



Сергей А. Лебедев

Геофизический Центр,

Российская академия наук, Москва

МОДЕЛЬ СРЕДНЕЙ ВЫСОТЫ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

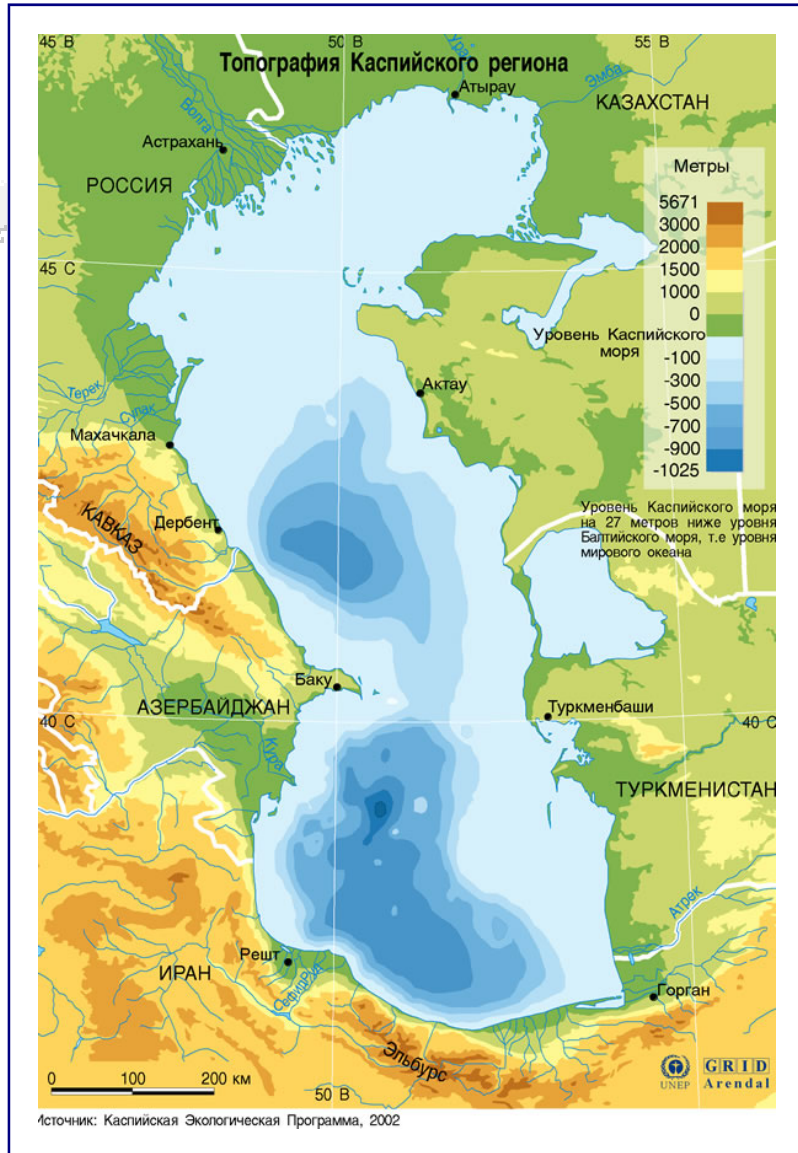


Каспийское море

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 $36^\circ 33'$ до $47^\circ 07'$ 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 км².

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

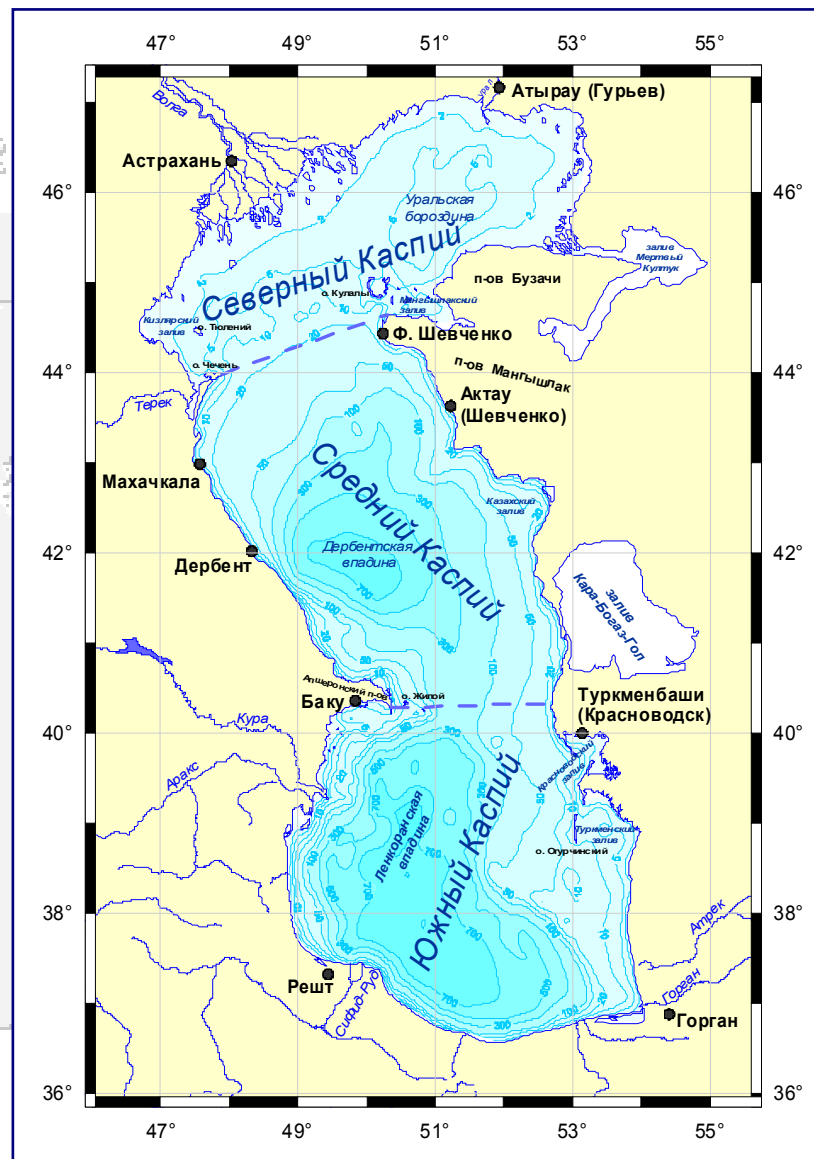


Каспийское море

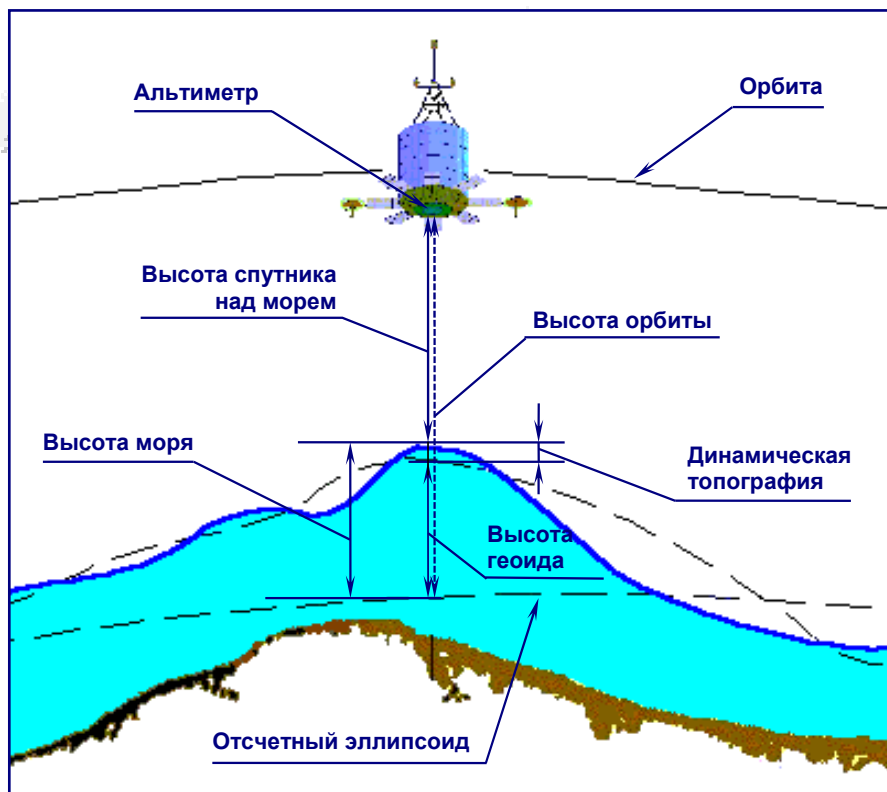
Северная часть моря мелководная, ее средняя глубина составляет всего 5-6 м, максимальные глубины 15-20 м расположены на границе со Средним Каспием. Рельеф дна характеризуется наличием банок, островов и мелких впадин.

В средней части Каспийского моря находится Дербентская впадина – котловина, смещенная к западному берегу, с наибольшей глубиной 788 м. Средняя глубина этой части моря составляет 190 м.

Южный Каспий отделен от Среднего Каспия Апшеронским порогом, глубина над которым не превышает 180 м. Наибольшая глубина для всего моря (1025 м) находится в Ленкоранской впадине, расположенной в юго-западной части Южного Каспия.



Основы 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, совпадающая с невозмущенной поверхностью океана

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:

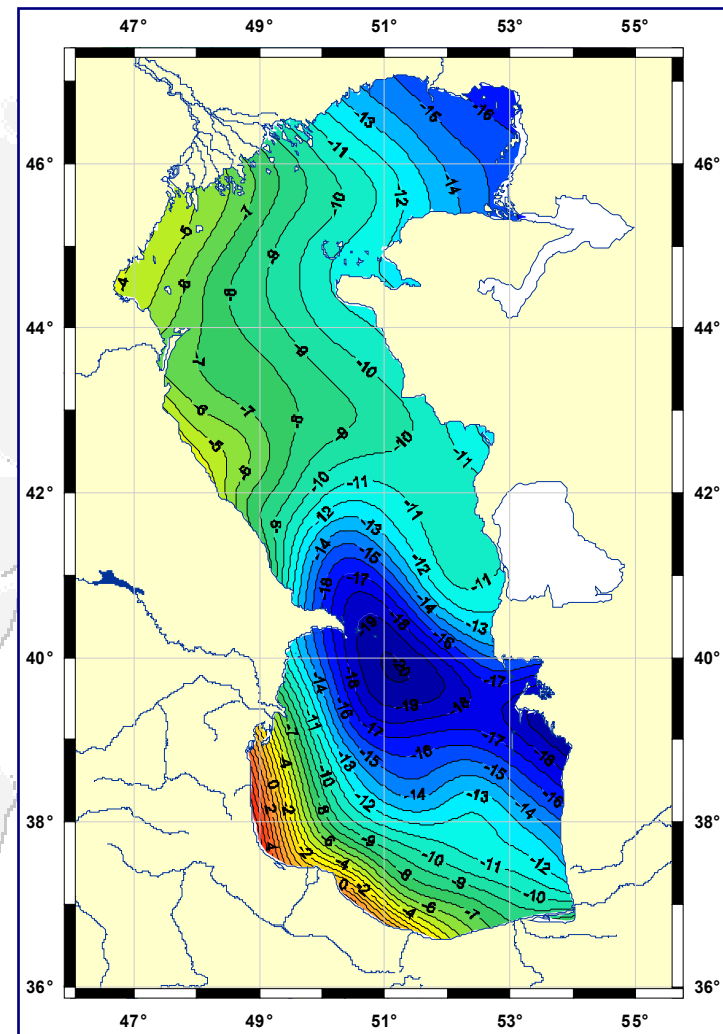
$$H_{dt} = H_{ssh} - H_g$$



Особенности гравитационного поля на акватории Каспийского моря

Понятия геоида и средней высоты морской поверхности (СВМП) имеют ключевое значение при правильной интерпретации данных спутниковой альтиметрии как в океанологических, так и в геодезических задачах.

Для Северного Каспия высота геоида понижается от -4 до -16 м вдоль дуги от Кизлярского залива к устью реки Урал. В северной части Среднего Каспия высота геоида изменяется от -4 до -12 м по направлению от Махачкалы до Форт-Шевченко, а в южной части – от -10 до -18 м вдоль оси моря по направлению к Апшеронскому порогу и достигает своего минимума фактически на границе Среднего и Южного Каспия. Минимум высоты геоида (около -21 м) соответствует понижению рельефа юго-восточнее Апшеронского полуострова. Далее высота геоида повышается по направлению к западному и южному берегу моря, повторяя собой изменения рельефа дна. У восточного берега Южного Каспия в Туркменском заливе находится второй локальный минимум (около -19 м) высоты геоида.



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



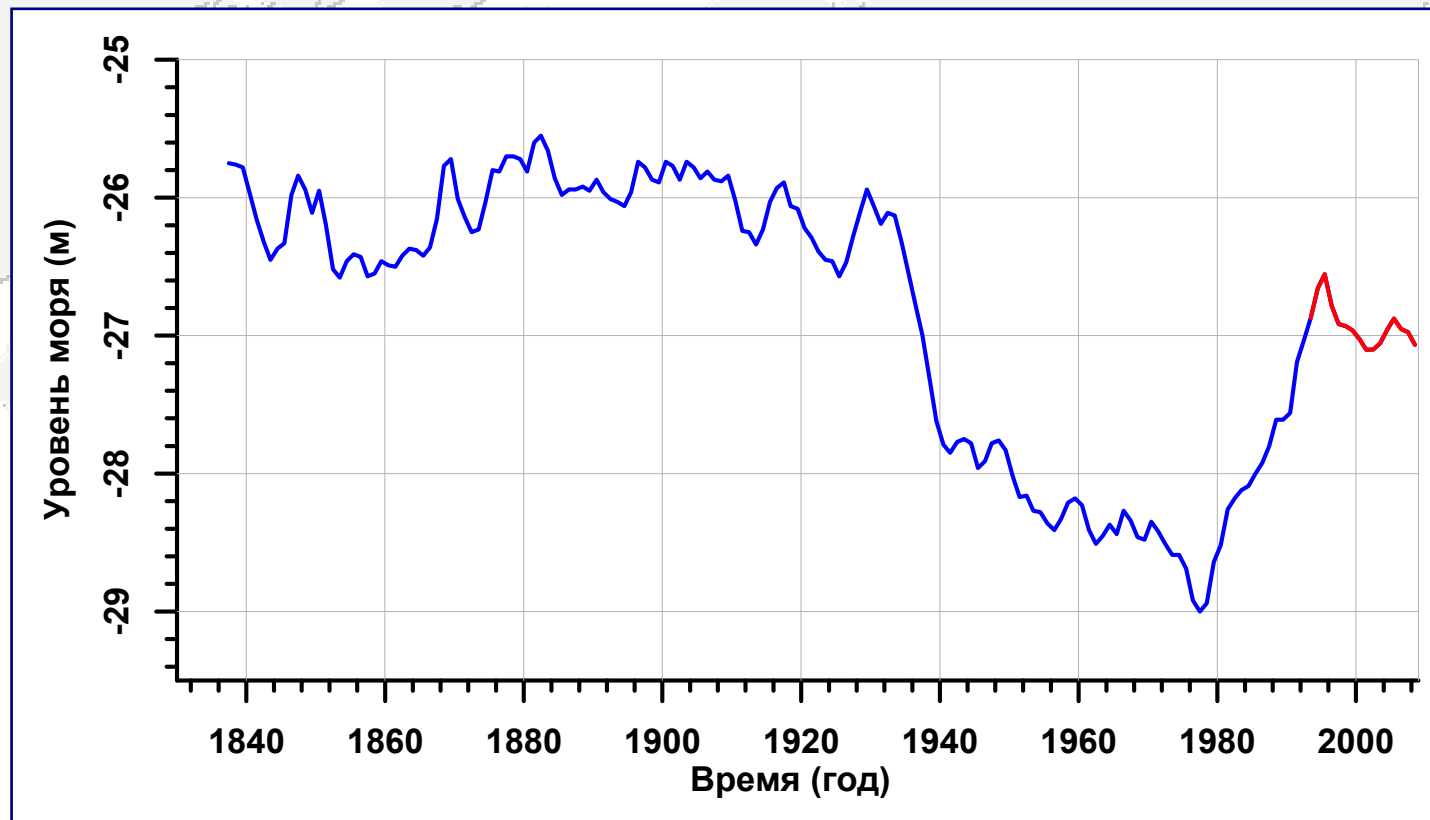
Проблемы при расчетах СВМП Каспийского моря

- ➔ Штормовые нагоны, возникающие в мелководном Северном Каспии, в чрезвычайных случаях могут достигать высот 3 - 4 м.
- ➔ Каспийское море относится к морям с сезонным ледовым покровом и отличается большой пространственно-временной неоднородностью развития ледовых процессов. В Северном Каспийском в умеренные зимы формирование ледового покрова начинается в середине ноября, а таяние его марте. В среднем, продолжительность ледового периода - 120 - 140 дней в восточной части Северного Каспия и 80 - 90 дней в западной его части. В суровые зимы на восточном и западном побережьях Среднего Каспия возможно формирования ледового покрова.
- ➔ Сезонные изменения уровня в 30 см оказывают существенное влияние на уровенный режим Каспийского моря.
- ➔ Особенности прохождения волны Волжского паводка по акватории Каспийского моря (больше 80 % речного стока приходится на Волгу), сейши и барические волны также влияют на уровенный режим моря.
- ➔ Разрушение в июне 1992 дамбы между Каспийским морем и заливом Кара-Богаз-Гол возобновило естественный сток морской воды в залив. До середины 1996 залив быстро заполнился Каспийской водой.



Многолетняя изменчивость уровня Каспийского моря

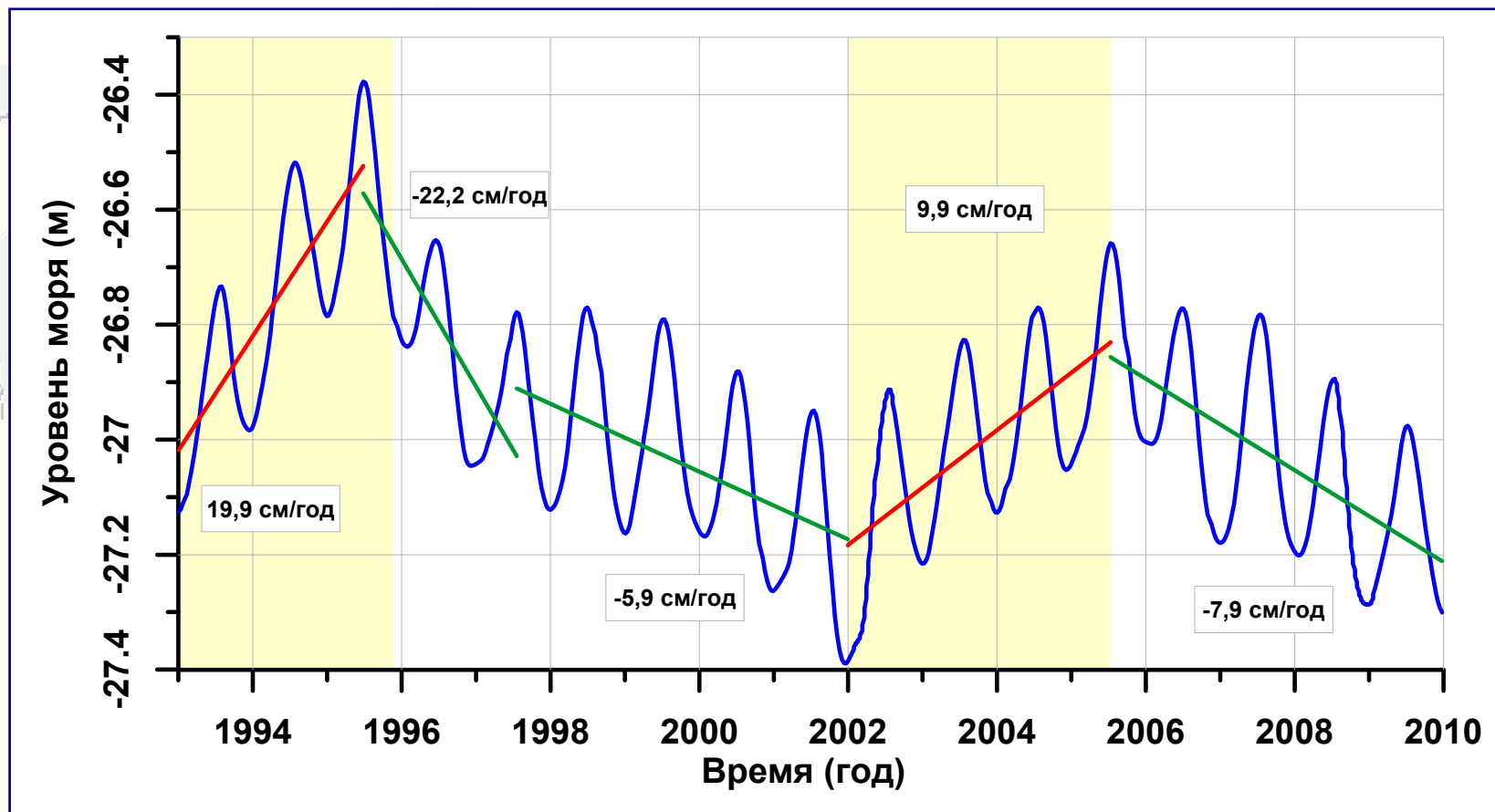
За время инструментальных наблюдений (с 1830 г.) амплитуда колебаний уровня Каспийского моря составила примерно 3,5 м. Самый низкий уровень наблюдался в 1977 году и составил -29 м, что является самой низкой отметкой за последние 400-500 лет



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

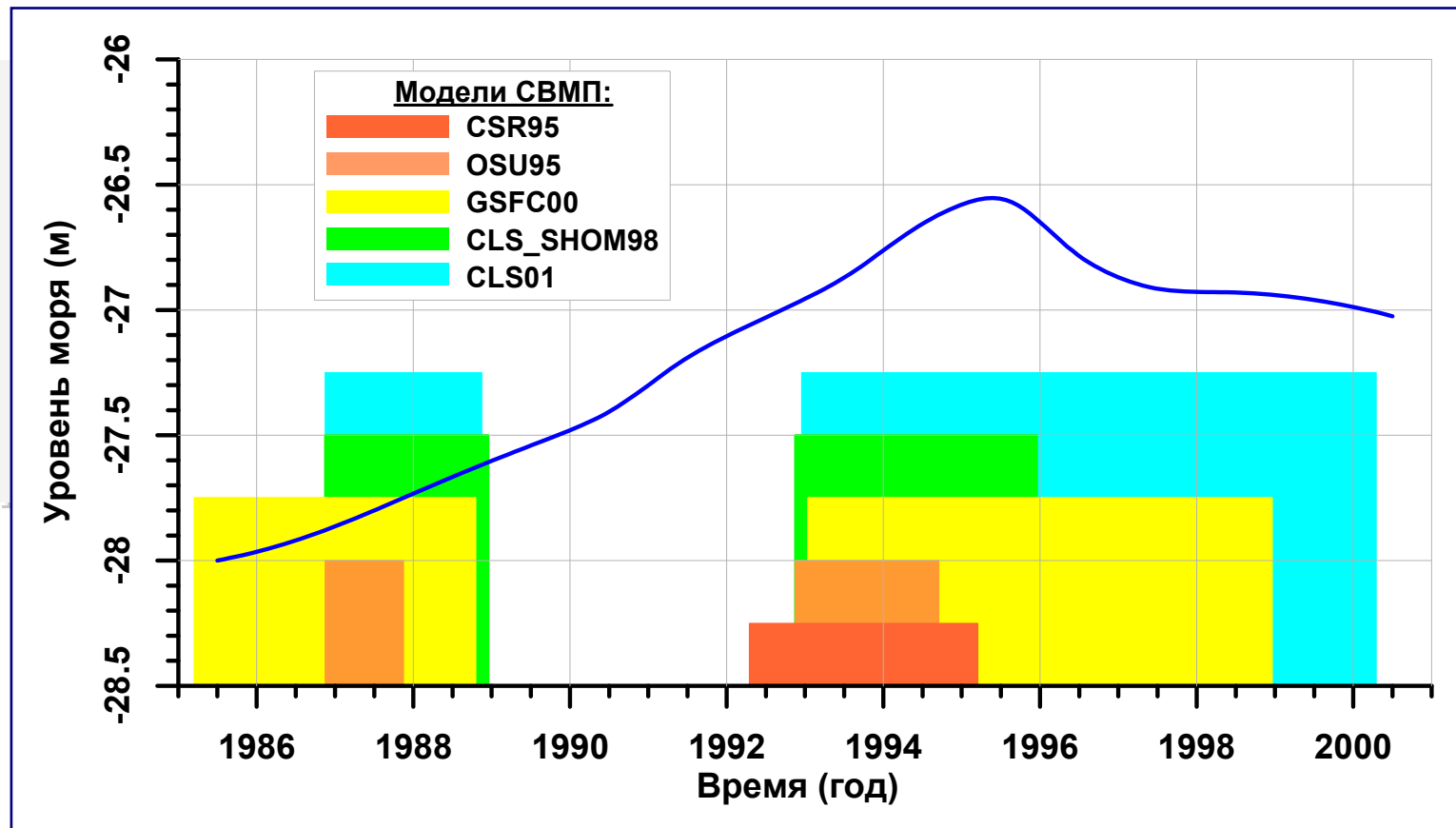


Многолетняя изменчивость уровня Каспийского моря



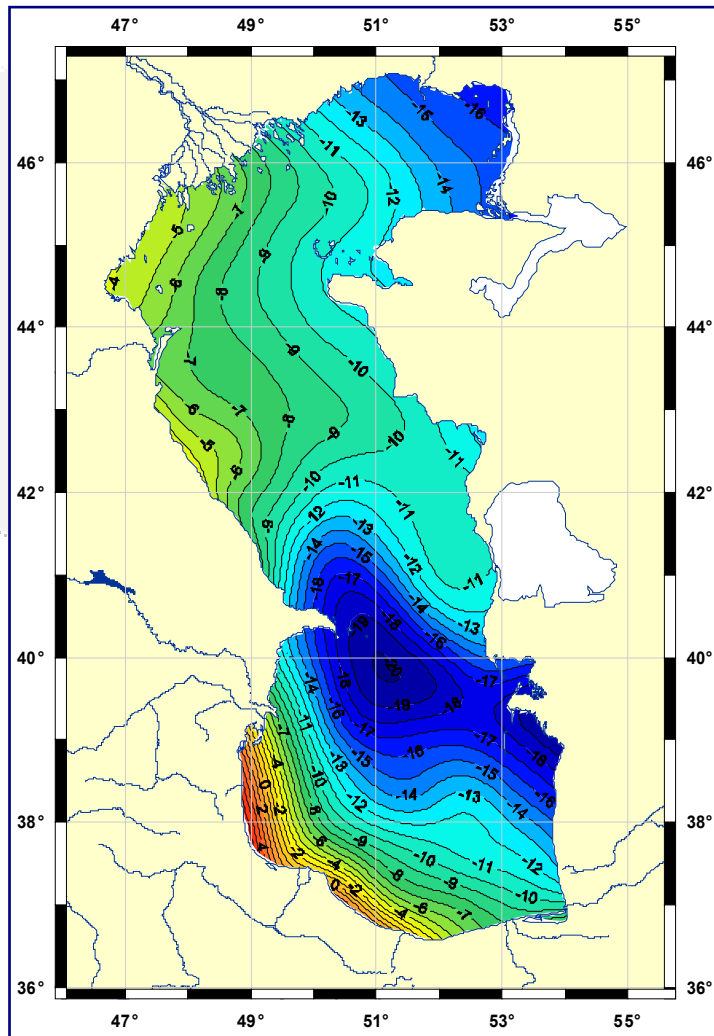
Колебания уровня Каспийского моря с сентября 1992 по декабрь 2009 данным
альтиметрических измерений.

Сравнение различных моделей СВМП

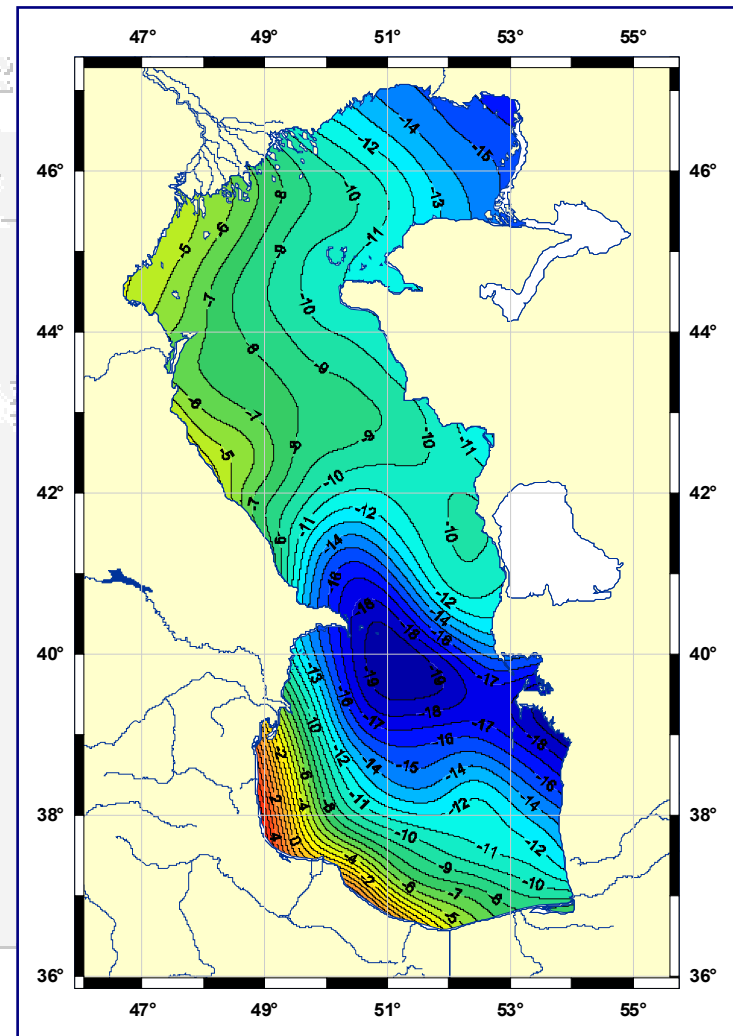


Модель СВМП Каспийского моря, которая в первом приближении соответствует эквипотенциальной поверхности моря, должна соответствовать невозмущенной поверхности моря в каждый момент времени. Для Каспийского моря модель СВМП должна зависеть не только от широты и долготы, но и от времени.

Сравнение различных моделей СВМП



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



Высота средней морской поверхности по модели GSFC00, разработанную в Годдардском центре космических полетов (GSFC).



Выбор данных спутниковой альтиметрии



Спутник
TOPEX/Poseidon



Спутник Jason-1/2

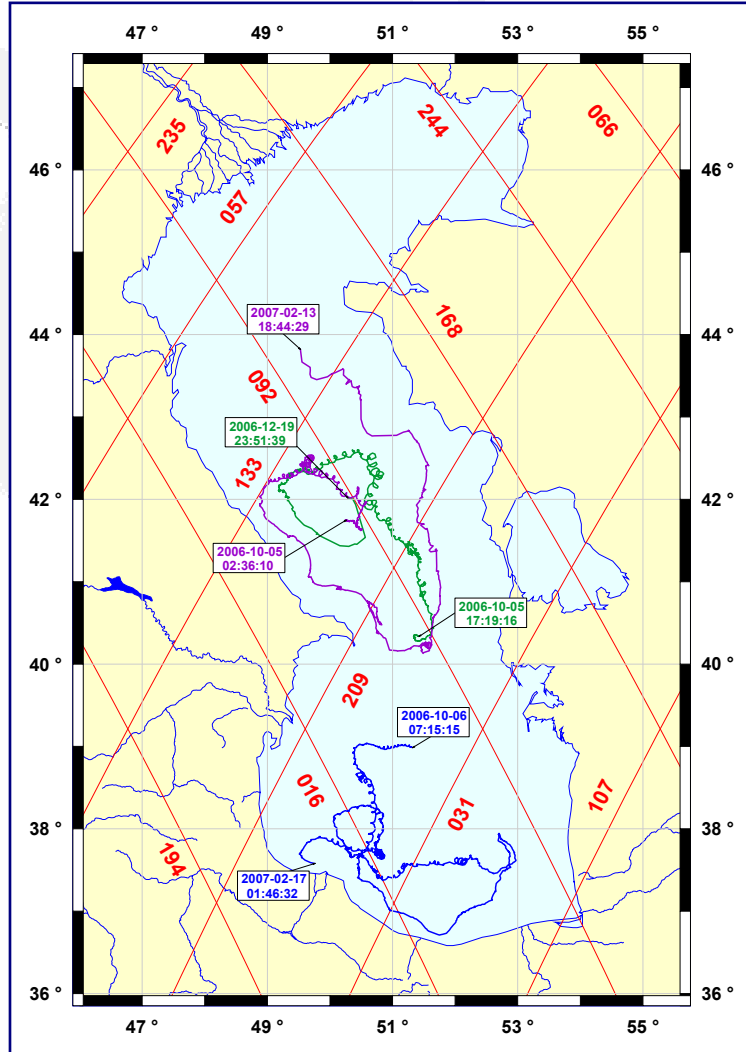
Для построения модели средней морской поверхности Каспия были выбраны данные спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2.

Этот выбор обусловлен следующими причинами.

- 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)



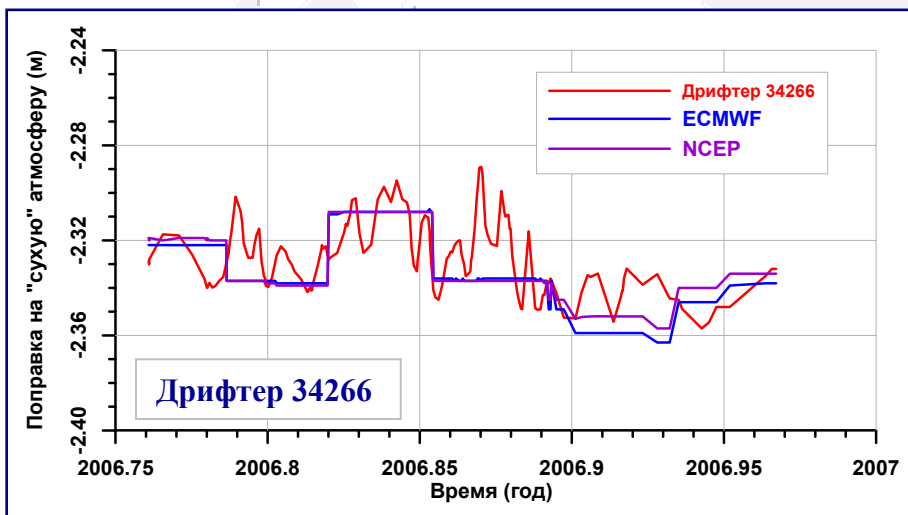
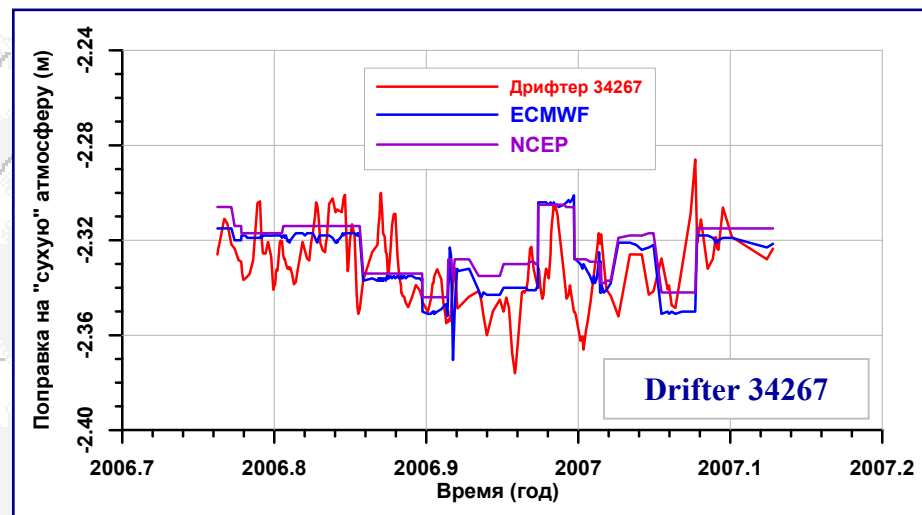
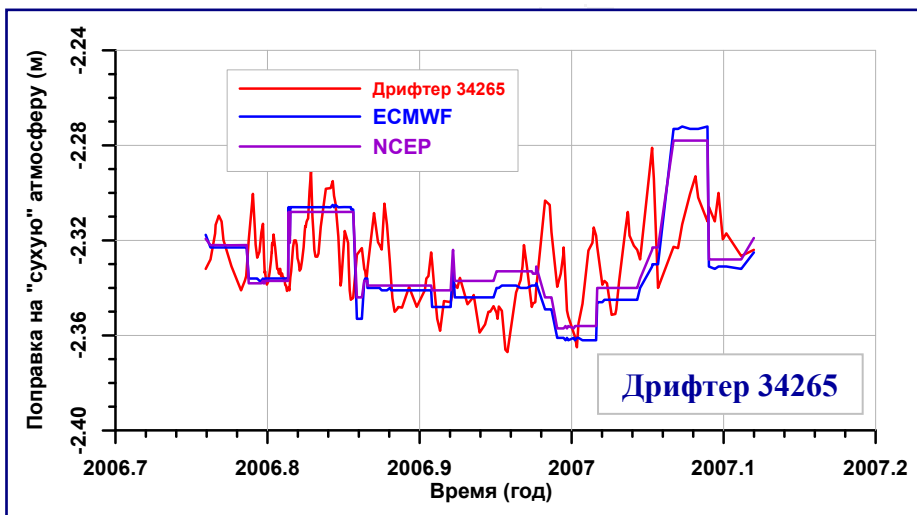
Дрифтерный эксперимент проекта MACE



С 4 октября 2006 года по 23 февраля 2007 года в рамках Международного проекта «*Multidisciplinary Analysis of the Caspian Sea Ecosystem*» (MACE) проводился первый 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.

Уточнение поправки на «сухую» атмосферу

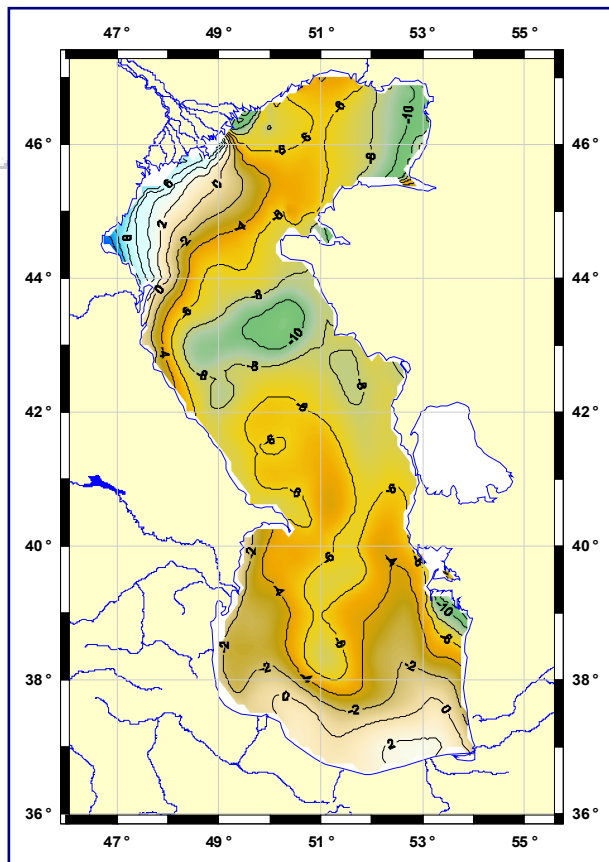


Дрифтер	Модель	Различие между расчетами по модельным данным и данным дрифтерных измерений, (см)			
		минимум	максимум	средняя величина	СКО
34265	ECMWF	-5.0	5.0	-0.10	3.86
	NCEP	-4.3	4.5	0.02	3.35
34266	ECMWF	-4.8	2.6	-0.50	2.25
	NCEP	-4.8	2.6	-0.40	2.29
34267	ECMWF	-6.4	4.9	0.40	2.94
	NCEP	-5.6	4.6	0.80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



Обработка данных спутниковой альтиметрии

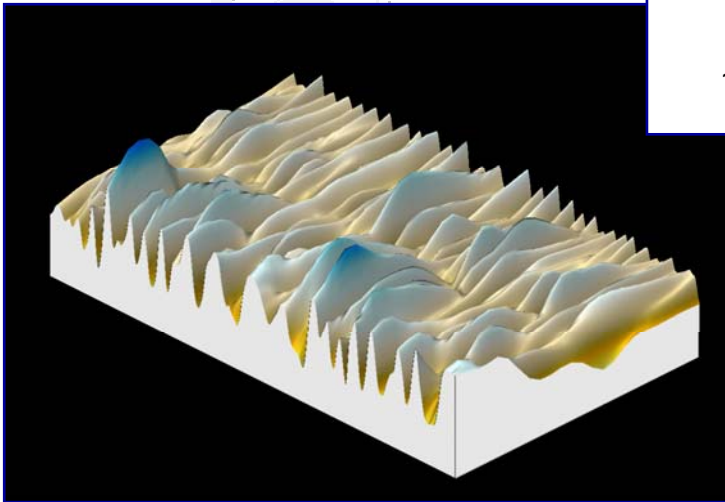
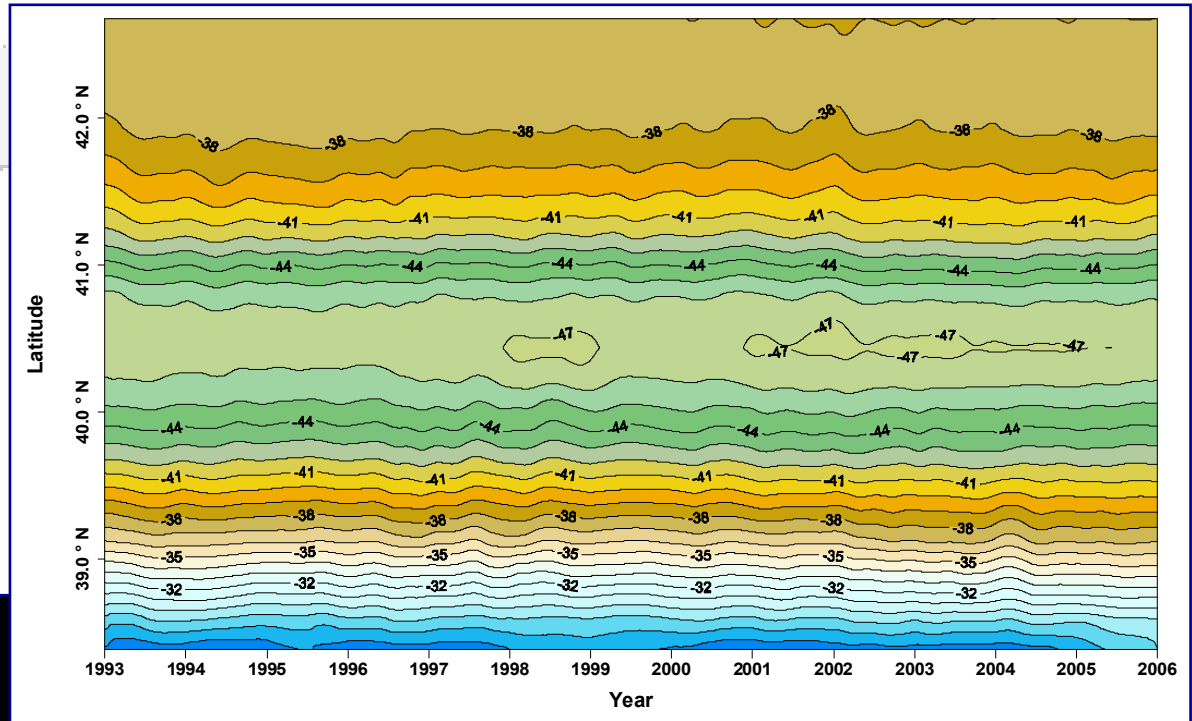
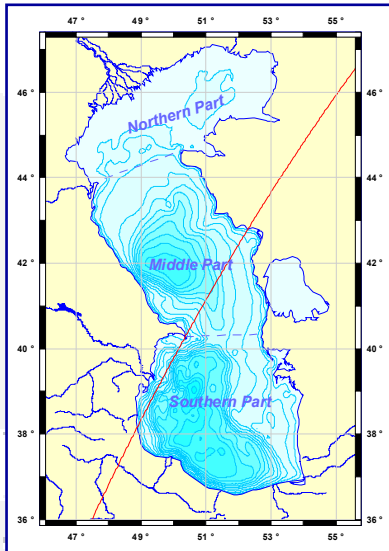


Средняя или климатическая динамическая топография (см) по данным гидродинамического моделирования (Попов, 2004)

- Учет всех необходимых поправок для обработки данных альтиметрических измерений:
 - поправка на влажность, рассчитанная по данным бортового радиометра,
 - поправка на влияние ионосферы, рассчитанная 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 дрейфтерами.
- Максимальная высота приливов в береговой зоне Каспийского моря не превышает 2 см, поэтому приливная поправка не учитывалась.
- Модель CBMP GCRAS08 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 GCRAS08 представляет собой численную функцию от времени для каждого трека, т.е. зависит от широты, долготы и времени. Ежегодно модель CBMP должна обновляться с учетом новых данных.

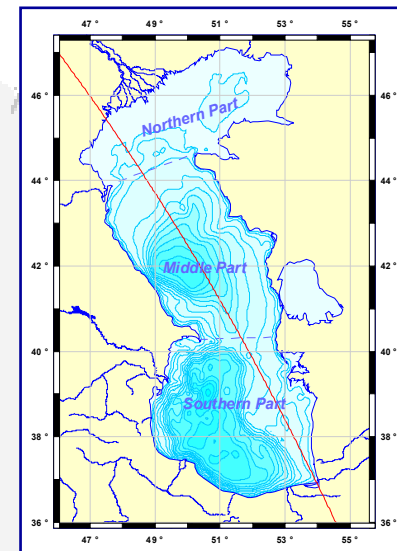
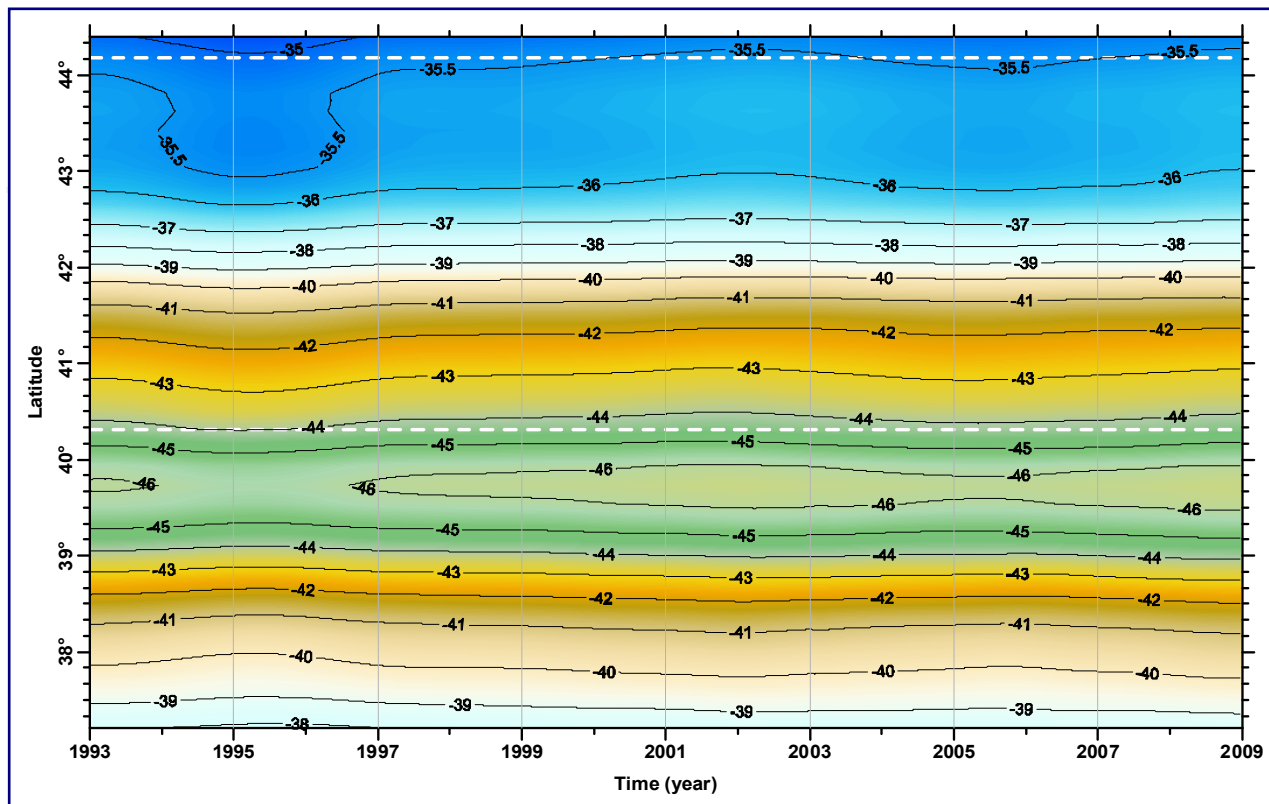


Изменчивость СВМП и уровня вдоль 209 трека

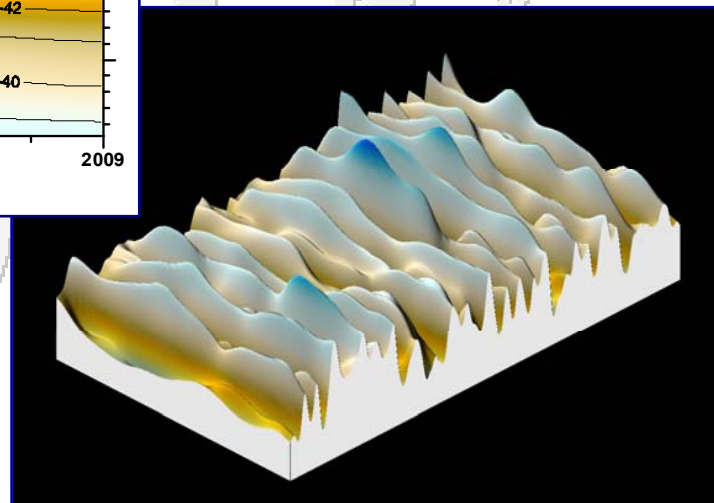


Временная изменчивость средней высоты морской поверхности GCRAS09 и аномалий уровня, рассчитанном относительно нее вдоль 209 трека спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2.

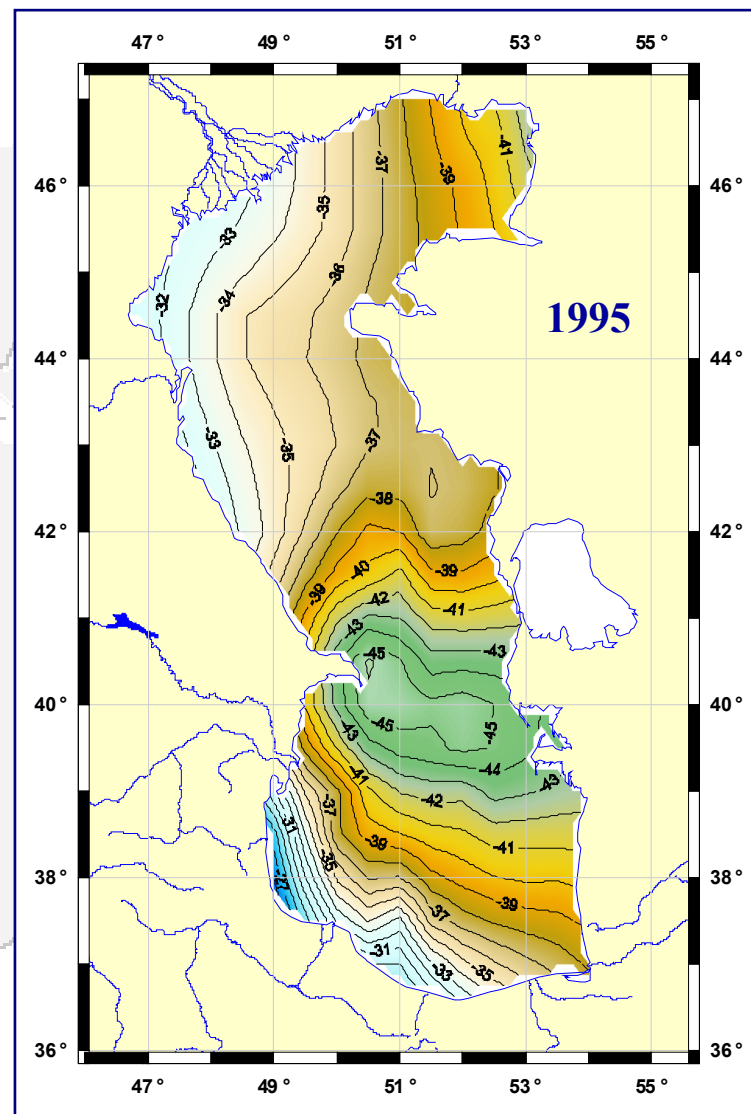
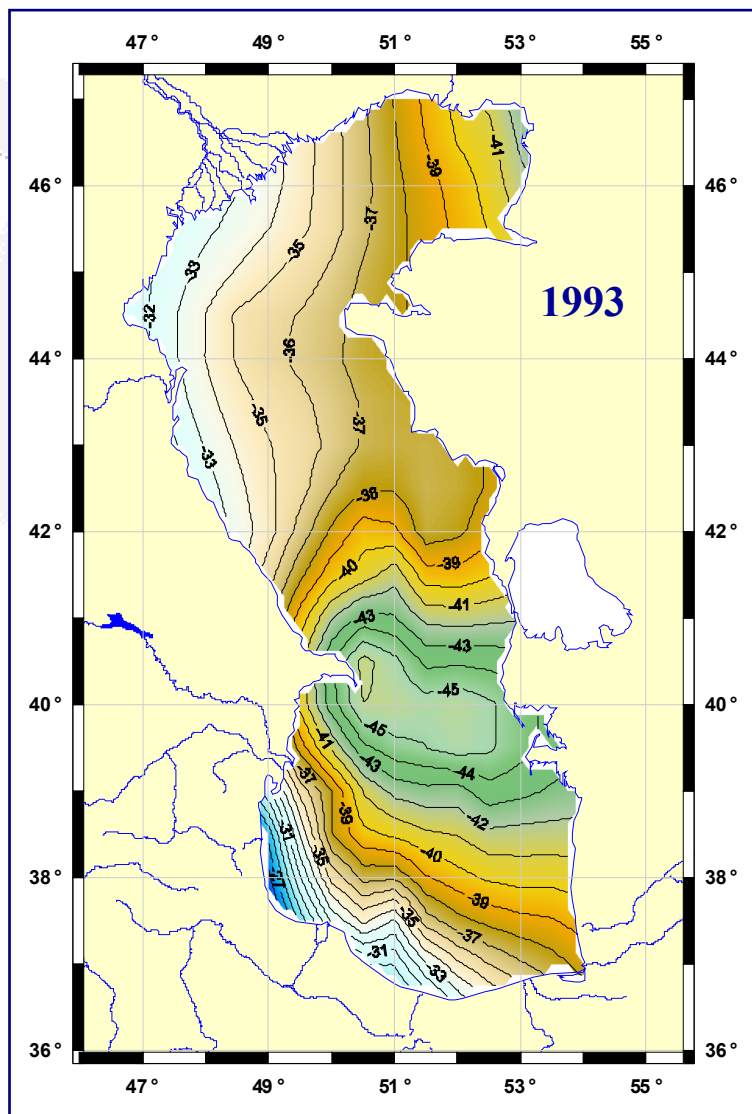
Изменчивость СВМП и уровня вдоль 092 трека



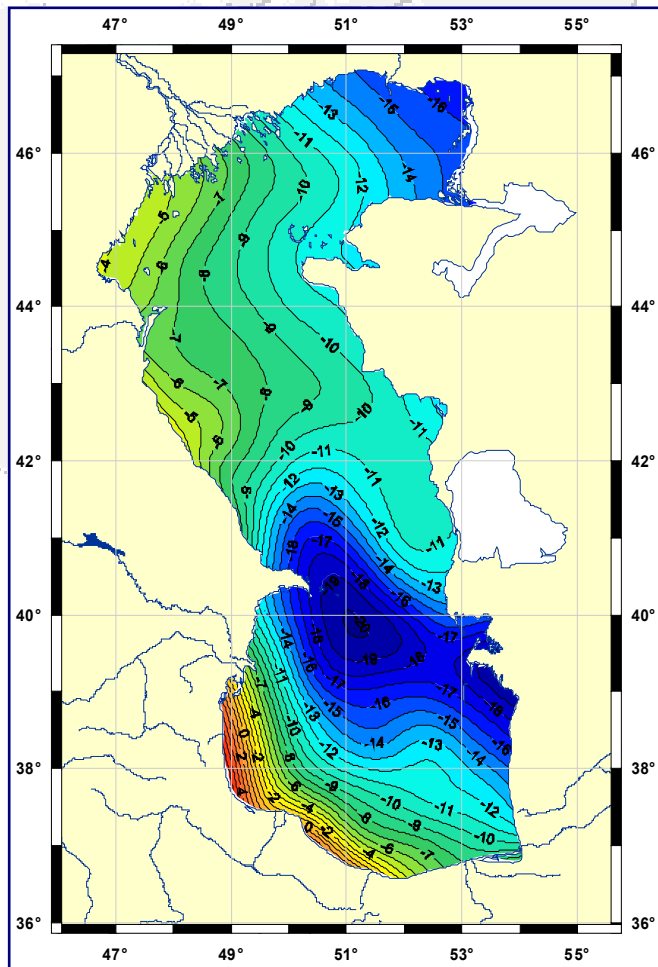
**Временная изменчивость средней
высоты морской поверхности GCRAS09
и аномалий уровня, рассчитанным
относительно нее вдоль 092 трека
спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2.**



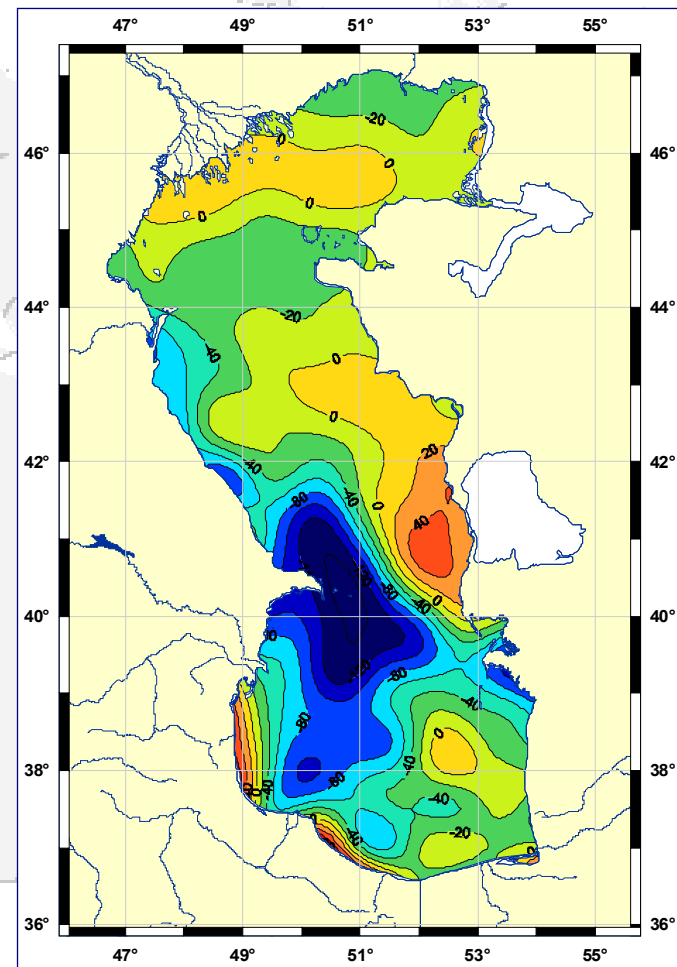
Модель GCRAS08 СВМП Каспийского моря



Особенности гравитационного поля на акватории Каспийского моря



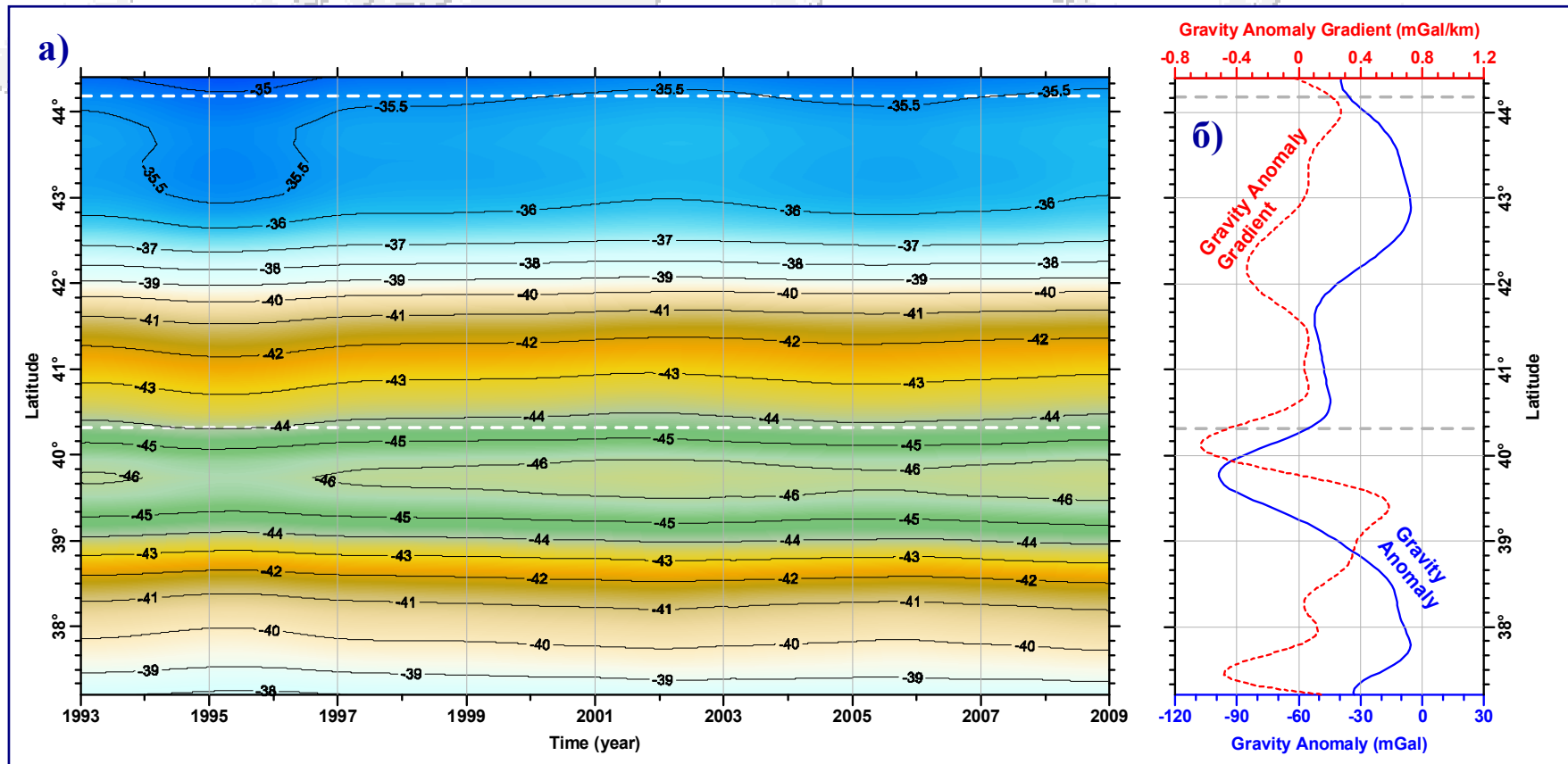
Высота геоида (м) по модели EGM2008 с разложением на гармонические составляющие до 360 степени.



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



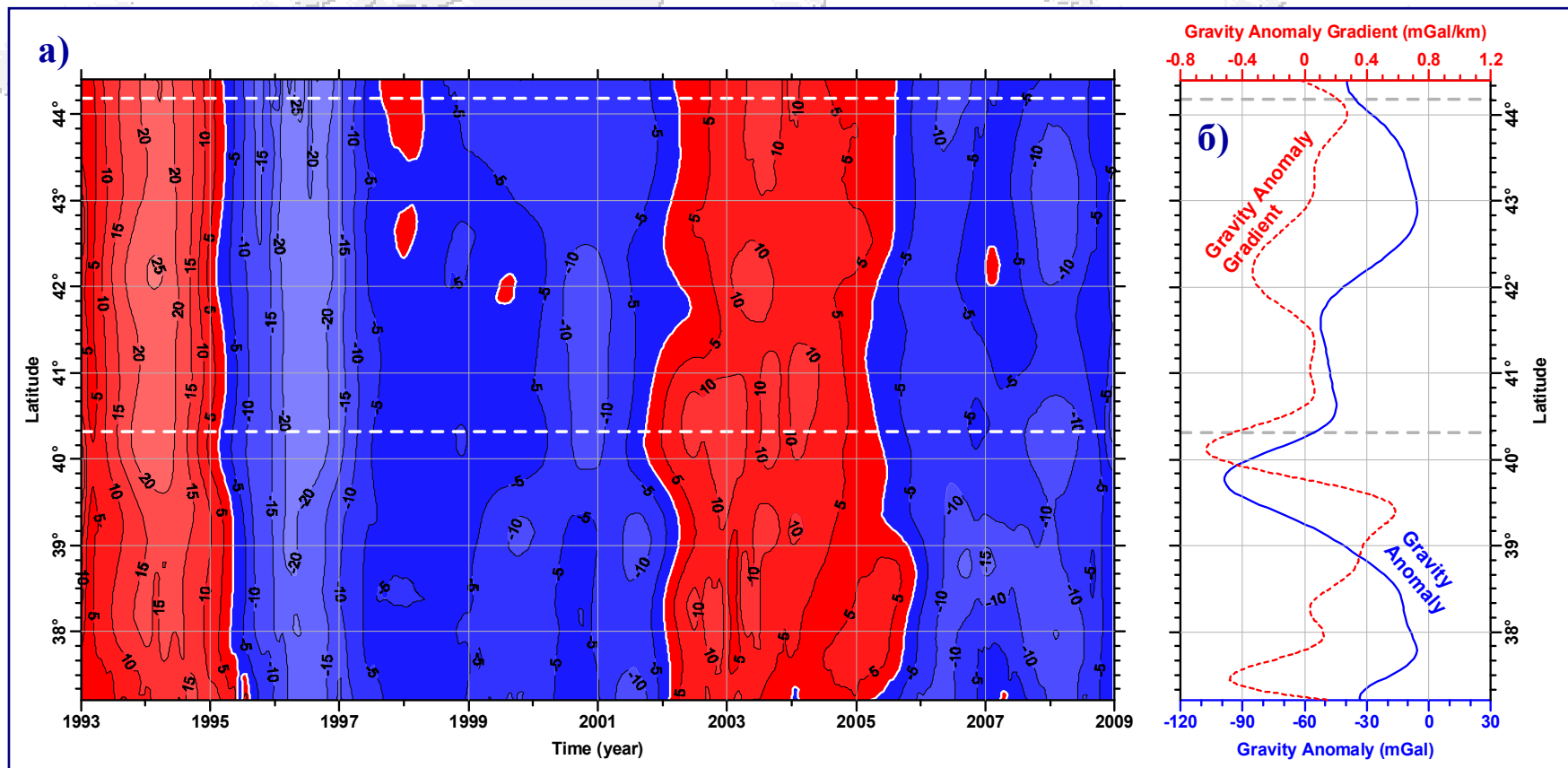
Изменчивость СВМП и аномалий силы тяжести вдоль 092 трека



(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, Средним и Южным Каспием



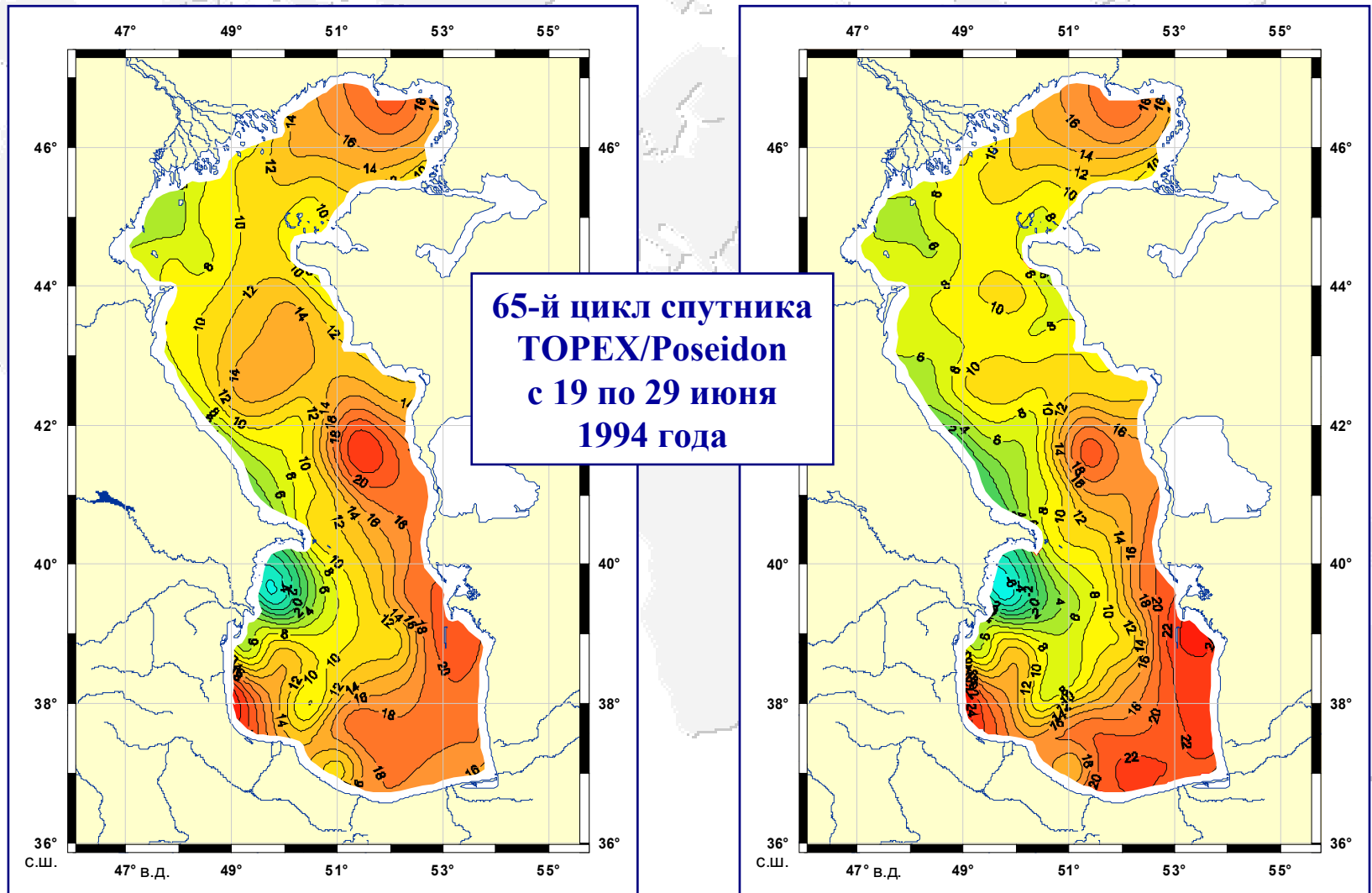
Изменчивость скорости роста СВМП и аномалий силы тяжести вдоль 092 трека



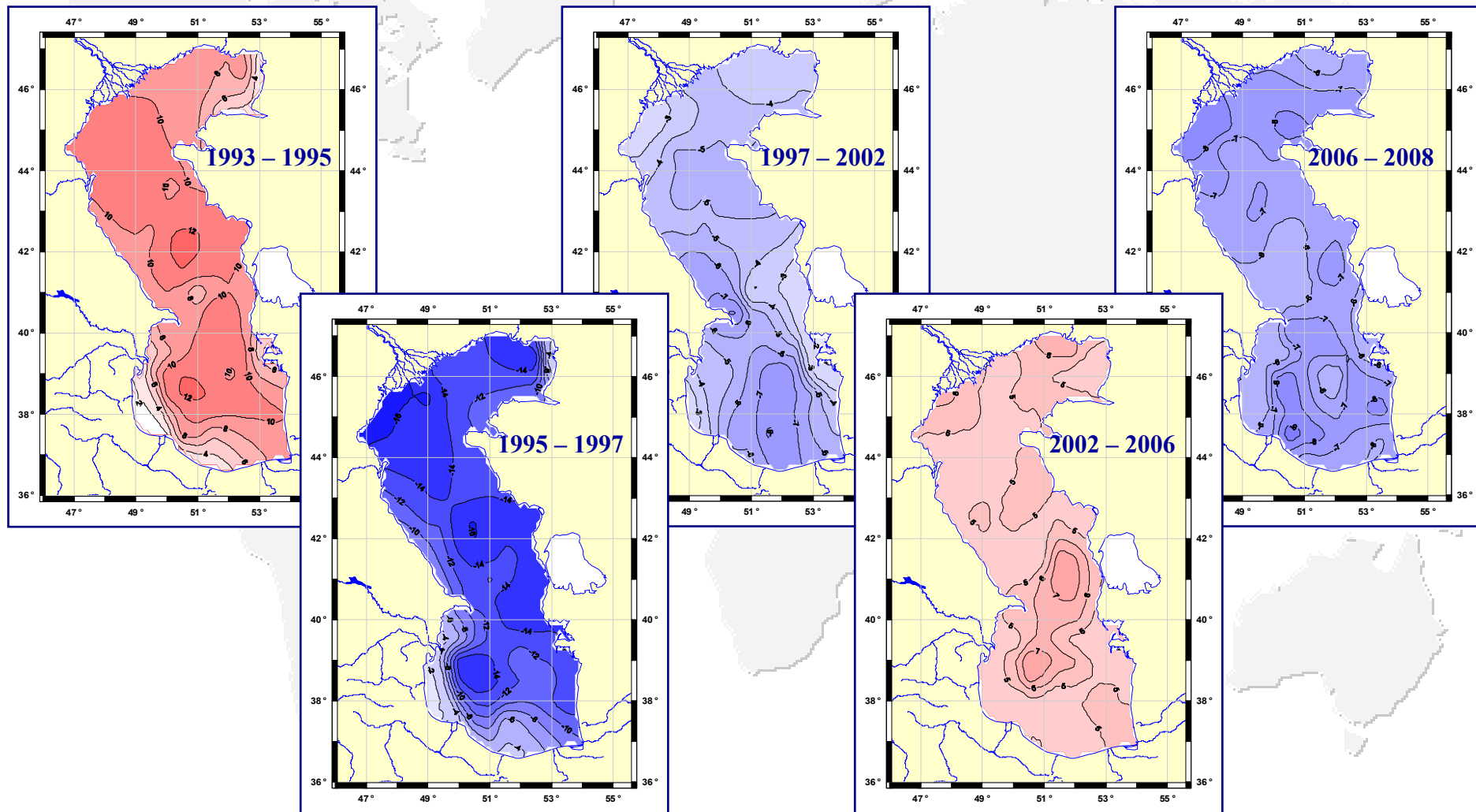
(а) Временная изменчивость скорости роста СВМП (м) вдоль 092 трека с сентября 1992 по декабрь 2008. Красным цветом выделены периоды роста уровня, синим – падения. (б) Изменчивость аномалий силы тяжести (синяя линия) и ее градиента (красная пунктирная линия) рассчитанные по модели EGM2008.



Аномалии уровня и синоптическая динамическая топография



Пространственно-временная изменчивость уровня Каспийского моря



Заключение

- Расчет поправки на «сухую» атмосферу по данным береговых метеостанций с учетом измерений атмосферного давления дрифтерами позволил повысить точность расчетов высот морской поверхности на 3 – 4 см.
- Региональная модель средних высот морской поверхности Каспия GCRAS08 хорошо описывает пространственно временную изменчивость среднего уровня моря, которая хорошо согласуется с особенностями гравитационного поля в данном регионе.
- Аномалии уровня моря, рассчитанные относительно данной модели СВМП, хорошо описывают особенности гидродинамического режима Каспийского моря с учетом сезонной, термостерической и синоптической изменчивости уровня моря.
- Полученные данные как модели СВМП, так и аномалий уровня могут быть использованы в термогидродинамических моделях усвоения данных спутниковой альтиметрии с учетом как межгодовой, так и сезонной, синоптической и термостерической изменчивости уровня моря.



