

Международный опыт калибровки данных спутниковой альтиметрии на стационарных и временных полигонах

С. А. Лебедев^{1,2,3}, И. В. Гусев^{1,4}

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

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Москва, Зеленоград, 124498, Россия

³ Майкопский государственный технологический университет
Майкоп, 385000, Россия

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

В настоящее время данные спутниковой альтиметрии стали главным источником информации о межгодовой изменчивости уровня Мирового океана и внутренних морей. Точность современных альтиметрических измерений высоты морской поверхности позволяет оценить скорость подъёма уровня Мирового океана в несколько миллиметров в год. Однако проведение высокоточных измерений высоты морской поверхности с борта космического аппарата в значительной степени зависит от калибровки альтиметрических измерений на специализированных полигонах, так как на результат измерений влияет множество факторов, связанных с аппаратурой, условиями распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, состоянием подстилающей поверхности и др. Концепция калибровки данных альтиметра включает сравнение *in situ* измерений уровня моря на полигоне калибровки с высотой морской поверхности, полученной в результате обработки измерений альтиметра над полигоном калибровки или вблизи него. В статье приводится обзор международного опыта калибровки данных спутниковой альтиметрии, который прошёл путь от простого сравнения спутниковых альтиметрических измерений с данными уровня постов до создания специализированных стационарных и временных полигонов. Этот опыт полезно использовать при разработке требований к перспективному полигону калибровки российской космической геодезической системы.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, полигон калибровки, высота морской поверхности

Одобрена к печати: 04.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35

Введение

В настоящее время данные спутниковой альтиметрии (СА) являются главным источником информации о межгодовой изменчивости уровня Мирового океана. Наблюдения СА дают неоценимый материал о глобальном уровне моря и его региональной изменчивости в глобальном масштабе. Согласно этим данным, с 1992 г. рост уровня Мирового океана составляет около $3 \pm 0,4$ мм/год (Ablain et al., 2017; Nerem et al., 2010, 2018). Точность подобных расчётов зависит от точности определения значений высоты морской поверхности (ВМП, *англ.* sea surface heights — SSH), полученных в результате обработки спутниковых альтиметрических измерений. За последние годы альтиметрические измерения ВМП эволюционировали как с развитием самих методов наблюдений и обработки данных, так и с ростом числа запускаемых космических аппаратов. Но несмотря на большой объём измерительных данных, достижение субмиллиметровой точности определения ВМП требует регулярного проведения калибровки данных СА на специализированных полигонах, так как результат измерений зависит от множества факторов, связанных с аппаратурой, условиями распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, состоянием подстилающей поверхности и др. Поэтому в настоящей статье проанализирован международный опыт создания и эксплуатации

стационарных и временных полигонов калибровки данных спутниковой альтиметрии в целях разработки требований к перспективному полигону калибровки российской космической геодезической системы.

Принцип калибровки данных спутниковой альтиметрии

В общем случае калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями прибора и размером измеряемой величины. Под калибровкой часто понимают процесс подстройки показаний выходной величины или индикации измерительного инструмента до достижения согласования между эталонной величиной на входе и результатом на выходе (с учётом оговорённой точности).

Концепция калибровки альтиметра включает сравнение *in situ* измерений уровня моря на полигоне калибровки с ВМП, полученной в результате обработки измерений альтиметра над полигоном калибровки или вблизи него (Bonnefond et al., 2011). Знание абсолютных отклонений между спутниковыми и *in situ* измерениями ВМП (SSH bias) для каждого спутника позволяет привести данные СА к единой системе отсчёта, объединить их и рассматривать как единый временной ряд для последующего анализа межгодовой изменчивости уровня моря.

Методы калибровки данных СА развивались вместе с совершенствованием самих альтиметров и увеличением программ спутниковых альтиметрических измерений. Они прошли путь от простого сравнения данных СА с данными уровенных постов до создания специализированных полигонов калибровки, которые могут быть как стационарными, так и временными.

Полигон калибровки представляет собой район морской акватории, обеспеченный детальной гравиметрической съёмкой и оборудованный комплексом различных измерительных средств берегового и морского базирования, а также комплексом средств сбора и обработки измерительной информации, необходимой для калибровки, оценки и контроля работы бортового альтиметра, микроволнового радиометра и другой аппаратуры.

Полигон калибровки обеспечивает проведение необходимых инструментальных измерений ВМП с привлечением измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), спутниковой лазерной дальнометрии, транспондеров, мареографов и другой измерительной аппаратуры.

Регулярность проведения калибровок даёт возможность отслеживать изменения показаний альтиметра во времени или его «дрейф». В свою очередь, калибровка поправок (на задержку сигнала в ионосфере и тропосфере и на состояние подстилающей поверхности) позволяет проанализировать тренды их межгодовых изменений и, как следствие, их влияние на расчёт скорости подъёма уровня Мирового океана. Например, одним из основных источников ошибок, влияющих на оценку уровня моря, является поправка на влажную тропосферу, рассчитываемую по данным бортового микроволнового радиометра (Ablain, Zawadzki, 2014). Как и у альтиметра, его показания также имеют инструментальный дрейф, вызванный, например, изменением внутренней температуры прибора. Поэтому поправка на влажную тропосферу будет также содержать компоненту, обусловленную инструментальной погрешностью радиометра, а рассчитанная по метеорологическим моделям может обеспечить хорошую оценку погрешности дрейфа радиометра.

Калибровка по данным уровенных постов

Первые эксперименты по оценке точности измерений альтиметра проводились путём сравнения спутниковых данных с данными уровенных постов, расположенных на побережье внутренних морей или крупных озёр, без привлечения ГНСС-измерений. Среди таких продолжительных экспериментов следует выделить:

- эксперимент на Великих озёрах (Верхнее, Гурон, Мичиган, Эри и Онтарио) США и Канады для калибровки измерений спутника TOPEX/Poseidon (Topography Experiment/Poseidon) (Morris, Gill, 1994);

- эксперимент в южной части Балтийского моря, где использовались данные уровенных постов Варнемюнде и Засниц для калибровки альтиметрических измерений спутников GEOSAT (Geodetic/Geophysical Satellite), TOPEX/Poseidon и ERS-1/2 (European Remote-Sensing Satellite) (Liebsch et al., 2002);
- эксперимент в Северном, Ирландском, Кельтском морях и в проливе Ла-Манш для калибровки измерений спутника ERS-2 по измерениям шести уровенных постов (Леруик, Абердин, Лоустофт, Ньюхейвен, Ньюлин, Шилдс), расположенных на берегах Великобритании (Dong et al., 2003).

Результаты калибровки спутниковых альтиметрических измерений ВМП относительно измерений на уровенных постах представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на уровенных постах

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм	
<i>Великие озёра (Верхнее, Гурон, Мичиган, Эри и Онтарио) (по данным уровенных постов) (Morris, Gill, 1994)</i>							
TOPEX/Poseidon	NRA-A	015	восходящий	MGDR-A	001–046	–150,1±24,3	
		076	нисходящий				
		117	восходящий				
		143	восходящий				
		152	нисходящий				
		228	нисходящий				
		254	нисходящий				
		015	восходящий				MGDR-B
	076	нисходящий					
	117	восходящий					
	143	восходящий					
	152	нисходящий					
	228	нисходящий					
	254	нисходящий					
	<i>Южная часть Балтийского моря (Liebsch et al., 2002)</i>						
	GEOSAT	GRA	027	нисходящий	GDR	001–040	–243,4±14,9
033			восходящий	–242,7±8,9			
ERS-1 Фаза С	RA	136	восходящий	REAPER	001–018	468,2±3,3	
		147	нисходящий			465,6±2,0	
ERS-1 Фаза G	RA	136	восходящий	REAPER	001–013	468,2±3,3	
		147	нисходящий			465,6±2,0	
TOPEX/Poseidon	NRA-A	323	восходящий	MGDR-B	010–224	–12,6±0,8	
ERS-2	RA	136	нисходящий	REAPER	001–036	61,9±3,3	
		147	восходящий			87,6±1,8	
<i>Северное, Ирландское, Кельтское моря и пролив Ла-Манш (Dong et al., 2003)</i>							
ERS-2	RA			REAPER	021–040	441,3±66,2	

Однако калибровки по данным уровенных постов имеют определённые недостатки, на пример связанные с необходимостью учёта современных вертикальных движений земной

коры, что требует проведения регулярных ГНСС-измерений на самих уровнях постах (Pfeffer, Allemand, 2016).

Стационарные полигоны калибровки

В идеальной ситуации полигон должен быть расположен в открытом океане на треке изо-маршрутной (повторяющейся) программы или, что ещё лучше, в месте пересечения восходящего и нисходящего треков. Расстояние от береговой линии должно быть более 20 км (половина пространственного разрешения бортового микроволнового радиометра на одной из рабочих частот), чтобы исключить влияние суши на данные бортового микроволнового радиометра, которые используются для расчёта поправки на влажную тропосферу при обработке альтиметрических измерений.

Чтобы избежать географически коррелированных ошибок при калибровке альтиметра, стационарные полигоны необходимо размещать в разных частях Мирового океана. Это обеспечит возможность учёта разнообразия океанических и атмосферных условий при калибровке данных СА.

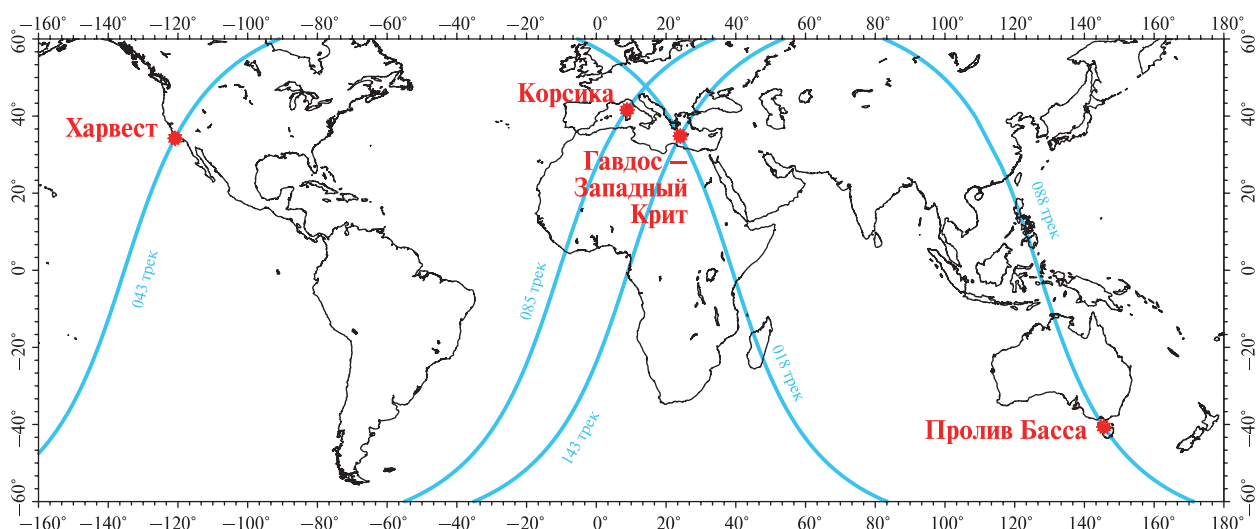


Рис. 1. Пример прохождения треков спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 через стационарные полигоны: Харвест, пролив Басса, Корсика и Гавдос – Западный Крит

Среди стационарных полигонов калибровки альтиметрических измерений различных спутниковых программ следует отметить: полигон Харвест, полигон в проливе Басса, полигон Корсика и полигон Гавдос – Западный Крит (рис. 1).

Полигон Харвест

Полигон расположен на одноимённой нефтедобывающей морской платформе Харвест (англ. Harvest) в Тихом океане примерно в 10 км от побережья Калифорнии возле западного входа в канал Санта-Барбара. Это первый полигон, предназначенный для калибровки альтиметрических измерений спутника TOPEX/Poseidon, который расположен вблизи 043-го восходящего трека (Christensen et al., 1994; Morris et al., 1995) (см. рис. 1). Он также использовался для калибровки данных альтиметрических измерений спутников Jason-1 и Jason-2 (Haines et al., 2003, 2010).

Морская платформа как полигон калибровки обладает рядом важных преимуществ. Она расположена достаточно далеко от берега, так что засвеченная альтиметром область при измерении в надир полностью совпадает с морской поверхностью. При этом сама платформа

слишком мала, чтобы существенно влиять на отражённый радиолокационный сигнал. Условия в районе платформы типичны для открытого океана. Значимая высота волны в акватории полигона в среднем составляет 2–3 м. И наконец, платформа находится в непосредственной близости от постояннодействующих ГНСС-станций, расположенных в Калифорнии и на западе США, измерения которых используются для определения геоцентрического положения альтиметрических спутников и самой платформы. Расположение полигона у побережья Калифорнии также привлекательно с точки зрения логистики (свободный доступ к платформе сотрудников, обслуживающих полигон, возможность использования дополнительного оборудования).

Полигон оснащён датчиками измерения уровня (барботажный, акустический и лазерный), лазерным измерителем волнения, метеостанцией, постоянно действующим ГНСС-приёмником и наземным микроволновым радиометром водяного пара (Gill et al., 1995). В октябре 1993 г. в дополнение к измерениям на платформе были проведены измерения на морском ГНСС-буе, расположенном вблизи 043-го восходящего трека на расстоянии 1,5 км от платформы (Born et al., 1994).

Отклонения альтиметрических измерений от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне Харвест, представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на полигоне Харвест (Born et al., 1994; Haines et al., 2010)

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
<i>По данным измерений уровня</i>						
TOPEX/Poseidon	NRA-A	043	восходящий	MGDR-B	001–235	+1±3
	NRA-B				236–364	+14±4
	Poseidon-1					-10±7
Jason-1	Poseidon-2			GDR-C	001–259	+94±2
Jason-2	Poseidon-3			GDR-T	001–050	+178±4
<i>По данным ГНСС-буя</i>						
TOPEX/Poseidon	NRA-A	043	восходящий	MGDR-B	042	-146±40
						-131±40

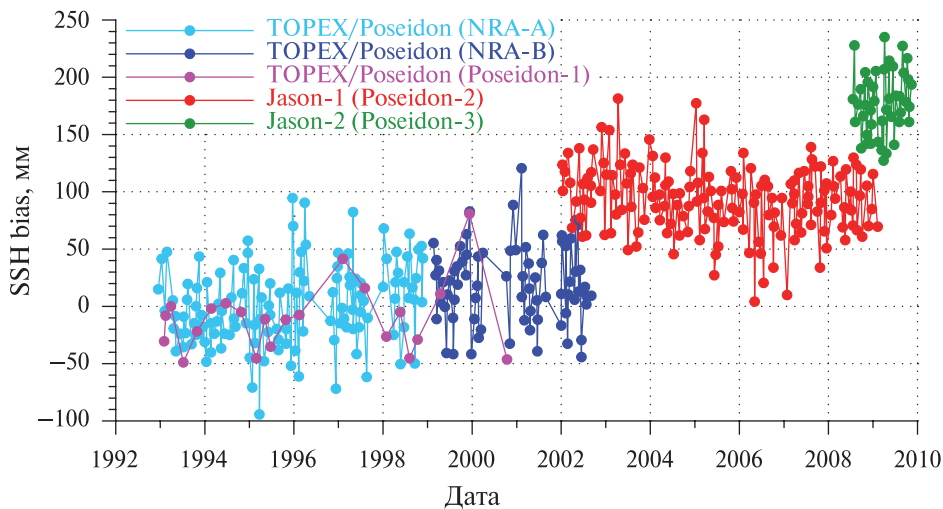


Рис. 2. Отклонения альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне Харвест (по данным (Born et al., 1994; Haines et al., 2010)). В скобках после названия спутника указано название альтиметра

Полигон расположен в проливе Басса, разделяющим Австралию и о. Тасмания и соединяющим Индийский и Тихий океаны. Калибровочную площадку, расположенную на юго-западной части пролива, пересекает 088-й нисходящий трек спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 (см. *рис. 1*) (White et al., 1994).

На расстоянии около 52 км от суши вдоль трека был расположен морской ГНСС-буй. Рядом с ним на расстоянии примерно 10 м размещался заякоренный океанографический буй, измеряющий температуру, солёность, давление и скорость течения. Ближе к берегу на расстояниях около 25 и 5 км от суши вдоль трека были расположены два закреплённых на глубине акустических измерителя течений. Датчики измерения уровня (акустические), метеостанция и ГНСС-приёмник находились в гавани порта Берни (город на северо-западе о. Тасмания) (Watson et al., 2003, 2004).

Таблица 3. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на полигоне в проливе Басса (Watson et al., 2011)

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
TOPEX/Poseidon	NRA-A	088	нисходящий	MGDR-B	001–235	$-14,9 \pm 2,1$
	NRA-B				236–364	$-6,0 \pm 3,1$
Jason-1	Poseidon-2			GDR-C	001–259	$+92,8 \pm 2,5$
Jason-2	Poseidon-3			GDR-T	001–079	$+171,9 \pm 3,7$

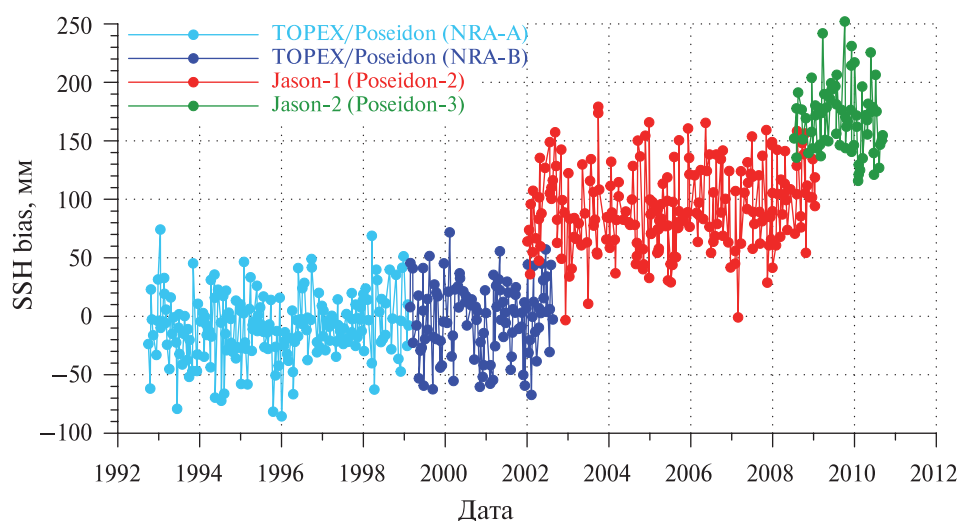


Рис. 3. Отклонения альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне в проливе Басса (по данным (Watson et al., 2011)). В скобках после названия спутника указано название альтиметра

Отклонения альтиметрических измерений от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне в проливе Басса, представлены в *табл. 3* и на *рис. 3*.

Полигон Корсика

Полигон Корсика расположен на юго-западной оконечности о. Корсика между г. Аяччо и м. Сенетоса (Bonfond et al., 2003a). Рядом с маяком Сенетоса на капитальной площадке был размещён пункт с ГНСС-приёмником, привязанный к системе отсчёта ITRF96 (*англ.* International Terrestrial Reference System, Международная земная система координат). Там же

была установлена метеорологическая станция, данные которой в основном использовались для вычисления «сухой» тропосферной поправки. Также привлекалась дополнительная информация с метеостанций Аяччо (около 40 км к северу от маяка) и Фигари (40 км к востоку).

Южнее маяка Сенетоса на западном побережье зал. Купабия были размещены два датчика измерения уровня моря (мареографы), третий располагался на юго-восточном побережье залива. В непосредственной близости от них находился геодезический репер, от которого оптическим нивелированием мареографы были привязаны к системе отсчёта ITRF96. Регулярные ГНСС-измерения и оптическое нивелирование позволили отслеживать высоту геодезических реперов с точностью не менее 1 см, а датчиков измерения уровня — не менее 5 мм.

Над каждым мареографом за полчаса до пролёта спутника и через полчаса после размещался морской ГНСС-буй. Сравнение ГНСС-измерений с измерениями мареографов обеспечило определение уровня моря со стандартным отклонением около 10 мм. Параметры волнения также измерялись с помощью морских ГНСС-буёв (Vonnefond et al., 2003a).

На территории военной базы Аспретто, расположенной примерно в 2 км от Аяччо, во время пролёта альтиметрического спутника развёртывалась французская передвижная станция спутниковой лазерной дальнометрии, по измерениям которой осуществлялось точное определение высоты его орбиты.

Близость суши и изрезанность береговой линии о. Корсика сильно влияет как на форму отражённых радиолокационных сигналов альтиметра, так и на точность расчёта поправки на влажность, рассчитываемую по данным бортового микроволнового радиометра. По этой причине для калибровки альтиметрических измерений выбирался участок вдоль трека на расстоянии 5–10 км от береговой линии.

Для этих целей использовался катамаран с двумя ГНСС-приёмниками, который при благоприятных погодных условиях работал в море в течение одного часа до времени пролёта спутника и часа после. Курс катамарана выбирался несколькими галсами вдоль 085-го восходящего и 130-го нисходящего треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 (пять галсов — в северо-восточном направлении и пять — в юго-западном) в полосе шириной 5,4 км на расстоянии до 20 км от береговой линии (Vonnefond et al., 2003b).

Таблица 4. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на полигоне Корсика (Vonnefond et al., 2019).

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
TOPEX/Poseidon	NRA-A	085	восходящий	MGDR-B	001–235	+24,5±8,3
	NRA-B				236–364	+24,1±3,7
	Poseidon-1					+11,9±9,7
Jason-1	Poseidon-2			GDR-E	001–259	+42,7±2,6
Jason-2	Poseidon-3			GDR-D	001–303	+16,2±2,3
Jason-3	Poseidon-3B			GDR-T	001–106	–11,0±3,7
ERS-2	RA	0130	нисходящий	REAPER	060–072	+673,2±19,4
EnviSat	RA-2			FMR-3.0	010–093	+491,4±5,7
SARAL	AltiKa			GDR-T	005–012	–66,5±4,6
CryoSat-2	SIRAL	2426 3563 4077 4794 5308	восходящий нисходящий восходящий нисходящий восходящий	G-POD-C	0005, 0018, 0031, 0044, 0057, 0070, 0083	+6,5±4,3
Sentinel-3A	SRAL	0741	нисходящий	PDGS	009–013	+9,2±5,2
Sentinel-3B					005–019	–14,1±5,0

В данной конфигурации полигона проводилась калибровка альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3. Для калибровки альтиметрических измерений спутников ERS-2, а в дальнейшем и других спутников: EnviSat (Environmental Satellite), SARAL (Satellite with ARGOS and ALtiKa), CryoSat-2 и Sentinel-3A/3B — полигон был расширен. В порту Аяччо был установлен дополнительный мареограф и заложен геодезический репер. Схема калибровки альтиметрических измерений этих спутников осталась неизменной: использование морских ГНСС-буёв, расположенных вблизи мареографов, и катамарана с двумя ГНСС-приёмниками.

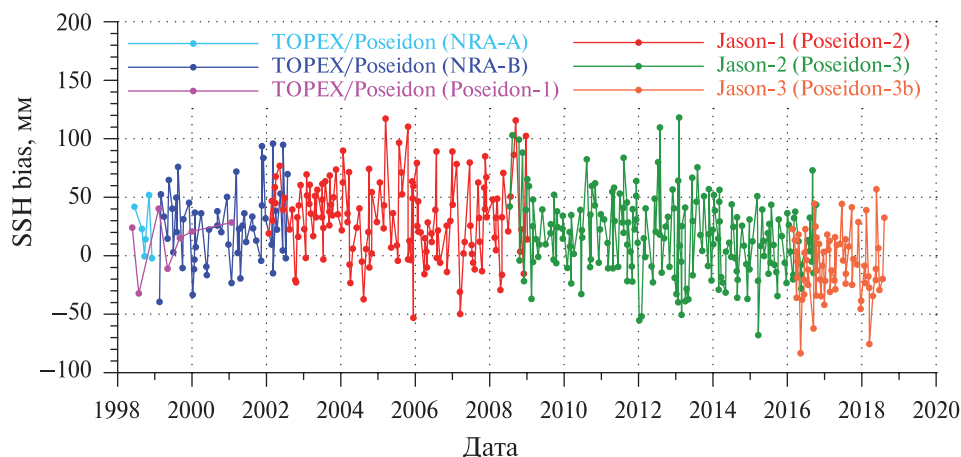


Рис. 4. Отклонения альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне Корсика (по данным (Bonfond et al., 2019)). В скобках после названия спутника указано название альтиметра

Отклонения альтиметрических измерений от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне Корсика, представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Полигон Гавдос – Западный Крит

Полигон расположен в Средиземном море на небольшом о. Гавдос в 50 км южнее о. Крит (Греция). На южной оконечности острова находится точка пересечения 018-го и 109-го треков спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3, а также проходят 0571-й трек спутника EnviSat и 0335-й трек спутника Sentinel-3A (Mertikas et al., 2018).

Для работы на этом полигоне были созданы: станция слежения Теофинос, уровенный пост Караве и станция Диас.

На станции слежения Теофинос были размещены: геодезический пункт с ГНСС-приёмником, станция слежения системы DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) и метеостанция. Также использовалась французская передвижная станция спутниковой лазерной дальнометрии.

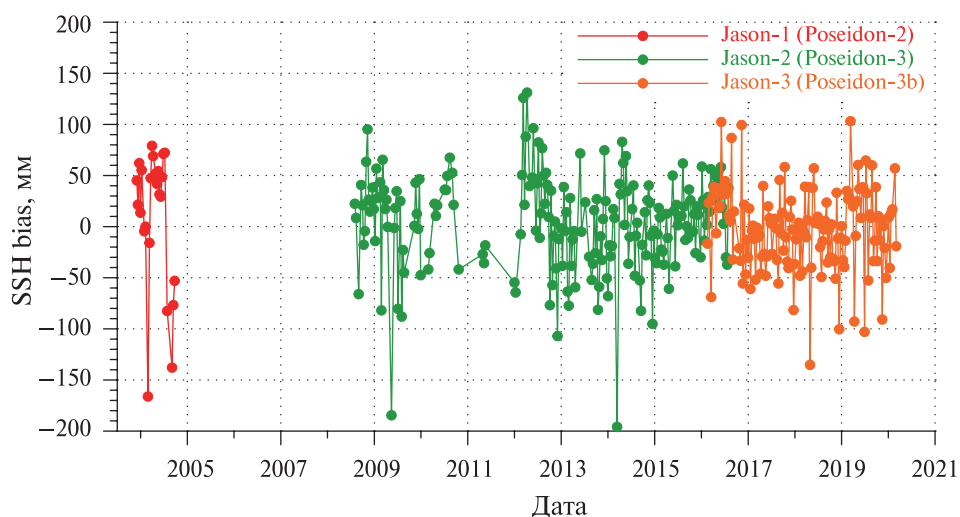
Уровенный пост Караве расположен рядом с одноимённым портом. В его состав входят ГНСС-приёмник, акустический и радарный датчики измерения уровня, датчик придонного давления, расположенный на глубине 10 м, который помимо уровня измеряет параметры волнения, и доплеровский измеритель течений. Все измерительные приборы были привязаны к системе ITRF2014.

На станции Диас, расположенной на 3,5 км южнее станции слежения Теофинос, в точке пересечения 018-го и 109-го треков спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 на высоте 20 м н. у. м. (над уровнем моря) установлены два ГНСС-приёмника и транспондер, представляющий собой радиоответчик — приёмопередающее устройство, посылающее сигнал в ответ на принятый сигнал (Hausleitner et al., 2012).

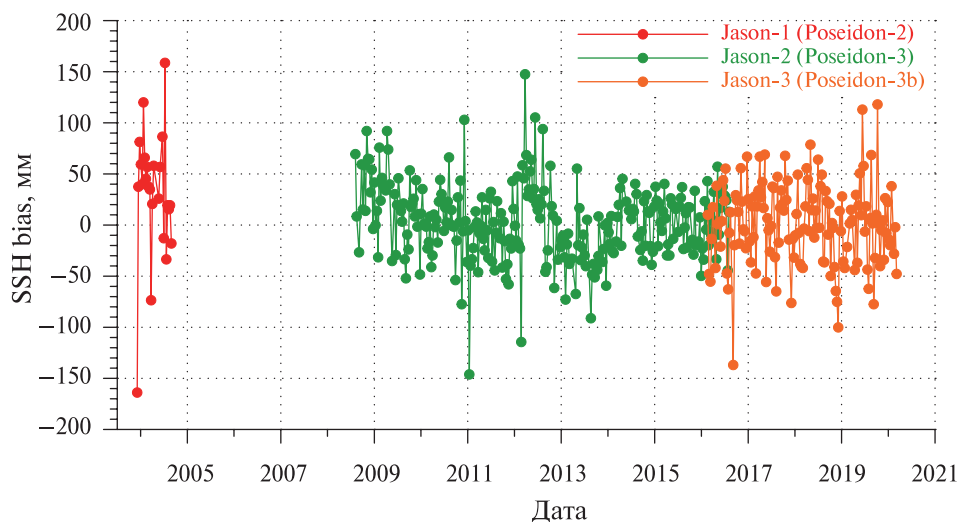
Как и на полигоне Корсика, на морских участках треков на полигоне Гавдос для калибровки использовался катер с ГНСС-приёмником на борту. Измерения высоты поверхности моря осуществлялись с помощью ГНСС-приёмника, совмещённого с профилометром, имеющим частоту дискретизации 2 с и точность измерений ± 2 мм (Mertikas et al., 2013).

Позднее полигон Гавдос был расширен за счёт установки в октябре 2015 г. в юго-западной части о. Крит на высоте 1100 м н.у.м. дополнительного транспондера, около которого были размещены два ГНСС-приёмника, две метеостанции и наземный микроволновый радиометр водяного пара. Дополнительно на южном побережье и на самой восточной оконечности о. Крит были установлены три ГНСС-приёмника и три датчика измерения уровня: акустический, радарный и мареограф. Это позволило расширить возможности полигона и провести калибровку альтиметрических измерений спутников SARAL, Sentinel-3B и HY-2A (Mertikas et al., 2013).

Отклонения альтиметрических измерений от *in situ* измерений ВМП (SSH bias), полученные по результатам калибровки на полигоне Гавдос – Западный Крит, и результаты калибровки с помощью транспондера представлены в табл. 5 и на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Отклонения альтиметрических измерений спутников Jason-1/2/3 от *in situ* измерений ВМП (SSH bias) для 018-го нисходящего трека (а) и 109-го восходящего (б), полученные по результатам калибровки на полигоне Гавдос – Западный Крит (по данным (Mertikas et al., 2018, 2020)). В скобках после названия спутника указано название альтиметра

Таблица 5. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) и измерений с применением транспондера на полигоне Гавдос – Западный Крит (Mertikas et al., 2013, 2016, 2018, 2020)

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
<i>По данным in situ измерений</i>						
Jason-1	Poseidon-2	018	нисходящий	GDR-E	070–101	+47,2±13,5
		109	восходящий			+35,3±13,4
Jason-2	Poseidon-3	018	нисходящий	GDR-D	002–303	+6,3±3,3
		109	восходящий			+3,3±2,1
Jason-3	Poseidon-3B	018	нисходящий	GDR-T	001–150	-4,3±3,4
		109	восходящий			-2,8±3,8
SARAL	AltiKa	0571	нисходящий	GDR-T	001–031	-40,5±9,4
Sentinel-3A	SRAL	0014	восходящий	SGDR-D	002–057	-11,9±6,9
		0278	нисходящий		002–052	-3,7±4,3
		0335	нисходящий		002–056	-8,1±4,9
Sentinel-3B	SRAL	0014	восходящий	SGDR-D	020–034	+4,6±5,6
		0071	нисходящий		020–038	+4,9±9,1
		0335	нисходящий			
HY-2A	ALT (HY)	0280	восходящий	SGDR	054–062	-45,1±4,2
<i>По данным транспондера</i>						
EnviSat	RA-2	0571	нисходящий	FMR-3.0	020–042	+364,2±94,5
Jason-2	Poseidon-3	018	нисходящий	SGDR-D	285–303	-12,1±6,2
Jason-3	Poseidon-3B	018	нисходящий	SGDR-T	005–151	+5,3±2,4
Sentinel-3A	SRAL	0014	восходящий	SGDR-D	003–056	+4,9±1,5
Sentinel-3B		0335	нисходящий		021–035	-3,5±3,5

Анализ результатов калибровки альтиметрических измерений показывает, что для основных стационарных полигонов, расположенных как в открытом океане, так и во внутренних морях, результаты существенно различаются (см. табл. 2–5). Также различаются результаты калибровки для восходящих и нисходящих треков на одном полигоне (см. табл. 5, рис. 5).

Это в первую очередь связано с точностью расчёта орбиты спутника, а также с алгоритмом расчёта поправок, необходимых для обработки данных СА. Последние имеют временной тренд, связанный с межгодовыми изменениями состояния атмосферы. По этой причине на всех стационарных полигонах, помимо калибровки измерений альтиметра, дополнительно ведётся калибровка и мониторинг основных поправок и сравнение результатов расчётов по различным данным (Andersen, Cheng, 2013).

Так, «сухая» тропосферная поправка, представленная в базах данных СА, рассчитывается по данным модели атмосферы. На стационарных полигонах при обработке данных альтиметрических измерений эта поправка рассчитывается по данным об атмосферном давлении, измеренном на локальной метеостанции. Поправка на влажность, рассчитанная по данным бортового микроволнового радиометра, сравнивается с расчётами по данным модели атмосферы и данным измерений интегрального содержания водяного пара наземным микроволновым радиометром водяного пара, ГНСС-измерений или радиозондом. Ионосферная поправка на стационарных полигонах рассчитывается по данным ГНСС-измерений или результатам модельных расчётов.

Результаты калибровки альтиметрических измерений на стационарных полигонах имеют явную географическую зависимость. Расширять число стационарных полигонов не всегда

возможно, так как оптимальных мест их расположения не так много. По этой причине данные альтиметрических измерений дополнительно калибруются на временных полигонах.

Временные полигоны калибровки

Калибровка альтиметрических измерений, кроме как на стационарных полигонах, осуществляется также и на временных, где проводить регулярные измерения затруднительно (например, вследствие наличия зимой льда на водной поверхности, сложной схемы логистики для проведения регулярных измерений и т. д.) либо время проведения калибровки не превышает всего нескольких циклов изомаршрутных программ одного или нескольких спутников.

Среди таких полигонов следует выделить:

- Пелагские о-ва, пролив между островами Лампедуза и Лампие, Средиземное море (Италия) (Ménard et al., 1994);
- м. Бегур, побережье Средиземного моря (Каталония, Испания) (Martinez-Benjamin et al., 2005, 2006);
- о. Ибица, Средиземное море (Испания) (Frappart et al., 2014, 2015; Martinez-Benjamin et al., 2005, 2006);
- оз. Эри (США, Канада) (Cheng et al., 2010; Shum et al., 2003);
- высокогорное оз. Иссык-Куль (Киргизия, Средняя Азия), 1607 м н.у.м. (Créaux et al., 2009, 2011, 2013, 2018);
- Лаккадивские о-ва, о. Каваратти, Индийский океан (Индия) (Babu et al., 2015);
- о. Цяньлиань, Жёлтое море (провинция Шаньдун, Китай) (Yang et al., 2017; Zhou et al., 2015);
- о. Хайнань, Южно-Китайское море (провинция Хайнань, Китай) (Chen et al., 2019);
- арх. Ваньшань, Южно-Китайское море (провинция Гуандун, Китай) (Zhai et al., 2020a, b).

Состав измерительной аппаратуры на каждом временном полигоне различен. Общий тип измерительной аппаратуры: один или несколько датчиков измерения уровня различных типов с обязательной привязкой их к геодезической системе координат по данным ГНСС-измерений, заякоренные или буксируемые ГНСС-буи и метеостанция. На всех временных полигонах отсутствуют измеритель морского волнения и наземный микроволновый радиометр водяного пара. Это не позволяет провести калибровку алгоритма расчёта поправки на состояния подстилающей поверхности и поправки на влажность.

Таблица 6. Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на временных полигонах

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
<i>Пелагские о-ва (Ménard et al., 1994)</i>						
TOPEX/ Poseidon	NRA-A	222	нисходящий	MGDR-A	004, 006, 012, 014, 016, 020	+10,1±3,7
	Poseidon-1				004, 007	-148,2±26,7
<i>Мыс Безур (Martinez-Benjamin et al., 2005, 2006)</i>						
TOPEX/ Poseidon	NRA-B	187	восходящий	MGDR-B	239	+65,2±32,1
					287	+37,4±32,6
Jason-1	Poseidon-2			IGDR	023	+37,1±32,1
						+105,2±103,5

Окончание табл. 6

Спутник	Альтиметр	Трек	Тип	Версия данных	Циклы	SSH bias, мм
<i>Остров Ибица, порт Ибица (Martinez-Benjamin et al., 2005, 2006)</i>						
Jason-1	Poseidon-2	187	восходящий	GDR-E	009–062	+169,1±33,4
		248	нисходящий			+177,4±24,5
<i>Остров Ибица, порт Сан-Антонио (Frappart et al., 2014, 2015)</i>						
Jason-1	Poseidon-2	187	восходящий	GDR-E	009–062	+119,2±23,4
		248	нисходящий			+122,4±27,4
<i>Озеро Эри (Cheng et al., 2010; Shum et al., 2003)</i>						
Jason-1	Poseidon-2	076	нисходящий	GDR-B	001–232	+13855,3±0,9
				GDR-C		+13856,4±0,9
					240–257	+13852,9±2,1
Jason-2	Poseidon-3			GDR-T	001–018	+13861,3±1,9
<i>Остров Ибица (по данным ГНСС-измерений) (Frappart et al., 2014, 2015)</i>						
Jason-2	Poseidon-3	187	восходящий	GDR-D	191	–10,2±9,3
SARAL	AltiKa	0315	нисходящий	GDR-T	006	–31,3±15,4
<i>Озеро Иссык-Куль (Créaux et al., 2009, 2011, 2013, 2018)</i>						
TOPEX/ Poseidon	NRA-A	131	восходящий	MGDR-B	001–250	–13,3±48,1
Jason-1	Poseidon-2			GDR-C	001–180	+96,5±40,3
Jason-2	Poseidon-3			GDR-D	003–023	+162,3±42,1
Jason-3	Poseidon-3b			GDR-T	005, 052	–28,1±40,2
GFO-1	GFO-RA	298	восходящий	GDR-C	001–150	+75,4±44,3
ENVISAT	RA-2	0223	нисходящий	GDR-B	001–040	+64,8±3,5
				GDR-C		+66,8±3,7
	0767	нисходящий	GDR-B	+59,8±3,6		
			GDR-C	+60,6±3,7		
Sentinel-3A	SRAL	0666	восходящий	GDR-T	009	–14,4±20,5
		0707	нисходящий			
<i>Лаккадивские о-ва (Babu et al., 2015)</i>						
SARAL	AltiKa	0539	нисходящий	GDR-T	001–011	–48,3±32,5
<i>Остров Цяньлиянь (Yang et al., 2017; Zhou et al., 2015)</i>						
Jason-2	Poseidon-3	153	восходящий	GDR-D	181–250	+21,0±5,9
SARAL	AltiKa	0753	нисходящий	GDR-T	001–019	–44,0±7,3
<i>Остров Хайнань (Chen et al., 2019)</i>						
Jason-2	Poseidon-3	114	нисходящий	GDR-D	192–263	–23,0±1,7
HY-2A	ALT (HY)	0093	нисходящий	IGDR	052–102	–255,0±62,0
<i>Архипелаг Ваньшань (Zhai et al., 2020a, b)</i>						
Jason-3	Poseidon-3b	153	восходящий	GDR-D	077, 078, 101	+20,7±49,7
Sentinel-3A	SRAL	0135	нисходящий	GDR-T		+30,1±39,4
		0234	восходящий			
HY-2A	ALT (HY)	0203	восходящий	IGDR		–150,0±2,0

Результаты калибровки альтиметрических измерений ВМП относительно *in situ* измерений (SSH bias) на временных полигонах представлены в табл. 6.

Заключение

Приведённый в статье анализ международного опыта проведения калибровки данных спутниковой альтиметрии иллюстрирует вклад развития методик калибровки данных спутниковой альтиметрии в совокупности с техническим оснащением полигонов калибровки в достигнутый на сегодняшний день уровень точности определения высоты морской поверхности.

Как было показано выше, методика калибровки данных спутниковой альтиметрии в настоящий момент представляет собой сложный технологический процесс, в котором используется широкий спектр измерительной аппаратуры. Калибровки спутниковых альтиметрических измерений позволили учесть инструментальные погрешности и уточнить методики расчёта поправок. В результате альтиметрические измерения были приведены к единой системе отсчёта, что дало возможность рассматривать их как единый временной ряд для анализа межгодовой изменчивости уровня моря.

Обработка всей совокупности доступной измерительной информации позволяет достичь субмиллиметрового уровня точности в определении ВМП, а следовательно, на таком же уровне отслеживать рост уровня Мирового океана. Учитывая, что его изменение влияет на социально-экономические процессы, особенно в прибрежных районах, существенно возрастает роль спутниковой альтиметрии как метода глобального мониторинга состояния Мирового океана.

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утверждённого Минобрнауки России (проект № 0145-2019-0004).

Литература

1. *Ablain M., Zawadzki L.* Error Characterization Report: Altimetry Measurements Errors at Climate Scales. CLS-DOS-NT-13-100. ESA, 2014. 25 p.
2. *Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A.* Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales // *Surveys in Geophysics*. 2017. V. 38. No. 1. P. 7–31. DOI: 10.1007/s10712-016-9389-8.
3. *Andersen O. B., Cheng Y.* Long term changes of altimeter range and geophysical corrections at altimetry calibration sites // *Advances in Space Research*. 2013. V. 51. No. 8. P. 1468–1477. DOI: 10.1016/j.asr.2012.11.027.
4. *Babu K. N., Shukla A. K., Suchandra A. B., Arun Kumar S. V. V., Bonnefond P., Testut L., Mehra P., Laurain O.* Absolute calibration of SARAL/AltiKa in Kavaratti during its initial calibration-validation phase // *Marine Geodesy*. 2015. V. 38(S1). P. 156–170. DOI: 10.1080/01490419.2015.1045639.
5. *Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Menard Y., Orsoni A., Jan G., Jeansou E.* (2003a) Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 261–284. DOI: 10.1080/714044521.
6. *Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Ménard Y., Orsoni A., Jeansou E., Haines B. J., Kubitschek D. G., Born G.* (2003b) Leveling the Sea Surface Using a GPS-Catamaran // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 319–334. DOI: 10.1080/714044524.
7. *Bonnefond P., Haines B. J., Watson C.* In situ absolute calibration and validation: a link from coastal to open-ocean altimetry // *Coastal altimetry* / eds. Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P., Benveniste J. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. P. 259–296. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_11.
8. *Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Guinle T., Féménias P.* Corsica: A 20-Yr multi-mission absolute altimeter calibration site // *Advances in Space Research*. 2019. DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.049 (In press).
9. *Born G. H., Parke M. E., Axelrad P., Gold K. L., Johnson J., Key K. W., Kubitschek D. G., Christensen E. J.* Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24517–24526. DOI: 10.1029/94JC00920.
10. *Chen C., Zhu J., Zhai W., Yan L., Zhao Y., Huang X., Yang W.* Absolute calibration of HY-2A and Jason-2 altimeters for sea surface height using GPS buoy in Qinglan, China // *J. Oceanology and Limnology*. 2019. V. 37. No. 5. P. 1533–1541. DOI: 10.1007/s13131-020-1599-8.
11. *Cheng K. C., Kuo C. Y., Tseng H. Z., Yi Y., Shum C. K.* Lake surface height calibration of Jason-1 and Jason-2 over the Great Lakes // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33(S1). P. 186–203. DOI: 10.1080/01490419.2010.487802.
12. *Christensen E. J., Haines B. J., Keihm S. J., Morris C. S., Norman R. A., Purcell G. H., Williams B. G., Wilson B. D., Born G. H., Parke M. E., Gill S. K., Shum C. K., Tapley B. D., Kolenkiewicz R., Nerem R. S.*

- Calibration of TOPEX/Poseidon at platform Harvest // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24465–24485. DOI: 10.1029/94JC01641.
13. Crétaux J. F., Calmant S., Romanovski V., Shabunin A., Lyard F., Bergé-Nguyen M., Cazenave A., Hernandez F., Perosanz F. An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia // *J. Geodesy*. 2009. V. 83. No. 8. P. 723–735. DOI: 10.1007/s00190-008-0289-7.
 14. Crétaux J. F., Calmant S., Romanovski V., Perosanz F., Tashbaeva S., Bonnefond P., Moreira D., Shum C. K., Nino F., Bergé-Nguyen M., Fleury S., Gegout P., Abarca Del Rio R., Maisongrande P. Absolute calibration of Jason radar altimeters from GPS kinematic campaigns over Lake Issykkul // *Marine Geodesy*. 2011. V. 34. No. 3–4. P. 291–318. DOI: 10.1080/01490419.2011.585110.
 15. Crétaux J. F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Romanovski V., Meysignac B., Perosanz F., Tashbaeva S., Arsena A., Fund F., Martignago N., Bonnefond P., Laurain O., Morrow R., Maisongrande P. Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul // *Advances in Space Research*. 2013. V. 51. No. 8. P. 1523–1541. DOI: 10.1016/j.asr.2012.06.039.
 16. Crétaux J. F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Jamangulova N., Satylkanov R., Lyard F., Perosanz F., Verron J., Montazem A. S., Le Guilcher G., Leroux D., Barrie J., Maisongrande P., Bonnefond P. Absolute calibration or validation of the altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan) // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 11. Art. No. 1679. 17 p. DOI: 10.3390/rs10111679.
 17. Dong X., Huang C., Woodworth P., Moore P., Bingley R. Absolute calibration of the ERS-2 altimeter using UK tide gauges // *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography* / eds. Hwang C., Shum C. K., Li J. IAG Symposia. V. 126. Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. P. 91–97. DOI: 10.1007/978-3-642-18861-9_11.
 18. Frappart F., Roussel N., Biancale R., Martinez Benjamin J. J., Perosanz F., Garate Pasquin J., Martin Davila J., Perez Gomez B., Gracia Gomez C., Lopez Bravo R., Tapia Gomez A., Berenguer Valles Casanova I., Gili Ripoll J. Preliminary results of the 2013 Ibiza calibration campaign of Jason 2 and SARAL altimeters // *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2014. P. 4473–4476. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947485.
 19. Frappart F., Roussel N., Biancale R., Martinez Benjamin J. J., Mercier F., Perosanz F., Garate Pasquin J., Martin Davila J., Perez Gomez B., Gracia Gomez C., Lopez Bravo R., Tapia Gomez A., Gili Ripoll J., Hernandez Pajares M., Salazar Lino M., Bonnefond P., Valles Casanova I. The 2013 Ibiza calibration campaign of Jason-2 and SARAL altimeters // *Marine Geodesy*. 2015. V. 38(S1). P. 219–232. DOI: 10.1080/01490419.2015.1008711.
 20. Gill S. K., Edwing R. F., Jones D. F., Mero T. N., Moss M. K., Samant M., Shih H. H., Stoney W. M. NOAA/ National ocean service platform Harvest instrumentation // *Marine Geodesy*. 1995. V. 18. No. 1–2. P. 49–67. DOI: 10.1080/15210609509379742.
 21. Haines B. J., Dong D., Born G. H., Gill S. K. The Harvest experiment: monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California offshore platform // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 239–259. DOI: 10.1080/714044520.
 22. Haines B. J., Desai S. D., Born G. H. The Harvest experiment: calibration of the climate data record from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and the ocean surface topography mission // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33(S1). P. 91–113. DOI: 10.1080/01490419.2010.491028.
 23. Hausleitner W., Moser F., Desjonqueres J. D., Boy F., Picot N., Weingrill J., Mertikas S., Daskalakis A. A new method of precise Jason-2 altimeter calibration using a microwave transponder // *Marine Geodesy*. 2012. V. 35(S1). P. 337–362. DOI: 10.1080/01490419.2012.718239.
 24. Liebsch G., Novotny K., Dietrich R., Shum C. K. Comparison of multimission altimetric sea-surface heights with tide gauge observations in the Southern Baltic Sea // *Marine Geodesy*. 2002. V. 25. No. 3. P. 213–234. DOI: 10.1080/01490410290051545.
 25. Martínez-Benjamin J. J., Martínez García M., Ortiz Castellón M. Á., Rodríguez Velasco G., Martín Dávila J., Garate Pasquin J., Bonnefond P., Pérez Gómez B., García Silva C. Calibration altimeter sites at cape of Begur and Ibiza Island // *Física de la Tierra*. 2005. V. 17. P. 33–45.
 26. Martinez-Benjamin J. J., Martinez-Garcia M., Martin-Davilab J., Garateb J., Talaya J., Ortiz M. A., Baron A., Bonnefond P. Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeter calibration campaigns in the western mediterranean // *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. 2006. No. 181. P. 52–57.
 27. Ménard Y., Jeansou E., Vincent P. Calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa: Additional results at Harvest // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24487–24504. DOI: 10.1029/94JC01300.
 28. Mertikas S. P., Daskalakis A., Tziavos I. N., Andersen O. B., Vergos G. S., Tripolitsiotis A., Zervakis V., Frantzis X., Parsinevelos P. Altimetry, bathymetry and geoid variations at the Gavdos permanent Cal/Val facility // *Advances in Space Research*. 2013. V. 51. No. 8. P. 1418–1437. DOI: 10.1016/j.asr.2012.10.021.
 29. Mertikas S. P., Zhou X., Qiao F., Daskalakis A., Lin M., Peng H., Tziavos I., Vergos G., Tripolitsiotis A., Frantzis X. First preliminary results for the absolute calibration of the Chinese HY-2 altimetric mission using the CRS1 calibration facilities in West Crete, Greece // *Advances in Space Research*. 2016. V. 57. No. 1. P. 78–95. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.016>.

30. *Mertikas S. P., Donlon C., Féménias P., Mavrocordatos C., Galanakis D., Tripolitsiotis A., Frantzis X., Tziavos I. N., Vergos G., Guinle T.* Fifteen years of Cal/Val service to reference altimetry missions: Calibration of satellite altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 10. Art. No. 1557. 40 p. DOI: 10.3390/rs10101557.
31. *Mertikas S., Tripolitsiotis A., Donlon C., Mavrocordatos C., Féménias P., Borde F., Frantzis X., Kokolakis C., Guinle T., Vergos G., Tziavos I. N., Cullen R.* The ESA Permanent Facility for Altimetry Calibration: Monitoring Performance of Radar Altimeters for Sentinel-3A, Sentinel-3B and Jason-3 Using Transponder and Sea-Surface Calibrations with FRM Standards // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 16. Art. No. 2642. 39 p. DOI: 10.3390/rs12162642.
32. *Morris C. S., Gill S. K.* Evaluation of the TOPEX/Poseidon altimeter system over the Great Lakes // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24527–24539. DOI: 10.1029/94JC01642.
33. *Morris C. S., DiNardo S. J., Christensen E. J.* Overview of the TOPEX/Poseidon Platform Harvest verification experiment // *Marine Geodesy*. 1995. V. 18. No. 1–2. P. 25–37. DOI: 10.1080/15210609509379740.
34. *Nerem R. S., Chambers D. P., Choe C., Mitchum G. T.* Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33(S1). P. 435–446. DOI: 10.1080/01490419.2010.491031.
35. *Nerem R. S., Beckley B. D., Fasullo J. T., Hamlington B. D., Masters D., Mitchum G. T.* Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era // *Proc. National Academy of Sciences*. 2018. V. 115. No. 9. P. 2022–2025. DOI: 10.1073/pnas.1717312115.
36. *Pfeffer J., Allemand P.* The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: A global synthesis of multisatellite altimetry, tide gauge data and GPS measurements // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016. V. 439. P. 39–47. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.01.027.
37. *Shum C., Yi Y., Cheng K., Kuo C., Braun A., Calmant S., Chambers D.* Calibration of Jason-1 Altimeter over Lake Erie // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 335–354. DOI: 10.1080/714044525.
38. *Watson C., Coleman R., White N., Church J., Govind R.* Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in Bass Strait, Australia // *Marine Geodesy*. 2003. V. 26. No. 3–4. P. 285–304. DOI: 10.1080/714044522.
39. *Watson C., White N., Coleman R., Church J., Morgan P., Govind R.* TOPEX/Poseidon and Jason-1: absolute calibration in Bass Strait, Australia // *Marine Geodesy*. 2004. V. 27. No. 1–2. P. 107–131. DOI: 10.1080/01490410490465373.
40. *Watson C., White N., Church J., Burgette R., Tregoning P., Coleman R.* Absolute calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2 // *Marine Geodesy*. 2011. V. 34. No. 3–4. P. 242–260. DOI: 10.1080/01490419.2011.584834.
41. *White N. J., Coleman R., Church J. A., Morgan P. J., Walker S. J.* A southern hemisphere verification for the TOPEX/Poseidon satellite altimeter mission // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. No. C12. P. 24505–24516. DOI: 10.1029/94JC01382.
42. *Yang L., Zhou X., Mertikas S. P., Zhu L., Yang L., Lei N.* First calibration results of Jason-2 and SARAL/AltiKa satellite altimeters from the Qianli Yan permanent Cal/Val facilities, China // *Advances in Space Research*. 2017. V. 59. No. 12. P. 2831–2842. DOI: 10.1016/j.asr.2017.02.044.
43. *Zhai W., Zhu J., Fan X., Yan L., Chen C., Tian Z.* (2020a) Preliminary calibration results for Jason-3 and Sentinel-3 altimeters in the Wanshan Islands // *J. Oceanology and Limnology*. 2020. 15 p. DOI: 10.1007/s00343-020-9251-1.
44. *Zhai W., Zhu J., Ma C., Fan X., Yan L., Wang H., Chen C.* (2020b) Measurement of the sea surface using a GPS towing-body in Wanshan area // *Acta Oceanologica Sinica*. 2020. V. 39. No. 5. P. 123–132. DOI: 10.1007/s13131-020-1599-8.
45. *Zhou X., Yang L., Lin M., Lei N., Tang Q., Mu B.* Absolute calibration of HY-2, Jason-2 and SARAL/AltiKa from China in-situ calibration site: Qian Li Yan // 2015 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2015). 2015. P. 3659–3662. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326616.

International experience in calibration of satellite altimetry data on the stationary and temporary calibration sites

S. A. Lebedev^{1,2,3}, I. V. Gusev^{1,4}

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

² *National Research University of Electronic Technology*
Zelenograd 124498, Moscow, Russia

³ *Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia*

⁴ *AO Central Research Institute for Machine Building*
Korolev 141070, Moscow Region, Russia

At present, satellite altimetry data are the main source of interannual variability in the sea level of the World Ocean and inland seas. The accuracy of present altimetric measurements of the sea surface height makes it possible to estimate the rate of rise in the level of the World Ocean to a few millimeters per year. However, high-precision measurements of sea surface heights from satellite are largely dependent on the calibration of altimetry measurements at specialized calibration sites, since the measurement result depends on many factors related to the equipment, the conditions of propagation of electromagnetic waves in the troposphere and ionosphere, the sea state bias, and etc. The concept of altimeter data calibration includes in-situ comparison of sea level measurements at the calibration site with the sea surface height obtained as a result of processing altimeter measurements above or near the calibration site. The article provides an overview of the international experience in the calibration of satellite altimetry data, which has gone from a simple comparison of satellite altimetry measurements with the data of level gauges to the creation of specialized stationary and temporary calibration sites. This experience is useful for the development of requirements for the prospective calibration range for the Russian space geodetic system.

Keywords: satellite altimetry, calibration site, sea surface height

Accepted: 04.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35

References

1. Ablain M., Zawadzki L., *Error Characterization Report: Altimetry Measurements Errors at Climate Scales*, CLS-DOS-NT-13-100, ESA, 2014, 25 p.
2. Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A., Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales, *Surveys in Geophysics*, 2017, Vol. 38, No. 1, pp. 7–31, DOI: 10.1007/s10712-016-9389-8.
3. Andersen O. B., Cheng Y., Long term changes of altimeter range and geophysical corrections at altimetry calibration sites, *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 51, No. 8. pp. 1468–1477, DOI: 10.1016/j.asr.2012.11.027.
4. Babu K. N., Shukla A. K., Suchandra A. B., Arun Kumar S. V. V., Bonnefond P., Testut L., Mehra P., Laurain O., Absolute calibration of SARAL/AltiKa in Kavaratti during its initial calibration-validation phase, *Marine Geodesy*, 2015, Vol. 38(S1), pp. 156–170, DOI: 10.1080/01490419.2015.1045639.
5. Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Menard Y., Orsoni A., Jan G., Jeansou E. (2003a), Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 261–284, DOI: 10.1080/714044521.
6. Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Ménard Y., Orsoni A., Jeansou E., Haines B. J., Kubitschek D. G., Born G. (2003b), Leveling the Sea Surface Using a GPS-Catamaran, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 319–334, DOI: 10.1080/714044524.
7. Bonnefond P., Haines B. J., Watson C., In situ absolute calibration and validation: a link from coastal to open-ocean altimetry, In: *Coastal altimetry*, Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P., Benveniste J. (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer, 2011, pp. 259–296, DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_11.
8. Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Guinle T., Féménias P., Corsica: A 20-Yr multi-mission absolute altimeter calibration site, *Advances in Space Research*, 2019, DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.049 (In press).

9. Born G. H., Parke M. E., Axelrad P., Gold K. L., Johnson J., Key K. W., Kubitschek D. G., Christensen E. J., Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24517–24526, DOI: 10.1029/94JC00920.
10. Chen C., Zhu J., Zhai W., Yan L., Zhao Y., Huang X., Yang W., Absolute calibration of HY-2A and Jason-2 altimeters for sea surface height using GPS buoy in Qinglan, China, *J. Oceanology and Limnology*, 2019, Vol. 37, No. 5, pp. 1533–1541, DOI: 10.1007/s13131-020-1599-8.
11. Cheng K. C., Kuo C. Y., Tseng H. Z., Yi Y., Shum C. K., Lake surface height calibration of Jason-1 and Jason-2 over the Great Lakes, *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33(S1), pp. 186–203, DOI: 10.1080/01490419.2010.487802.
12. Christensen E. J., Haines B. J., Keihm S. J., Morris C. S., Norman R. A., Purcell G. H., Williams B. G., Wilson B. D., Born G. H., Parke M. E., Gill S. K., Shum C. K., Tapley B. D., Kolenkiewicz R., Nerem R. S., Calibration of TOPEX/Poseidon at platform Harvest, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24465–24485, DOI: 10.1029/94JC01641.
13. Crétaux J. F., Calmant S., Romanovski V., Shabunin A., Lyard F., Bergé-Nguyen M., Cazenave A., Hernandez F., Perosanz F., An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, No. 8, pp. 723–735, DOI: 10.1007/s00190-008-0289-7.
14. Crétaux J. F., Calmant S., Romanovski V., Perosanz F., Tashbaeva S., Bonnefond P., Moreira D., Shum C. K., Nino F., Bergé-Nguyen M., Fleury S., Gegout P., Abarca Del Rio R., Maisongrande P., Absolute calibration of Jason radar altimeters from GPS kinematic campaigns over Lake Issykkul, *Marine Geodesy*, 2011, Vol. 34, No. 3–4, pp. 291–318, DOI: 10.1080/01490419.2011.585110.
15. Crétaux J. F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Romanovski V., Meyssignac B., Perosanz F., Tashbaeva S., Arsena A., Fund F., Martignago N., Bonnefond P., Laurain O., Morrow R., Maisongrande P., Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul, *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 51, No. 8, pp. 1523–1541, DOI: 10.1016/j.asr.2012.06.039.
16. Crétaux J. F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Jamangulova N., Satylkanov R., Lyard F., Perosanz F., Verron J., Montazem A. S., Le Guilcher G., Leroux D., Barrie J., Maisongrande P., Bonnefond P., Absolute calibration or validation of the altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan), *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 11, Art. No. 1679, 17 p., DOI: 10.3390/rs10111679.
17. Dong X., Huang C., Woodworth P., Moore P., Bingley R., Absolute calibration of the ERS-2 altimeter using UK tide gauges, In: *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*, Hwang C., Shum C. K., Li J. (eds.), IAG Symposia, Vol. 126, Berlin; Heidelberg: Springer, 2003, pp. 91–97, DOI: 10.1007/978-3-642-18861-9_11.
18. Frappart F., Roussel N., Biancale R., Martinez Benjamin J. J., Perosanz F., Garate Pasquin J., Martin Davila J., Perez Gomez B., Gracia Gomez C., Lopez Bravo R., Tapia Gomez A., Berenguer Valles Casanova I., Gili Ripoll J., Preliminary results of the 2013 Ibiza calibration campaign of Jason 2 and SARAL altimeters, *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2014, pp. 4473–4476, DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947485.
19. Frappart F., Roussel N., Biancale R., Martinez Benjamin J. J., Mercier F., Perosanz F., Garate Pasquin J., Martin Davila J., Perez Gomez B., Gracia Gomez C., Lopez Bravo R., Tapia Gomez A., Gili Ripoll J., Hernandez Pajares M., Salazar Lino M., Bonnefond P., Valles Casanova I., The 2013 Ibiza calibration campaign of Jason-2 and SARAL altimeters, *Marine Geodesy*, 2015, Vol. 38(S1), pp. 219–232, DOI: 10.1080/01490419.2015.1008711.
20. Gill S. K., Edwing R. F., Jones D. F., Mero T. N., Moss M. K., Samant M., Shih H. H., Stoney W. M., NOAA/National ocean service platform Harvest instrumentation, *Marine Geodesy*, 1995, Vol. 18, No. 1–2, pp. 49–67, DOI: 10.1080/15210609509379742.
21. Haines B. J., Dong D., Born G. H., Gill S. K., The Harvest experiment: monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California offshore platform, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 239–259, DOI: 10.1080/714044520.
22. Haines B. J., Desai S. D., Born G. H., The Harvest experiment: calibration of the climate data record from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and the ocean surface topography mission, *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33(S1), pp. 91–113, DOI: 10.1080/01490419.2010.491028.
23. Hausleitner W., Moser F., Desjonquieres J. D., Boy F., Picot N., Weingrill J., Mertikas S., Daskalakis A., A new method of precise Jason-2 altimeter calibration using a microwave transponder, *Marine Geodesy*, 2012, Vol. 35(S1), pp. 337–362, DOI: 10.1080/01490419.2012.718239.
24. Liebsch G., Novotny K., Dietrich R., Shum C. K., Comparison of multimission altimetric sea-surface heights with tide gauge observations in the Southern Baltic Sea, *Marine Geodesy*, 2002, Vol. 25, No. 3, pp. 213–234, DOI: 10.1080/01490410290051545.
25. Martínez-Benjamín J. J., Martínez García M., Ortiz Castellón M. Á., Rodríguez Velasco G., Martín Dávila J., Garate Pasquin J., Bonnefond P., Pérez Gómez B., García Silva C., Calibration altimeter sites at cape of Begur and Ibiza Island, *Física de la Tierra*, 2005, Vol. 17, pp. 33–45.
26. Martinez-Benjamin J. J., Martinez-Garcia M., Martin-Davilab J., Garateb J., Talaya J., Ortiz M. A., Baron A., Bonnefond P., Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeter calibration campaigns in the western Mediterranean, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 2006, No. 181, pp. 52–57.

27. Ménard Y., Jeansou E., Vincent P., Calibration of the TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa: Additional results at Harvest, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24487–24504, DOI: 10.1029/94JC01300.
28. Mertikas S. P., Daskalakis A., Tziavos I. N., Andersen O. B., Vergos G. S., Tripolitsiotis A., Zervakis V., Frantzis X., Partsinevelos P., Altimetry, bathymetry and geoid variations at the Gavdos permanent Cal/Val facility, *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 51, No. 8, pp. 1418–1437, DOI: 10.1016/j.asr.2012.10.021.
29. Mertikas S. P., Zhou X., Qiao F., Daskalakis A., Lin M., Peng H., Tziavos I., Vergos G., Tripolitsiotis A., Frantzis X., First preliminary results for the absolute calibration of the Chinese HY-2 altimetric mission using the CRS1 calibration facilities in West Crete, Greece, *Advances in Space Research*, 2016, Vol. 57, No. 1, pp. 78–95, available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.016>.
30. Mertikas S. P., Donlon C., Féménias P., Mavrocordatos C., Galanakis D., Tripolitsiotis A., Frantzis X., Tziavos I. N., Vergos G., Guinle T., Fifteen years of Cal/Val service to reference altimetry missions: Calibration of satellite altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 10, Art. No. 1557, 40 p., DOI: 10.3390/rs10101557.
31. Mertikas S., Tripolitsiotis A., Donlon C., Mavrocordatos C., Féménias P., Borde F., Frantzis X., Kokolakis C., Guinle T., Vergos G., Tziavos I. N., Cullen R., The ESA Permanent Facility for Altimetry Calibration: Monitoring Performance of Radar Altimeters for Sentinel-3A, Sentinel-3B and Jason-3 Using Transponder and Sea-Surface Calibrations with FRM Standards, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 16, Art. No. 2642, 39 p., DOI: 10.3390/rs12162642.
32. Morris C. S., Gill S. K., Evaluation of the TOPEX/Poseidon altimeter system over the Great Lakes, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24527–24539, DOI: 10.1029/94JC01642.
33. Morris C. S., DiNardo S. J., Christensen E. J., Overview of the TOPEX/Poseidon Platform Harvest verification experiment, *Marine Geodesy*, 1995, Vol. 18, No. 1–2, pp. 25–37, DOI: 10.1080/15210609509379740.
34. Nerem R. S., Chambers D. P., Choe C., Mitchum G. T., Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions, *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33(S1), pp. 435–446, DOI: 10.1080/01490419.2010.491031.
35. Nerem R. S., Beckley B. D., Fasullo J. T., Hamlington B. D., Masters D., Mitchum G. T., Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proc. National Academy of Sciences*, 2018, Vol. 115, No. 9, pp. 2022–2025, DOI: 10.1073/pnas.1717312115.
36. Pfeffer J., Allemand P., The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: A global synthesis of multisatellite altimetry, tide gauge data and GPS measurements, *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, Vol. 439, pp. 39–47, DOI: 10.1016/j.epsl.2016.01.027.
37. Shum C., Yi Y., Cheng K., Kuo C., Braun A., Calmant S., Chambers D., Calibration of Jason-1 Altimeter over Lake Erie, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 335–354, DOI: 10.1080/714044525.
38. Watson C., Coleman R., White N., Church J., Govind R., Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in Bass Strait, Australia, *Marine Geodesy*, 2003, Vol. 26, No. 3–4, pp. 285–304, DOI: 10.1080/714044522.
39. Watson C., White N., Coleman R., Church J., Morgan P., Govind R., TOPEX/Poseidon and Jason-1: absolute calibration in Bass Strait, Australia, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, No. 1–2, pp. 107–131, DOI: 10.1080/01490410490465373.
40. Watson C., White N., Church J., Burgette R., Tregoning P., Coleman R., Absolute calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2, *Marine Geodesy*, 2011, Vol. 34, No. 3–4, pp. 242–260, DOI: 10.1080/01490419.2011.584834.
41. White N. J., Coleman R., Church J. A., Morgan P. J., Walker S. J., A southern hemisphere verification for the TOPEX/Poseidon satellite altimeter mission, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. C12, pp. 24505–24516, DOI: 10.1029/94JC01382.
42. Yang L., Zhou X., Mertikas S. P., Zhu L., Yang L., Lei N., First calibration results of Jason-2 and SARAL/AltiKa satellite altimeters from the Qianli Yan permanent Cal/Val facilities, China, *Advances in Space Research*, 2017, Vol. 59, No. 12, pp. 2831–2842, DOI: 10.1016/j.asr.2017.02.044.
43. Zhai W., Zhu J., Fan X., Yan L., Chen C., Tian Z. (2020a), Preliminary calibration results for Jason-3 and Sentinel-3 altimeters in the Wanshan Islands, *J. Oceanology and Limnology*, 2020, 15 p., DOI: 10.1007/s00343-020-9251-1.
44. Zhai W., Zhu J., Ma C., Fan X., Yan L., Wang H., Chen C. (2020b), Measurement of the sea surface using a GPS towing-body in Wanshan area, *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, Vol. 39, No. 5, pp. 123–132, DOI: 10.1007/s13131-020-1599-8.
45. Zhou X., Yang L., Lin M., Lei N., Tang Q., Mu B., Absolute calibration of HY-2, Jason-2 and SARAL/AltiKa from China in-situ calibration site: Qian Li Yan, *2015 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS-2015)*, 2015, pp. 3659–3662, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326616.