

# Особенности обработки данных спутниковой альтиметрии на акватории Белого, Баренцева и Карского морей

Сергей А. Лебедев



Геофизический центр РАН, Москва, Россия  
lebedev@wccb.ru



Институт космических исследований РАН, Москва, Россия  
Sergey\_a\_lebedev@mail.ru

Около 90% всей площади арктического шельфа России, составляющего 5,2–6,2 млн км<sup>2</sup>, приходится на перспективные нефтегазоносные области. В том числе 2 млн км<sup>2</sup> – в Западной Арктике на шельфе Баренцева и Карского морей (включая Обскую и Тазовскую губы), где потенциальные ресурсы углеводородного сырья составляют 50–60 млрд м<sup>3</sup>. Даже при низкой геологической и геофизической изученности на шельфе Баренцева моря открыто 11 месторождений, в том числе 4 нефтяных (Приразломное, Долгинское, Варандейское, Медьное), 3 газовых (Мурманское, Лудловское, Северо-Кильдинское), 3 газоконденсатных (Штокмановское, Поморское, Ледовое) и 1 нефтегазоконденсатное (Северо-Гуляевское). Одно только Штокмановское месторождение – крупнейшее в мире, содержит около 4000 млрд м<sup>3</sup> газа. В акватории Карского моря открыты не менее

колоссальные по объему газоконденсатные месторождения – Ленинградское и Русановское. Сегодня освоение Арктики требует новых подходов, обеспечивающих рациональное недропользование и охрану природы на основе современной науки и технологий, прежде использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спутниковая альтиметрия в настоящее время является единственным методом ДЗЗ, который позволяет исследовать уровень моря, как Мирового океана, так и морей арктического шельфа Российской Федерации (в первую очередь Белого, Баренцева и Карского морей). Эти моря характеризуются сложными гидродинамическими, приливными, ледовыми и метеорологическими режимами, что обуславливает особенности обработки данных спутниковой альтиметрии для

## Данные спутниковой альтиметрии

Для анализа гидрологического режима Белого, Баренцева и Карского морей наиболее оптимальными являются данные спутников ERS-1/2 (E1/2), Envisat (En) и SARAL/AltiKa (S/A) с периодом повторения изомаршрутного цикла 35 дней, а для части Белого моря (бассейн, Онежский и Двинский заливы) – данные спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2 (J1/2/3) с периодом повторения изомаршрутного цикла 9,9 суток. Массив данных спутника E1 представляет собой непрерывный но длинный по времени ряд измерений Фазы С (04/1992 – 08/2002) с возможностью его продления данными спутника J1 (12/2001 – 02/2009), спутника J2 (06/2008 – настоящее время) и спутника J3 (01/2016 – настоящее время). Массив данных спутника T/P представляет собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (08/1992 – 08/2002) с возможностью его продления данными спутника J1 (12/2001 – 02/2009), спутника J2 (06/2008 – настоящее время) и спутника J3 (01/2016 – настоящее время). Обработка данных спутников T/P и J1/2 проводилась с применением программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) – с учетом всех необходимых поправок (поправки на влажность, сухой поправки, ионосферной поправки, систематической поправки и т.д.). Данные альтиметрических измерений выше перечисленных спутников представлены в Таблицах 4–5, где желтым цветом выделены, используемые при расчете ошибки расчета орбиты и систематической ошибки

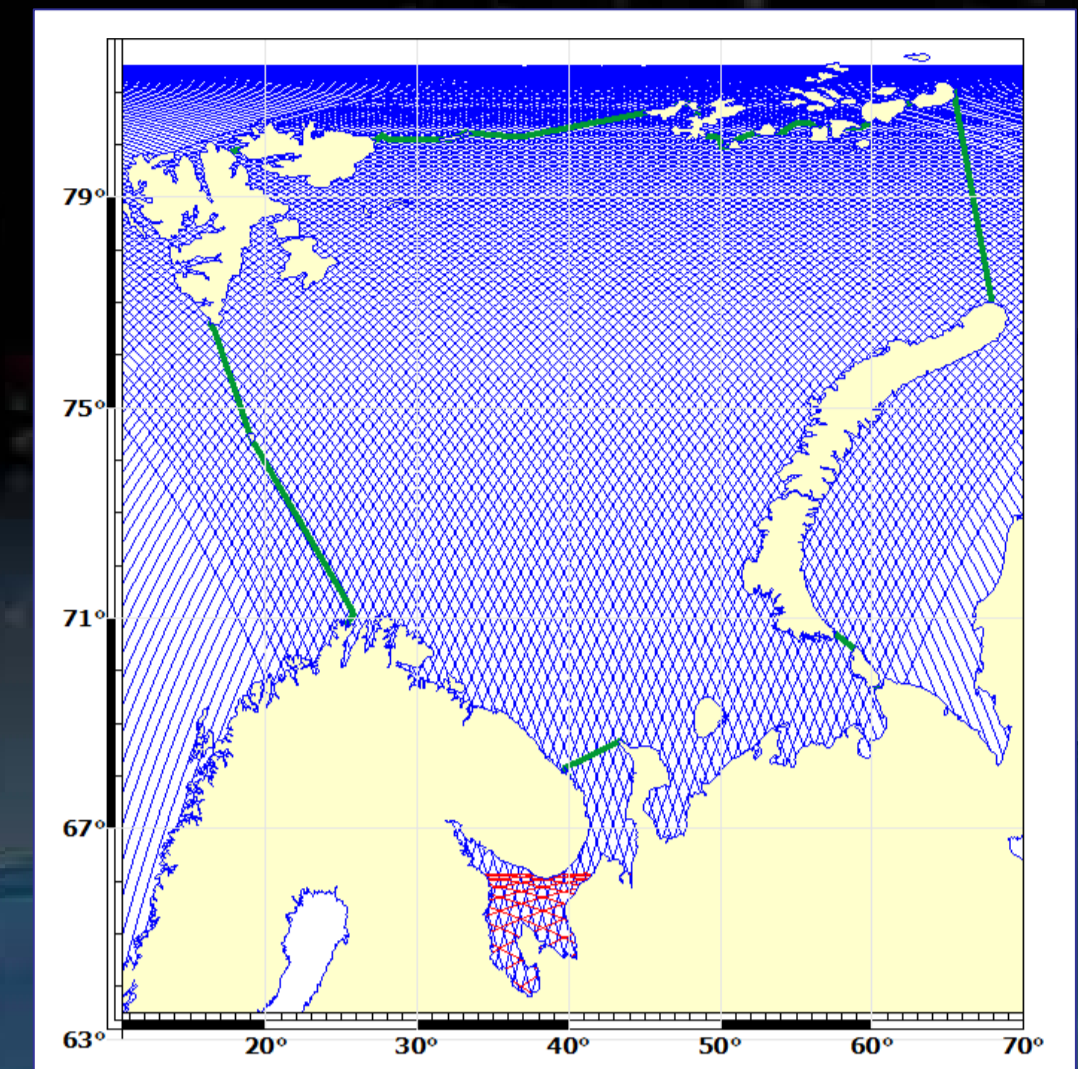


Рис. 2. Положение треков спутников ERS-1/2, Envisat и SARAL/AltiKa (синие линии) и спутников T/P и J1/2/3 (красная линия) на акватории Белого, Баренцева и Карского морей и западной части Карского моря. Граница между морями показана зеленой линией.

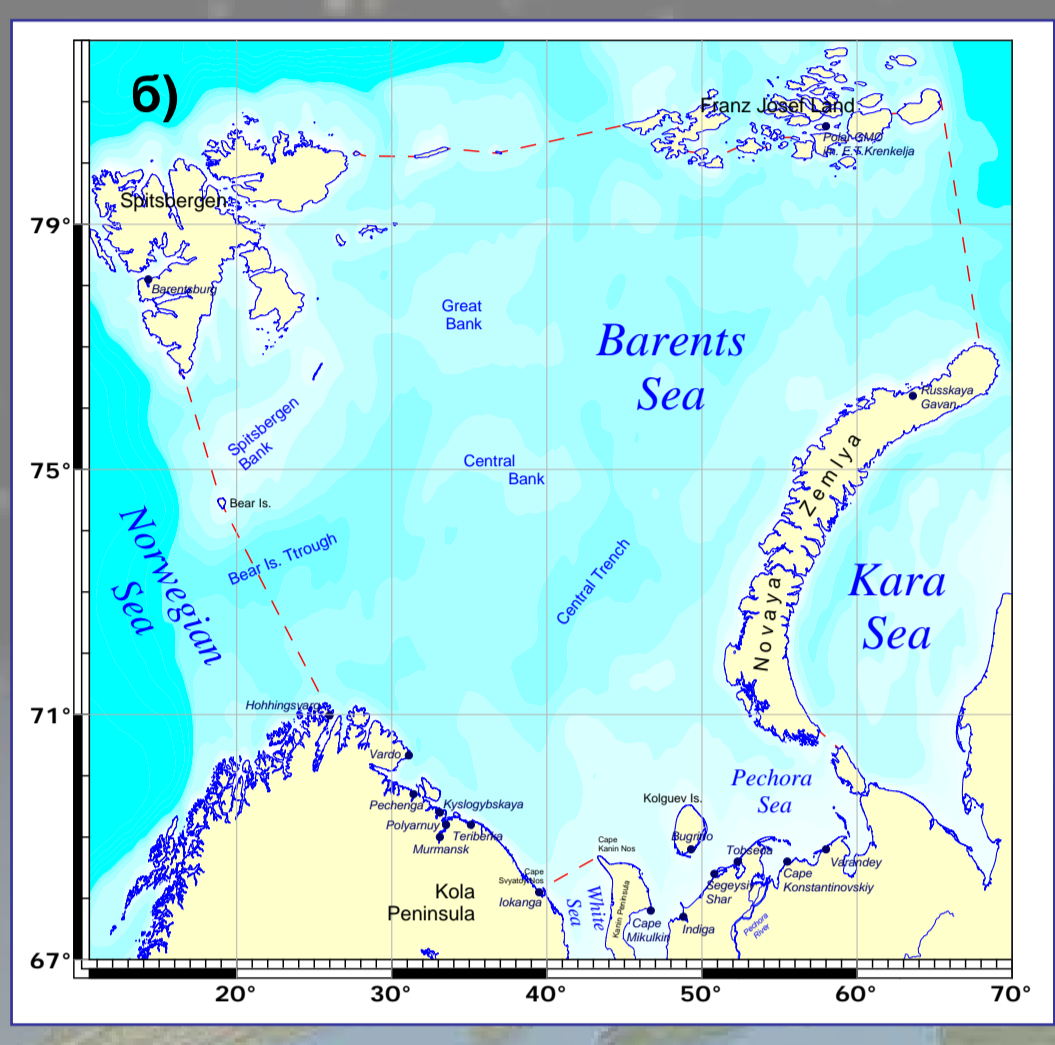
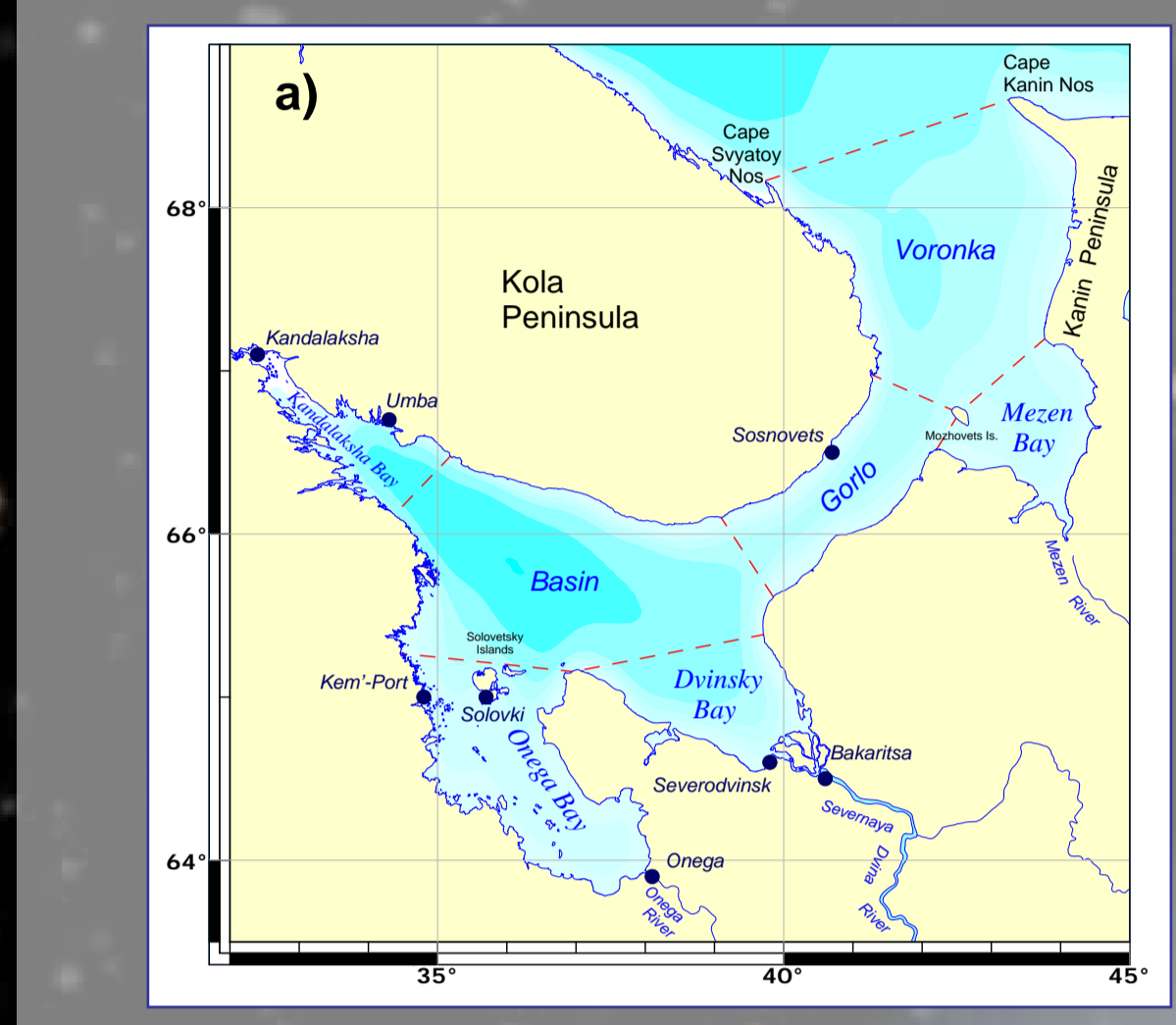


Рис. 1. Карты Белого (а), Баренцева и Карского (б) морей. Синими кружками отмечены уровневые посты, по которым проводилась верификация.

## Особенности гидрологического режима

Особенности гидрологического режима Белого, Баренцева и Карского морей обусловлены: географическими характеристиками (Таблице 1), особенностями водного (Таблице 2) и ледового баланса (Таблице 3) этих морей, которые в первую очередь влияют на их уровень моря.

Таблица 1. Физико-географические характеристики морей Западной Арктики

Характеристика	Белое море	Баренцево море	Карское море
Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	85–91	1405–1512	882,5–926
Объем, тыс. км <sup>3</sup>	5–6	282–316	98–121
Средняя глубина	49–67	186–222	111–131
Максимальная глубина, м	340–350	513	596–620
Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	717,7–720	668	6100

Таблица 2. Составляющие водного баланса морей Западной Арктики

	Белое море			Баренцево море			Карское море		
	Речной сток, км <sup>3</sup> /год			Речной сток, км <sup>3</sup> /год			Речной сток, км <sup>3</sup> /год		
<b>Приходная часть</b>	215–230			233–263			1350–1480		
в том числе:	в том числе:			в том числе:			в том числе:		
р. Северная Двина	106,6–171	р. Печора	131–139	из Баренцева моря	620–624	из Карского моря	350		
р. Мезень	20,6–38,5	р. Пенжина	22,5	из Норвежского моря	72,6–146,6	в том числе:	40		
р. Онега	15,4–27	реки о. Шпицберген	35,5	пр. Карские ворота	350	пр. Карские ворота	350		
р. Кемь	7,6–12,5	реки о. Новая Земля	22,5	пр. Югорский шар	40	о. Земля Франца-Иосифа	140–198		
р. Ковша	8,5–9,4	река о. Земля Франца-Иосифа	3,65	из Карского моря (м. Желания – о. Салма)	500	пр. Карские ворота	21,4–54,4		
Беломорско-балтийский канал	8,31					о. Земля Франца-Иосифа	43,5–58		
р. Выт	7,9–11,5					в Баренцевом море (м. Желания – о. Салма)	53,4–84		
р. Кулой	1,1–6,63					из Белого моря	2200–2231		
р. Поноя	5,3					из Карского моря	990		
р. Шана	5					пр. Карские ворота	350		
						пр. Югорский шар	40		
						испарение	411		
						испарение	2316		
<b>Расходная часть</b>	2200–2231			2390			21,4–54,4		
из Баренцева моря	2000	из Белого моря	2200–2231	из Карского моря	390	из Баренцева моря (м. Желания – о. Салма)	500		
из Карского моря	2000	из Карского моря	2200–2231	из Карского моря	990				
		из Карского моря	2200–2231	из Карского моря	350				
		из Карского моря (м. Желания – о. Салма)	500	из Карского моря	40				
испарение	411								
испарение	2316								

Таблица 3. Составляющие ледового баланса (км<sup>3</sup>) морей Западной Арктики

	Белое море			Баренцево море			Карское море		
	0			201,7–291,91			21,4–54,4		
<b>Приходная часть</b>	0			201,7–291,91			21,4–54,4		
из Белого моря				из Белого моря	13,6–31,31	из Баренцева моря	21,4–54,4		
из Карского моря				из Карского моря	144,6–202,6	из Карского моря	32–33		
в том числе:	в том числе:			в том числе:	в том числе:	в том числе:	в том числе:		
о. Земля Франца-Иосифа	о. Земля Франца-Иосифа			о. Земля Франца-Иосифа	140–198	о. Земля Франца-Иосифа	32–33		
о. Новая Земля	о. Новая Земля			о. Новая Земля	4,6	о. Новая Земля	21,4–54,4		
пр. Карские ворота	пр. Карские ворота			пр. Карские ворота	4,6	пр. Карские ворота	21,4–54,4		
о. Шпицберген	о. Шпицберген			о. Шпицберген	43,5–58	о. Шпицберген	140–198		
о. Земля Франца-Иосифа	о. Земля Франца-Иосифа			о. Земля Франца-Иосифа	53,4–84	о. Земля Франца-Иосифа	140–198		
					53,4–84	о. Земля Франца-Иосифа	140–198		
из Карского моря	13,6–31,31			из Карского моря	53,4–84	о. Земля Франца-Иосифа	140–198		
из Баренцева моря	13,6–31,31			из Карского моря	53,4–84	пр. Карские ворота	21,4–51		
					53,4–84	пр. Карские ворота	4,6		

Колебания уровня Белого, Баренцева и Карского морей связаны в основном с приливо-отливными и стоннонагонными явлениями, а в устьевых участках рек также с весенними половодьями.

**Речной сток.** Более 3/4 всего речного стока в Белое море (Таблица 2) приходится на долины рек, впадающих в Онежский, Двинский и Мезенский заливы (60–70%). Максимум стока наблюдается весной и составляет 40% годового стока. У рек, впадающих с юго-востока, весенний паводок более резкий. Для моря в целом максимальный сток приходится на май, минимальный – на февраль–март. Речной сток в Баренцево море на 90% он сосредоточен в юго-восточной части моря. Сток реки Печора составляет 70% всего стока в море за год. На северное побережье Норвегии и берег Кольского полуострова приходится всего около 10% речного стока.

На долю Карского моря приходится в среднем около 55% общего стока во все моря российской Арктики. Примерно 80% речного стока приходится на июнь–сентябрь. Практически весь материковый сток поступает в Карское море с юга.

**Приливы.** На большей части акватории Белого моря приливы носят правильный полусуточный характер. Средняя величина прилива в Бассейне моря колеблется от 0,9 до 1,2 м. В Северной части моря средняя величина прилива колеблется от 1,8 до 4,7 м. В Мезенском заливе средняя величина прилива составляет 6,6 м, а наибольшая 10 м. В Баренцевом море приливы носят полусуточный или неправильный суточный характер. В юго-восточной части моря на отдельных участках встречаются неправильные полусуточные и неправильные суточные приливы. Средняя величина прилива в западной части района медленно увеличивается с запада на восток от 2,4 до 3,8 м, в восточной части, наоборот, уменьшается с запада на восток от 2,6–2 до 1–0,5 м. В Карском море приливы имеют преимущественно неправильный полусуточный характер. Величины приливов сравнительно невелики. По всем пунктам побережья они равны в среднем 0,5–0,8 м, но в Обской губе превышают 1 м. Нередко их подавляют стоннонагонные колебания уровня, которые на материковом берегу моря больше 1 м, а в глубине заливов и губ в безледные сезоны доходят до 2 м и больше.

**Сгон-нагон** На большей части побережья Северного Ледовитого океана стоннонагонные колебания уровня воды значительно больше, чем приливы и отливы. Исключение составляет Баренцево море, где на фоне крупных приливных колебаний уровня они менее заметны. Колебания уровня, вызванные штормовыми нагонами на открытых акваториях составляет около 1 м, а в прибрежной зоне – более 2 м. Длительность нагонов в среднем равна 3–4 суткам. Стоны приводят к меньшим изменениям колебания уровня в 1,5–2 раза, но их длительность существенно выше: 4–5 суток при средних стогах и до полумесяца при максимальных.

**Лед** В Белом море наблюдается обычно с ноября по май, однако бывают годы, когда он появляется в начале октября и исчезает в первой половине июля. Ледяной покров в основном представляет собой дрейфующие льды, которые занимают 90% всей площади моря, а припой развит слабо, и на долю его приходится не более 10%. В редкие годы весь лед тает на месте, а в большинстве случаев он выносится в Баренцево море. В отличие от западной и центральной частей, юго-восточная часть Баренцева моря покрывается льдом. Обычно льдообразование начинается во 2-й половине октября. Процесс замерзания направлен с востока на запад, таяние льдов происходит главным образом в обратном направлении. Длительность ледового периода составляет от 6 до 10 мес. Ледяной покров юго-востока Баренцева моря в течение годового цикла состоит из однолетних льдов толщиной от 5 до 200 см. Вследствие географического положения Карское море ежегодно замерзает. Лед образуется в самом море, а также поступает из Центрального Арктического бассейна. Большую часть года Карское море покрыто сплошным ледяным покровом. В юго-западной части моря лед наблюдается в течение 7–8 месяцев, с ноября по июль. Северо-восточная часть моря в летний период не полностью очищается от льда. Льдообразование в Карском море обычно начинается в сентябре в северных районах и в октябре – ноябре на юге. Зимой неподвижный лед бывает только вблизи берегов в виде припая. За припая обычно располагаются плавающие льды. В большинстве это обширные ледяные поля. За зиму лед достигает толщины 0,5–1,5 м.

Таблица 4. Данные спутников ERS-1/2, Envisat и SARAL/AltiKa и поправки, используемые при их обработке.

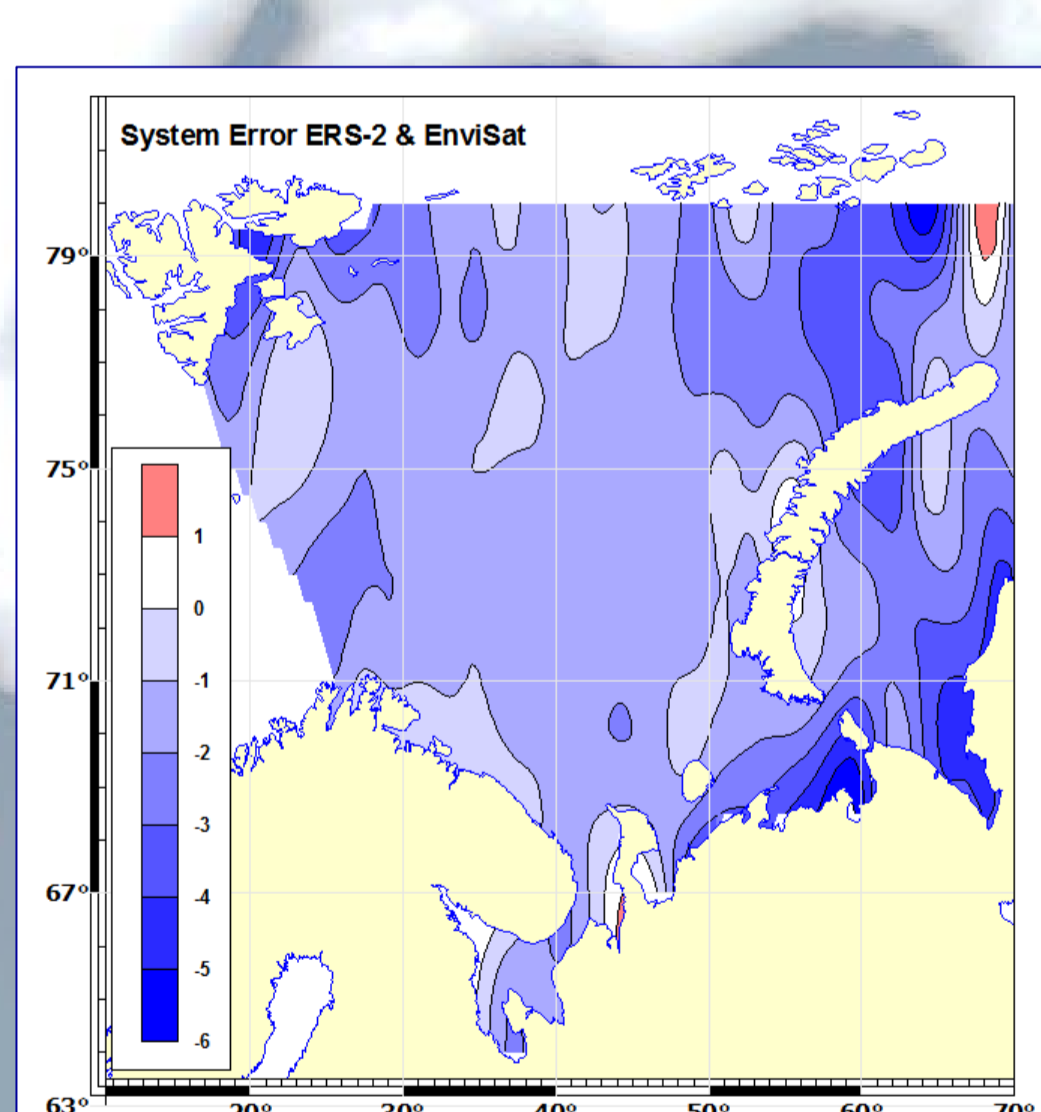
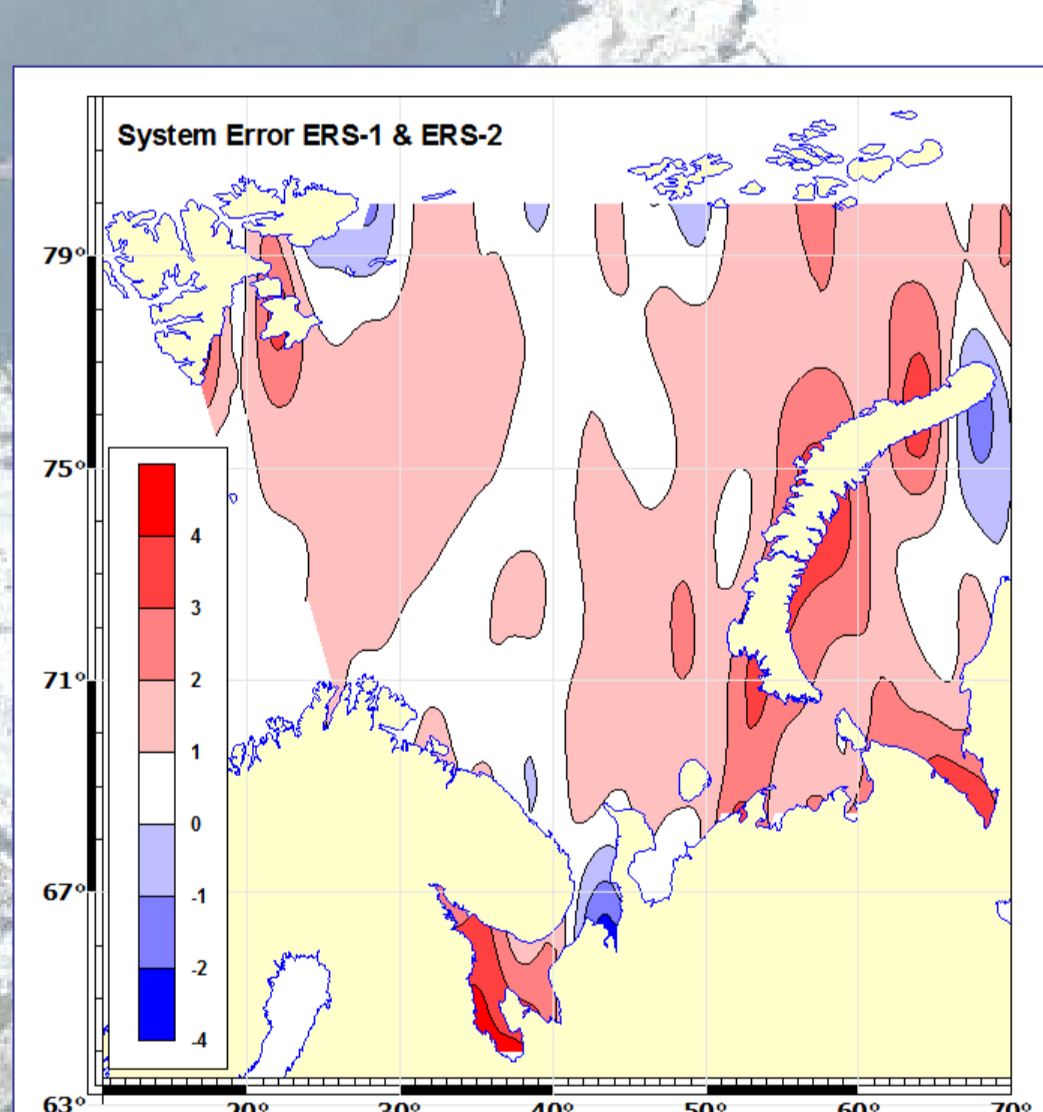
	ERS-1, phase G	ERS-2	ENVISAT, phase B, phase C	SARAL/AltiKa, phase A
Модель расчета орбиты	DOMEM4 REAPER REAPER2008 REAPER/GZ REAPER/ESOC		ESOC EIGEN-6C CNES GDR-D	
«Сухая» поправка	ECMWF model NCEP model			NOAA GFS
Поправка на влажность	ECMWF ERA-Interim model radiometer			
Ионосферная поправка	Bent IR2007 NIC09		NOAA GFS DORIS JPL GIM	
Поправка обратного барометра	static global MOC2D local MOC2D local mean		static	
Приливы в земной коре	solid earth tide model			
Модель приливов	FES2004 tide model WebTide tide model GOT4.8 tide model GOT4 tide model FES2012 tide model			
Модель нагрузки на дно	FES2004 load tide model GOT4.8 load tide model GOT4.10 load tide model			
Модель полюсных приливов	pole tide model			
Поправка на состояние поверхности	BM3 sea state bias		CLS sea state bias	
Отчетная поверхность расчета аномалии уровня	TOPEX ellipsoid EGM2008 geoid height EGM2008 MSSH height DTU10 MSSH height CNES/CLS11 MSSH height DTU13 MSSH height EIGEN6 geoid height		CLS sea state bias hybrid sea state bias	EGM96 geoid

Таблица 5. Данные спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 и поправки, используемые при их обработке.

	TOPEX/Poseidon, phase A	JASON-1, phase A	JASON-2, phase A
Модель расчета орбиты	JGM-3/NASA JGM-3/CNRS GSFC GDR-C GSFC SSI1204 GFZ/SLCC1	ESOC EIGEN-6L04c GDR-C GFS ESOC EIGEN-6S2 CNES GDR-E	GSFC SSI1404
«Сухая» поправка	ECMWF model NCEP model		
Поправка на влажность	ECMWF ERA-Interim model radiometer		
Ионосферная поправка	Bent IR2007 NIC09		
Поправка обратного барометра	static global MOC2D local MOC2D mean		
Приливы в земной коре	solid earth tide model		
Модель приливов	FES2004 GOT4.8 GOT4.10 FES2012		
Модель нагрузки на дно	FES2004 GOT4.8 GOT4.10		
Модель полюсных приливов	pole tide		
Поправка на состояние поверхности	BM4 CLS sea state bias Chambers BM4		Tam et al. 2012 non-parametric sea state bias
Отчетная поверхность расчета аномалии уровня	TOPEX ellipsoid EGM2008 geoid height EGM2008 mean sea surface height CNES-CLS11 mean sea surface height DTU13 mean sea surface height EIGEN6 geoid height DTU15 mean sea surface height		

## Систематическая ошибка

Объединение данных спутников E1/2 и En T/P и J1/2 в единый ряд альтиметрических измерений требует проведения анализа данных за временной интервал работы спутников в режиме тандема. Такой режим работы предполагает, что спутники имеют одинаковые параметры орбиты, треки спутников совпадают, а разница по времени в пролете одного спутника за другим минимальна. Для спутников E1 и E2 эта разница в среднем 35 мин., а для спутников E2 и En – 30 мин. Для спутников J1 и J2 в среднем составила 17 см. Измерения высоты морской поверхности, проводимые альтиметром спутника J1, на акватории



Белого моря превышают измерения спутника J2 в среднем на -1,83±0,34 см, а коэффициент корреляции между данными составляет 0,999

Рис. 3. Систематическая ошибка между измерениями спутников ERS-1 и ERS-2 (левый рисунок) и Envisat и ERS-2 (правый рисунок).

## Ошибка в расчетах высот приливов

Приливы играют большую роль в гидрологическом режиме Белого, Баренцева и Карского морей. Поэтому от точности расчета высот приливов в этом регионе зависит корректность обработки данных спутниковой альтиметрии. Сравнение высот приливов в Белом и Баренцевом морях, рассчитанных по региональной модели Лаборатории прикладных морских исследований Гидрометцентра РФ и глобальной модели приливов GOT00.2 показывает, что максимальная разница более 35 см наблюдается в горле Белого моря и в Мезенском заливе. Разница в расчетах по этим моделям дает ошибку порядка 15 см вдоль всего Кольского побережья Баренцева моря и в Чешской губе.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (проект № 14-17-00555), в рамках которого разработан алгоритм обработки данных спутниковой альтиметрии

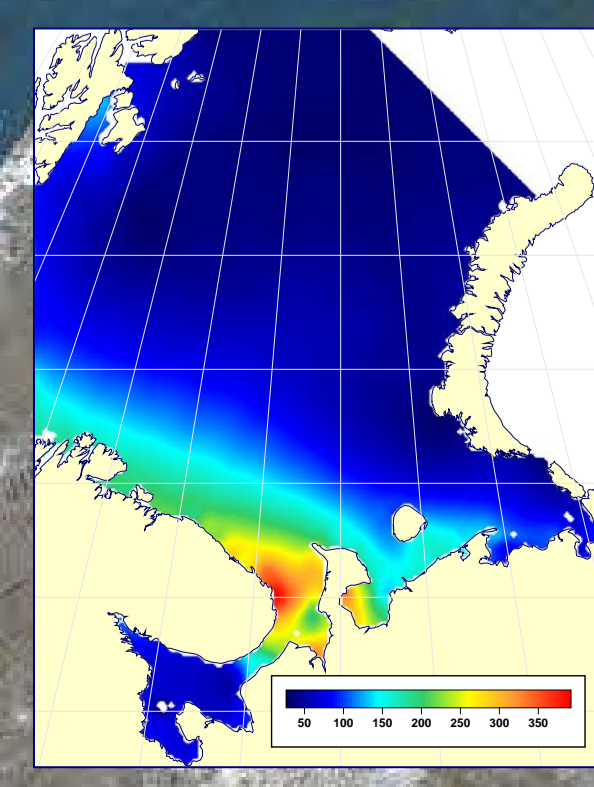


Рис. 4. Разница в высоте приливов (мм), рассчитанных по региональной модели Лаборатории прикладных морских исследований Гидрометцентра РФ и глобальной модели приливов GOT00.2.

Таблица 6. Сравнение амплитуды и фазы основных приливных волн между измерениями на уровнях постов и результатами модельных расчетов

Уровневый пост	Приливная волна	Глобальная модель				Региональная модель			
		Высота (%)	Фаза (час)	Высота (%)	Фаза (час)	Высота (%)	Фаза (час)	Высота (%)	Фаза (час)
Соловки	M <sub>2</sub>	53,1	0,49	30,5	0,21	27,3	0,15		
	S <sub>2</sub>	31,8	0,23	77,3	0,89	29,0	0,19		
Пенчага	K <sub>1</sub>	5,9	0,02	58,5	0,54	26,1	0,29		
	M <sub>2</sub>	76,2	0,78	87,4	1,25	7,5	0,05		
Вардо	S <sub>2</sub>	73,9	0,84	58,6	0,47	26,3	0,17		
	K <sub>1</sub>	28,3	0,15	14,1	0,16	17,1	0,09		
Варандей	M <sub>2</sub>	76,8	0,45	45,8	0,69	22,2	0,65		
	S <sub>2</sub>	25,7	0,29	45,1	0,84	19,8	0,28		
Варандей	K <sub>1</sub>	43,9	0,93	27,2	0,45	4,2	0,09		
	M <sub>2</sub>	68,3	2,01	34,6	0,78	16,6	1,39		
Варандей	S <sub>2</sub>	73,7	1,34	57,3	1,17	26,4	0,79		
	K <sub>1</sub>	24,6	0,98	39,8	1,04	15,0	1,10		