Анализ результатов расчетов модели морской циркуляции INMOM для Черного моря с вариационной ассимиляцией данных о температуре и солености

Захарова Наталья Борисовна
Пармузин Евгений Иванович

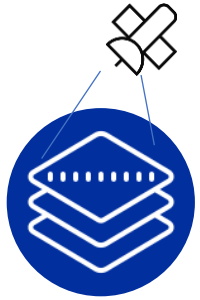
Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН)

Двадцать четвертая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА" 2026

Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН-Черное море»



+



+



Численная модель INMOM [1]

Процедуры ассимиляции [2]

Блок обработки данных [3]

1. Zalesny V. B. , Diansky N. A., Fomin V. V. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2012

2. Agoshkov, V., Zalesny, V., Parmuzin, E., Shutyaev, V., Ipatova, V. Problems of variational assimilation of observational data for ocean general circulation models and methods for their solution. Izv. Atmos. Ocean. Phys., 2010

3. Захарова Н.Б., Шевченко Б.С, Контроль данных дистанционного зондирования о температуре поверхности Черного и Азовского морей. Региональные проблемы дистанционного зондирования земли, 2023

Численная модель INMOM

Разработана в ИВМ РАН для моделирования гидродинамических процессов в акваториях Мирового океана



Расчёт

- Морские течения
- Термохалинная структура и плотность воды
- Распределение основных гидрологических и специальных параметров



Вывод полей

- Температура
- Соленость
- Уровень моря
- Поле скоростей

Вариационная ассимиляция данных

- Предположим, что функция, полученная путем обработки данных наблюдений, есть T_{obs} на $t \in (t_{j-1}, t_j), j = 1,2,\dots,J$. Допускается случай, когда T_{obs} известна только на части множества $\Omega \times (0, \bar{t})$, носитель которого обозначим m_0. Дополнительной неизвестной (управлением) системы является функция полного потока Q.

- Вводится функционал стоимости в виде:

$$J_a \equiv J_a(Q) = \frac{1}{2}\int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega_0} \alpha\left(Q - Q^{(0)}\right) B^{-1}\left(Q - Q^{(0)}\right) d\Omega\, dt + \frac{1}{2}\int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega_0} m_0 (T - T_{obs}) R^{-1} (T - T_{obs})\, d\Omega\, dt,$$

где $\alpha \equiv \alpha(\lambda, \theta, t)$ регуляризирующая функция (возможно, что $\alpha \equiv \alpha(\lambda, \theta, t) = const \geq 0$),
$Q^{(0)} = Q^{(0)}(\lambda, \theta, t)$ заданная функция, m_0 - характеристическая функция наличия данных,
R, B – ковариационные функции матрицы ошибок наблюдений и бэкграунда;

- *Задача ассимиляции данных наблюдений ставится следующий образом: найти полное решение системы (температура, соленость, функция уровня, скорость) и функцию потока тепла на поверхности Q такие, что функционал J_a принимает минимальное значение.*

Данные

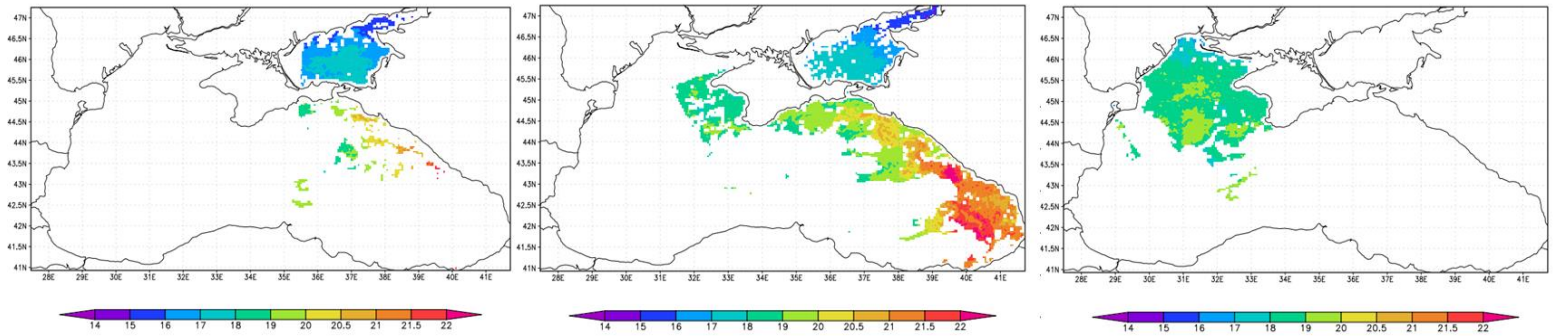
Ассимиляция в модели

- Данные наблюдений со спутников – температура поверхности моря
- Трехмерные поля по температуре
- Трехмерные поля по солености

Данные наблюдений

Температура поверхности моря

В процедурах ассимиляции используются данные наблюдений о ТПМ в акватории Черного и Азовского морей, предоставленные ЦКП «ИКИ - Мониторинг» [4]



4. Лупян Е.А. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 2015

Спутники:

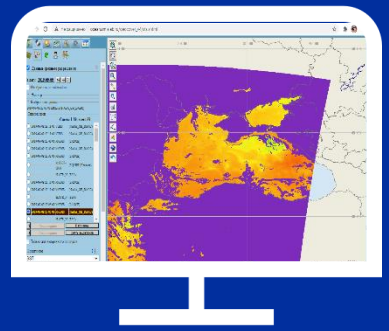
Aqua (MODIS),

Terra (MODIS),

Suomi NPP (VIIRS),

~~Sentinel (SLSTR),~~

~~Метеор-М (МСУ-МР)~~



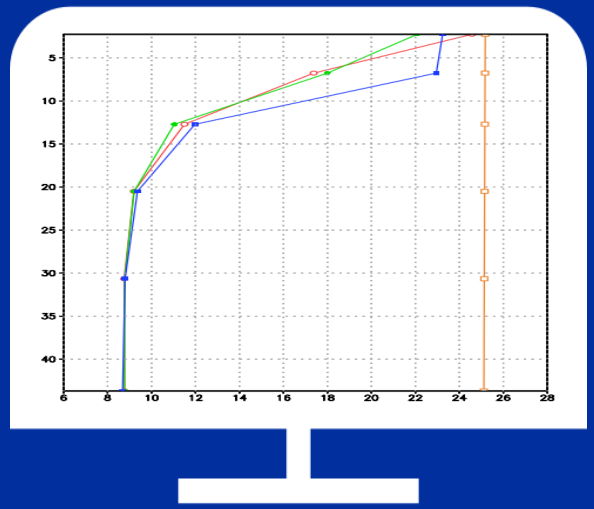
Данные наблюдений

3D-недельные поля

- Температура, соленость и геострофические скорости
- Пространственное разрешение ¼ градуса
- Доступны для всей акватории
- Спутниковые наборы данных об уровня моря, ТПМ, поверхностной солености и вертикальные профили *T, S* дополняют друг друга
- Получены из глобального проекта ARMOR3D* (входит в CMEMS)

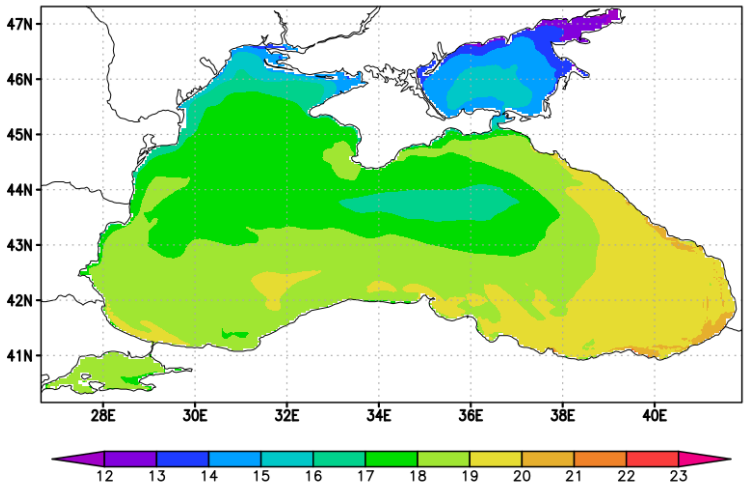
**Guinehut S., Dhomps A.-L., Larnicol G. and Le Traon P.-Y.* High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations // Ocean Sci. 2012. V. 8, P. 845-857.

Пример профилей в различных точках акватории с 15 по 22 июля 2020 года в σ-системе на первых 8 горизонтах, °С.



зеленый - 34.1° в.д. 43.7° с.ш.,
красный - 39.1° в.д. 42.2° с.ш.,
синий - 30.1° в.д. 42.5° с.ш.,
оранжевый 36.6° в.д. 46.2° с.ш.

Реанализ

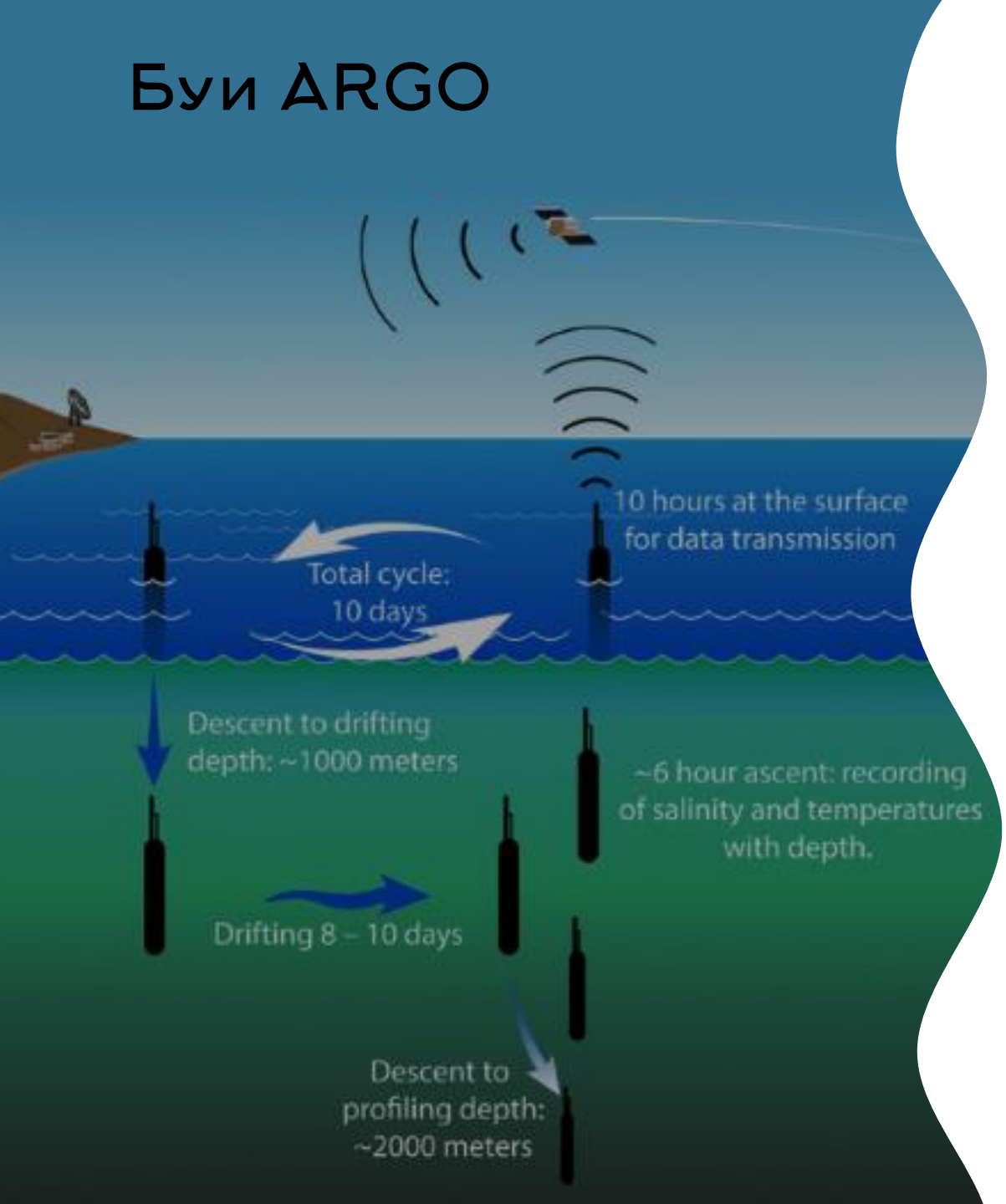


Поле ТПМ осредненное за август 2021 г.

Параметры расчета

- Акватория Черного и Азовского морей
- Ассимиляция ТПМ и 3D-недельных полей
- Расчеты за 2015-2024 гг.
- Шаги сетки по долготе и широте 0.05 и 0.036 градуса соответственно
- 27 глубинных уровней (1-2000 м)
- Вывод полей о температуре, солености, циркуляции, уровне моря

Буи ARGO



Оценка точности расчетов

проводится по данным буев ARGO

≤ 0.005 °C

погрешность температурных данных ARGO после калибровки[1]

≤ 0.001 PSU

погрешность данных солености по ARGO после калибровки[2]

[1] Gruenberg, D. E. (2026). Uncertainty Budget Analysis of the SBE-41 CTD Temperature Measurement System: Implications for Ocean Heat Content Estimates. https://doi.org/10.5281/zenodo.19254468

[2] https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/

Буи ARGO
в Черном море

Номер буя ARGO	Максимальная глубина [м]	Количество профилей за 2021 год
3901852	1500	71
3901854	1500	73
3901855	1500	69
6903271	1500	73
6903766	1500	72
6903782	1500	73
7900595	800	37

Табл. Некоторые параметры наблюдений

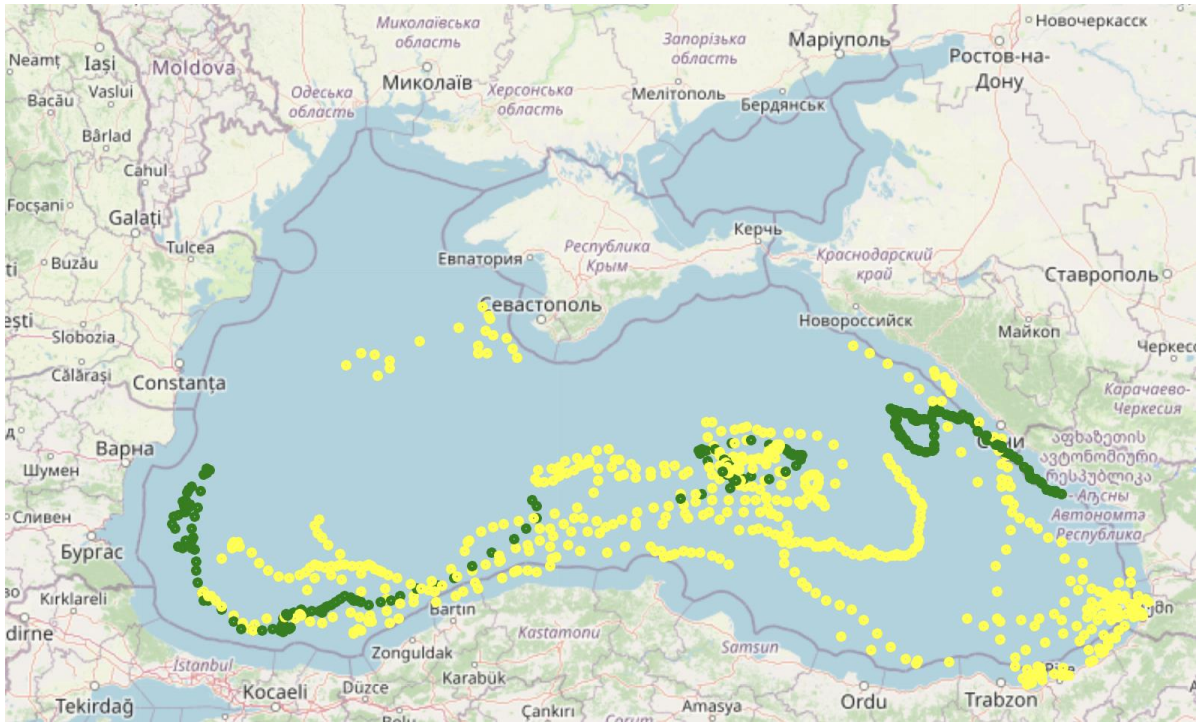


Рис. Траектории буев за 2021 год

Верификация

T?

Проведена верификация значений температуры для трех вариантов расчетов модели INMOM в акватории Черного моря

1. Базовая версия модели без ассимиляции
2. Вариационная ассимиляция спутниковых данных о ТПМ
3. Комбинированная ассимиляция ТПМ и 3D-недельных полей температуры

Цель:

Верификация результатов расчетов

Повышение точности расчетов

при включении ассимиляции 3D-полей

0-30 м — Наибольшие ошибки наблюдаются в верхних слоях

в 2-4 раза — Уменьшается среднеквадратическая ошибка при ассимиляции 3D-полей в слое 30-300 м (с 1.4-2.1°C до 0.3-1.0°C)

2.4 °C — Максимальный разброс ошибок по модели

в 5-7 раз — Относительная погрешность уменьшается при ассимиляции 3D-полей в большинстве слоев

Глубина слоя, м	Расчет без ассимиляции		Ассимиляция ТПМ		Ассимиляция ТПМ и 3D-полей температуры	
	δ	RMSE	δ	RMSE	δ	RMSE
0-5	-0.023	1.225	0.004	1.038	**0.003**	0.845
5-30	**-0.069**	**2.439**	**-0.055**	**2.334**	**-0.017**	**2.164**
30-100	0.173	2.125	0.178	2.172	**0.023**	1.015
100-300	0.151	1.429	0.154	1.451	**-0.000**	0.322
300-800	0.073	0.703	0.074	0.706	**-0.005**	0.201
800-1500	0.003	0.215	0.003	0.215	**-0.001**	0.176

Осредненная за 2021 год ошибка, температура

$$\delta = (T_{model} - T_{ARGO}) / T_{ARGO}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i:1}^{N}(T_{model} - T_{ARGO})^2}$$

Ошибки в значениях солености

Что происходит
с соленостью воды?

S?

1. Базовая версия модели без ассимиляции
2. Вариационная ассимиляция спутниковых данных о ТПМ
3. Вариационная ассимиляция 3D-недельных полей температуры (T)
4. Комбинированная ассимиляция ТПМ и 3D-недельных полей T и S

Ошибки солености

по данным буев ARGO

Модель показывает систематическое занижение солености во всех слоях (BIAS < 0)

в несколько раз

Ассимиляция данных о солености повышает точность расчетов в толще воды (0 – 800м). Наибольший эффект — в слое 5-30м, наименьший — в глубинных слоях 800–1500 м, где ошибки и так малы

Ошибка, PSU / Глубина, м	Метрики	Расчет без ассимиляции	Ассимиляция 3D-полей T	Ассимиляция ТПМ и 3D-полей T, S
0-5	RMSE	0.75	0.76	**0.21**
	Bias	-0.62	-0.63	**-0.13**
5-30	RMSE	0.57	0.57	**0.16**
	Bias	-0.50	-0.50	**-0.07**
30-100	RMSE	0.62	0.62	**0.40**
	Bias	-0.53	-0.53	**-0.20**
100-300	RMSE	0.53	0.53	**0.45**
	Bias	-0.46	-0.46	**-0.31**
300-800	RMSE	0.11	0.10	**0.06**
	Bias	-0.08	-0.08	**-0.04**
800-1500	RMSE	**0.03**	**0.03**	**0.03**
	Bias	**-0.02**	**-0.02**	**-0.02**

Осредненная за 2021 год ошибка солености, Bias и RMSE, PSU

Заключение

Ассимиляция ТПМ

Ассимиляция данных ТПМ полезна только для коррекции приповерхностного слоя (0-5 м), но не улучшает моделирование на глубинах ниже 30 м.

Роль 3D-данных

Ассимиляция 3D-полей температуры и солености критически важна для кардинального повышения точности модели на глубинах от 30 м и ниже.

Воспроизведение солености

Модель INMOM позволяет довольно точно воспроизводить поля солености, ассимиляция 3D полей S на глубинах свыше 800м практически не меняет результат

Работа поддержана РНФ (проект №26-11-00355)