Сергей А. Лебедев

Геофизический Центр РАН,
Институт космических исследований РАН

СПУТНИКОВАЯ АЛЬТИМЕТРИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Выездной семинар-школа. «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 15-20 февраля 2011 г.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

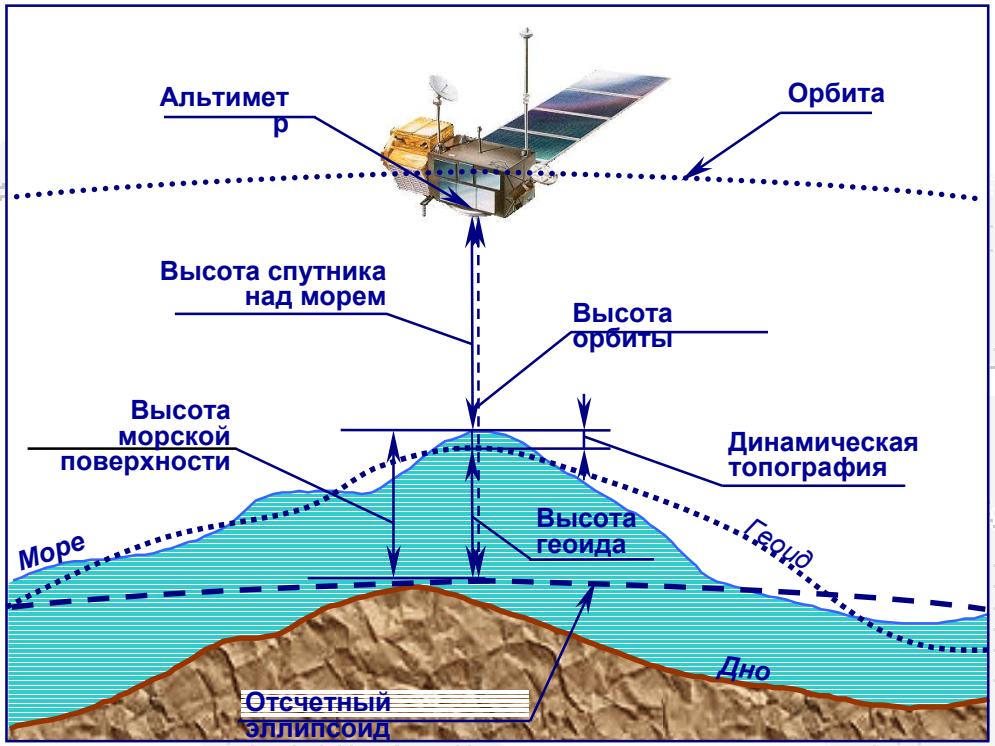
Основные программы спутниковых альтиметрических измерений

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 A, B	07/1991 – 03/1992	2384	774	775	98,5	3
	Фаза C	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 – 01/2006	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 – 09/2008	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
ICESsat		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

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Геометрия метода спутниковой альтиметрии



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

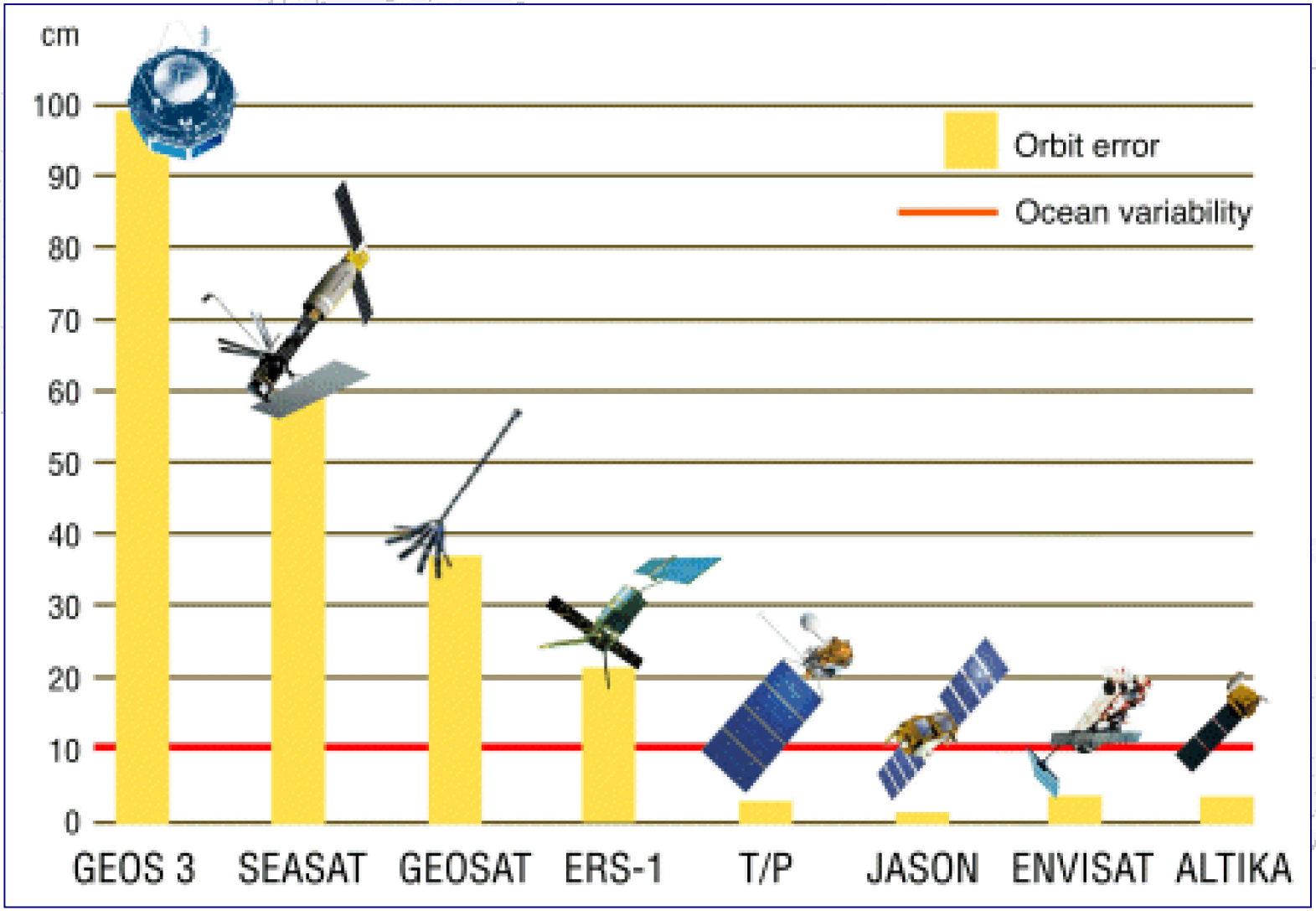
H_{dt} – динамическая топография как отклонения морской поверхности относительно геоида: $H_{dt}=H_{ssh} - H_g$

Помимо этого спутниковая альтиметрия позволяет анализировать:

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

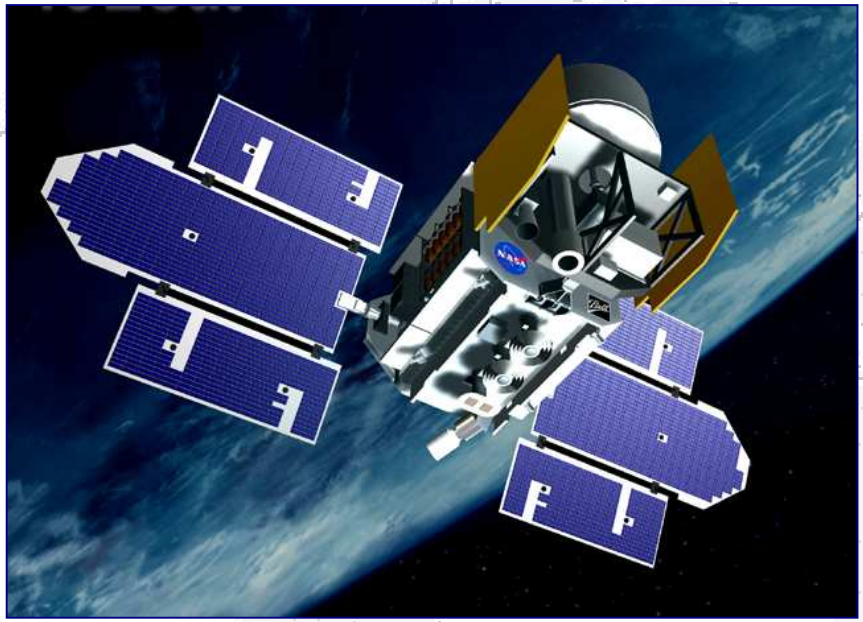
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

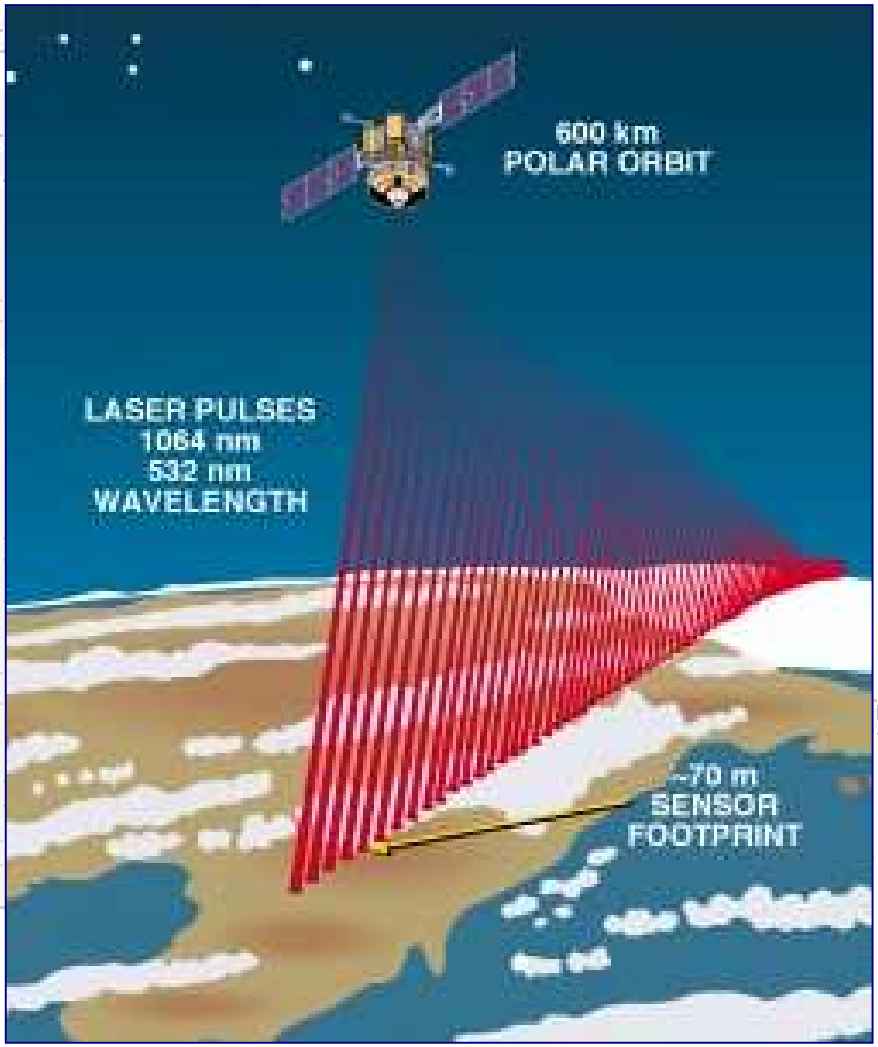
Точность расчета высоты орбиты основные программы альтиметрических измерений



© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Альтиметрическая программа спутника ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite)

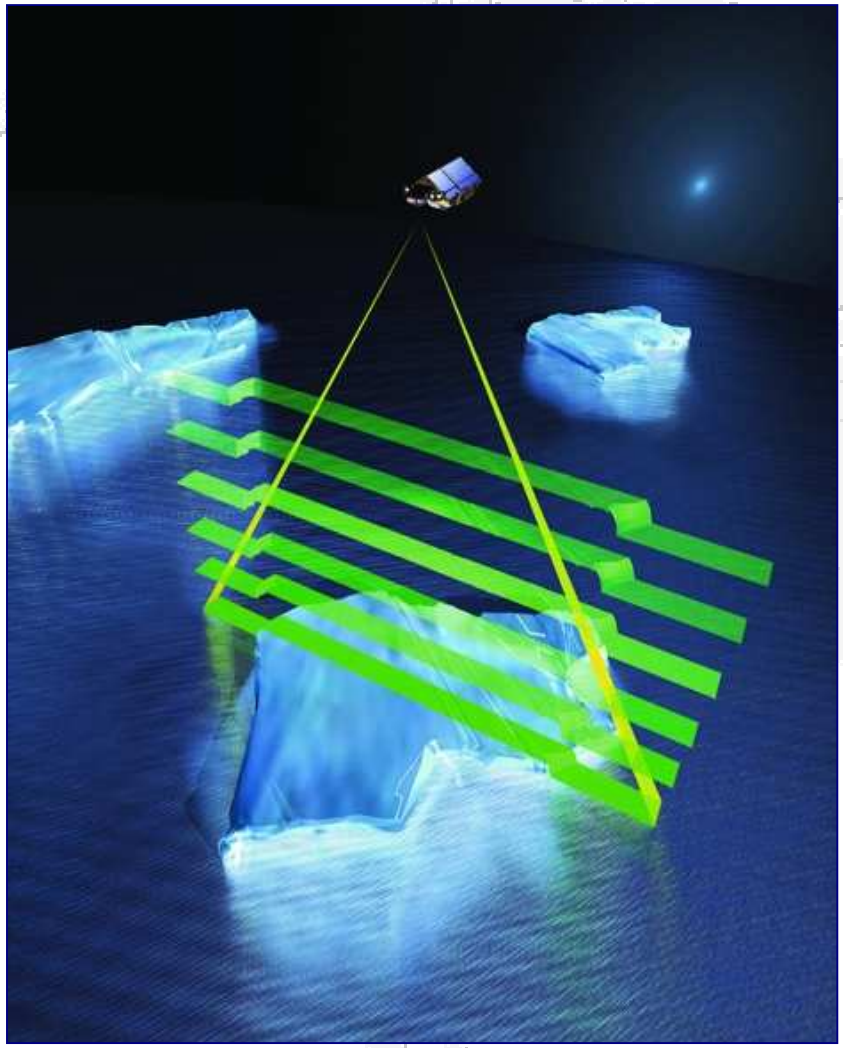




Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Альтиметрическая программа спутника CryoSat

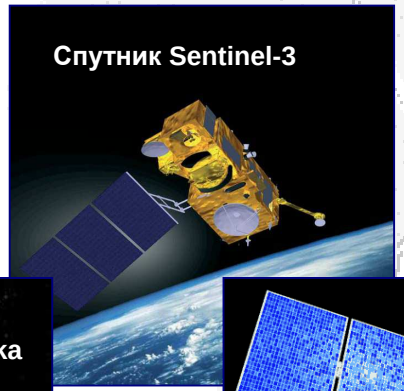


SAR Interferometer Radar Altimeter (SIRAL)

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

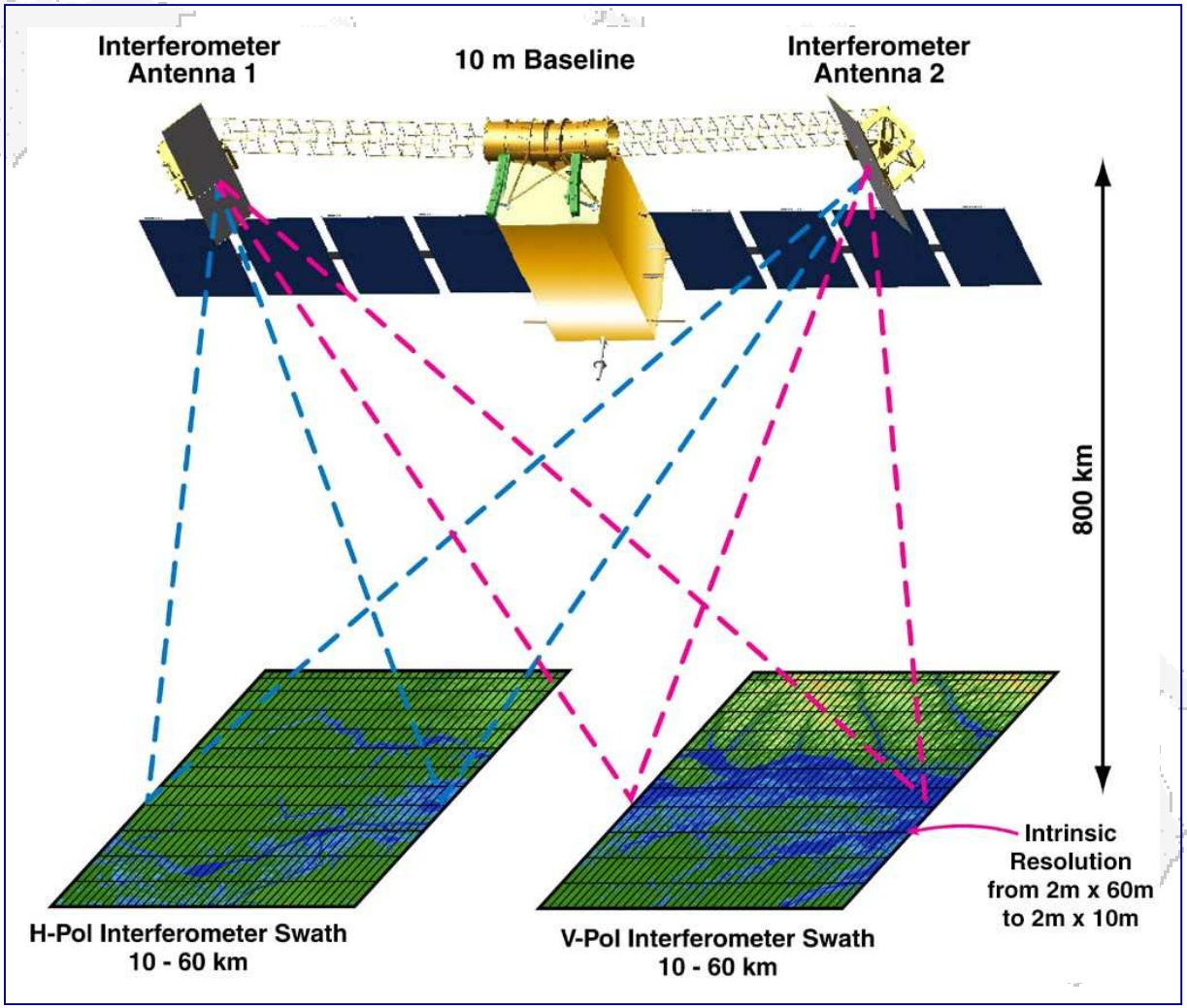
Будущие программы спутниковых альтиметрических измерений

Программа	Время активной работы, *месяц/год*	Масса, *кг*	Параметры орбиты			
			Высота,		Наклонение, *градусы*	Период повторяемости [2], *сутки*
			перигей	апогей		
HY-2	планируется на 06/2011	513	963.6	965	99.3	14 ~168
САДКО (Poseidon-2)	12/2010 – настоящее время	1500	1347		73.6	17
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



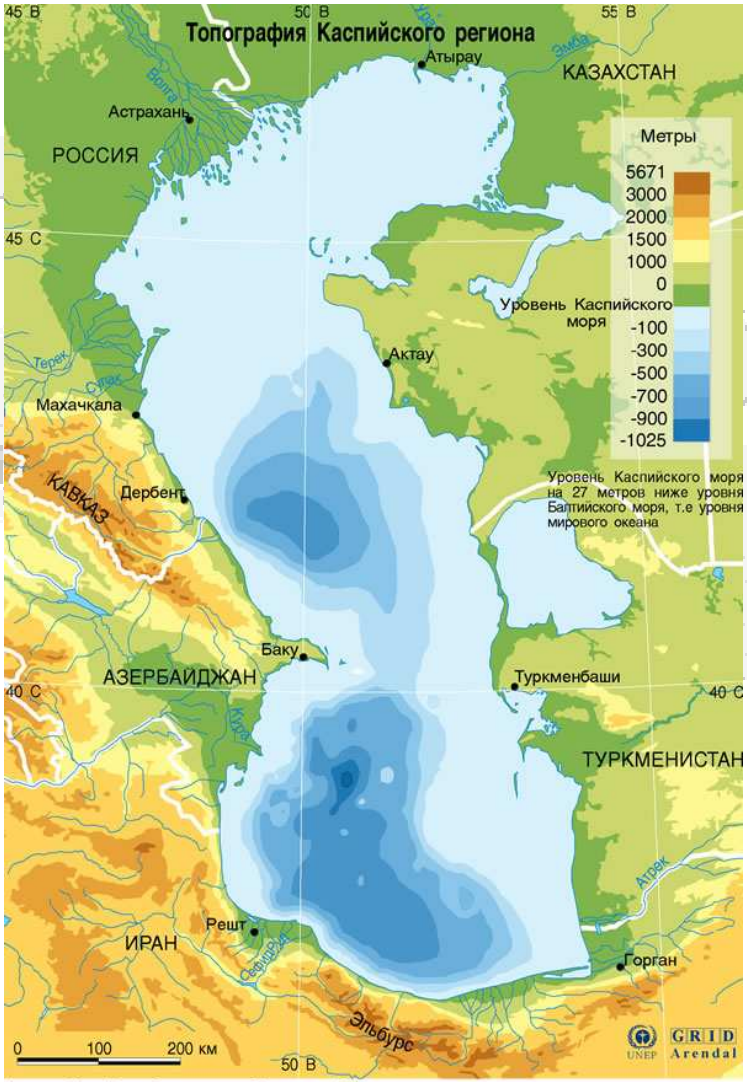
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Альтиметрическая программа спутника SWOT (Surface Water Ocean Topography)



Altimeter/interferometer

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.



Источник: Каспийская Экологическая Программа, 2002

Каспийское море

Каспий является внутренним морем, расположенным в обширной материковой депрессии на границе Европы и Азии. Это крупнейший замкнутый водоем мира, и только изоляция от Мирового океана отличает его от открытых морей. Все остальные признаки водоема: размеры, глубины, особенности термохалинной структуры и циркуляции вод – позволяют отнести его к типу глубоких внутренних морей.

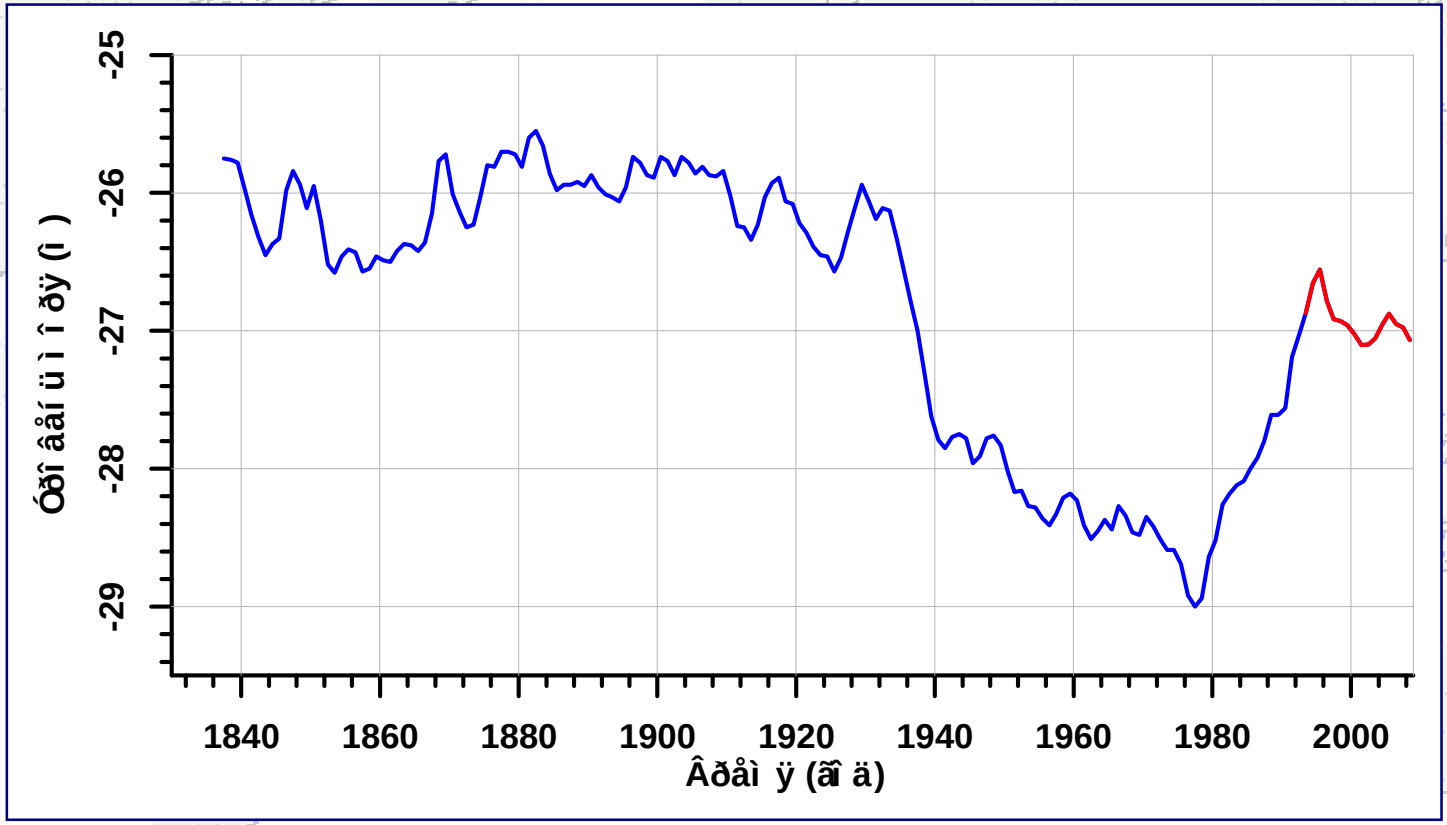
Каспийское море вытянуто по меридиану более чем на 10° (от 36°33' до 47°07'с.ш.), что составляет около 1 200 км, при средней ширине примерно 310 км. Площадь моря при отметке уровня -27,5 м (в Балтийской системе высот) составляет 386 400 км^2.

В физико-географическом отношении, с учетом особенностей подводного рельефа, оно разделяется на три части: Северный, Средний и Южный Каспий.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Многолетняя изменчивость уровня Каспийского моря

За время инструментальных наблюдений (с 1830 г.) амплитуда колебаний уровня Каспийского моря составила примерно 3,5 м. Самый низкий уровень наблюдался в 1977 году и составил -29 м, что является самой низкой отметкой за последние 400-500 лет



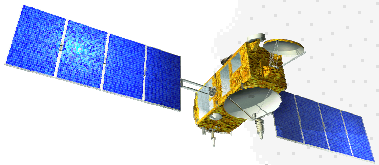
Колебания среднегодового уровня Каспийского моря за период инструментальных наблюдений – синяя линия (по данным С.В. Победоносцева (ГОИН)) и данным альтиметрических измерений – красная линия.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

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

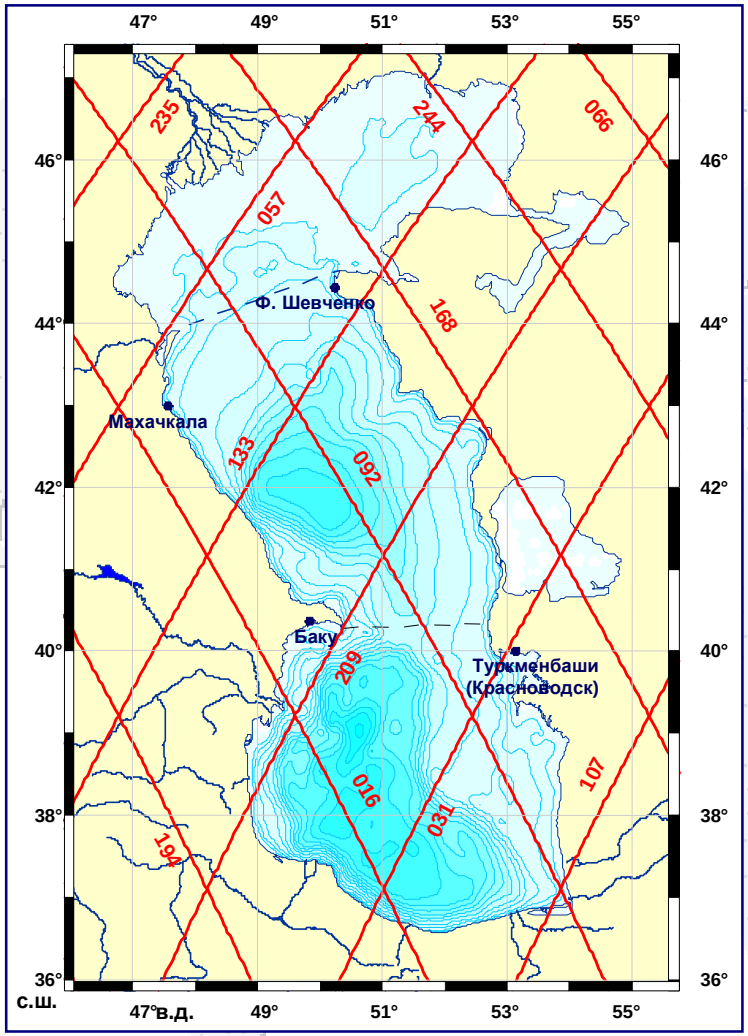


Спутники Jason-1/2

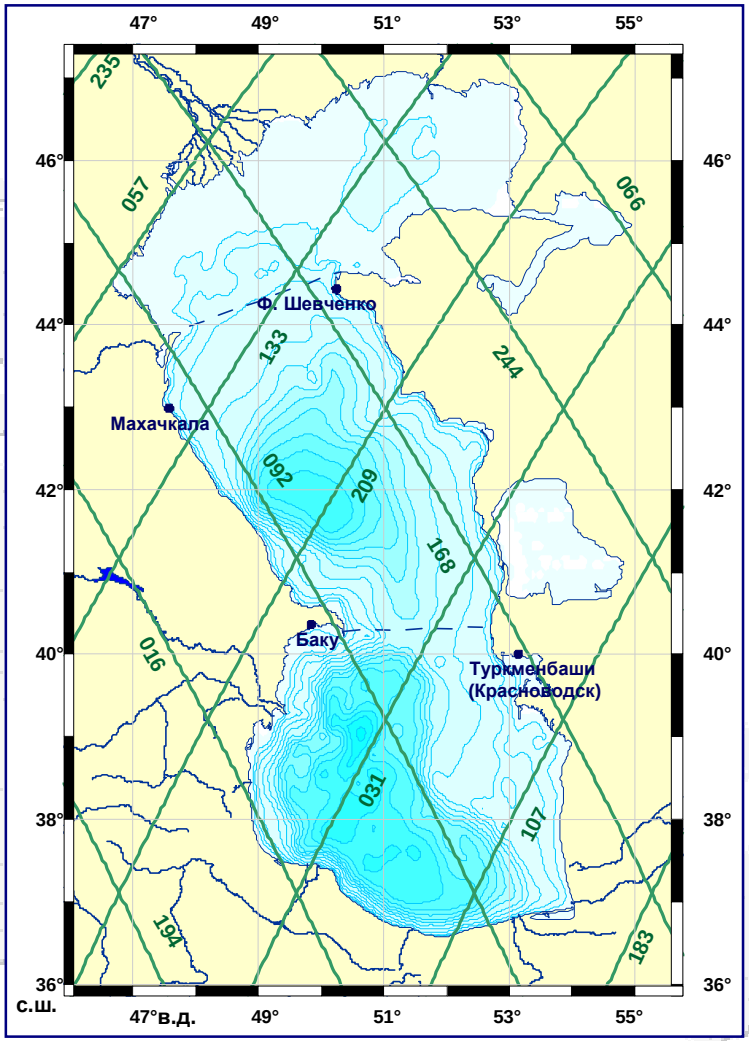
- **Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этих программ составляет 1.7 см, а расчет самой высоты моря относительно отсчетного эллипсоида – 4.2 см.**
- **Временной масштаб повторения измерений вдоль трека 9.916 суток наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной 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)**

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Расположение треков



TOPEX/Poseidon и Jason-1/2

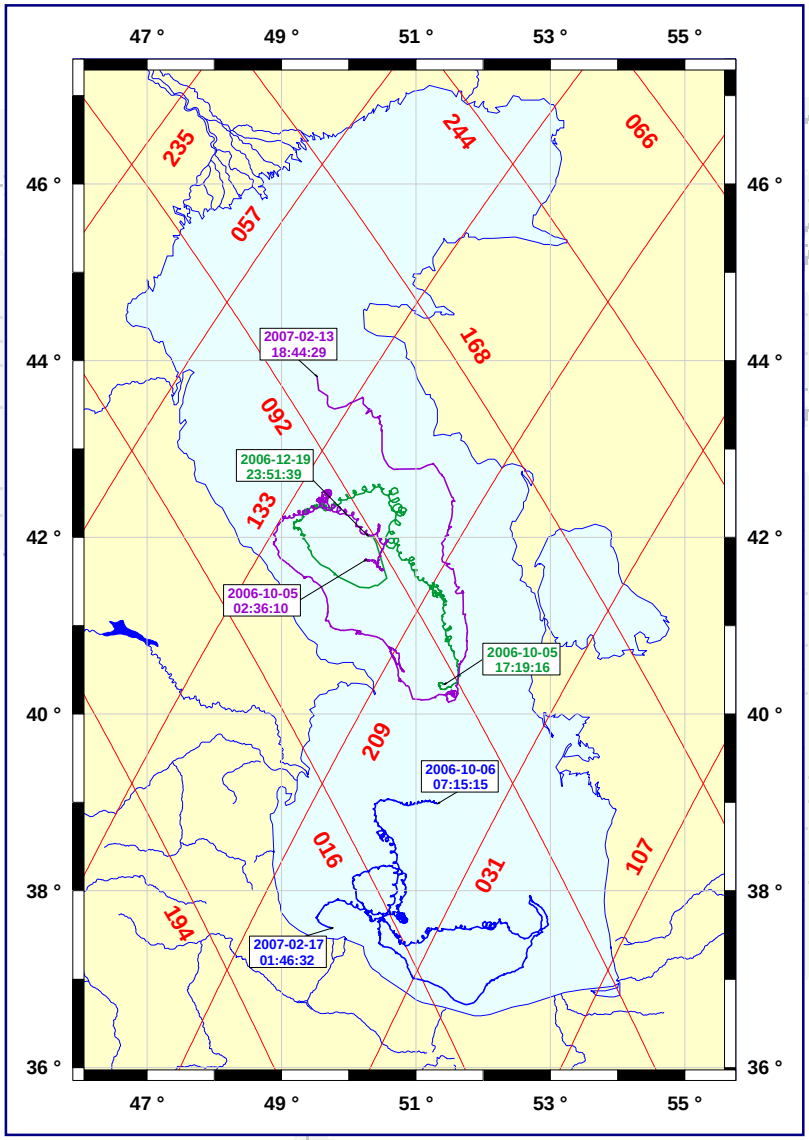


TOPEX/Poseidon и Jason-1

(после совершения ими маневра коррекции орбиты соответственно 19 августа 2002 г. и 26 января 2009 г.)

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Дрифтерный эксперимент проекта MACE

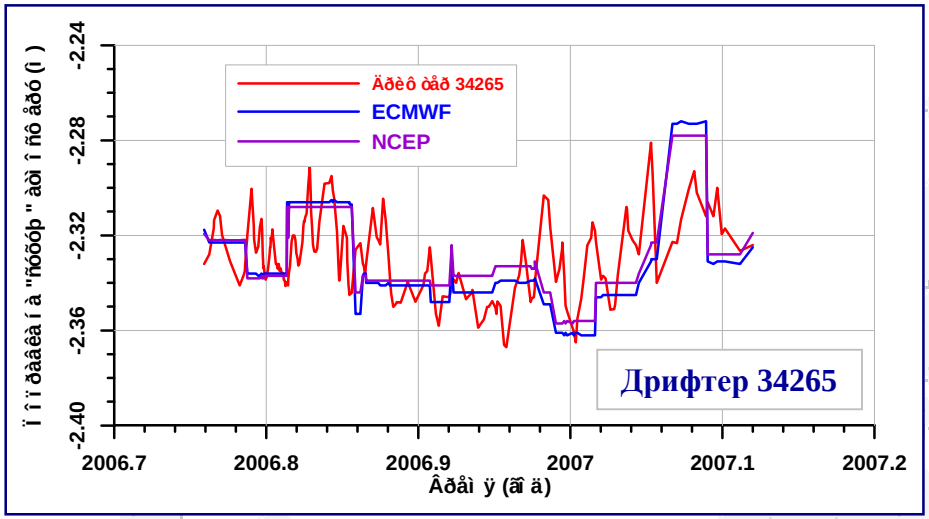


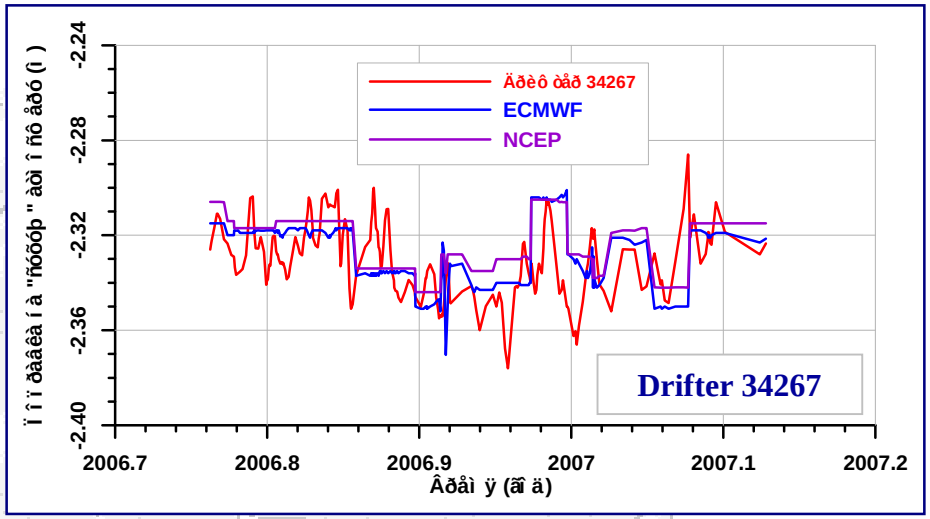
С 4 октября 2006 года по 23 февраля 2007 года в рамках Международного проекта «*Multidisciplinary Analysis of the Caspian Sea Ecosystem*» (MACE) проводился первые дрифтерный эксперимент на акватории Каспийского моря.

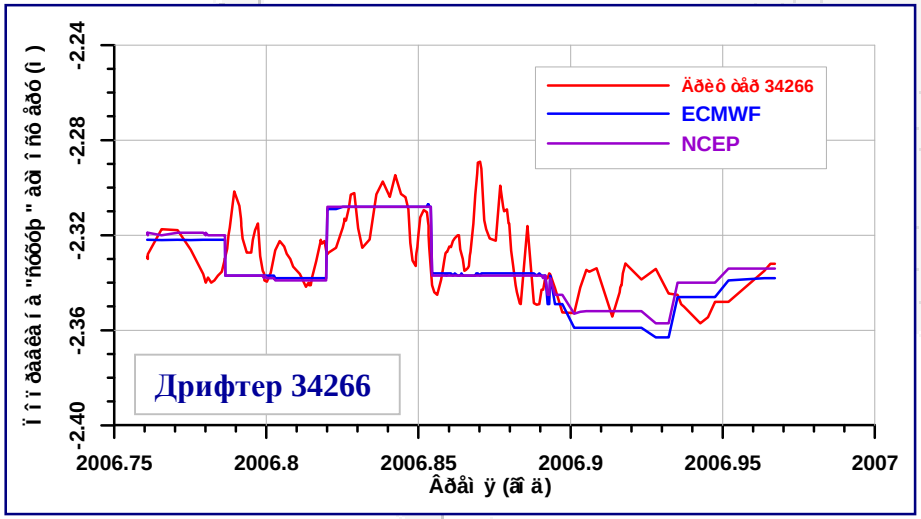
В эксперименте были использованы дрифтеры модели SVP-B, которые позволили измерять атмосферное давление на уровне моря и температуру воды. Данные об атмосферном давлении были использованы при анализе поправки на «сухую» атмосферу, используемую при обработке данных спутниковой альтиметрии.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Уточнение поправки на «сухую» атмосферу





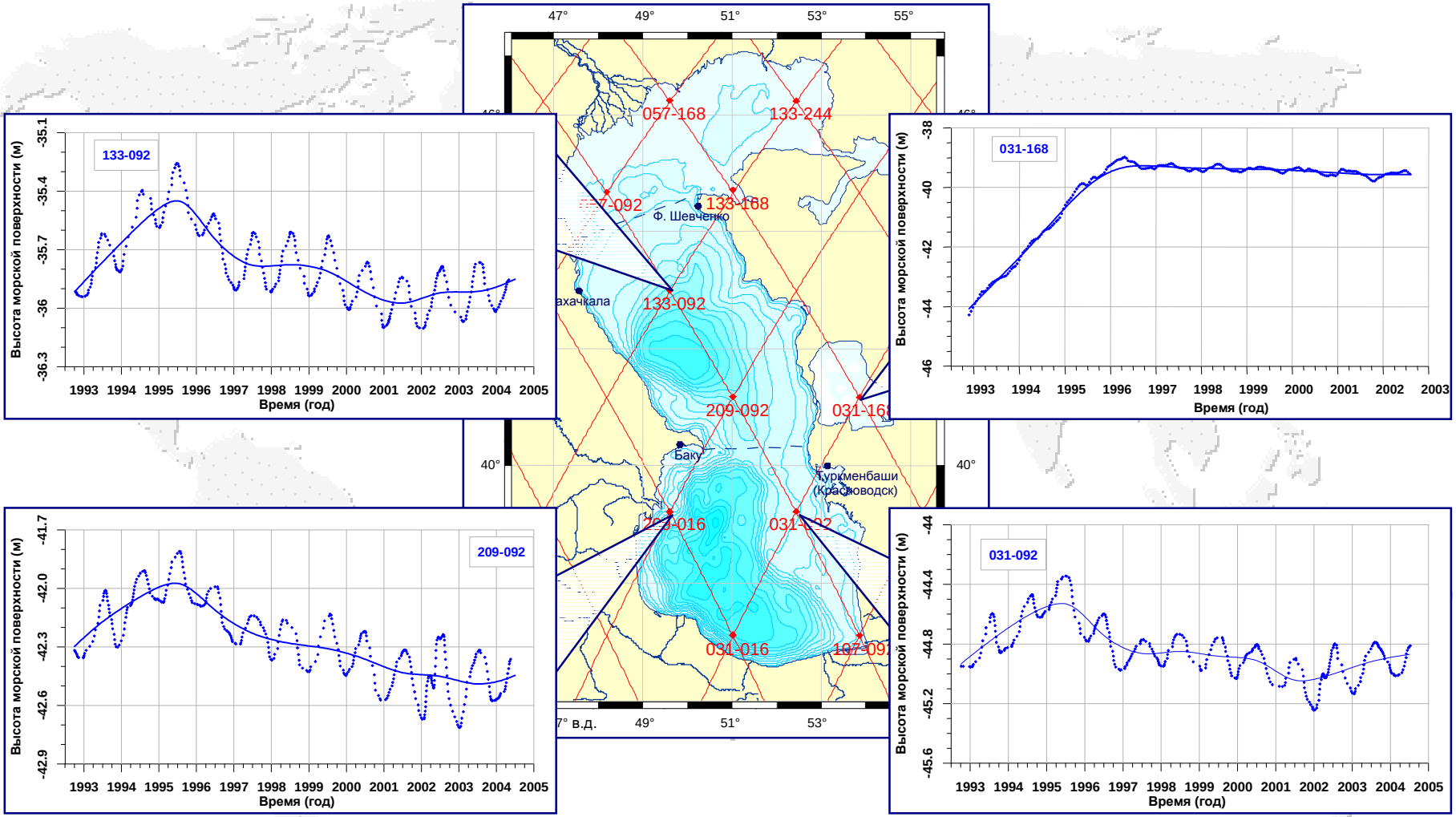


Дрифтер	Модель	Различие между расчетами по модельным данным и данным дрифтерных измерений, (*см*)			
		минимум	максимум	средняя величина	СКО
34265	ECMWF	-5.0	5.0	-0.10	3.86
	NCEP	-4.3	4.5	0.02	3.35
34266	ECMWF	-4.8	2.6	-0.50	2.25
	NCEP	-4.8	2.6	-0.40	2.29
34267	ECMWF	-6.4	4.9	0.40	2.94
	NCEP	-5.6	4.6	0.80	2.65

Разница между расчетами поправки на «сухую» атмосферу по данным об атмосферном давлении модельных расчетов ECMWF или NCEP и данными измерений атмосферного давления дрифтерами составила от 2 до 6 см.

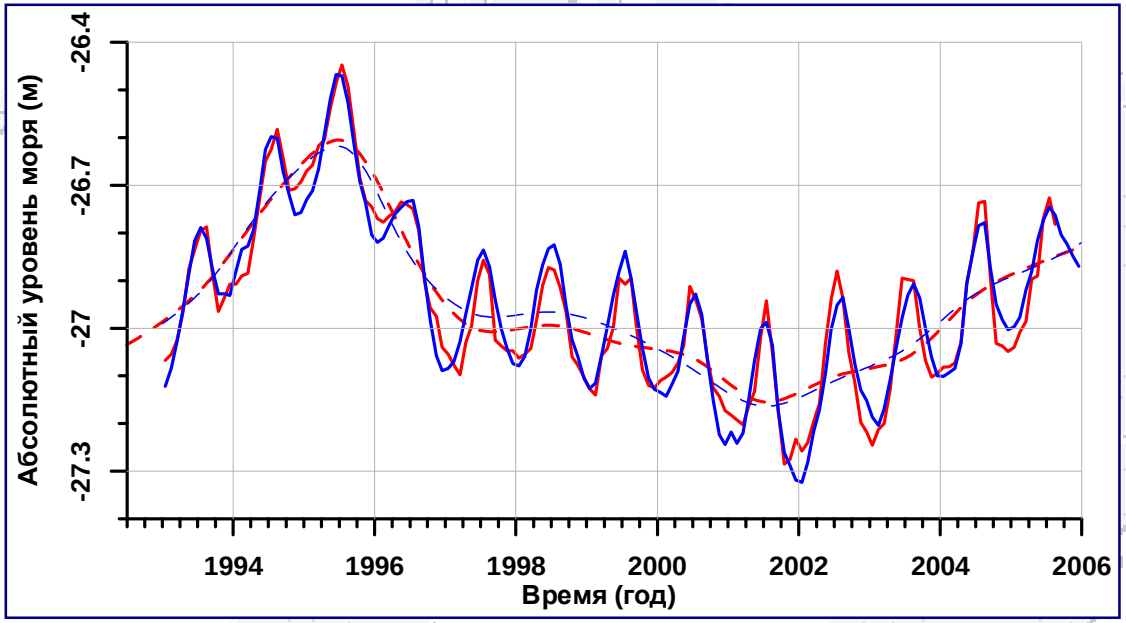
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Изменчивость высоты морской поверхности в точках пересечения треков



© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Анализ межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря



Изменчивость абсолютного уровня Каспийского моря (м) за период с января 1993 г. по декабрь 2003 г. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 (*синий цвет*) и данным уровнемерных постов (*красный цвет*)

Скорость изменения уровня в разных частях Каспийского моря

Временной интервал	Скорость изменения уровня, *(см/год)*			
	Северный Каспий	Средний Каспий	Южный Каспий	Море в целом
октябрь 1992 – март 1995	18,8 ± 1,8	22,2 ± 1,7	20,4 ± 2,4	20,4 ± 2,2
ноябрь 1995 – сентябрь 1996	-24,2 ± 2,0	-17,4 ± 2,4	-26,1 ± 2,1	-23,1 ± 2,4
октябрь 1997 – июнь 1998	-2,5 ± 1,0	-6,9 ± 2,0	-6,3 ± 2,1	-5,3 ± 2,1
декабрь 1998 – апрель 2001	-7,9 ± 1,3	-6,7 ± 1,6	-12,5 ± 1,8	-9,1 ± 1,9
декабрь 2002 – декабрь 2003	11,9 ± 2,4	11,8 ± 1,7	17,5 ± 2,9	13,7 ± 2,3
январь 2003 – октябрь 2005	6,7 ± 1,9	6,2 ± 2,1	13,1 ± 2,3	8,5 ± 2,1

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Сравнение данных

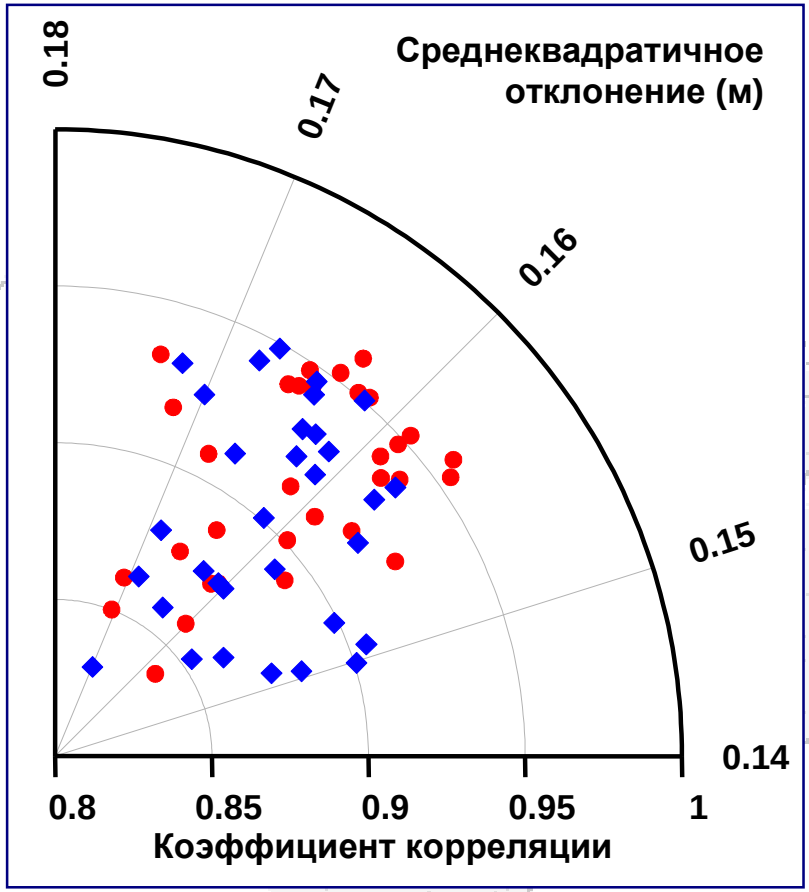


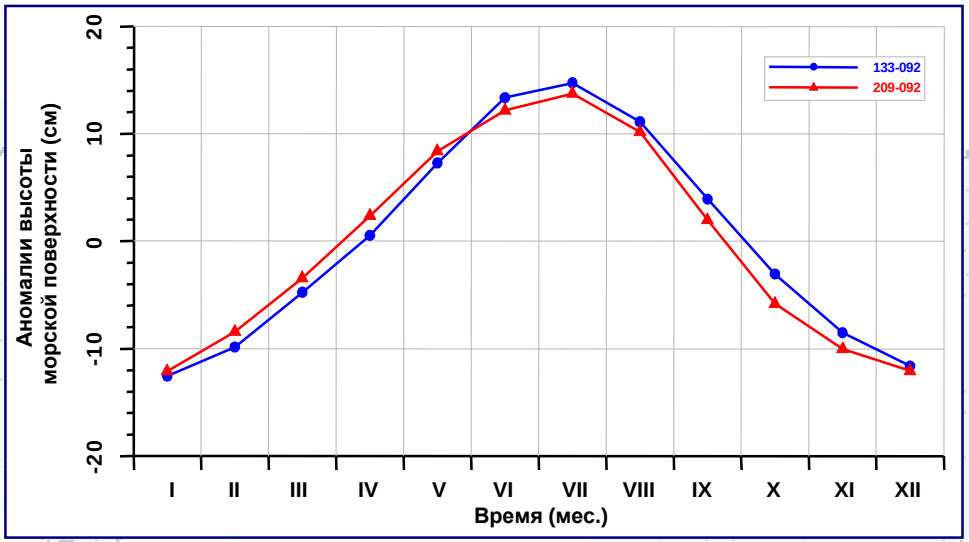
Диаграмма среднеквадратичной разности уровня моря по постам и в точках пересечения треков и соответствующие коэффициенты корреляции между данными уровнемерных постов (за исключением поста Махачкала) и результатами расчетов по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 (*красный цвет*) и между самими уровнемерными постами (*синий цвет*)

Коэффициенты корреляции данных уровнемерных постов и изменчивости высоты морской поверхности в точках пересечения треков

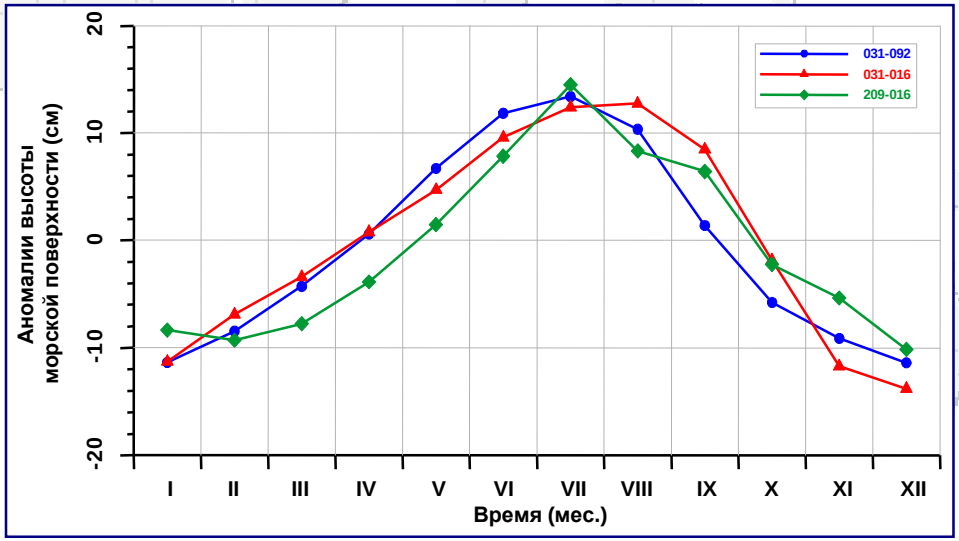
Уровнемерные посты	Точки пересечения треков							Море (по альт.)
	Северный Каспий		Средний Каспий		Южный Каспий			
	057-092	133-244	133-092	209-092	209-016	031-092	031-016	
Форт Шевченко	0.876	0.859	0.923	0.931	0.918	0.931	0.892	0.938
Махачкала	0.899	0.739	0.862	0.853	0.901	0.883	0.874	0.906
о. Жилой	0.876	0.863	0.948	0.942	0.932	0.931	0.901	0.950
Нефтяные Камни	0.876	0.876	0.943	0.942	0.941	0.948	0.901	0.953
Баку	0.841	0.889	0.951	0.960	0.913	0.919	0.892	0.941
Куули-Маяк	0.859	0.874	0.952	0.953	0.925	0.954	0.937	0.958
Туркменбаши (Красноводск)	0.861	0.850	0.918	0.933	0.914	0.948	0.908	0.940
Кара-Богаз-Гол	0.880	0.831	0.925	0.932	0.922	0.942	0.912	0.946
Море (по постам)	0.909	0.876	0.963	0.964	0.956	0.966	0.936	0.978

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Анализ сезонной изменчивости



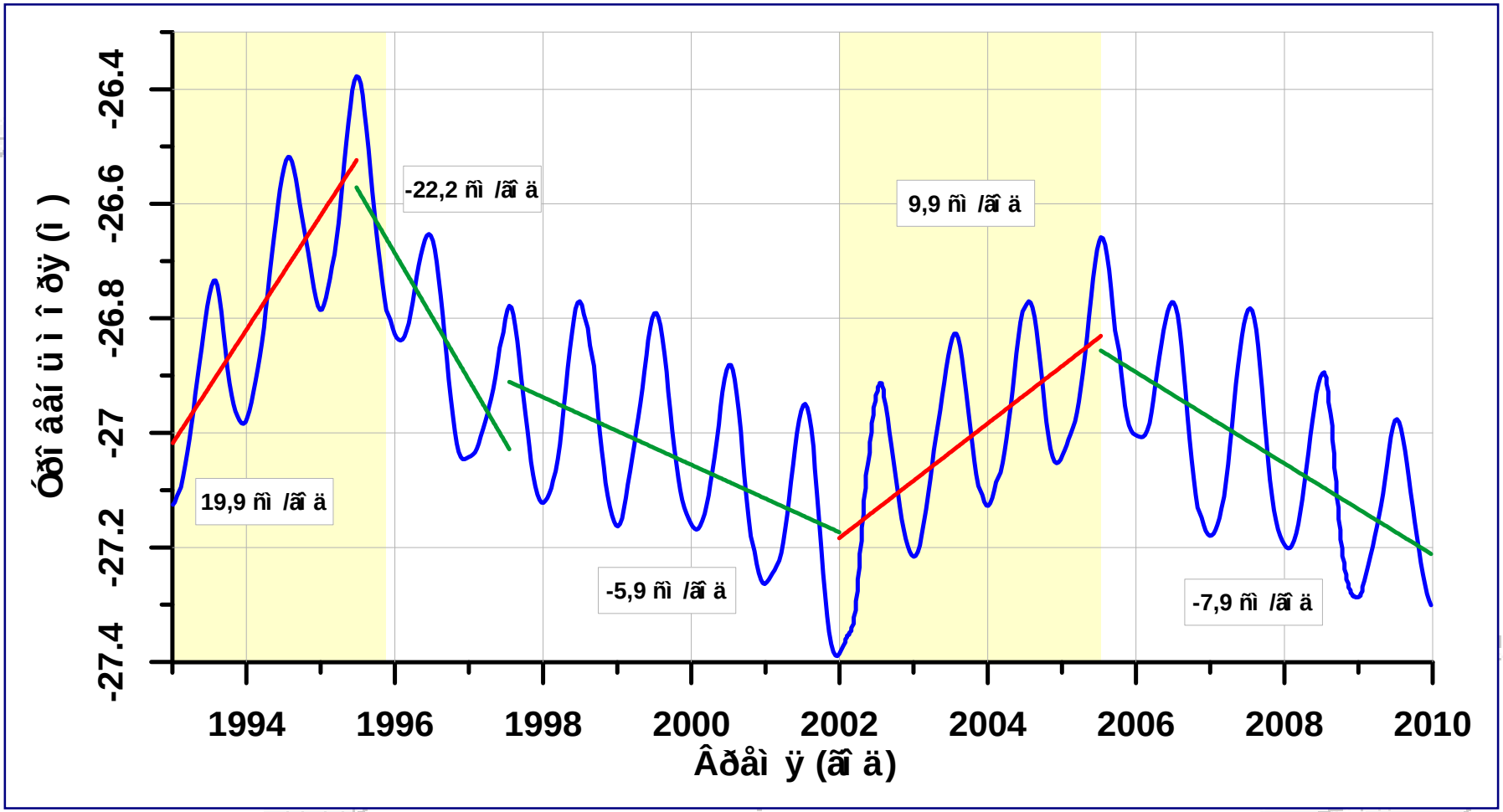
Сезонная изменчивость аномалий высоты морской поверхности в точках пересечения в Среднем Каспии



Сезонная изменчивость аномалий высоты морской поверхности в точках пересечения в Южном Каспии

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

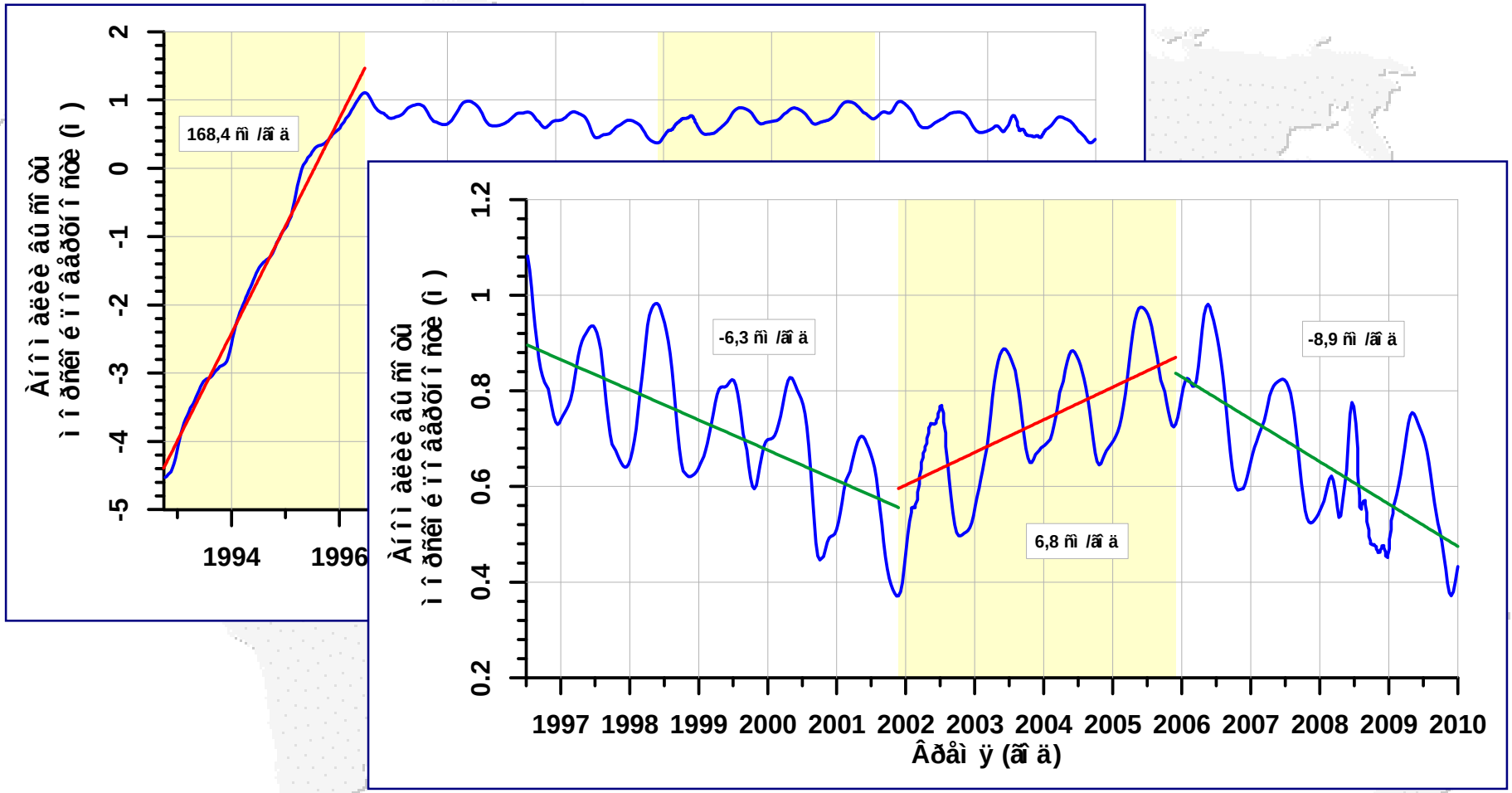
Многолетняя изменчивость уровня Каспийского моря



Изменчивость уровня Каспийского моря с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 .

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

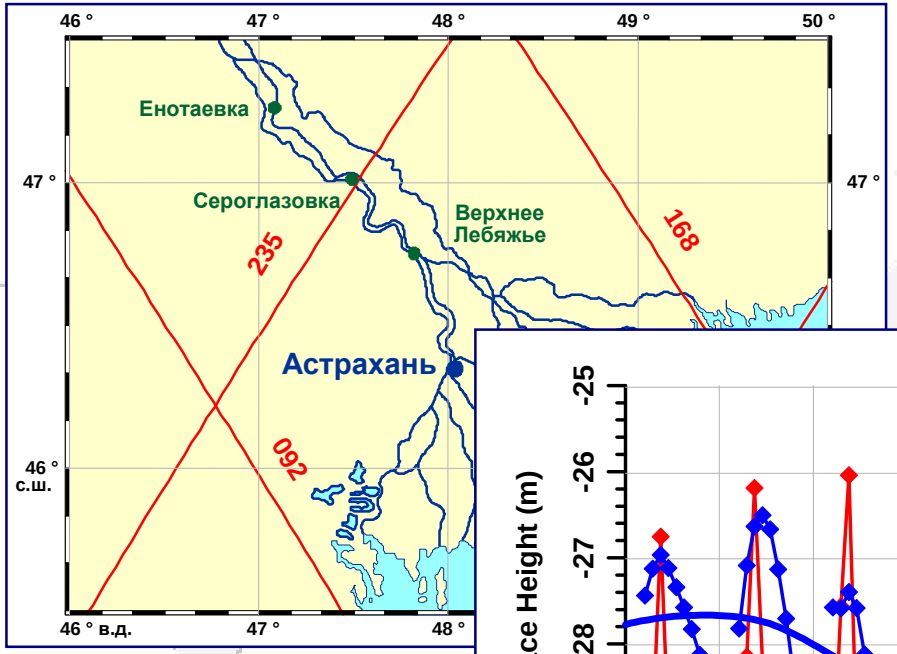
Многолетняя изменчивость уровня залива Кара-Богаз-Гол

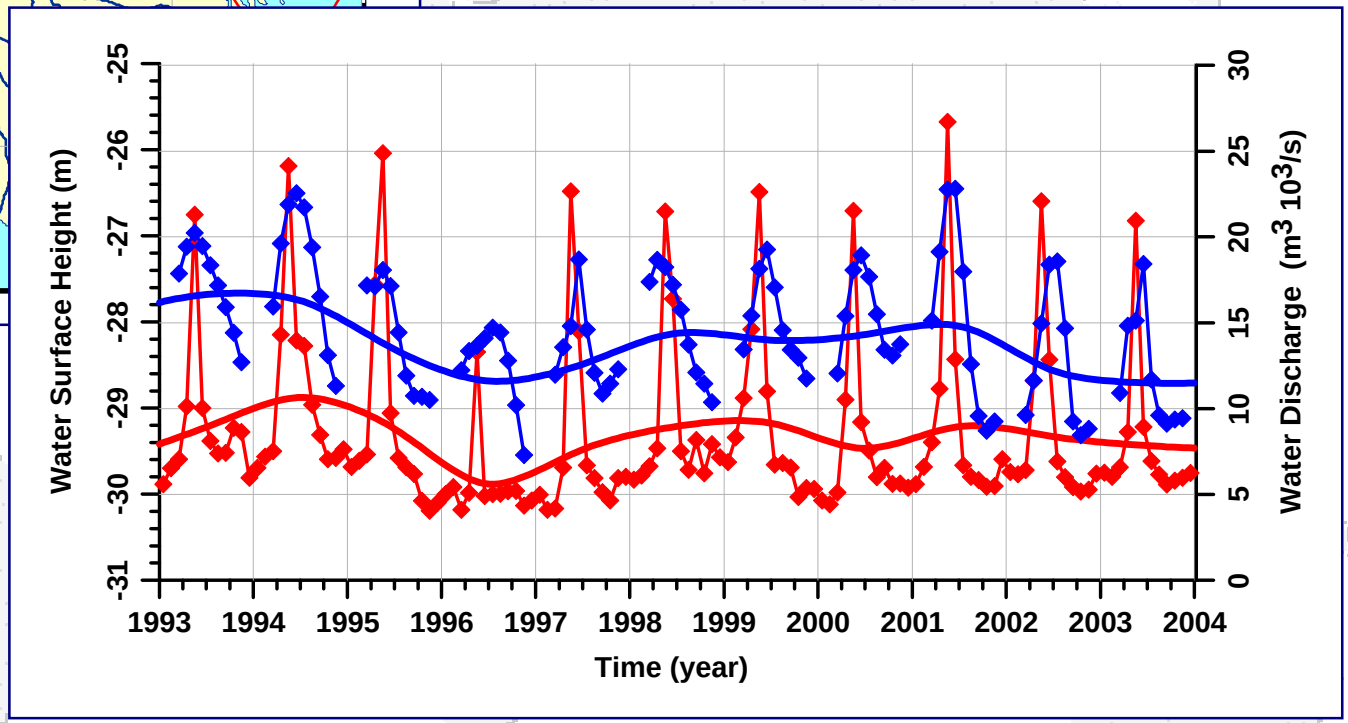


Изменчивость уровня залива Кара-Богаз-Гол с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 .

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Расчет уровня Волги по данным спутниковой альтиметрии





Временной ход среднемесячного изменений расхода воды в створе Волгоградской ГЭС (красная линия) и аномалий высоты поверхности воды, рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии (синяя линия)

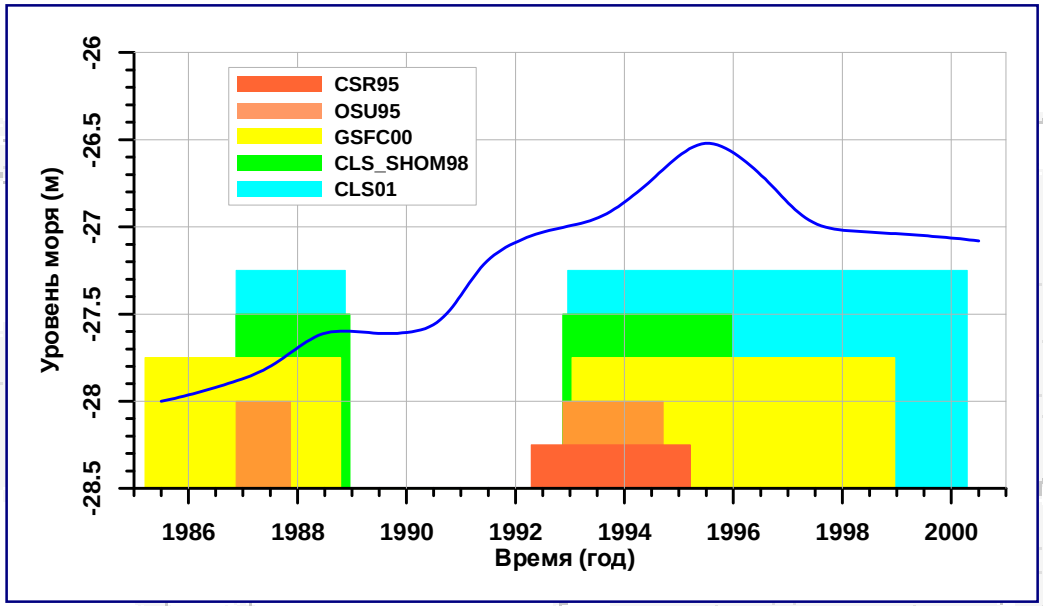
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Модели средних высот морской поверхности

Модель	Используемые данные			Шаг сетки	Диапазон широт
	Спутник	Данные	Временной интервал *(месяц/год)*		
CSR95	ERS-1	с 1 по 18 цикл фазы C	04/1992 – 12/1993	2.5’ x 2.5’	–79° ? +82°
		фаза E (геодезическая программа)	04/1994 – 09/1994		
		фаза F (геодезическая программа)	10/1994 – 03/1995		
	TOPEX/Poseidon	с 1 по 73 цикл	09/1992 – 10/1994		
OSU95	GEOSAT	с 1 по 22 цикл изомаршрутной программы	11/1986 – 11/1987	3.75’ x 3.75’	–80° ? +82°
	ERS-1	с 7 по 17 цикл фазы C	11/1992 – 11/1993		
		фаза E (геодезическая программа)	04/1994 – 09/1994		
	TOPEX/Poseidon	с 17 по 53 цикл	02/1993 – 03/1994		
GSFC00	GEOSAT	геодезическая программа	03/1985 – 10/1986	2’ x 2’	± 80°
		с 1 по 42 цикл изомаршрутной программы	11/1986 – 10/1988		
	ERS-1	с 1 по 18 цикл фазы C	04/1992 – 12/1993		
		с 1 по 13 цикл фазы G	04/1995 – 06/1996		
		фаза E (геодезическая программа)	04/1994 – 09/1994		
		фаза F (геодезическая программа)	10/1994 – 03/1995		
	ERS-2	с 1 по 29 цикл	04/1995 – 01/1998		
	TOPEX/Poseidon	с 11 по 232 циклы	01/1993 – 12/1998		
CLS_SHOM98	GEOSAT	с 1 по 44 цикл изомаршрутной программы	11/1986 – 11/1988	3.75’ x 3.75’	± 82°
	ERS-1	с 7 по 17 цикл фазы C	11/1992 – 11/1993		
		с 2 по 12 цикл фазы G	05/1995 – 05/1996		
		фаза E (геодезическая программа)	04/1994 – 09/1994		
		фаза F (геодезическая программа)	10/1994 – 03/1995		
	TOPEX/Poseidon	с 11 по 121 цикл	01/1993 – 12/1995		
CLS01	GEOSAT	с 1 по 44 цикл изомаршрутной программы	11/1986 – 11/1988	2’ x 2’	–80° ? +82°
	ERS-1	с 6 по 18 цикл фазы C	12/1992 – 12/1993		
		с 1 по 2 цикл фазы G	04/1992 – 05/1993		
		фаза E (геодезическая программа)	04/1994 – 09/1994		
		фаза F (геодезическая программа)	10/1994 – 03/1995		
	ERS-2	с 1 по 49 цикл	04/1995 – 12/1999		
	TOPEX/Poseidon	с 11 по 280 циклы	01/1993 – 04/2000		

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Сравнение основных моделей СВМП



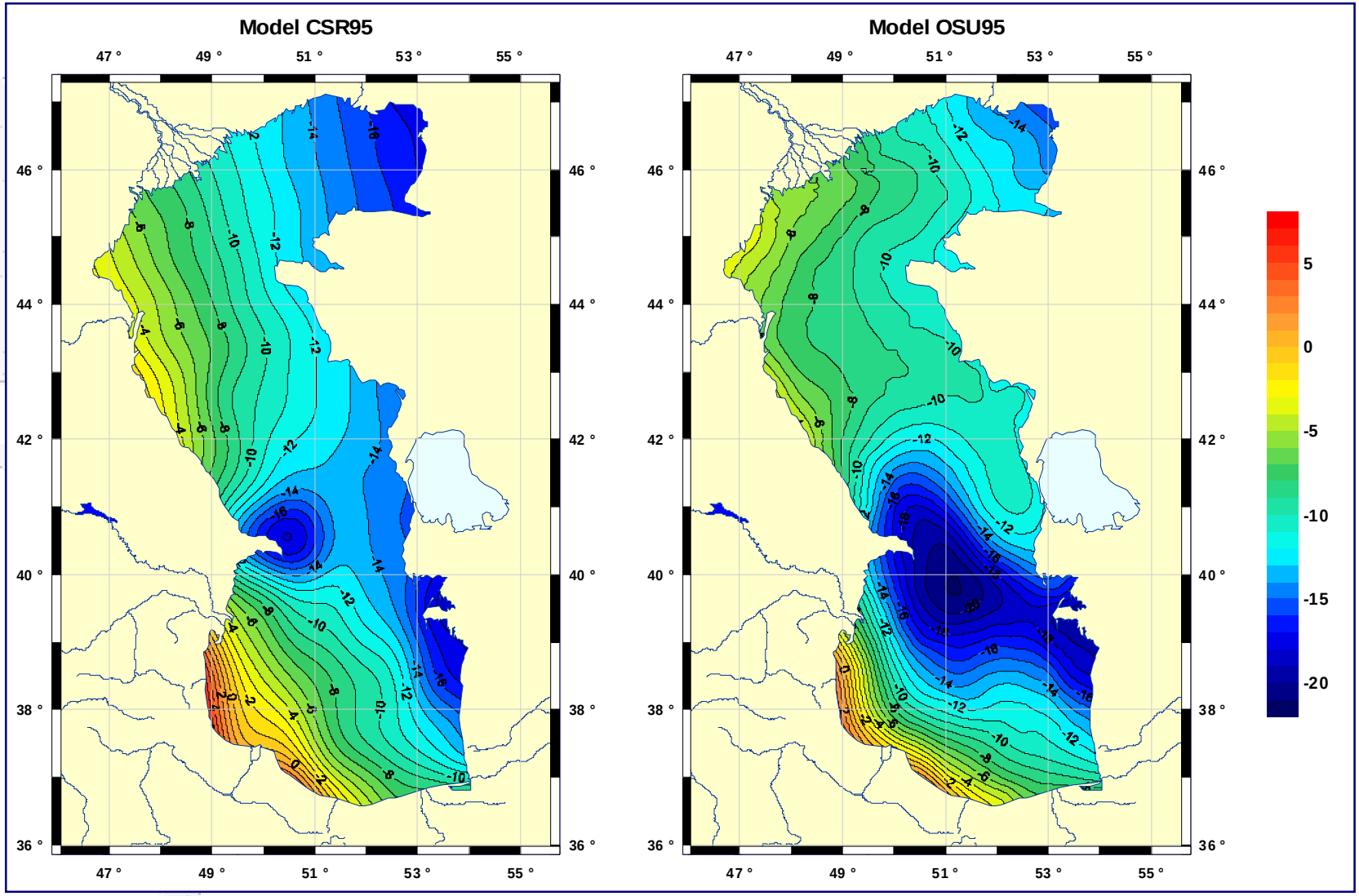
Статистические характеристики среднего уровня Каспийского моря для временных интервалов, соответствующих основным моделям СВМП, рассчитанные по среднемесячным данным уровнемерных постов

Цветом условно показаны временные интервалы, соответствующих основным моделям СВМП

Модель	Период осреднения	Среднее значение, *(м)*	Средне-квадратичное отклонение *(м)*
CSR95	март 1992 – март 1995	-26,89	0,14
OSU95	ноябрь 1986 – ноябрь 1987 ноябрь 1992 – сентябрь 1994	-27,24	0,47
GSFC00	март 1983 – октябрь 1988 январь 1993 – январь 1999	-27,25	0,49
CLS_SHOM98	ноябрь 1986 – ноябрь 1988 ноябрь 1992 – декабрь 1995	-27,18	0,48
CLS01	ноябрь 1986 – ноябрь 1987 декабрь 1992 – апрель 2000	-27,1	0,37
Уровнемерные посты	январь 1985 – декабрь 2000	-27,21	0,45

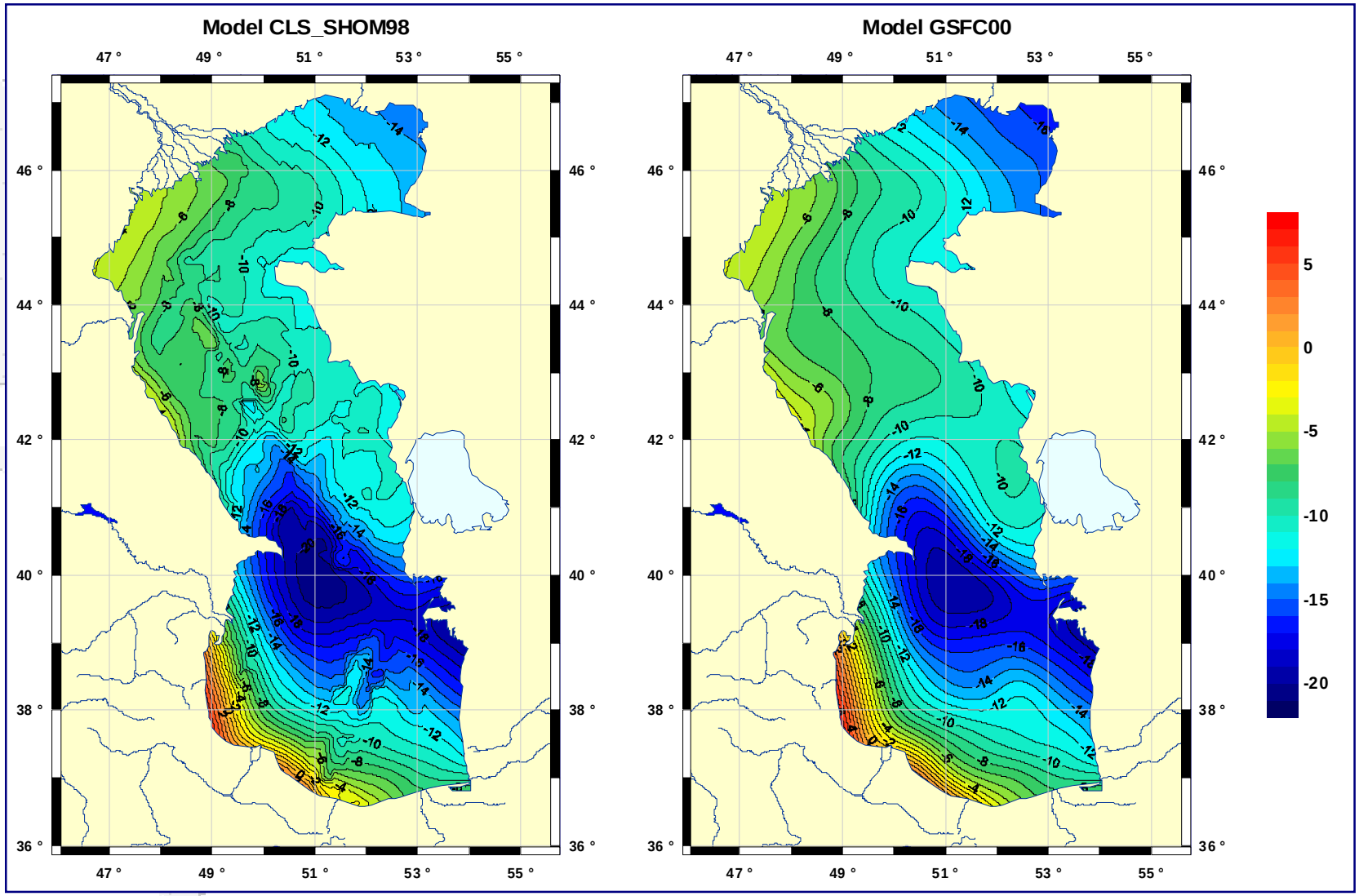
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Модели средних высот морской поверхности



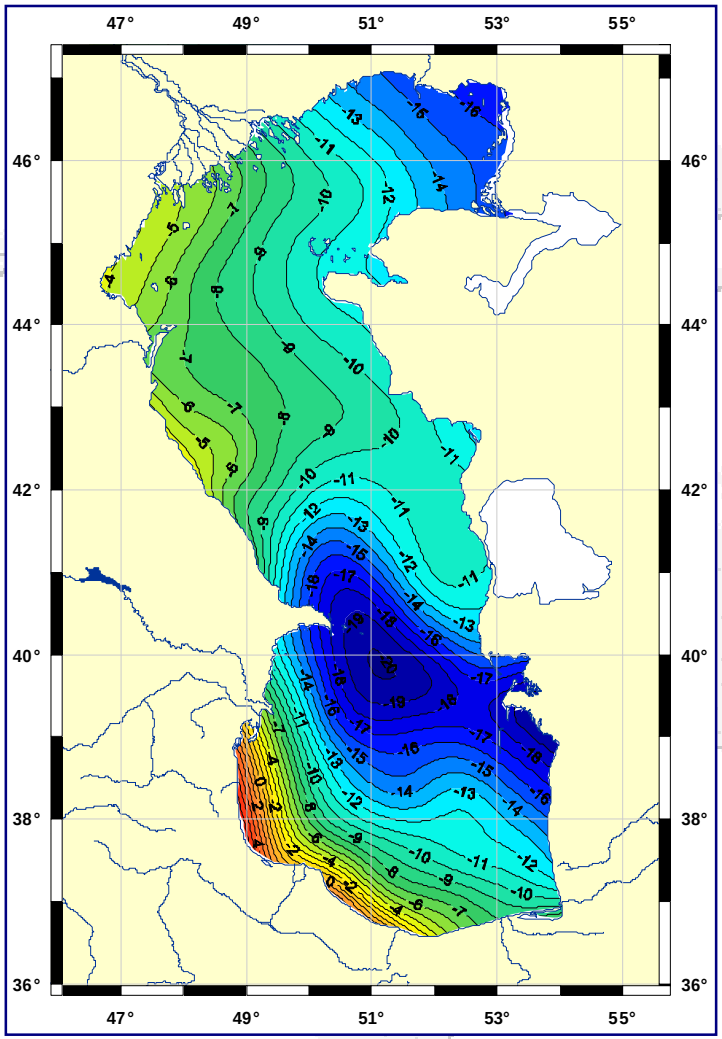
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Модели средних высот морской поверхности



© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Сравнение основных моделей СВМП



Высота геоида (м) по модели EGM96

Среднеквадратичное отклонение (м) разницы аномалий СВМП для различных моделей

	CSR95	OSU95	GSFC00	CLS_SHOM98	CLS01	EGM96
CSR95	–	3.14	2.99	2.98	3.10	2.95
OSU95	3.14	–	0.53	0.57	0.28	0.55
GSFC00	2.99	0.53	–	0.46	0.43	0.17
CLS_SHOM98	2.98	0.57	0.46	–	0.47	0.58
CLS01	3.10	0.28	0.43	0.47	–	0.44
EGM96	2.95	0.55	0.17	0.58	0.44	–

Коэффициент корреляции аномалий СВМП для различных моделей

	CSR95	OSU95	GSFC00	CLS_SHOM98	CLS01	EGM96
CSR95	-	0.681	0.698	0.702	0.689	0.714
OSU95	0.681	-	0.992	0.994	0.998	0.991
GSFC00	0.698	0.992	-	0.990	0.995	0.999
CLS_SHOM98	0.702	0.994	0.990	-	0.702	0.990
CLS01	0.689	0.998	0.995	0.702	-	0.994
EGM96	0.714	0.991	0.999	0.990	0.994	-

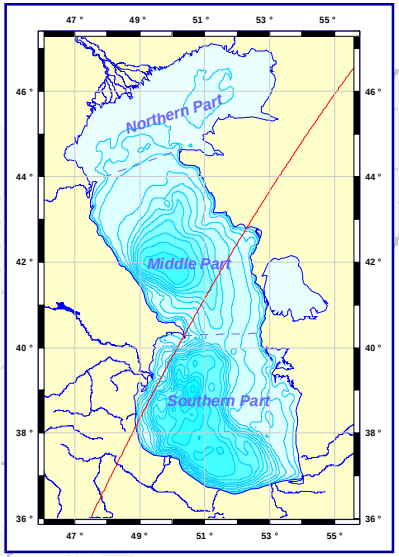
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

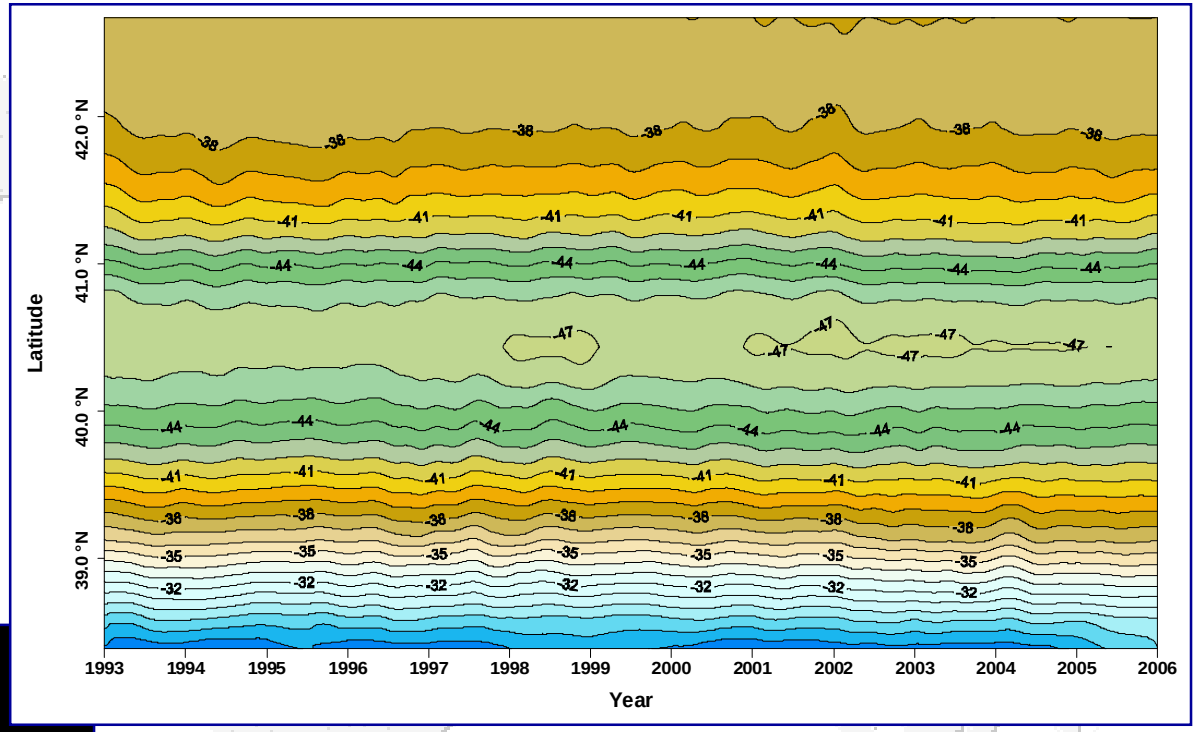
Обработка данных спутниковой альтиметрии

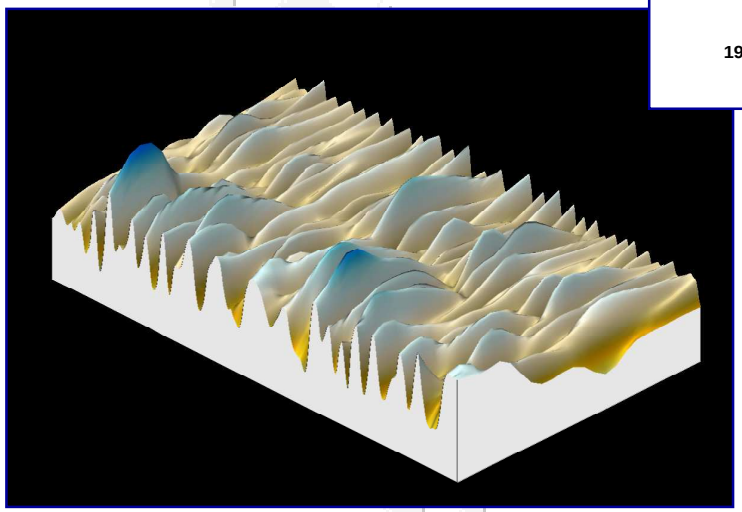
- Учет всех необходимых поправок для обработки данных альтиметрических измерений:
  - поправка на влажность, рассчитанная по данным бортового радиометра,
  - поправка на влияние ионосферы, рассчтитанная по данным двухчастотных измерений,
  - поправка на состояние подстилающей поверхности.
- Поправка на «сухую» атмосферу рассчитывалась по данным измерений атмосферного давления на береговых метеостанциях с учетом измерений дрифтерами.
- Максимальная высота приливов в береговой зоне Каспийского моря не превышает 2 см, поэтому приливная поправка не учитывалась.
- Модель СВМП GCRAS09 Каспийского моря рассчитывалась по следующей схеме:
  - Синоптическая и сезонная изменчивость высоты морской поверхности исключалась из данных альтиметрических измерений для каждого трека и каждого изомаршрутного цикла.
  - Из полученных данных исключалась средняя или климатическая динамическая топография, рассчитанная по данным гидродинамического моделирования.
  - Модель GCRAS09 представляет собой численную функцию от времени для каждого трека, т.е. зависит от широты, долготы и времени. Ежегодно модель СВМП должна обновляться с четом новых данных.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Изменчивость СВМП и уровня вдоль 209 трека



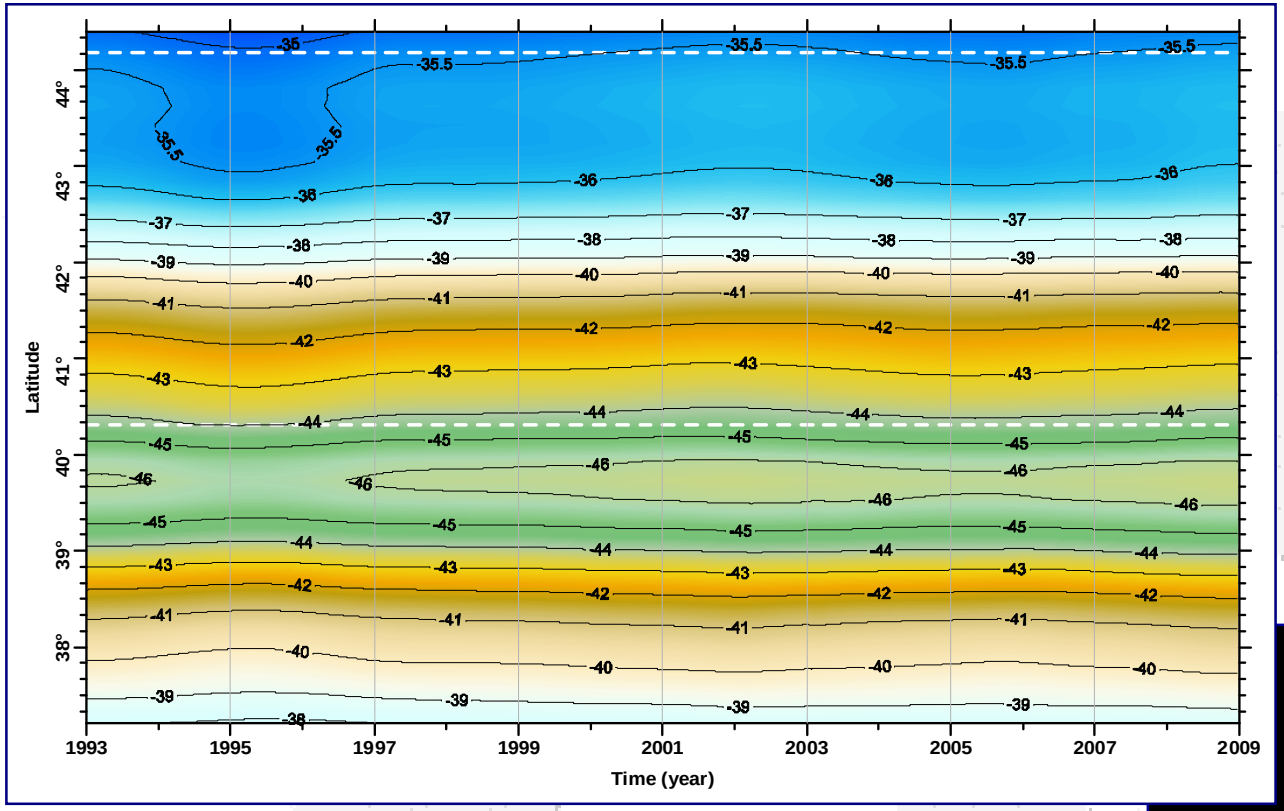


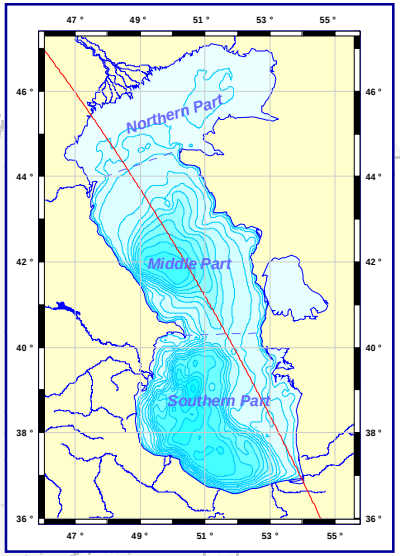


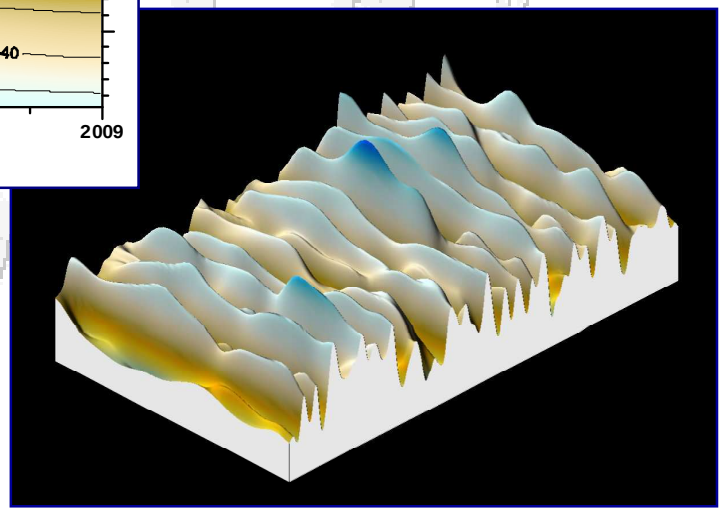
Временная изменчивость средней высоты морской поверхности GCRAS09 и аномалий уровня, рассчитанным относительно нее вдоль 209 трека спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Изменчивость СВМП и уровня вдоль 092 трека



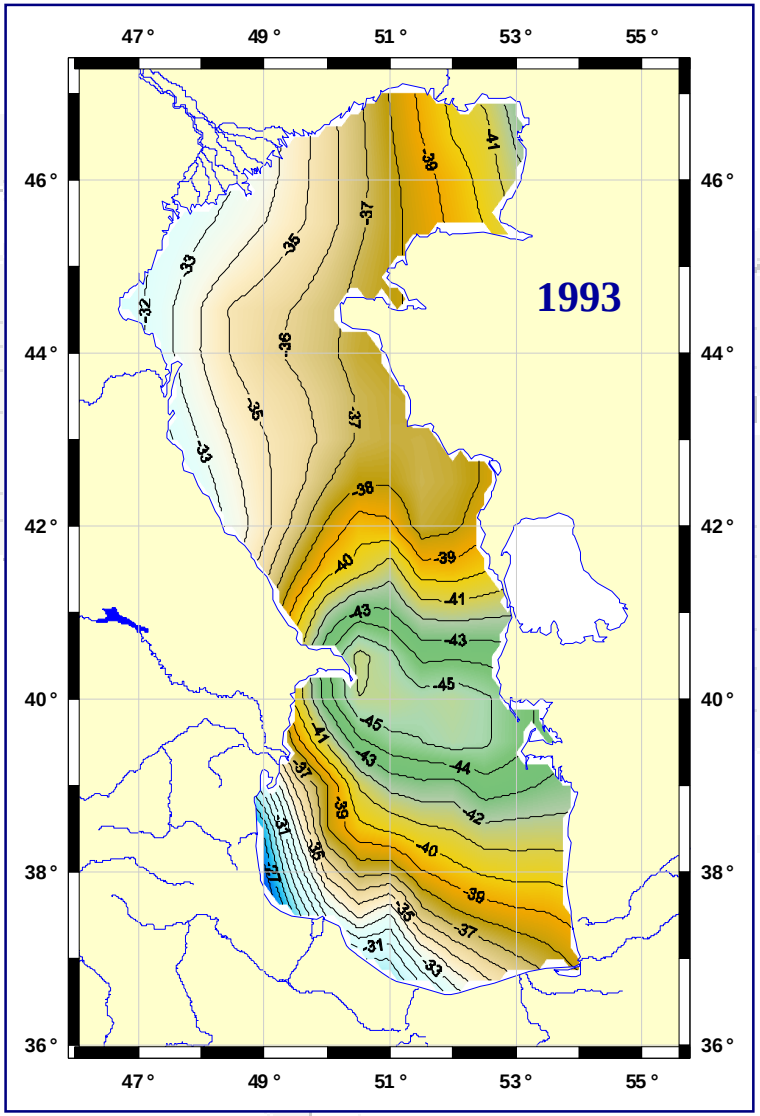


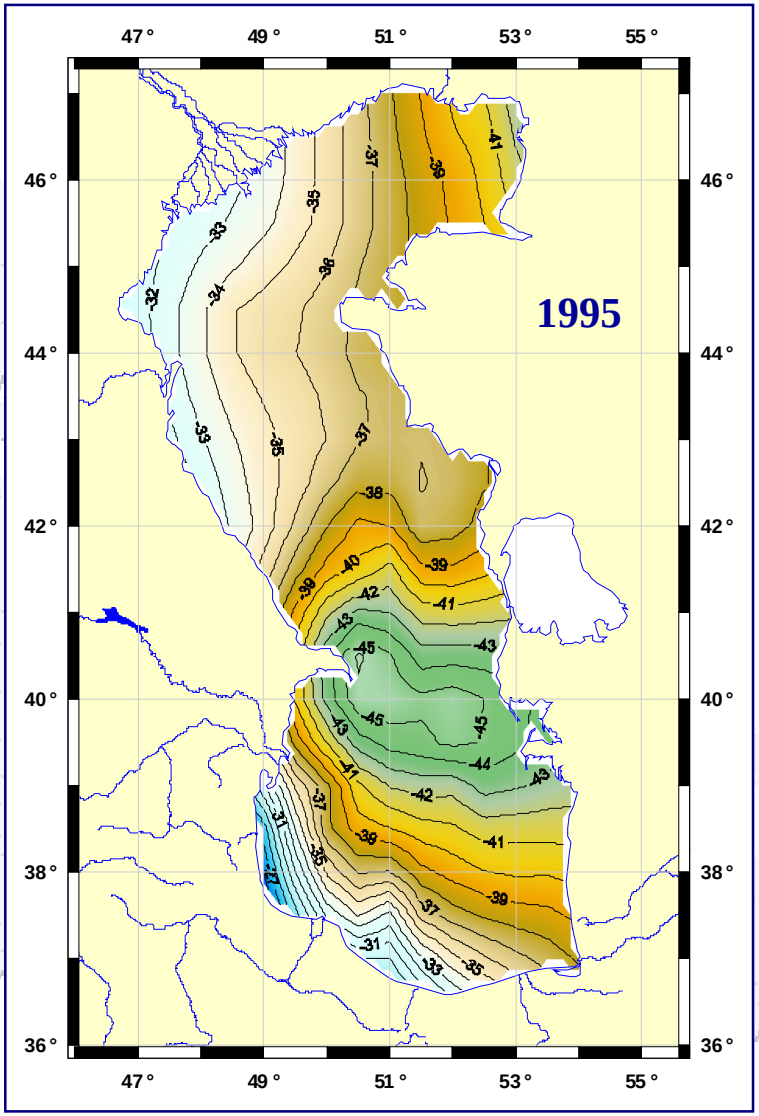


Временная изменчивость средней высоты морской поверхности GCRAS09 и аномалий уровня, рассчитанным относительно нее вдоль 092 трека спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

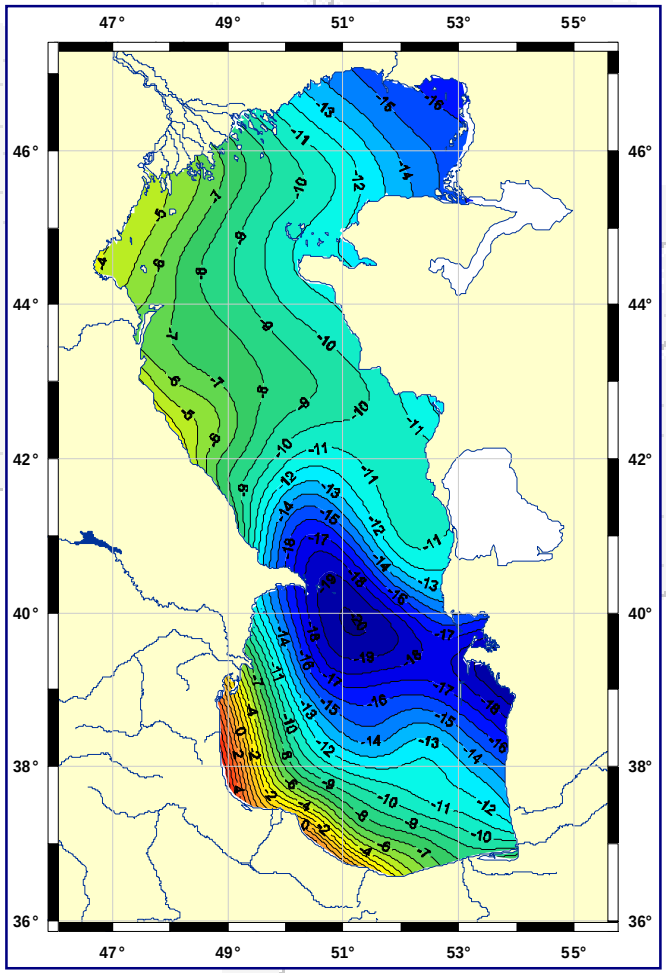
Модель GCRAS08 СВМП Каспийского моря



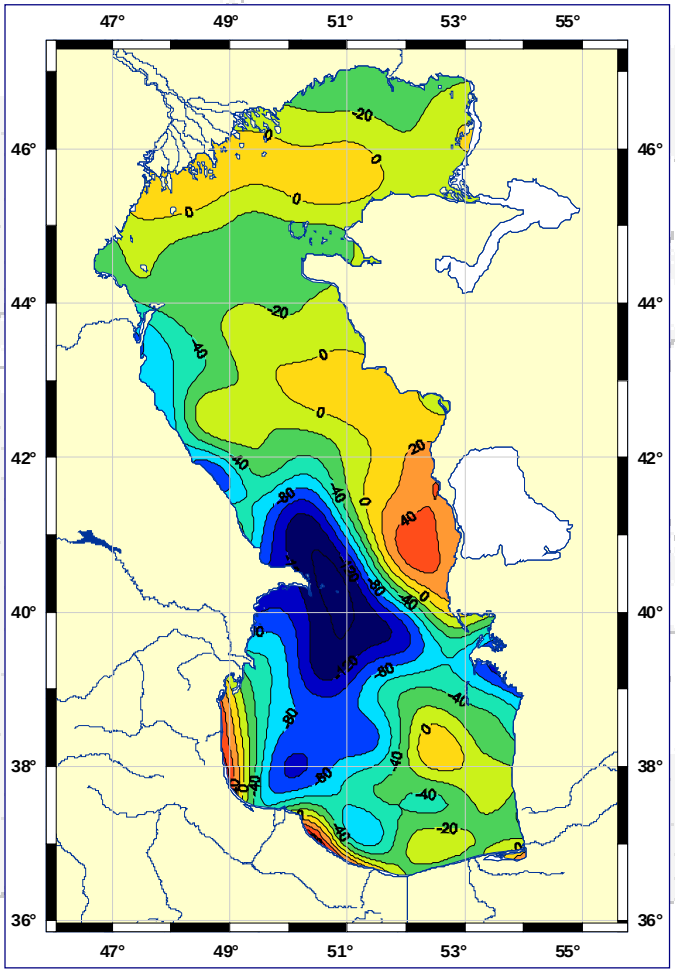


© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Особенности гравитационного поля на акватории Каспийского моря



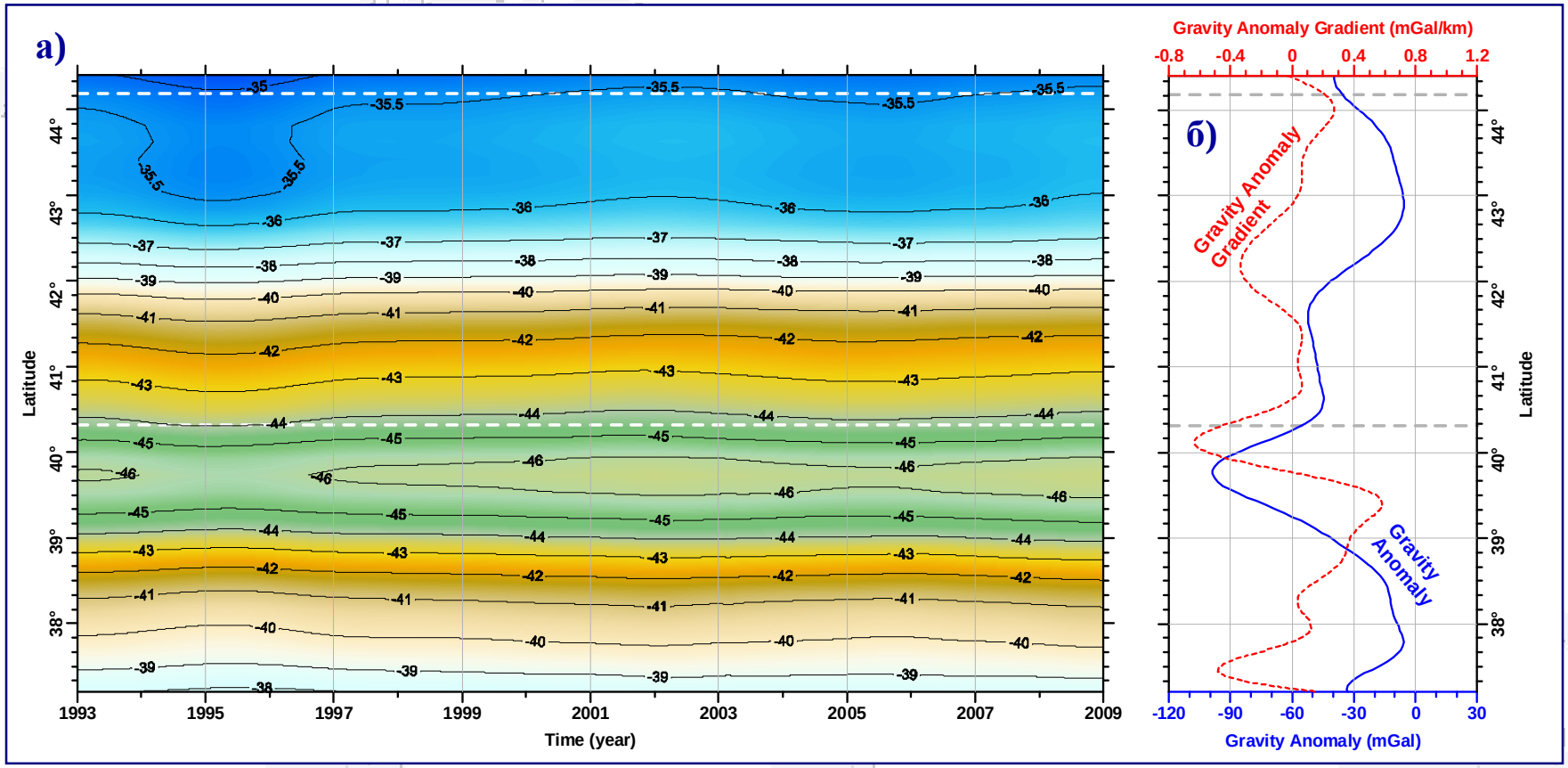
Высота геоида (м) по модели EGM2008 с разложением на гармонические составляющие до 360 степени.



Аномалии силы тяжести (мГал) по модели EGM2008 с разложением на гармонические составляющие до 360 степени.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

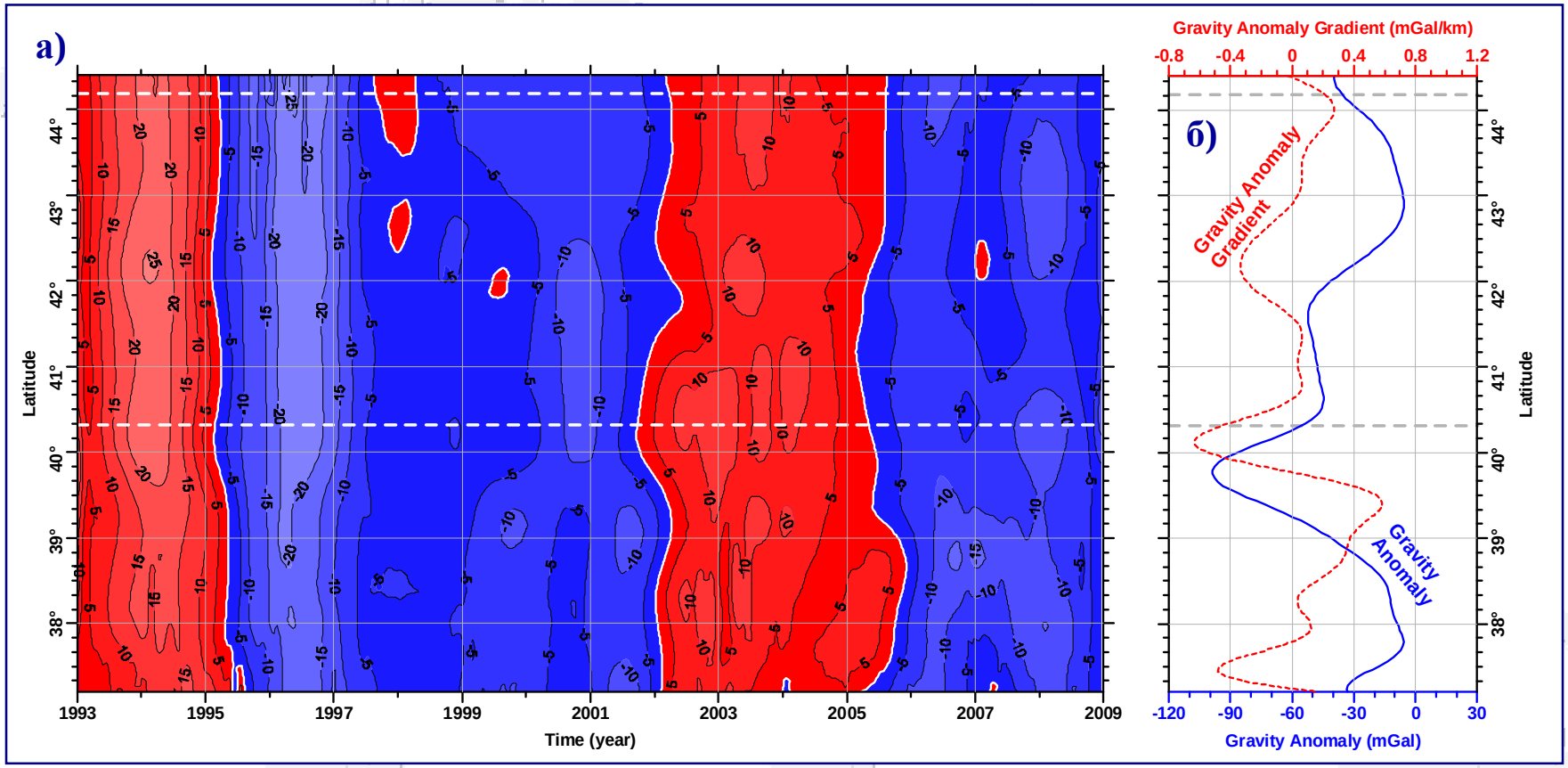
Изменчивость СВМП и аномалий силы тяжести вдоль 092 трека



(а) Временная изменчивость СВМП (м) вдоль 092 трека с сентября 1992 по декабрь 2008. (б) Изменчивость аномалий силы тяжести (синяя линия) и ее градиента (красная пунктирная линия) рассчитанные по модели EGM2008. Пунктирная линия показывает границу между Северным, Среднем и Южным Каспием

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

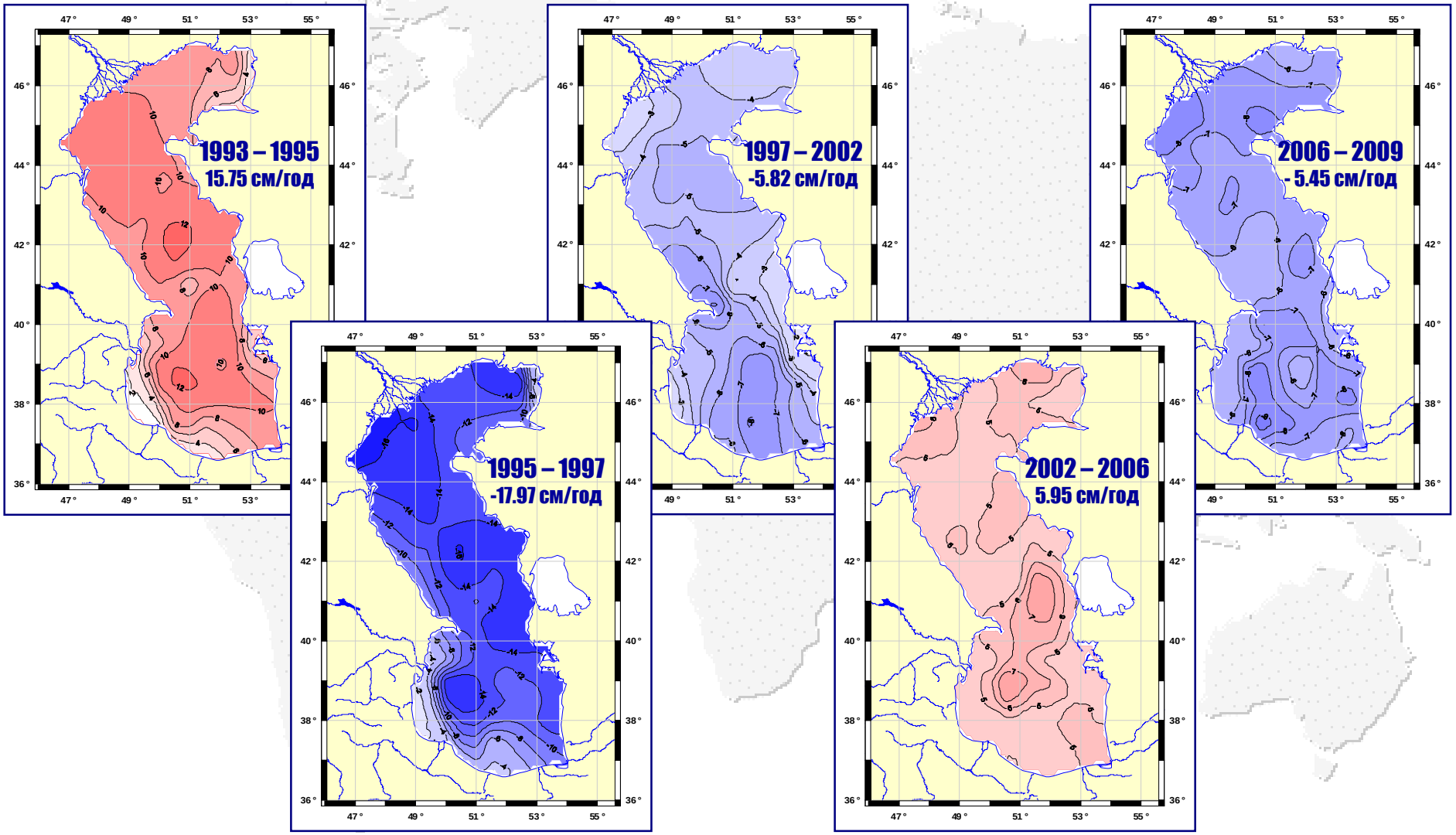
Изменчивость скорости роста СВМП и аномалий силы тяжести вдоль 092 трека



(а) Временная изменчивость скорости роста СВМП (м) вдоль 092 трека с сентября 1992 по декабрь 2008. Красным цветом выделены периода роста уровня, синим – падения. (б) Изменчивость аномалий силы тяжести (синяя линия) и ее градиента (красная пунктирная линия) рассчитанные по модели EGM2008.

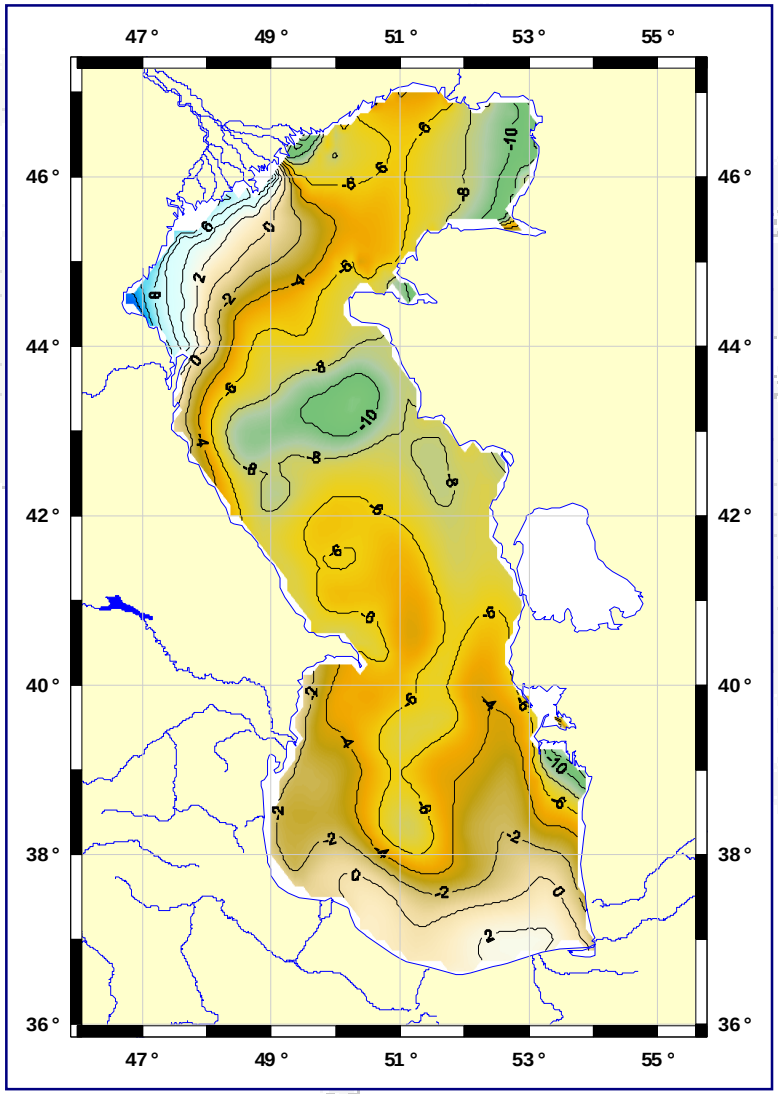
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Пространственно-временная изменчивость уровня Каспийского моря



© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Синоптическая изменчивость динамической топографии

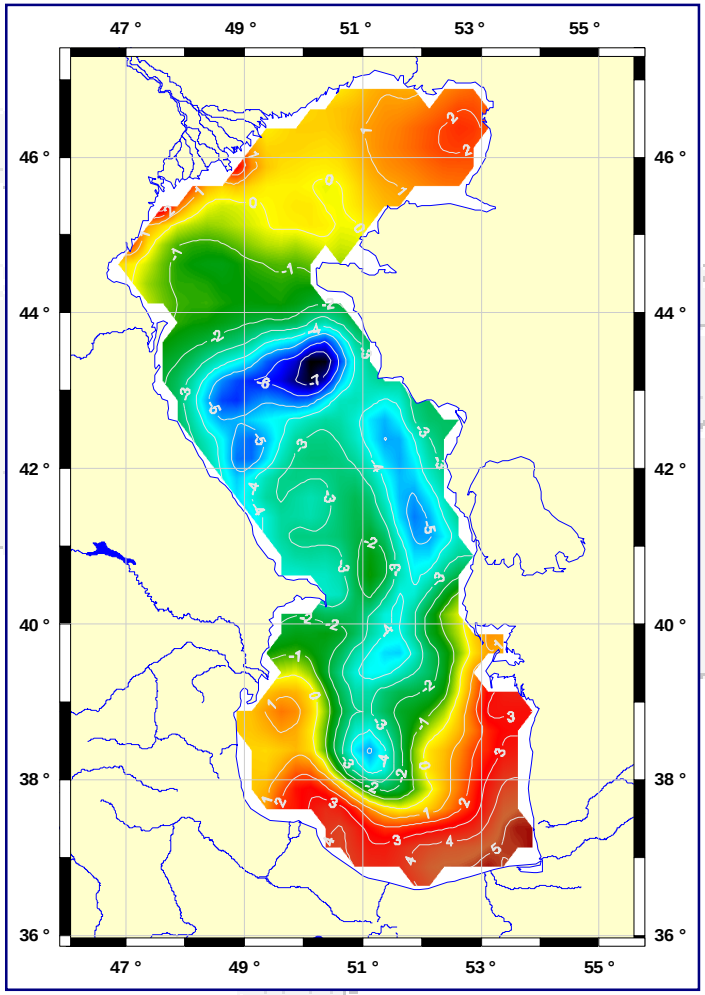


Карты синоптической динамической топографии Каспийского моря строились как суперпозиция среднеклиматической динамической топографии и аномалий уровня, рассчитанных относительно модели СВМП GCRAS09 Геофизического центра РАН

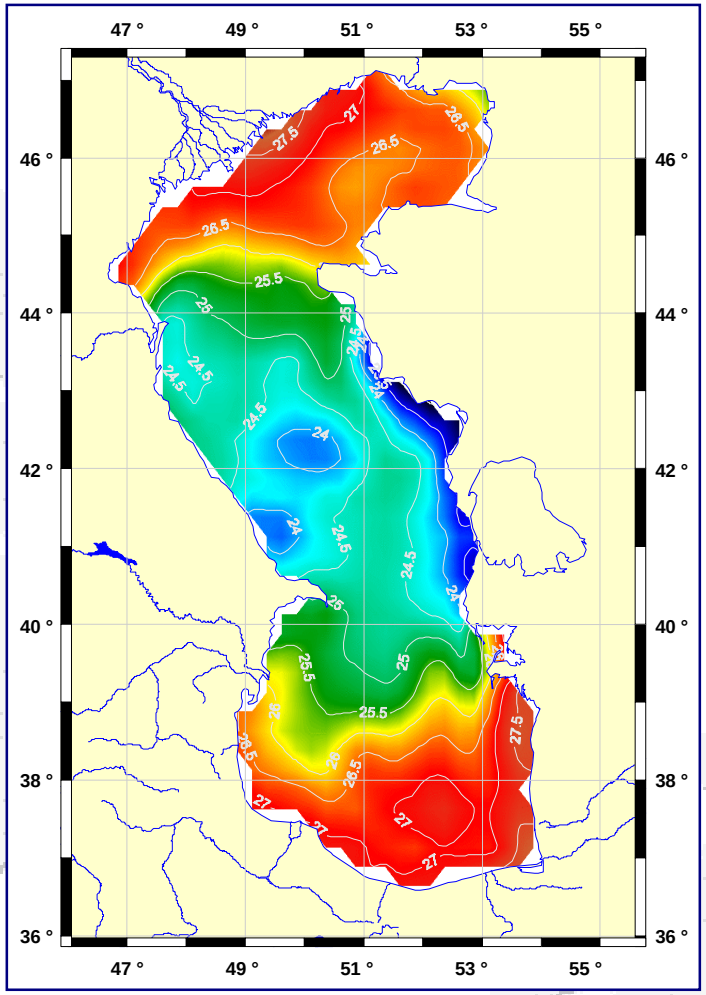
Среднеклиматическая динамическая топографии Каспийского моря, рассчитанная по модели трехмерной гидродинамической бароклинной модели со свободной поверхностью, созданной сотрудниками Лаборатории морских прикладных исследований Гидрометцентра России

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Динамическая топография Каспийского моря



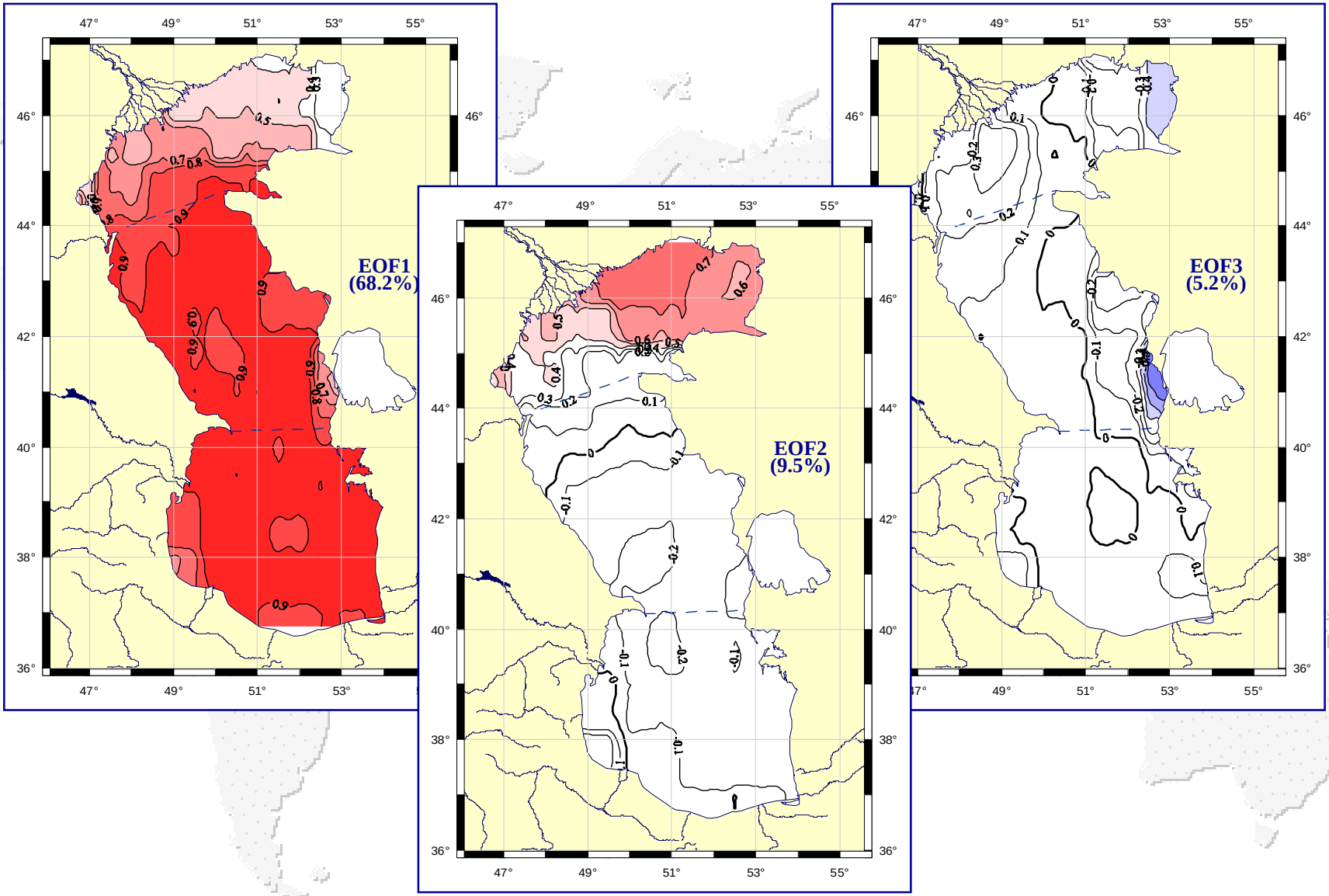
Климатическая динамическая топография (см) Каспийского моря, рассчитанная по модели ЛПМИ Гидрометцентра РФ



Синоптическая динамическая топография Каспийского моря на 6 июня 2008 по данным спутниковой альтиметрии

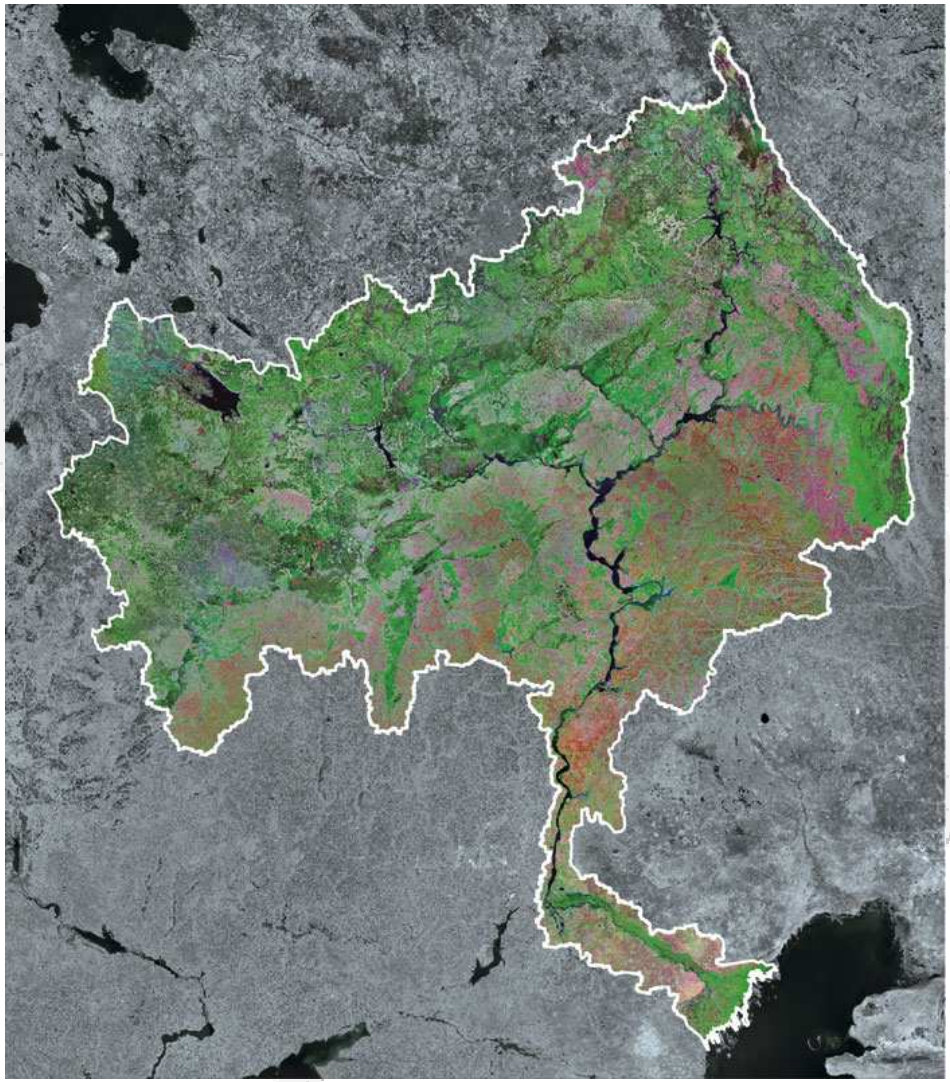
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Разложение аномалий уровня по EOF



© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Речной сток. Река Волга

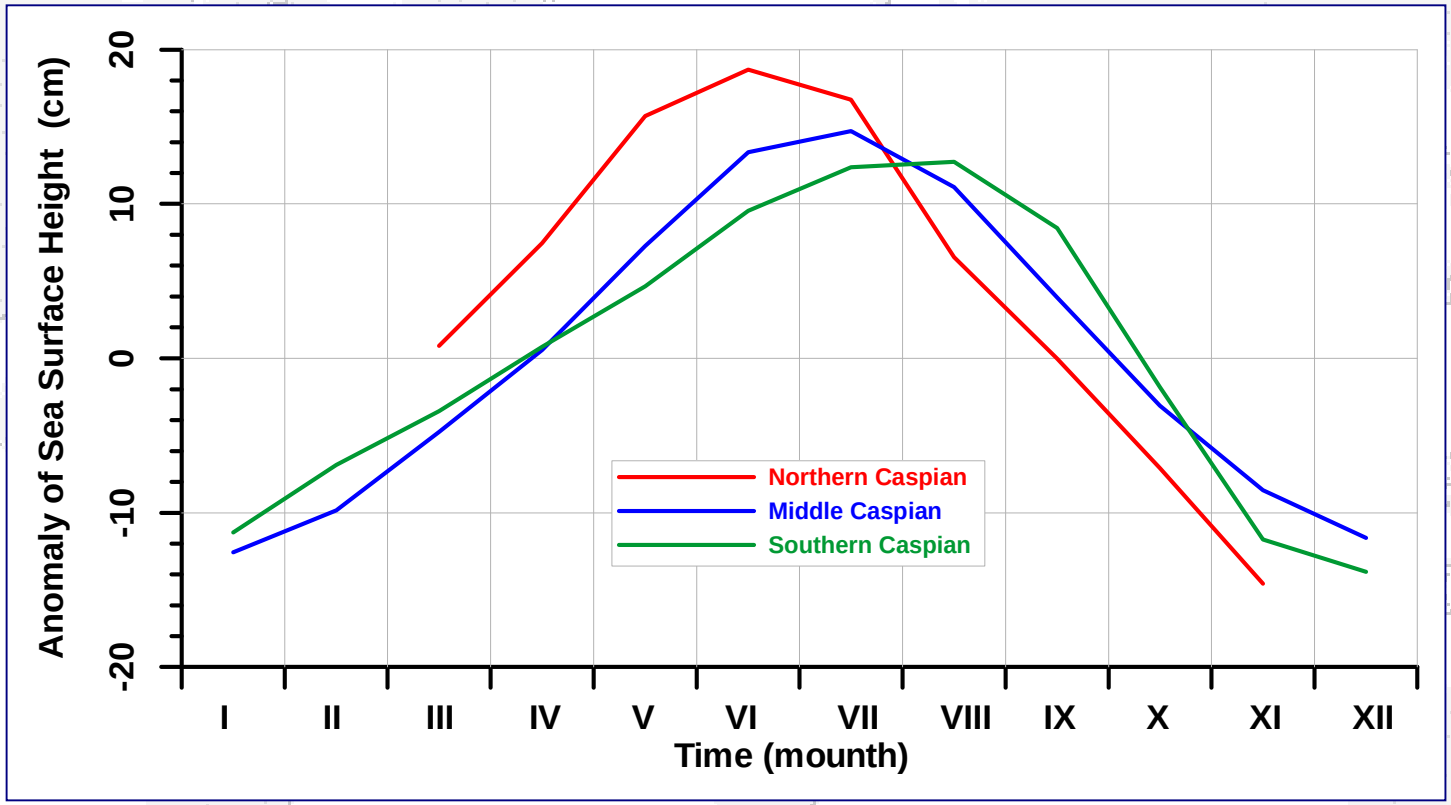


Being an enclosed water basin, the Caspian Sea is strongly affected by the river input. Among more than 130 rivers entering the Caspian Sea, the most important is the Volga that provides more than 78% of total input.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Продвижения волны паводка

Thus problem of flood wave propagation is important task for investigation of the Caspian Sea hydrological regime



Usually flood wave is obtained in middle of June on the North Caspian and middle of August on the South Caspian

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Модель продвижения волны паводка

The one-dimensional gradually varied unsteady water flow in open channels or rivers with arbitrary cross-sections and fixed bed is governed by the Saint-Venant hydrodynamic equations

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q}{S}\right)+\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q}{S}\right)^2+g\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{Q|Q|}{D^2}=0 \qquad (2)$$

where:

- x – **spatial longitudinal coordinate,**
- t – **time,**
- $Q = Q(x, t)$ – **river discharge,**
- $S = S(H, x, t)$ – **wetted cross-section,**
- $H = H(x, t)$ – **surface level measured from a fixed plane of reference,**
- g – **acceleration of gravity,**
- $D = D(x, t)$ – **conveyance, conveniently related to the frictional resistance to the flow**

Equations (1) and (2) represent conservation of mass and momentum, respectively.

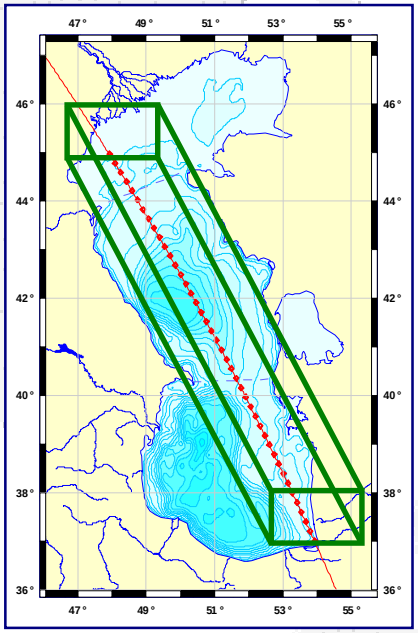
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Модель продвижения волны паводка

In a first approximation the Caspian Sea was approximated as channel with a rectangular cross-section. Channel axis coincided with the sea longitudinal axis or location of descending pass 092 of satellites TOPEX/Poseidon (T/P) and Jason-1/2 (J1/2).

Two assumptions are using:

- **The Saint-Venant hydrodynamic equations system (1)–(2) is considered without inertial members.**
- **On water surface effective evaporation** $E_{effect} = E - P$ **(difference of evaporation** E **and precipitation** P **) play the key role. In this case** $Q = Q_R(0, t) - E_{effect}(x, t)$**, where** Q_R **is the Volga river discharge.**



According to assumptions this system of the equations takes on following form:

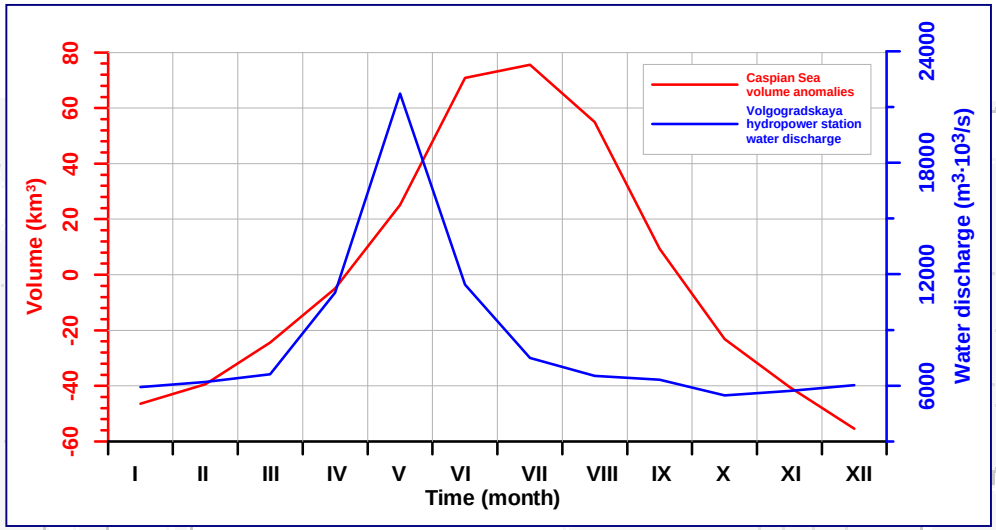
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q_R}{\partial x} = \frac{\partial E_{effect}}{\partial x} \qquad (3)$$

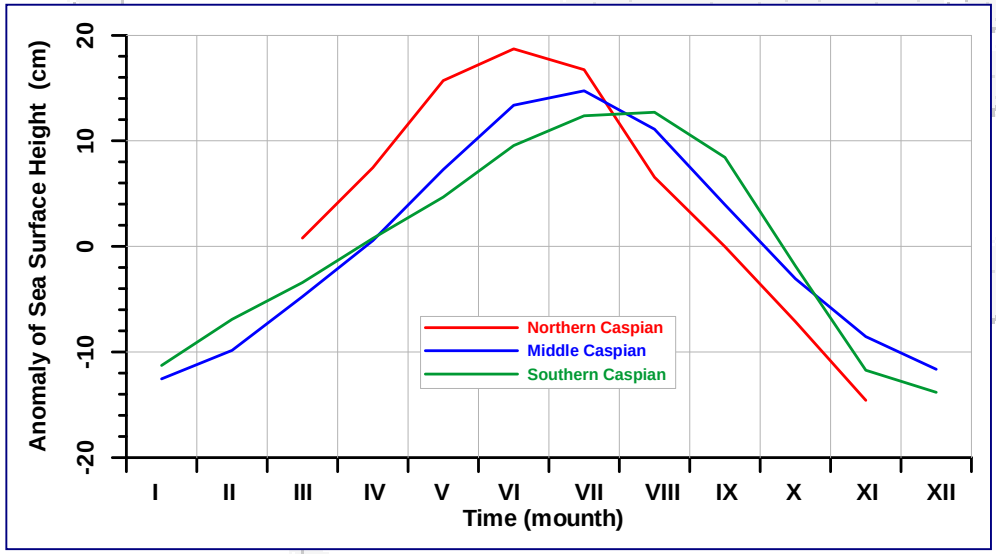
$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q}{S}\right) + g\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q^2}{\overline{D}^2} = 0 \qquad (4)$$

where D **is the conveyance, conveniently related to the frictional resistance to the flow.**

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Аппроксимация стока Волги





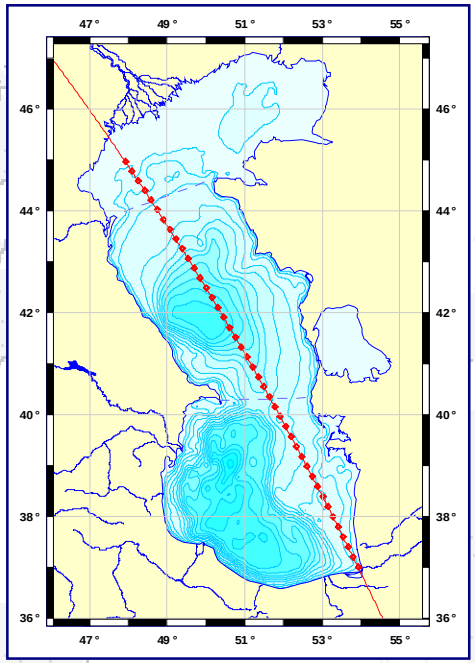
Analysis of Volgogradskaya hydropower station water discharge, the Caspian Sea volume anomalies and seasonal variability of sea surface height anomaly in the Northern, the Middle and the Southern Caspian show that Q_R can approximate the next function:

$$Q_R = a\, e^{-bt^2} \qquad (5)$$

where a and b are empirical parameter.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

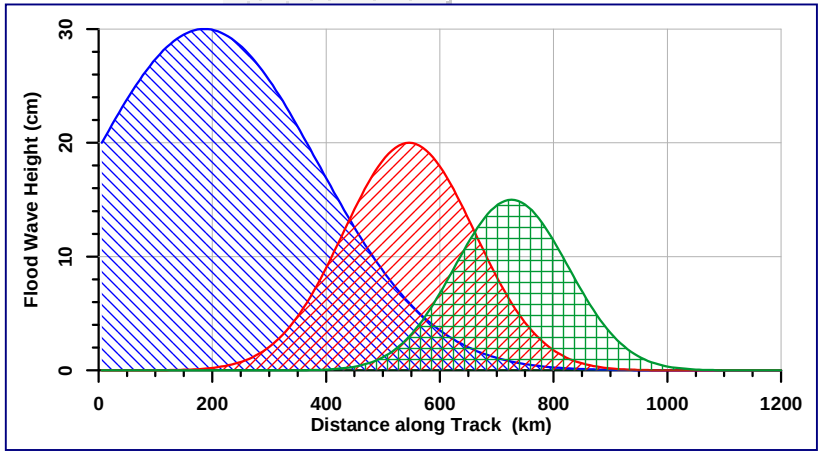
Аппроксимация стока Волги



Equations system (3)–(4) **simultaneously with** (5) **gives the next picture of Volga flood wave propagation and next formula for flood wave:**

$$H(t) = A(t)\, e^{-B(t)t^2}$$

where $A(t)$ **and** $B(t)$ **are empirical function which are calculated on based satellite altimetry measurements of SSH anomaly.**



Variability of flood wave height along 092 track T/P and J1/2 was used according to simulation data on time.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Верификация модели

Validation and correction this flood wave propagation model on based satellite altimetry data realize to the following steps:

- **Position of flood wave detect as location of maximum of SSH anomaly along track for each T/P and J1/2 satellite altimetry repeat cycle *n*.**
- **Amplitude of flood wave $A(t_n)$ are determine as maximum value of SSH anomaly for each satellite altimetry repeat cycle *n*.**
- **Calibration factor $B(t_n)$ determined of flood wave length along track calculated as minimization of next functional**

$$J = \min \left| \int SSHa_n \, dl - \int H(t_n) \, dl \right|$$

where *n* is index cycle of repeat altimetric measurement, $SSHa_n$ is anomaly of sea surface height for *n*–cycle, t_n is model time corresponding to time of *n*–cycle and $H(t_n)$ is solution of flood wave model for model time t_n.

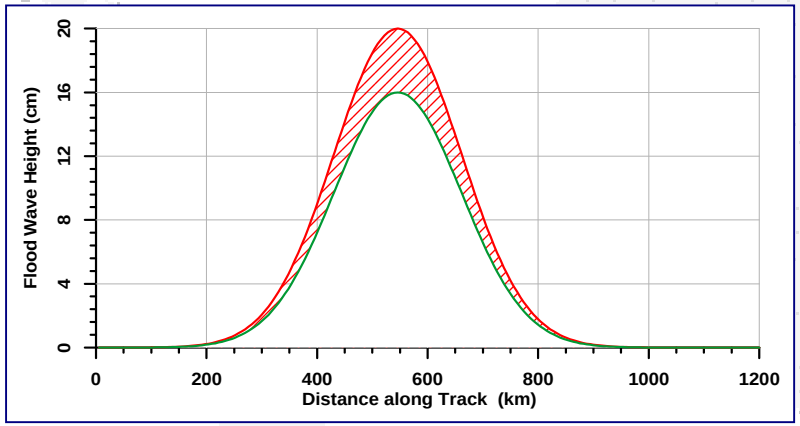
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Верификация модели

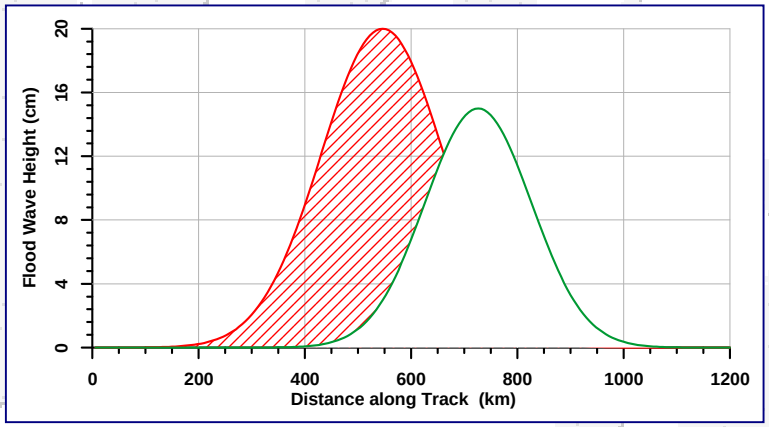
According to this model for two successive satellite altimetry cycles *n* and *n+1*:

$$\int SSHa_{n+1}\,dl - \int SSHa_n\,dl = \int H(t_{n+1})\,dl - \int H(t_n)\,dl = E_n + K$$

where E_n is integral effective evaporation for time period between two cycles and K is SSH anomaly change caused by flood wave propagation.



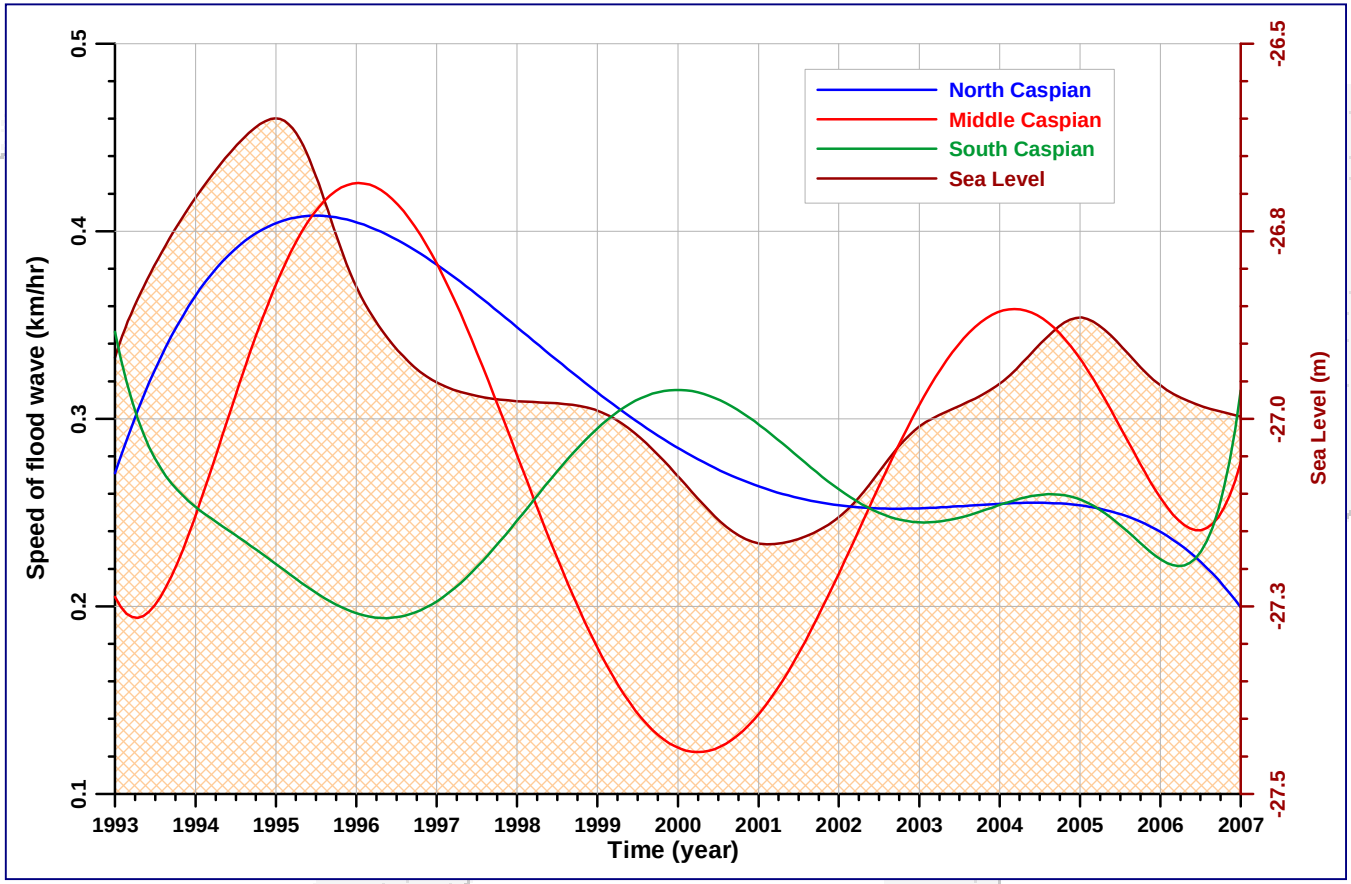
Variability of flood wave height was caused effective evaporation E_n.

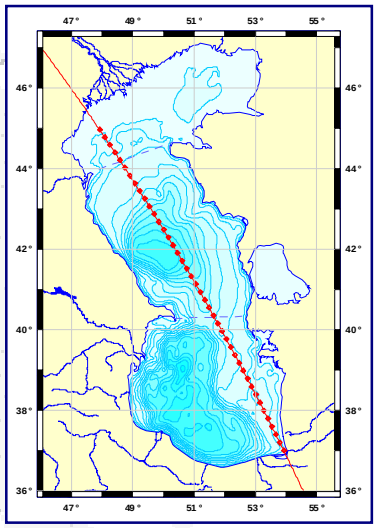


Variability of flood wave height was caused flood wave propagation K and E_n.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Скорость волны паводка



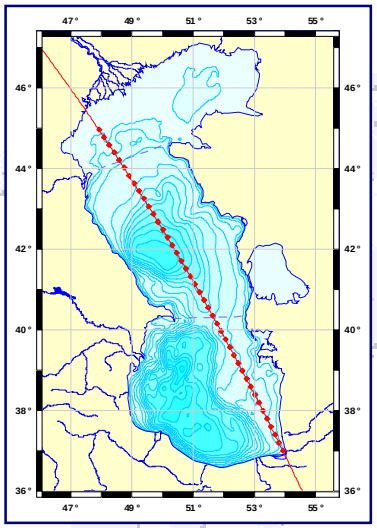


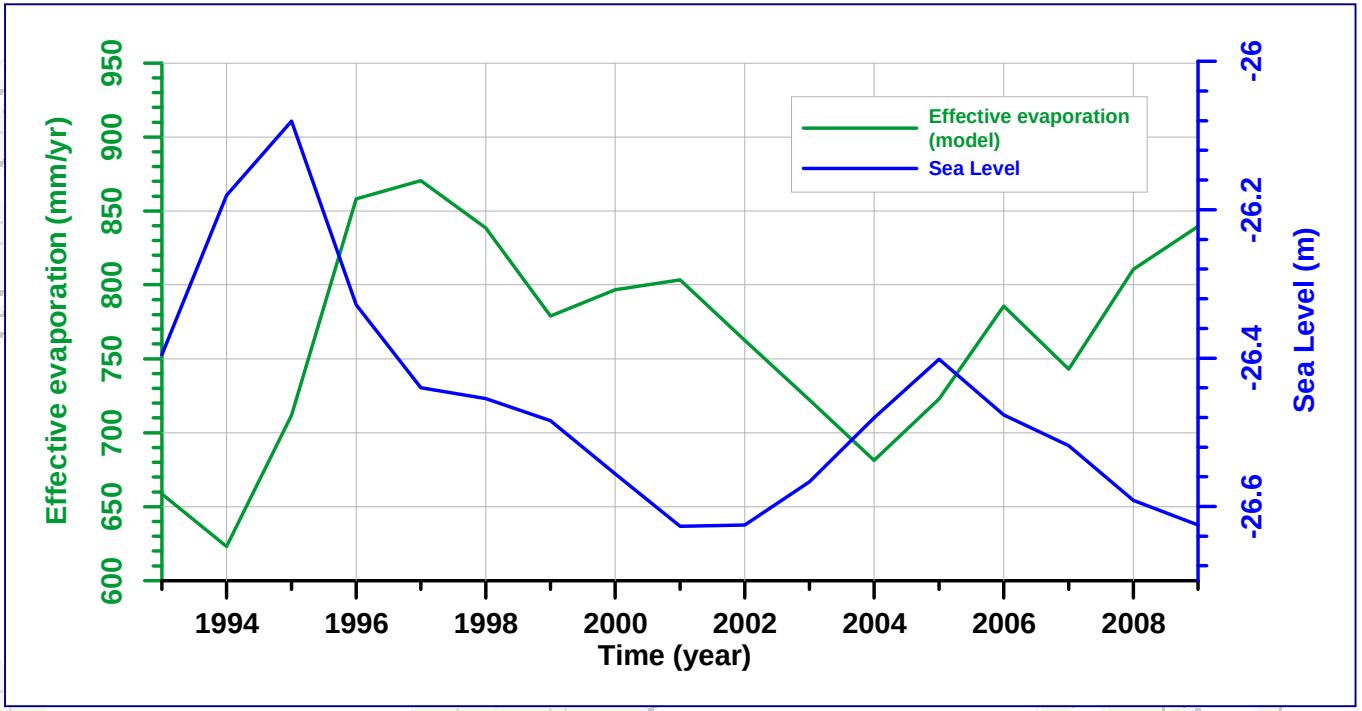
Correlation coefficient between flood wave speed on the Northern Caspian calculated by model and sea level variability is 0.751.

Suggested model can also calculate of flood wave propagation speed along descending 092 track. Periods of sea level rise are corresponding with temporal interval increase of flood wave propagation speed on the North Caspian.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Эффективное испарение



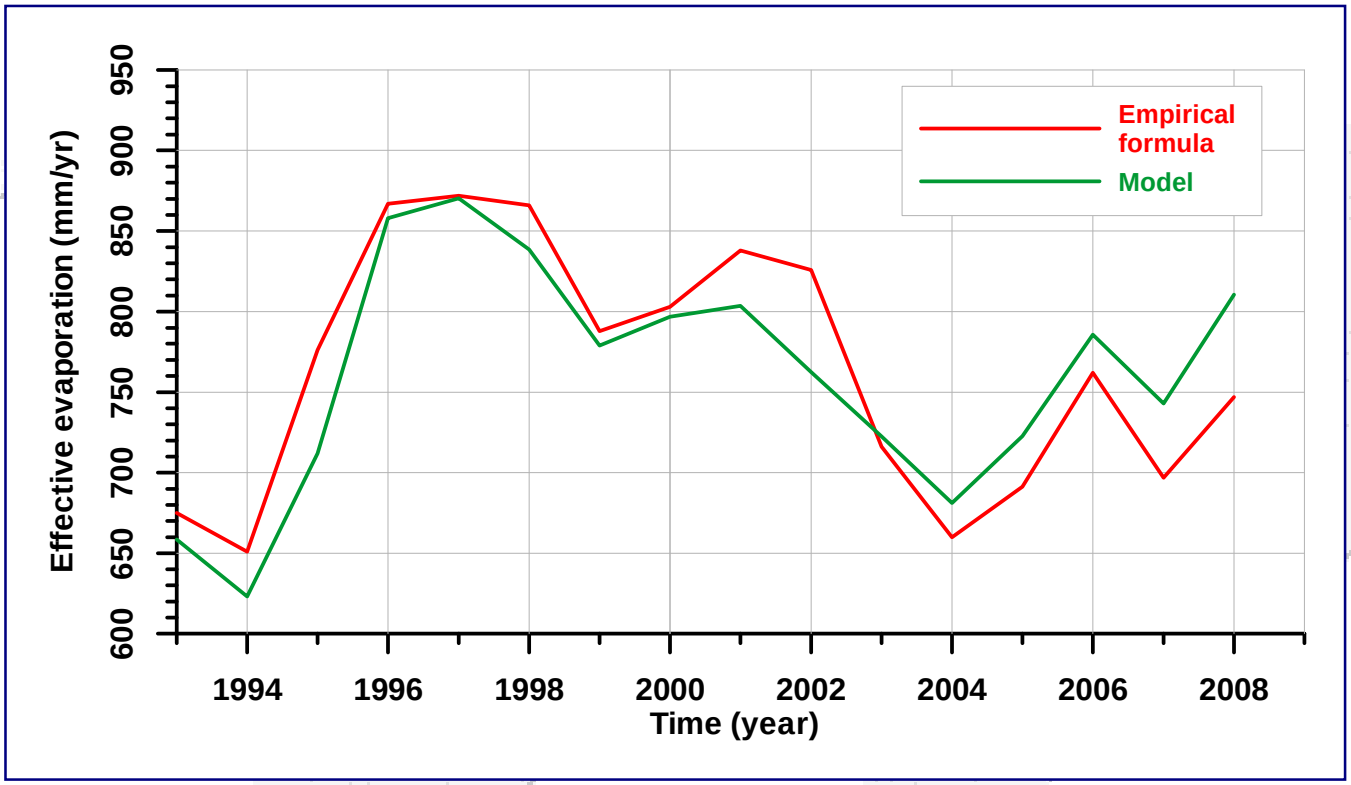


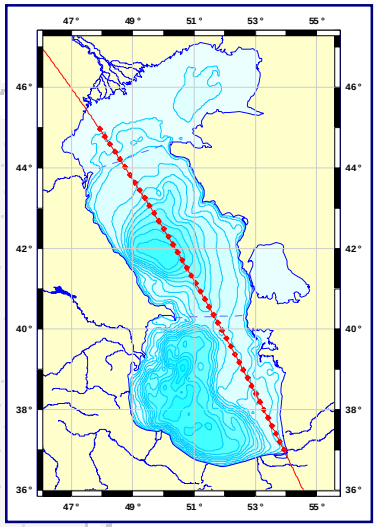
Correlation coefficient between effective evaporation calculated by model and the Caspian Sea level variability is -0.697.

Temporal variability effective evaporation fine conforms to annual of the Caspian Sea level variation. Time period of sea level rise correlation with decrease of effective evaporation. This confirm hypothesis about strong influence interannual change atmospheric parameters on variability of the Caspian sea level.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Эффективное испарение

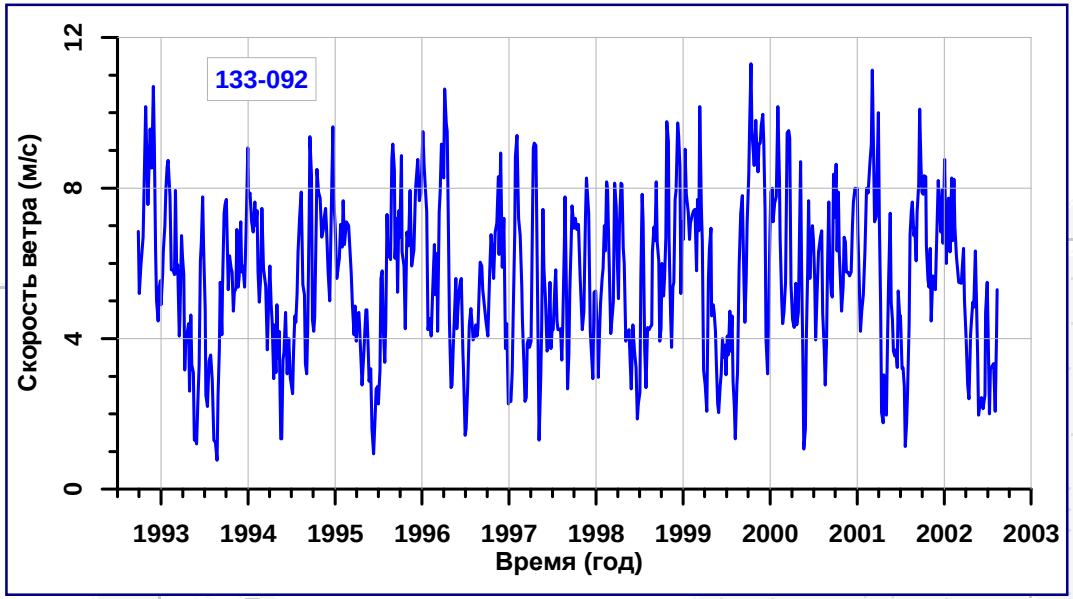




Correlation coefficient between effective evaporation calculated by empirical formula and by model is 0.895.

Interannual variability of the Caspian Sea effective evaporation was based on difference method. Interannual evaporation trend calculated on empirical formula with using meteorological data have value - 3.15±2.3 mm/yr for time period from 1993 to 2009. This model give positive value interannual evaporation trend as 2.17±0.93 mm/yr.

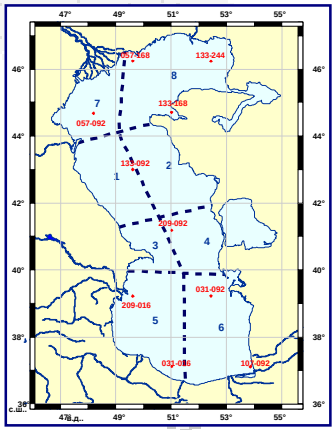
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.



Ветровой режим

Изменчивость скорости приводного ветра в точке пересечения 133-092 в Среднем Каспии

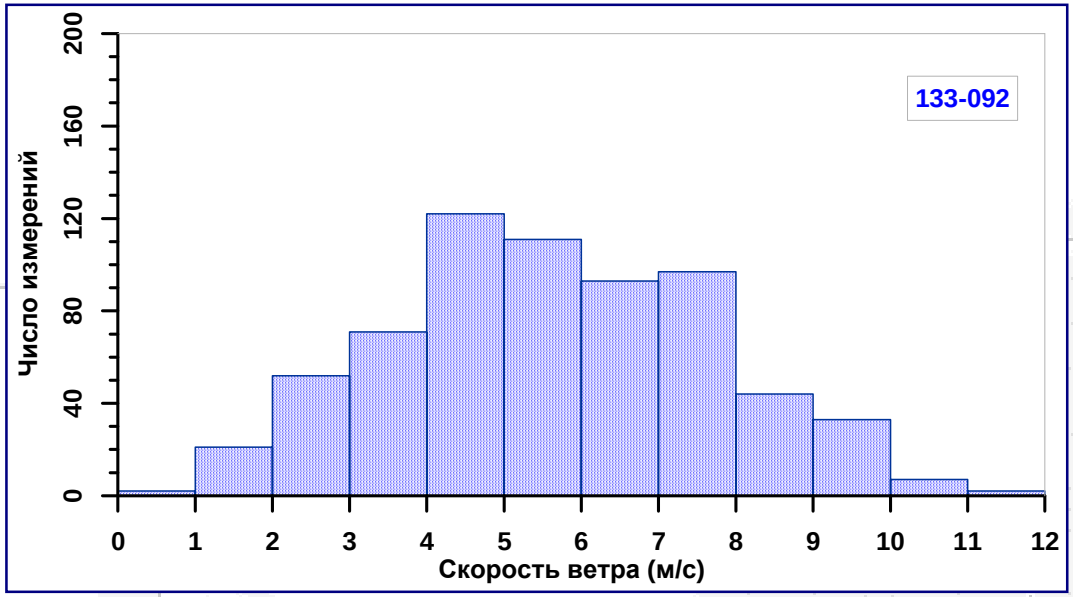
Статистка вариаций скорости приповерхностного ветра с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрии спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 в точках пересечения треков



Район	Номер района	Точка пересечения	Среднее значение, *(м/с)*	Средне-квадратичное отклонение, *(м/с)*	Макси-мальный размах, *(м/с)*
Северный Каспий	8	133-244	4.3	1.5	3.4
	7	057-092	4.9	1.9	3.9
Средний Каспий	1	133-092	5.6	2.1	3.9
	4	209-092	5.7	2.2	4
Южный Каспий	5	209-016	4.3	1.8	3.8
	5	031-016	3.3	1.7	4
	6	031-092	4.9	1.8	3.9

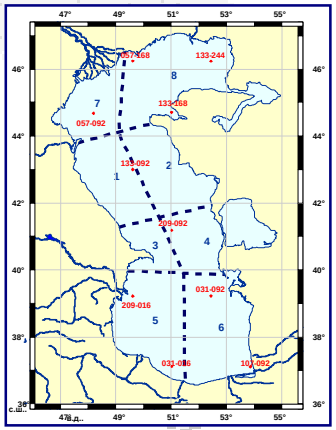
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Ветровой режим



Гистограмма распределения скорости приводного ветра в точке пересечения 133-092 в Среднем Каспии

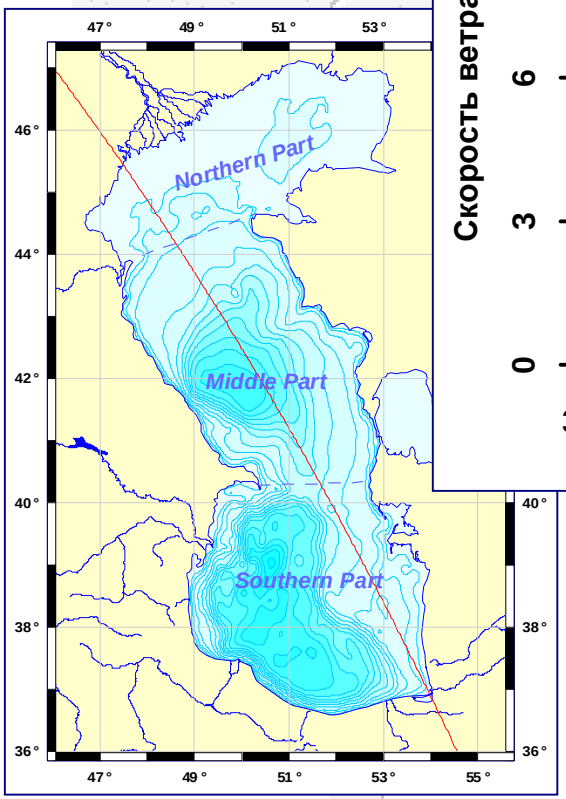
Повторяемость скорости приповерхностного ветра с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрии спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 в точках пересечения треков

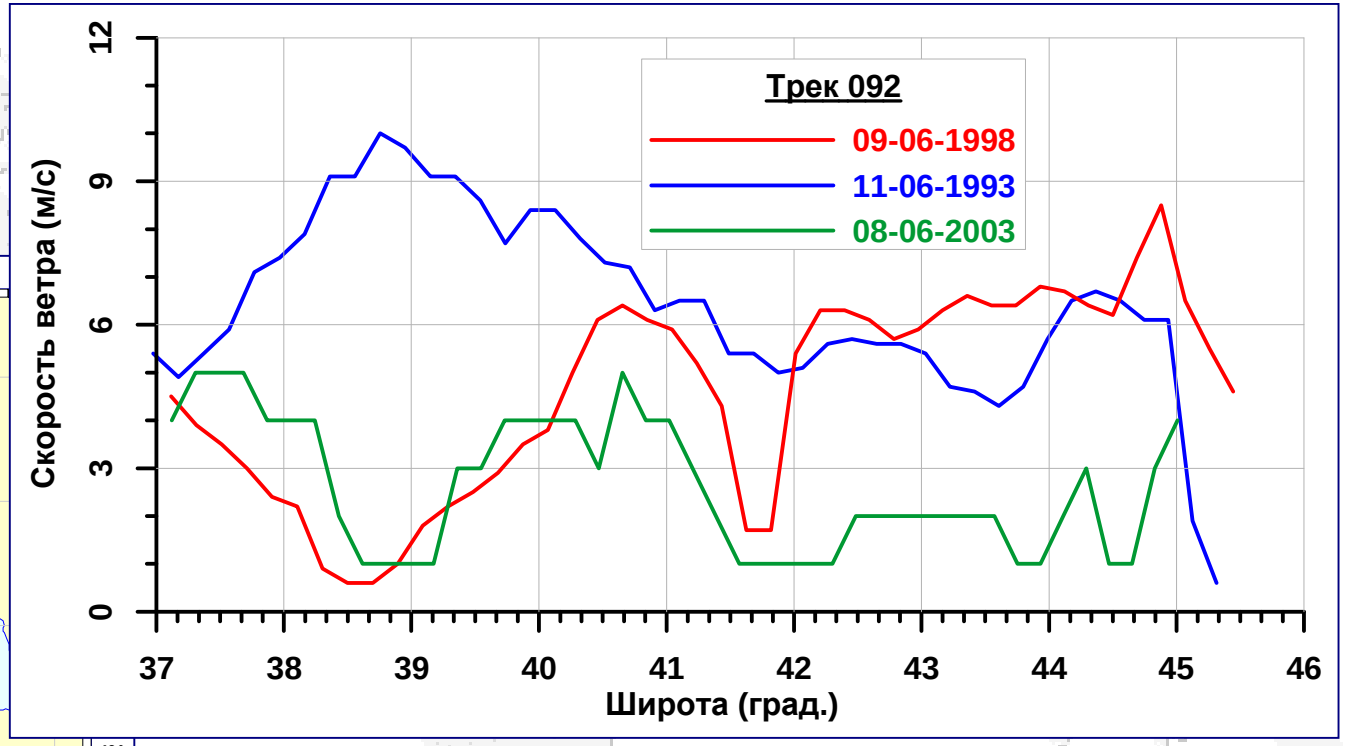


Район	Северный Каспий		Средний Каспий		Южный Каспий		
Точка пересечения	133–244	057–092	133–092	209–092	209–016	031–016	031–092
Номер района	8	7	1	4	5	5	6
Интервал скорости ветра	Повторяемость, %						
< 1	0.4	0.9	0.5	0.3	1.2	2.9	1
1 – 2	4.2	2.9	3.2	2.6	6.8	20.4	4
2 – 3	12.1	10.7	7.9	9	16.5	28.6	10
3 – 4	28.2	17.8	10.8	13.5	22.9	17.8	18.8
4 – 5	23.4	22.1	18.6	14.6	18.5	13.1	20.5
5 – 6	19.5	17.2	16.9	15.7	15.8	8.7	17.3
6 – 8	10.8	22.3	29	28.1	15	7.3	23.1
> 8	1.4	6.1	13.1	16.2	3.3	1.2	5.3

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Ветровой режим

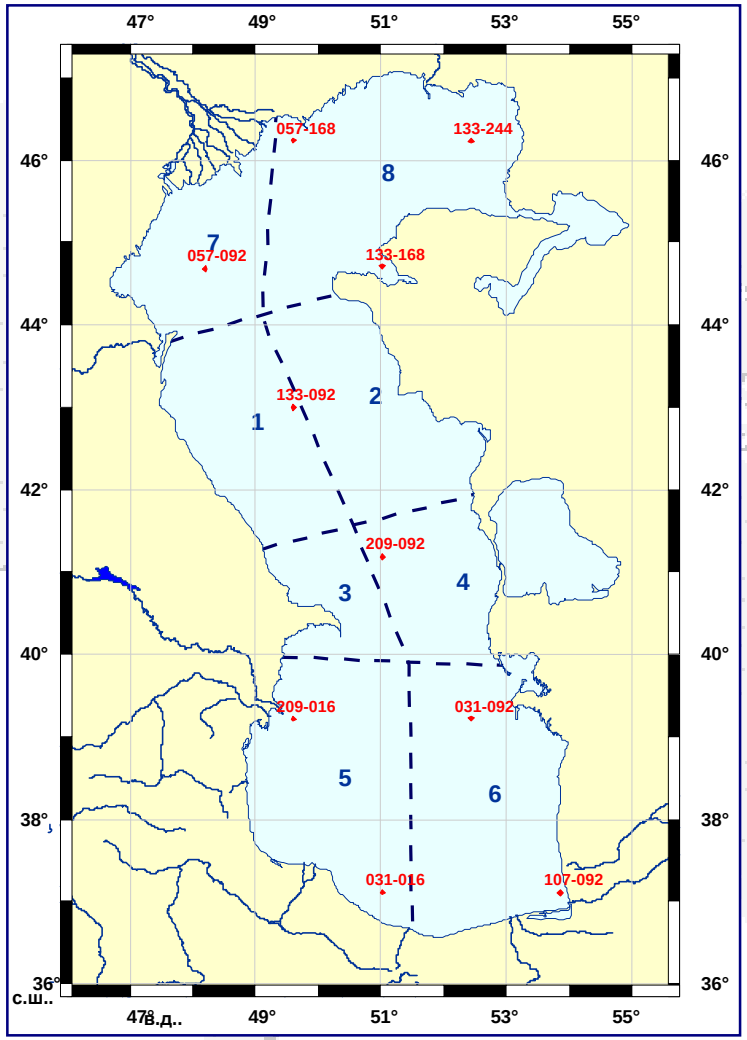




Изменчивость скорости приводного ветра вдоль 092 трека по данным альтиметрии спутника TOPEX/Poseidon

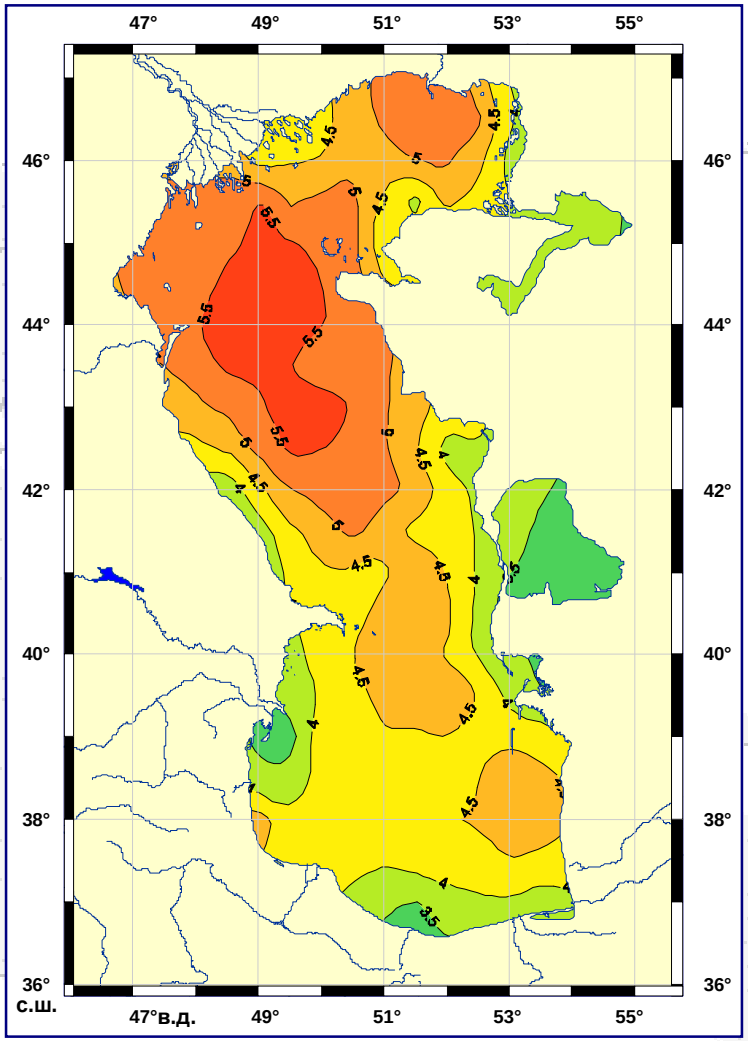
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Ветровой режим



Районирование по ветровым условиям:

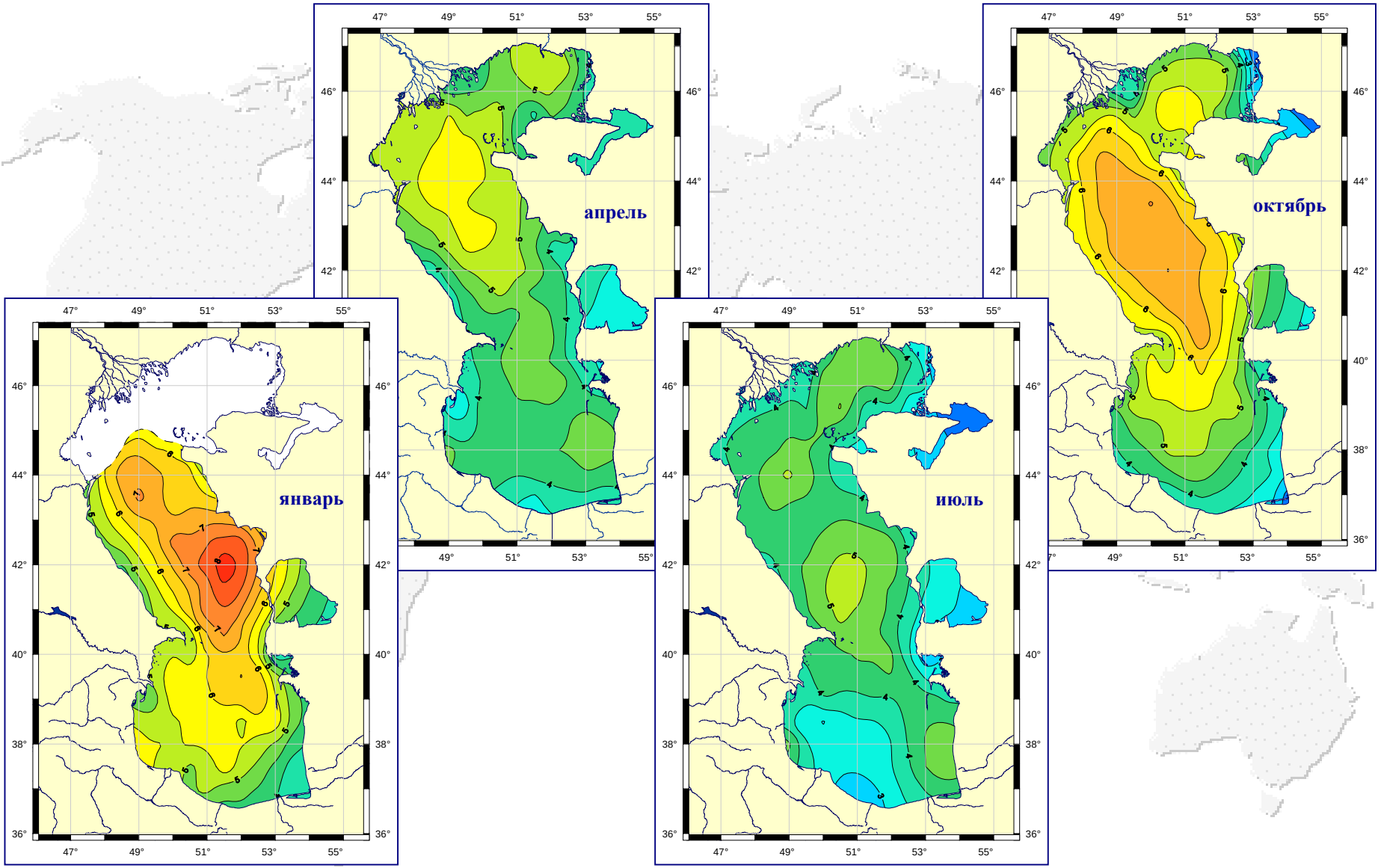
[Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1992]



Средняя за апрель скорость приводного ветра

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

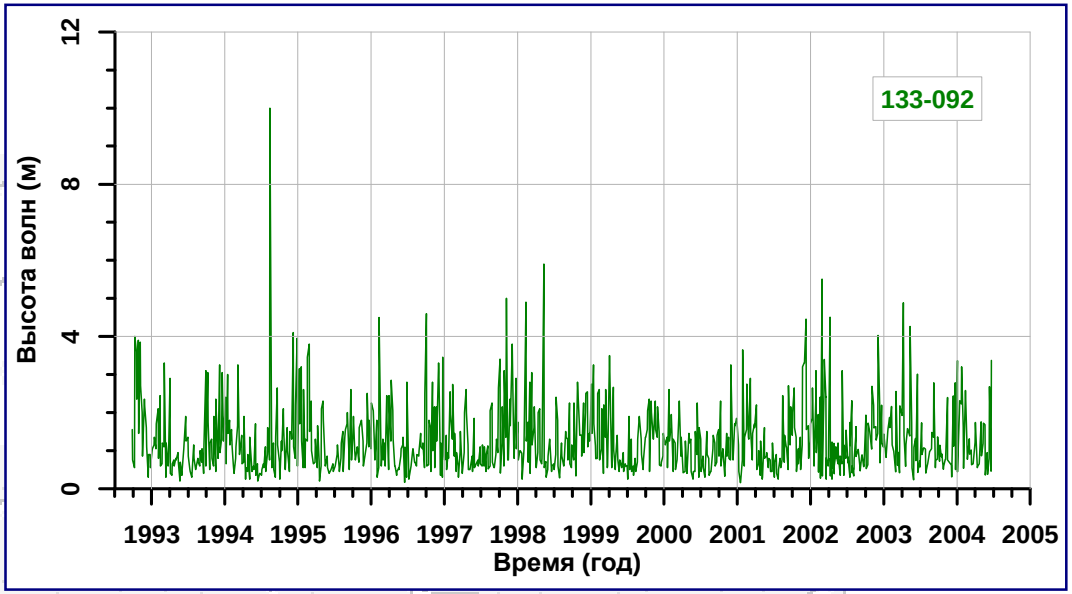
Ветровой режим



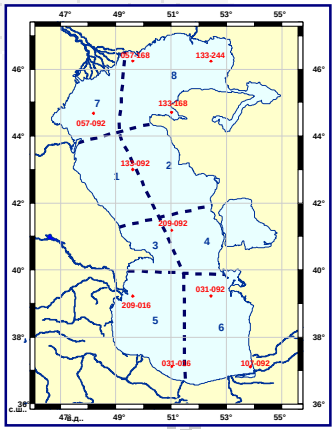
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Режим волнения

Изменчивость высоты волн в точке пересечения 133-092 в Среднем Каспии



Статистка вариаций высот волн с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрии спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 в точках пересечения треков

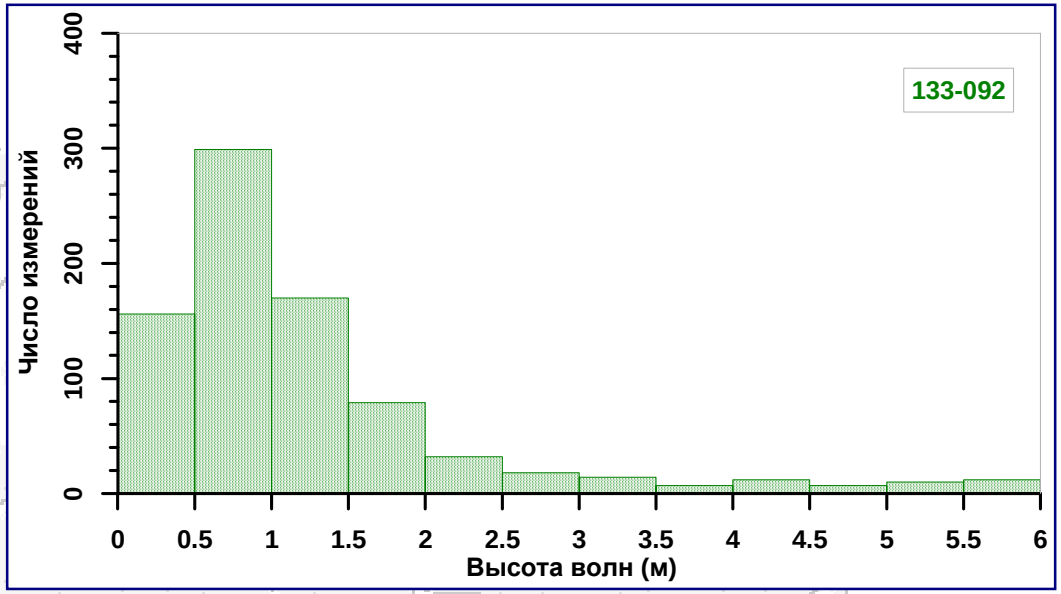


Район	Номер района	Точка пересечения	Среднее значение, *(м)*	Средне-квадратичное отклонение, *(м)*	Макси-мальный размах, *(м)*
Северный Каспий	8	133-244	4.3	1.5	3.4
	7	057-092	4.9	1.9	3.9
Средний Каспий	1	133-092	5.6	2.1	3.9
	4	209-092	5.7	2.2	4
Южный Каспий	5	209-016	4.3	1.8	3.8
	5	031-016	3.3	1.7	4
	6	031-092	4.9	1.8	3.9

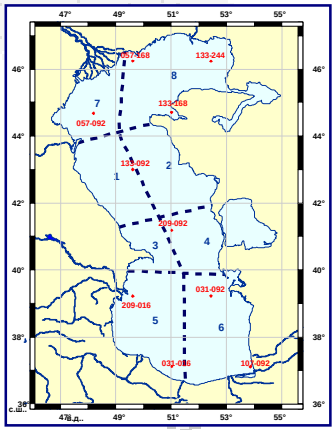
© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Режим волнения

Гистограмма распределения высот волн в точке пересечения 133-092 в Среднем Каспии



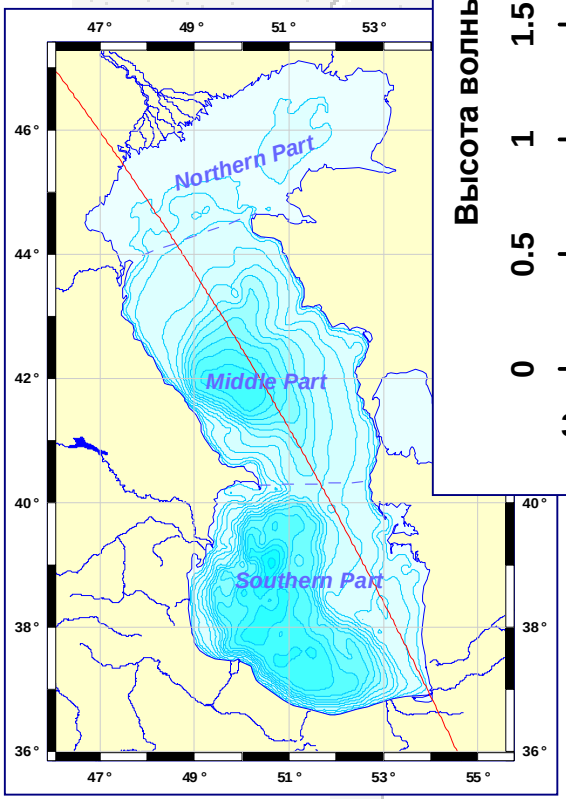
Повторяемость высот волн с сентября 1992 г. по декабрь 2009 г. по данным альтиметрии спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 в точках пересечения треков

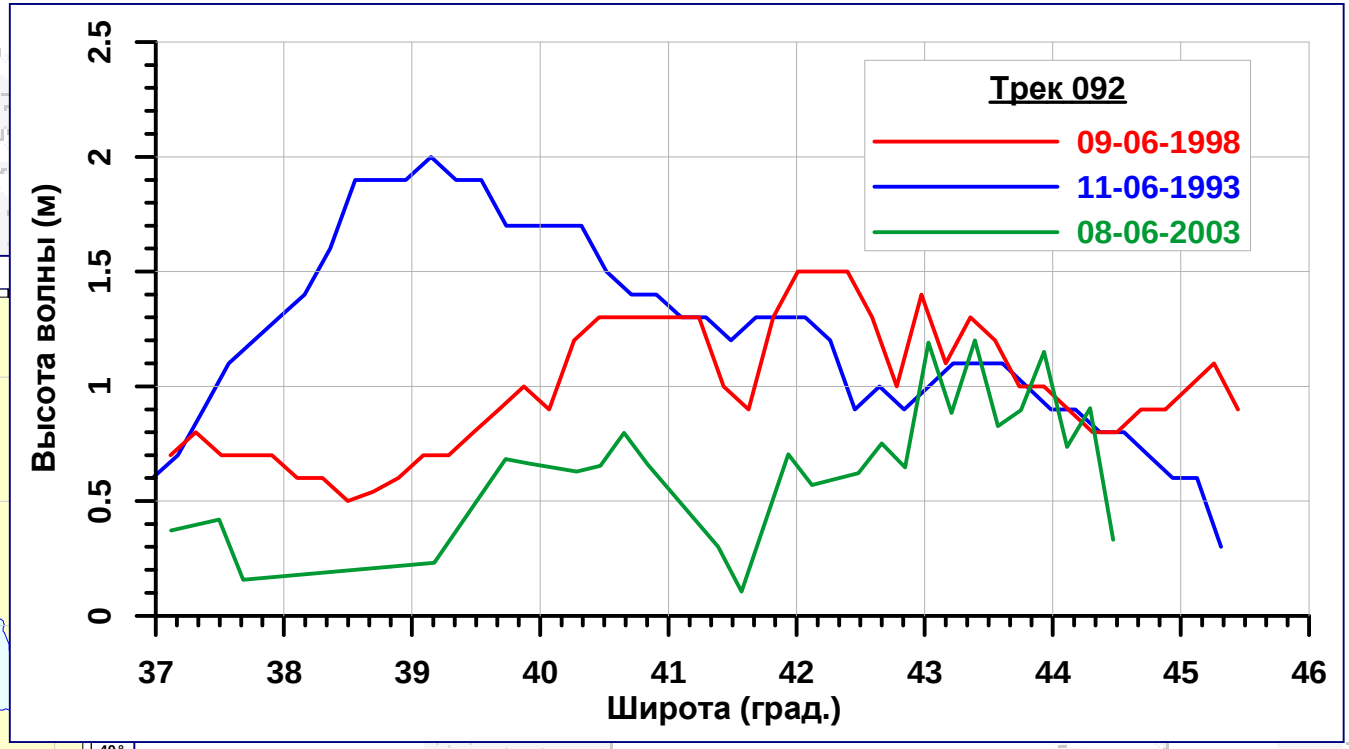


Район	Северный Каспий		Средний Каспий		Южный Каспий		
Точка пересечения	133-244	057-092	133-092	209-092	209-016	031-016	031-092
Номер района	8	7	1	4	5	5	6
Интервал высот волн	Повторяемость, %						
< 0.5	41.7	22.8	13.2	14.1	23.3	19.1	18.6
0.5 - 1.0	50.9	51.2	35.6	33.1	40.4	36.6	42
1.0 - 1.5	4.3	17.8	22.6	25.7	18.2	20.8	18.8
1.5 - 2.0	0.7	4.9	10.3	12.8	10.1	9.7	9.9
2.0 - 2.5	0.2	1.4	7.6	5.7	3.2	3.9	4.7
2.5 - 3.0	0.5	0.6	4.6	3.3	2	2.2	2.5
3.0 - 3.5	0.9	0.6	3.4	2.9	0.6	1.7	2.3
3.5 - 4.0	0.3	0.2	0.9	1.2	0.6	0.9	0.6

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Режим волнения

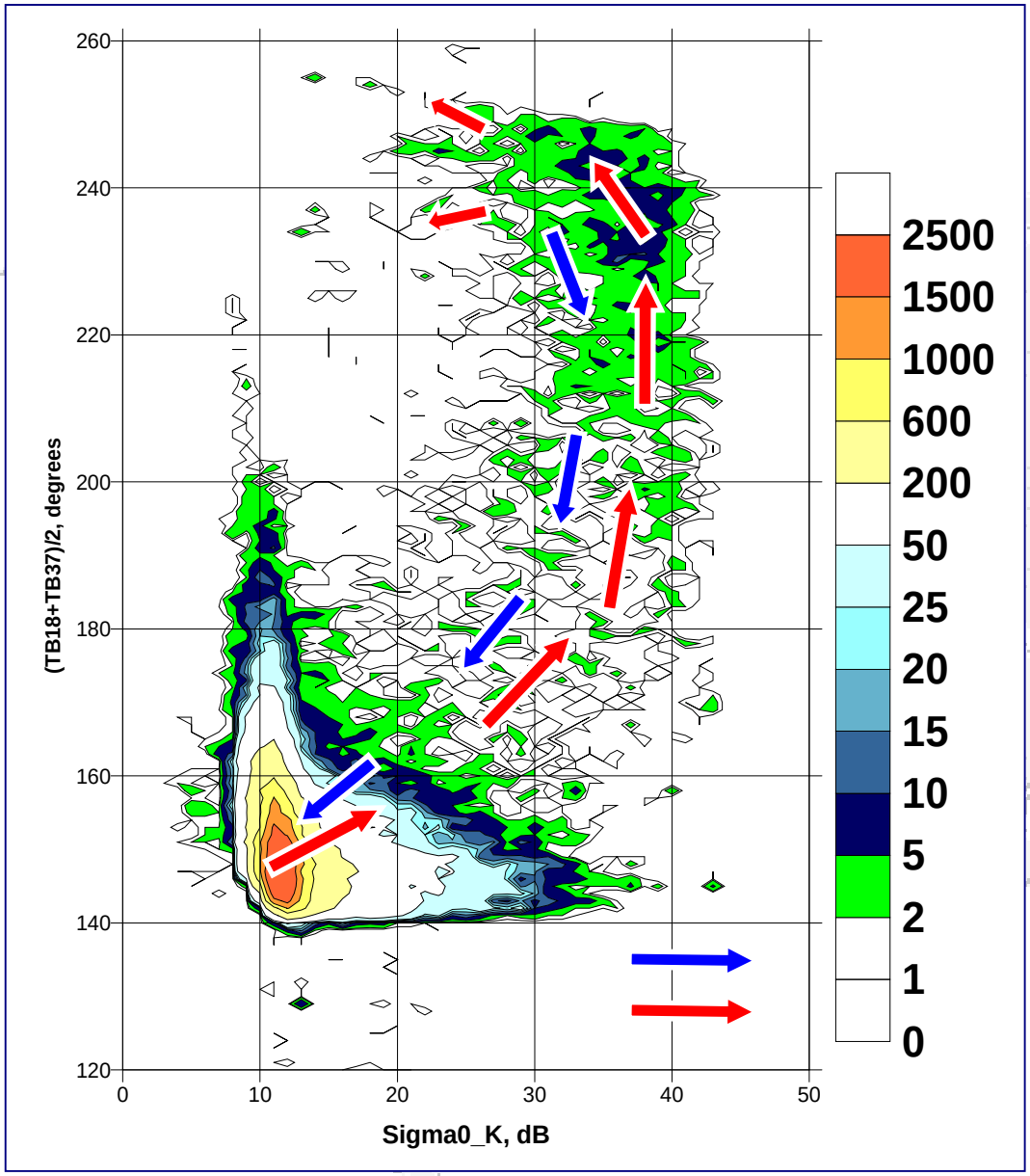




Изменчивость скорости значимой высоты волны вдоль 092 трека по данным альтиметрии спутника TOPEX/Poseidon

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

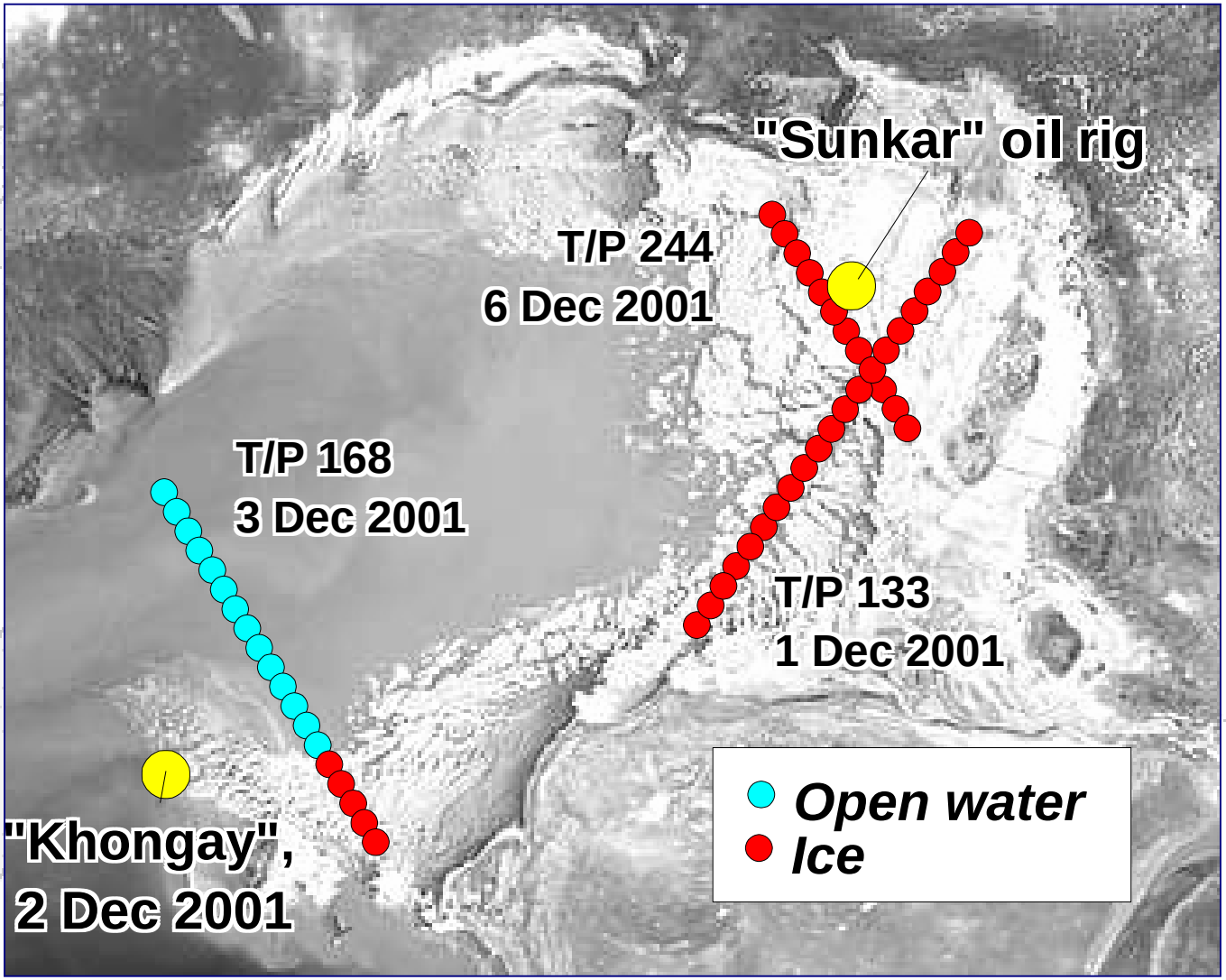
Ледовая обстановка



Распределение повторяемость наблюдений коэффициента обратного рассеяния по данным спутникового альтиметра и средней температуры поверхности, рассчитанной по данным каналов 18 и 37 ГГц бортового радиометра спутника TOPEX/Poseidon (октябрь 1992 – март 2002).

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Ледовая обстановка

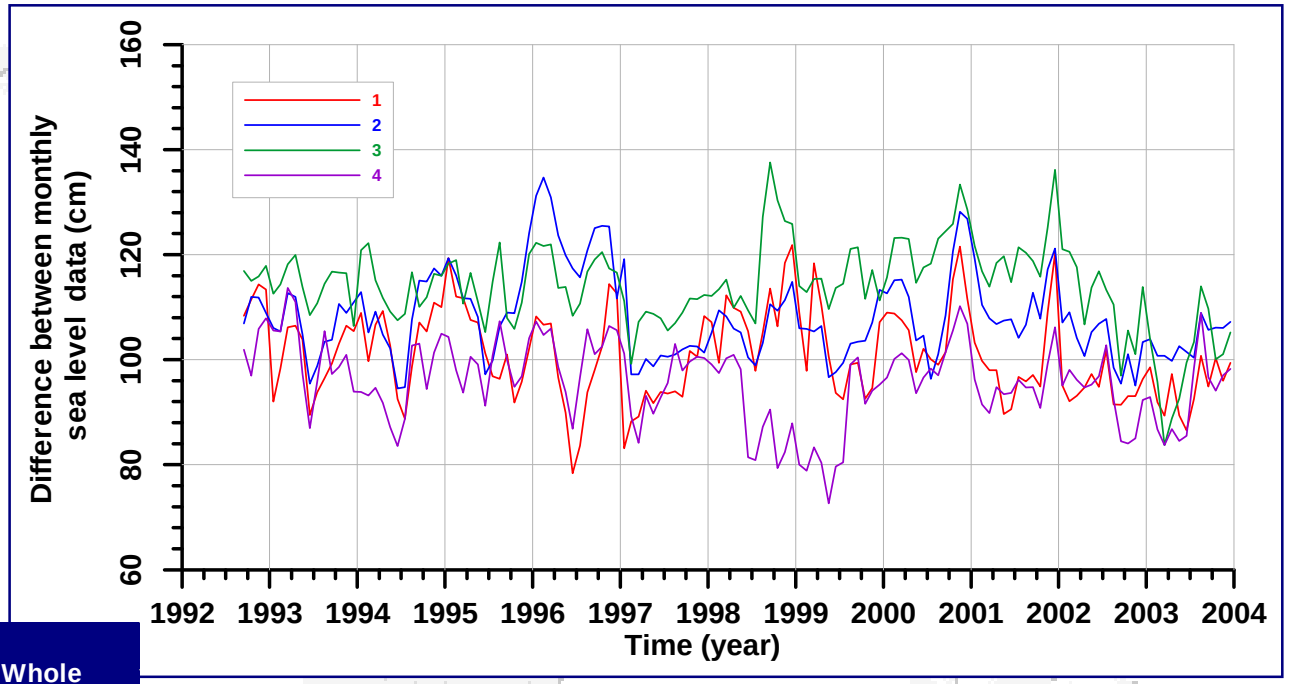


Распределение морского льда по данным MODIS на 3 декабря 2001 и данным альтиметра и радиометра спутника TOPEX/Poseidon

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

Оценка скорости вертикальных движений земной коры

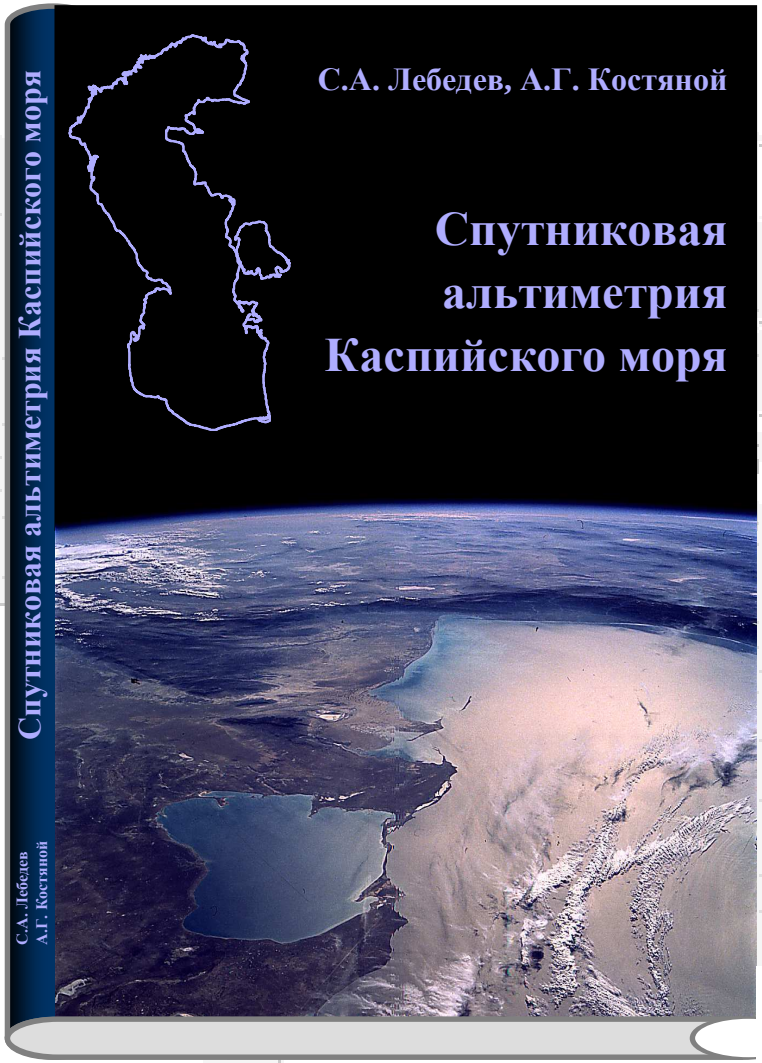
Value of the Earth's crust uplift was estimated basing on the difference between monthly (and/or annual) sea level gauge measurements and sea level derived from satellite altimetry data since October 1992 till December 2005. numerator is monthly data, denominator is annual data



Level gauges		Whole Sea *(altimetry)*
Middle Part	Makhachkala	-0.449 -0.455
	Fort Shevchenko	-0.459 -0.446
Southern Part	Turkmenbashi	-0.459 -0.446
	Baku	-0.614 -0.605

Temporal difference between monthly sea level of gauges and results of processing of satellite altimetry data. Sea level gauges are shown as follows:
1 – Makhachkala, 2 – Fort Shevchenko,
3 – Turkmenbashi, 4 – Baku.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.



Основные результаты данной работы изложены в книге:

Лебедев С.А., Костяной А.Г.

Спутниковая альтиметрия Каспийского моря.

Москва: Издательский центр «МОРЕ» Международного Института Океана, 2005. – 366 с.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.

© 2011, Лебедев С.А., Шауро С.Н.