A satellite-style map of the Black Sea region, showing the sea in dark blue and the surrounding landmasses in green and brown. The text is overlaid on the upper left portion of the map.

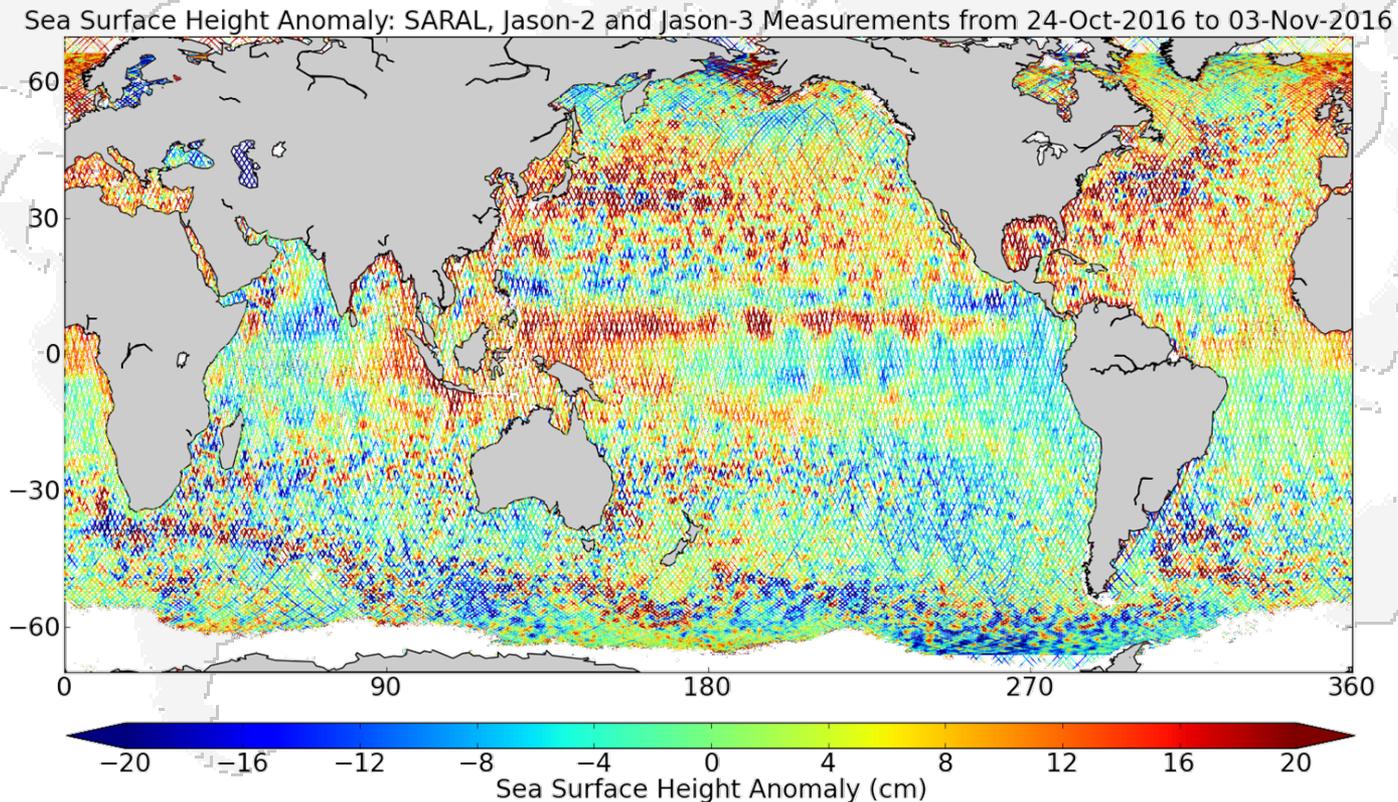
Метод вдольтрековой адаптации данных дистанционного зондирования в численной модели термогидродинамики Чёрного моря

Сахно Андрей Вячеславович, аспирант НИУ «МИЭТ»

Лебедев Сергей Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор НИУ «МИЭТ»

Введение

Работа посвящена методу адаптации вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии в термогидродинамической модели Чёрного моря, который является альтернативой ассимиляции данных наблюдений (вариационная ассимиляция, оптимальная интерполяция, метод Калмана и его модификации и др.)



Цели и задачи

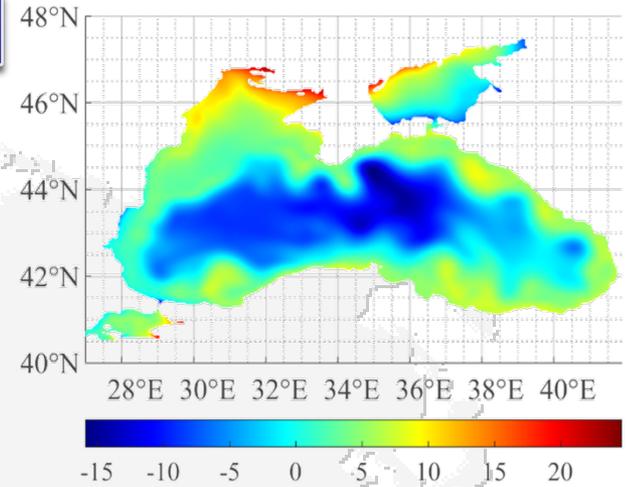
Целью данной работы является разработка метода адаптации вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии и внедрение его в термогидродинамическую модель ИВМ РАН (INMOM).

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- Изучить существующие методы усвоения данных уровня.
- Подготовить данные спутниковой альтиметрии:
 - Фильтрация вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии.
 - Выбор оптимального алгоритма интерполяции модельного уровня в точки спутниковых измерений.
 - Разработка алгоритма расчета и учета радиальной составляющей орбитальной ошибки в данных спутниковой альтиметрии.
- Реализовать метод адаптации вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии в термогидродинамической модели Чёрного моря:
 - Выбор оптимального алгоритма экстраполяции подготовленных данных спутниковой альтиметрии на модельную сетку.
 - Численная реализация метода адаптации данных спутниковой альтиметрии.
 - Обоснование оптимального времени адаптации.
 - Подстановка адаптированных данных и продолжение расчетов.

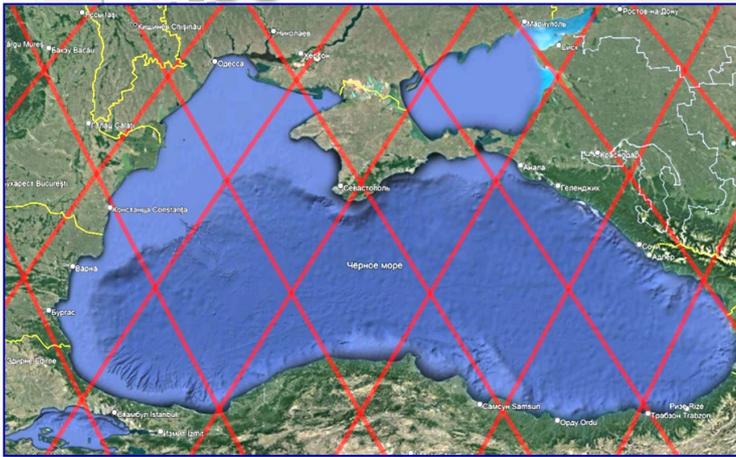
Модель INMOM

В работе использовалась численная модель гидротермодинамики Черного и Азовского морей *INMOM** разрешением 4 км (200×306 , 27 σ -уровней) и шагом по времени $\Delta t = 2.5$ мин. Шаги по широте и долготе постоянны и равны 0.036° и 0.05° соответственно.



Аномалии уровня Черного моря (см) по модели INMOM на момент 05.04.2016

Данные наблюдений



Положение треков спутника Jason-3 на акватории Черного моря

В качестве данных наблюдений использовались вдольтрековые данные об аномалиях уровня, полученные из альтиметрических измерений спутника *Jason-3*.

*Zalesny V. B. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2012. – Т. 27. – №. 1. – С. 95-112.

Подготовка данных

Для обработки данных используется фильтр Гаусса x

$$y(i) = \sum_{l=-n}^n x(i-l) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma}} \exp\left\{-\frac{l^2}{2\sigma^2}\right\}, \sigma = 2$$

Данные спутниковой альтиметрии содержат радиальную ошибку, которую для акватории Черного моря можно аппроксимировать как: $\Delta SLA_{Alt} = a \cdot t + b$, где SLA_{Alt} – аномалии уровня, полученные из данных спутниковой альтиметрии, t – время измерения.

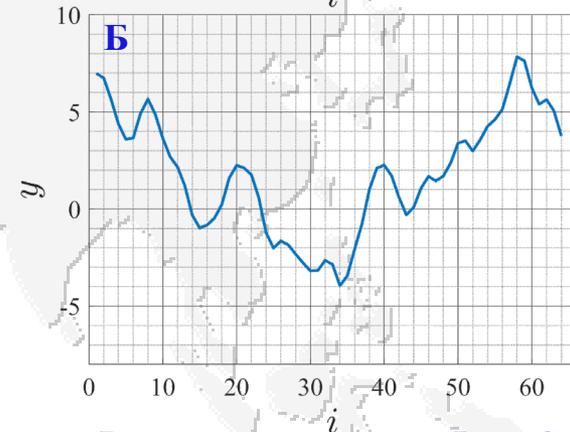
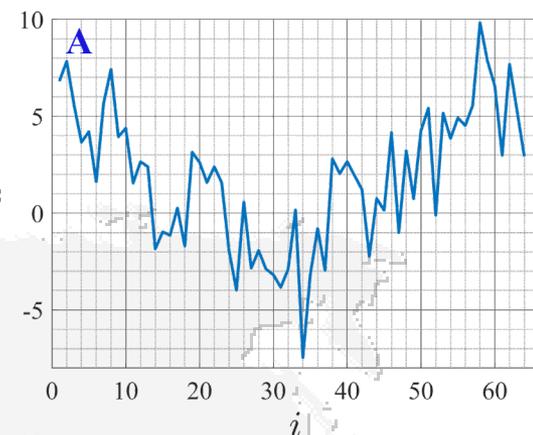
Тогда скорректированные аномалии уровня SLA'_{Alt} определяются как: $SLA'_{Alt} = SLA_{Alt} - \Delta SLA_{Alt}$.

Коэффициенты a и b ищем и условия

$$\Phi(a, b) = |SLA'_{Alt} - SLA_{Model}| \rightarrow \min$$

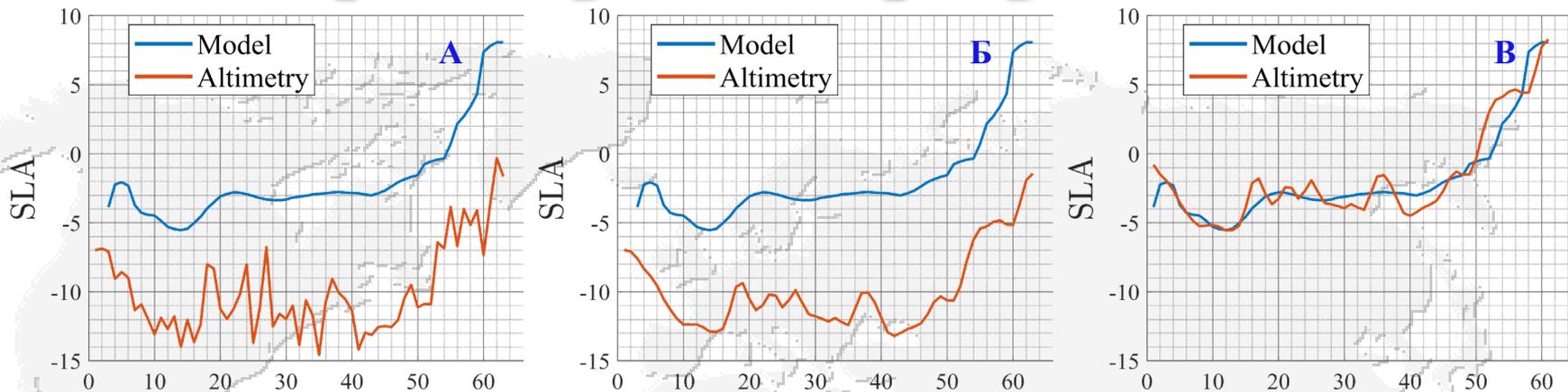
где SLA_{Model} – аномалии уровня, полученные из результатов модельных расчетов и интерполированные методом билинейной интерполяции в точки трека.

Таким образом задача сводится к нахождению минимума функции двух переменных на некоторой области Σ : $\Phi(a, b) \rightarrow \min, (a, b) \in \Sigma$



Вдольтрековые данные Jason-3, А – до фильтрации, Б – после, где i – номер шага вдоль трека

Промежуточные результаты



Уровень Черного моря (см) по модели INMOM (*Model*) и из данных Jason-3 (*Altimetry*),
 А – до фильтрации альтиметрии, Б – после фильтрации, В – после учета орбитальной ошибки

Цикл	Коэффициент корреляции до учета орбитальной ошибки	Коэффициенты аппроксимации орбитальной ошибки		Коэффициент корреляции после учета орбитальной ошибки
		<i>a</i>	<i>b</i>	
107	0.362	-0.64	6.735	0.965
108	0.105	-0.66	10.408	0.934
109	0.424	-0.55	5.51	0.939
110	0.448	-0.479	-11.633	0.958
111	0.288	-0.497	-7.959	0.932
112	0.261	-0.614	-4.286	0.926
114	0.629	-0.411	-4.286	0.918
115	0.704	-0.706	-1.837	0.948
116	0.482	-0.624	-11.633	0.953
117	0.381	-0.658	-3.061	0.914

Экстраполяция данных наблюдений

Экстраполяция данных спутниковой альтиметрии в узлы расчетной сетки проводится по алгоритму обратного расстояния*

$$SLA'_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{SLA'_{Alt\ k}}{R_k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}},$$

$$R_k = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2},$$

$$R_k \leq \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} / 2,$$

где i и j – индексы точки расчетной сетки, k – индекс точек спутниковых измерений вдоль трека, SLA'_{Alt} – значения скорректированных альтиметрических измерений, x_i и y_j – координаты точки расчетной сетки, x_k и y_k – координаты точки трека, Δx и Δy – шаги расчетной сетки, N – число альтиметрических измерений, попадающих в круг радиуса R_k .

*Захарова Н. Б., Лебедев С. А. Интерполяция оперативных данных буев ARGO для ассимиляции данных в модели циркуляции Мирового океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №. 4. – С. 104-111.

Гидродинамическая адаптация

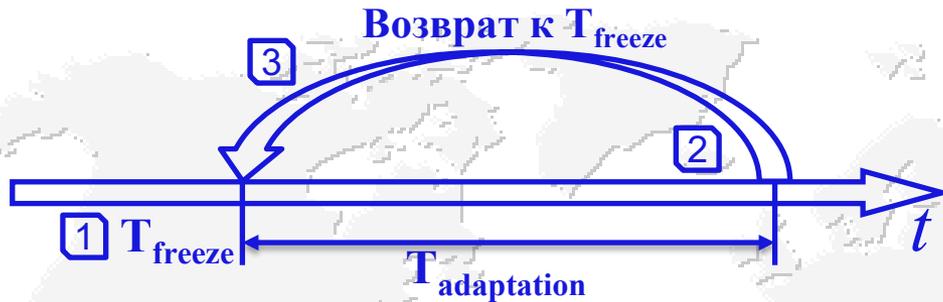
На каждом шаге решается задача адаптации* (приспособления) гидрологических полей, которая моделирует физические процессы приспособления горизонтальных составляющих скорости к отклонениям давления, вызванным изменениями плотности воды и уровня океана:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - lv = -\frac{1}{r_x} \left(\frac{1}{\rho_0} P_x + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - g \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + lu = -\frac{1}{r_y} \left(\frac{1}{\rho_0} P_y + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - g \frac{\partial \xi}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{r_x r_y} \left(\frac{\partial r_y u H}{\partial x} + \frac{\partial r_x v H}{\partial y} \right) + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma}, \end{cases}$$

u, v, ω – компоненты вектора скорости, l – сила Кориолиса, ρ_0 – фоновая плотность, p_a – атмосферное давление на поверхности, H – глубина в состоянии покоя, ξ – отклонение уровня от его невозмущенного состояния, r_x, r_y – метрические коэффициенты, P_x, P_y – компоненты горизонтального градиента давления

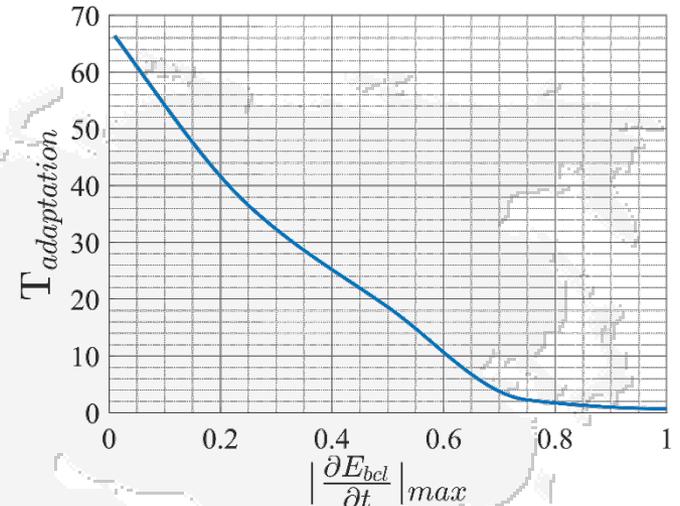
*Марчук Г. И., Саркисян А. С. Математическое моделирование циркуляции океана. Наука, Москва. – 1988.

Алгоритм адаптации вдольтрековых данных

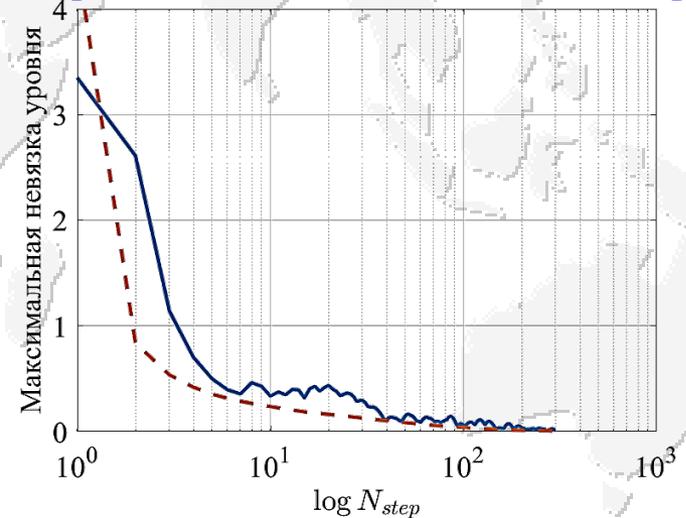


T_{freeze} – момент «заморозки», после него ГУ на поверхности (атмосферный форсинг) и ГУ на берегу акватории (стоки рек) считаются неизменными. Также происходит добавление к модельному уровню вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии.

$T_{adaptation}$ – период гидродинамической адаптации* полей состояния Чёрного моря под альтиметрический уровень. Из анализа изменчивости кинетической энергии и невязки уровня получено значение 36 модельных шагов.



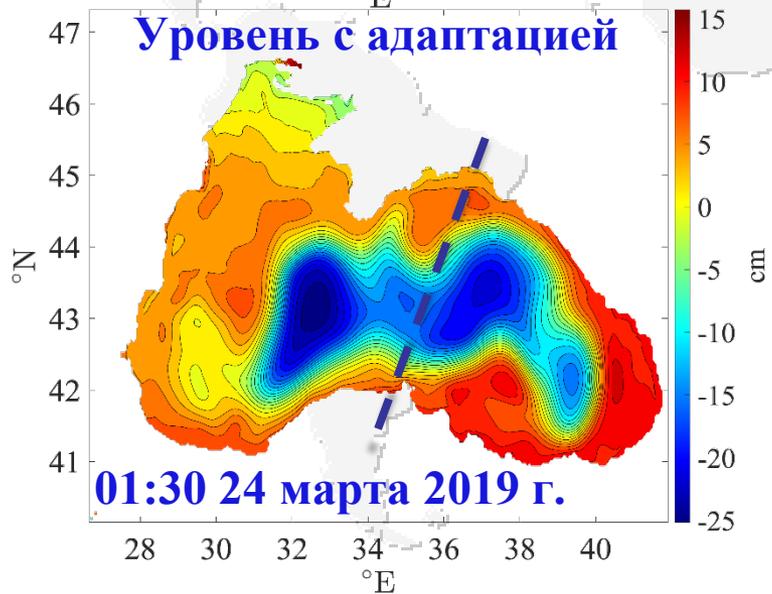
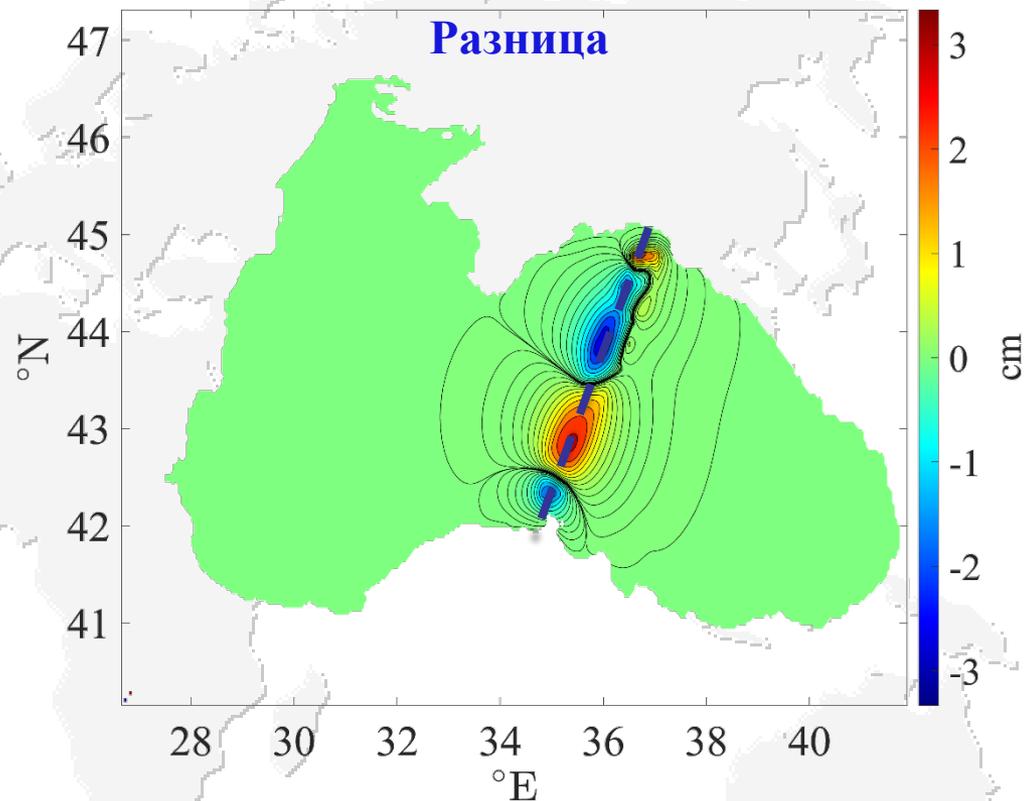
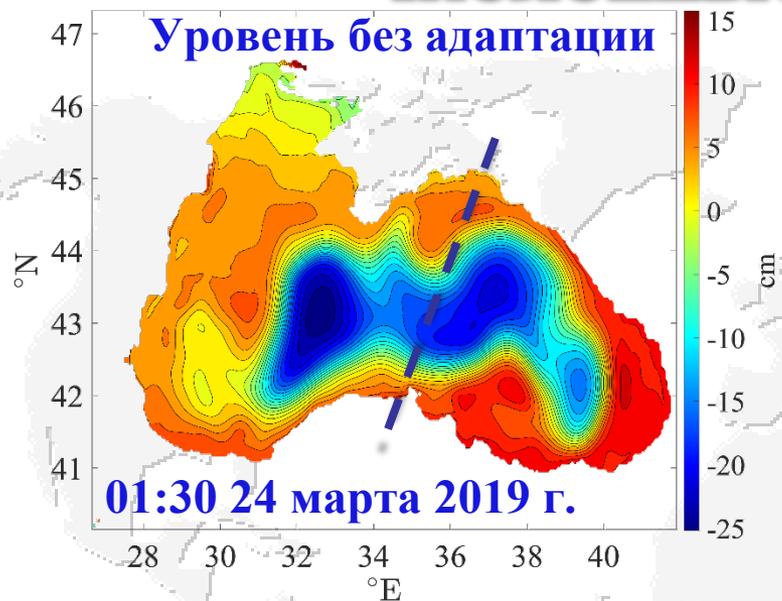
Связь времени адаптации и изменения энергии



Зависимость невязки уровня номер шага модели

*Марчук Г. И., Саркисян А. С. Математическое моделирование циркуляции океана. Наука, Москва. – 1988.

Численные эксперименты



Использовались данные Jason-3,
трек 7 цикл 115, 01:30 24 марта 2019 г.

Численные эксперименты

M_{Model} – ср. уровень без адаптации

$M_{Adaptation}$ – ср. уровень с адаптацией

Δ – разница уровней с адаптацией и без

M_{Δ} – ср. значение разницы уровней

Std_{Δ} – СКО разницы уровней

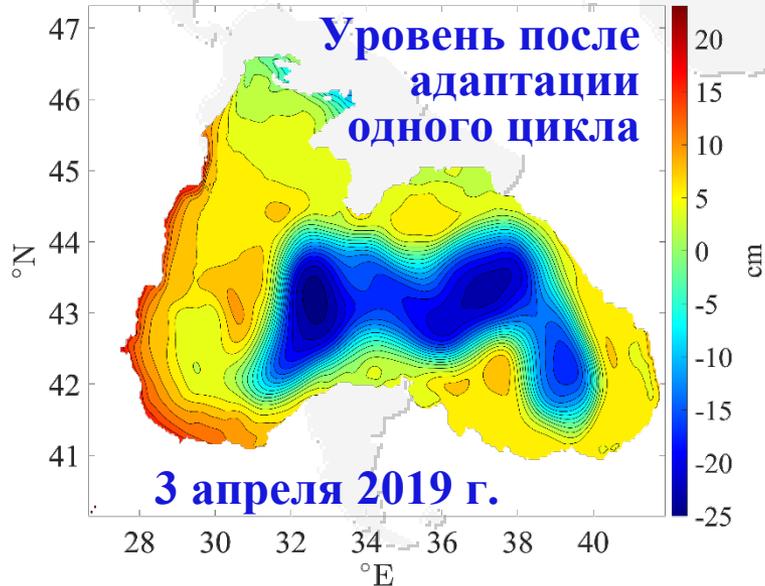
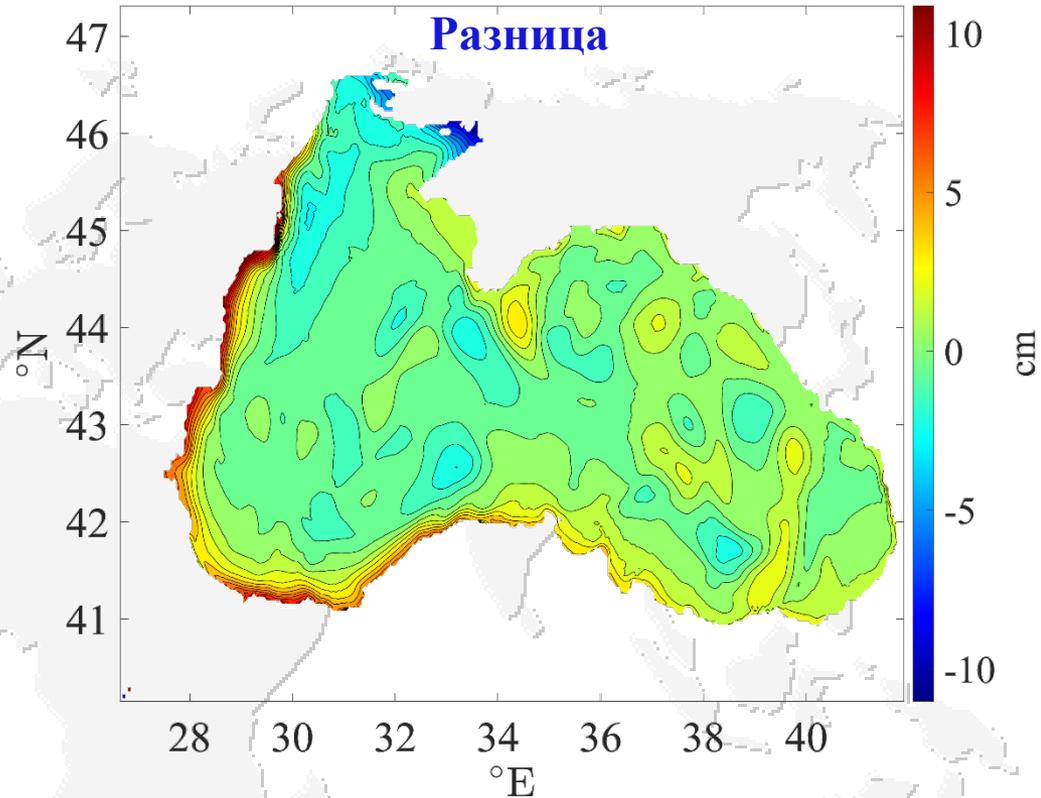
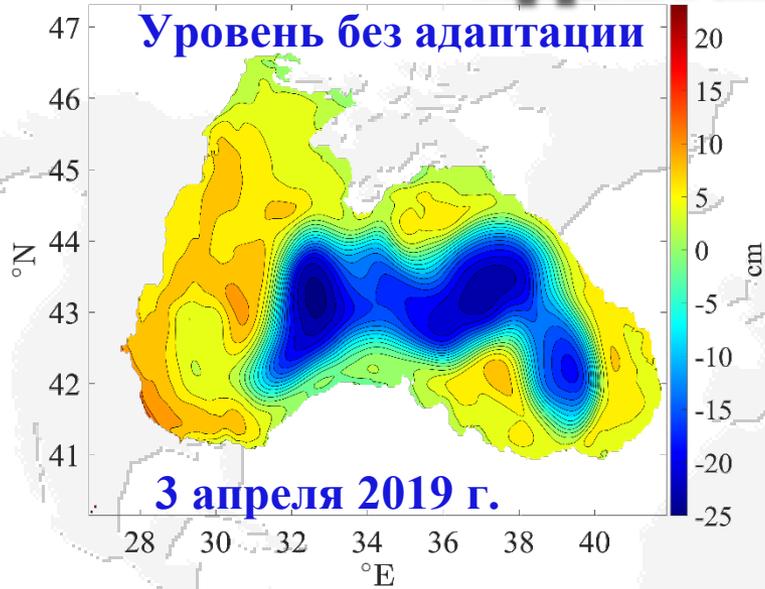
R – коэфф. корреляции уровня без адаптации и с ней

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad Std = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

	Начало	0,5 часа	1 час	1,5 часа	3 часа	6 часов
M_{Model}	-0,0289	-0,0286	-0,0563	-0,0340	-0,0452	-0,0349
$M_{Adaptation}$	0,0110	-0,0138	-0,0432	-0,0090	-0,0199	-0,0185
M_{Δ}	-0,0399	-0,0148	-0,0131	-0,0250	-0,0252	-0,0164
Std_{Δ}	2,1793	1,9067	1,7522	1,1131	0,8198	0,6724
R	0,9731	0,9813	0,9869	0,9931	0,9960	0,9974

Адаптация 115 цикла



$$M_{\text{Model}} = 0,8554$$

$$M_{\text{Adaptation}} = 0,3029$$

$$M_{\Delta} = -0,5525$$

$$\text{Std}_{\Delta} = 1,6463$$

$$R = 0,9863$$

Заключение

- Изучены существующие методы усвоения данных уровня
- Реализованы методы интерполяции и экстраполяции уровня с модельной сетки в точки спутниковых измерений и обратно
- Проведена фильтрация данных альтиметрии, учтена радиальная составляющая орбитальной ошибки, после чего среднее значение коэффициента корреляции альтиметрических измерений увеличилось с 0,4 до 0,67
- Решена задача адаптации вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии, разработанный метод внедрен в программный код термогидродинамической модели ИВМ РАН
- Проведен анализ результатов моделирования, исходя из энергетической изменчивости и расчета невязки уровня получена оценка времени адаптации – 36 модельных шагов, которая соотносится с оценками из классической литературы (Марчук, Саркисян, 1988)
- Проведен численный эксперимент адаптации одного цикла (10 дней) альтиметрических измерений спутника Jason-3

A satellite-style map of the Black Sea region, including parts of Europe, the Black Sea, and the Caucasus. A large, semi-transparent blue overlay covers the Black Sea and its immediate surroundings. The text "Спасибо за внимание" is centered over this blue area.

Спасибо за внимание