

**Сергей А. Лебедев**

*к. ф.-м. н.,  
Ведущий научный сотрудник  
Лаборатории геоинформатики  
Геофизического Центра РАН*

*lebedev@wdcb.ru*

# **ОСНОВЫ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ**



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

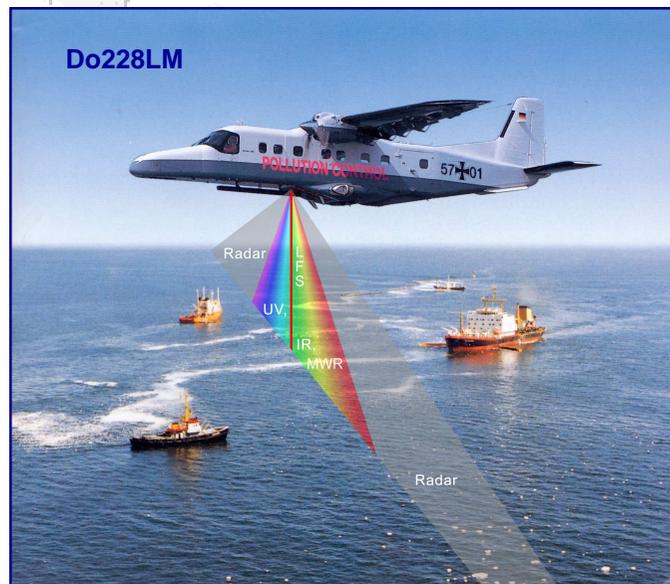
© 2010, Лебедев С.А.

# Типы методов дистанционного зондирования



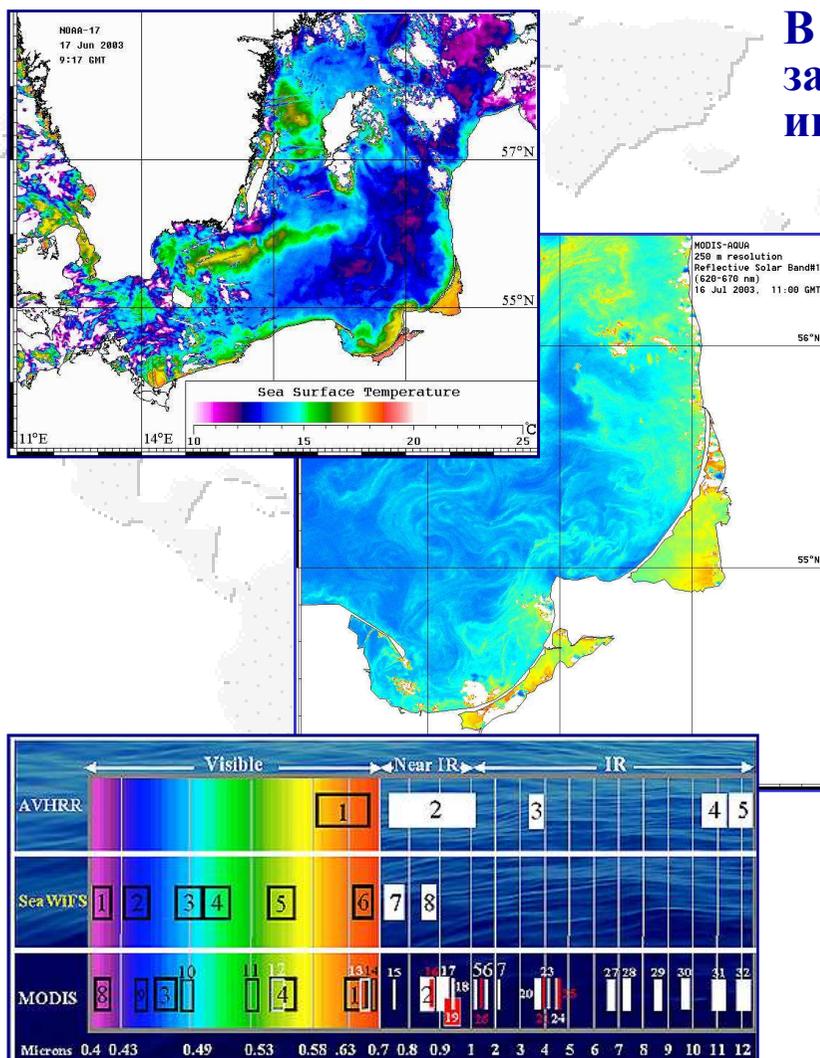
Методы дистанционного зондирования подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные.

- ➔ Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения (ИК и СВЧ) 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 отраженного сигнала.
- ➔ При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отраженного излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния.



# Спутниковая информация

В настоящее время для решения прикладных задач используется следующая спутниковая информация:



- ИК- и СВЧ-радиометрия (температура подстилающей поверхности, обнаружение лесных пожаров и т.д.)
- Радиометрия в видимом диапазоне (температура подстилающей поверхности, лед, хлорофилл и т.д.)
- Альтиметрия (высота поверхности океана, приводный ветер, высоты волн и т.д.)
- Скаттерометрия (скорость и направление приводный ветер и т.д.)
- Радиолокация (SAR) подстилающей поверхности (загрязнение. приводный ветер, высоты волн и т.д.)



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Спутниковая альтиметрия



Помимо этого спутниковая альтиметрия позволяет анализировать:

- амплитуду скорости приводного ветра
- высоты волн
- состояние подстилающей поверхности

$H_g$  – высота геоида или эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли

$H_{orb}$  – высота орбиты спутника

$H_{alt}$  – высота спутника над поверхностью моря

$H_{ssh}$  – высота морской поверхности с учетом ряда поправок ( $dH_i$ ), связанных с прохождением радиосигнала через

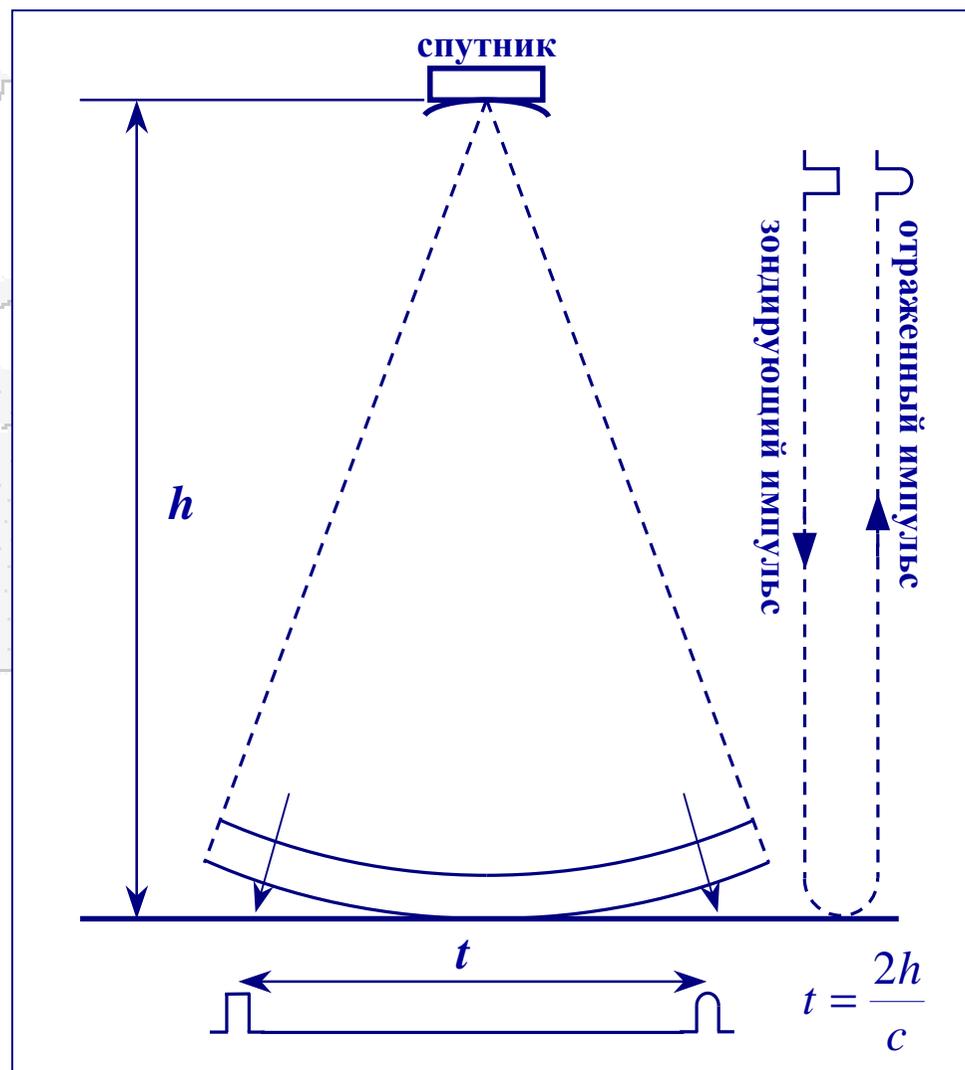
– атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности:

$H_{dt} = H_{ssh} - H_g$

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

# Основы метода спутниковой альтиметрии

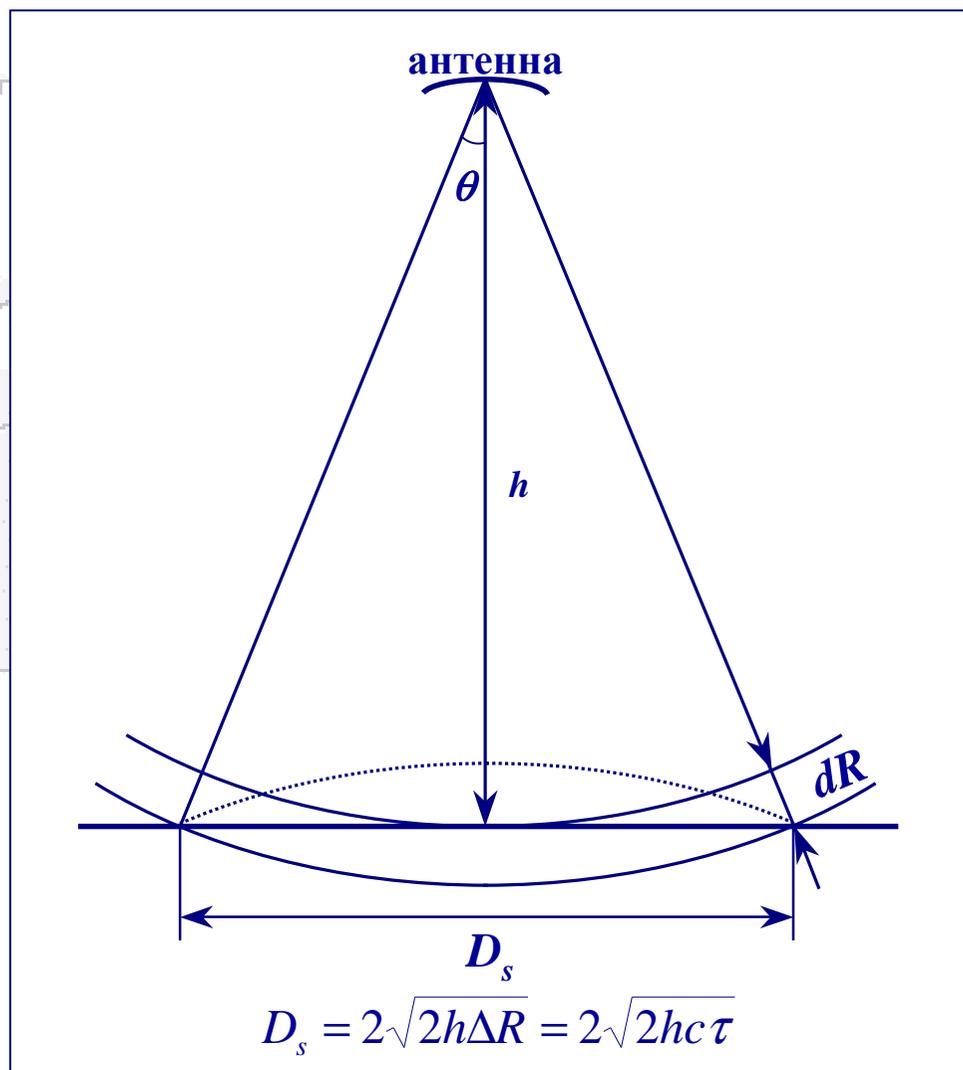
Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования поверхности с борта космического аппарата. По времени возврата зондирующего радиоимпульса рассчитывается расстояние от спутника до подстилающей поверхности, что позволяет определить высоту морской поверхности.



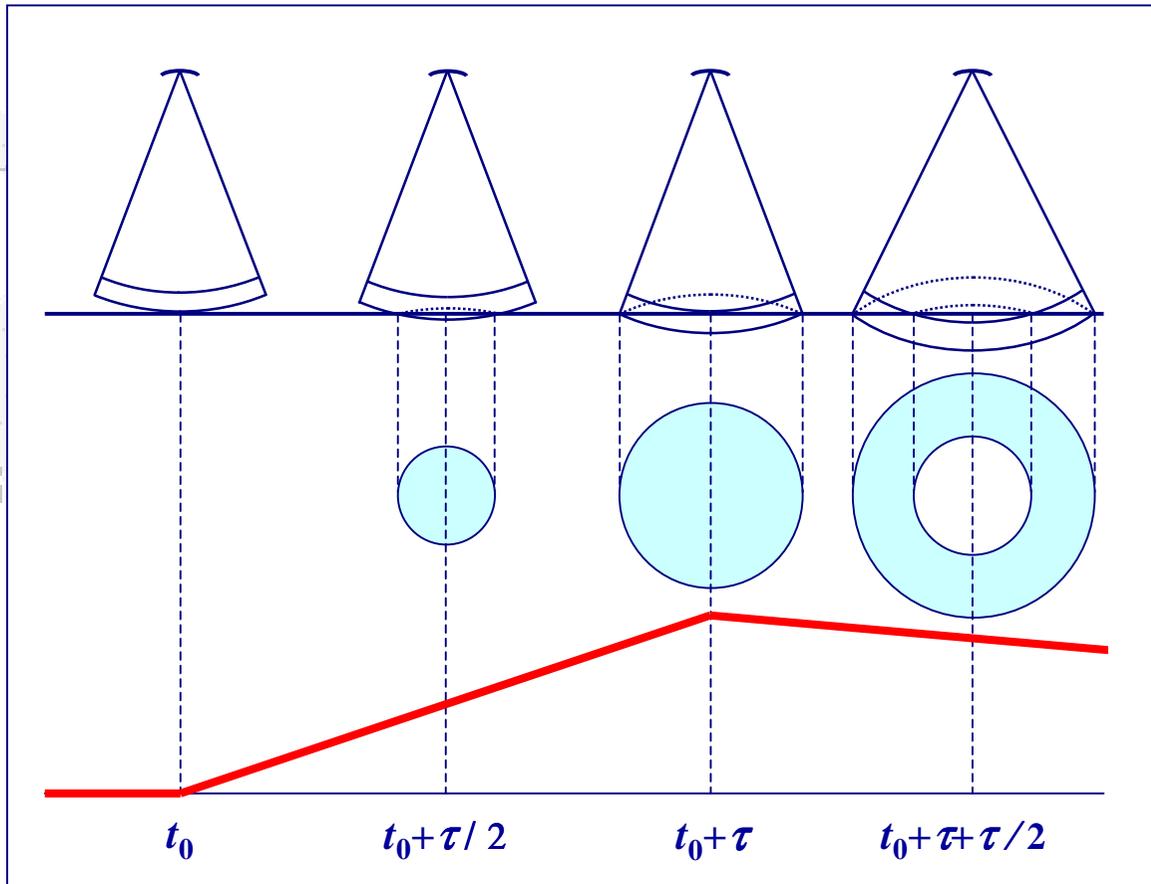
# Основы метода спутниковой альтиметрии

Диаметр сегмента подстилающей поверхности, с которого происходит отражение радиоимпульса, зависит от частота его повторения.

Для спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 для одиночного импульса при  $\tau = 0.2$  нс он получается равным  $D_s = 2.54$  км, а его площадь составляет  $5.05$  км<sup>2</sup>, что значительно меньше максимальной величины определяемой конструкцией альтиметра ( $D_s = 48.1$  км).



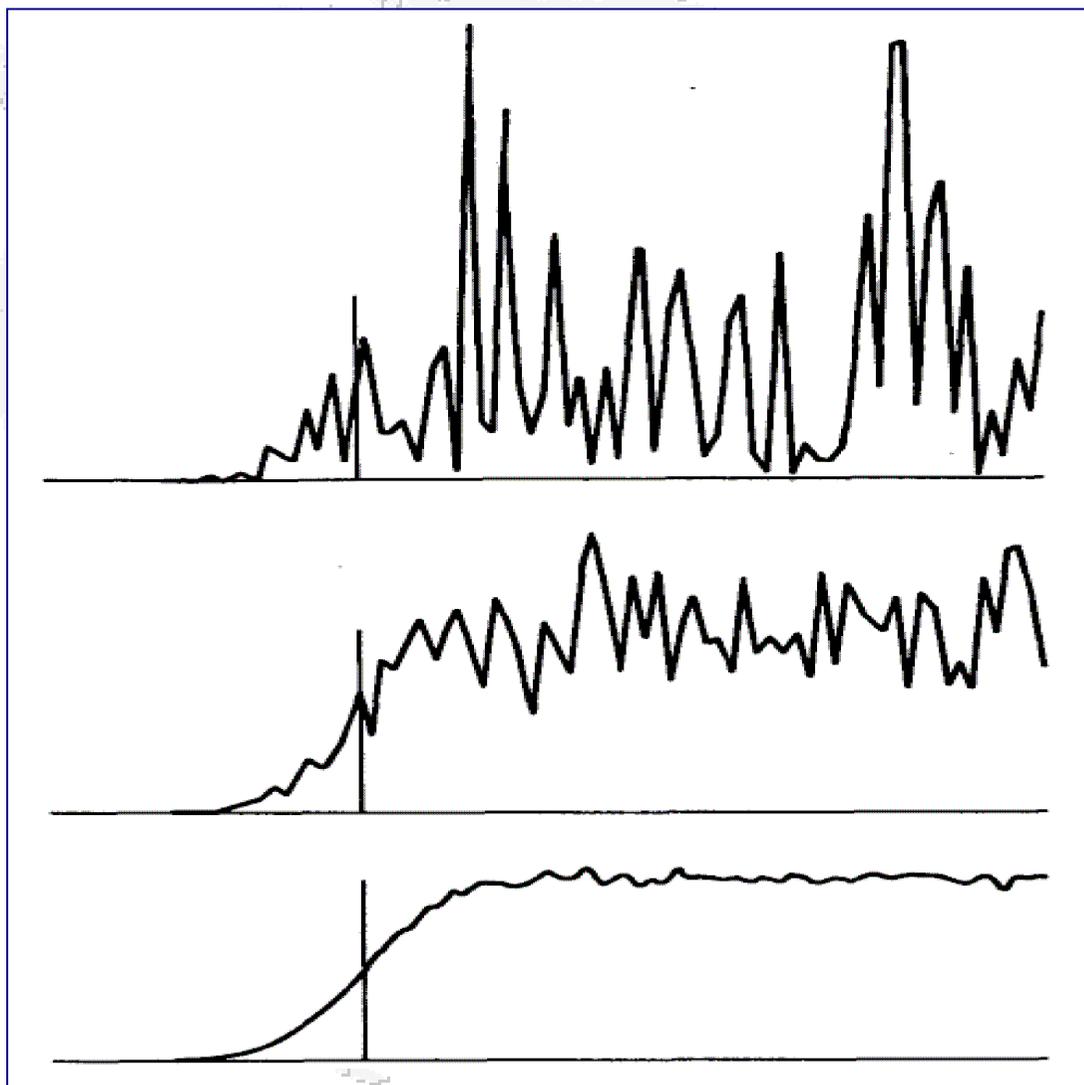
# Основы метода спутниковой альтиметрии



Зависимость формы и площади сегмента подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра от времени.

После касания зондирующим импульсом подстилающей поверхности происходит расширение сегмента, с которого происходит отражение, с последующим вырождением его до кольца, середину которого занимает отраженный сигнал от следующего импульса.

# Модельные формы импульсов, рассеянные поверхностью



Отдельный  
импульс

Осреднение по 25  
импульсам

Осреднение по 1000  
импульсам

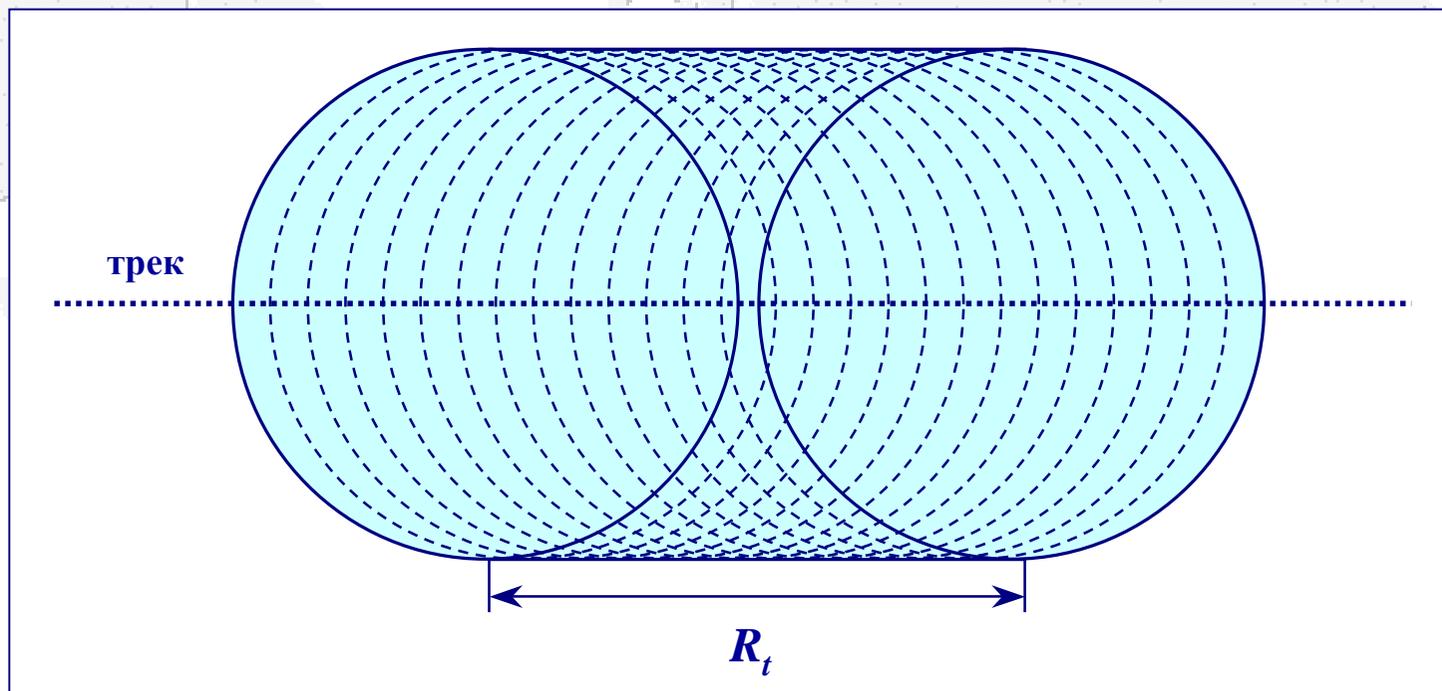


Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Основы метода спутниковой альтиметрии

Спутник движется по орбите со скоростью 5.8 км/с вдоль трека.  
При таком осреднении с интервалами осреднения 1, 0.1 и 0.05 с  
суммарная площадь, с которой получена информация  
соответственно составляет 19.75, 6.52 и 5.78 км<sup>2</sup>.



Изменение площади сегмента подстилающей поверхности,  
с которого поступает информация, за счет осреднения

# Отражение импульса от неровной поверхности

$$P_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{FS}(t_2) p(t_1 - t_2) q\left(\frac{c}{2}(t - t_1)\right) p dt_1 dt_2$$

$p(t)$  – форма излучаемого импульса,

$q(z)$  – плотность вероятности распределения высот зеркальных точек,

$P_{FS}$  – средняя форма импульса, отраженного от плоской диффузной поверхности

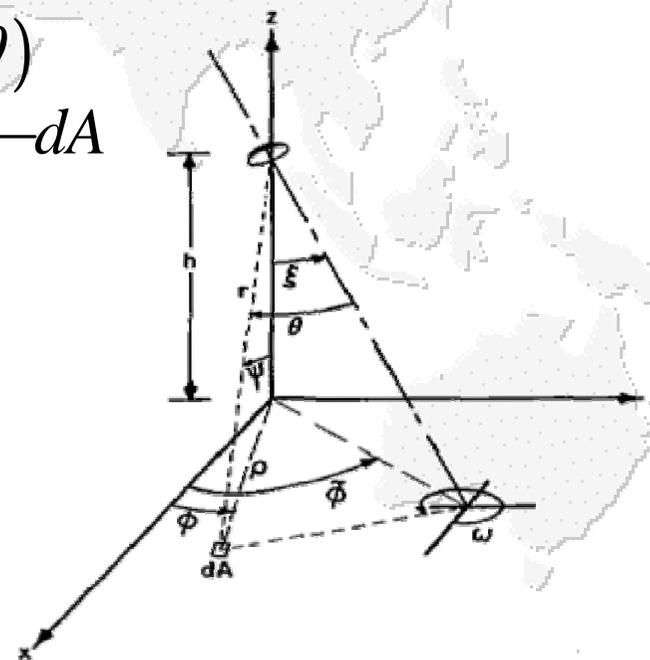
$$P_{FS}(t) = P_0 \iint_{\text{illuminated area}} \frac{\delta\left(t - \frac{2r}{c}\right) G^2(\theta) \sigma(x, y, \theta)}{r^4} dA$$

$G$  – диаграмма направленности антенны,

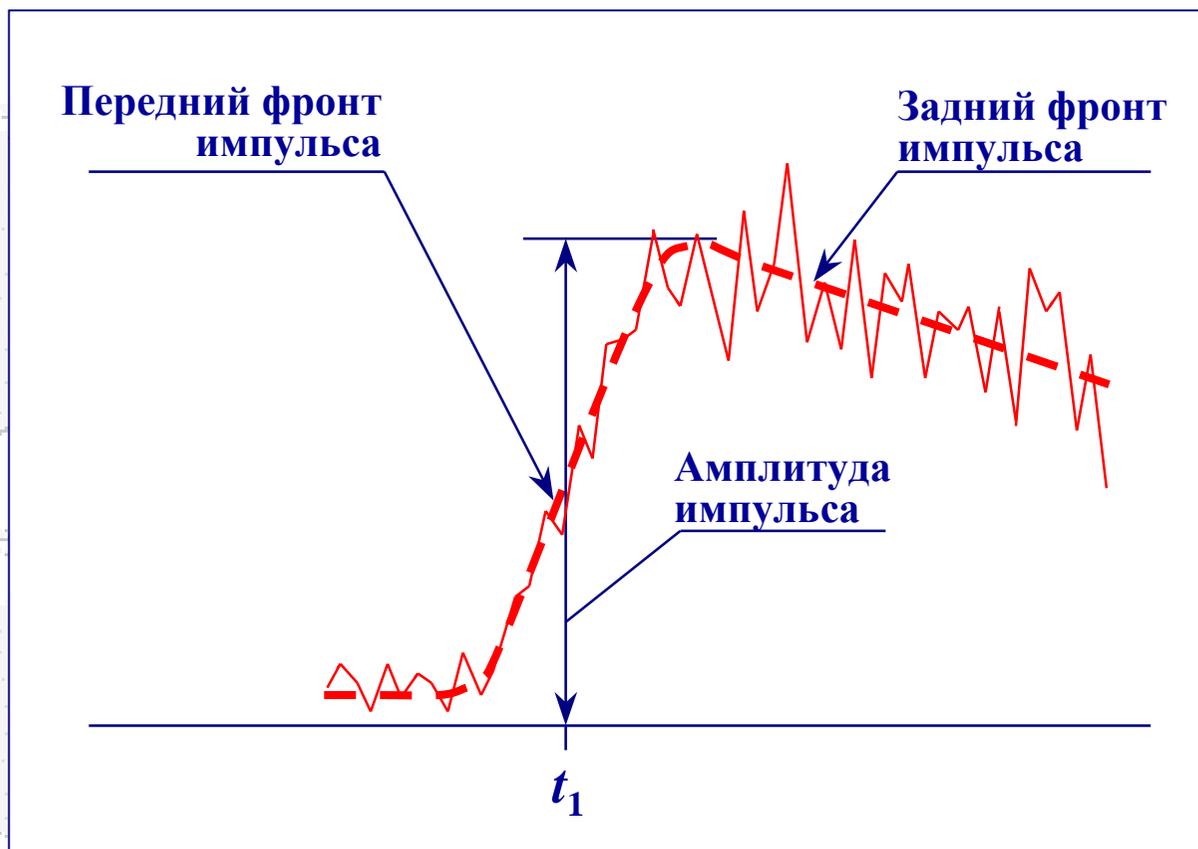
$r$  – расстояние от антенны до элементарной области  $dA$  на поверхности,

$\sigma$  – сечение рассеяния на единицу площади

$h$  – среднее расстояние от спутника до поверхности

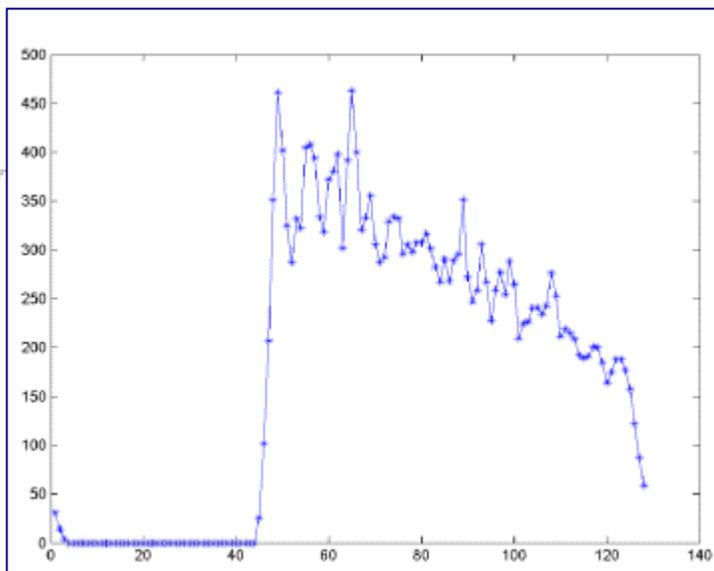


# Отраженный импульс



**Основные элементы форма отраженного импульса  
( $t_1$  – время, соответствующее половине амплитуды  
фронта отраженного импульса)**

# Отраженный импульс



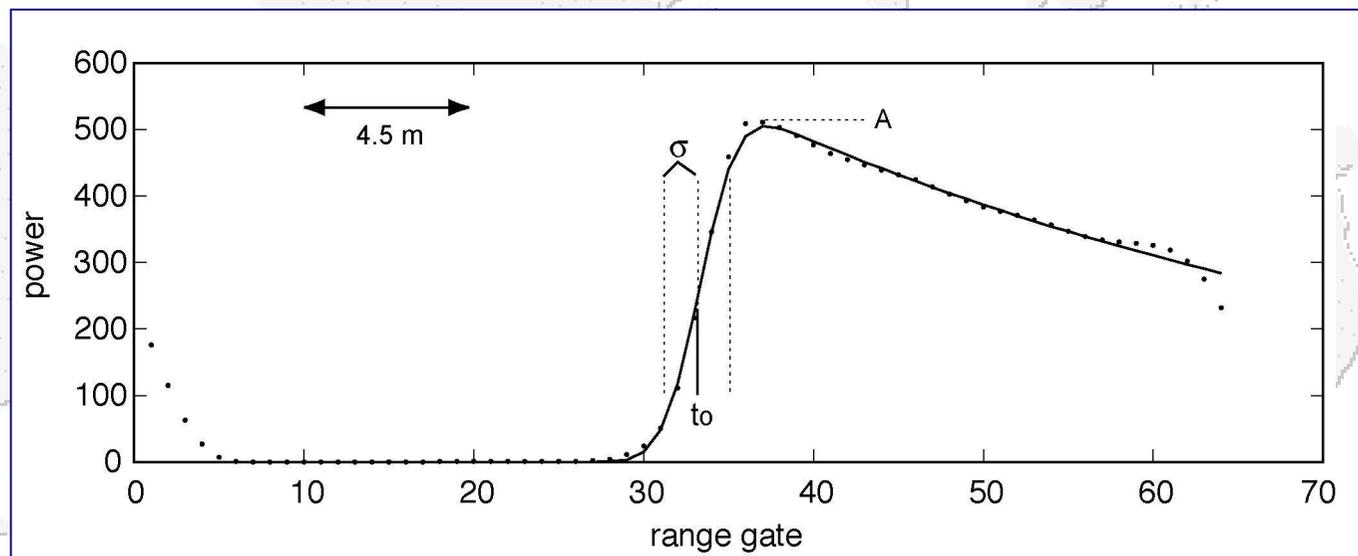
Форма отраженного импульса, рассеянного однородной шероховатой поверхностью по формуле Брауна (Ocean -1 re-tracking)

$t_0 = 2h/c$  – высота орбиты спутника над поверхностью воды,

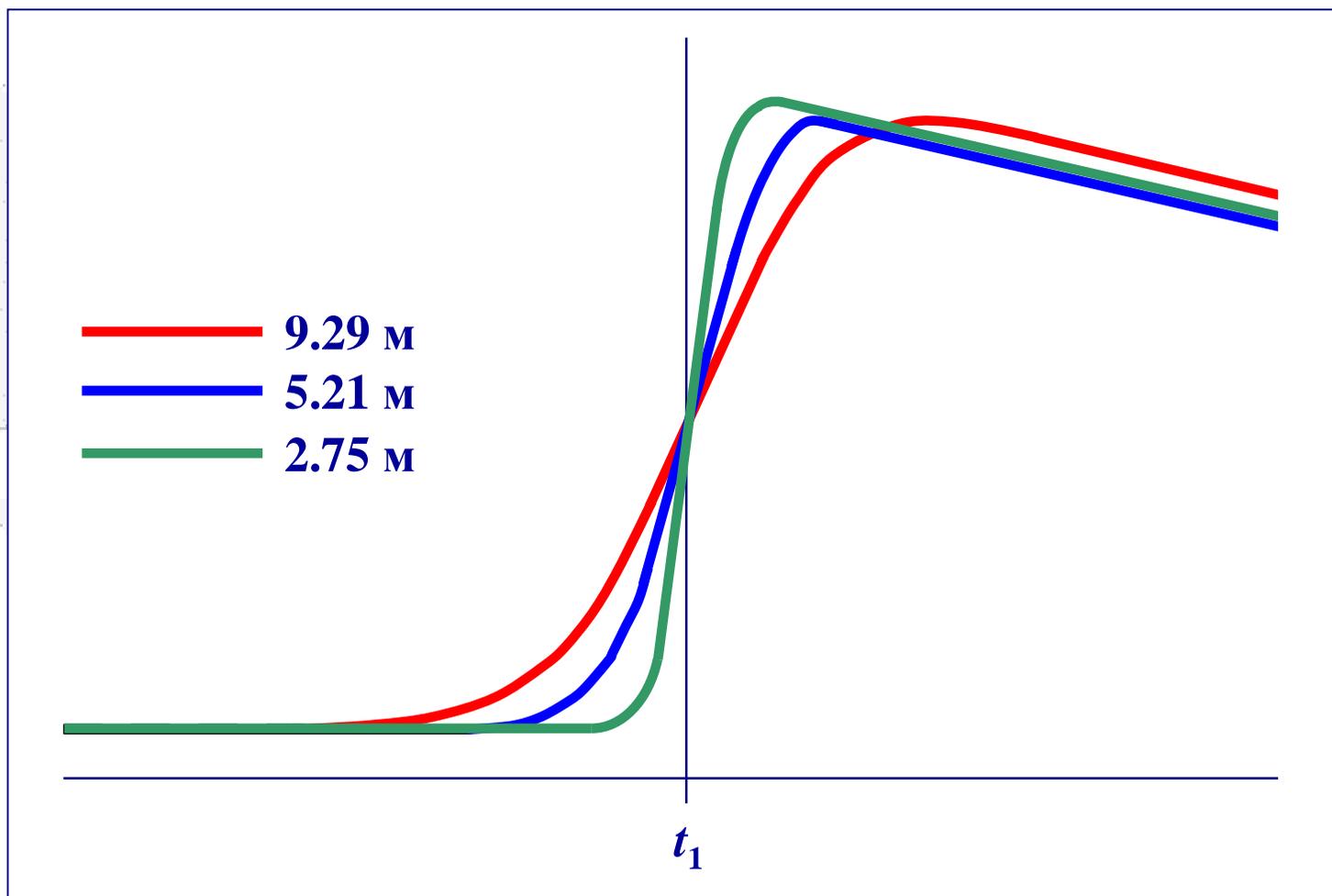
$SWH = 2\sigma$  – высота волн,

$A$  – магнитуда импульса – параметр шероховатости поверхности, связанный со скоростью ветра

Форма отраженного импульса в открытом океане

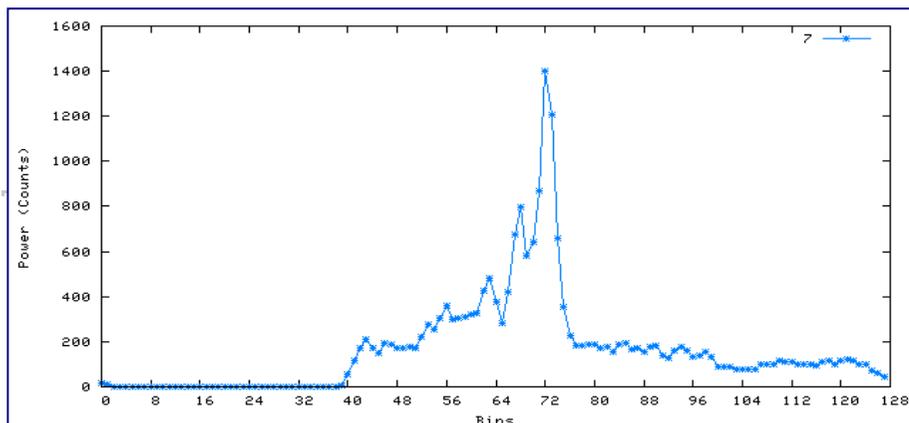


# Отраженный импульс

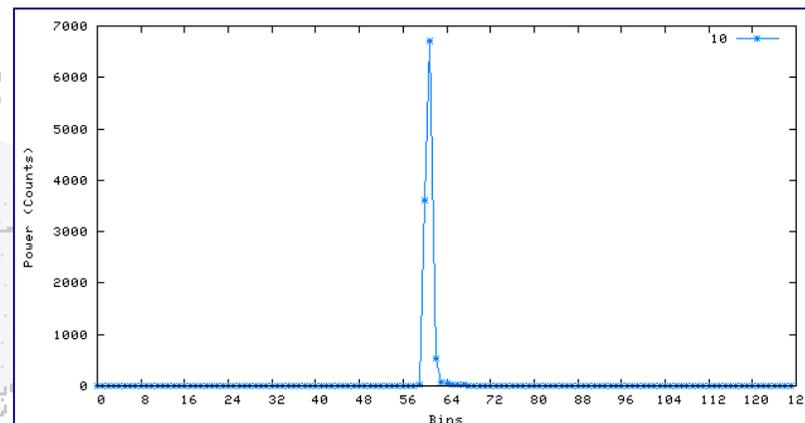


Примеры сглаженных форм отраженного импульса для различной степени волнения морской поверхности

# Отраженный импульс

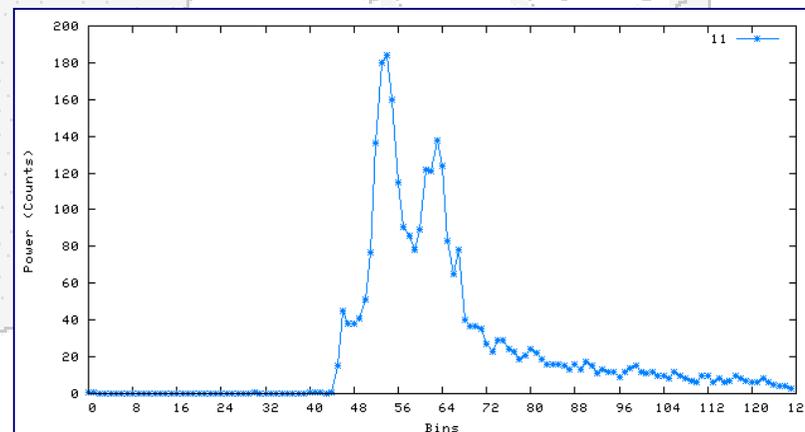


**Совместное отражение от суши и воды**



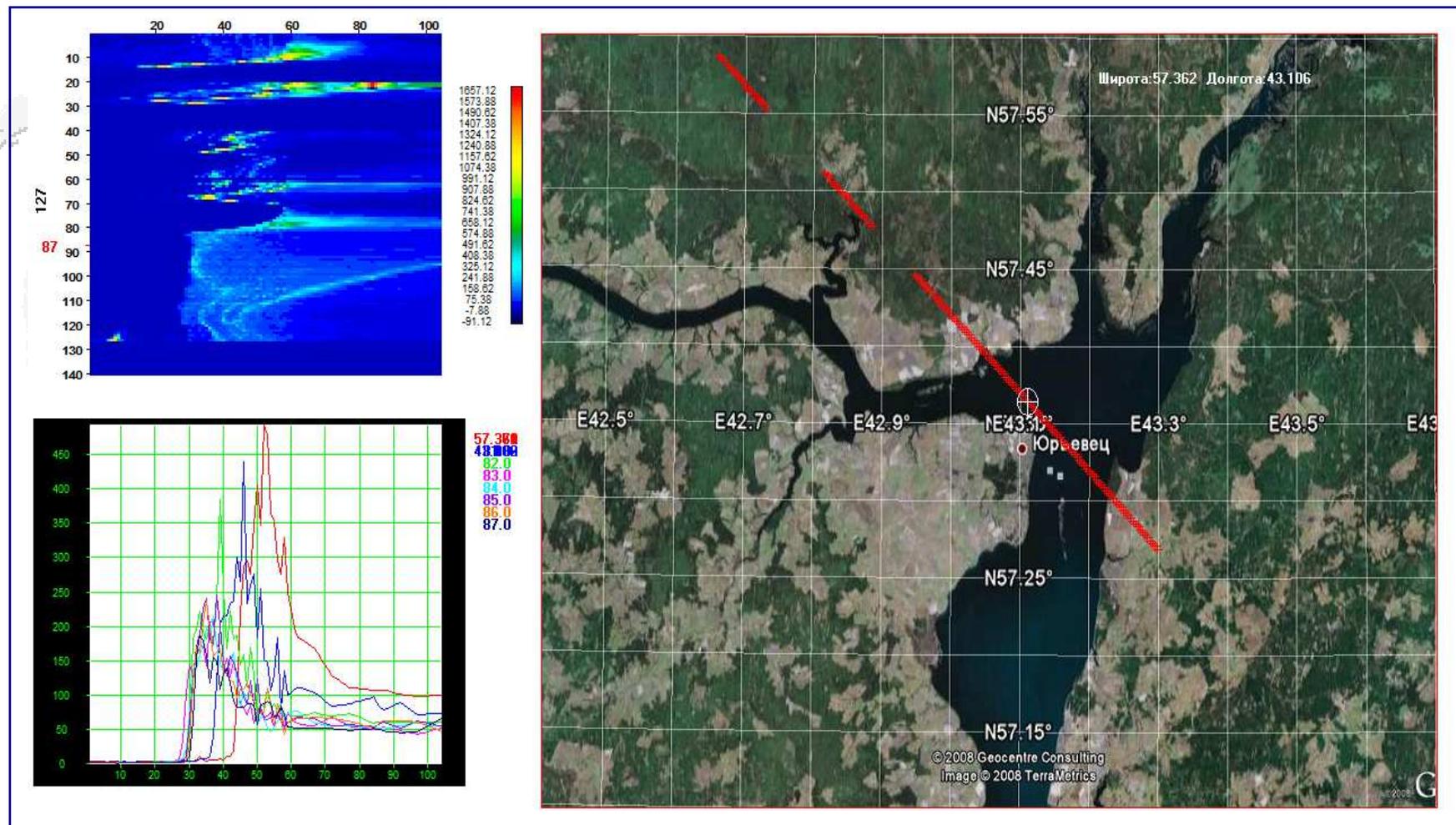
**Квази-зеркальное, когерентное отражение от глади воды в устьях и гаванях**

**Причина ошибок стандартного алгоритма обработки отраженного импульса  
неправильное определение положения переднего фронта отраженного импульса**



**Наличие нескольких сильно отражающих объектов**

# Отраженный импульс



**Топография суши и гидрометеорологического режима водохранилища должны учитываться при построении регионального алгоритма ретрекинга**



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Основные поправки

На прохождение радиоимпульса альтиметра сильно влияет состояние атмосферы, которое выражается в увеличении времени возврата зондирующего сигнала, что приводит к ошибке определения положения спутника над поверхностью океана. Явление рефракции радиоимпульса в атмосфере можно разделить на следующие виды:

- ⇒ рассеяние молекулами воздуха, в первую очередь обусловленное наличием молекул кислорода в составе атмосферы (поправка на «сухую» тропосферу);
- ⇒ поглощение водяным паром и облаками (поправка на влажность);
- ⇒ рассеяние на свободных электронах в ионосфере (ионосферная поправка).

Дополнительные поправки, обязательные для учета при обработке данных:

- ⇒ поправка на состояние подстилающей поверхности, которая зависит от высоты волны и скорости ветра,
- ⇒ инструментальная поправка,
- ⇒ поправка на отклонении антенны альтиметра от положения надира

## Геофизические поправки

- ⇒ поправка обратного барометра,
- ⇒ приливные поправки.



# Основные программы



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Основные программы

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
			Высота,		Наклонение, градусы	Период повторяемости <sup>2</sup> , сутки
			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	17,5
	09/1978 – 10/1978					3
GEO SAT	геодезическая программа	635	775	779	108,1	~23
	изомаршрутная программа					11/1986 – 12/1989
ГЕОИК 1 <sup>1</sup> (Космос–1660)	07/1985 – 10/1986	1500	1482	1525	73,6	–
ГЕОИК 2 <sup>1</sup> (Космос–1732)	03/1986 – 03/1986	1500	1480	1525	73,6	–
ГЕОИК 3 <sup>1</sup> (Космос–1803)	12/1986 – 12/1987	1500	1497	1504	82,6	–
ГЕОИК 4 <sup>1</sup> (Космос–1823)	03/1987 – 10/1987	1500	1479	1524	73,6	–
ГЕОИК 5 <sup>1</sup> (Космос–1950)	06/1988 – 07/1990	1500	1484	1522	73,6	–
ГЕОИК 6 <sup>1</sup> (Космос–2037)	09/1989 – 09/1990	1500	1485	1524	73,6	–
ГЕОИК 7 <sup>1</sup> (Космос–2088)	08/1990 – 03/1993	1500	1484	1524	73,6	–
ERS-1	Фаза А	2384	774	775	98,5	3
	Фаза В					3
	Фаза С					35
	Фаза D					3
	Фаза E <sup>1</sup>					~168
	Фаза F <sup>1</sup>					~168
	Фаза G					35

<sup>1</sup> – геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель)

<sup>2</sup> – для изомаршрутных программ



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Основные программы

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
			Высота,		Наклонение, градусы	Период повторяемости <sup>2</sup> , сутки
			перигей	апогей		
TOPEX/Poseidon	08/1992 – 12/2005	2402	1331	1344	66,04	10
ГЕОИК 8 <sup>1</sup> (Космос-2226)	01/1993 – 07/1993	1500	1479	1525	73,6	–
ГЕОИК 9 <sup>1</sup> (Гео-ИК)	12/1994 – 07/1995	1500	1481	1526	73,6	–
ERS-2	04/1995 – 06/2002	2516	784	785	98,6	35
GFO-1	02/1998 – настоящее время	410	786	788	108,1	17
Jason-1	12/2001 – настоящее время	500	1337	1343	66,2	10
ENVISAT	03/2002 – настоящее время	7991	783	785	98,6	35
ICESat	01/2003 – настоящее время	1000	593	610	94	183,8
CryoSat-1 <sup>1</sup>	10/2005 – потерян при выводе на орбиту	650	720		92	~369
OSTM/Jason-2	06/2008 – настоящее время	510	1324	1335	66,04	10
CryoSat-2 <sup>1</sup>	04/2010 – настоящее время	650	720		92	~369
HY-2	планируется на 2010	513	~ 963		99,3	14 168
САДКО (Poseidon-2)	планируется на 2010 - 2012	~ 1500	1347		73,6 - 82,6	~ 17,5
SARAL / AltiKa	планируется на 2011	~ 600	~ 800		98,55	35
Sentinel-3- Ocean	планируется на 2012	~ 2300	~ 800		98,5	14 27
Jason-2	планируется на 2013 - 2014	~ 500	1336		66	10
SWOT	планируется на 2016	~ 500	970		78	3 22

<sup>1</sup> – геодезические программы (для российских программ в скобках указан спутник-носитель)

<sup>2</sup> – для изомаршрутных программ



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

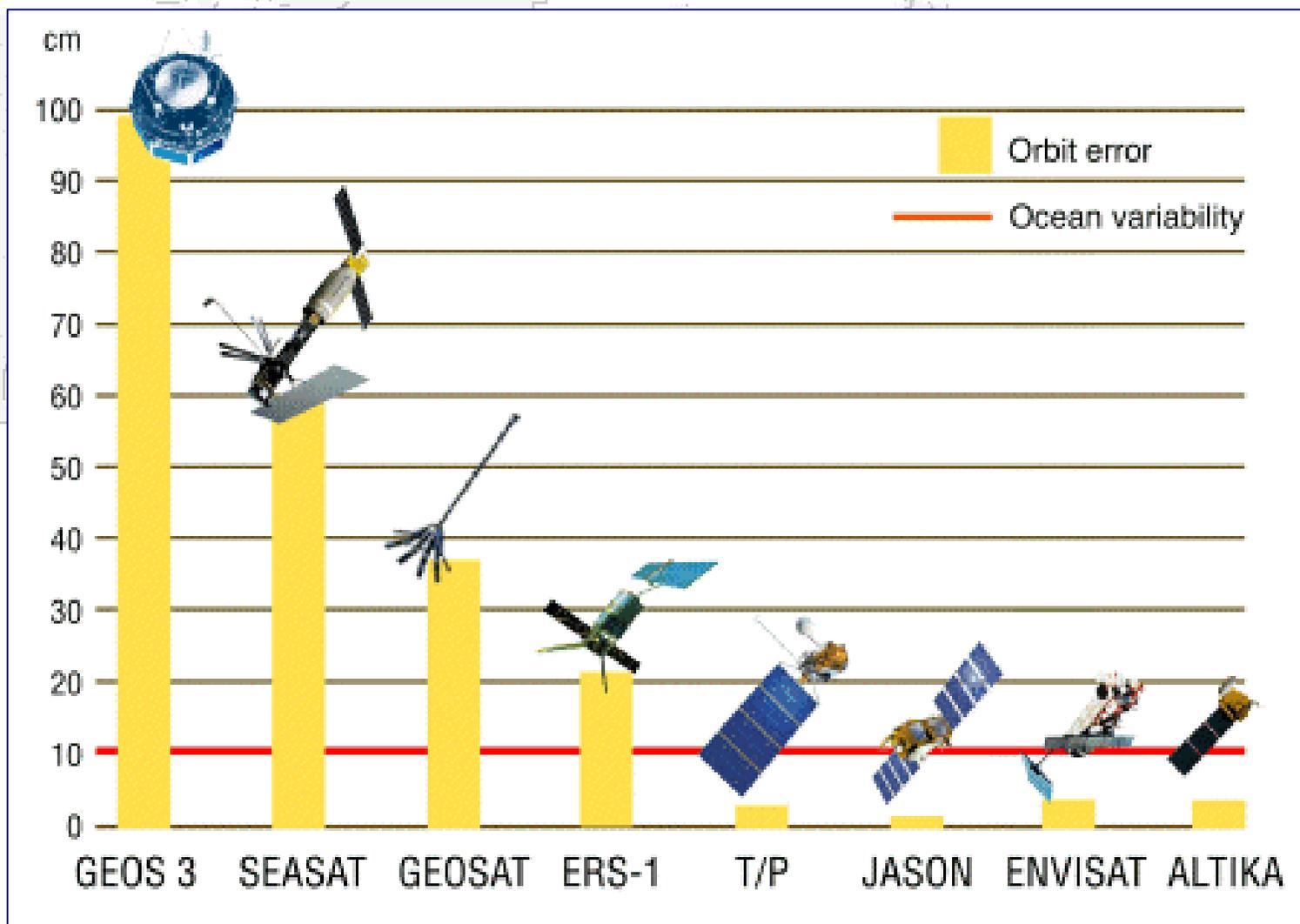
© 2010, Лебедев С.А.

# Альтиметр САДКО (Poseidon-2)

Характеристики	Диапазон Ku	Диапазон С	Общие
Средняя высота			1347 км
Вес			2x25 кг (два комплекта)
Частота	13.5 ГГц	5.3 ГГц	
Ширина полосы	320 МГц	320 (100) МГц	
Длительность импульса	105.6 мкс	105.6 мкс	
Частота повторения импульса	1800 (1680) Гц	300 (420) Гц	
Диаметр антенны			1.2 м
Усиление	42 дБ	33 дБ	
Ширина луча	1.3°	3.4°	
Потребляемая мощность			70 Вт
Пиковая мощность на канал	7 Вт	16 Вт	
Количество отсчетов отклика			128



# Основные программы

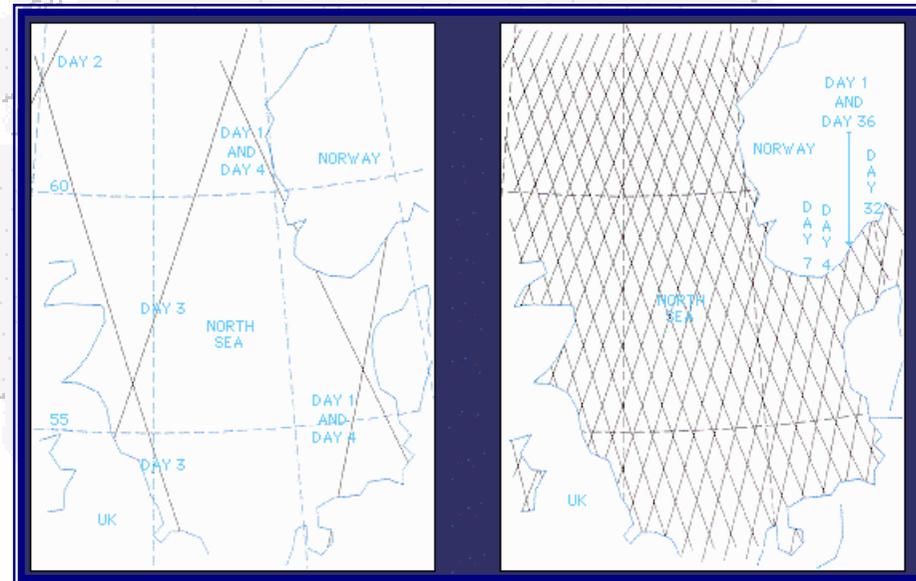


Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.

# Изомаршрутные программы

Изомаршрутные программы направлены в первую очередь для исследования изменений высот морской поверхности синоптического масштаба. Для этой цели параметры орбиты спутника выбираются таким образом, чтобы измерения вдоль треков проводились повторно через определенный интервал времени (цикл). Отклонение положения последующего трека от предыдущего при этом не превышает 1-2 километра.



Положение треков изомаршрутных программ спутника ERS-1 с циклом повторения 3 и 35 дней



# Данные спутниковой альтиметрии

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

## Ошибки расчета орбиты и поправок для разных типов данных спутника Jason-1

	Тип данных		
	Оперативные	Промежуточные	Окончательные
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



# Оперативные данные

После поступления данных с борта спутника производится прогноз высоты орбиты и расчет поправок по соответствующим моделям. Таким образом, каждые 6–8 часов формируются RGDR-данные.

## Радиальная составляющая орбитальной ошибки прогноза высоты орбиты спутника ERS-2

День прогноза	Точность прогноза высоты орбиты (см)	Среднеквадратичное отклонение прогноза от точной орбиты (см)
1	14.6	13.4
2	19.1	17.9
3	24.6	22.9
4	31.5	29.0
5	39.4	35.5

При этом следует учитывать, что прогнозируемая высота орбиты спутника содержит радиальную ошибку по сравнению с точными расчетами с применением данных навигационных систем и систем слежения.

Однако в этих данных могут отсутствовать некоторые поправки. Так QLGDR данные спутника TOPEX/POSEIDON не содержат «сухую» тропосферную поправку и поправку обратного барометра.

## Промежуточные данные

В течение последующих 1–2 недель прогнозируемая высота орбиты уточняется за счет радиальной составляющей, рассчитываемой по точкам пересечения (выравнивание высот орбит), что позволяет сформировать IGDR-данные. Это приводит к уточнению значений высот морской поверхности. Ошибка высоты орбиты в этом случае значительно ниже, что позволяет использовать IGDR-данные для исследования межгодовых аномалий уровня морей и океанов.

## Окончательные данные

Окончательный вариант данных (GDR) получается в результате уточнения высоты орбиты по данным вектора положения спутника, полученным с наземных лазерных станций слежения или других спутников. Это повышает точность расчета высоты морской поверхности, что позволяет использовать спутниковую альтиметрию для решения не только океанологических, но и геодезических задач. GDR данные формируются примерно через 1–2 месяца после окончания цикла изомаршрутной программы спутника.



# Структура базы данных спутниковой альтиметрии

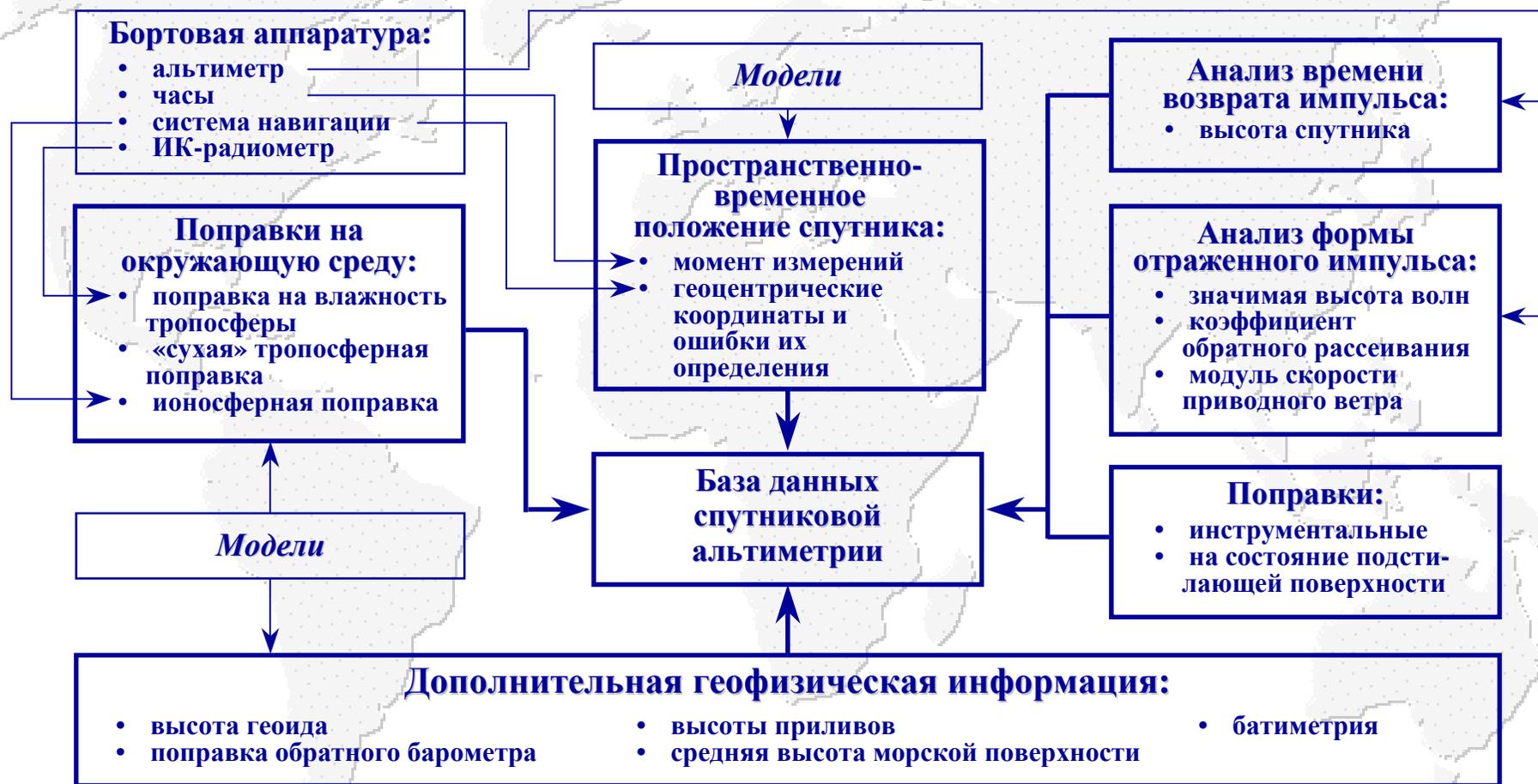
Структура большинства баз данных спутниковой альтиметрии состоит из следующих групп:

- пространственно-временное положение спутника;
- высота спутника над подстилающей поверхностью;
- поправки, влияющие на время возврата зондирующего импульса (инструментальная поправка, поправка на состояние подстилающей поверхности, поправки на влияние окружающей среды);
- результаты анализа формы отраженного импульса (значимая высота ветровых волн, коэффициент обратного рассеяния, модуль скорости приводного ветра);
- дополнительная геофизическая информация (поправка обратного барометра, высоты геоида и средней морской поверхности, высоты приливов — морского, солнечного, твердой Земли и полюсного, данные батиметрии).

Часть информации получается в результате обработки исходных данных полученных с борта ИСЗ, другая — как результат модельных расчетов.



# Структура базы данных спутниковой альтиметрии



# Данные спутниковой альтиметрии

Источник данных	Спутник	Данные	Организация базы данных	Тип данных	Способ получения данных	Доступ к данным
	GEOS-3	высота морской поверхности	вдоль трека	GDR	FTP	свободный
	SEASAT			GDR		
	TOPEX/ Poseidon			IGDR		
		GDR		FTP, CD		
		MGDR		FTP		
		QLGDR				
	Jason-1	высота морской поверхности		NRTSSHA	FTP	
				аномалии высоты морской поверхности		
		аномалии уровня моря		OSDR		
				аномалии высоты морской поверхности		
		GDR				
		NRTSSHA				
	TOPEX/ Poseidon	аномалии уровня моря	данные на сетке		FTP, CD	
	GEOSAT	высота морской поверхности	вдоль трека	GDR	CD	платный
	GFO-1				FTP	свободный
	ГЕОИК	высота морской поверхности	вдоль трека	GDR	Интернет, CD	свободный
	GEOSAT			IGDR		
	TOPEX/ Poseidon			MGDR		
	Jason-1			IGDR		
	GFO-1			GDR		
	ERS-2	аномалии высоты морской поверхности	вдоль трека	RGDR	Интернет	свободный
	TOPEX/ Poseidon					
	GFO-1					
	Jason-1					
	ERS-2	карты (изображения)				
	TOPEX/ Poseidon					
	GFO-1					
	Jason-1					



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.



# Данные спутниковой альтиметрии

Источник данных	Спутник	Данные	Организация базы данных	Тип данных	Способ получения данных	Доступ к данным
	ERS-1	аномалии уровня моря	вдоль трека	GDR	FTP, CD, DVD	свободный
	ERS-2					
	ENVISAT					
	TOPEX/ Poseidon					
	Jason-1					
	Jason-2					
	ERS-2		данные на сетке	FTP, DVD		
	GFO-1					
	ENVISAT					
	TOPEX/ Poseidon					
	Jason-1					
	Jason-2					
	GFO-1	аномалии уровня моря	вдоль трека	RGDR	FTP	свободный
	ENVISAT					
	TOPEX/ Poseidon					
	Jason-1					
	Jason-2		вдоль трека	Internet (Web)		
	GEOSAT					
	ERS-1					
	ERS-2					
ENVISAT	аномалии высоты или уровня моря	Internet (Web)				
TOPEX/ Poseidon						
Jason-1						
Jason-2						

# Интегрированная База Данных Спутниковой Альтиметрии (ИБДСА)

ИБДСА формируется на основе данных трех уровней: исходных (измерительных), результатов модельных расчетов и дополнительной информации .

- Исходные данные представляют собой результаты обработки сигнала альтиметра вдоль треков с учетом инструментальных ошибок и поправок на влияние окружающей среды. Они различаются между собой как структурой организации массивов информации, так и составом параметров и геодезической системой отсчета. Исходные данные могут изменяться в случае повторного перерасчета орбит спутника или уточнения инструментальных поправок.
- Часть результатов модельных расчетов представляет собой численные массивы данных на регулярной сетке, другая — результаты расчета по численным моделям. К ним относятся – высоты приливов, высоты геоида, аномалии силы тяжести, средние высоты морской поверхности, динамическая топография и др.. Они периодически изменяются по мере использования новых данных или развития алгоритмов и методов их обработки.
- Дополнительная информация представляет данные по глубинам Мирового океана и фундаментальным геодезическим константам. В перспективе — данные высокоточных координат мировых и региональных геодезических сетей и элементы связей между ними; GPS-измерения и т.д. Она необходима для совместного использования данных альтиметрии при решении широкого круга как океанологических, так и других задач.



# Принцип интегрированности

При объединении этих данных в единую базу проводились дополнительные операции:

- отнесение измерительной информации и геофизических моделей к единой геодезической системе отсчета,
- запись времени измерений в едином формате,
- учет инструментальной поправки, поправки на состояние подстилающей поверхности и выбор и учет оптимальных поправок, обусловленных влиянием окружающей среды на время прохождения радиоимпульса (при их отсутствии — расчет по соответствующей модели),
- использование единых алгоритмов при пересчете результатов модельных
- расчетов дополнительной информации вдоль треков,
- выдача информации в едином формате.

Реализация данных процедур потребовала создания программного обеспечения, которое стало частью специализированной системы управления базой данных. По причине большого объема рабочей информации и периодического обновления данных, алгоритмов и численных моделей было принято решение формировать новую базу по запросу Пользователя в зависимости от временного интервала и района. Таким образом, программное обеспечение становится составной частью базы данных, которая объединяет их в новую базу. Такой подход был назван *принципом интегрированности*.



# Принцип построения ИБДСА





**Спасибо за  
внимание**



Выездной семинар-школа. «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования», Таруса, 9-12 июля 2010 г.

© 2010, Лебедев С.А.