

Сергей А. Лебедев



*Геофизический Центр
Российской академии наук*



*Майкопский государственный
технологический университет*



*Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»*

Спутниковая альтиметрия — основы метода и приложения в науках о Земле



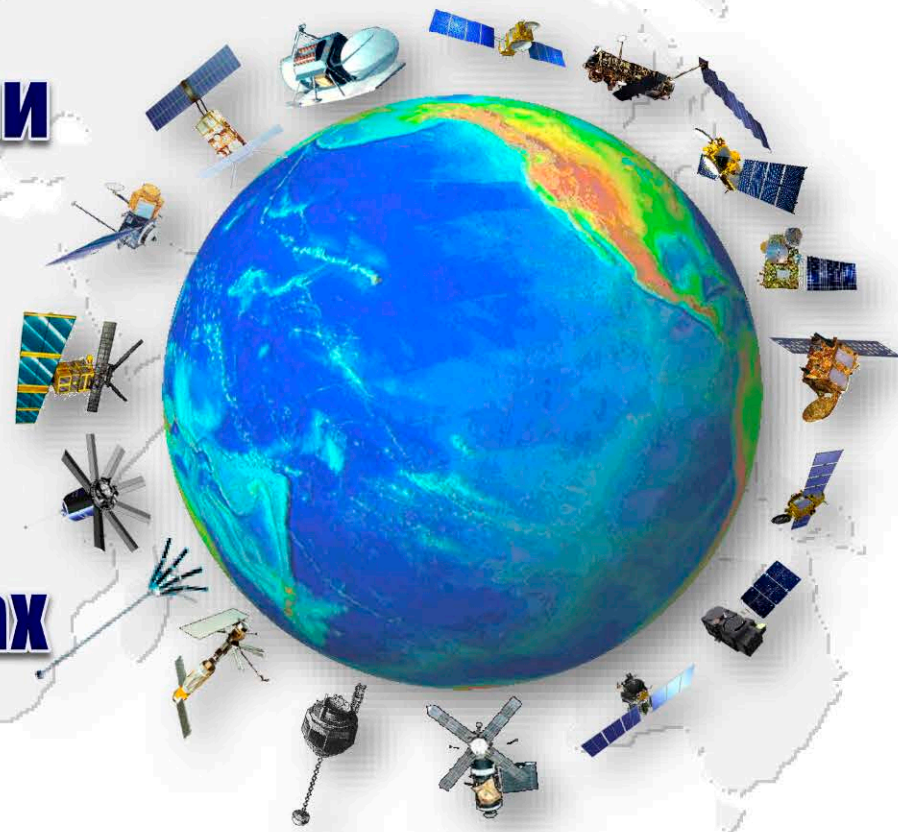
Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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



Содержание

- ⇒ Дистанционное зондирование Земли
- ⇒ Основы метода спутниковой альтиметрии
- ⇒ Обработка данных
- ⇒ Приложения в науках о Земле



Типы методов дистанционного зондирования



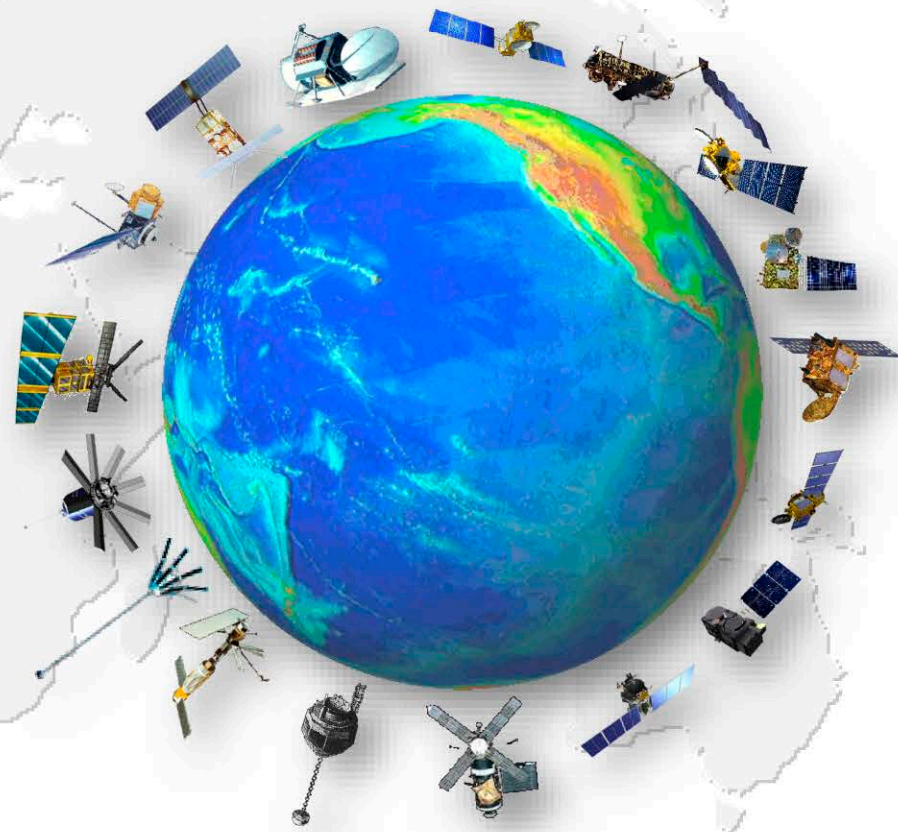
Методы дистанционного зондирования подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные.

- ➔ Пассивные методы основаны на регистрации теплового (ИК), микроволнового (СВЧ) излучения и естественного гамма-излучения с поверхности моря.
- ➔ Полуактивные методы основаны на облучении естественными и искусственными источниками электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне и в анализе сопоставления изменения спектрального состава отражённого сигнала.
- ➔ При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отражённого излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния.



Основы метода

- ⇒ История развития
- ⇒ Геометрия метода
- ⇒ Геодезические и изомаршрутные программы
- ⇒ Рабочая частота альтиметра



История развития спутниковой альтиметрии

Развитие спутниковой альтиметрии условно можно разделить на три этапа:

- ➔ Первый этап (с 1974 по 1980 г.) — это спутниковые программы Skylab–IV, GEOS–3 и SEASAT, связанные с исследованием потенциальной возможности использования спутниковой альтиметрии, в первую очередь в геодезии.
- ➔ Второй этап (с 1985 по 1992 г.) — проведение целенаправленных спутниковых экспериментов GEOSAT, Гео-ИК-1 и ERS-1 для решения геодезических программ и исследования возможностей применения спутниковых альтиметрических измерений в других науках о Земле (например, океанологии, гляциологии, гидрологии и т.д.).

Программа		Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
				Высота, км		Наклонение, градусы	Период повторяемости ²
				перигей	апогей		
Skylab–4 (орбитальная станция)		05/1973 – 02/1974	20847	422	437	130	–
GEOS-3		04/1975 – 12/1978	341	817	858	115	–
SeaSat		07/1978 – 09/1978	2300	761	765	108	17
		09/1978 – 10/1978					3
GEOSAT (GEOfedetic SATellite)	геодезическая программа	03/1985 – 11/1986	635	775	779	108,1	~23
	изомаршрутная программа	11/1986 – 12/1989					17
Гео-ИК 1 ¹ (Космос–1660)		07/1985 – 10/1986	1500	1482	1525	73,6	–
Гео-ИК 2 ¹ (Космос–1732)		03/1986 – 03/1986	1500	1480	1525	73,6	–
Гео-ИК 3 ¹ (Космос–1803)		12/1986 – 12/1987	1500	1497	1504	82,6	–
Гео-ИК 4 ¹ (Космос–1823)		03/1987 – 10/1987	1500	1479	1524	73,6	–
Гео-ИК 5 ¹ (Космос–1950)		06/1988 – 07/1990	1500	1484	1522	73,6	–
Гео-ИК 6 ¹ (Космос–2037)		09/1989 – 09/1990	1500	1485	1524	73,6	–
Гео-ИК 7 ¹ (Космос–2088)		08/1990 – 03/1993	1500	1484	1524	73,6	–
ERS-1 (European Remote sensing Satellite – 1)	Фазы А, В	07/1991 – 03/1992	2384	774	775	98,5	3
	Фаза С	04/1992 – 12/1993					35
	Фаза D	12/1993 – 04/1994					3
	Фазы E ¹ , F ¹	04/1994 – 03/1995					~168
	Фаза G	04/1995 – 06/1996					35

1 – геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель)

2 – для изомаршрутных программ



Тринадцатая международная школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Гаруса, 25–27 мая 2023 г.

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



История развития спутниковой альтиметрии

- ➔ Третий этап (с 1992 г. по настоящее время) — проведение постоянного мониторинга водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей (спутники ERS-1/2, TOPEX/Poseidon, GFO-1, Jason-1/2/3, ENVISAT, HY-2A/B, SARAL, Гео-ИК-2 и др).

Программа		Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
				Высота, км		Наклонение, градусы	Период повторяемости ²
				перигей	апогей		
TOPEX/Poseidon (TOPOgraphy EXPeriment)	Фаза А	08/1992 – 08/2002	2402	1331	1344	66,04	10
	Фаза В	09/2002 – 01/2006					
Гео-ИК-1 № 8 ¹ (Космос-2226)		01/1993 – 07/1993	1500	1479	1525	73,6	–
Гео-ИК-1 № 9 ¹ (Гео-ИК)		12/1994 – 07/1995	1500	1481	1526	73,6	–
ERS-2 (European Remote sensing Satellite – 2)		04/1995 – 06/2002	2516	784	785	98,6	35
GFO-1 (Geosat Follow-On – 1)		02/1998 – 10/2008	410	786	788	108,1	17
Jason-1	Фаза А	12/2001 – 01/2009	500	1337	1343	66,2	10
	Фаза В	02/2009 – 02/2012					
	Фаза С ¹	05/2012 – 07/2013				66,042	~406
ENVISAT (ENVironmental SATellite)		03/2002 – 04/2012	7991	783	785	98,6	35
ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite)		01/2003 – настоящее время	1000	593	610	94	183,8
CryoSat-1		08.10.2005 – потерян при выводе на орбиту	650				
Jason-2	Фаза А	06/2008 – 02/2016	510	1338,7	1351	66,0	10
	Фаза В	02/2016 – 10/2016					
	Фаза С ¹	10/2016 – 01/2017					~406
	Фаза D	01/2017 – 10/2019					–
CryoSat-2		04/2010 – настоящее время	720	720	730	92,0	~369
HY-2A (Hai Yang – 2A)	изомаршрутная программа	08/2011 – настоящее время	513	963,6	965	99,3	14
	геодезическая программа						~168
Гео-ИК-2 №11 ¹ (Космос-2470)		12/2011 – ошибка при выводе на орбиту	1500	369	1021	99,46	17

¹ – геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель)

² – для изомаршрутных программ



Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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



История развития спутниковой альтиметрии

- ⇒ Четвёртый этап (с 2010 г. по настоящее время) — проведение постоянного мониторинга водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей, а также для изучения полярных льдов и поверхности Земли лазерными альтиметрами (спутник ICESat-1), альтиметрами с синтезированной апертурой (спутники CryoSat-1/2, Sentinel-3A/B, Sentinel-6 FM/Jason-CS) и альтиметра-интерферометра (спутник SWOT).

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
			Высота, км		Наклонение, градусы	Период повторяемости ² ,
			перигей	апогей		
Jason-3	01/2016 – настоящее время	525	1338,7	1351	66,0	10
SARAL (Satellite with ARGOS and AltiKa)	02/2013 – настоящее время	450	786		98,55	35
Sentinel-3A	02/2016 – настоящее время	1200	809	811	98,6	27
Гео-ИК-2 № 12 ¹ (Космос-2517)	06/2016 – настоящее время	1500	949	950	99,3	17
Sentinel-3B	04/2018 – настоящее время	1200	809	811	98,65	27
CFOSat (Chinese-French Oceanography Satellite)	10/2018 – настоящее время	650	523,3	524,7	97,5	13
HY-2B (Hai Yang – 2B)	10/2018 – настоящее время	510	973	974	99,4	14
CFOSat follow-on	10/2018 – настоящее время	650	523,3	524,7	97,5	13
Гео-ИК-2 № 13 ¹ (Космос-2540)	08/2019 – настоящее время	1500	949	950	99,3	17
HY-2C (Hai Yang – 2C)	09/2020 – настоящее время	520	963,6	965	99,3	14
Jason-CS / Sentinel-6A	11/2020 – настоящее время	1192	1336		66,0	10
HY-2D (Hai Yang – 2D)	05/2021 – настоящее время	520	963,6	965	99,3	14
SWOT (Surface Water and Ocean Topography)	12/2022 – настоящее время	2200	890,582		77,6	20,8

¹ – геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель)

² – для ионизирующих программ



Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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

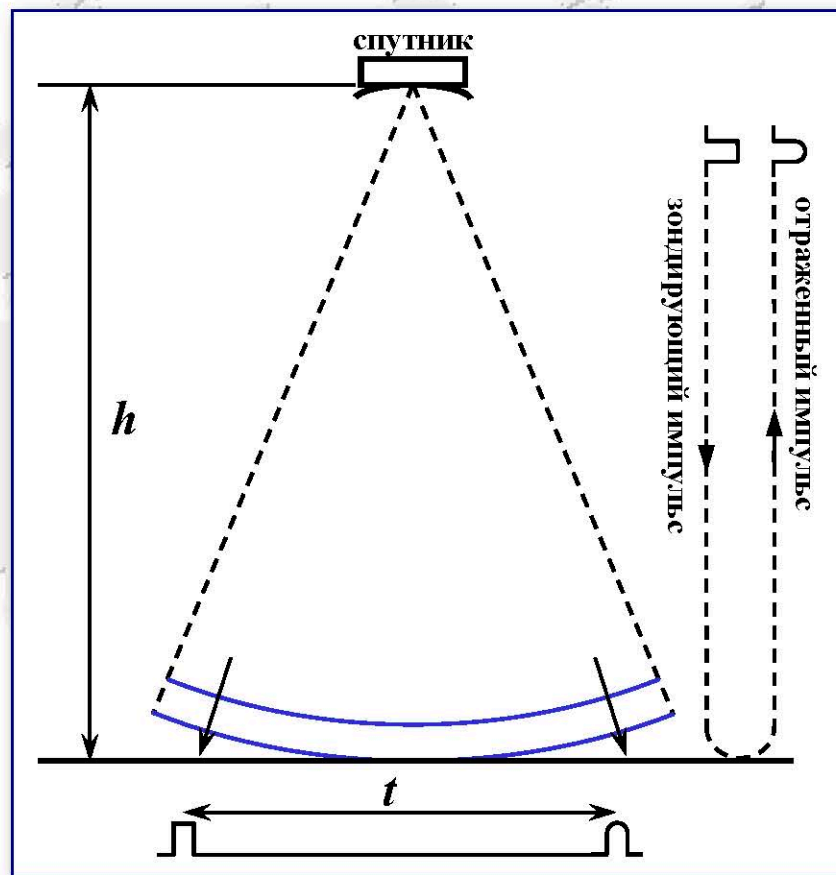


Определение расстояния от альтиметра до подстилающей поверхности

По времени возврата
зондирующего радиоимпульса

$$h = \frac{c_0 t}{2}$$

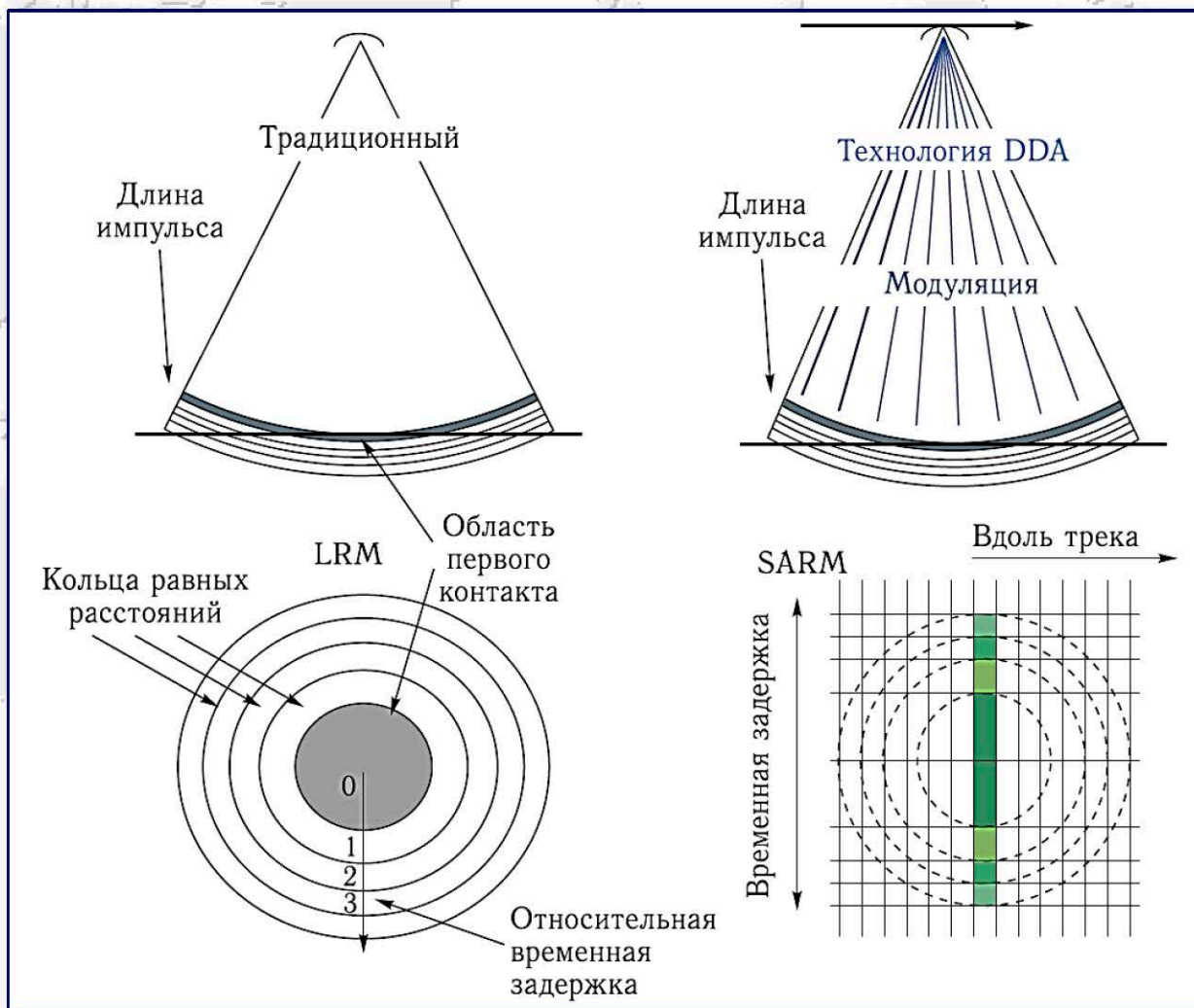
рассчитывается расстояние
от спутника до подстилающей
поверхности, что позволяет
определить высоту морской
поверхности



Принципиальная схема
работы альтиметра



Отличие работы альтиметра, зондирующего в надир, и альтиметра с синтезированной апертурой



Синтезирование апертуры

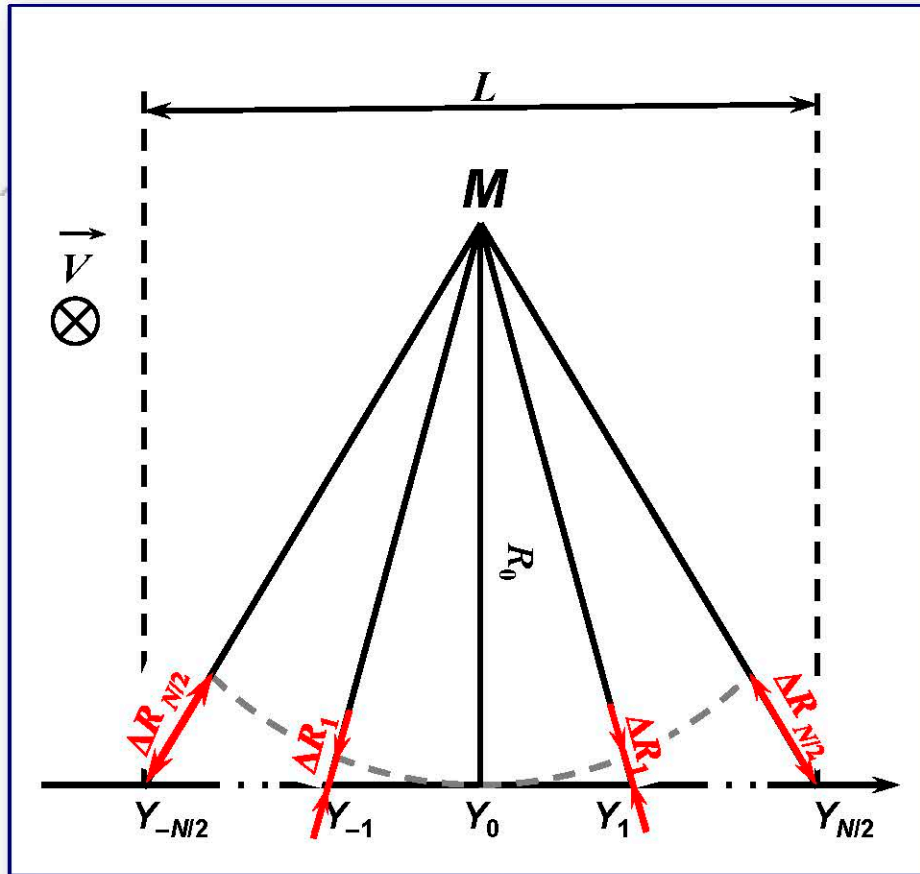
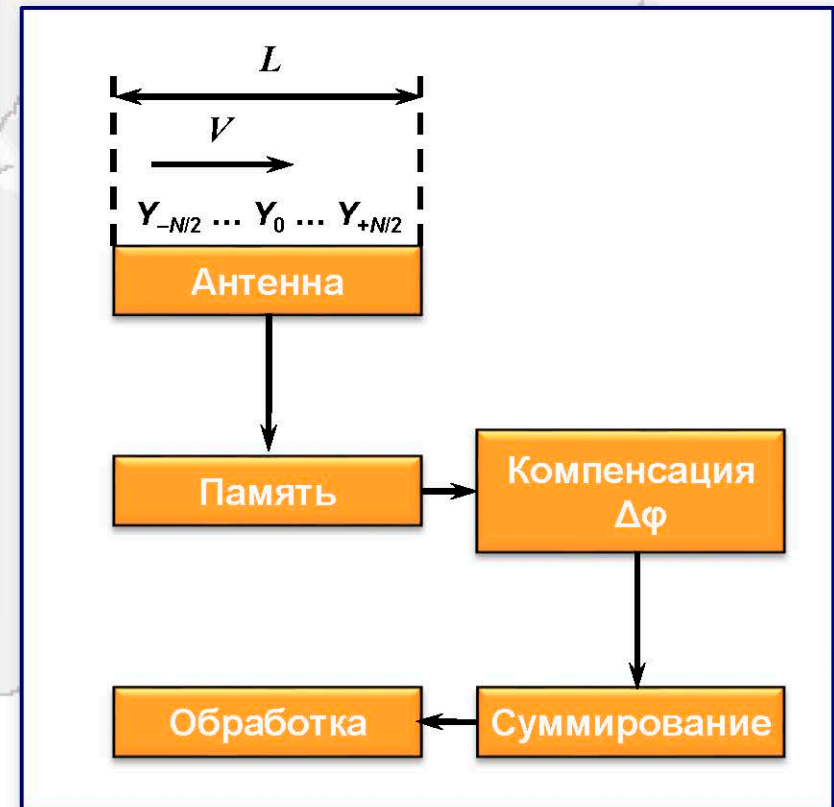
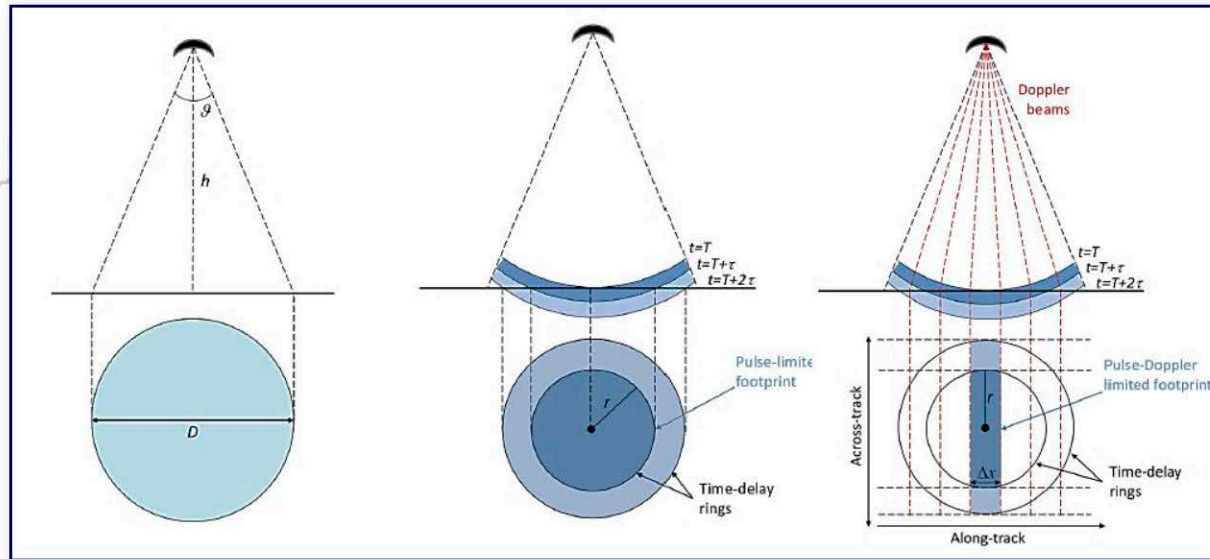


Схема синтезирования апертуры
при перемещении излучателя



Размер сегмента отражения



$$D = 2h \tan \frac{\theta}{2},$$

$$D = 2\sqrt{hc\tau},$$

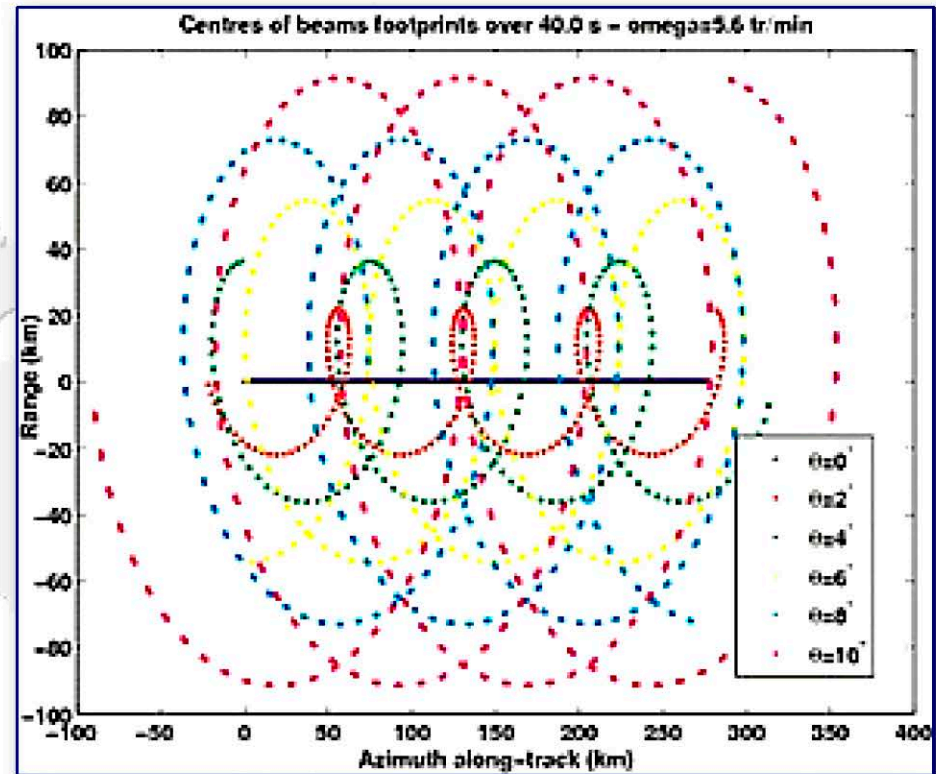
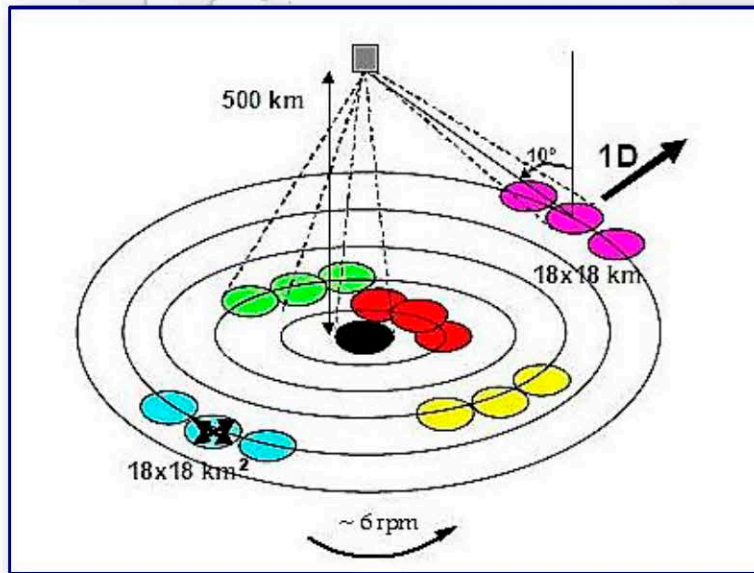
$$S_i = \begin{cases} 2\Delta x \sqrt{hc\tau} & i = 0, \\ (\Delta x)^2 & i \neq 0, \end{cases}$$

$$\Delta x = \frac{h\lambda}{2VN} RF.$$

- D – диаметр сегмента отражения
- S_i – площадь сегмента отражения
- h – высота спутника над подстилающей поверхностью
- θ – угловое разрешение антенны
- c – скорость света
- τ – длительность импульса
- λ – длина волны импульса
- V – скорость движения спутника по орбите
- N – число лучей равномерно разнесённых в доплеровской области
- PRF – частота повторения импульсов (*Pulse Repetition Frequency*)



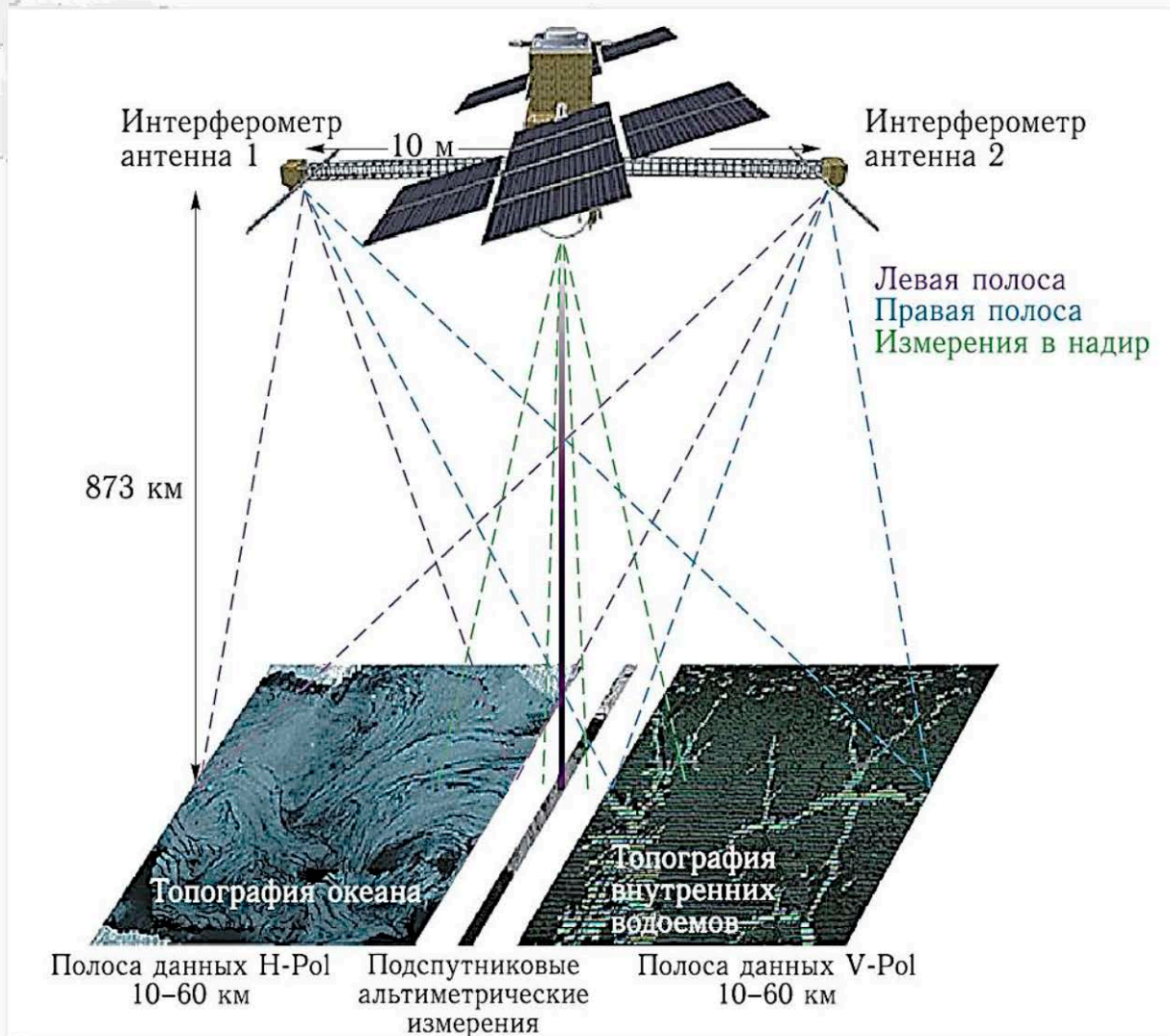
Альтиметрическая программа спутника CFOSat (Chinese-French Oceanography Satellite)



Real aperture radar SWIM
(Surface Waves Investigation and Monitoring instrument)



Альтиметрическая программа спутника SWOT (Surface Water Ocean Topography)



Altimeter/interferometer

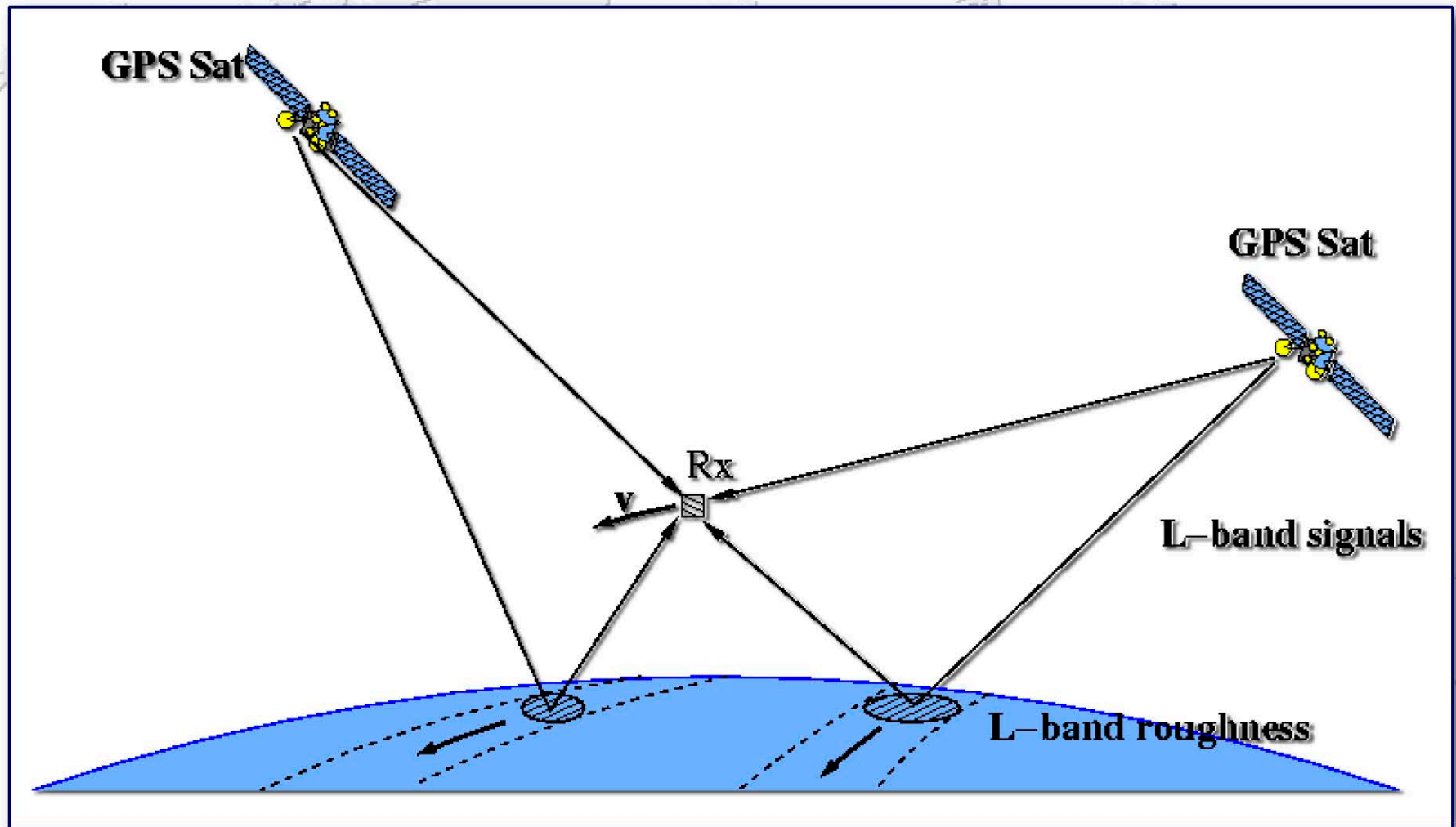


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

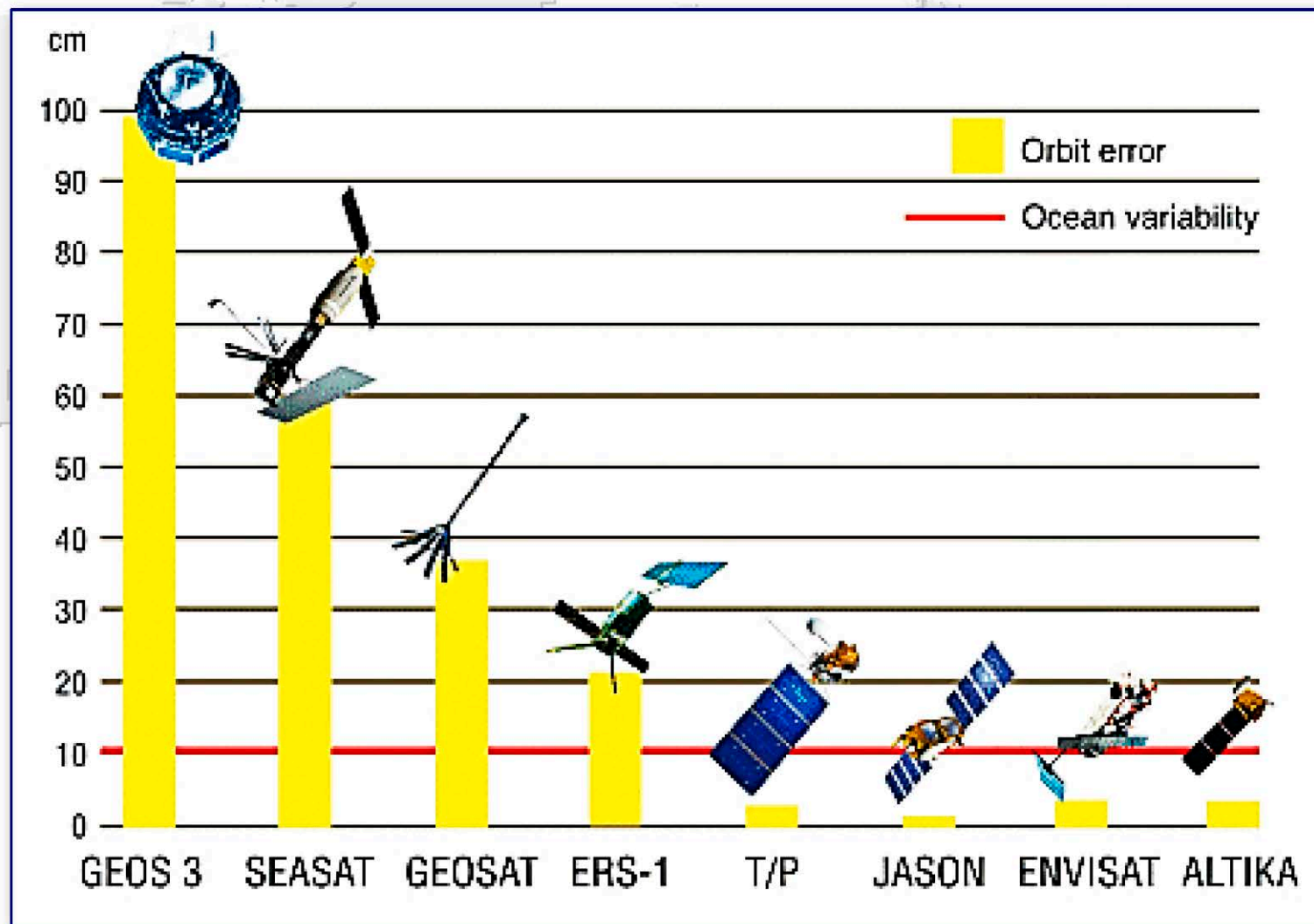
© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



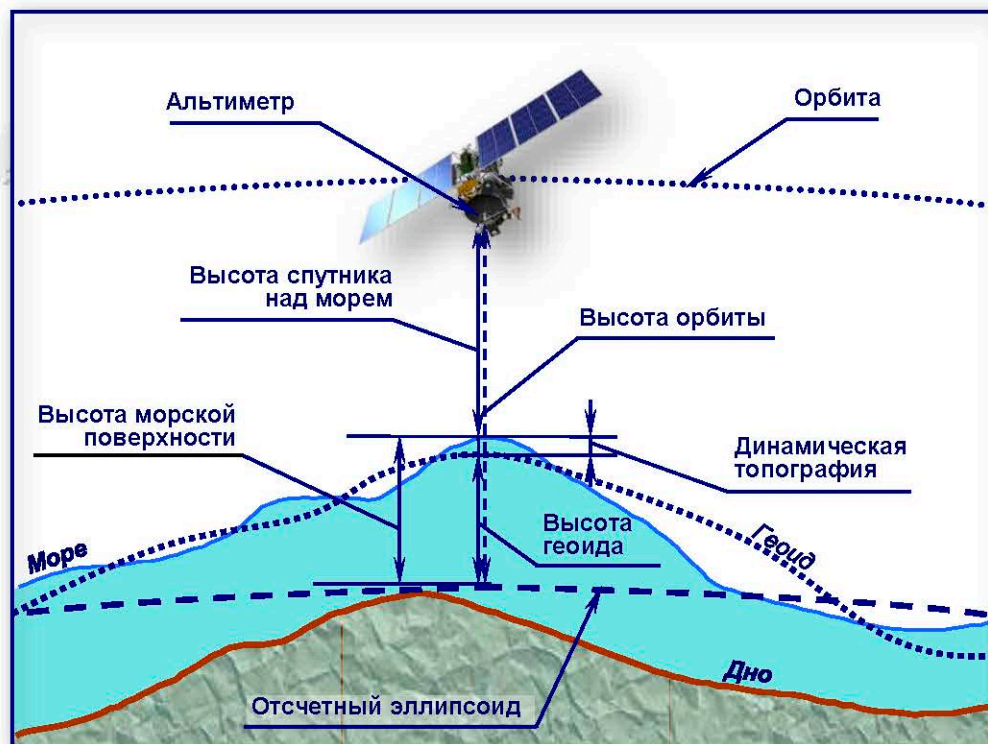
GNSS (Global Navigation Satellite System) рефлектометрия



Точность расчёта высоты орбиты основных программ альтиметрических измерений



Геометрия метода



Помимо этого спутниковая альтиметрия позволяет анализировать:

- амплитуду скорости приводного ветра
- значимые высоты морских волн

H_g – высота геоида или эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли

H_{orb} – высота орбиты спутника

H_{alt} – высота спутника над поверхностью моря

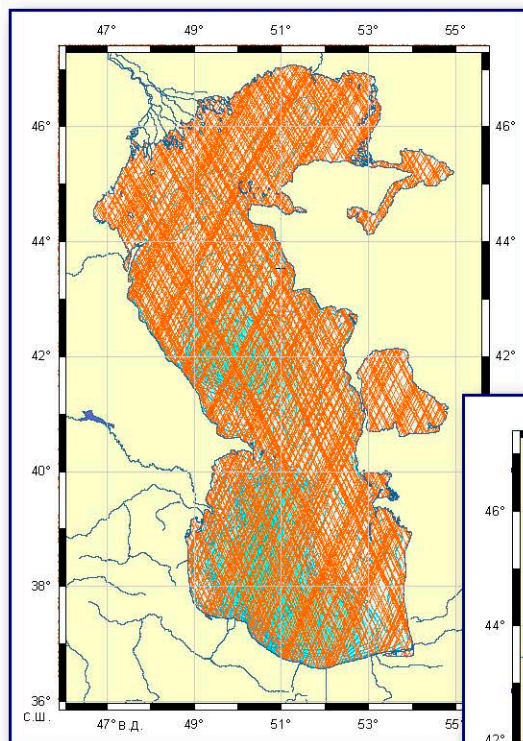
H_{ssh} – высота морской поверхности с учётом ряда поправок (ΔH_i), связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности:

$$H_{ssh} = H_{orb} - H_{alt} - \sum \Delta H_i$$

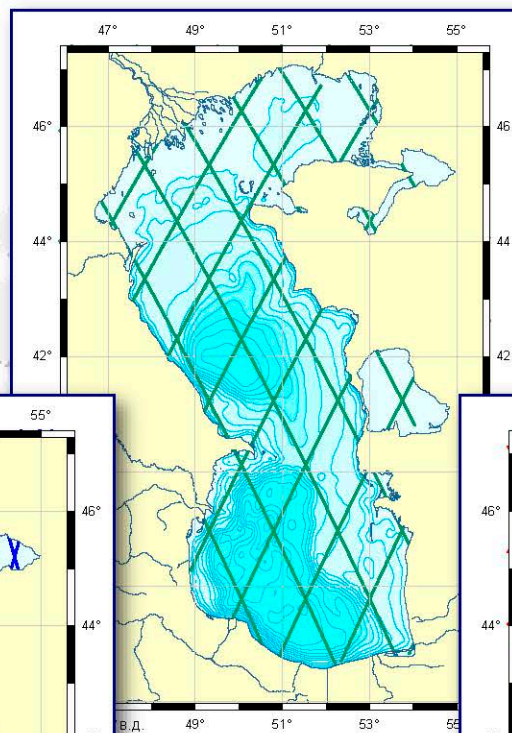
H_{dt} – динамическая топография как отклонения морской поверхности относительно геоида: $H_{dt} = H_{ssh} - H_g$



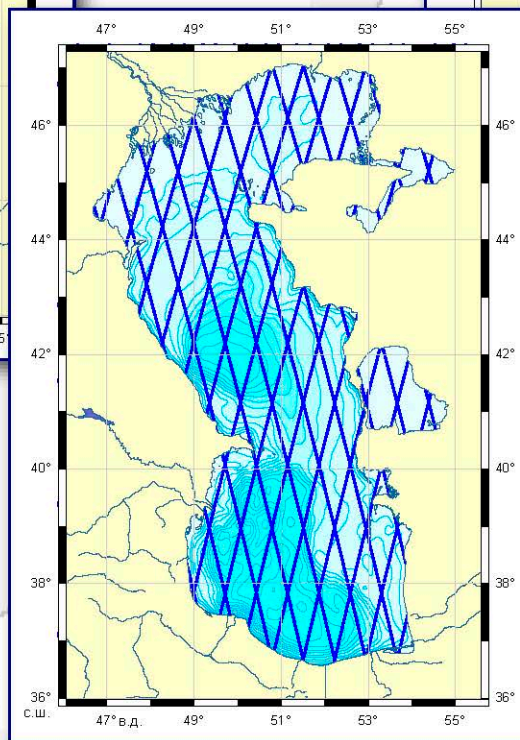
Геодезические и изомаршрутные программы



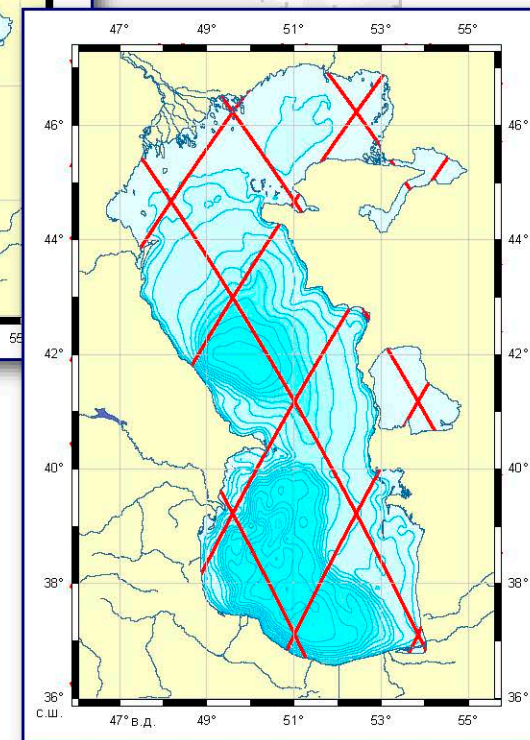
**ERS-1/2
и ENVISAT,
SARAL
(35 суток)**



**TOPEX/Poseidon
и Jason-1/2/3
(10 суток)**



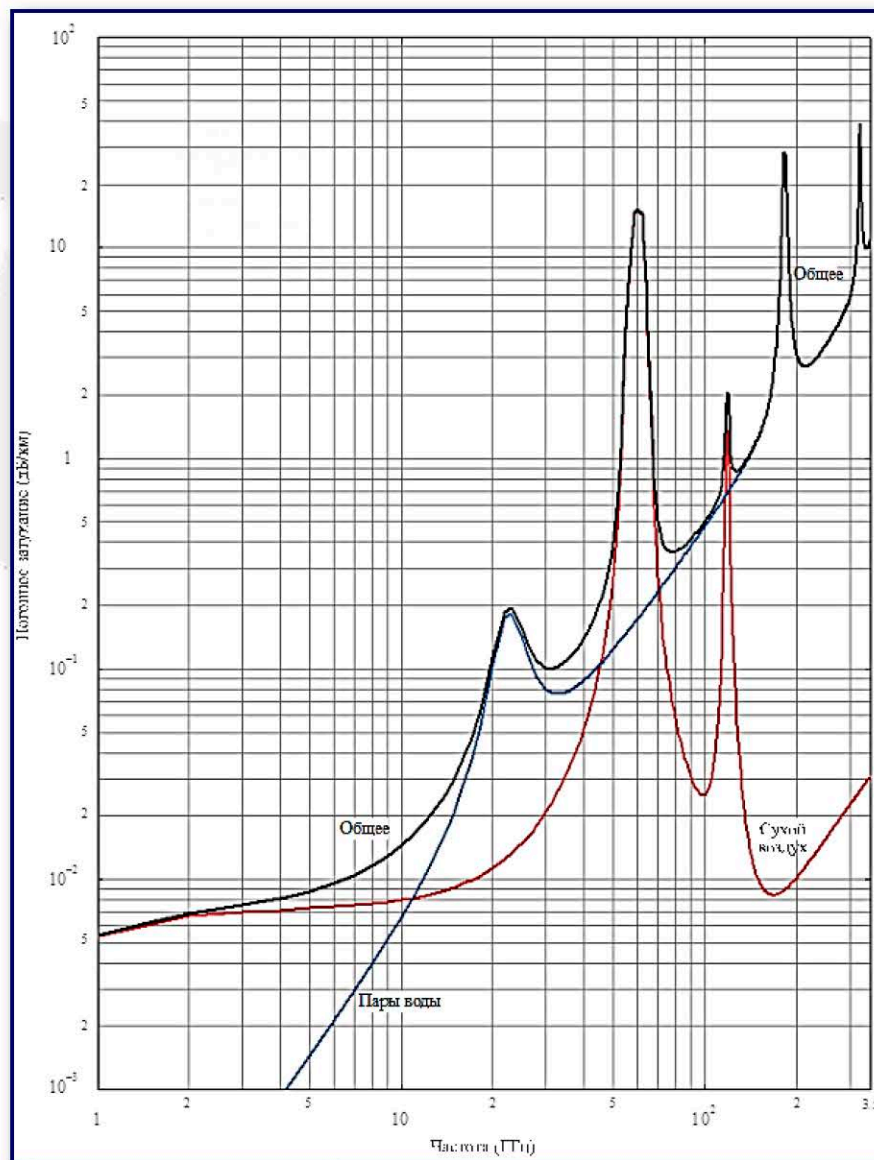
**GEOSAT
и GFO-1
(17 суток)**



**GEOSAT
(геодезическая
программа)**



Рабочая частота альтиметра



Окна прозрачности атмосферы

Погонное затухание (дБ/км)
в сухом воздухе и водяных парах
при атмосферном давлении 1013 гПа,
температуре 15 °С и концентрации
паров воды 7,5 г/м³



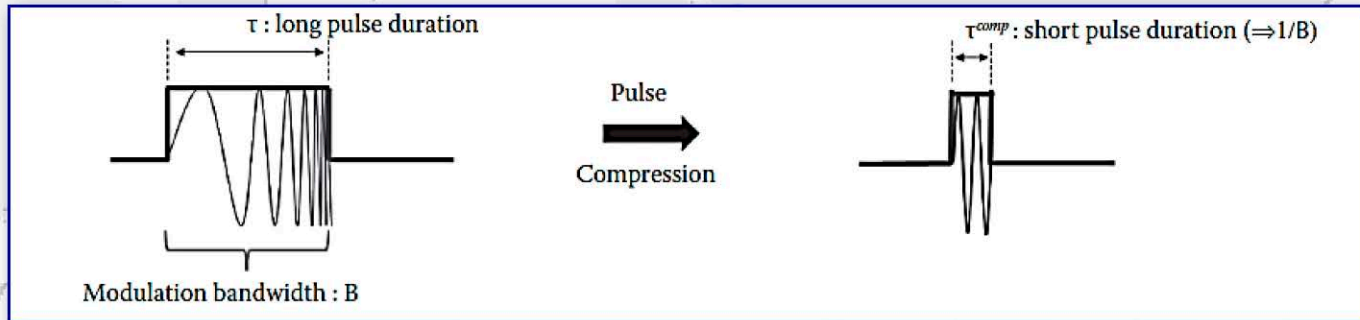
Обработка данных

- ⇒ Обработка данных на борту спутника
- ⇒ Наземный сегмент системы обработки данных
 - ⇒ Анализ формы отраженного импульса (ретрегкинг)
 - ⇒ Расчёт поправок
- ⇒ Верификация данных
- ⇒ Типы и базы данных

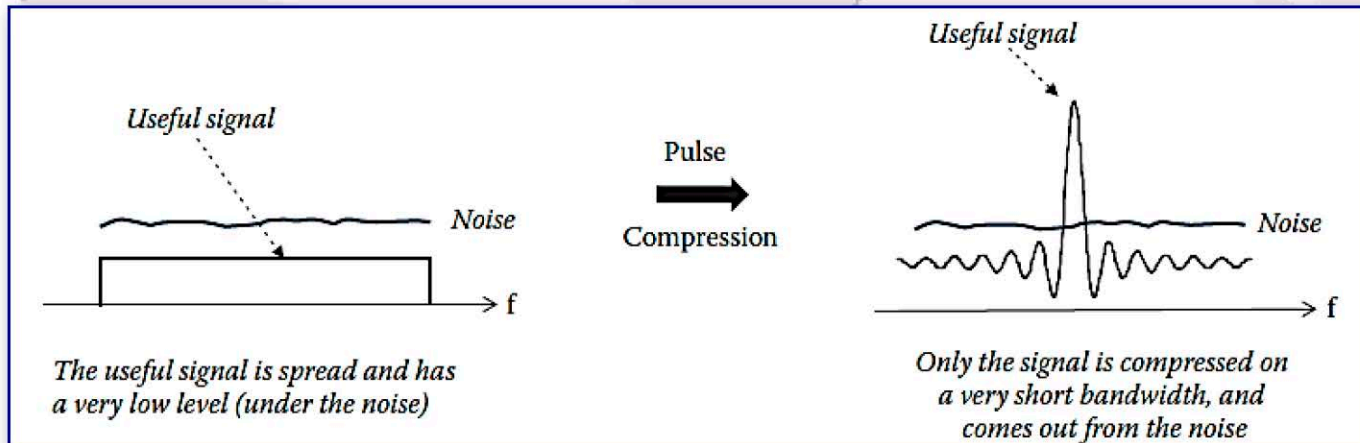


Сжатие зондирующих импульсов

Для достижения приемлемого разрешения альтиметра требуется очень короткая длительность зондирующего импульса (разрешение по высоте в 50 см соответствует длительности импульса менее 2 нс). При этом остается требование к повышенной мощности зондирующего сигнала для уменьшения ошибок, связанных с отношением сигнал/шум. Таким образом, для повышения разрешения альтиметра используется зондирующий импульс с частотной модуляцией.

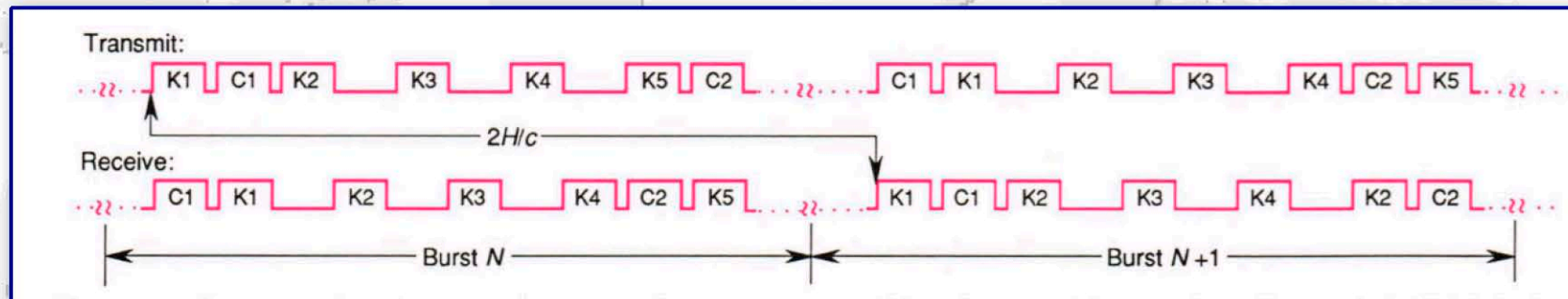


Range resolution before processing	$\frac{c_0 \cdot \tau}{2}$	$\longrightarrow$	$\frac{c_0}{2 \cdot B}$	Range resolution after processing
---------------------------------------	----------------------------	-------------------	-------------------------	--------------------------------------

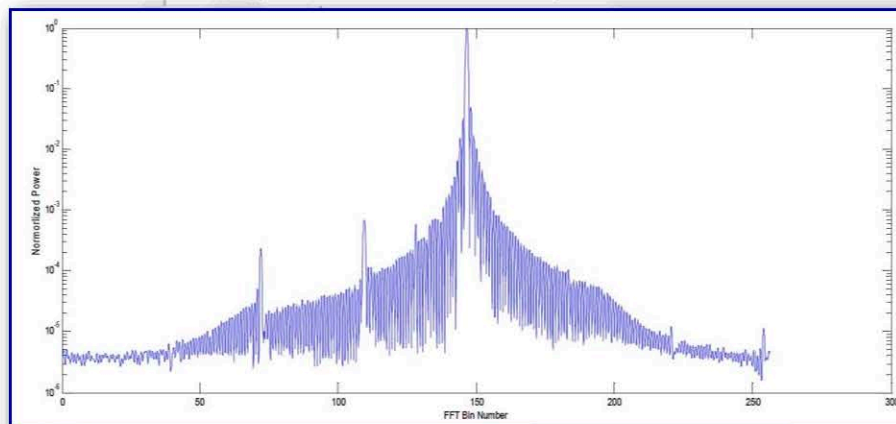


Обработка данных на борту спутника

- ➔ Определение времени между посылкой зондирующего импульса и моментом приёма отражённого импульса



- ➔ Фурье-преобразование мощности отражённого импульса для последующего анализа формы отражённого импульса.



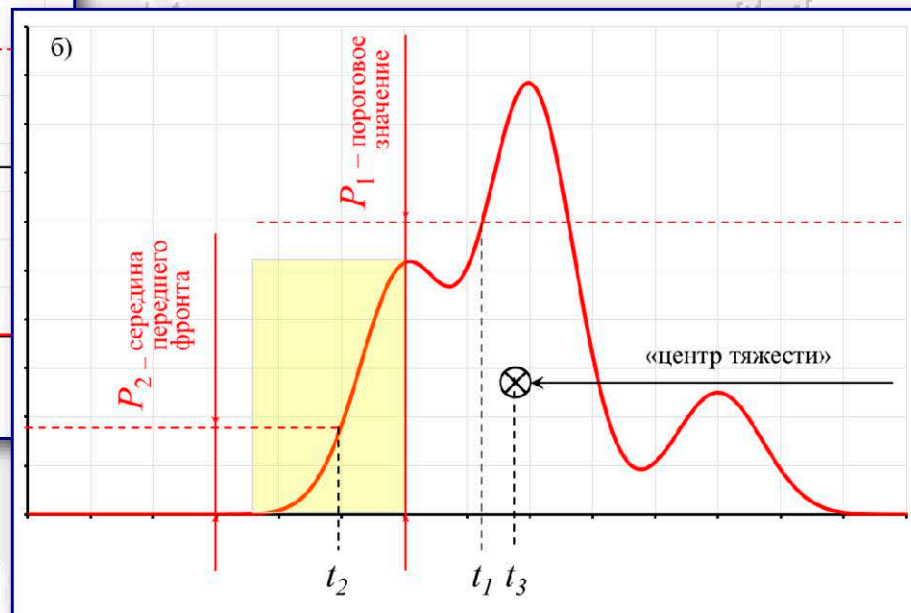
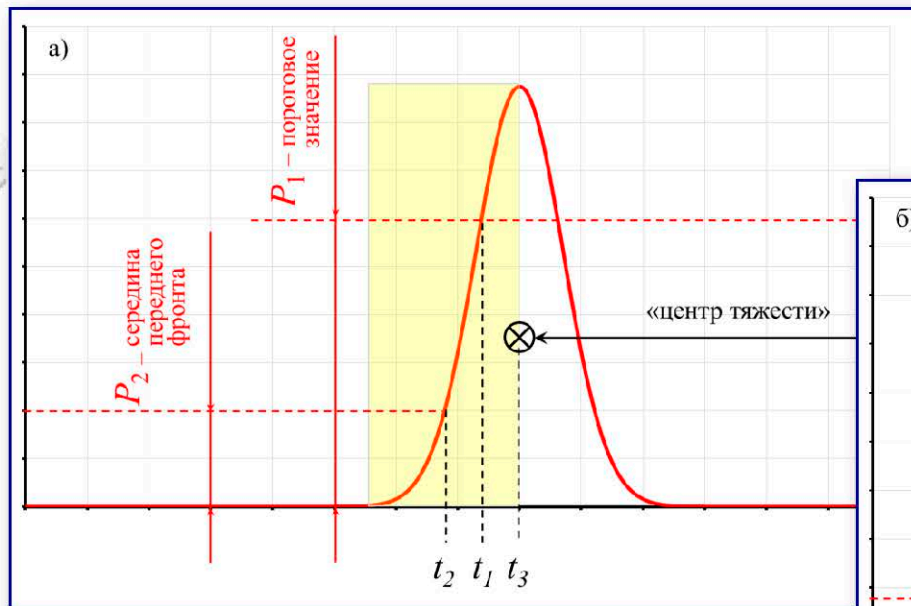
*Нормированная мощность
отражённого импульса*



*Мощность отражённого импульса
после фурье-преобразования —
«форма» отражённого импульса*



Выбор времени отражения сигнала

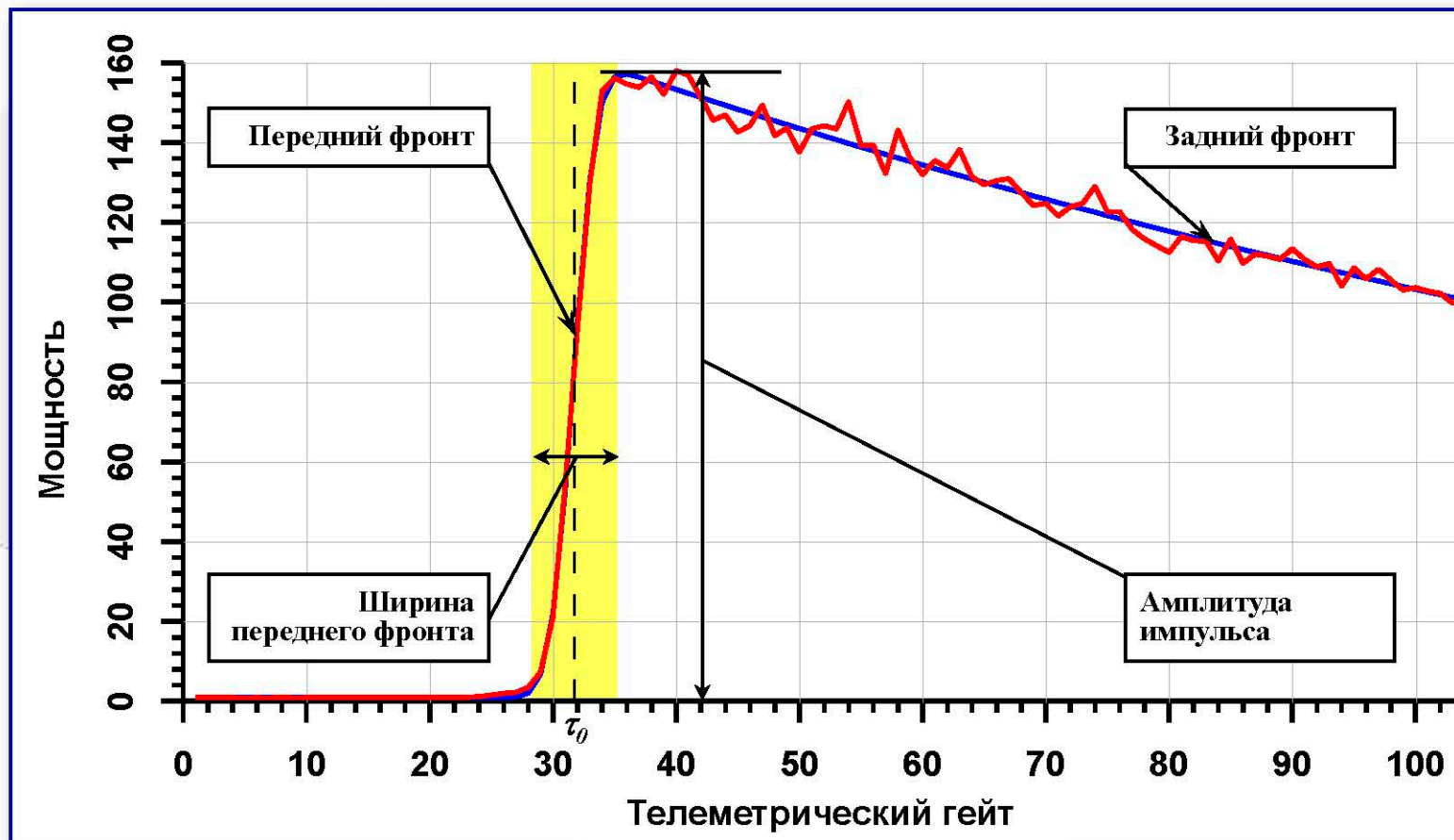


Параметры отражённых сигналов от точечной цели (а) и от шероховатой поверхности (б):

- t_1 – время превышения порогового значения;
- t_2 – время, соответствующее середине переднего фронта (выделен жёлтым цветом);
- t_3 – время, соответствующее «центру тяжести» фигуры, образованной изображением отражённого сигнала на линейной временной развёртке.



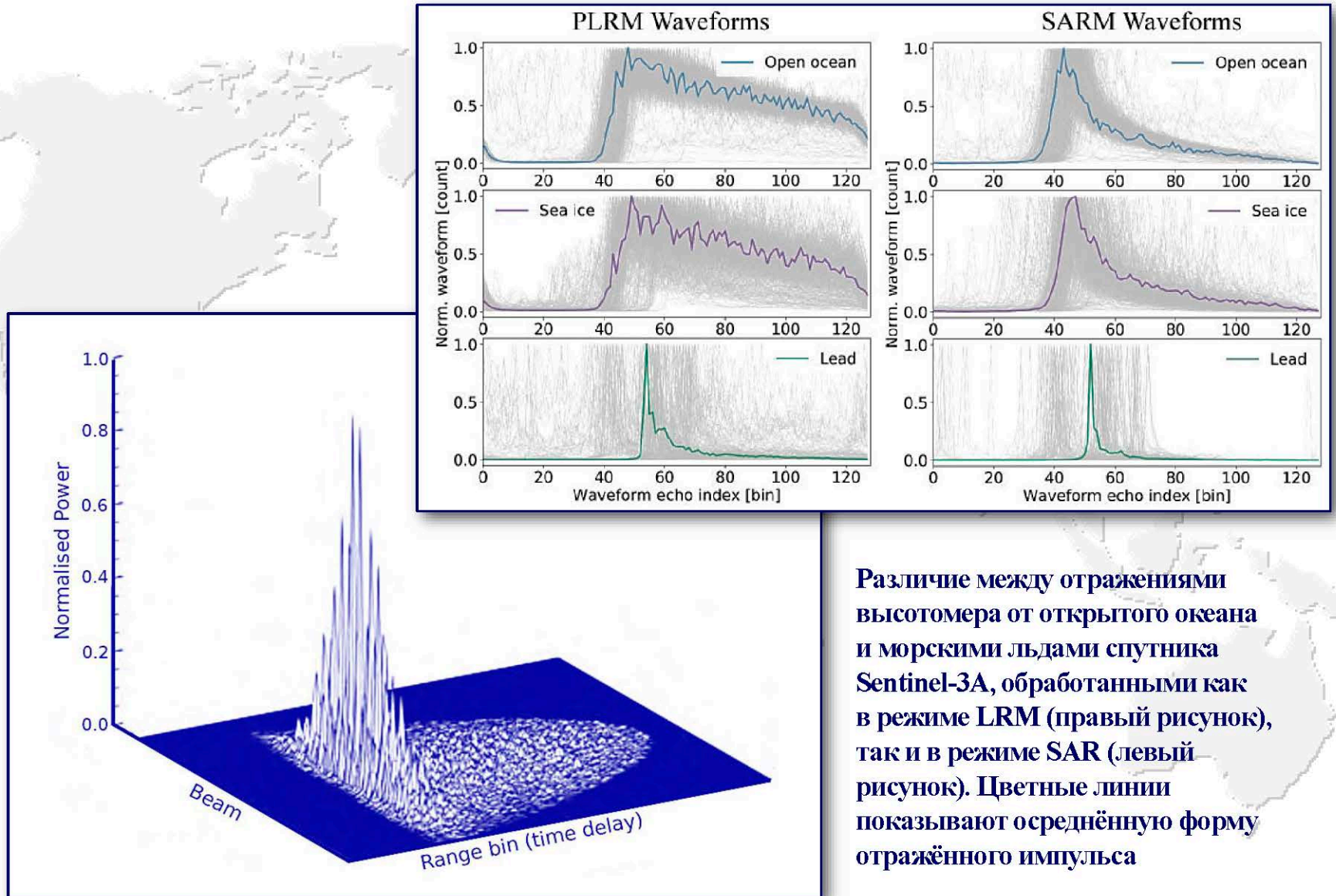
Форма отражённого импульса



Форма импульса, отражённого от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осреднённая за 1 с форма отражённого импульса для условий открытого океана (красная линия), где τ_0 — середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн (h_{swH})



Форма отражённого импульса



Различие между отражениями
высотометра от открытого океана
и морскими льдами спутника
Sentinel-3A, обработанными как
в режиме LRM (правый рисунок),
так и в режиме SAR (левый
рисунок). Цветные линии
показывают осреднённую форму
отражённого импульса

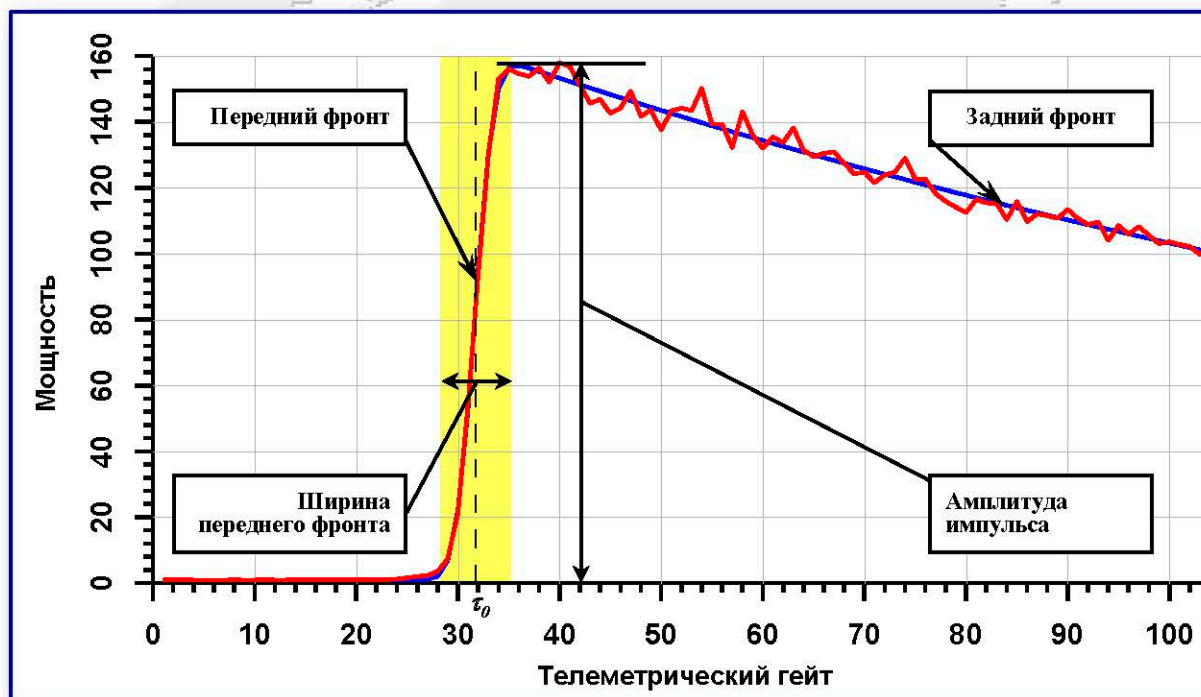


Анализ формы отражённого импульса (ретрекинг)

Алгоритмы ретрекинга разделяются:

- на эмпирические или параметрические (алгоритм центра тяжести или алгоритм Ise-1, β — ретрекинг и т.д.),
- аналитические (по формуле Брауна, по формуле Брауна – Хайне, алгоритмы Ocean-1 и -2, алгоритм Ise-2 и т.д.)
- статистические (метод оценки максимального правдоподобия и т.д.),
- региональные.

Форма импульса, отражённого от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осреднённая за 1 с форма отражённого импульса для условий открытого океана (красная линия), где τ_0 — середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн (h_{swh})



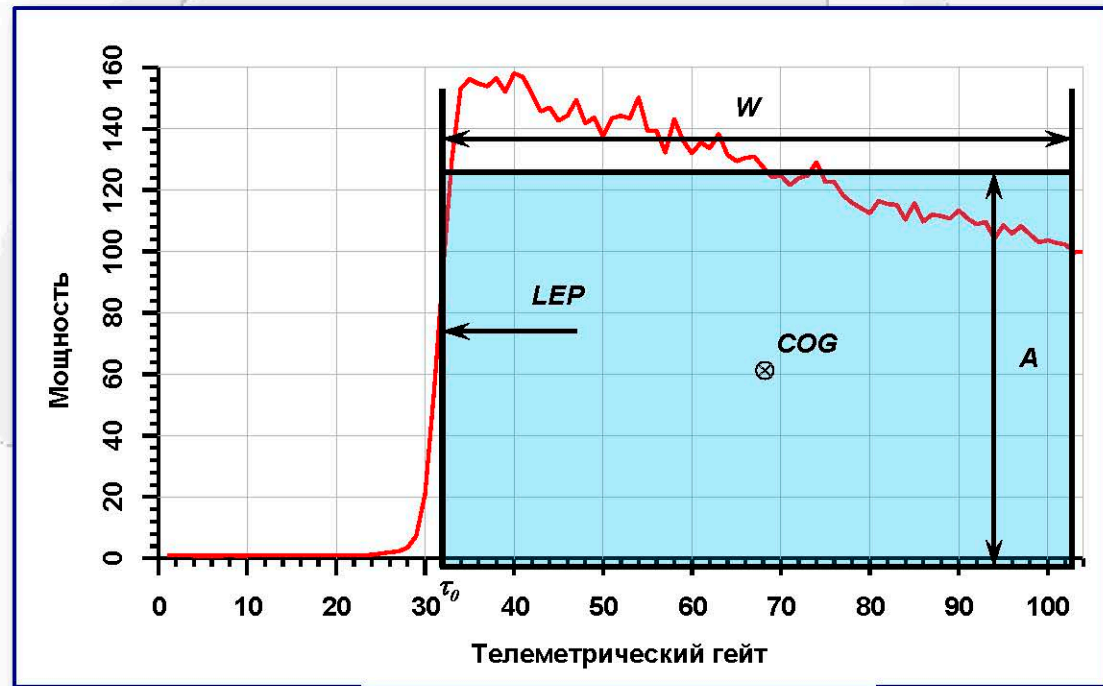
Алгоритм центра тяжести (Ice-1)

Центрирование мощности отражённого сигнала проводится по алгоритму центра тяжести по амплитуде (A), ширине (W), положению центра тяжести волны (COG) и положение середины переднего фронта (LEP)

$$A = \sqrt{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t) / \sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)}$$

$$W = \left(\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t) \right)^2 / \sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)$$

$$COG = \sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} iP_i^2(t) / \sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)$$



$$LEP = COG - \frac{W}{2}$$



Теоретическая модель формы отражённого импульса

При малых отклонениях оси антенны от положения надира среднюю форму принятого эхолитом отражённого от морской поверхности сигнала, вывод которой базируется на модели некогерентного (по мощности) рассеяния радиоволн шероховатой поверхностью

$$P(t) = P_{FSI}(t) \otimes s_r(t) \otimes q_s(t)$$

- $P_{FSI}(t)$ – средняя мощность сигнала, отражённого плоской поверхностью
 $s_r(t)$ – форма импульса, отражённого от плоской поверхности
 $q_s(t)$ – плотность вероятности распределения высот зеркальных точек

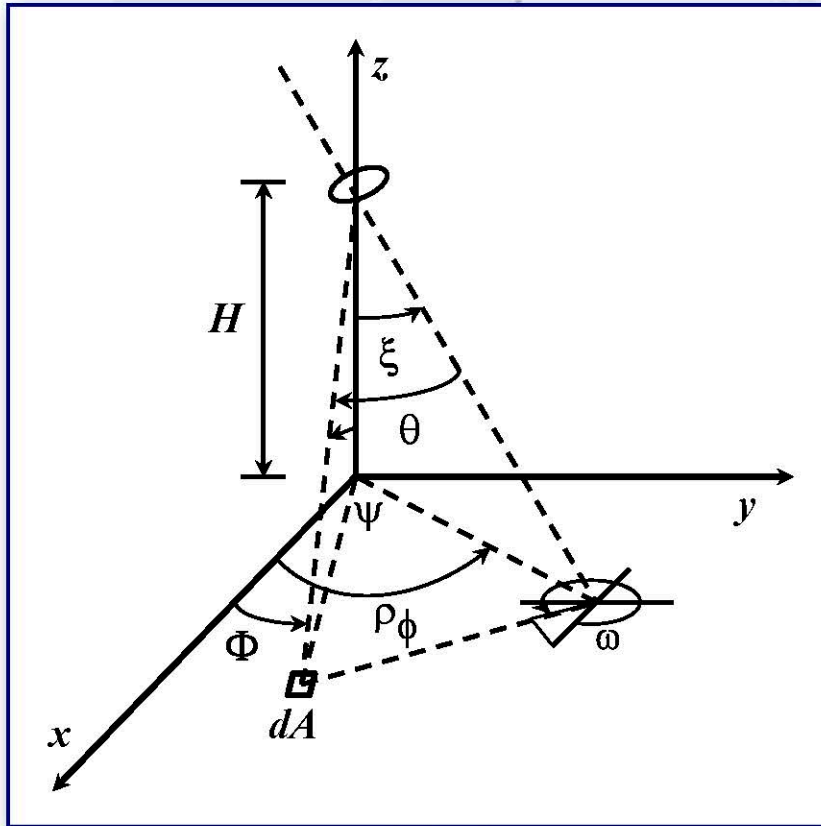
Модель Брауна построена в рамках следующих предположений:

- отражающая поверхность содержит достаточно большое число независимых отражающих элементов;
- статистики возвышений поверхности являются постоянными в пределах освещаемой радаром поверхности;
- отражение является скалярным процессом без эффектов поляризации;
- нормированное сечение обратного рассеяния является постоянным для всей освещаемой площади, т.е. в пределах диаграммы направленности не зависит от угла падения;
- эффектом Доплера можно пренебречь.



Модель Брауна

$$P_{FSI}(t) = \left(\lambda^2 / (4\pi)^3 L_P \right) \int_{\text{illuminated area}} \left(\delta\left(t - \frac{2r}{c}\right) G^2(\theta, \omega) \sigma(\psi, \phi) / r^4 \right) dA$$



λ – длина волны зондирующего импульса радиовысотомера;

L_P – двусторонняя потеря при распространении сигнала;

$\delta(t - 2r/c)$ – передаточная функция с задержкой по времени, которая является дельта-функцией;

r – расстояние от антенны до элементарной области dA на поверхности;

$G^2(\theta, \omega)$ – диаграмма направленности антенны;

$\sigma(\psi, \phi)$ – сечение обратного рассеяния на dA ;

H – высота орбиты спутника относительно подстилающей поверхности.



Модель Брауна

$$P_{FSI}(t) = \frac{G_0^2 \lambda c s_0}{4(4p)^2 L_p H^3} \times \exp \left[-\frac{4}{g} \sin^2 x - \frac{4c}{gH} t \times \cos 2x \right] \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n G(n+1/2)}{\sqrt{p} \times G(n+1)} \left[\sqrt{\frac{ct}{H}} \tan x \right]^n I_n \left(\frac{4}{g} \sqrt{\frac{ct}{H}} \times \sin 2x \right)$$

- τ – время отражения зондирующего импульса от подстилающей поверхности;
- G_0 – нормировочный коэффициент диаграммы направленности антенны;
- λ – длина волны зондирующего импульса радиовысотомера;
- L_P – двусторонняя потеря при распространении сигнала;
- σ_0 – коэффициент обратного рассеяния;
- H – высота орбиты спутника относительно подстилающей поверхности;
- γ – эффективная ширина диаграммы направленности антенны.

$$\tau = t - 2H/c$$

$$\gamma = 0,724 \cdot \sin^2 \theta_{3dB}$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt = \int_0^1 (-\ln z)^{x-1} dz$$

θ_{3dB} – диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ по мощности;

$\Gamma(x)$ – Гамма-функция;

$I_n(x)$ – функция Бесселя n -го порядка.



Модель Брауна

$$P(t) = \frac{P_0 \sigma_0}{2H^4} \cdot \exp\left(-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha\right) \frac{c}{H} (t - \tau_0)\right) \cdot \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{c(t - \tau_0)}{\sqrt{2} \sqrt{s^2 + c^2 \tau_{pulse}^2}}\right)\right) \times \\ \times \exp\left[-\frac{4}{\gamma} \cdot \sin^2 \xi - \frac{c}{H} (t - \tau_0) \cdot \left(\frac{4}{\gamma} \cos 2\xi + \alpha\right)\right] I_0\left(\frac{4}{\gamma} \cdot \sin 2\xi \sqrt{\frac{c}{H} (t - \tau_0)}\right)$$

- t – время;
 τ_0 – «эпоха»;
 σ_0 – коэффициент обратного рассеяния;
 ξ – угол отклонения антенны от положения надира;
 s – средняя высота шероховатости подстилающей поверхности (зависит от значимой высоты волны h_{swh});
 H – расстояние от спутника до поверхности;
 P_0 – мощность зондирующего импульса;
 R – радиус Земли;
 θ – угловое разрешение антенны;
 τ_{pulse} – длительность зондирующего импульса;
 I_0 – функция Бесселя.

$$\alpha = \frac{4c}{\gamma h \left(1 + \frac{h}{R}\right)},$$

$$\gamma = \frac{\sin^2(\theta)}{2 \ln(2)},$$

$$I_0(z) = 1.$$



Модифицированная формула Брауна

$$P(t) = K \frac{\sigma_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \cdot \sin(\xi)^2\right) \cdot [1 + \operatorname{erf}(u)] \exp(-v)$$

$$K = 1, \quad \gamma = 0,724 \left(\sin(\theta_{3dB})\right)^2,$$

$$u = \frac{t - \tau - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left(t - \tau - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2\right),$$

$$\alpha = \frac{4c}{\gamma H \left(1 + \frac{H}{R}\right)} \left(\cos(2\xi) - \frac{(\sin(2\xi))^2}{\gamma} \right),$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_P^2 + \left(\frac{h_{swh}}{2c}\right)^2}, \quad \sigma_P = \frac{0,5}{BW}.$$

τ – «эпоха», номер гейта;

σ_0 – коэффициент обратного рассеивания ;

h_{swh} – значимая высота морских волн;

ξ – угол отклонения антенны от положения надира;

θ_{3dB} – угловое разрешение антенны;

H – расстояние от спутника до поверхности;

R – радиус Земли;

c – скорость света.



Развитие теоретической модели формы отраженного импульса

Развитие модели Брауна:

$$P(t) = A \exp(-v) \cdot [1 + \operatorname{erf}(u)]$$

$$v = \alpha \left(t - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2 \right), \quad u = \frac{t - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_c}, \quad \alpha = \delta - \beta^2 / 4,$$

$$\sigma_c^2 = \sigma_p^2 + \sigma_s^2, \quad \sigma_s = \frac{h_{swh}}{2c}, \quad \delta = \frac{4c}{\gamma h} \cdot \cos(2\xi), \quad \beta = \frac{4}{\gamma} \left(\frac{c}{H} \right)^{1/2}$$

➤ Использование различных разложений функций Бесселя и разные порядки ортогональных полиномов Чебышева – Эрмита H_n .

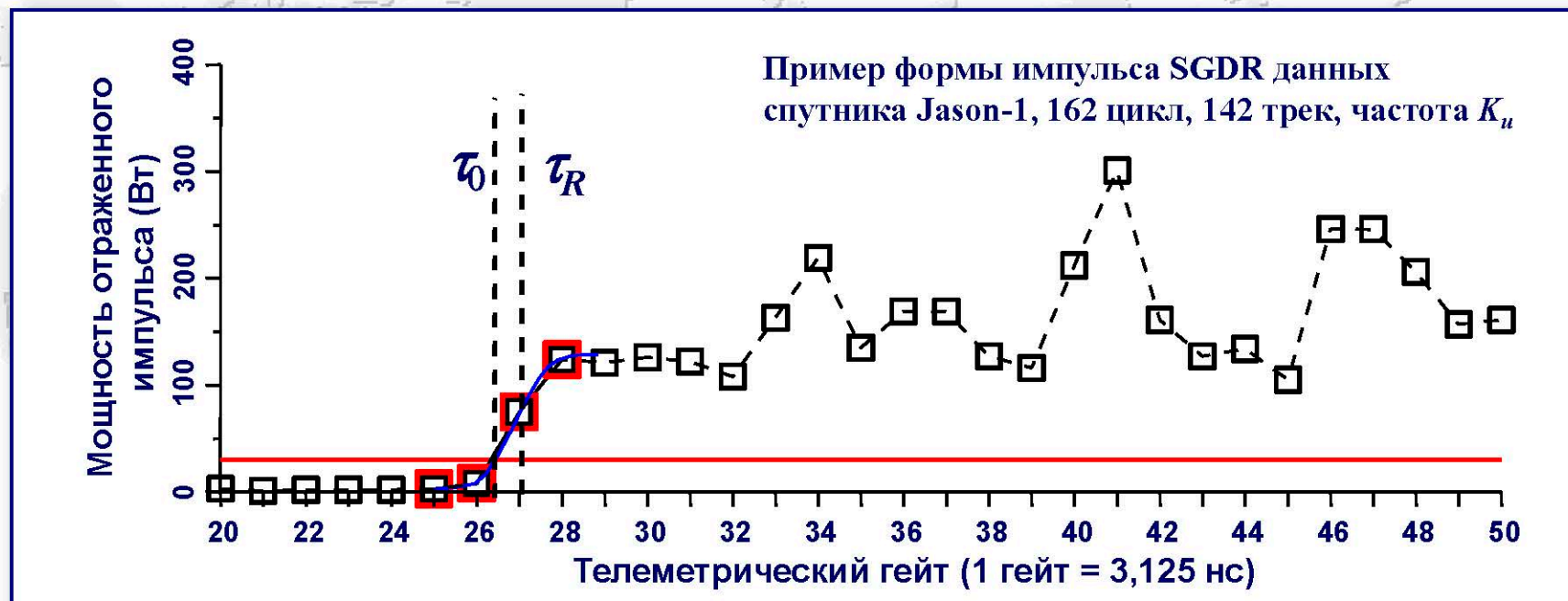
$$I_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{4} \right)^n \left(\frac{1}{n!} \right)^2 \approx 2 \exp \left(\frac{z^2}{8} \right) - 1$$

➤ Использование различных распределений плотности вероятности возвышений морской поверхности.



Региональный адаптивный ретрекинг

1. Пороговый ретрекинг определяет точку прихода импульса τ_0 по превышению заданного порога



2. Улучшенный алгоритм ретрекинга — 4 точки вблизи порога аппроксимируются функцией ошибок

$$A \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\tau - \tau_R}{S} \right) \right)$$

Параметры A , τ_R , S определяются из алгоритма оптимизации (минимизируются среднеквадратичные отклонения)



Метод максимального правдоподобия (MLE — Maximum Likelihood Estimator)

Это универсальный метод оптимального оценивания неизвестных параметров, если известен вид функции распределения. Для обработки данных спутниковой альтиметрии функция правдоподобия имеет вид:

$$\chi^2(\theta_j) = \sum_{i=1}^n \left(-N \frac{\bar{P}_i}{P_i(\theta_j)} - N \cdot \ln P_i(\theta_j) \right)^2$$

- N — количество отдельных форм импульса, усреднённых для формирования измеренного сигнала;
- N — количество гейтов;
- P_i — теоретическая мощность отражённого сигнала;
- $\bar{P}_i$ — реальная мощность отражённого сигнала;
- θ_j — оцениваемые параметры ($i = 2-4$).



Значимая высота ветровых волн

Уравнение свертки

$$P(t) = P_{FSI}(t) \otimes s_r(t) \otimes q_s(t)$$

$q_s(t)$ — плотность вероятности
возвышений
морской поверхности

➔ Линейная модель

(распределение Гаусса)

- не учитывает асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности.

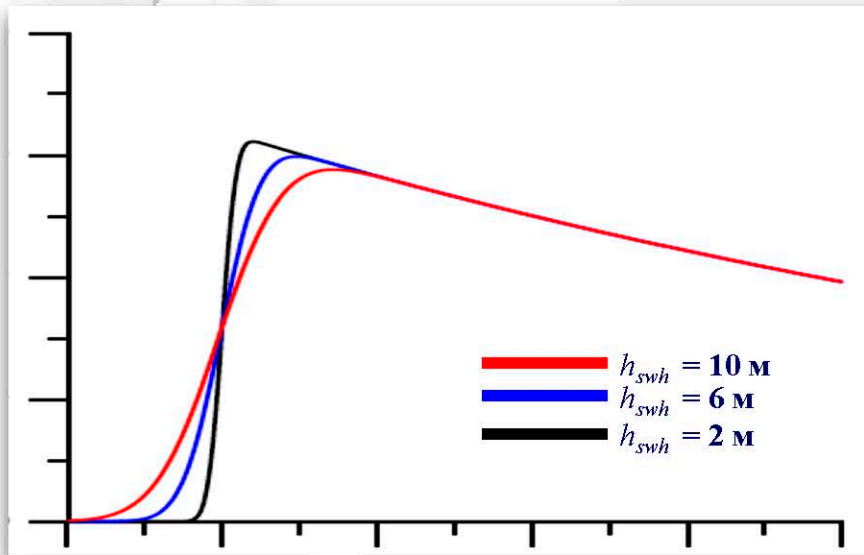
➔ Нелинейная модель Грама – Шарлье (распределение Грама – Шарлье)

- возвышения морской поверхности $\leq 2,5$ м.

➔ Комбинированная модель

- распределение Грама – Шарлье (возвышения морской поверхности $\leq 2,5$ м);
- распределение Гаусса; (возвышения морской поверхности $> 2,5$ м).

*Примеры сглаженных форм
отражённого импульса для различной
степени волнения морской поверхности*



Период волн

1. На основании закона разгона:

$$T_p = \frac{2\pi U_{10}}{0,84g} \left(\frac{h_{swh}}{0,26} \right)^{0,6}$$

2. Gommenginger et al. (2003):

$$\log_{10}(T_p) = a + b \cdot \log_{10}((\sigma_0 h_{swh})^{1/4})$$

$$a = 0,154 \pm 0,021, \quad b = 1,797 \pm 0,047$$

3. Badulin (2014):

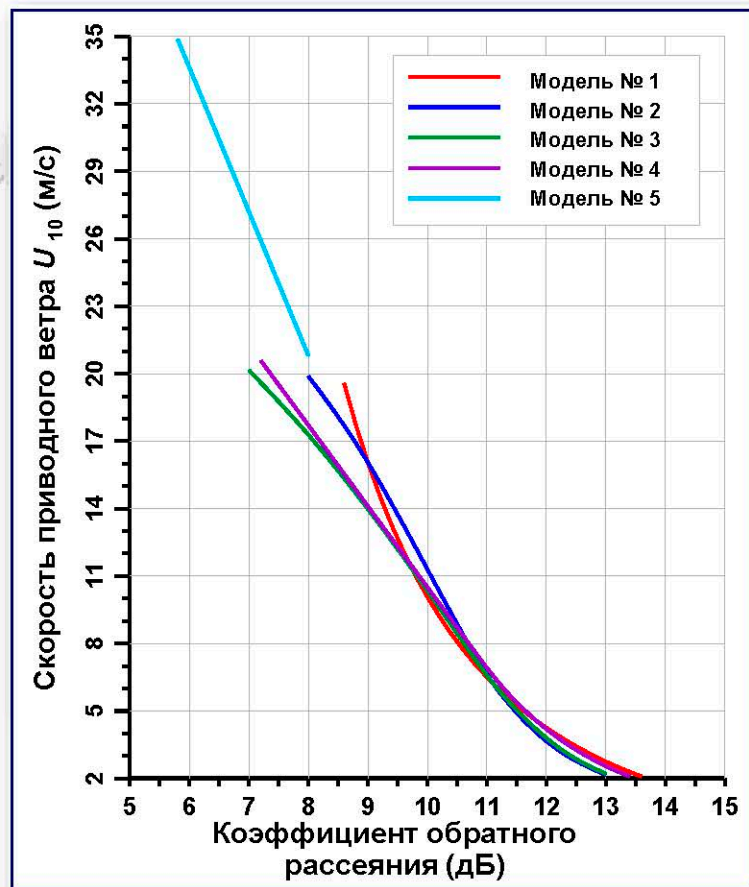
$$T_p = 2^{1/5} \pi \times 0,67 \sqrt{\frac{h_{swh}}{g}} \cdot |\Delta_p h_{swh}|^{-1/10}$$

Периоды волн ближайших к бую AD06 (18,814 с.ш., 67,095 в.д.) по разным методикам за 26 января 2013 г. и 24 декабря 2013 г.

Дата	Высота волны (м)		Период волны (с)				Расстояние от буя (км)
	Буй	Альтиметр	Буй	Закон разгона	Gommenginger et al., (2003)	Badulin (2014)	
2013/01/26	12	11	44	46	47	54	~ 99
2013/12/24	19	2	52	63	618	65	~ 38



Скорость приводного ветра



Зависимость скорости приводного ветра на высоте 10 м от коэффициента обратного рассеяния для наиболее широко используемых алгоритмов

1. Brown (1979):

$$U_{10} = \exp \left[\left(10^{-(0,21 + \sigma^0/10)} - B \right) / A \right]$$

2. Chelton and McCabe (1985):

$$U_{10} = 0,943 \cdot 10^{\left[(\sigma^0/10 - A) / B \right]}$$

3. Witter and Chelton (1991):

$$U_{10} = \sum_{n=0}^5 A_n (\sigma^0)^n$$

4. Abdalla (2012):

$$U_{10} = \begin{cases} A_1 - B_1 \sigma^0 \\ A_2 \exp(-B_2 \sigma^0) \end{cases}$$

5. Young (1993):

$$U_{10} = A \sigma^0 + B$$



Поправки на влияние атмосферы

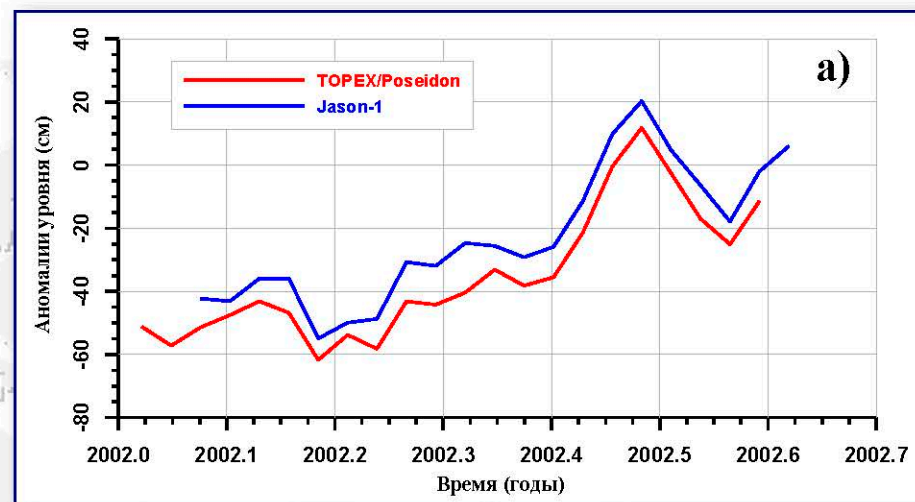
На прохождение радиоимпульса альтиметра сильно влияет состояние атмосферы, которое выражается в увеличении времени возврата зондирующего сигнала, что приводит к ошибке определения высоты спутника над поверхностью океана.

- «Сухая» тропосферная поправка
 - рассеяние радиоимпульса молекулами газов, входящих в состав воздуха, и в первую очередь кислородом (2–3 м)
- Поправка на влажность
 - поглощение электромагнитного излучения водяным паром (<0,5 м)
- Ионосферная поправка
 - рассеяние радиоимпульса альтиметра свободными электронами и ионами (0,02–0,2 м)

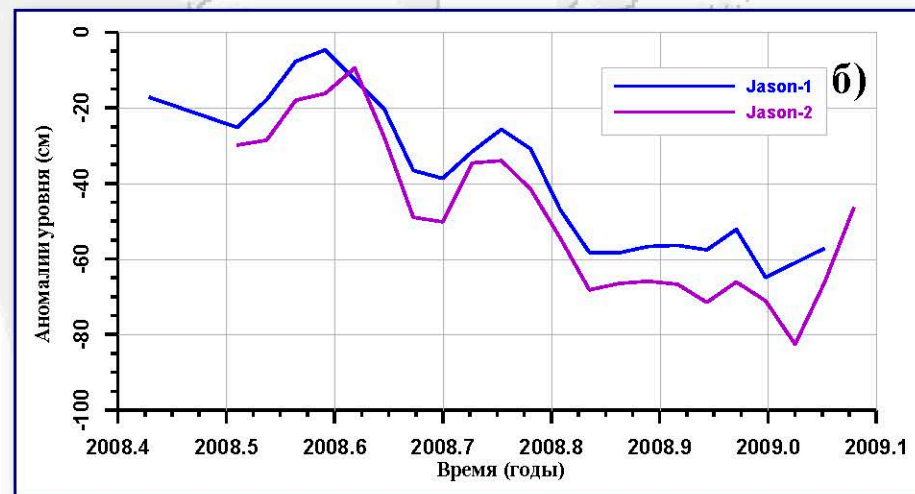


Учёт систематической ошибки

Для Каспийского моря анализ показал, что измерения высоты морской поверхности, проводимые альтиметром спутника Jason-1, превышают измерения спутника TOPEX/Poseidon в среднем на $9,19 \pm 1,48$ см, а спутника Jason-1 превышают измерения спутника Jason-2 в среднем на $8,85 \pm 0,84$ см

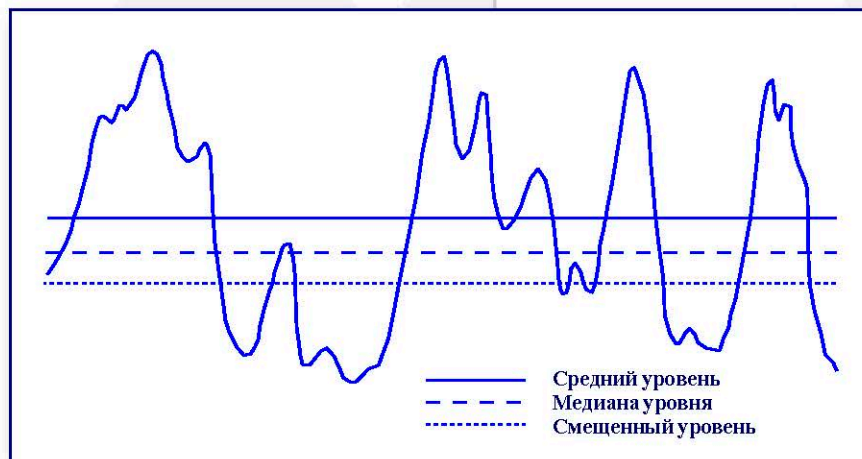


Временная изменчивость аномалий уровня (см) Каспийского моря (а) в точке ($50^{\circ}49'56,7''$ в.д. и $41^{\circ}26'5,7''$ с.ш.), лежащей на 092-м треке, по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 (а) и Jason-2 и Jason-1 (б)



Поправки на состояние подстилающей поверхности

Помимо учёта влияния атмосферы на расчёт высоты спутника необходимо учесть поправку, связанную с состоянием подстилающей поверхности



Различие между средним уровнем моря, его медианой и измеряемой величиной

➔ Поправка на электромагнитное смещение

- интенсивность отражения радиоволн меняется вдоль профиля длинных поверхностных волн, т.е. гребни волны отражают зондирующий радиоимпульс слабее, чем впадины

$$dh_{emb} = F_1(h_{swh}, U_{10}) \approx F_1(h_{swh}, \sigma^0)$$

➔ Поправка на асимметрию возвышений морской поверхности

- обусловлена отклонением распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса



Геофизические поправки

Позволяют исключить из данных спутниковой альтиметрии изменение высоты моря, обусловленное различными физическими явлениями

➔ Поправка обратного барометра

$$dh_{inv} = -9,948(P_s - P_0)$$

➔ Приливные поправки

- обусловлены воздействием приливообразующих сил на водную и твёрдую оболочки Земли

➔ Полусные приливы

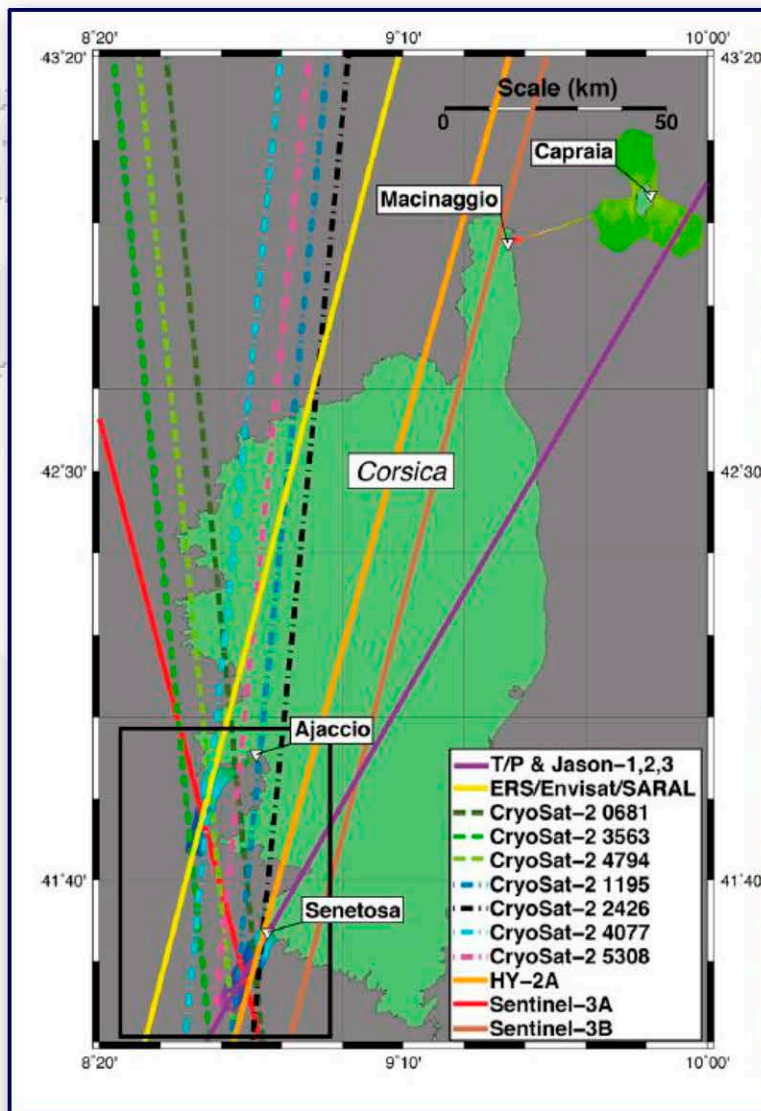
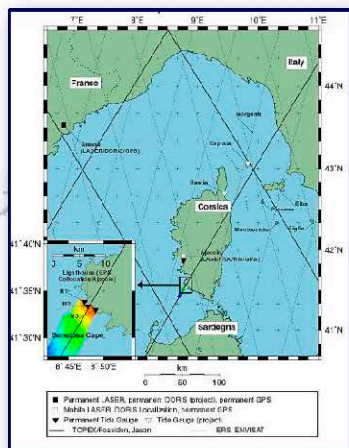
- отклонения водной поверхности или твёрдой оболочки Земли, вызванные колебаниями положения её полюса, которые обусловлены свободной эйлеровской прецессией

➔ Нагрузка на дно океанов и морей

- приливы приводят к возрастанию массы столба воды единичного сечения и к появлению дополнительной нагрузки на дно и его прогибу (эффект нагрузки), а избыточная масса воды сама притягивает Землю (эффект самопритяжения) и тем самым вызывает дополнительные деформации земной коры



Калибровка данных



Калибровка и/или
верификация данных
проводится на
специализированном
полигоне



Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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



Данные спутниковой альтиметрии

Данные альтиметрических измерений независимо от спутников разделяются на несколько типов: оперативные, промежуточные и окончательные.

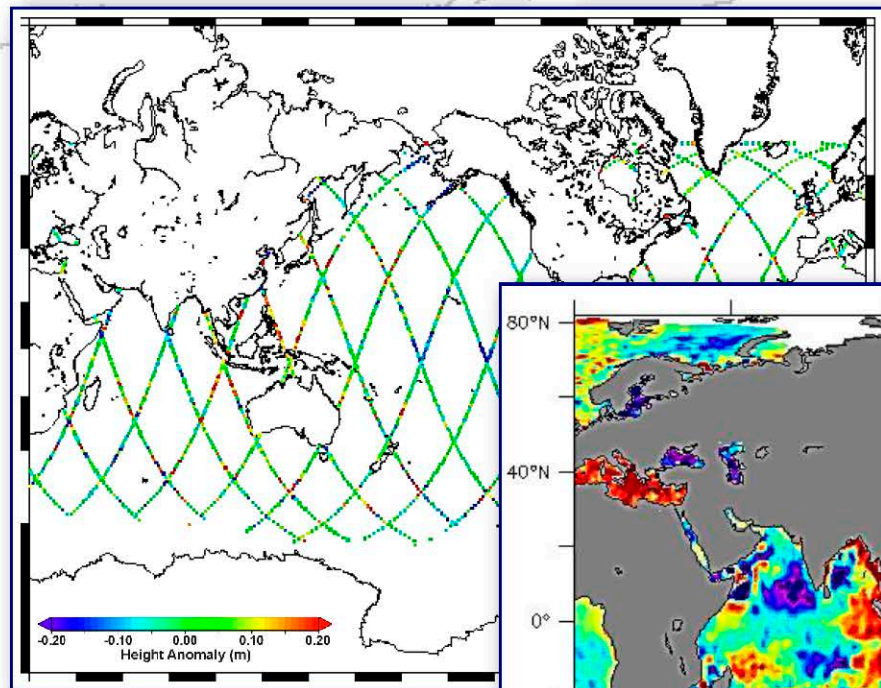
Ошибки расчёта орбиты и поправок для разных типов данных спутника Jason-2

	Тип данных		
	Оперативные (OGDR)	Промежуточные (IGDR)	Окончательные (GDR и SGDR)
Инструментальная ошибка	1.7 см	1.7 см	1.7 см
Поправка на ионосферу	отсутствует	0.5 см	0.5 см
Поправка на состояние подстилающей поверхности	2 см	2 см	2 см
Поправка на отклонение от положения надира	2 см	1 см	1 см
«Сухая» атмосферная поправка	отсутствует	0.7 см	0.7 см
Поправка на влажность	1.2 см	1.2 см	1.2 см
Альтиметр		3.3 см	3.3 см
Высота орбиты	20-30 см	< 4 см	2.5 см
Точность расчета высоты морской поверхности		5 см	4.2 см
Высота волны	10%		
Скорость ветра	2 м/с	1.7 м/с	1.7 м/с

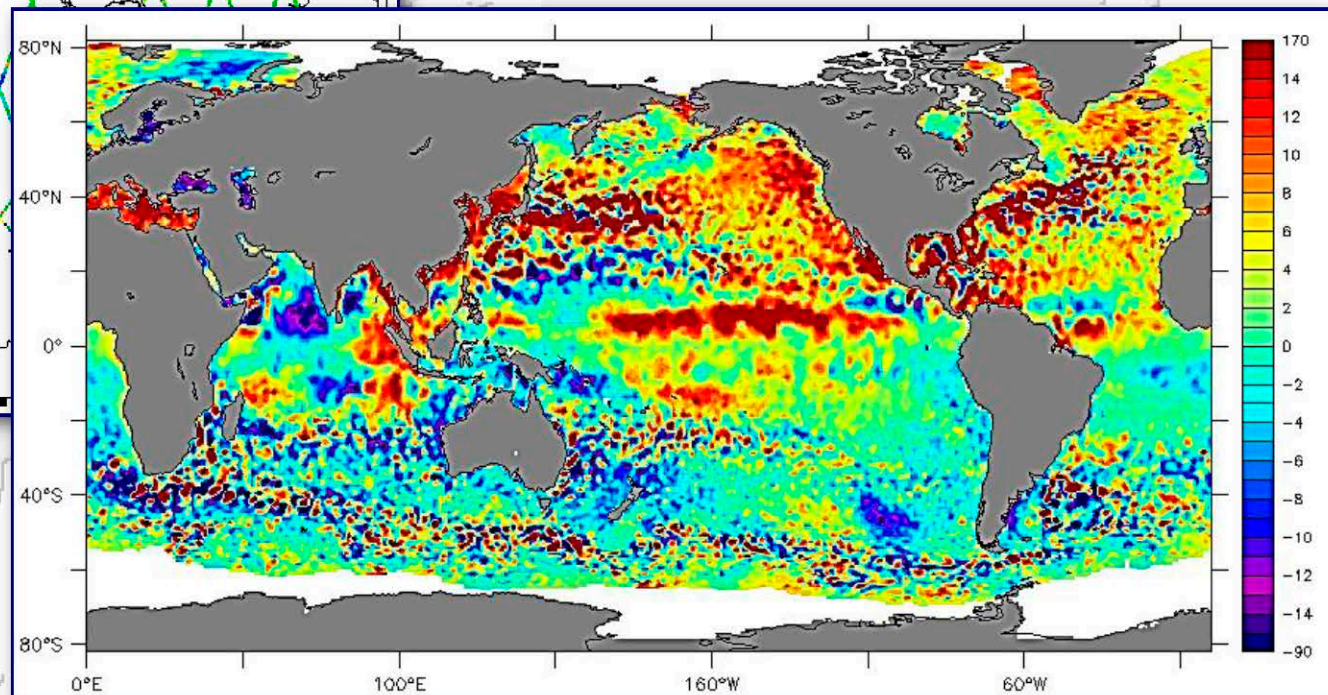


Данные спутниковой альтиметрии

Исходные данные альтиметрических измерений даются вдоль треков, так как измерения проводятся в надир или вблизи него. В результате обработки они трансформируются в данные на регулярной сетке.



Аномалии высоты морской поверхности по данным альтиметра Posidon-2 спутника Jason-1 на 13 ноября 2012 года

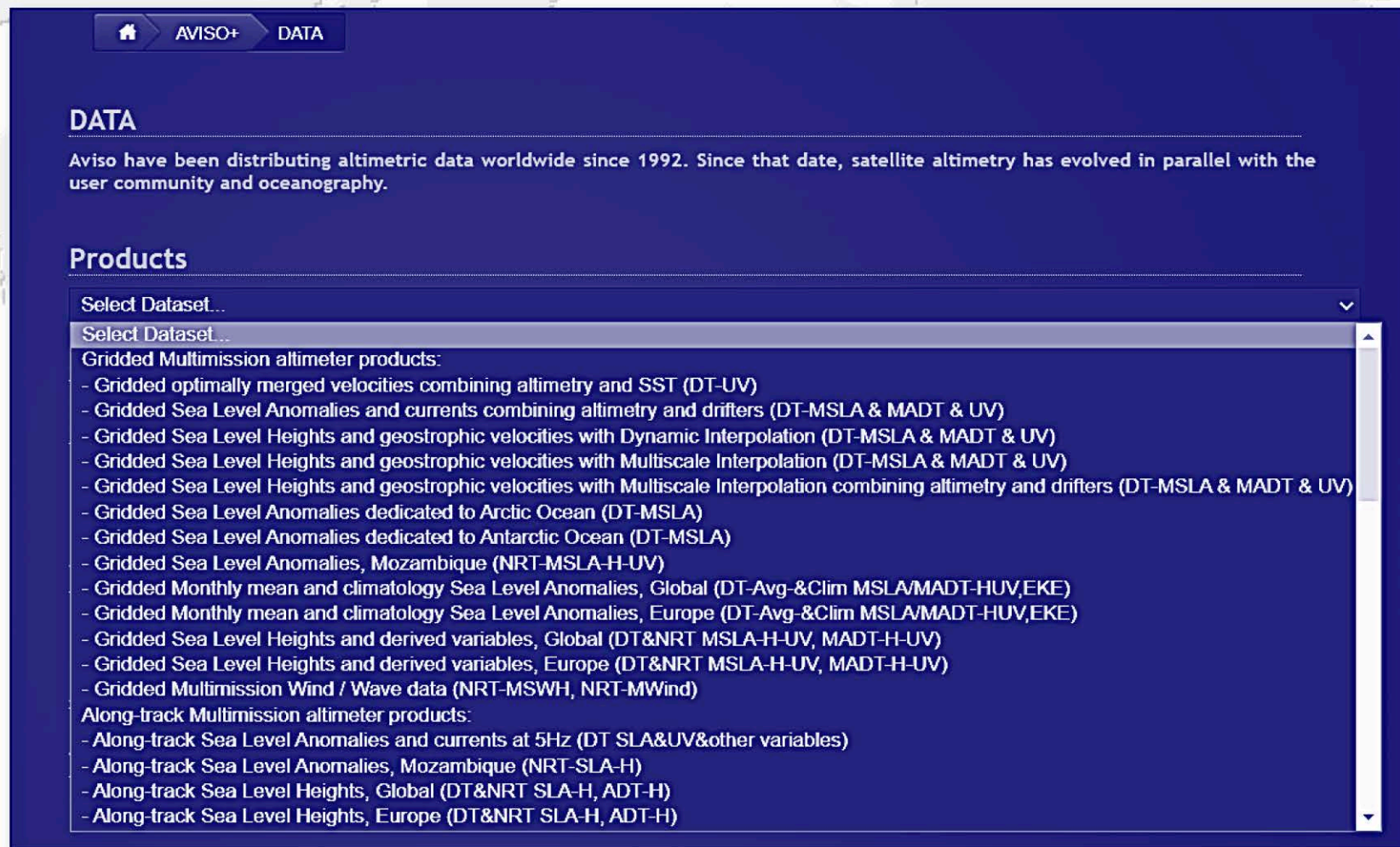


Аномалии высоты морской поверхности по данным спутника Jason-2 за июль 2012 года



База данных вдоль трека и на регулярной сетке AVISO

В базе данных AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>). включает данные вдоль трека и данные на регулярных сетках в формате NetCDF.



The screenshot shows the AVISO website's 'DATA' section. At the top, there are navigation tabs for 'AVISO+' and 'DATA'. Below the 'DATA' tab, the heading 'DATA' is followed by a paragraph: 'Aviso have been distributing altimetric data worldwide since 1992. Since that date, satellite altimetry has evolved in parallel with the user community and oceanography.' Below this, the 'Products' section features a dropdown menu titled 'Select Dataset...'. The menu is open, displaying a list of products categorized into 'Gridded Multimission altimeter products' and 'Along-track Multimission altimeter products'.

DATA

Aviso have been distributing altimetric data worldwide since 1992. Since that date, satellite altimetry has evolved in parallel with the user community and oceanography.

Products

Select Dataset...

Select Dataset...

Gridded Multimission altimeter products:

- Gridded optimally merged velocities combining altimetry and SST (DT-UV)
- Gridded Sea Level Anomalies and currents combining altimetry and drifters (DT-MSLA & MADT & UV)
- Gridded Sea Level Heights and geostrophic velocities with Dynamic Interpolation (DT-MSLA & MADT & UV)
- Gridded Sea Level Heights and geostrophic velocities with Multiscale Interpolation (DT-MSLA & MADT & UV)
- Gridded Sea Level Heights and geostrophic velocities with Multiscale Interpolation combining altimetry and drifters (DT-MSLA & MADT & UV)
- Gridded Sea Level Anomalies dedicated to Arctic Ocean (DT-MSLA)
- Gridded Sea Level Anomalies dedicated to Antarctic Ocean (DT-MSLA)
- Gridded Sea Level Anomalies, Mozambique (NRT-MSLA-H-UV)
- Gridded Monthly mean and climatology Sea Level Anomalies, Global (DT-Avg-&Clim MSLA/MADT-HUV,EKE)
- Gridded Monthly mean and climatology Sea Level Anomalies, Europe (DT-Avg-&Clim MSLA/MADT-HUV,EKE)
- Gridded Sea Level Heights and derived variables, Global (DT&NRT MSLA-H-UV, MADT-H-UV)
- Gridded Sea Level Heights and derived variables, Europe (DT&NRT MSLA-H-UV, MADT-H-UV)
- Gridded Multimission Wind / Wave data (NRT-MSWH, NRT-MWind)

Along-track Multimission altimeter products:

- Along-track Sea Level Anomalies and currents at 5Hz (DT SLA&UV&other variables)
- Along-track Sea Level Anomalies, Mozambique (NRT-SLA-H)
- Along-track Sea Level Heights, Global (DT&NRT SLA-H, ADT-H)
- Along-track Sea Level Heights, Europe (DT&NRT SLA-H, ADT-H)



База данных вдоль трека и на регулярной сетке AVISO

В базе данных AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>). включает данные вдоль трека и данные на регулярных сетках в формате NetCDF.

Ocean Bulletin

Interface to visualize Ssalto/Duacs maps for Sea Level Anomalies, Absolute Dynamic Topography, Wind and Waves by choosing a date and an area.

- Registration form
Register to get access to Aviso product, be informed of all updates, product information and reprocessing
- FTP
Aviso FTP is an authenticated FTP. All Ssalto/Duacs product users need an account on FTP, whether for NRT or for DT data, for along-track and gridded products. In NRT, the most recent data are available via FTP.
- Aviso+ CNES Data Center
This interface is used by Cnes to archive a wide range of altimetric (including GDRs, SGDRs, etc) and auxiliary data (including Earth rotation parameters, atmospheric correction data...).
- LAS (Live Access Server)
The Live Access Server is a highly configurable Web server designed to provide flexible access to geo-referenced scientific data. Plot the Global/regional gridded dataset in NRT (more than one month) and in DT.
- Thredds Data Server
The Opendap enables access to remote data sets through familiar data analysis and visualization packages (e.g. Matlab, IDL, Ferret, ncBrowse, Live Access Server), just as if they reside locally on the user's machine. An authentication is required to access it. Get access to the global/regional gridded dataset in NRT (more than one month) and in DT.
- Gridded Data Extraction Tool
Aviso+ data extraction tool enables to extract a data sub-set from the Aviso gridded datasets. You can choose either an area (by its geographical coordinates or among pre-defined regions), or a period for variable(s) within a given dataset. An option helps you to make your own Python script command lines that matches the extraction.



База данных вдоль трека и на регулярной сетке AVISO

В базе данных AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>). включает данные вдоль трека и данные на регулярных сетках в формате NetCDF.

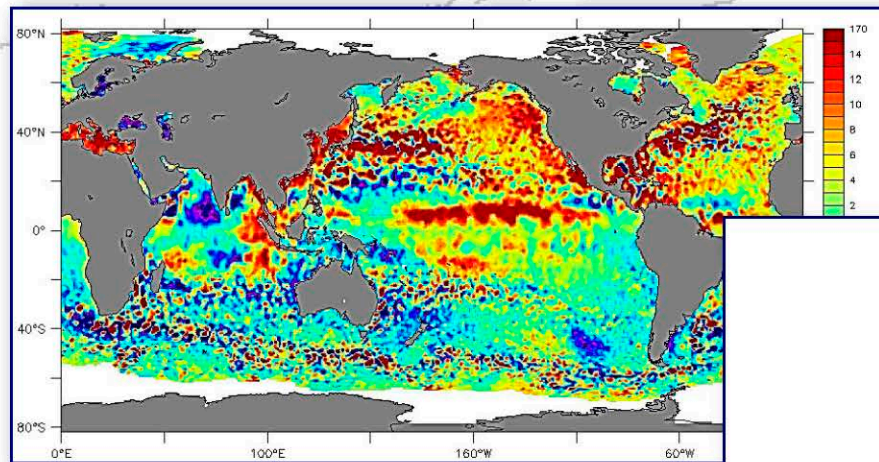
Service	Visualization	Download NetCDF	Subscribe to get access	Authenticated
Ocean Bulletin	Yes	No	No	No
LAS	Yes	No	No	No
Authenticated FTP	No	Yes	Registration form	Yes with individual login
Opendap	No	Yes	Registration form	Yes with individual login
Data Extraction Tool	No	Yes	Registration form	Yes with individual login
Aviso - Cnes Data Center	No	Yes	Dedicated Registration	Yes with individual login ⁽¹⁾
Anonymous Aviso.Cnes FTP	No	Yes	No	No

(1) The individual login/password for the Aviso-Cnes Data Center Service differs from the others.



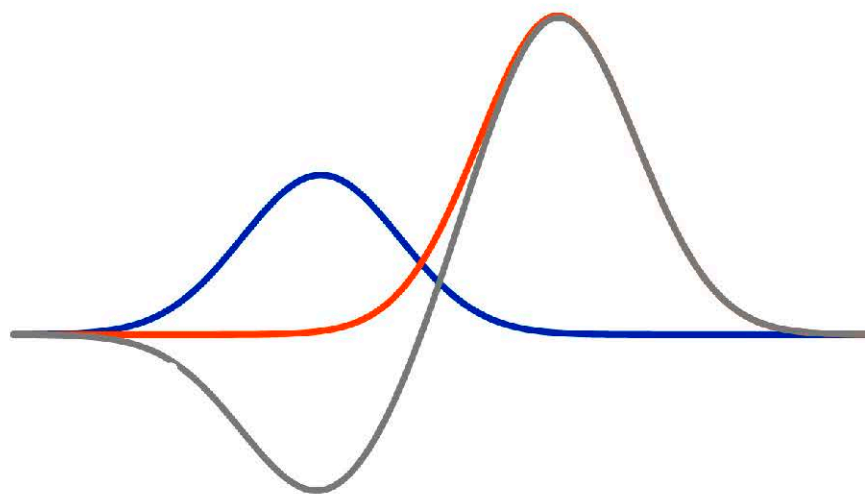
Данные спутниковой альтиметрии

Исходные данные альтиметрических измерений даются вдоль треков, так как измерения проводятся в надир или вблизи него. В результате обработки они трансформируются в данные на регулярной сетке.



Аномалии высоты морской поверхности по данным спутника Jason-2 за июль 2012 года

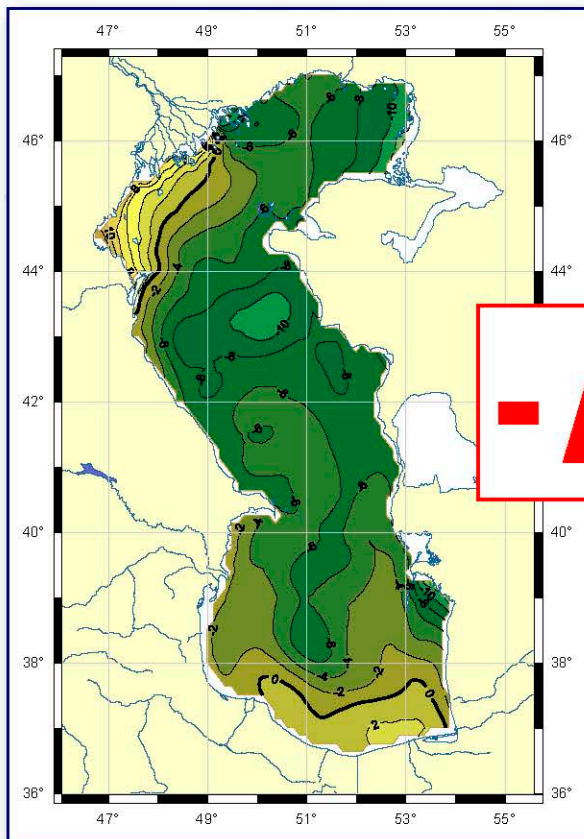
Пример идентификации стационарных вихрей по данным спутниковой альтиметрии



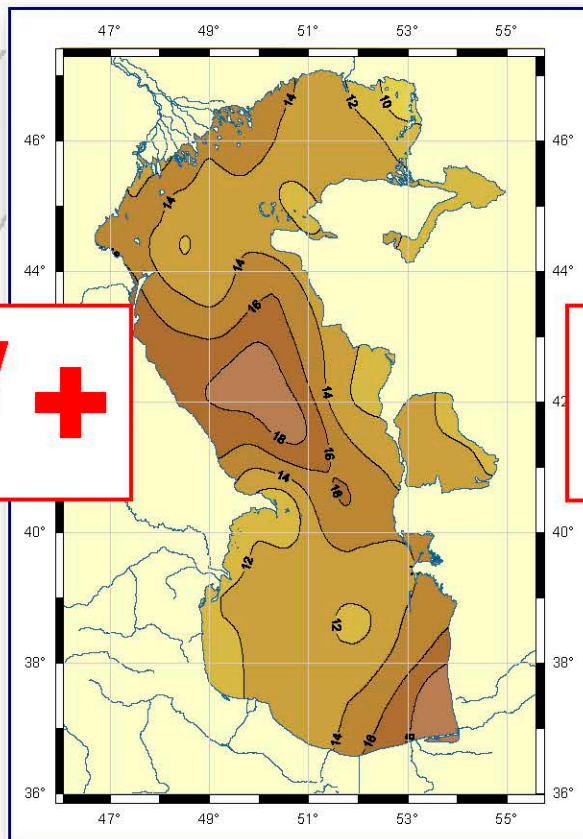
- Климатическая динамическая топография
- Синоптическая динамическая топография
- Аномалии уровня



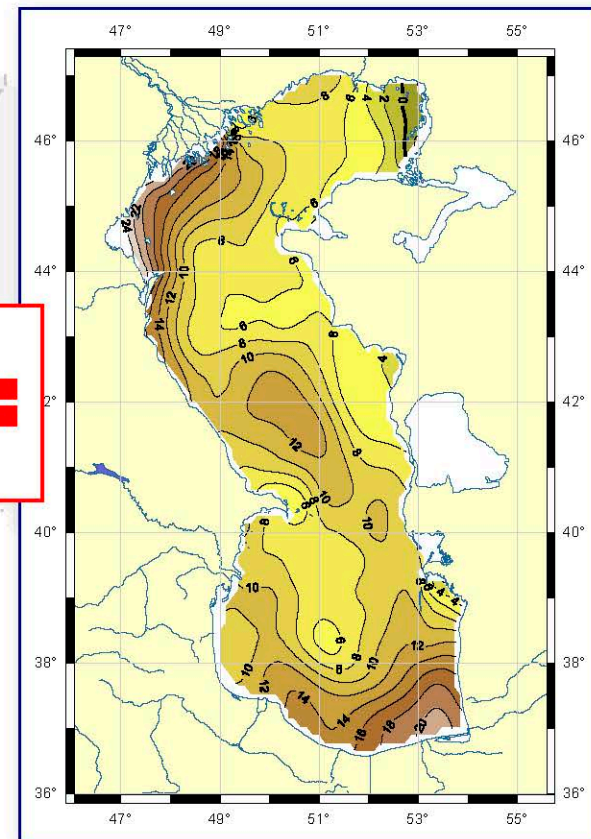
Синоптическая динамическая топография (ДТ)



**Среднеклиматическая
ДТ (см), рассчитанная
по модели ЛМПИ
Гидрометцентра России**



**Среднемесячные аномалии
уровня Каспийского моря
(см) за июль 2005 г.**

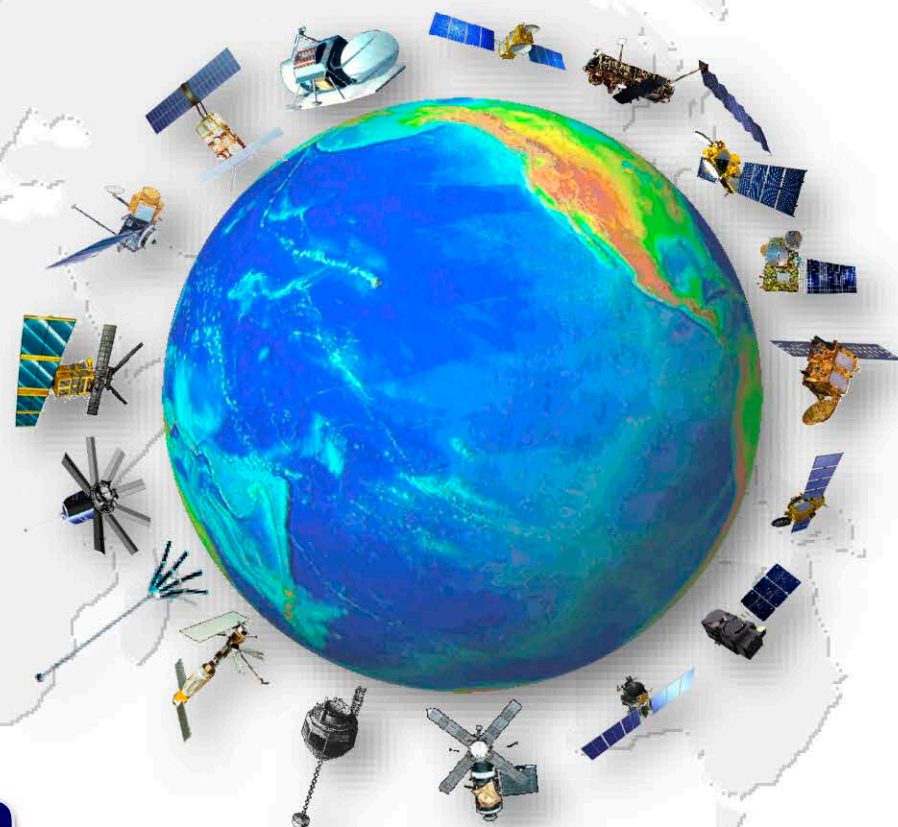


**Синоптическая ДТ (см) за
июль 2005 г., определяемая
как суперпозиция
среднеклиматической
ДТ и АУМ**



Приложения в науках о Земле

- ⇒ **Геодезия
и гравиметрия**
- ⇒ **Батиметрия
Мирового океана**
- ⇒ **Геология**
- ⇒ **Океанология**
- ⇒ **Гляциология**
- ⇒ **Гидрология суши**
- ⇒ **Ландшафтоведение**



Спутниковая альтиметрия в науках о Земле

➔ Геодезия и гравиметрия

- уточнение геоцентрической системы координат;
- глобальные модели геопотенциала;
- определение детальных характеристик гравитационного поля в Мировом океане.

➔ Батиметрия Мирового океана

- уточнение батиметрии или топографии дна Мирового океана.

➔ Геология

- изучение внутреннего строения Земли и дна Мирового океана;
- тектоника плит.

➔ Океанология

- уточнение глобальных моделей приливов;
- уточнение глобальной циркуляции Мирового океана;
- климатические изменения уровня;
- изучение синоптических вихрей и меандры сильных струйных течений;
- планетарные волны Россби, Кельвина и градиентно-вихревые волны;
- волны цунами;
- морские льды.

➔ Гляциология

- создание цифровых моделей ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии.

➔ Гидрология суши.

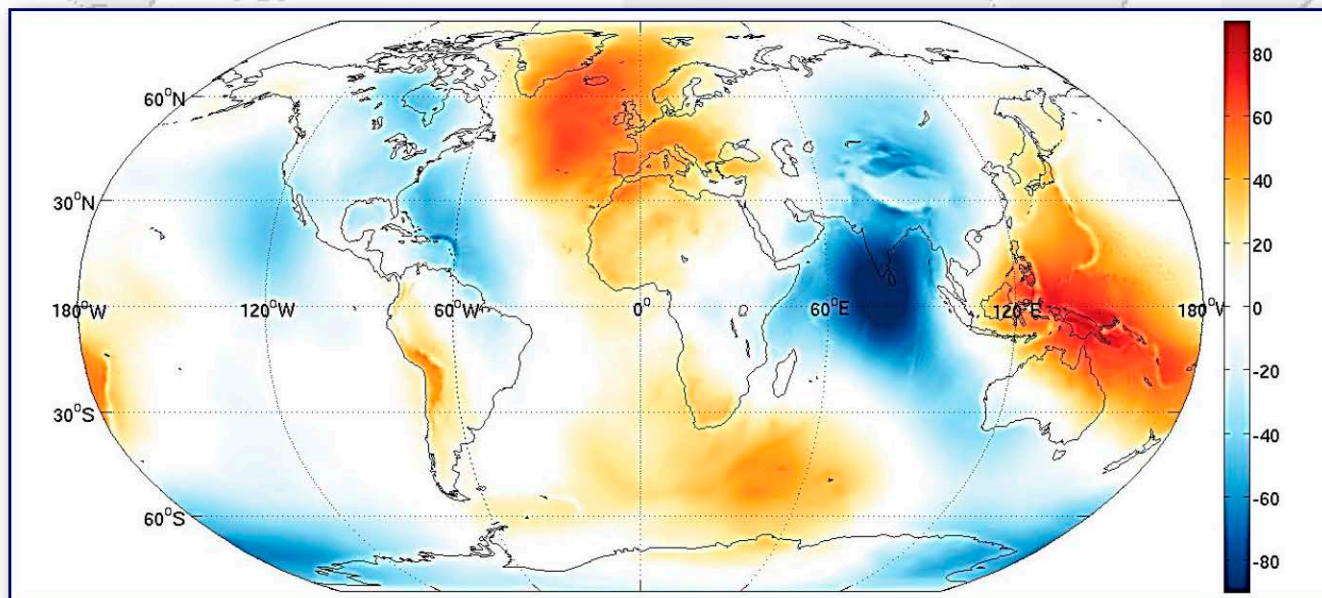
➔ Ландшафтоведение.



Спутниковая альтиметрия в геодезии и гравиметрии

Современное методическое и техническое состояние спутниковой альтиметрии позволяет успешно использовать данные дистанционного зондирования при решении различных геодезических задач. В их число входят:

- уточнение геоцентрической системы координат;
- вывод глобальных моделей геопотенциала;
- определение детальных характеристик гравитационного поля Земли в Мировом океане в виде цифровых моделей высот геоида, уклонов отвесных линий, аномалий силы тяжести;
- установление и поддержание общеземной системы высот.



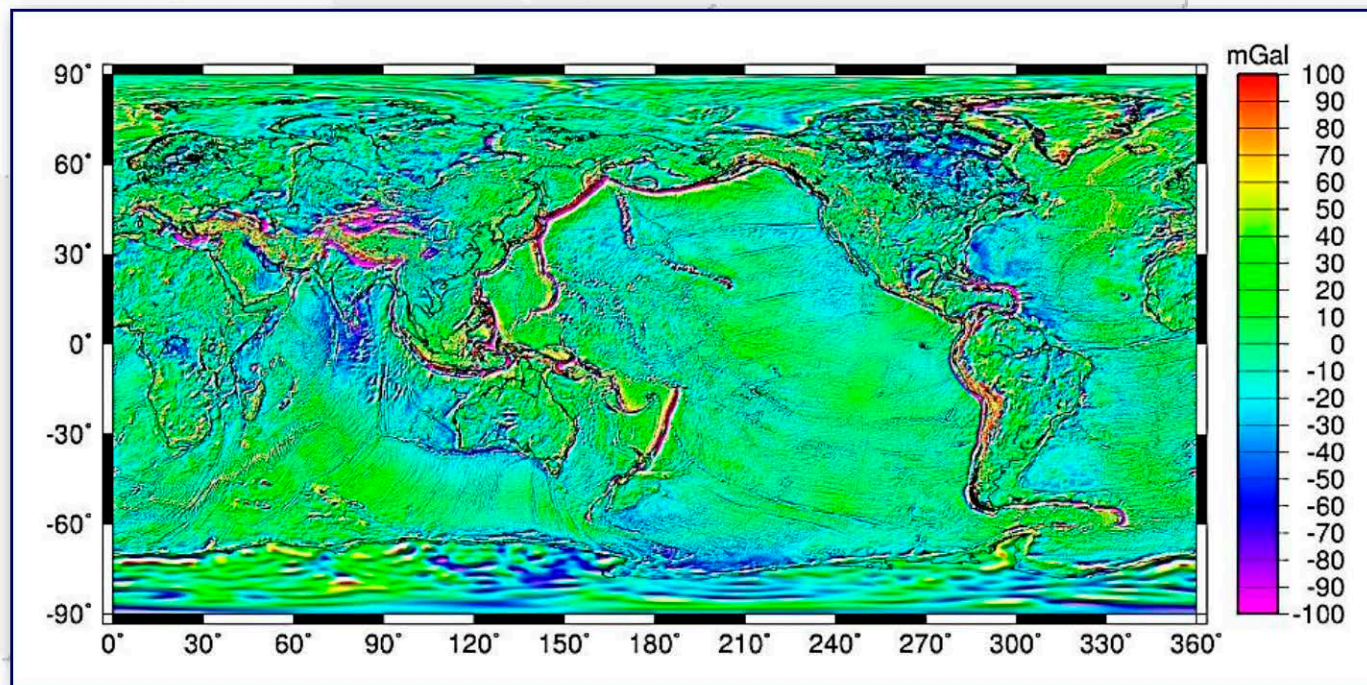
Высота геоида (м),
рассчитанная
по модели EGM2008
с разложением
на сферические
функции
до 500 степени.



Спутниковая альтиметрия в геодезии и гравиметрии

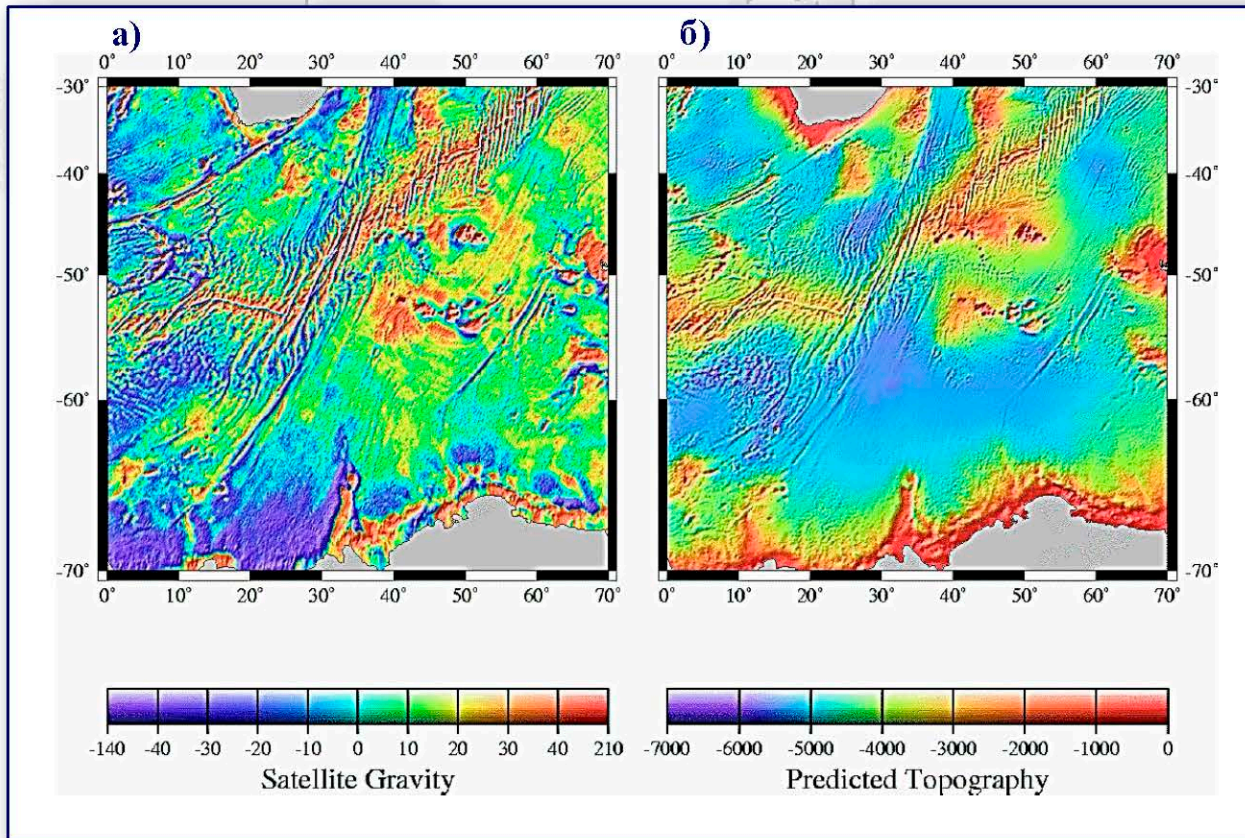
По теоретическим оценкам спектральной плотности сигнала и шума, разрешающая способность спутниковой альтиметрии по данным об аномалиях силы тяжести находится на уровне 30 км, а точность составляет 8 мГал. Комплексное использование данных, полученных различными системами спутниковой альтиметрии, потенциально позволяет на значительной части акватории Мирового океана обеспечить определение аномалий силы тяжести с точностью около 5 мГал и разрешением не хуже 20 км.

Аномалии силы
тяжести
(мГал = 10^{-3} м/с²),
рассчитанные по
модели EGM2008



Батиметрия Мирового океана

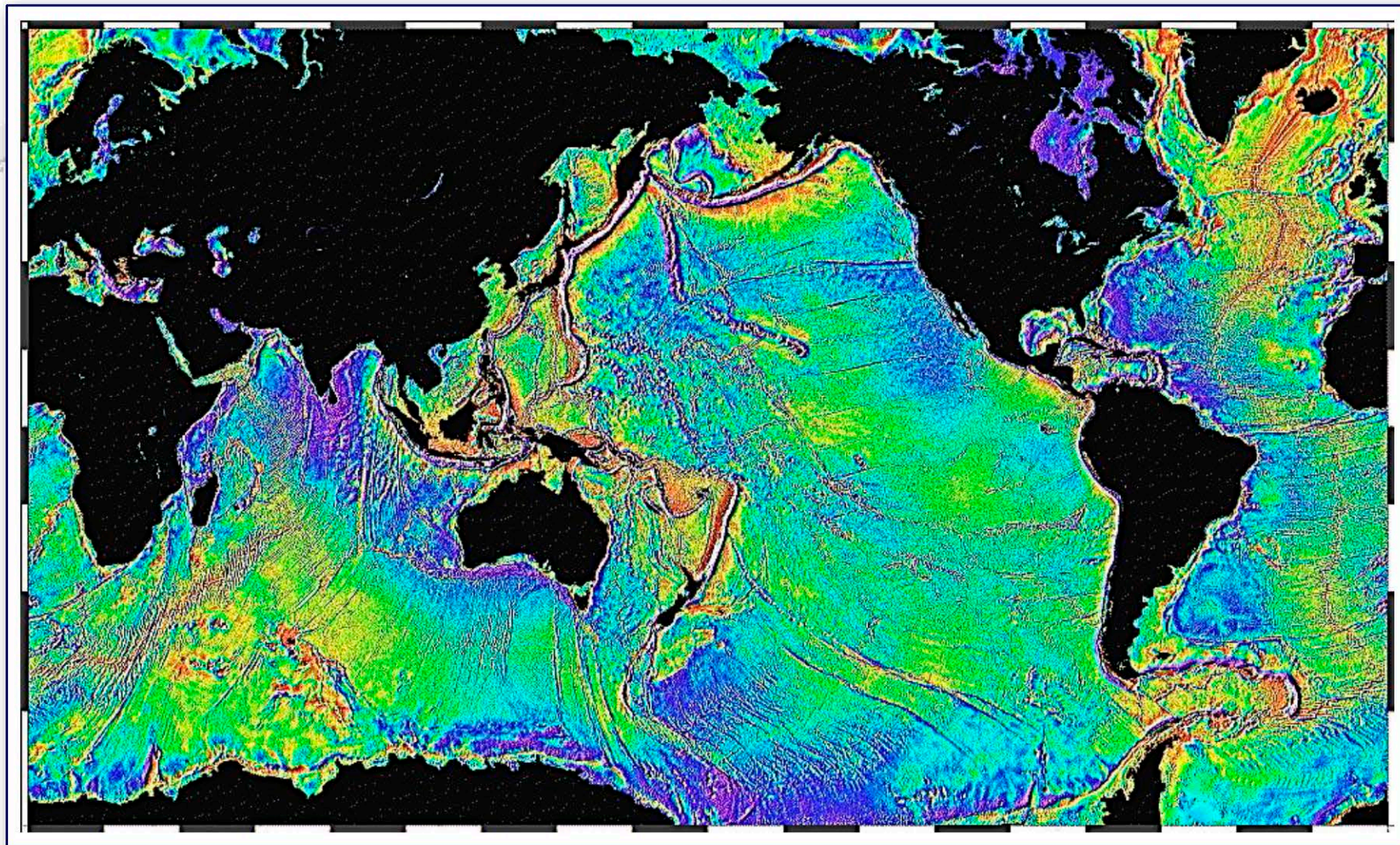
Метод спутниковой альтиметрии позволил существенно уточнить батиметрию или «топографию» дна Мирового океана, так как аномалии силы тяжести, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, отображают особенности рельефа океанического дна.



Связь аномалий силы тяжести (мГал), рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии (а), и (б) предполагаемого рельефа дна (м) южной части Атлантического и Индийского секторов Южного океана в районе Капской котловины, котловины Агульяс, Африканско-Антарктического хребта и Африканско-Антарктической котловины



Батиметрия Мирового океана



Карта *предполагаемого* рельефа дна Мирового океана, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии



Спутниковая альтиметрия в геологии

Спутниковые альтиметрические измерения стали одним из новых методов в выявлении общих закономерностей геологического строения дна Мирового океана, так как аномалии силы тяжести и высоты морского геоида весьма чувствительны к обширным неоднородностям гравитационного поля Земли.

Поле высоты геоида на акватории Мирового океана, построенное по данным спутниковой альтиметрии с пространственным разрешением 5', позволило изучать внутреннее строение Земли по его аномалиям. В основе такой интерпретации лежит частотный анализ. Разложение по сферическим функциям высот геоида отображает:

- гармоники 2–4 порядка — топографию границы «ядро – мантия»,
- гармоники 4–10 — аномалии плотности в нижних частях мантии
- гармоники 10–14 порядка соответствуют аномалиям плотностей средней мантии на глубинах 600–2000 км.
- гармоники 14–18 связаны с плотностными изменениями в верхней мантии и на нижней границе литосферных плит, расположенной на глубинах до 300 км
- гармоники 18–22 порядка представляют интерес для изучения верхнего слоя земной коры и топографии дна океана



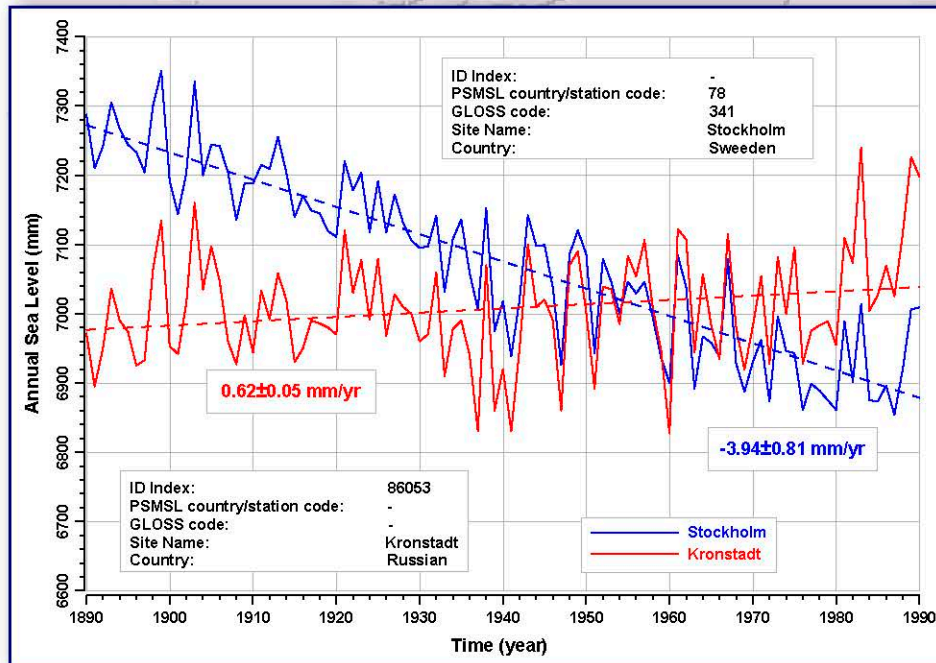
Спутниковая альтиметрия в океанологии

Спутниковые альтиметрические измерения стали одним из новых методов в океанологии

- Климатические изменения уровня Мирового океана, окраинных и внутренних морей
- Пространственная неоднородность климатической изменчивости уровня Мирового океана, окраинных и внутренних морей
- Сезонная и климатическая изменчивость уровня и скоростей течения окраинных и внутренних морей
- Наблюдений волн цунами в режиме of-line
- Явления *El Niño* and *La Niña*
- Планетарные экваториальные волны и волны Россби
- Скорости приводного ветра
- Сезонная и межгодовая изменчивость высот, периода и крутизны значимых волн
- Сплочённость морского льда

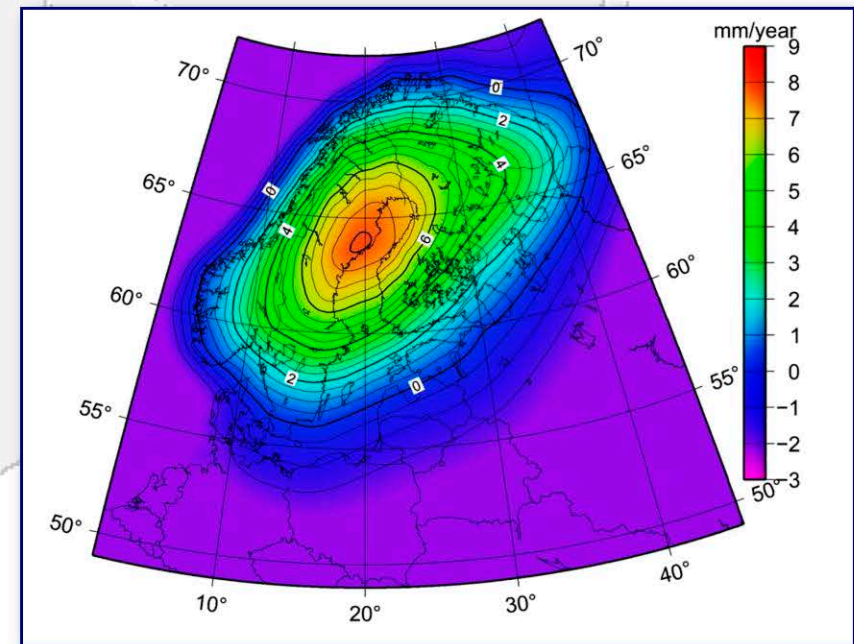


Климатические изменения уровня Балтийского моря

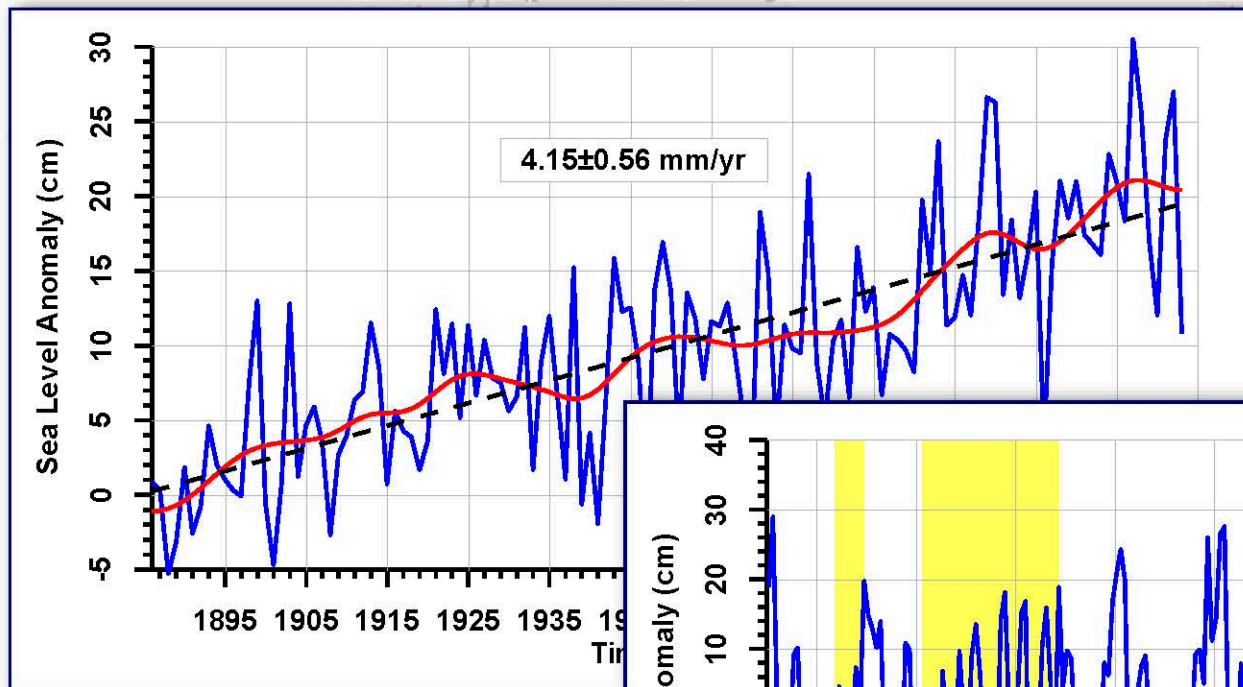


Сравнение межгодовой
изменчивости уровня
Балтийского моря
по данным уровенных постов
Стокгольм (Швеция) и
Кронштадт (Россия)

Скорости современные
вертикальные движения
земной коры (СВДЗК) в
районе Балтийского моря

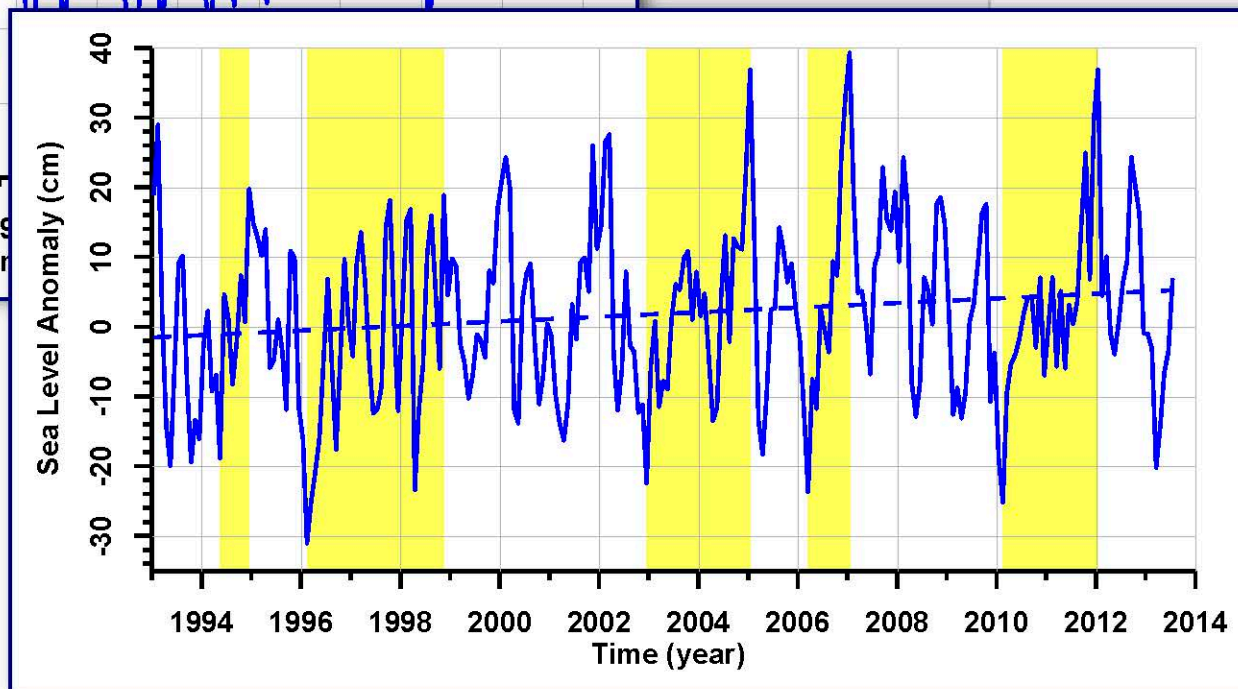


Климатические изменения уровня Балтийского моря



Межгодовая
изменчивость уровня
Балтийского моря по
данным уровенного
поста Стокгольм
(Швеция) с учётом
скорости СВДЗК

Межгодовая изменчивость
уровня Балтийского моря
по данным
альтиметрических
измерений спутников
TOPEX/Poseidon и Jason-1/2

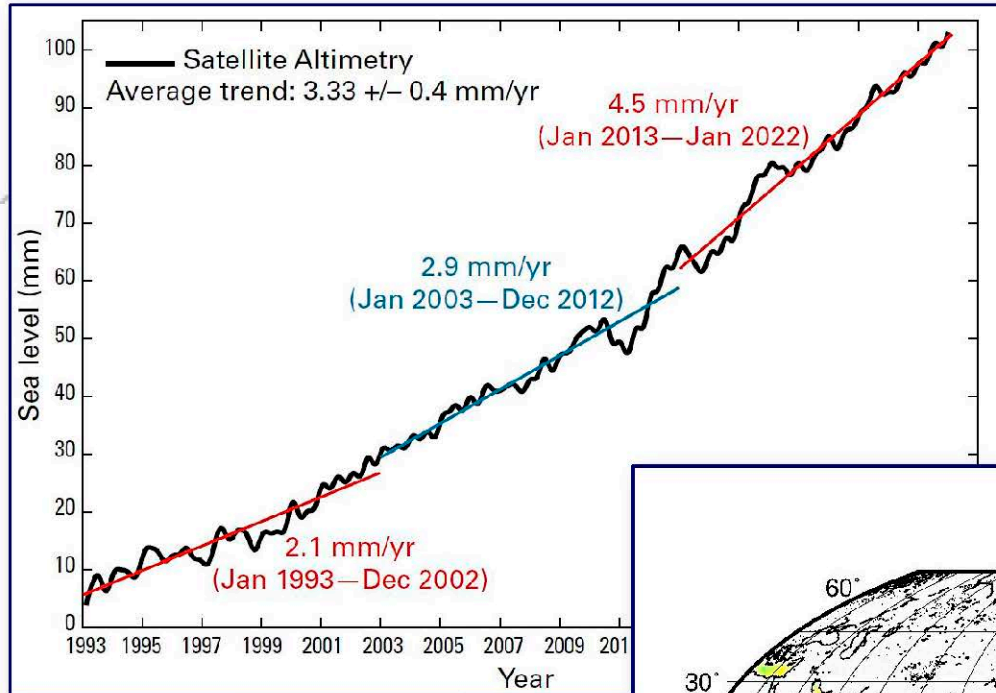


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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

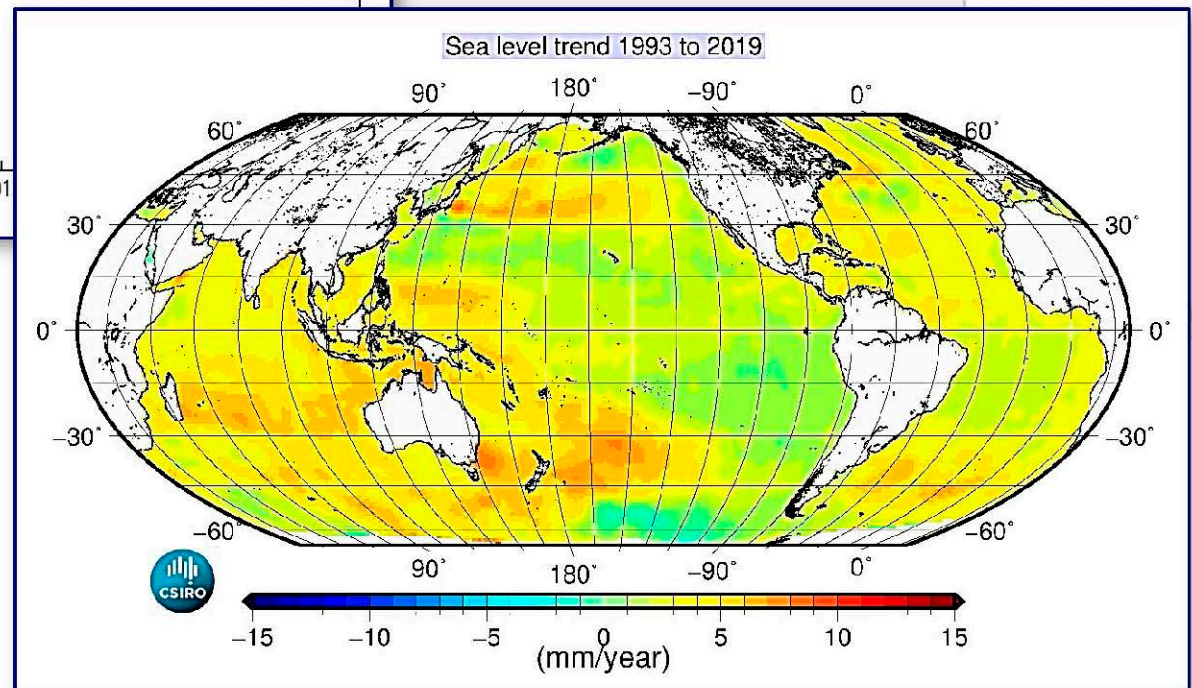


Уровень моря. Климатическая изменчивость



**Климатическая
изменчивость уровня
Мирового океана
по данным спутниковой
альтиметрии за период
1993–2022 годы**

**Карта климатической
изменчивости уровня
Мирового океана
по данным спутниковой
альтиметрии за период
1993–2019 годы**

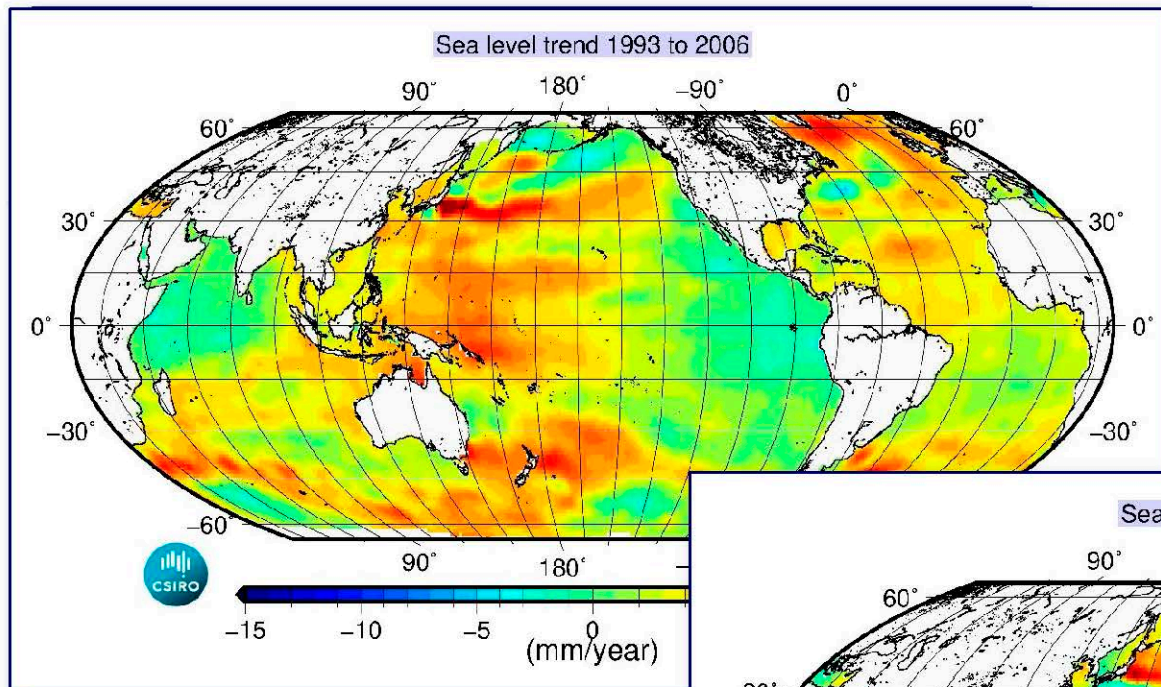


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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

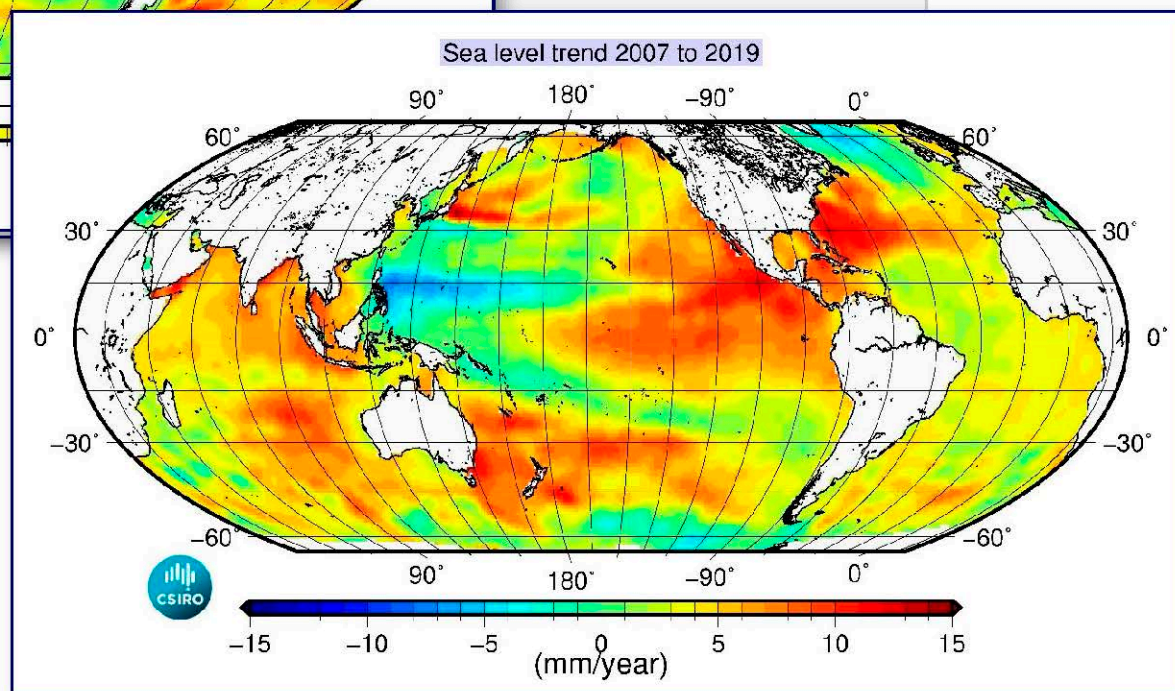


Уровень моря. Климатическая изменчивость



**Карта климатической
изменчивости уровня
Мирового океана
по данным спутниковой
альтиметрии за период
1993–2006 годы**

**Карта климатической
изменчивости уровня
Мирового океана
по данным спутниковой
альтиметрии за период
2007–2019 годы**

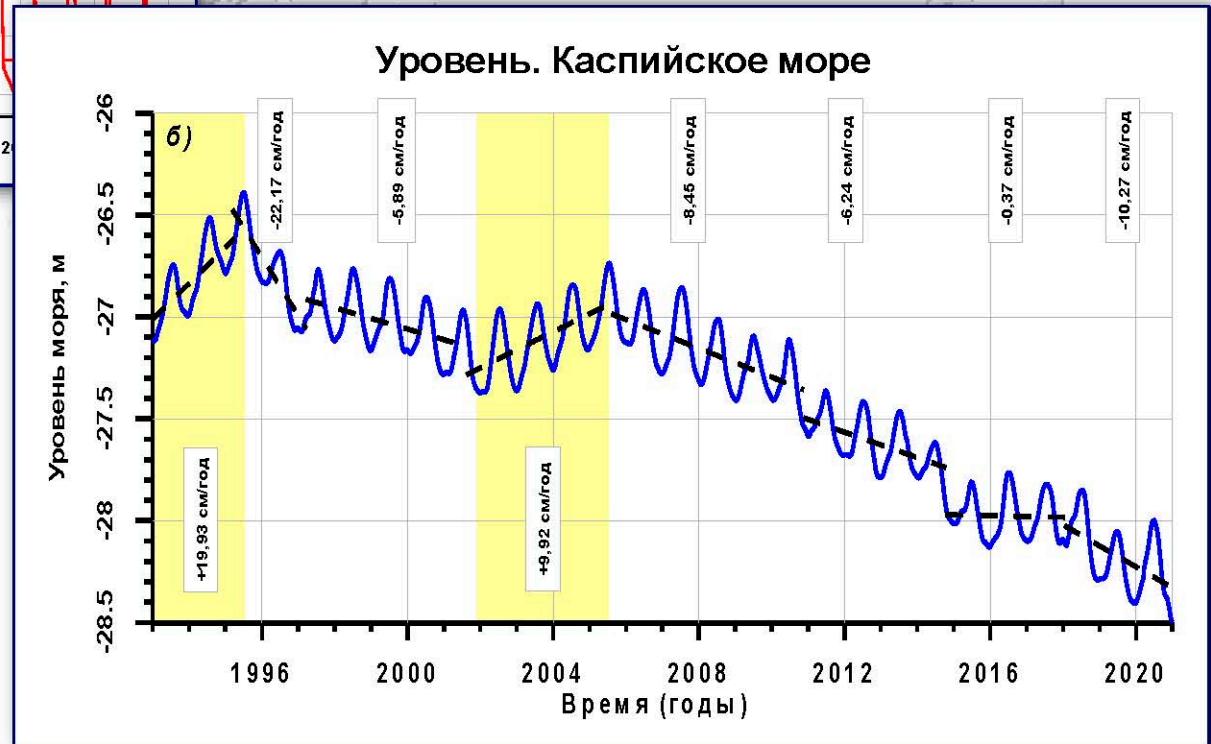


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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

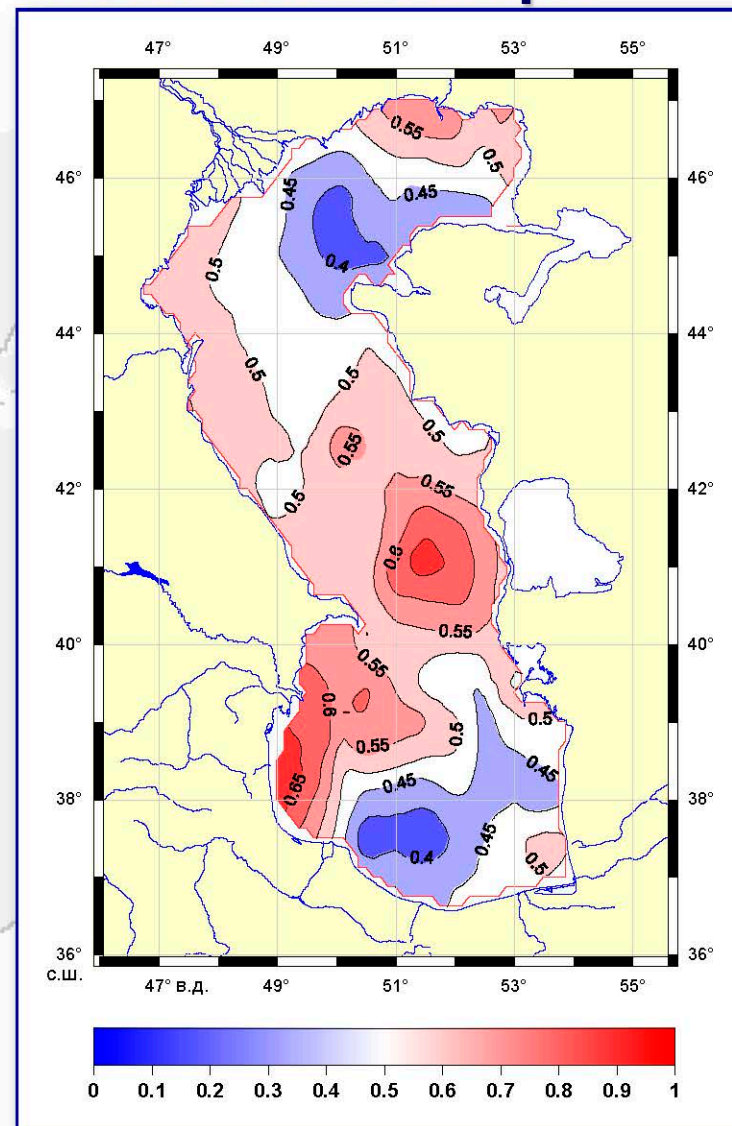


Климатические изменения стока реки Волга и уровня Каспийского моря



Пространственная неоднородность межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря

Нормированные скорости
межгодовой изменчивости уровня
Каспийского моря
по данным альтиметрических
измерений спутников
TOPEX/Poseidon и Jason-1/2
с января 1993 г. по декабрь 2012 г.

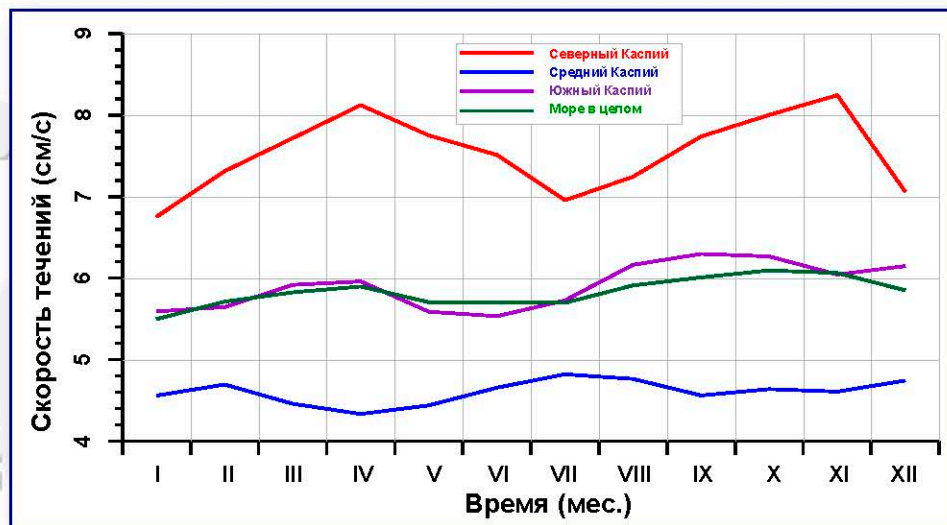


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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



Сезонная изменчивость скоростей течений



Сезонная изменчивость геострофических скоростей течений на поверхности (см/с)

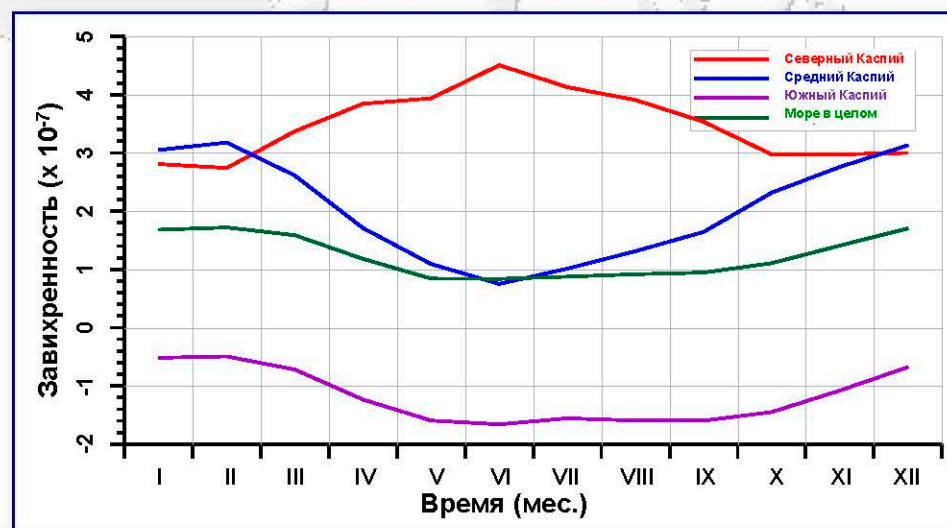
$$U_g = -\frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h_{dyn}}{\partial y}, \quad V_g = \frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h_{dyn}}{\partial x}$$

в Северном (красная линия), Среднем (синяя) и Южном (фиолетовая) Каспии по данным о альтиметрических измерениях спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 за 1993–2012 гг.

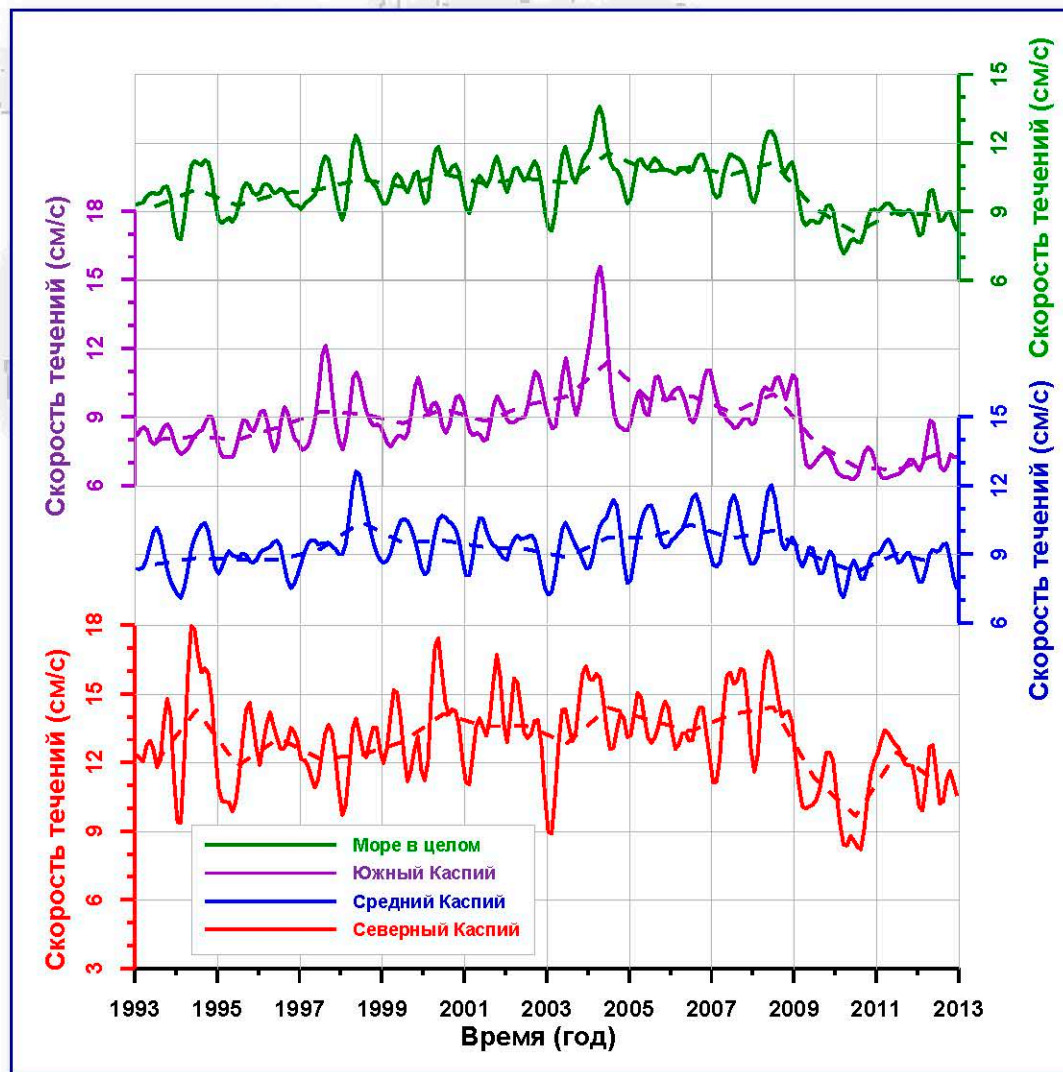
Сезонная изменчивость поля завихренности

$$\zeta = \frac{\partial V_g}{\partial x} - \frac{\partial U_g}{\partial y}$$

геострофических скоростей течений на поверхности в Северном (красная линия), Среднем (синяя) и Южном (фиолетовая) Каспии по данным альтиметрическим измерениям спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 за 1993–2012 гг.



Межгодовая изменчивость геострофической скорости течений

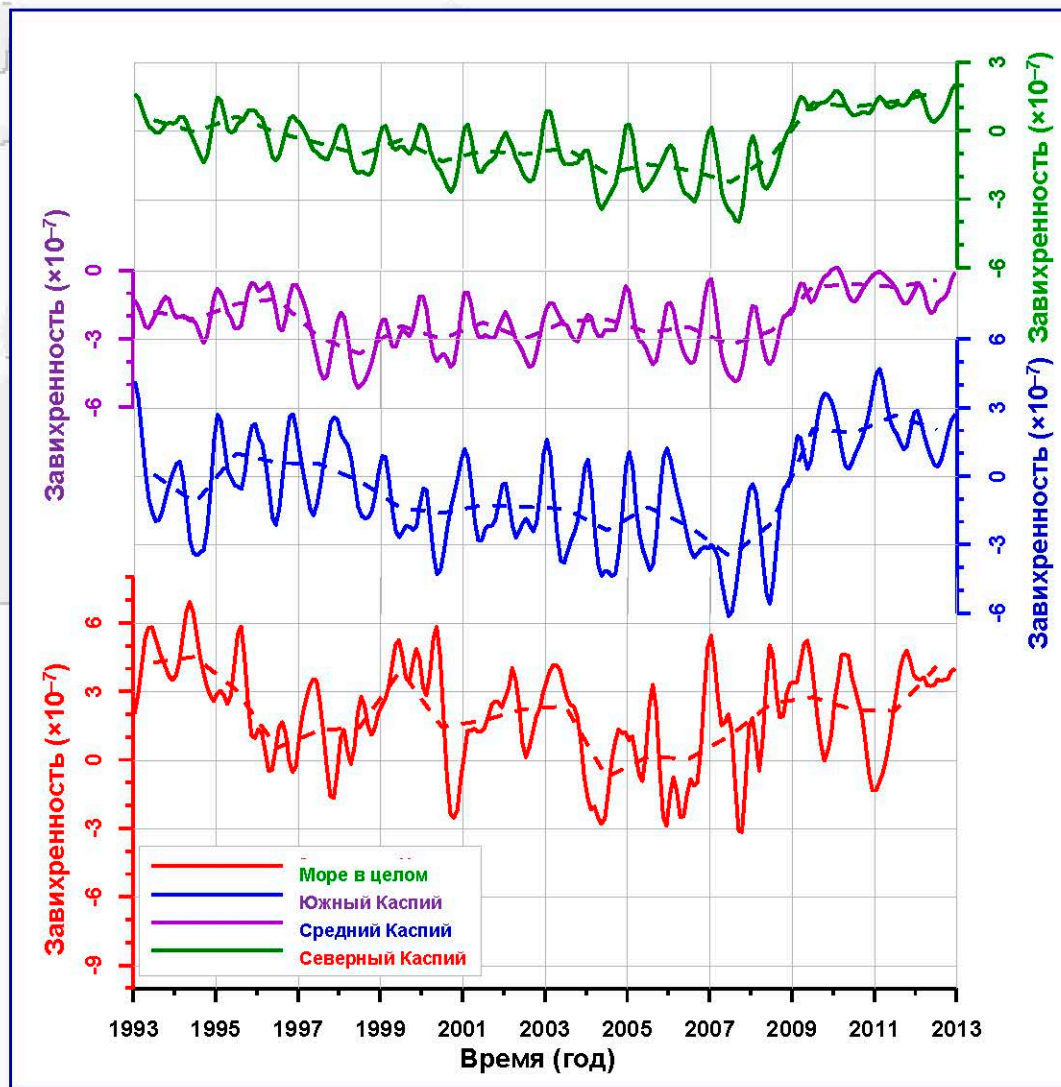


Межгодовая изменчивость среднемесячной геострофической скорости течений (м/с) в различных частях Каспия и моря в целом по данным альтиметрических измерений спутника TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 за сентябрь 1992 г. – декабрь 2012 г.

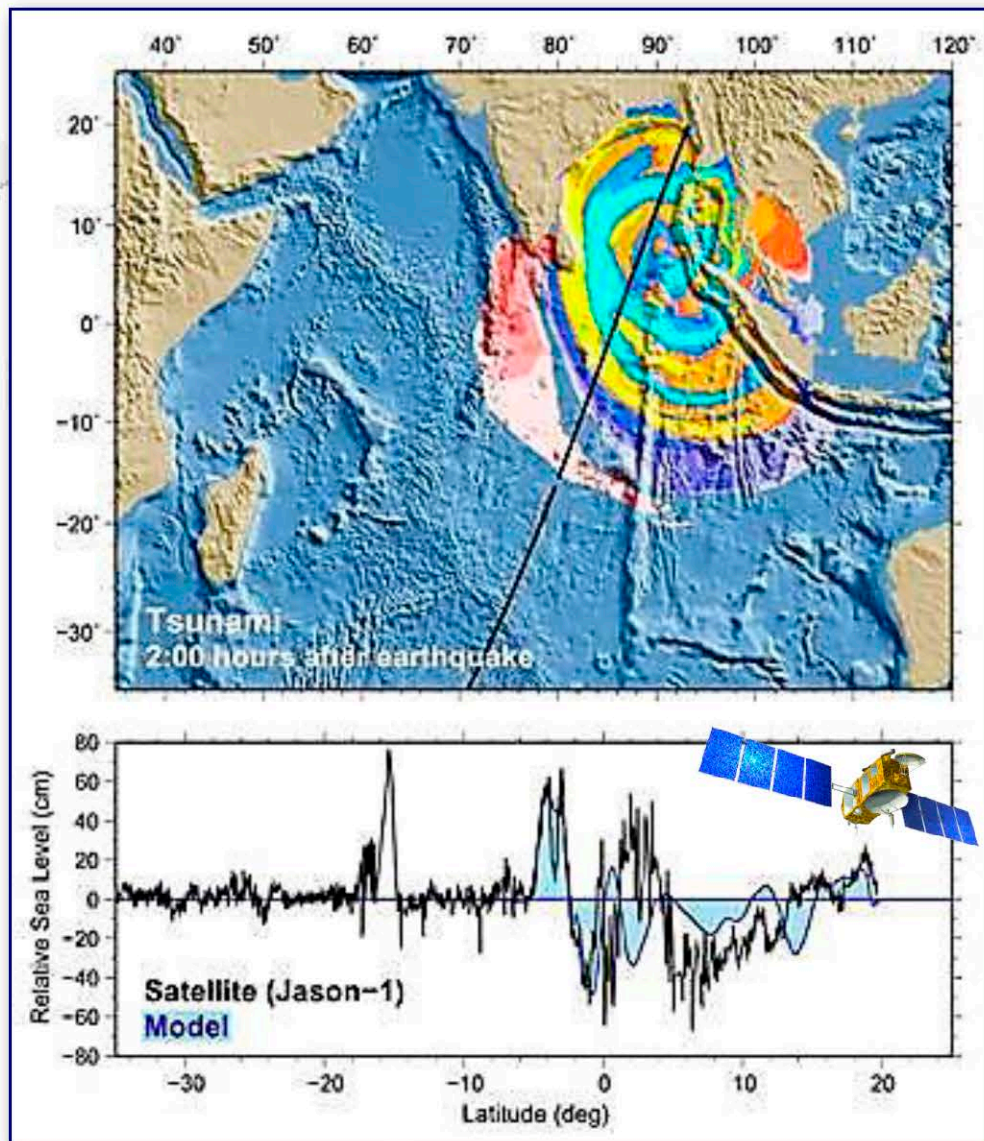


Межгодовая изменчивость завихренности геострофических скоростей течений

Межгодовая изменчивость
среднемесячной
завихренности
геострофической скорости
течений (м/с) в различных
частях Каспия и моря
в целом по данным
альтиметрических
измерений спутника
TOPEX/Poseidon и Jason-1/2
за сентябрь 1992 г. – декабрь
2012 г.



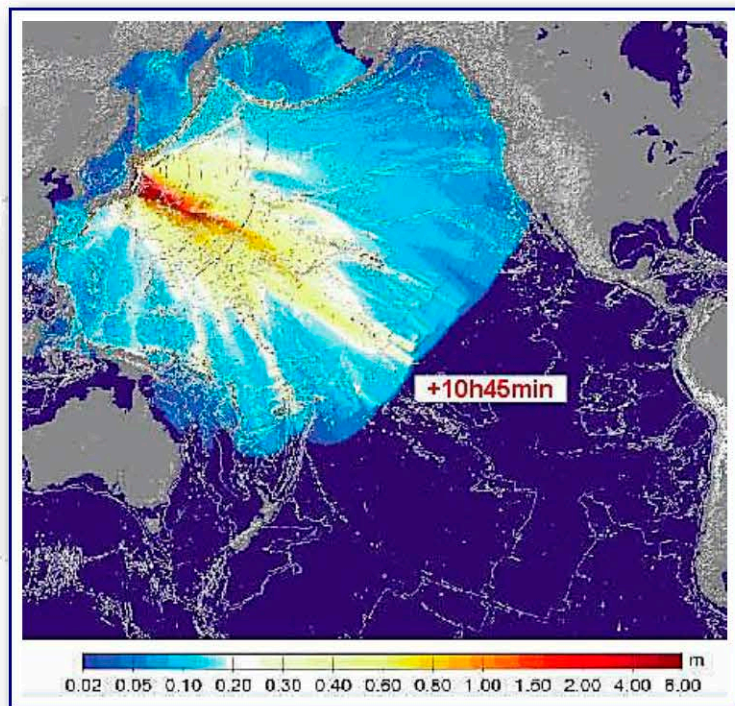
Уровень моря. Цунами



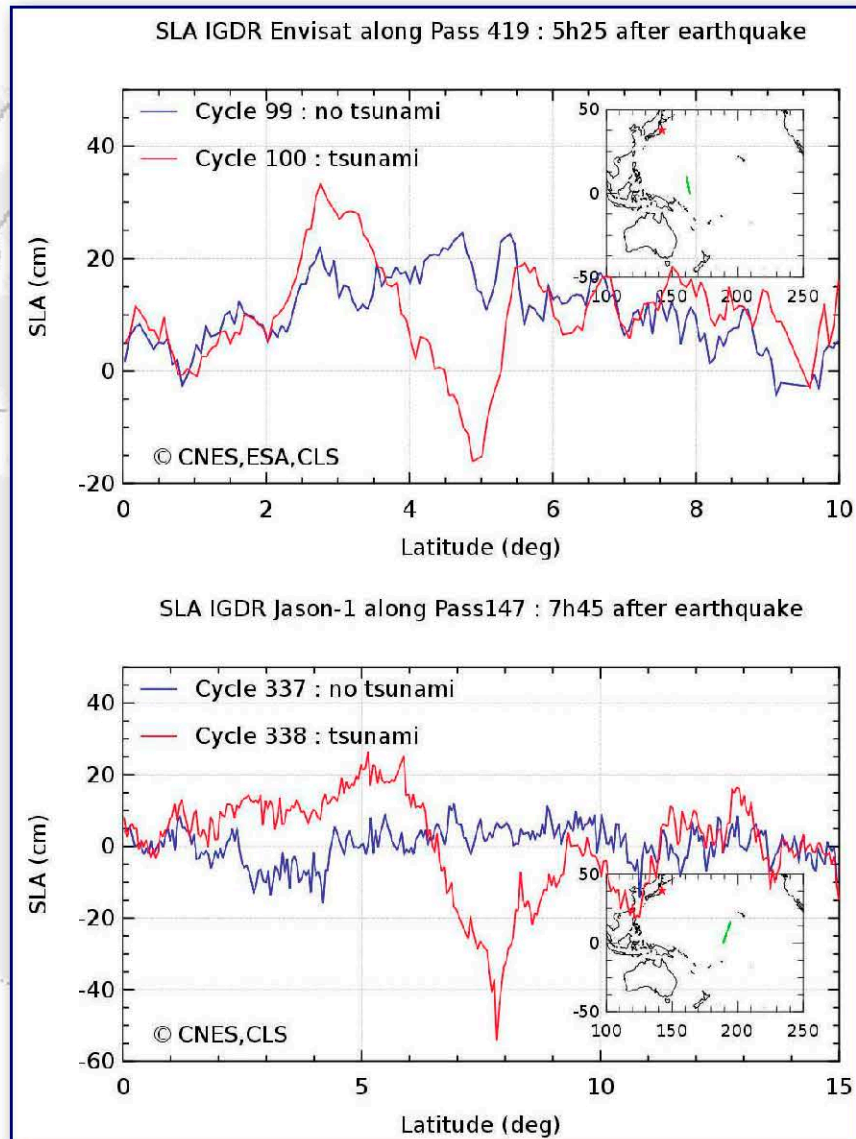
Амплитуда волны цунами, рассчитанная по модели (верхний рисунок) и изменчивость уровня моря вдоль треков спутника Jason-1 (нижний рисунок) после подводного землетрясения в Индийском океане возле северо-западного берега острова Суматры (Индонезия), произошедшего 26 декабря 2004 года



Уровень моря. Цунами

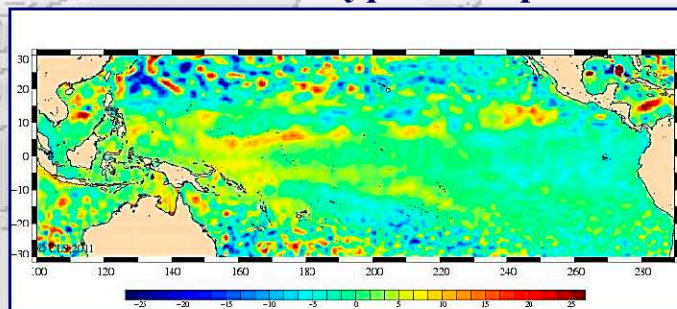
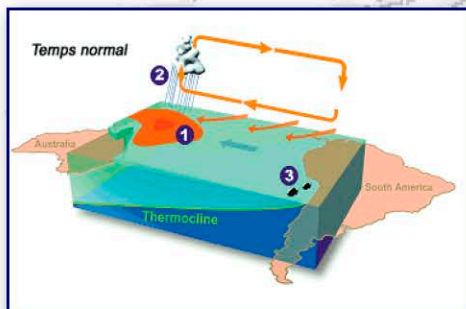


Амплитуда волны цунами, рассчитанная по модели (верхний рисунок) и изменчивость уровня моря вдоль треков спутника Envisat (левый рисунок) после подводного землетрясения в Тихом океана у восточного побережья острова Хонсю (Япония), произошедшего 11 марта 2011 года



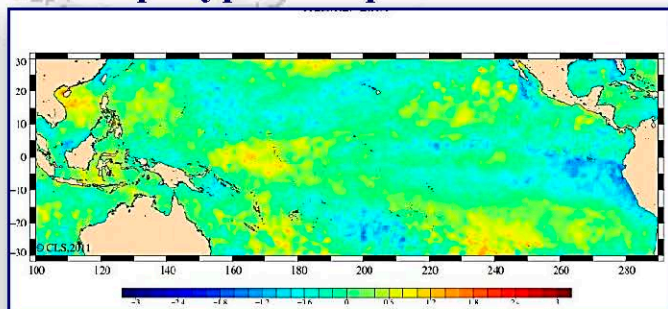
Уровень и температура поверхности моря Явления *El Niño* and *La Niña*

Аномалии уровня моря

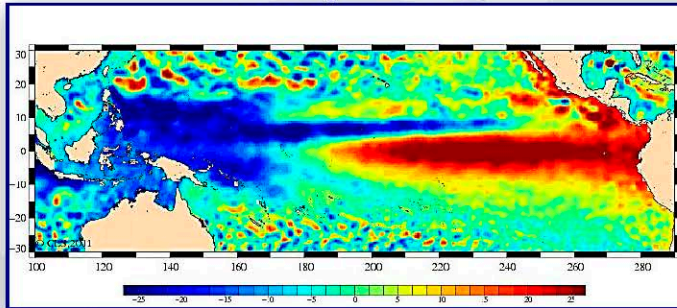
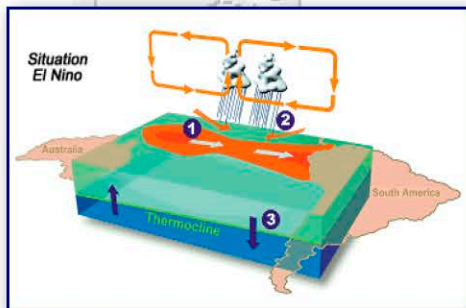


Октябрь 2001 г.

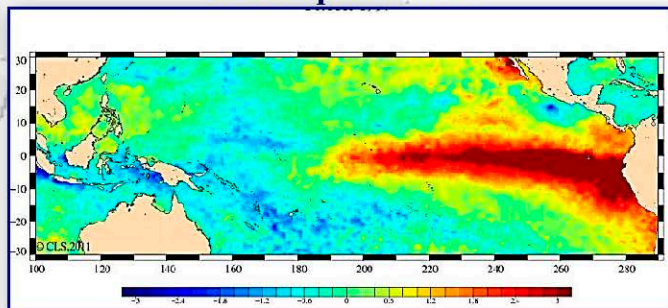
Температура поверхности океана



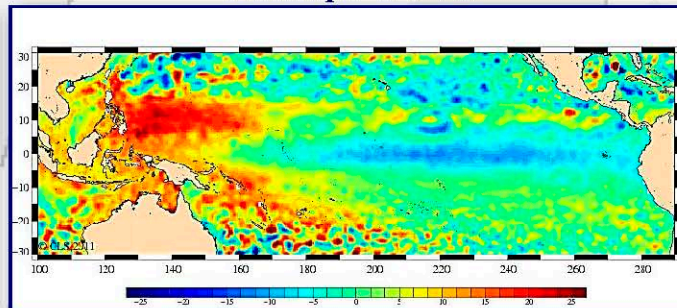
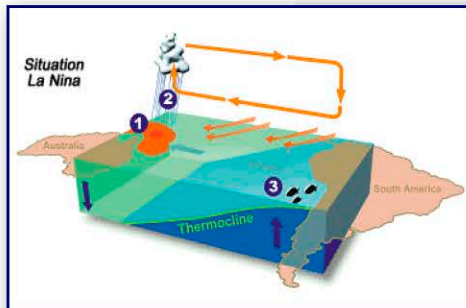
Октябрь 2001 г.



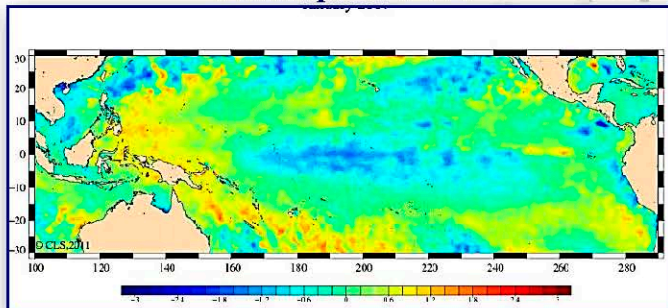
Октябрь 1997 г.



Октябрь 1997 г.



Декабрь 2008 г.



Декабрь 2008 г.

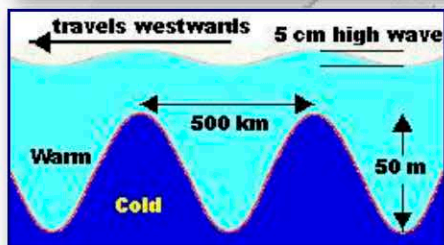
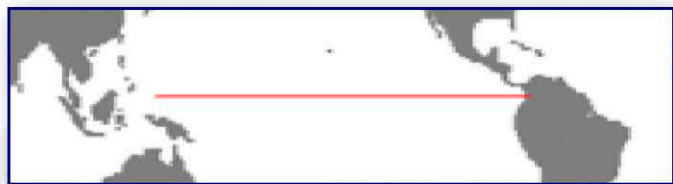


Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

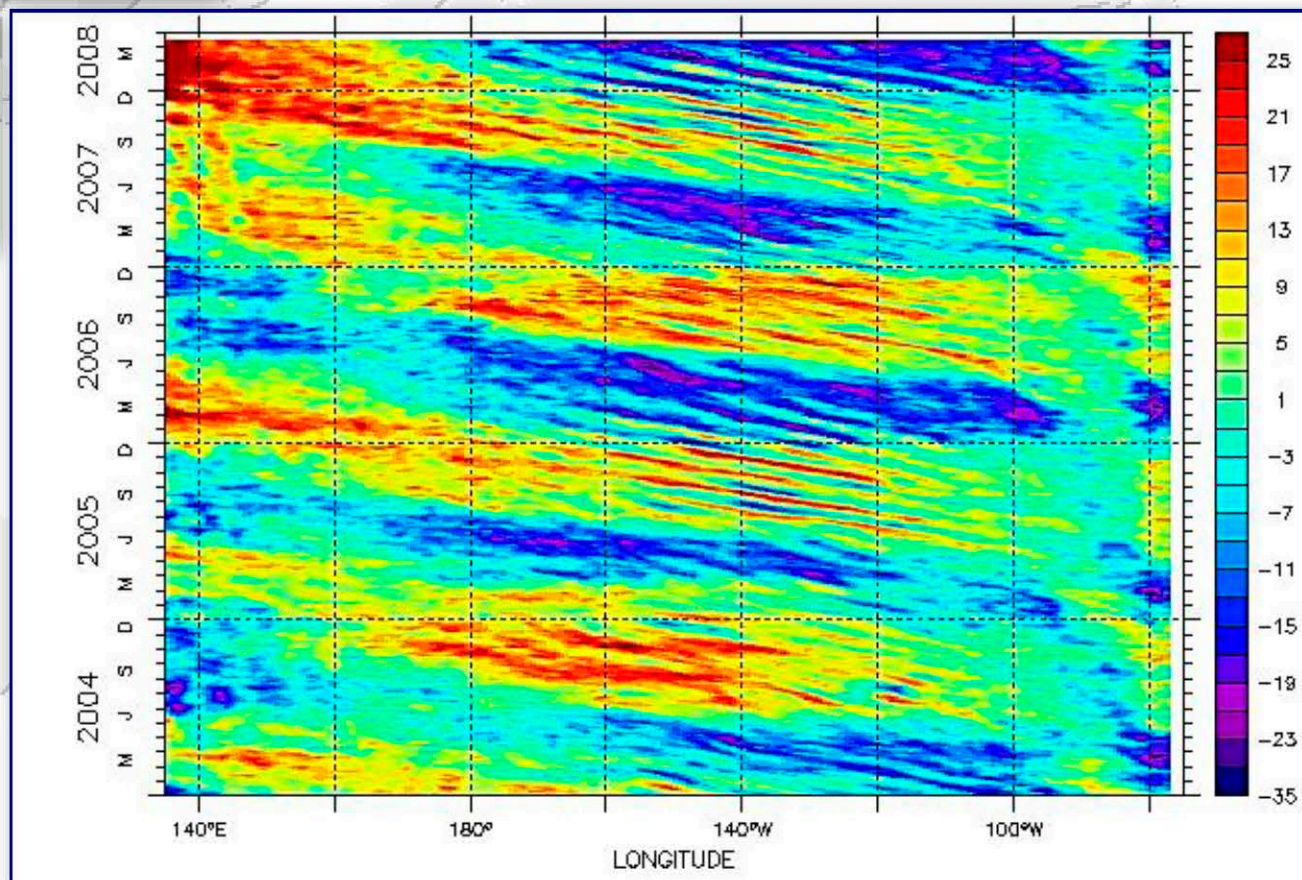
© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



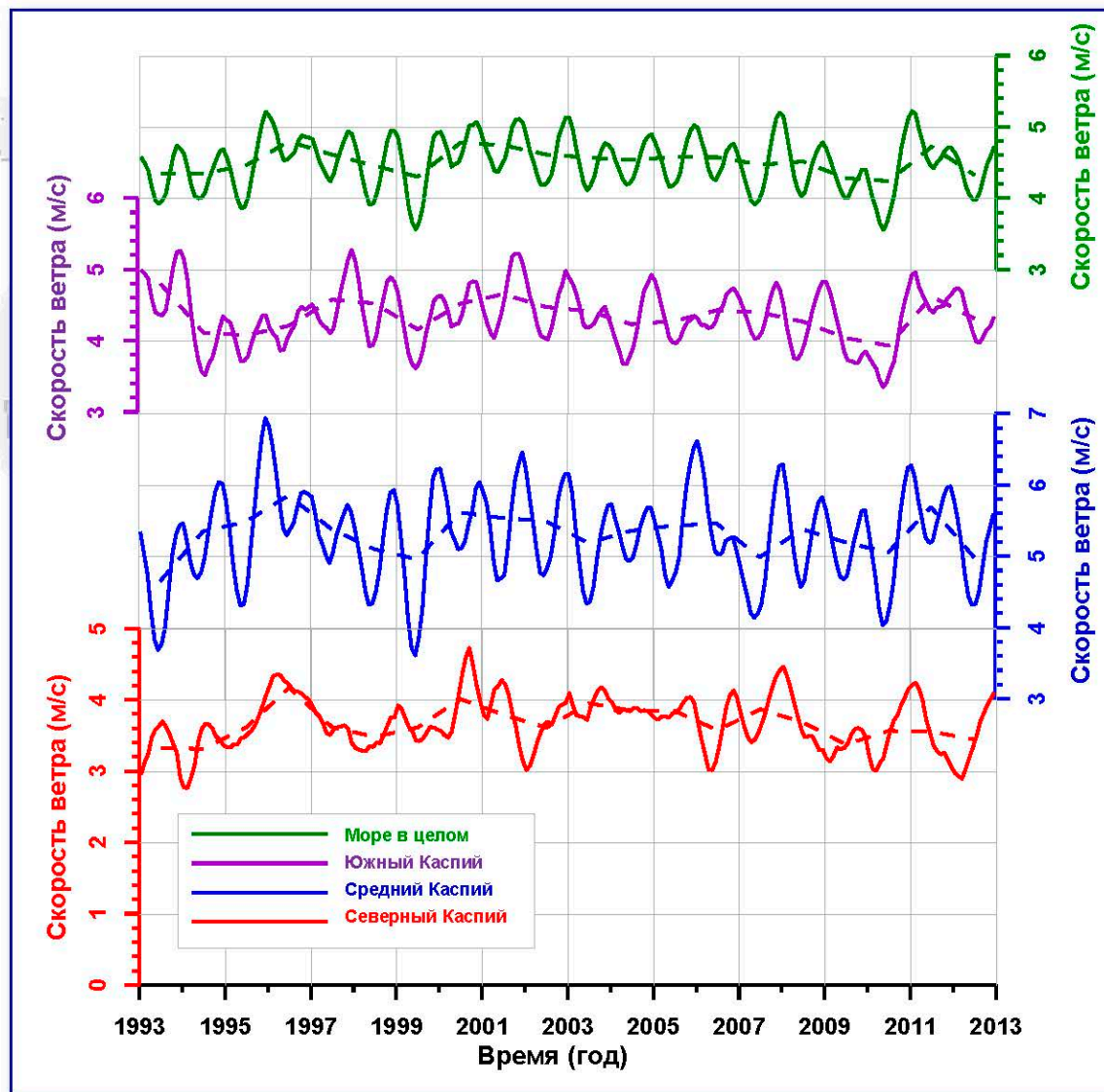
Уровень моря. Планетарные волны



Аномалии уровня
моря, рассчитанные
по данным
альтиметрических
измерений
спутников
ТОPEX/Poseidon
и Jason-1 вдоль
экватора



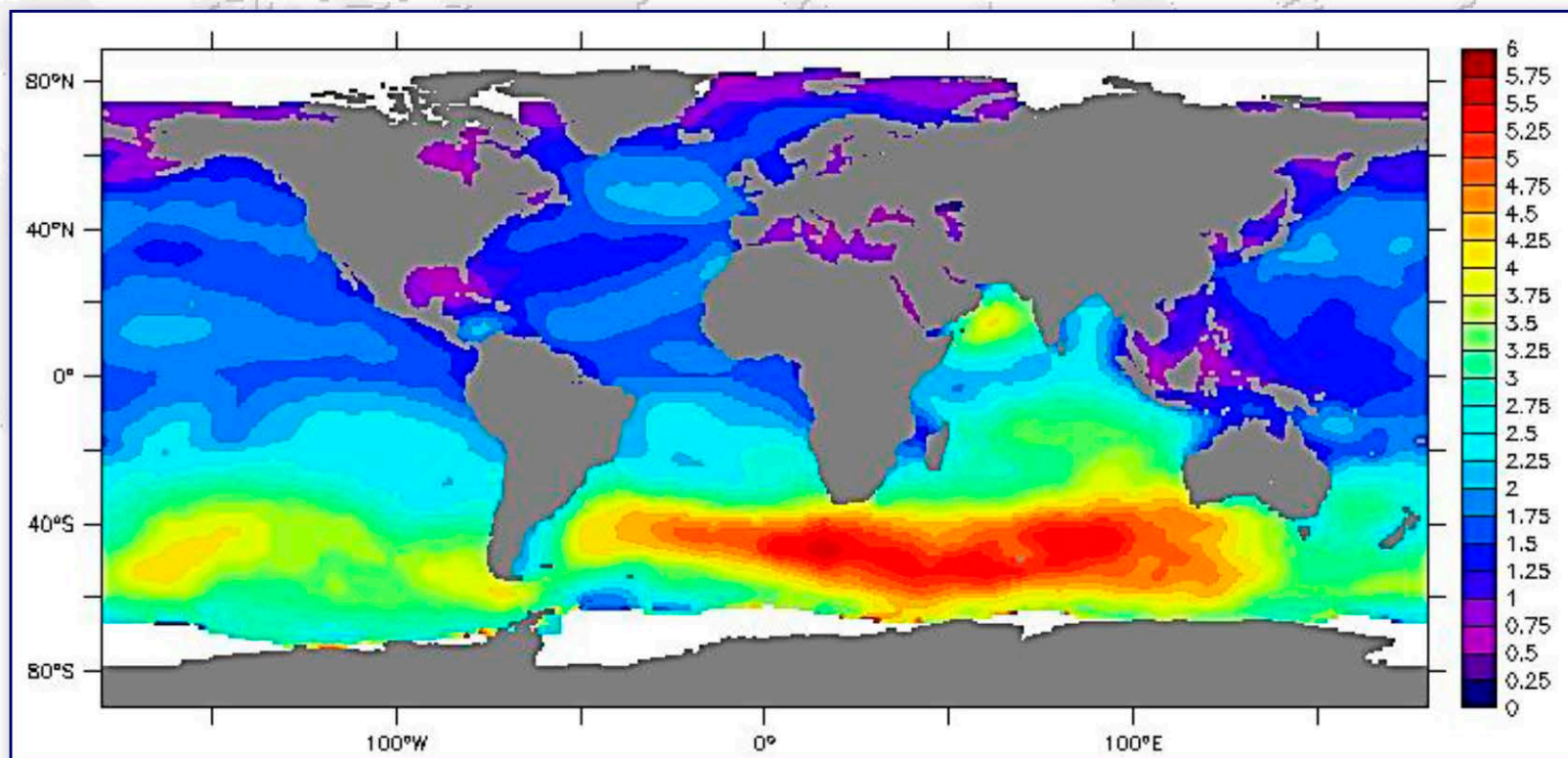
Межгодовая изменчивость скорости ветра



Межгодовая изменчивость среднемесячной скорости приповерхностного ветра (м/с) в различных частях Каспия и моря в целом по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 за сентябрь 1992 г. – декабрь 2012 г.



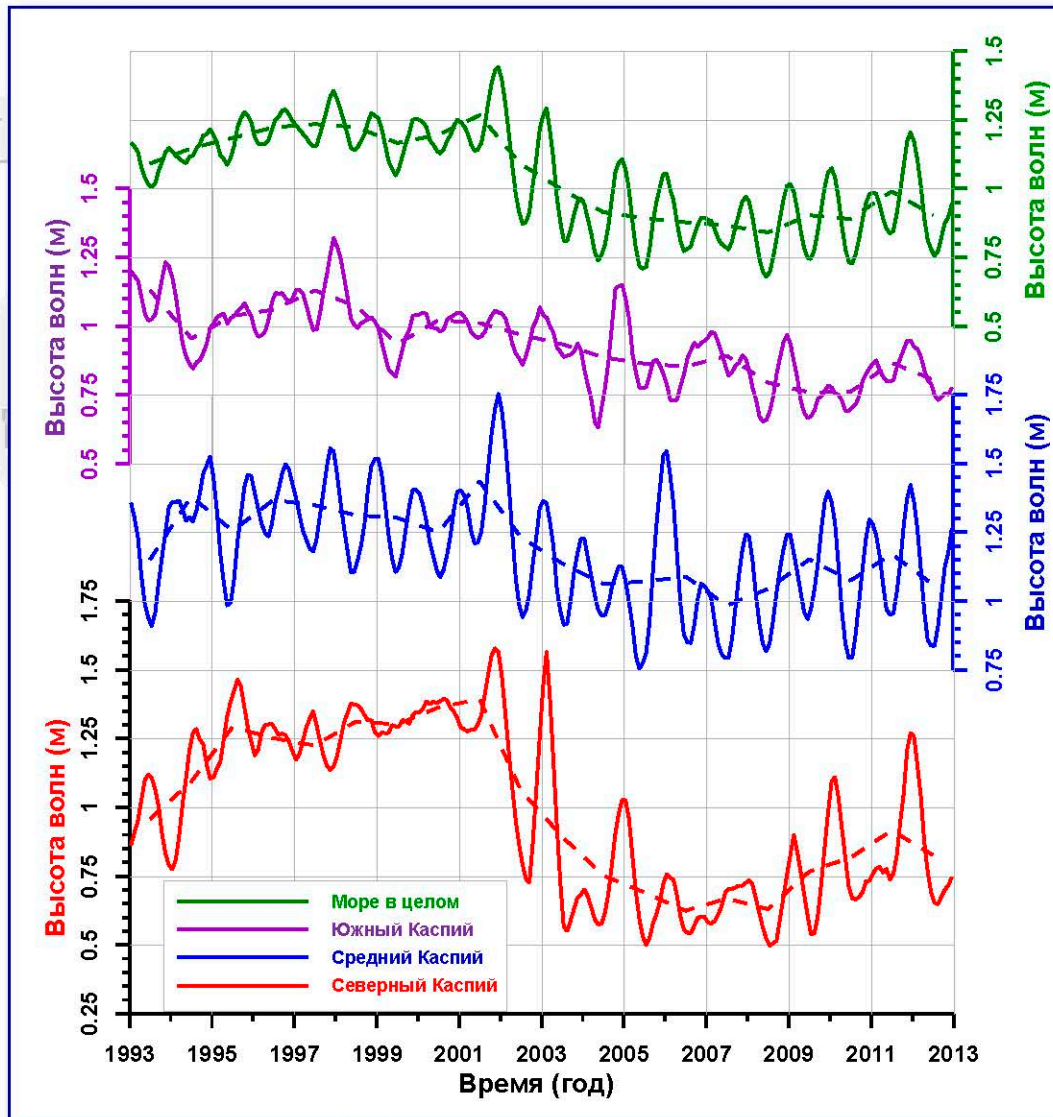
Высота ветровых волн



**Среднемесячная значимая высота морских волн
по данным альтиметрических измерений
спутника Jason-2 за июль 2012 года**



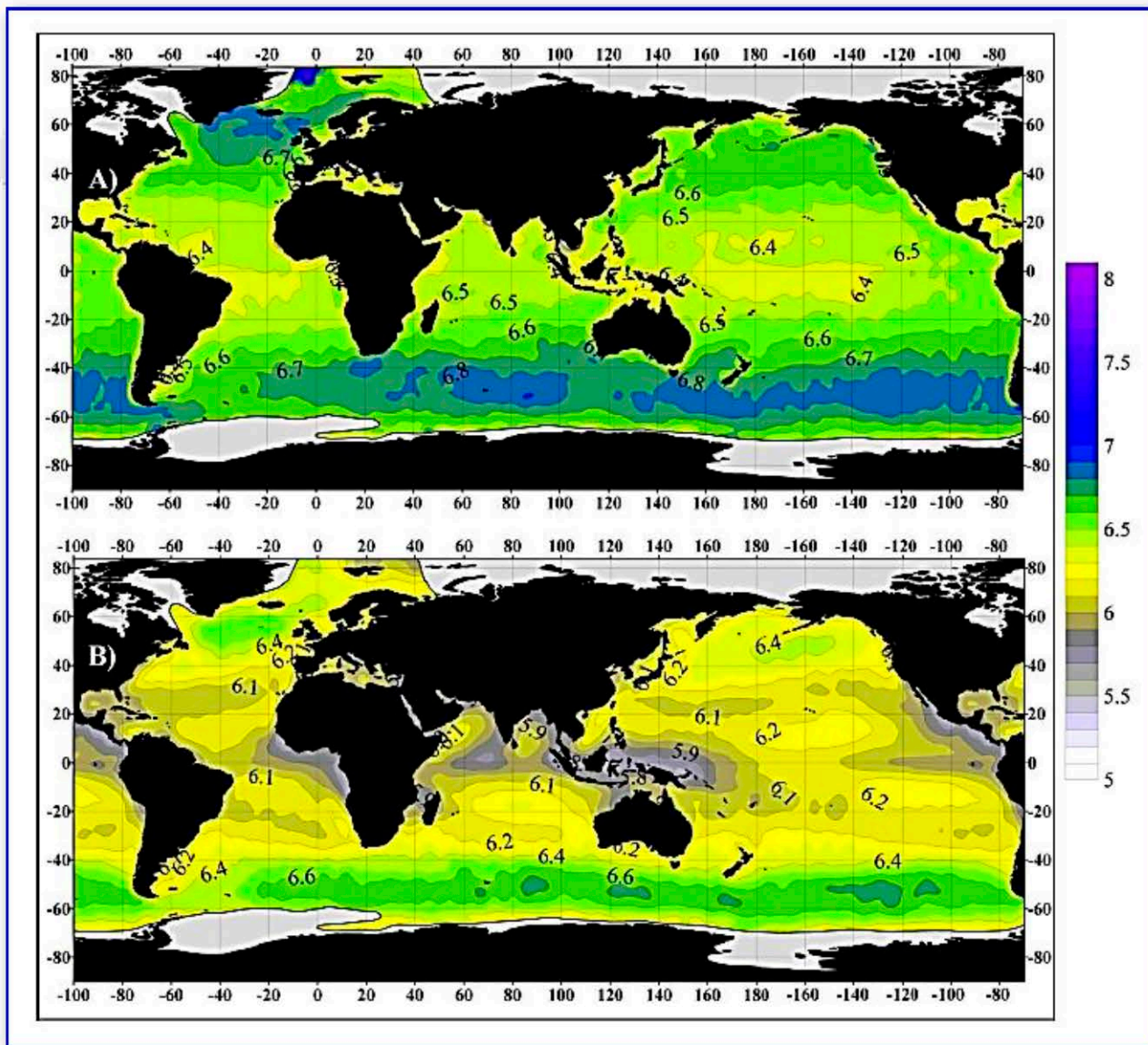
Межгодовая изменчивость высот волн



Межгодовая изменчивость
среднемесячной высоты
волн (м) в различных частях
Каспия и моря в целом
по данным льтиметрических
измерений спутников
TOPEX/Poseidon и Jason-1/2
за январь 1993 г. – декабрь
2012 г.



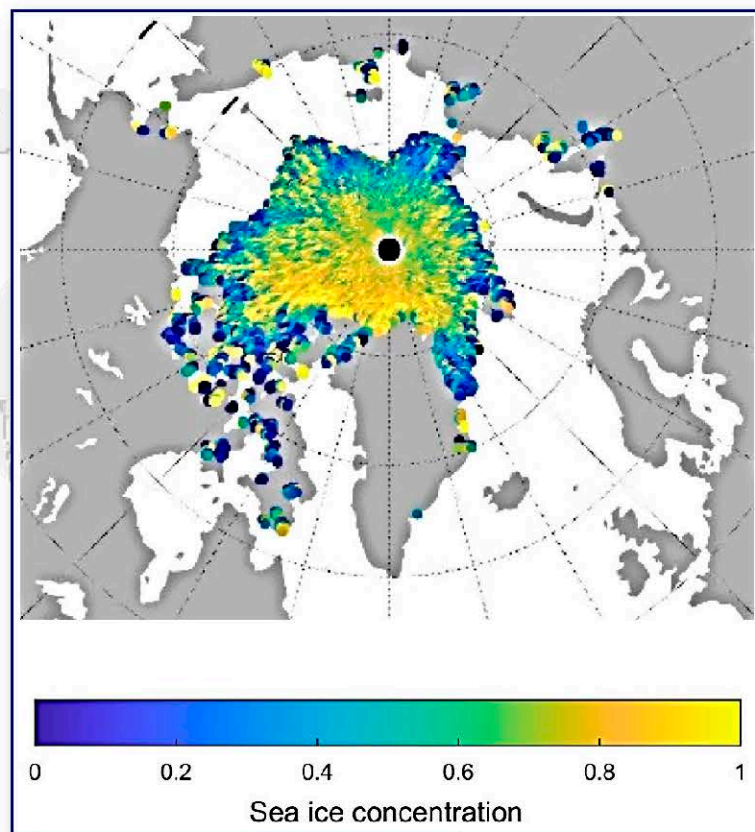
Крутизна ветровых волн



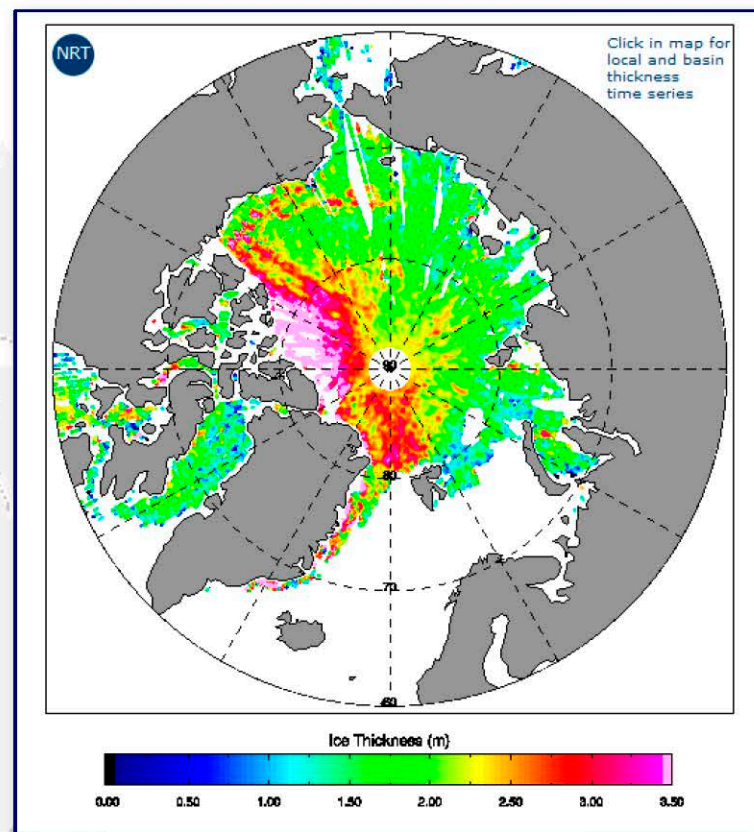
**Крутизна
ветровых волн
по данным
альтиметрических
измерений
спутника Envisat
в 2011 году по
модели Бадулина
(а) и модели
Gommenginger (б)**



Сплочённость и толщина морского льда



Сплочённость морского льда в Северном ледовитом океане по данным спутника ICESat-2 за сентябрь 2019 года

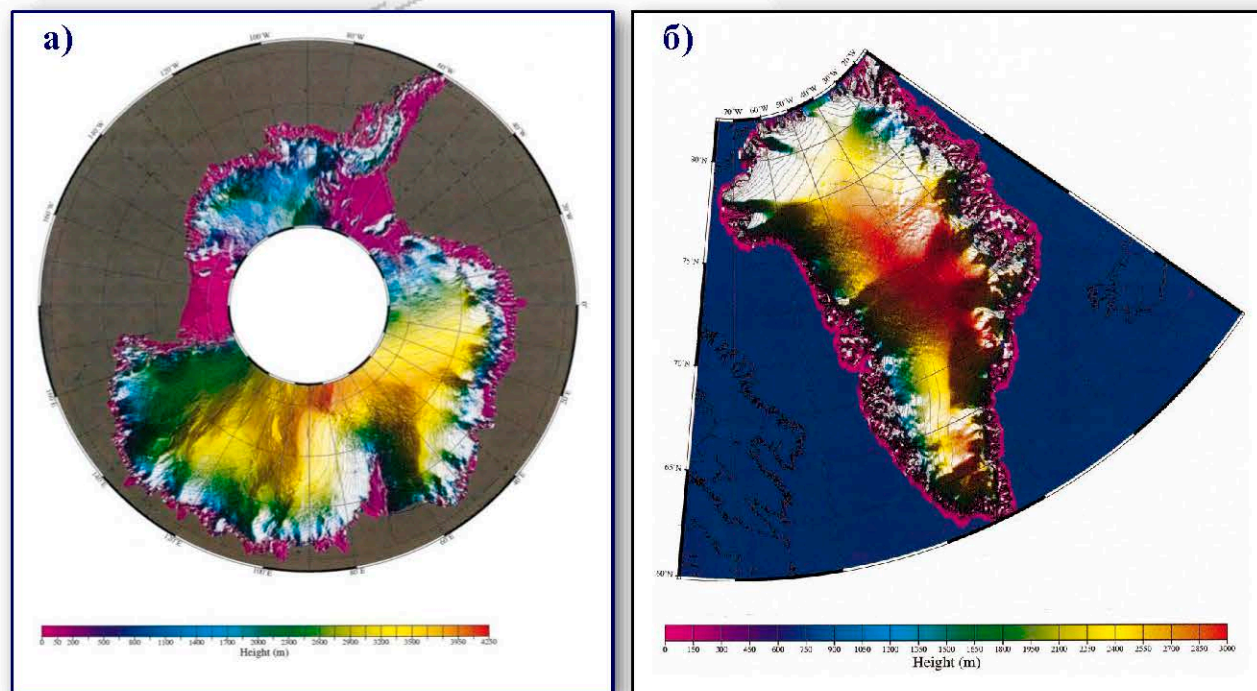


Средняя толщина льда в Северном ледовитом океане по данным спутника CryoSat-2 за период с 18 марта по 14 апреля 2015 года



Спутниковая альтиметрия в гляциологии

Точные сведения о топографии ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии являются фундаментальной основой для гляциологических исследований. Альтиметрические данные спутника ERS-1 имели большое значение для создания цифровых моделей высоты ледникового щита Антарктиды и Гренландии с высоким пространственным разрешением.



Карта ледникового щита Антарктиды (а) и Гренландии (б) с разрешением 2" по данным геодезической программы спутника ERS-1

В период между 2003 и 2007 гг. ледники Гренландии перемещались быстрее, чем на 100 м в год, утончаясь в среднем на 0,84 м в год



Спутниковая альтиметрия в гидрологии суши

Изучение гидрологического режима крупных озер и рек планеты важно:

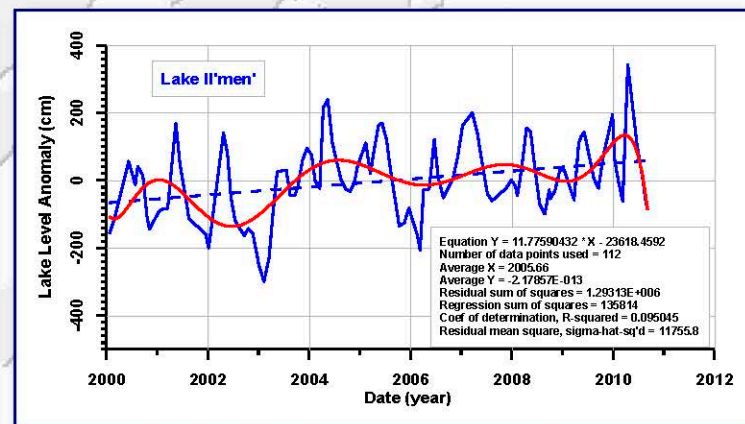
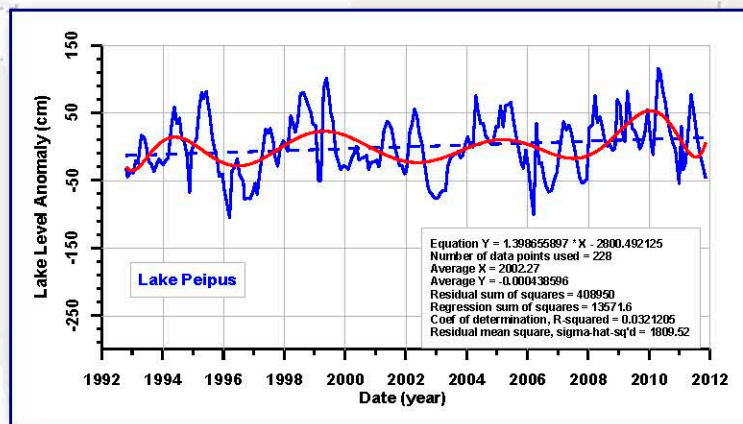
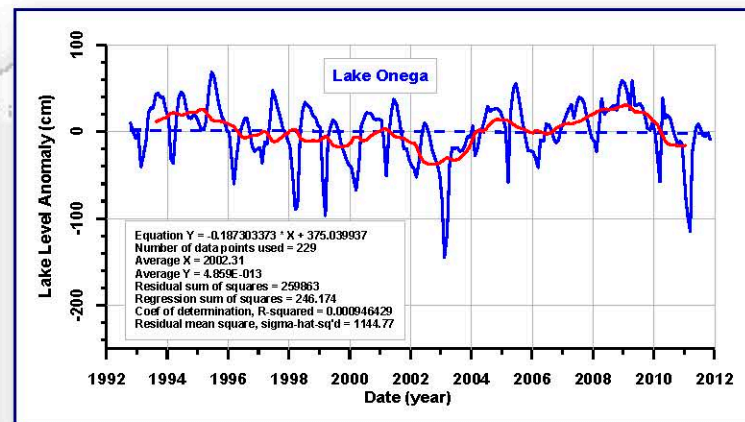
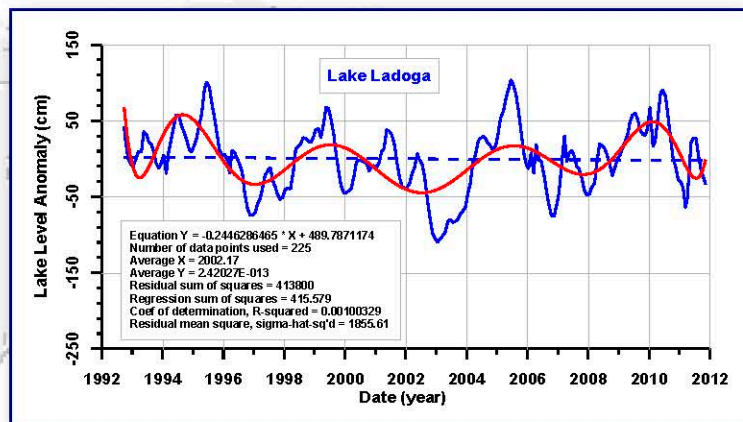
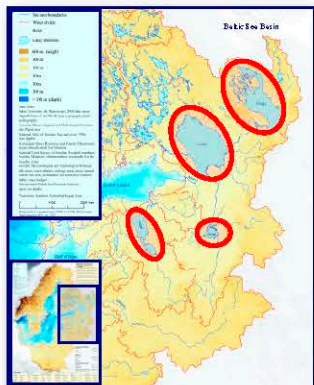
- для оценки запасов пресной воды;
- изучения водного баланса;
- анализа климатических и антропогенных изменений;
- прогноза их гидрологического режима;
- оценки вероятности природных катаклизмов.

Для некоторых озёр и рек гидрологическую информацию об их уровне часто трудно получить из-за недоступности области исследований (бассейн реки Амазонки и некоторых рек Африки, высокогорные озёра Тибета и т.д.), малочисленности или отсутствия уровенных постов или запаздывания передачи данных в центр обработки. В этом случае спутниковая альтиметрия имеет огромный потенциал в исследовании временной изменчивости высоты водной поверхности озёр, водохранилищ и рек.

К настоящему времени проведены исследования гидрологического режима более 200 озёр, 60 водохранилищ и 25 рек и их бассейнов. Создано три интернет ресурса: Geodesy, Oceanography et Hydrologie from Space (GOHS), USDA Global Reservoir and Lake Monitor и River and Lake, на которых собраны результаты исследования временной изменчивости уровня воды по данным спутниковой альтиметрии



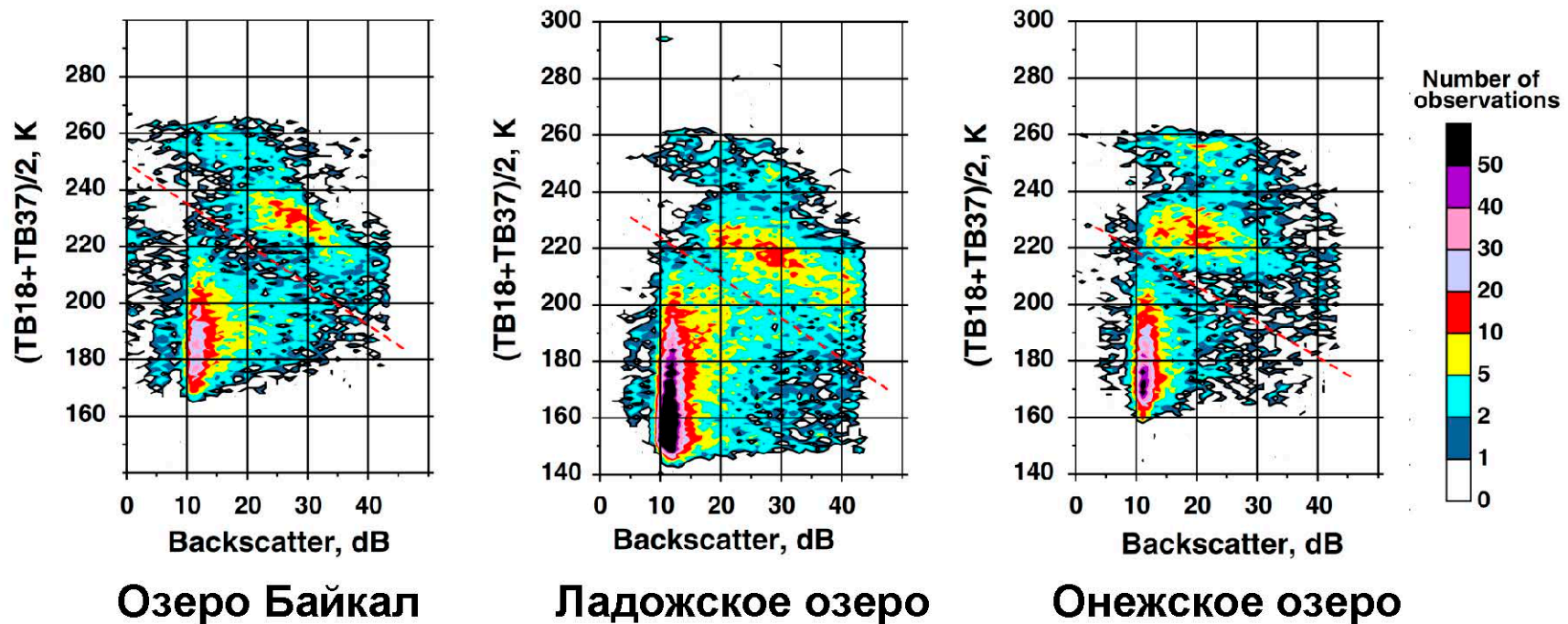
Уровенный режим крупнейших озёр северо-запада России



Временная изменчивость уровня крупнейших озёр северо-запада России по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2



Идентификация ледяного покрова по данным альтиметра и микроволнового радиометра



Двумерные диаграммы (количество случаев) наблюдений альтиметра и бортового радиометра спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 для озера Байкал и Ладожского и Онежского озёр. По оси X — коэффициент обратного рассеяния $K_{\text{н}}$ -диапазона (частота 13,6 ГГц). Ось Y — средняя яркостная температура на 18,7 и 34 ГГц. Красные пунктирные линии разделяют области между льдом и открытой водой





Спасибо за внимание



Тринадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23–27 мая 2025 г.

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

