

Сергей А. Лебедев



Геофизический Центр РАН,

**Анна И. Гинзбург
Андрей Г. Костяной
Николай А. Шеремет**



Институт космических исследований РАН



Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Климат Черного и Азовского морей в условиях глобального потепления

Часть II. Уровень и связанные параметры



**III Международный выездной семинар-школа «спутниковые методы и системы исследования Земли»
Таруса, 28 февраля – 5 марта 2012 г.**

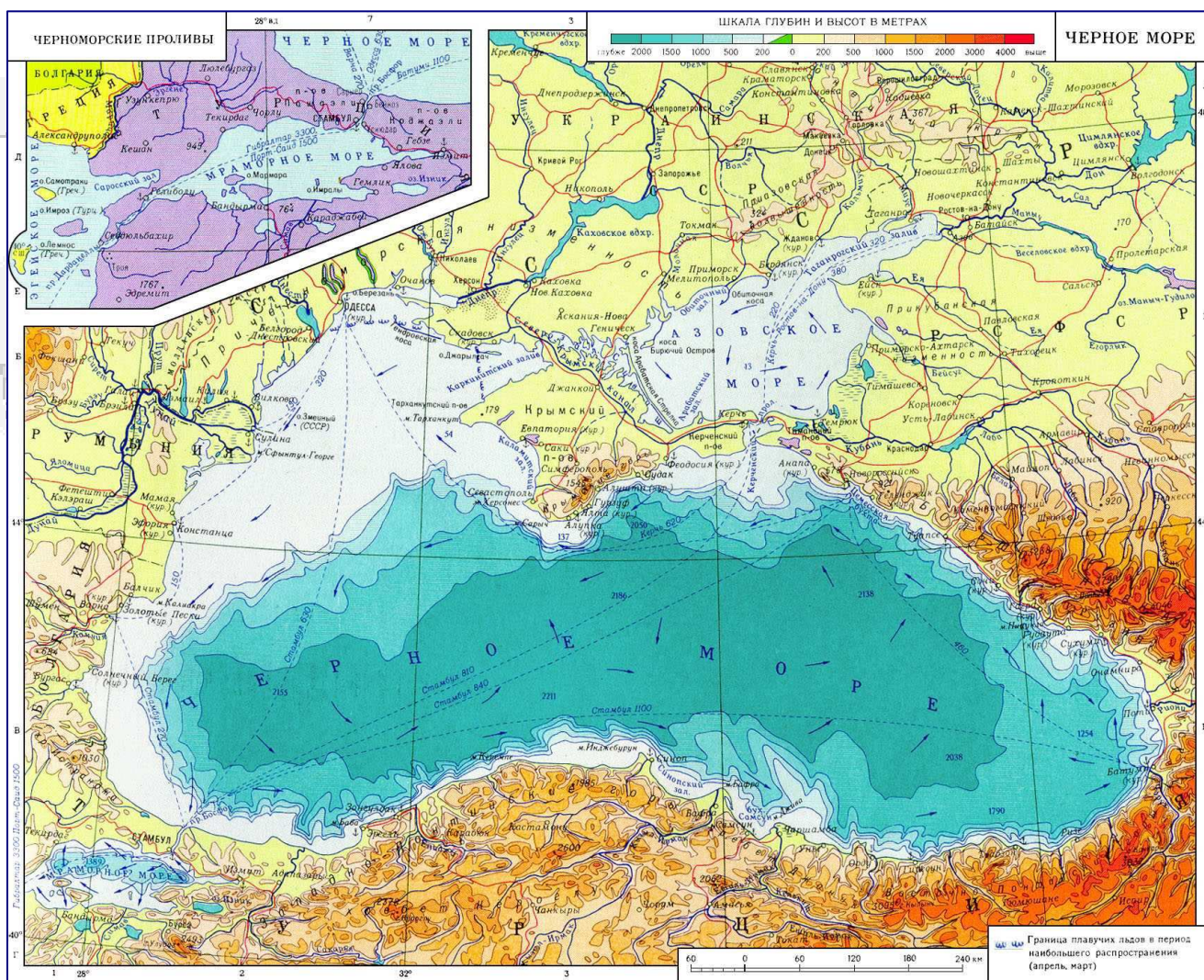
© 2011, ГЦ РАН, ИКИ РАН, ИО РАН С.А. Лебедев, А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, Н.А. Шеремет

Содержание

- ⇒ **Физико-географические особенности**
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Физико-географические особенности

Тектоническое происхождение («потомки» древнего пресноводного Сарматского моря) определило почти полную изоляцию от Мирового океана



Физико-географические особенности

⇒ Водосборные бассейны вследствие своего географического положения и размеров занимают один или несколько климатических поясов и могут в большей или меньшей степени откликаться на изменения регионального климата

⇒ Материковый сток — один из самых существенных факторов формирования их гидрологических условий и важнейшая составляющая водного баланса



⇒ Материковый сток имеет непосредственную связь с режимом увлажнения на водосборе впадающих в море рек, который зависит от характера атмосферной циркуляции в районе водосбора

Физико-географические особенности



Верхнебосфорское течение несёт в Мраморное море в среднем за год около 325 км^3 распреснённой (18‰) черноморской воды. С нижнебосфорским течением поступает около 175 км^3 солёной воды (38‰) из Мраморного моря в Чёрное

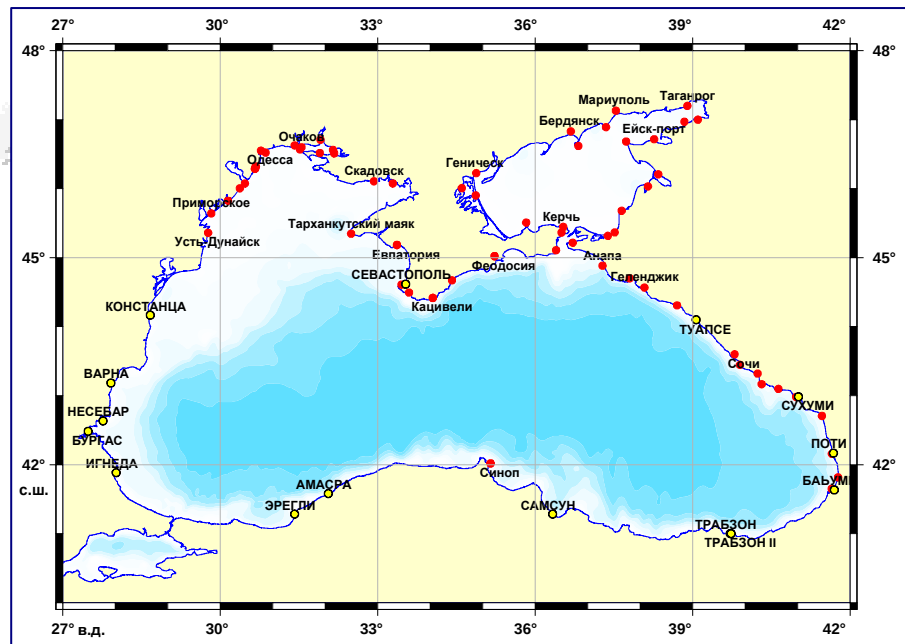
Годовой приток черноморских вод через Керченский пролив в среднем составляет $36...38 \text{ км}^3$, а сток азовоморских вод в Чёрное море — $53...55 \text{ км}^3$



Содержание

- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ **Данные и методика анализа изменчивости
уровня морей**
 - ⇒ **Измерения уровня на уровневых постах**
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость
уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Измерения уровня моря на постах



Сеть пунктов наблюдений за уровнем Черного и Азовского морей. Желтым цветом выделены посты, входящие в международные сети GLOSS и PSMSL

Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, Молдавии, Украины и России (европейская часть)



Содержание

- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ **Спутниковая альтиметрия**
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Геометрия метода спутниковой альтиметрии



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

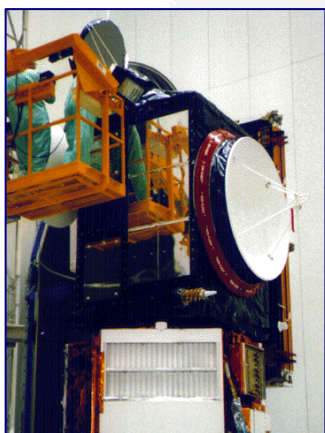
H_{ssh} — высота морской поверхности с учетом ряда поправок (ΔH_i), связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности:

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

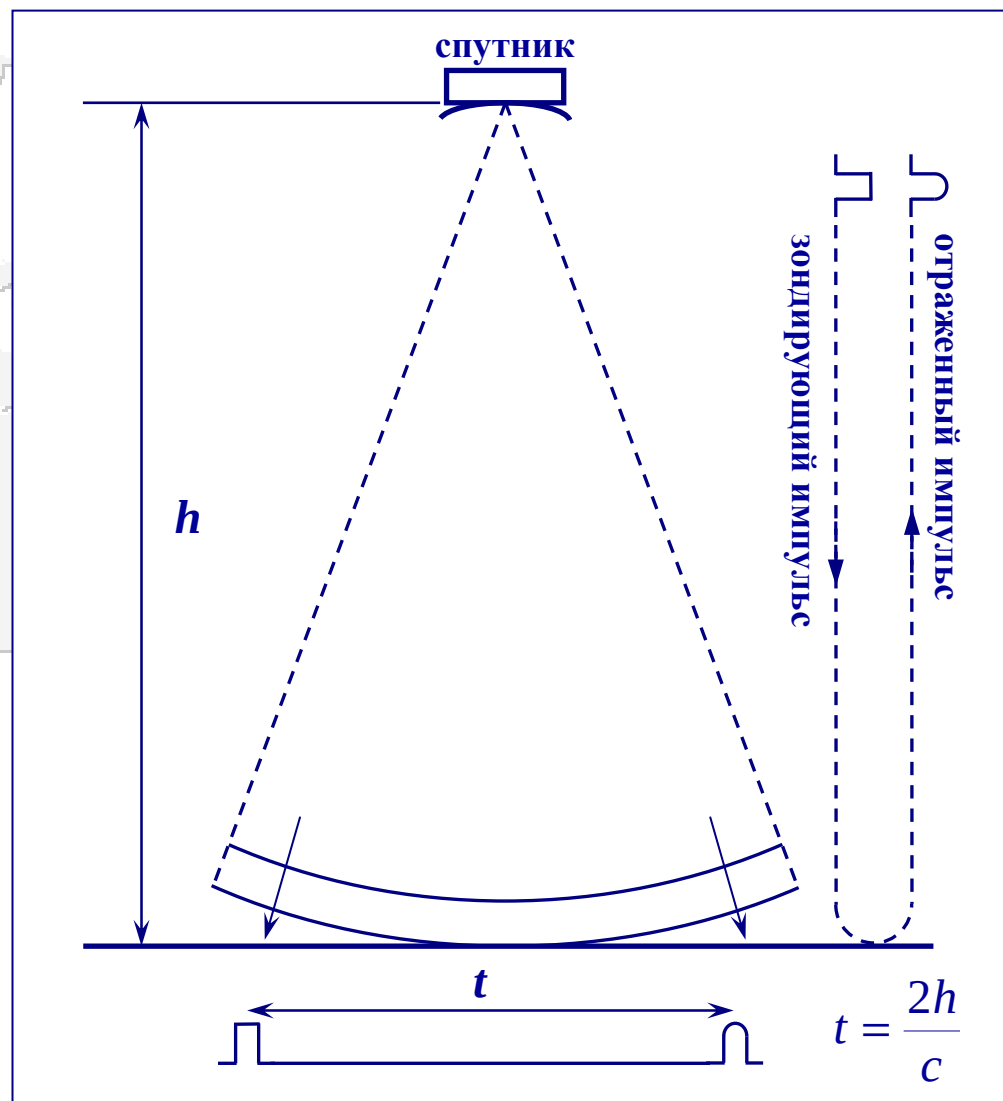
H_{dt} — динамическая топография как отклонения морской поверхности относительно геоида: $H_{dt} = H_{ssh} - H_g$

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.

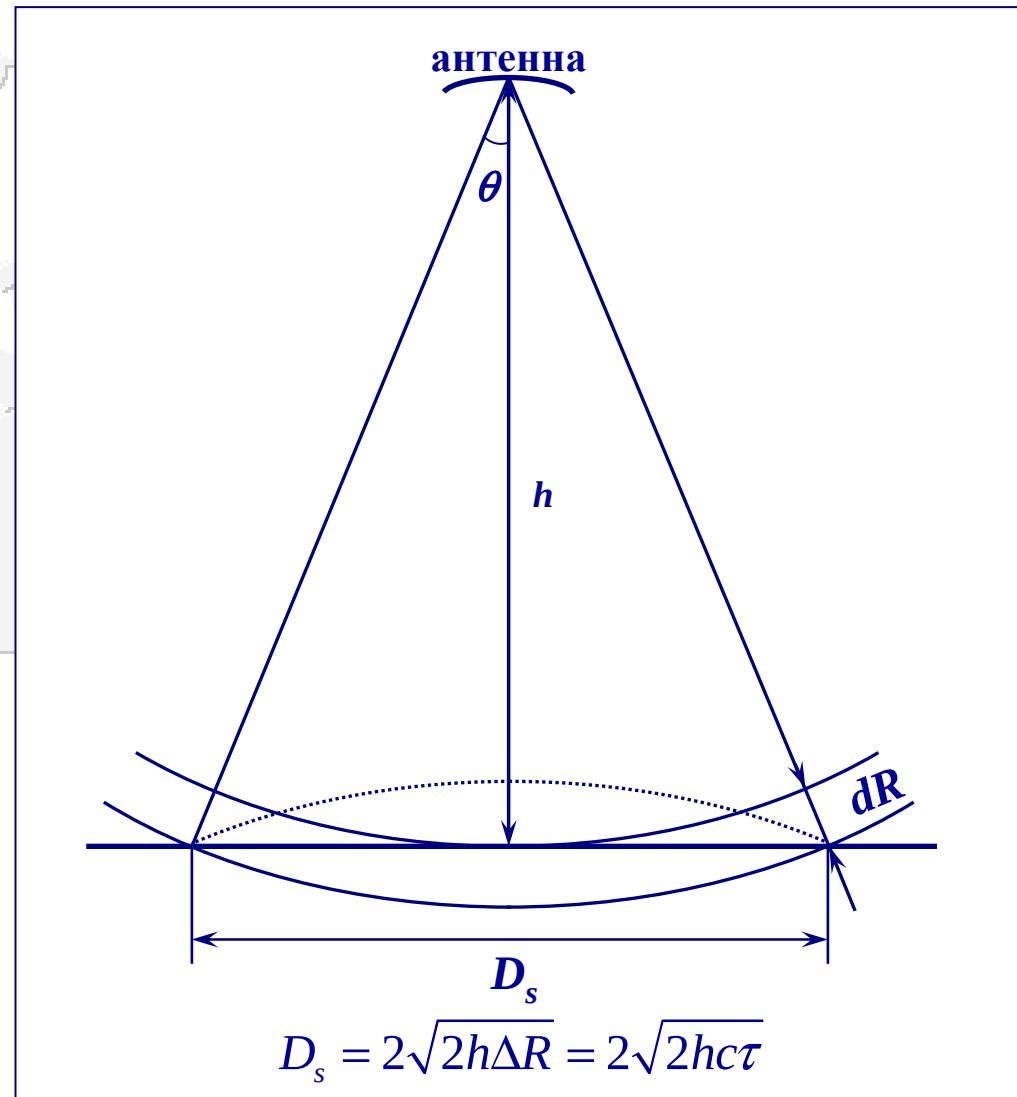


ТОРЕХ
альтиметр

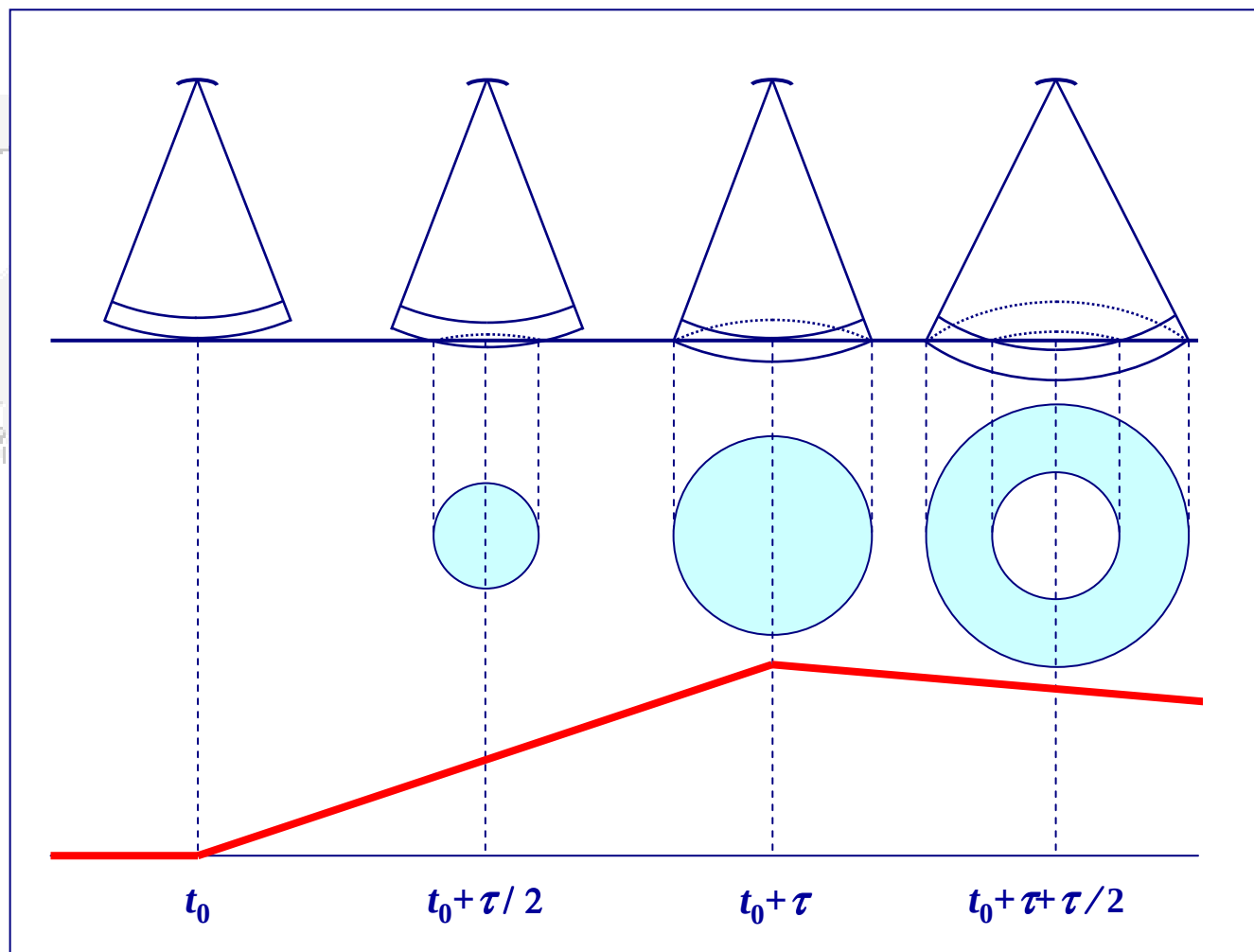


Основы метода спутниковой альтиметрии

Диаметр сегмента подстилающей поверхности, с которого происходит отражение радиоимпульса, зависит от частота его повторения. Для спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 для одиночного импульса при $\tau = 0.2$ нс он получается равным $D_s = 2.54$ км, а его площадь составляет 5.05 км^2 , что значительно меньше максимальной величины определяемой конструкцией альтиметра ($D_s = 48.1$ км).



Основы метода спутниковой альтиметрии

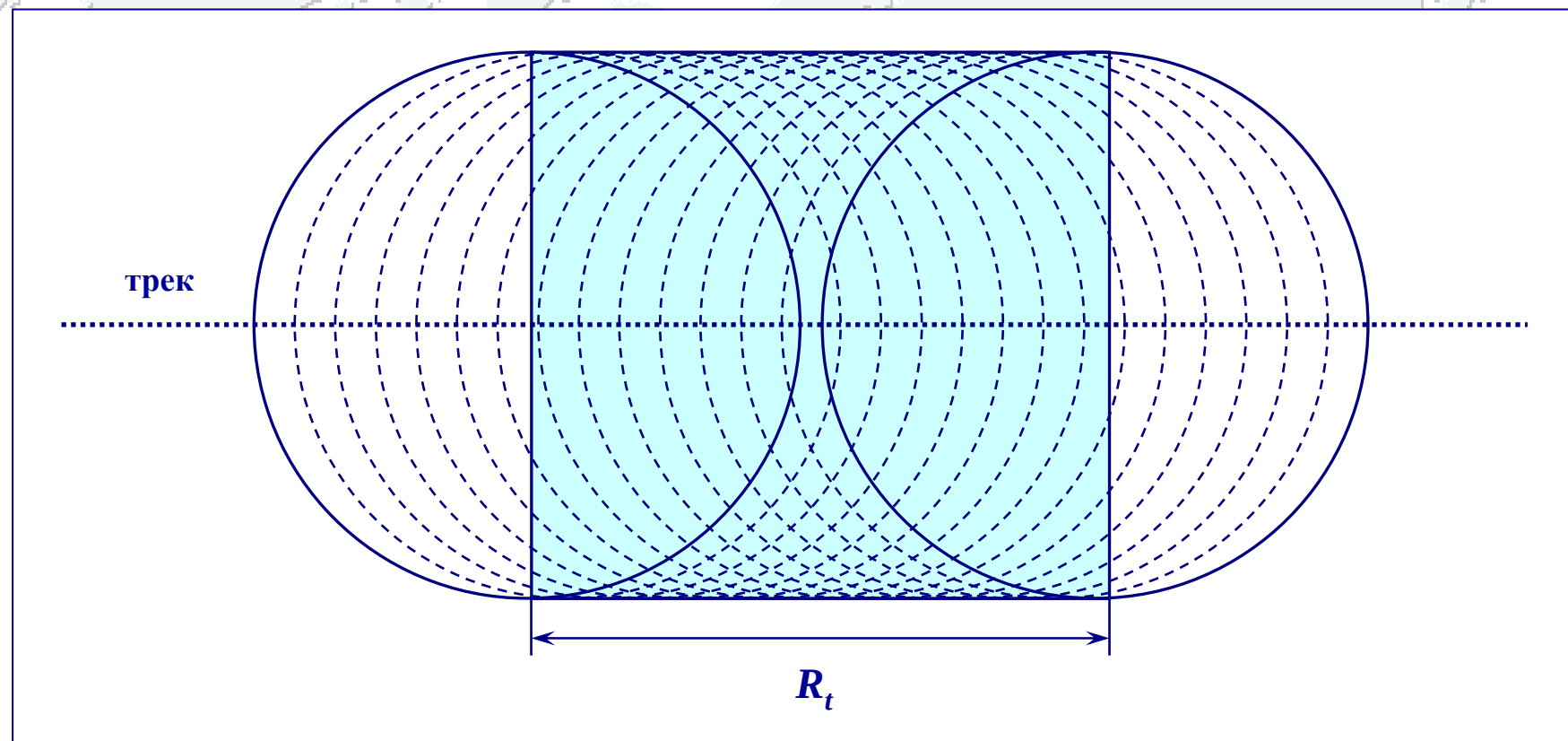


После касания зондирующим импульсом подстилающей поверхности происходит расширение сегмента, с которого происходит отражение, с последующим вырождением его до кольца, середину которого занимает отраженный сигнал от следующего импульса.

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

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 км².



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

Основные программы спутниковых альтиметрических измерений

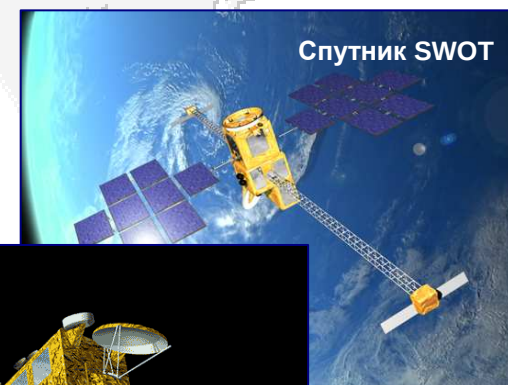
Программа		Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
				Высота,		Наклонение, градусы	Период повторяемости ² , сутки
				перигей	апогей		
Skylab-4 (орбитальная станция)		05/1973 – 02/1974	20847	422	437	130	–
GEOS-3		04/1975 – 12/1978	341	817	858	115	–
SEASAT		07/1978 – 09/1978	2300	761	765	108	17
		09/1978 – 10/1978					3
GEOSAT	геодезическая программа	03/1985 – 11/1986	635	775	779	108,1	~23
	изомаршрутная программа	11/1986 – 12/1989					17
ГЕОИК 1 ¹ (Космос–1660)		07/1985 – 10/1986	1500	1482	1525	73,6	–
ГЕОИК 2 ¹ (Космос–1732)		03/1986 – 03/1986	1500	1480	1525	73,6	–
ГЕОИК 3 ¹ (Космос–1803)		12/1986 – 12/1987	1500	1497	1504	82,6	–
ГЕОИК 4 ¹ (Космос–1823)		03/1987 – 10/1987	1500	1479	1524	73,6	–
ГЕОИК 5 ¹ (Космос–1950)		06/1988 – 07/1990	1500	1484	1522	73,6	–
ГЕОИК 6 ¹ (Космос–2037)		09/1989 – 09/1990	1500	1485	1524	73,6	–
ГЕОИК 7 ¹ (Космос–2088)		08/1990 – 03/1993	1500	1484	1524	73,6	–
ERS-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
TOPEX/Poseidon		08/1992 – настоящее время	2402	1331	1344	66,04	10
ГЕОИК 8 ¹ (Космос–2226)		01/1993 – 07/1993	1500	1479	1525	73,6	–
ГЕОИК 9 ¹ (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		08.10.2005 – потерян при выводе на орбиту	650	720		92	~369
OSTM/Jason-2		06/2008 – настоящее время	510	1324	1335	66,04	10
CryoSat-2		04/2010 – настоящее время	720	717		92,0	~369

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

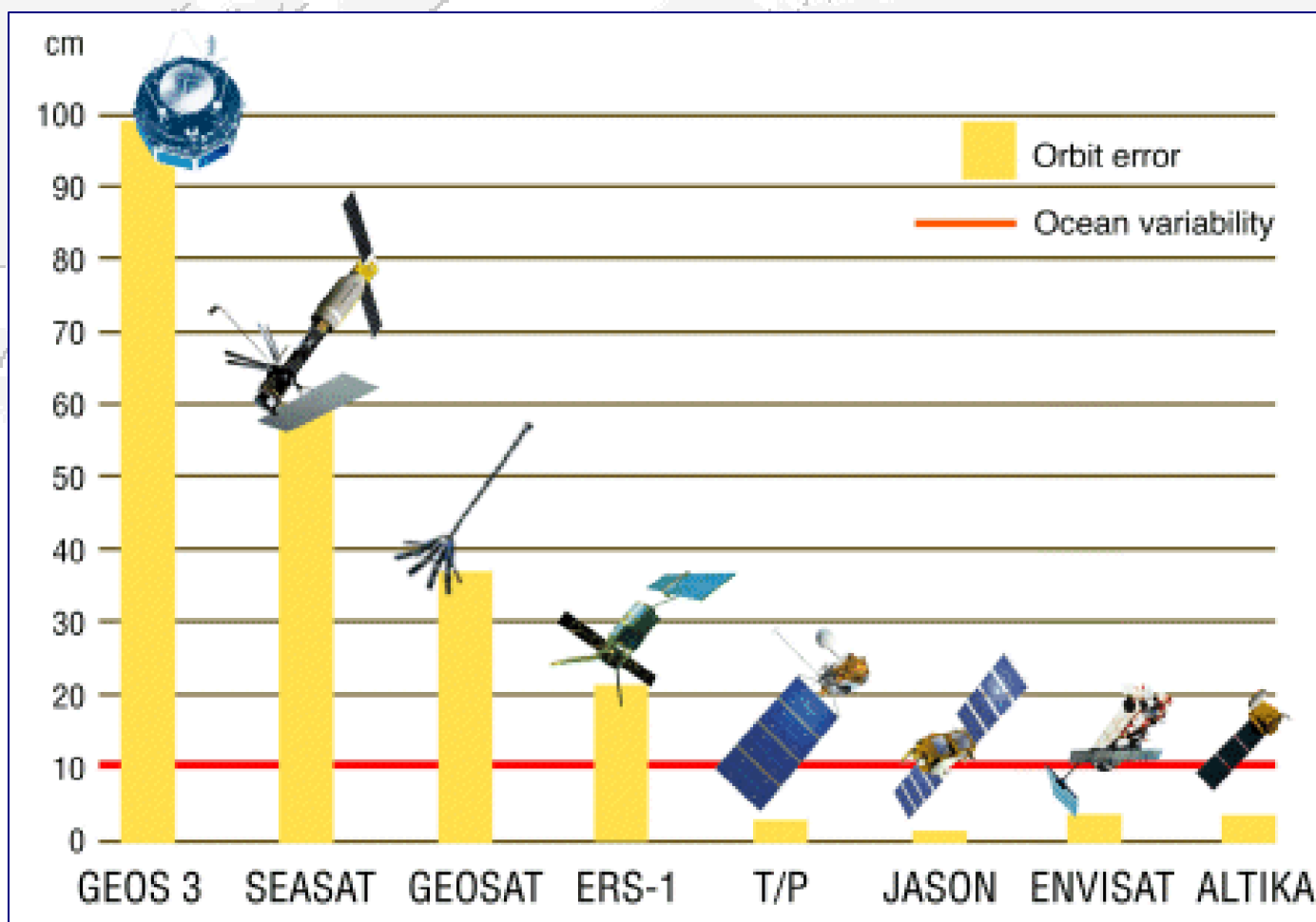
² – для изомаршрутных программ

Будущие программы спутниковых альтиметрических измерений

Программа	Время активной работы, месяц/год	Масса, кг	Параметры орбиты			
			Высота,		Наклонение, градусы	Период повторяемости ² , сутки
			перигей	апогей		
САДКО (Poseidon-2)	12/2010 – не выведен на расчетную орбиту	1500	1347		73.6	17
HY-2	планируется на 06/2010	513	963.6	965	99.3	14 ~168
SARAL/Altika	планируется на 06/2011	600	800		98.705	35
Sentinel-3 -- Ocean	планируется на 11/2012	2300	693		98.6	35
Jason-3	планируется на 2013–2014	500	1336		66.0	10
SWOT (Surface Water and Ocean	планируется на 2013–2016	500	1336		66.0	10



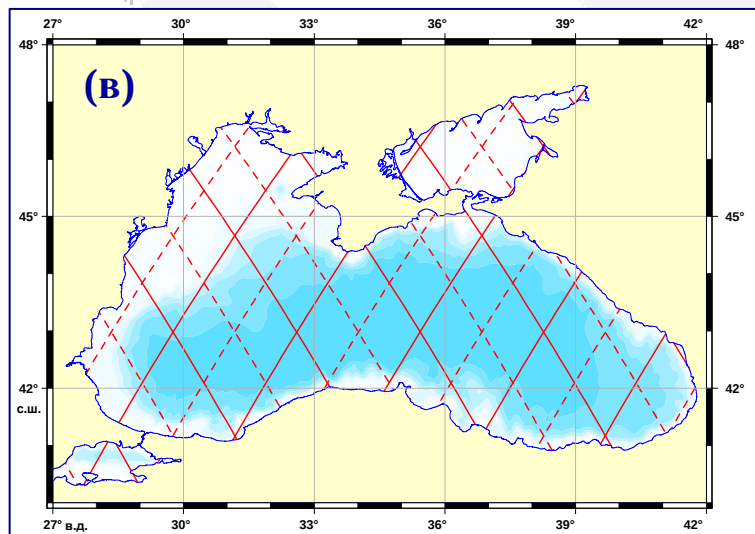
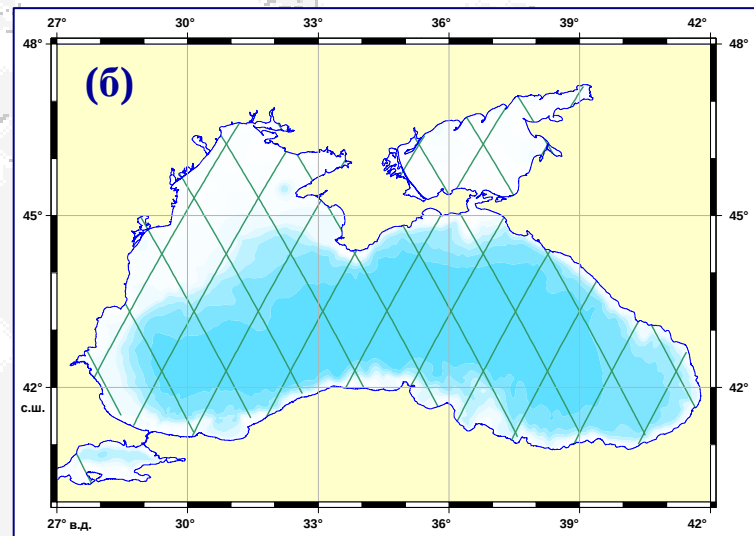
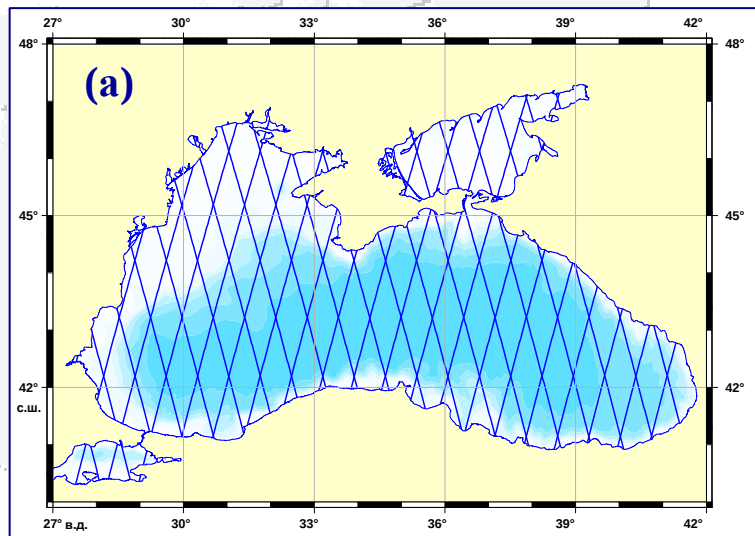
Точность расчета высоты орбиты основные программы альтиметрических измерений



Содержание

- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ **Выбор данных спутниковой альтиметрии**
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Расположение треков различных программ спутниковой альтиметрии



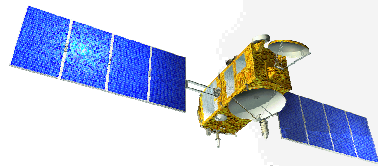
Расположение на акватории Черного и Азовского морей треков спутников (а) - ERS-1/2 и ENVISAT с периодом повторения 35 суток, (б) - GEOSAT и GFO-1 с периодом повторения 17 суток, (в) - TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 с периодом повторения 10 суток (штриховой линией показано положение треков спутников после маневра).

Выбор данных спутниковой альтиметрии

Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря лучше выбрать данные спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2. Этот выбор обусловлен следующими причинами:



Спутник
TOPEX/Poseidon



Спутники
Jason-1/2

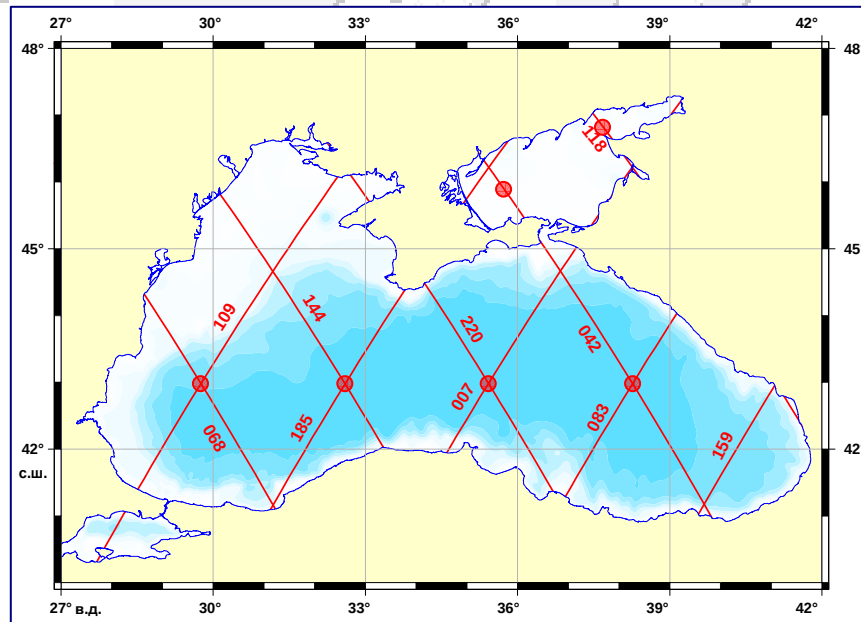
- Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этих программ составляет 1.7 см, а расчет самой высоты моря относительно отсчетного эллипсоида – 4.2 см.
- Временной масштаб повторения измерений вдоль трека 9.916 суток наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня моря.
- Расположение треков внутри изомаршрутного цикла по акватории моря наиболее оптимально, что позволяет анализировать изменчивость уровня вдоль треков с пространственным разрешением 5-6 км.
- Данные TOPEX/Poseidon представляют собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.) с возможностью его продления данными спутника Jason-1 (с января 2002 г. по февраль 2009 г.) и Jason-2 (с августа 2008 г. по настоящее время)

Содержание

- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Методика обработки данных

Обработка данных спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 проводилась с использованием программного обеспечения интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) по следующей схеме:



- ➔ Для Черного моря выбирались 2 точки пересечения в западной части (068-109 и 144-185) и 2 точки в восточной части (220-007 и 082-083)

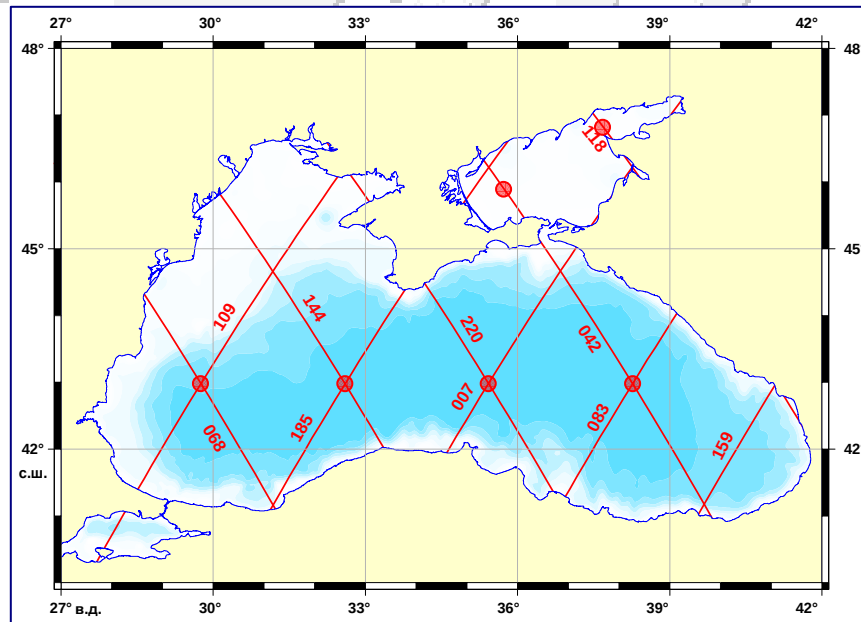
- ➔ Учитывались все поправки на влияние тропосферы и ионосферы.
- ➔ Поправка на морские приливы, нагрузка на дно и поправка обратного барометра не учитывались.
- ➔ Временной анализ проводился по анализу изменчивости высоты морской поверхности в точках пересечения восходящих и нисходящих треков.
- ➔ На акватории Азовского моря единственная точка пересечения 042-185 расположена близко к береговой линии. Поэтому для анализа временной изменчивости уровня моря выбирались точки, расположенные на 042 и 118 треках и равноудаленные от береговой линии.

Содержание

- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей**
- ⇒ Оценка изменчивости водообмена через проливы
- ⇒ Заключение

Методика обработки данных

Обработка данных спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 проводилась с использованием программного обеспечения интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) по следующей схеме:



- ➞ Для Черного моря выбирались 2 точки пересечения в западной части (068-109 и 144-185) и 2 точки в восточной части (220-007 и 082-083)

- ➞ Учитывались все поправки на влияние тропосферы и ионосферы.
- ➞ Поправка на морские приливы, нагрузка на дно и поправка обратного барометра не учитывались.
- ➞ Временной анализ проводился по анализу изменчивости высоты морской поверхности в точках пересечения восходящих и нисходящих треков.
- ➞ На акватории Азовского моря единственная точка пересечения 042-185 расположена близко к береговой линии. Поэтому для анализа временной изменчивости уровня моря выбирались точки, расположенные на 042 и 118 треках и равноудаленные от береговой линии.

Временная изменчивость уровня Азовского моря

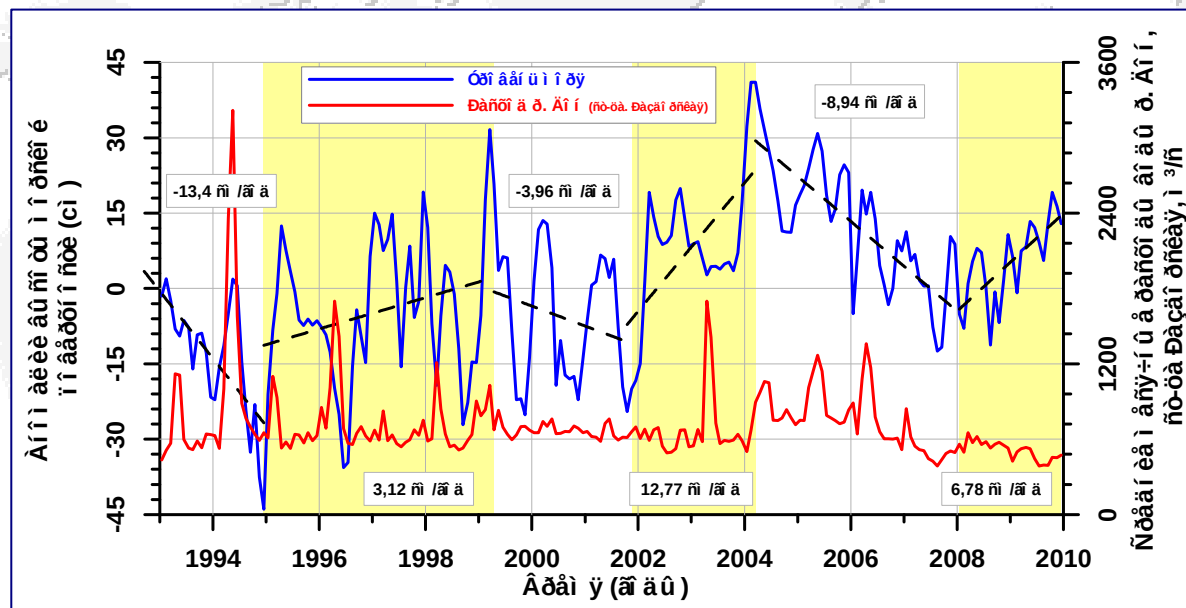
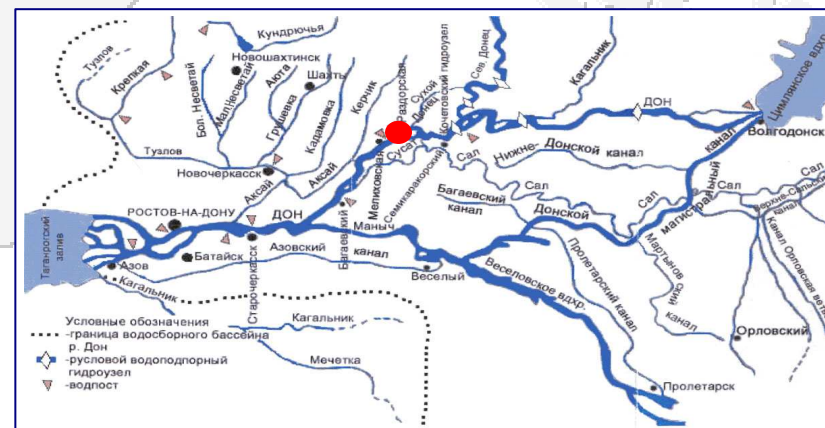


Схема гидрографической сети Нижнего Дона



Изменчивость среднемесячных аномалий уровня Азовского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды роста выделены цветом

Временная изменчивость уровня Азовского моря

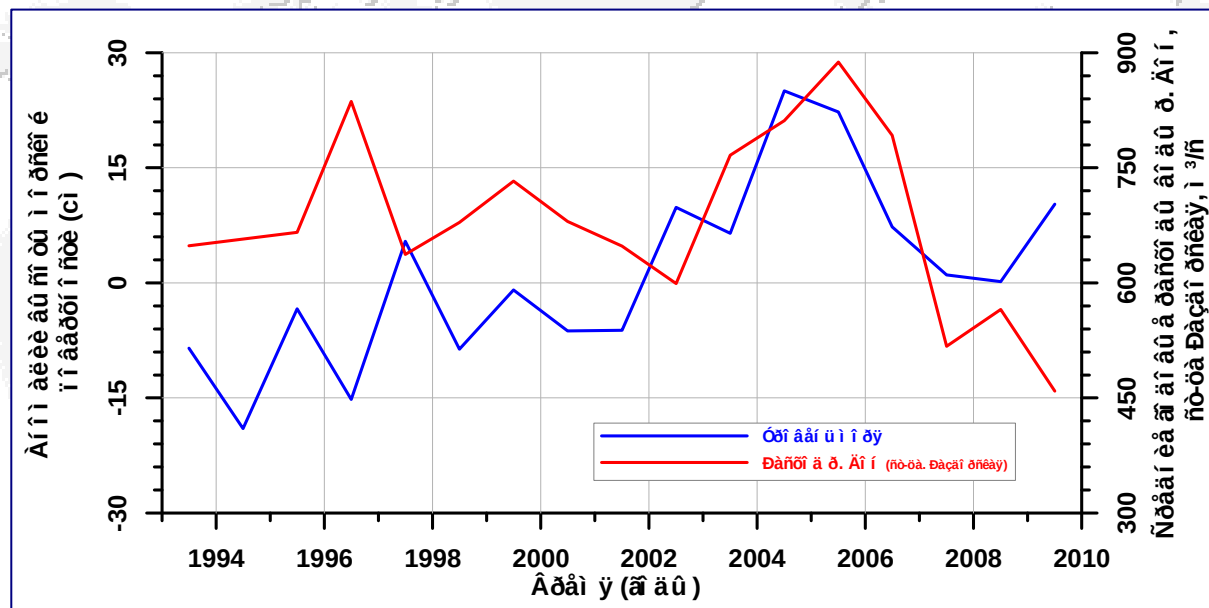
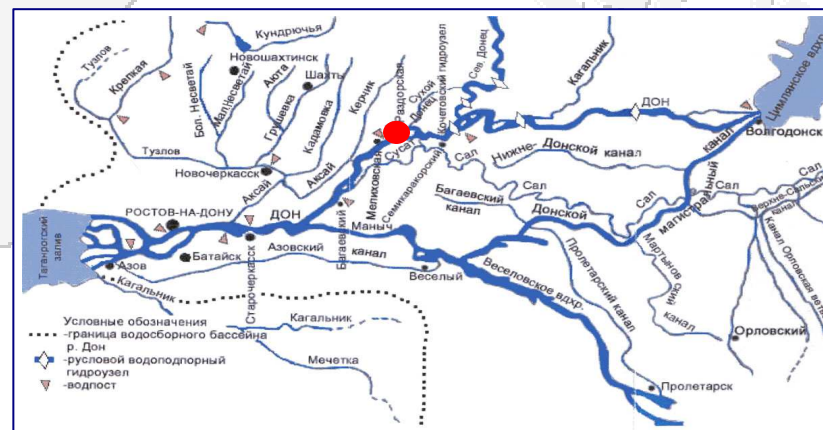


Схема гидрографической сети Нижнего Дона

Изменчивость среднегодовых аномалий уровня Азовского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2



Временная изменчивость уровня Черного моря

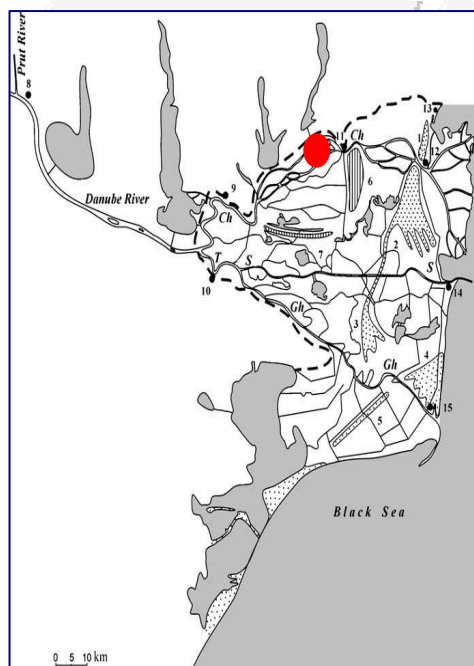
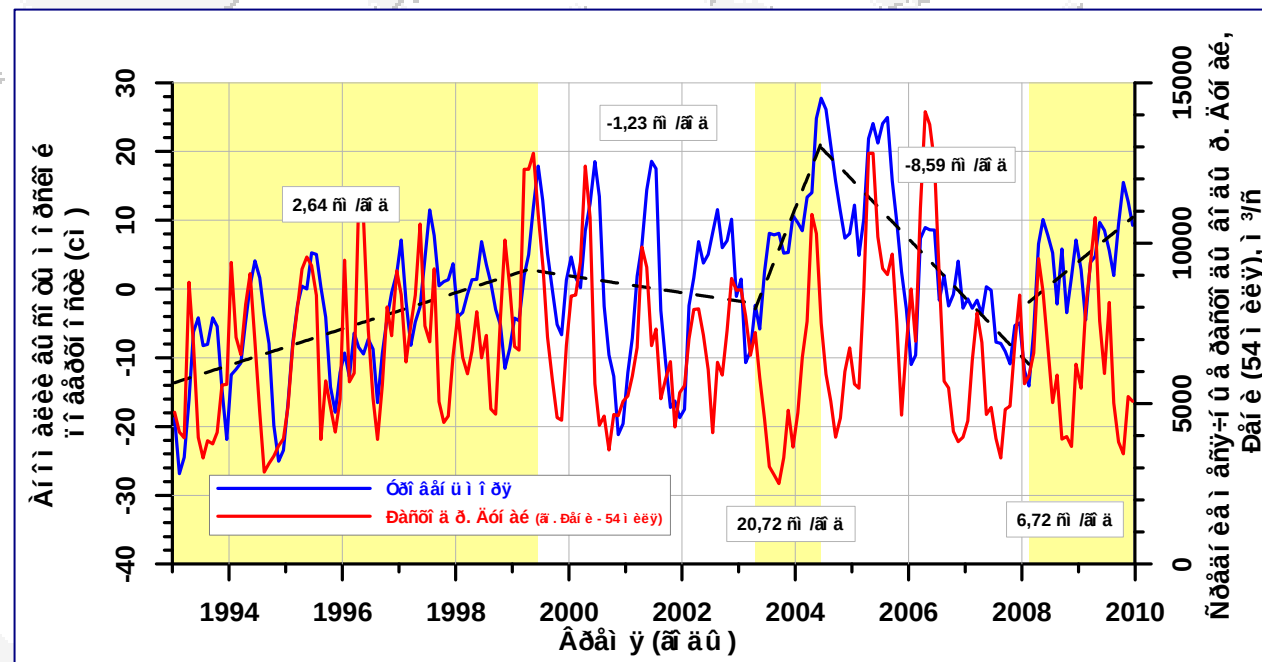


Схема
гидрографической
сети дельты р. Дунай



Изменчивость среднемесечных аномалий уровня Азовского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды роста выделены цветом

Временная изменчивость уровня Черного моря

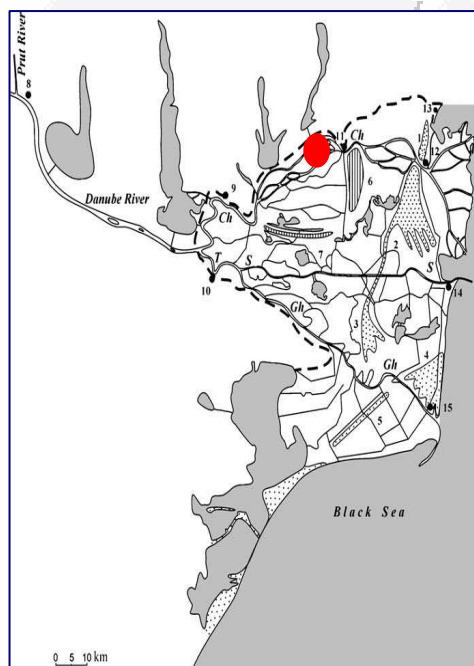
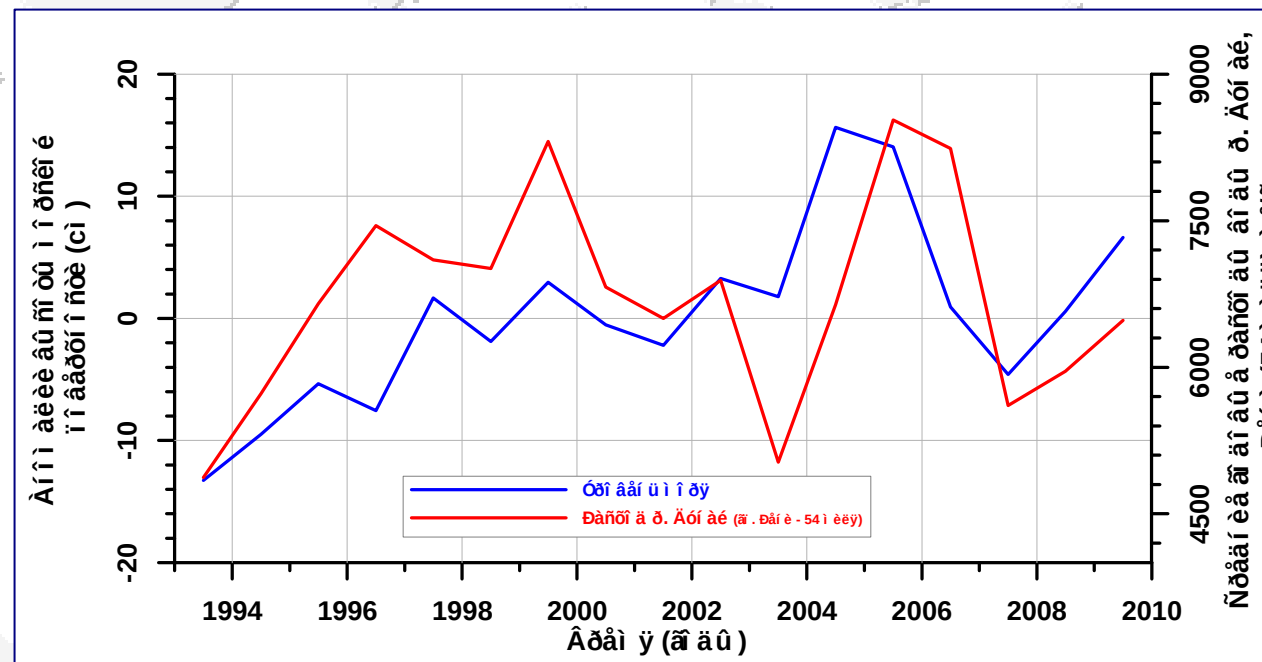
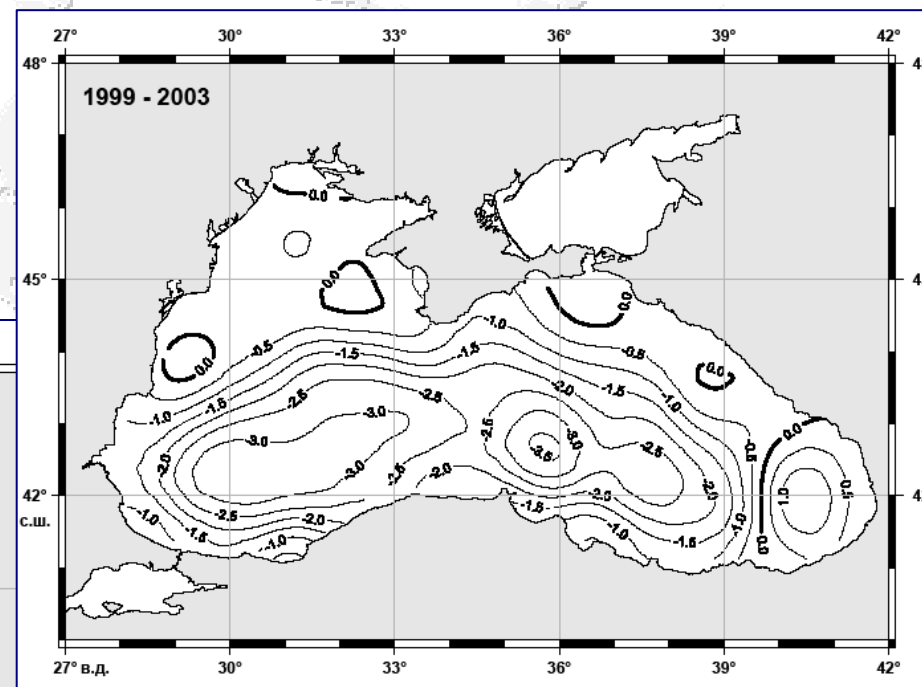
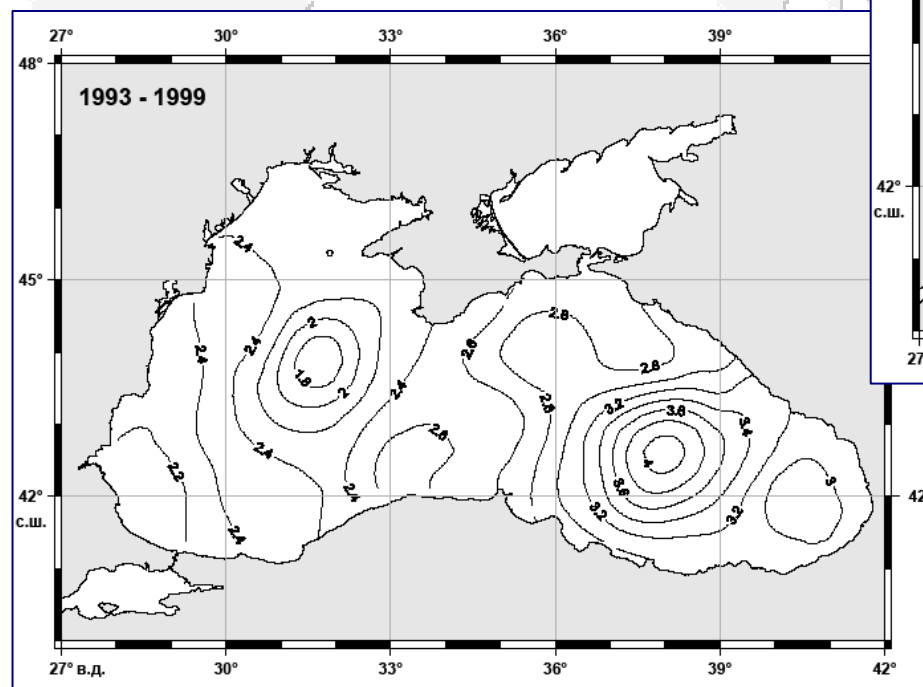


Схема
гидрографической
сети дельты р. Дунай



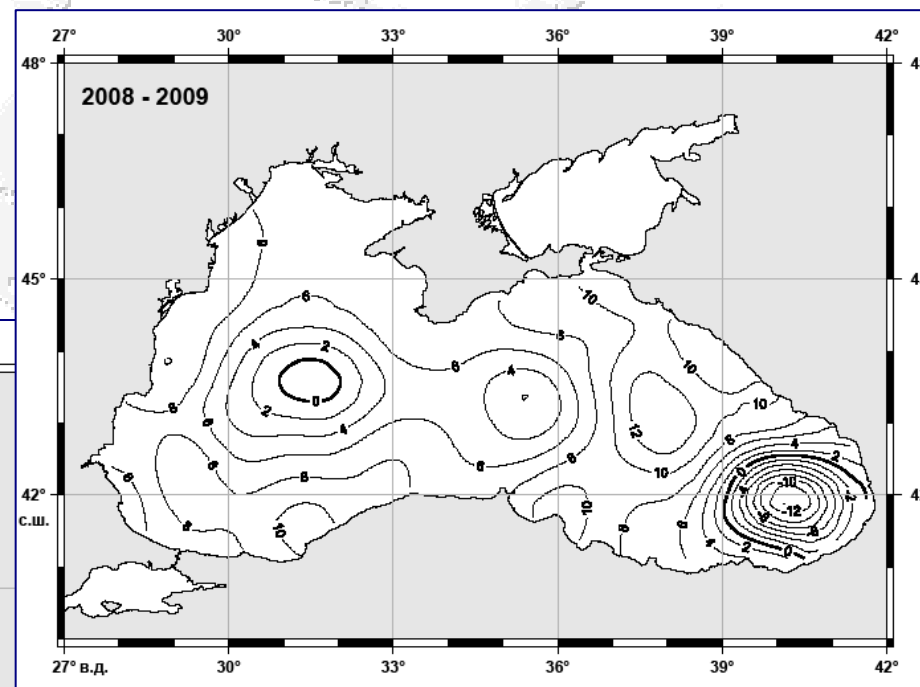
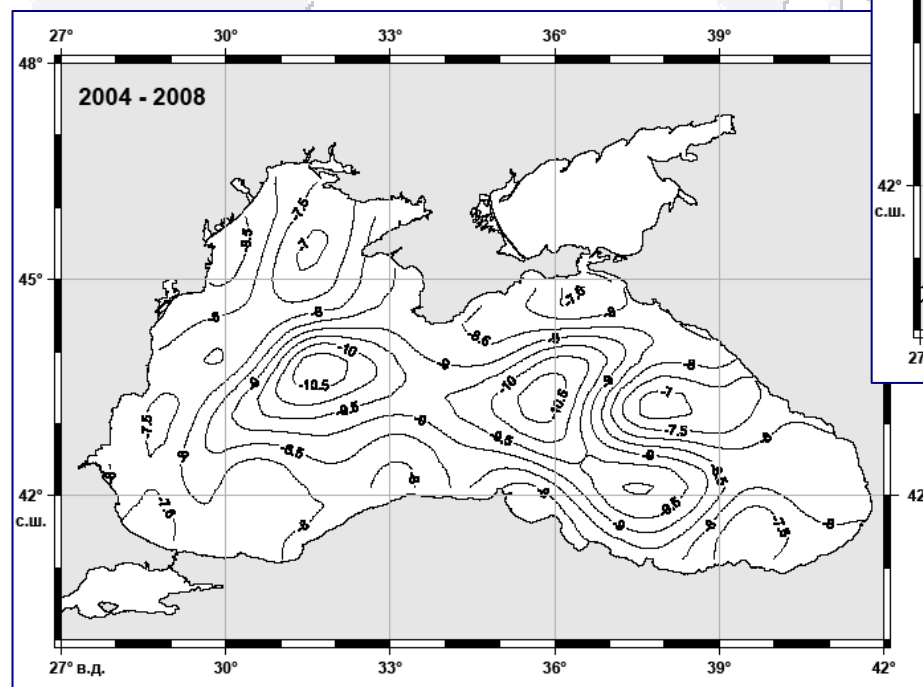
Изменчивость среднегодовых аномалий уровня Азовского моря с января 1993 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J 1/2

Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения уровня



**Пространственная изменчивость
межгодовой скорости изменения
аномалий уровня Черного моря (см/год)
по данным альтиметрических
измерений спутников Т/Р и J 1/2 для
разных временных интервалов:
1993–1999 гг. - рост уровня,
1999–2003 гг. – понижение уровня.**

Пространственная изменчивость межгодовой скорости изменения уровня

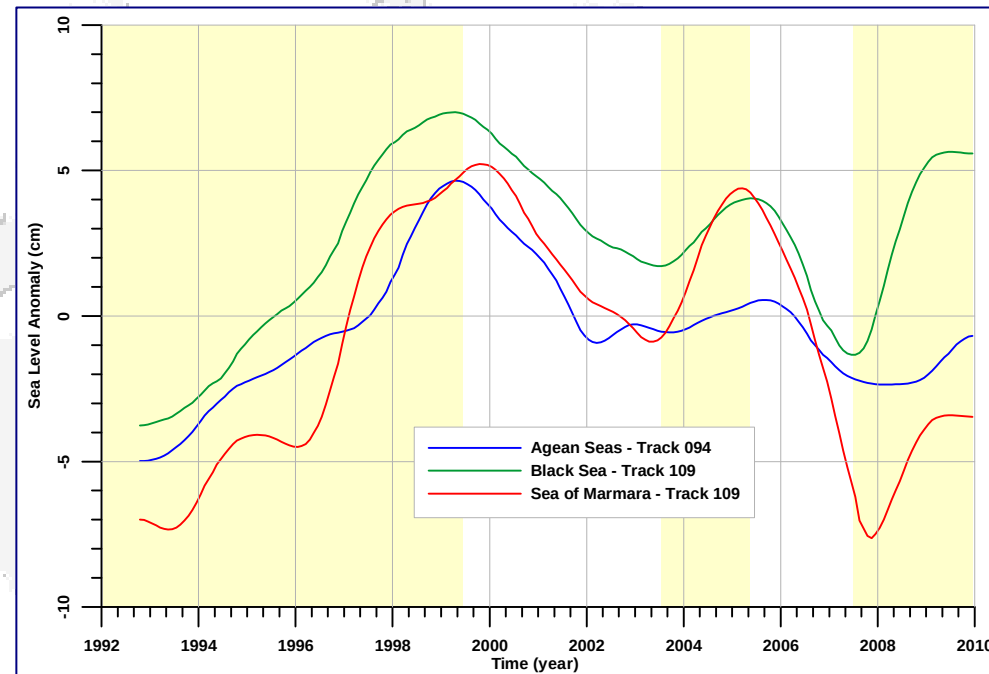
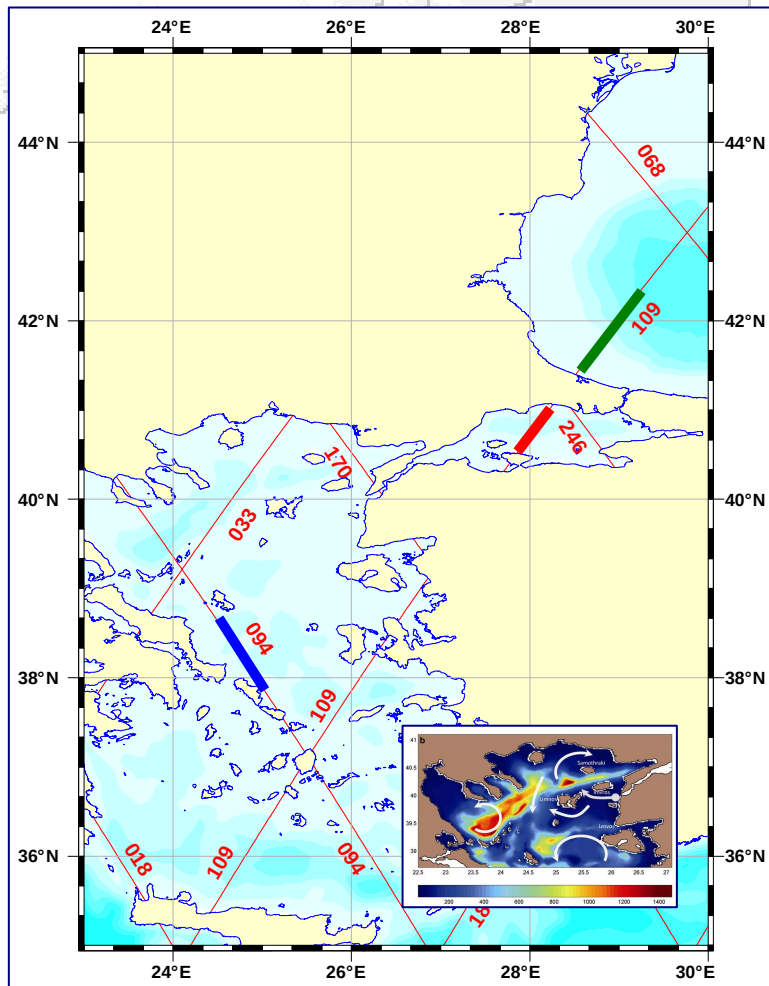


**Пространственная изменчивость
межгодовой скорости изменения
аномалий уровня Черного моря (см/год)
по данным альтиметрических
измерений спутников Т/Р и J 1/2 для
разных временных интервалов:
2004–2008 гг. – понижение уровня,
2008–2010 гг. - рост уровня.**

Содержание

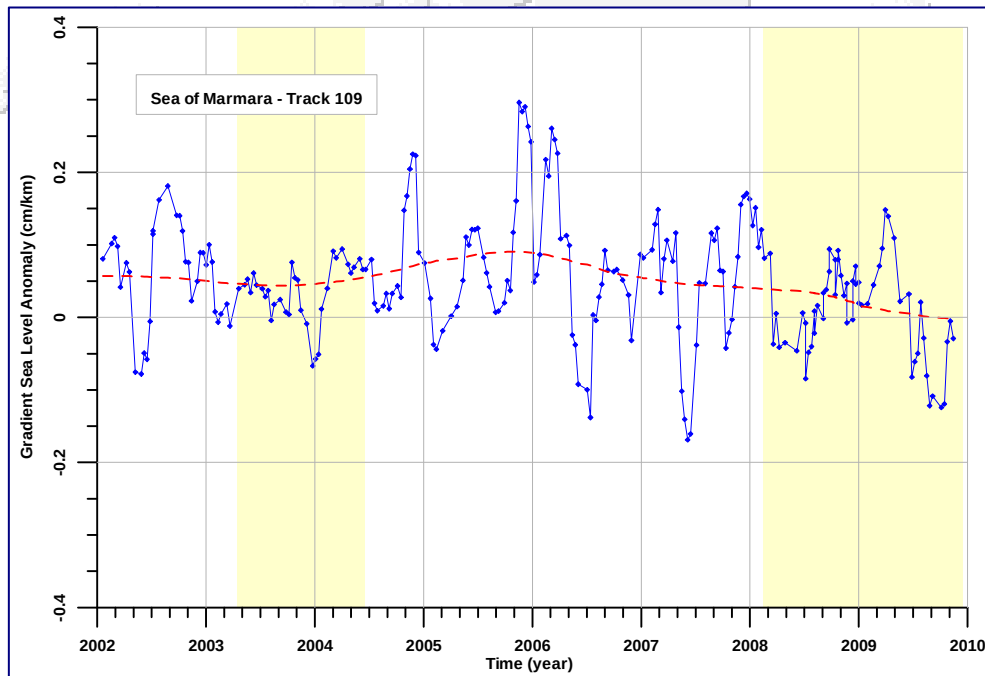
- ⇒ Физико-географические особенности
- ⇒ Данные и методика анализа изменчивости уровня морей
 - ⇒ Измерения уровня на уровневых постах
 - ⇒ Спутниковая альтиметрия
 - ⇒ Выбор данных спутниковой альтиметрии
 - ⇒ Методика обработки данных
- ⇒ Пространственно-временная изменчивость уровня Черного и Азовского морей
- ⇒ **Оценка изменчивости водообмена через проливы**
- ⇒ Заключение

Оценка водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы

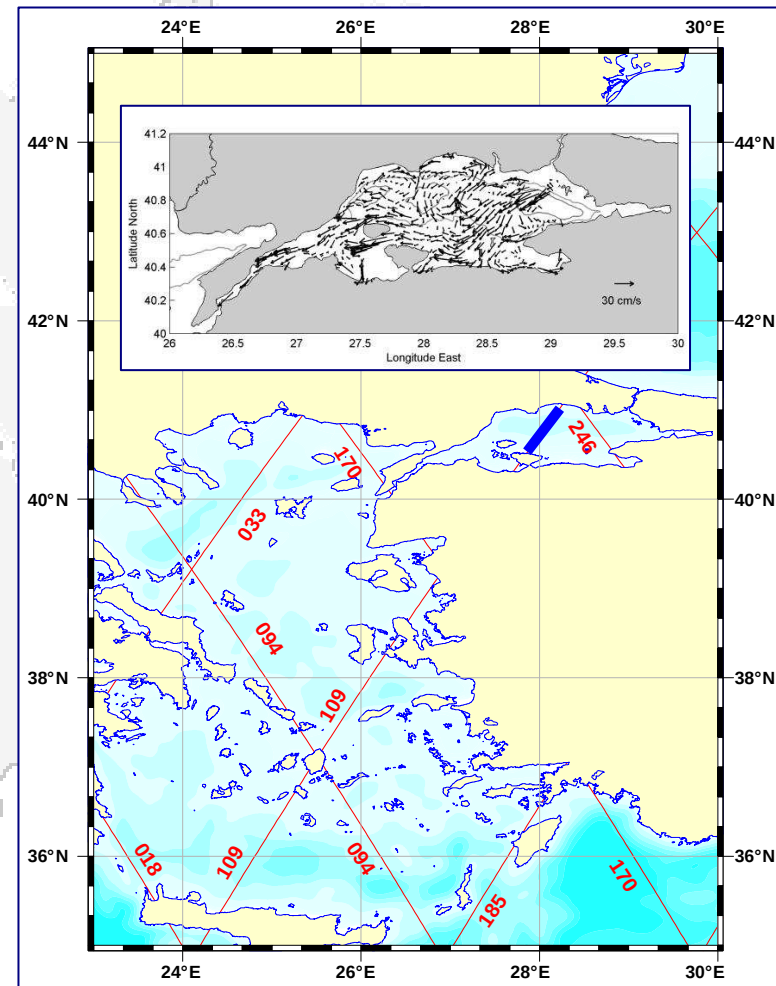


Межгодовая изменчивость аномалий уровня моря (см) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 вдоль восходящего 109 трека, расположенного в юго-западной части Черного моря в Мраморном море, и вдоль нисходящего 094 трека расположенного в западной части Эгейского морей

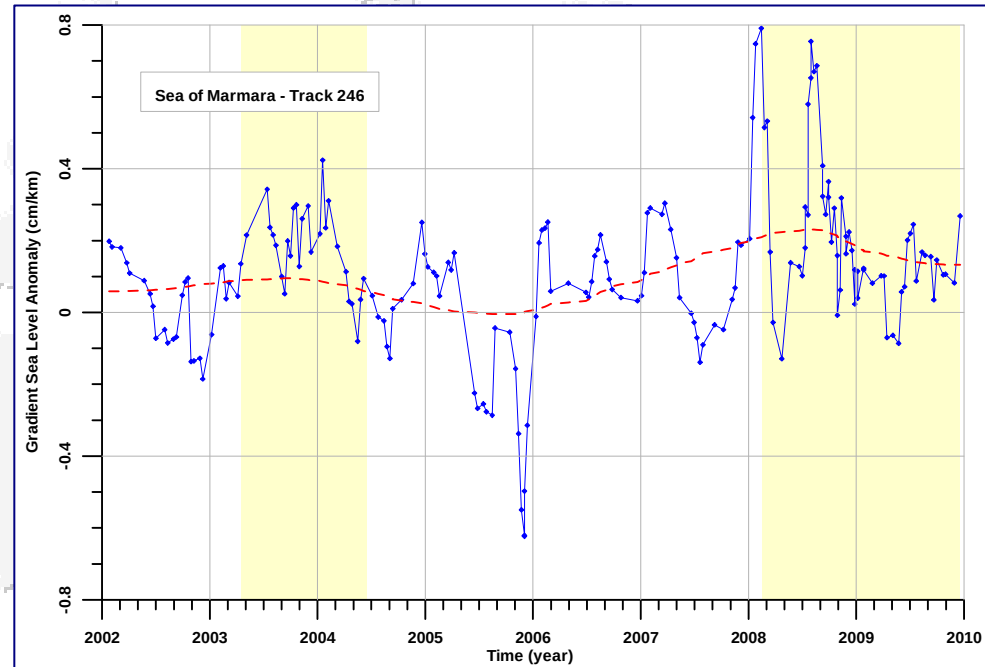
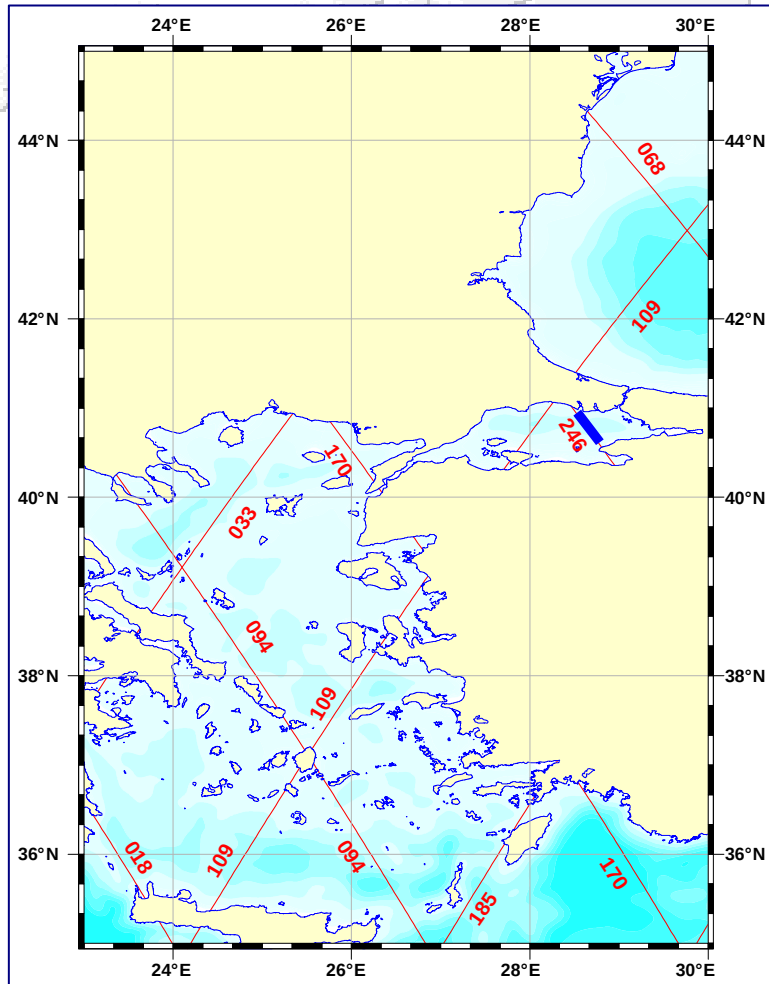
Оценка водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы



Межгодовая изменчивость среднего градиента аномалий уровня (см/км) по данным альтиметрических измерений спутников J1/2 вдоль восходящего 109 трека, расположенного в акватории Мраморного моря



Оценка водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы



Межгодовая изменчивость среднего градиента аномалий уровня (см/км) по данным альтиметрических измерений спутников J1/2 вдоль нисходящего 246 трека, расположенного в акватории Мраморного моря

**Спасибо за
внимание**



**III Международный выездной семинар-школа «спутниковые методы и системы исследования Земли»
Таруса, 28 февраля – 5 марта 2012 г.**

© 2011, ГЦ РАН, ИКИ РАН, ИО РАН С.А. Лебедев, А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, Н.А. Шеремет