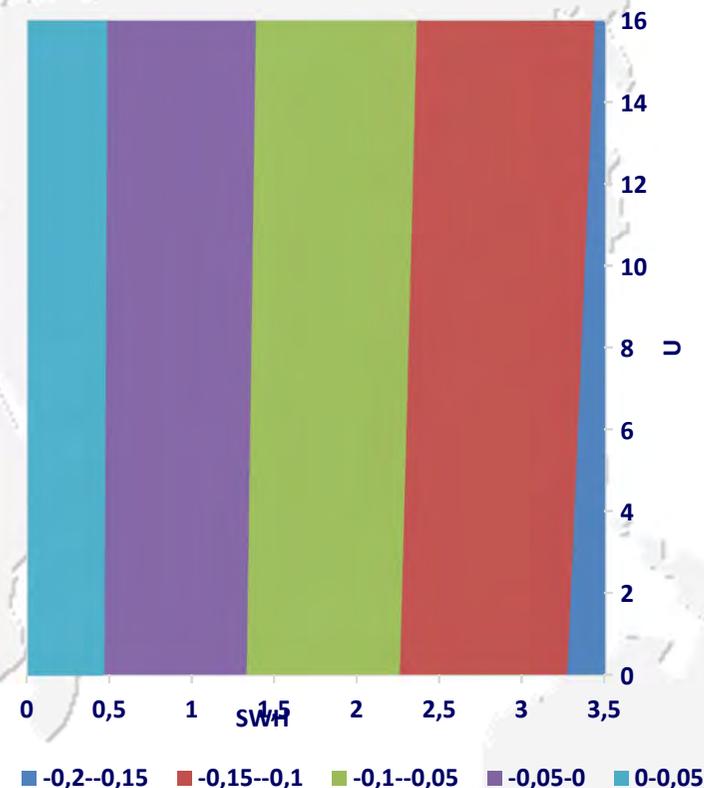


Параметрическая модель для российских космических аппаратов

Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Зависимость dh_{SSB} от SWH и U

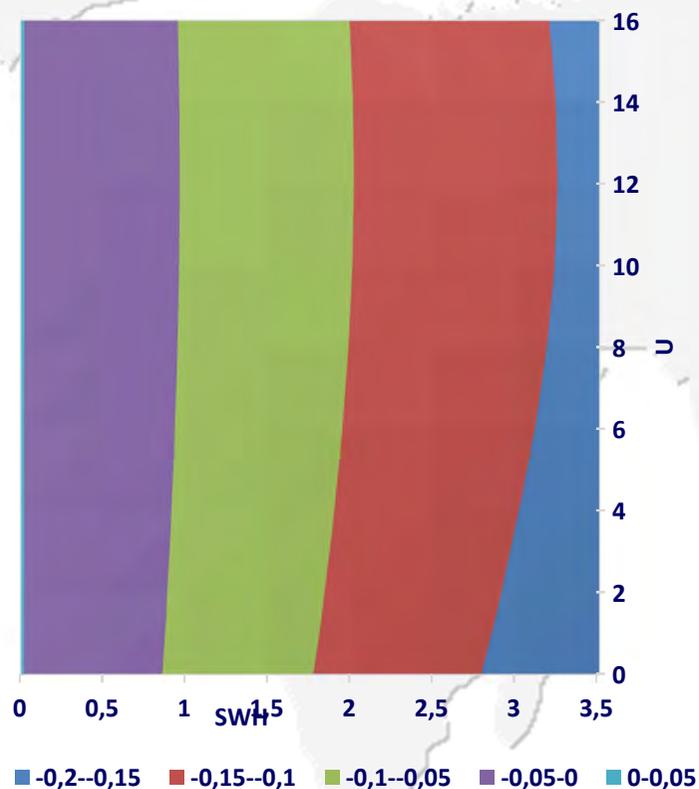


Результаты расчётов dh_{SSB} для Мирового океана по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (справа) за 2019 год



Параметрическая модель для российских космических аппаратов

Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Результаты расчётов dh_{SSB} для Мирового океана по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) за 2018–2019 годы



Параметрическая модель для российских космических аппаратов

$$dh_{SSB} = a_0 + h_{SWH} (a_1 + a_2 h_{SWH} + a_3 U + a_4 U^2)$$

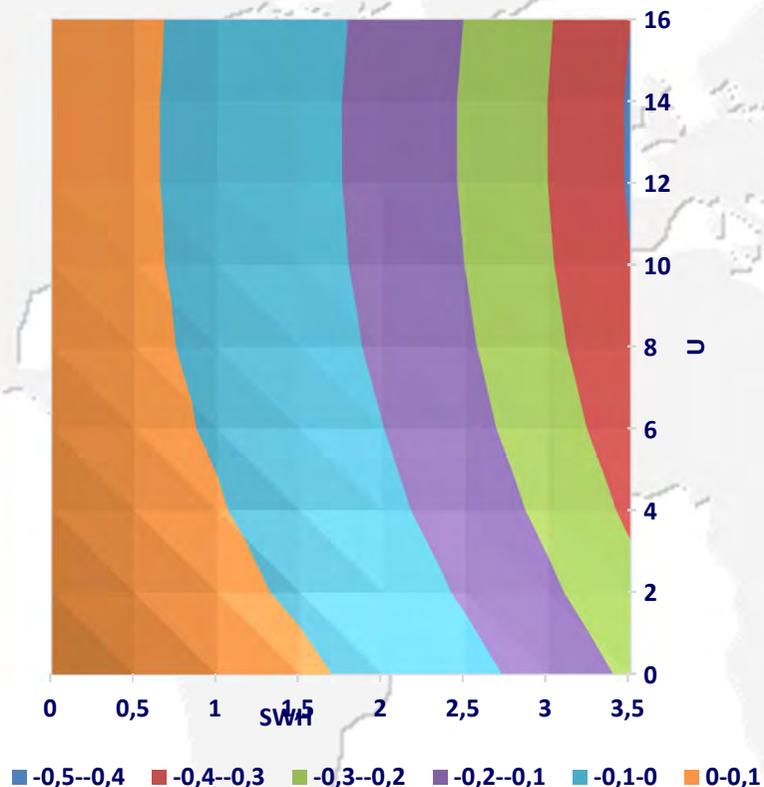
Результаты расчётов для Чёрного моря

	По точкам пересечения (метод 1)			По точкам вдоль треков изомаршрутной программы (метод 2)		
Временной интервал (год)	2018	2019	2018–2019	2018	2019	2018-2019
Количество точек	56	42	99	20 965	13 065	67 948
Коэффициенты модели						
a_0	0,02581	0,08109	0,05208	0,08064	-0,00763	0,07120
a_1	0,03785	-0,20239	-0,01144	-0,12543	-0,06024	-0,08921
a_2	-0,03065	0,03926	-0,01979	0,01009	0,00690	0,00322
a_3	-0,00840	-0,09299	-0,02091	-0,00347	-0,00455	-0,00054
a_4	0,00032	0,00540	0,00089	0,00018	0,00031	0,00004

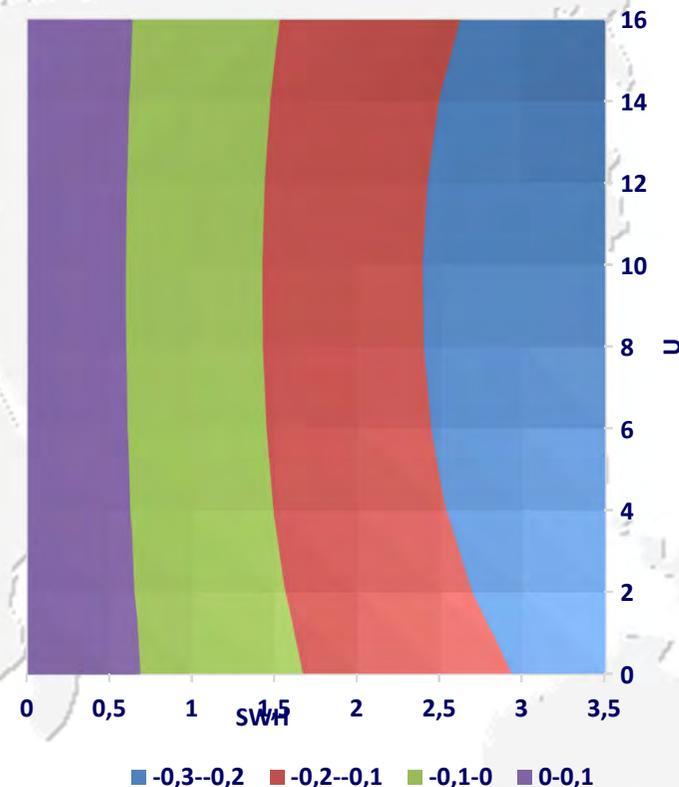


Параметрическая модель для российских космических аппаратов

Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



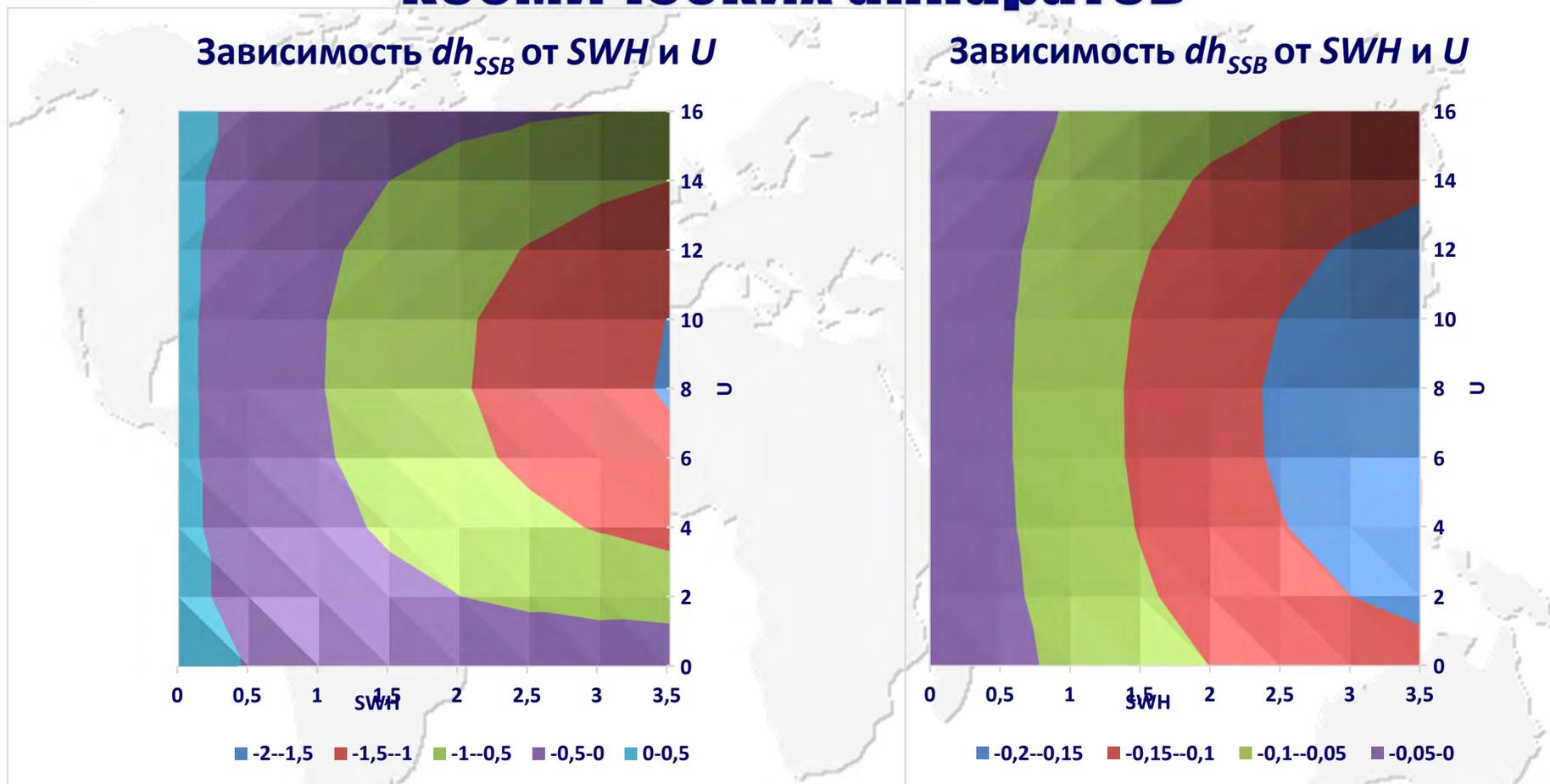
Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Результаты расчётов dh_{SSB} для Чёрного моря по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (справа) за 2018 год



Параметрическая модель для российских космических аппаратов



Результаты расчётов dh_{SSB} для Чёрного моря по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (справа) за 2019 год



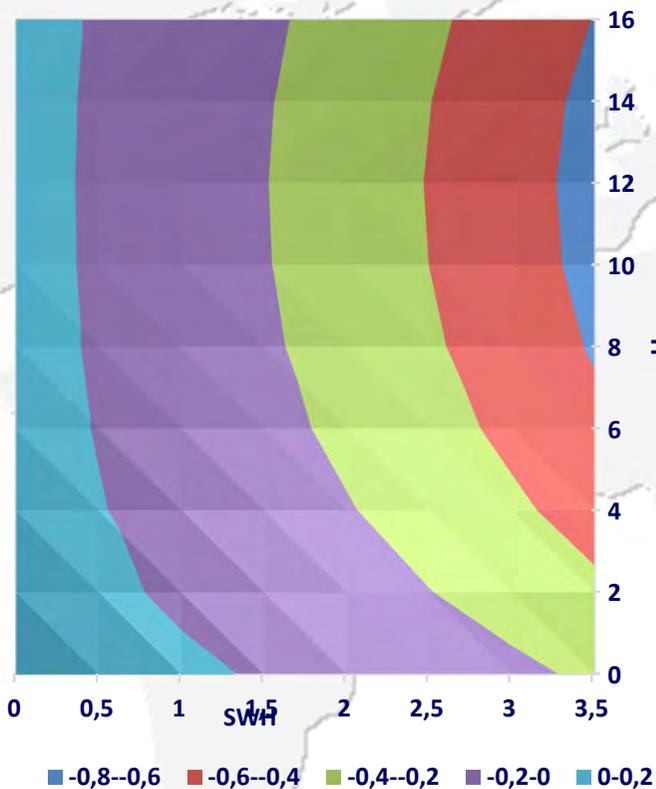
Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

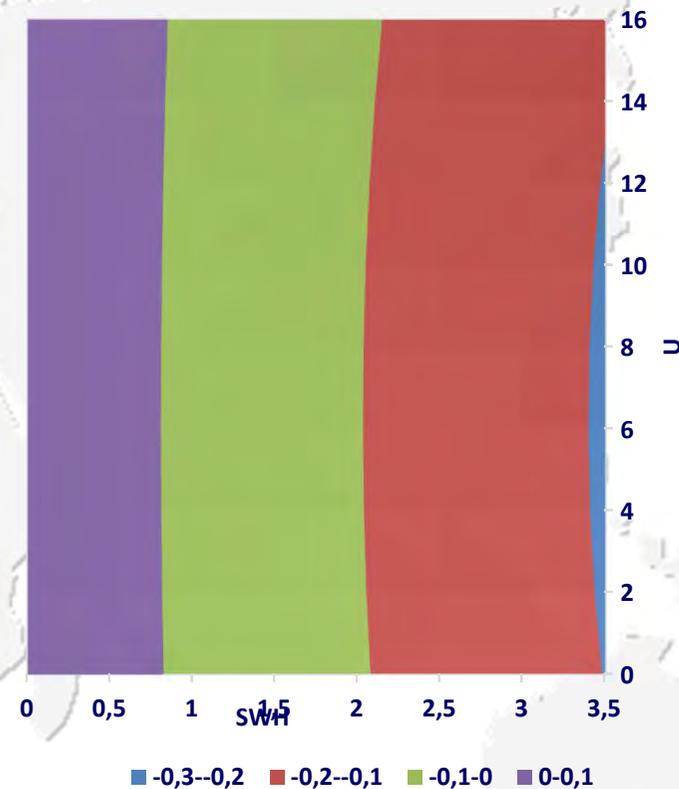


Параметрическая модель для российских космических аппаратов

Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Зависимость dh_{SSB} от SWH и U



Результаты расчётов dh_{SSB} для Чёрного моря по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (слева) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (справа) за 2018–2019 годы



Заключение

По результатам исследований, получены следующие результаты:

- Средняя разность dh_{SSB} для Мирового океана между 2018 г. и 2019 г. по коэффициентам, рассчитанным по точкам пересечения (метод 1) и по точкам вдоль треков изомаршрутной программы (метод 2), составляет $-1,32$ мм и $-27,94$ мм соответственно. Среднеквадратическое отклонение (СКО) для каждого метода – $3,95$ мм (метод 1) и $28,78$ мм (метод 2), коэффициент корреляции – $0,9997$ (метод 1) и $0,9993$ (метод 2). Такое различие обусловлено тем, что разность во времени между измерениями по методу 1 ограничивалась 10 сутками, а по методу 2 – кратное периоду изомаршрутных измерений, т.е. 27,54 суток.
- Средняя разность dh_{SSB} для Мирового океана между коэффициентами, рассчитанными методом 1 и методом 2 за 2018 г. и 2019 г. составляет $6,93$ мм и $-17,45$ мм соответственно. СКО – $14,12$ мм (2018 г.) и $19,01$ мм (2019 г.), коэффициент корреляции – $0,9981$ (2018 г.) и $0,9975$ (2019 г.). Показатели корреляции для обоих случаев, а также небольшая средняя разница и СКО, говорят о том, что данные методы могут использоваться независимо друг от друга, для определения поправки SSB .



Заключение

- Средняя разность dh_{SSB} между Мировым океаном и Чёрным морем по коэффициентами, рассчитанным по методу 1 за 2018 г. и 2019 г. составляет 19,49 мм и 460,52 мм соответственно. СКО – 90,99 мм и 622,63 мм, коэффициент корреляции – 0,8805 и 0,7616. Для Чёрного моря использовалось сравнительно малое количество информации (2018 г. – 56 точек; 2019 г. – 42 точки), что сказалось на таких показателях как средняя разность, СКО и коэффициент корреляции. Волновой режим в Мировом океане и Чёрном море различается между собой. Высота волн зыби (доминирующих волн) в Чёрном море меньше, чем в Мировом океане. Средняя значимая высота волны в Черном море составляет $\approx 0,9$ м, а в Мировом океане – ≈ 2 м.
- Средняя разность dh_{SSB} между Мировым океаном и Чёрным морем по коэффициентами, рассчитанным по методу 2 за 2018 г. и 2019 г. составляет 17,79 мм и 28,45 м соответственно. СКО – 53,79 мм и 34,54 мм, коэффициент корреляции – 0,9928 и 0,9491. Увеличение количества обрабатываемой информации улучшило результаты расчётов. Для внутренних и окраинных морей следует выбирать метод 2 для расчёта коэффициентов модели SSB.



Литература

1. *Jackson F.C.* The reflection of impulses from a nonlinear random sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 1979. Vol. 84. No. C8. P. 4939-4943. doi: 10.1029/JC084iC08p04939.
2. *Srokosz M.A.* On the joint distribution of surface elevation and slopes for a nonlinear random sea, with an application to radar altimetry // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 1986. Vol. 91. No.C1. P. 995-1006. doi: 10.1029/JC091iC01p00995.
3. *Lagerloef G.S.E.* Comment on “On the joint distribution of surface elevations and slopes for a nonlinear random sea, with an application for radar altimetry” by M.A. Srokosz // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 1987. Vol. 92. No.C3. P. 2985-2987. doi: 10.1029/JC092iC03p02985.
4. *Parsons C.L., Miller L.S.* A laboratory study of the electromagnetic bias of rough surface scattering by water waves // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1990. Vol. 28. No. 6. P. 1001-1011. doi: 10.1109/36.62624.
5. *Bar D.E., Agnon Y.* A fractal model for the sea state bias in radar altimetry. // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 1997. Vol. 4. No. 4. P. 213-222. doi: 10.5194/npg-4-213-1997.
6. *Peng F., Deng X.* Improving precision of high-rate altimeter sea level anomalies by removing the sea state bias and intra-1-Hz covariant error // *Remote Sensing of Environment.* 2020. Vol. 251. P. 112081. doi: 10.1016/j.rse.2020.112081.
7. *Pires N., Fernandes M.J., 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. P. 576. doi: 10.3390/rs8070576.



Спасибо за внимание



Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

