

# ЦИФРОВОЙ АТЛАС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Захарова Наталья Борисовна  
Пармузин Евгений Иванович



X Всероссийская  
конференция «Обработка  
пространственных данных в  
задачах мониторинга  
природных и антропогенных  
процессов» (SDM-2025)

# ПРОЕКТ РНФ

## ИВС «ИВМ РАН - ЧЕРНОЕ МОРЕ» И ЕЁ ИНТЕГРАЦИЯ С ЦКП «ИКИ-МОНИТОРИНГ»

Информационно-вычислительная система (ИВС) вариационной ассимиляции данных «ИВМ РАН - Черное море» [1-2] была создана на основе численной модели INMOM [3] для моделирования морских акваторий и проведения расчетов с ассимиляцией реальных данных наблюдений [4] в ИВМ РАН.

В работе используются данные со спутников о температуре поверхности моря из программно-аппаратного комплекса ЦКП «ИКИ - Мониторинг»

1. Агошков В.И. др. ИВС "ИВМ РАН - Черное море". Москва, ИВМ РАН, 2016.
2. Агошков В.И., Пармузин Е.И., Захарова Н.Б. и др. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2014663103 «Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных «ИВМ РАН – Черное море»», 2014.
3. 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.
4. Agoshkov, V.I.; Zalesny, V.B.; Parmuzin, E.I.; Shutyaev, V.P.; Ipatova, V.M. Problems of variational assimilation of observational data for ocean general circulation models and methods for their solution. Izv. Atmos. Ocean. Phys., 2010.

# ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

**ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ  
СИСТЕМАМИ АРХИВАЦИИ, ОБРАБОТКИ И  
АНАЛИЗА ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ  
НАБЛЮДЕНИЙ ИКИ РАН ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ЗАДАЧ ИЗУЧЕНИЯ И МОНИТОРИНГА  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

- 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), 12(5) 263–284
- Лаврова О.Ю. и др. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности. Современные проблемы ДЗЗ из космоса (2019), 16(3) 266-287

# ЦКП «ИКИ-Мониторинг»



сверхбольшие архивы спутниковых данных и возможности их распределенного анализа

ИКИ

ТСМ ИКИ РАН

rus  eng 

ЦКП «ИКИ-Мониторинг»



ВЕГА-Science

Архивы данных

Пользователи

Публикации

Проекты

Возможность мониторинга и изучения различных явлений и объектов

Информационные продукты:  
Безоблачные композитные изображения

Возможности анализа:  
Анализ разновременных наблюдений и выявление изменений

# Информационно- вычислительная система «ИВМ РАН- Черное море»

Численная модель INMOM  
+  
Процедуры ассимиляции  
данных  
+  
Блок обработки данных



## 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:

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

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.*



# ОБРАБОТКА ДАННЫХ

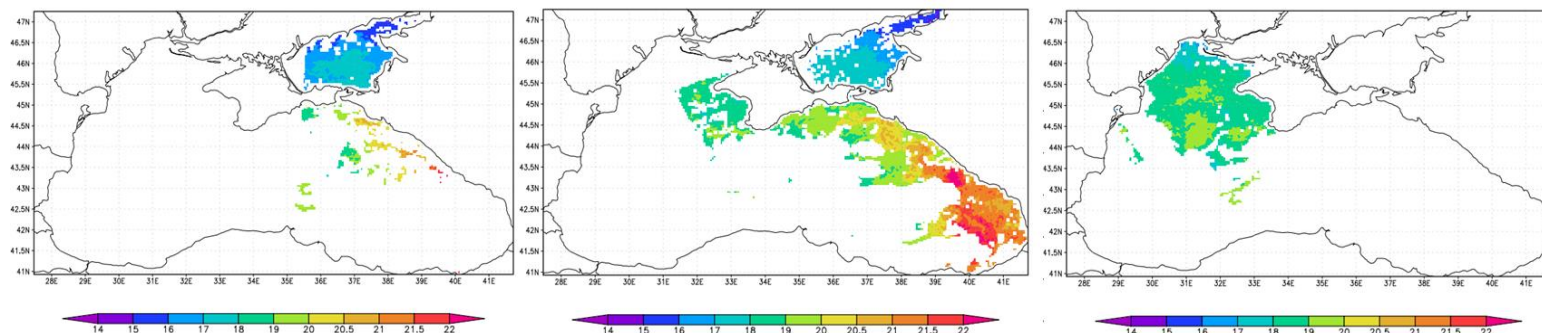
## ОБРАБОТКА, ВЕРИФИКАЦИЯ, ИНТЕРПОЛЯЦИЯ, АНАЛИЗ ДАННЫХ

- Обработка и верификация данных наблюдений о состоянии морских акваторий.
- Интерполяция наблюдений на регулярную сетку численной модели.
- Расчет статистических характеристик основных гидрофизических параметров морских сред по наборам данных.
- Построение на основе данных наблюдений ковариационных матриц и весовых коэффициентов в задачах ассимиляции данных.
- Верификация результатов расчетов и используемых методов ассимиляции по натурным данным измерений.

# ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

## ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

В процедурах ассимиляции используются данные о температуре поверхности моря (ТПМ) Черного, Азовского и Мраморного морей за 2015-2024 гг. морей с различных спутников, которые зачастую покрывают только часть исследуемой акватории в силу погодных условий, особенностей измерительных приборов и траекторий спутников.



Данные наблюдений о ТПМ в акватории Черного и Азовского морей за 17.10.2019, полученные из ЦКП «ИКИ - Мониторинг»



### СПУТНИКИ:

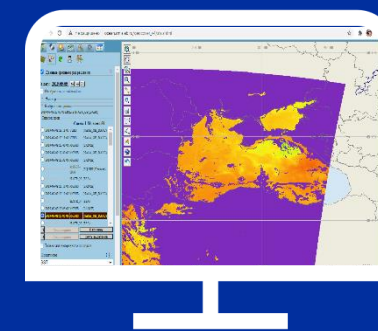
Aqua (MODIS),

Terra (MODIS),

Suomi NPP (VIIRS),

Sentinel (SLSTR),

Метеор-М (МСУ МР)



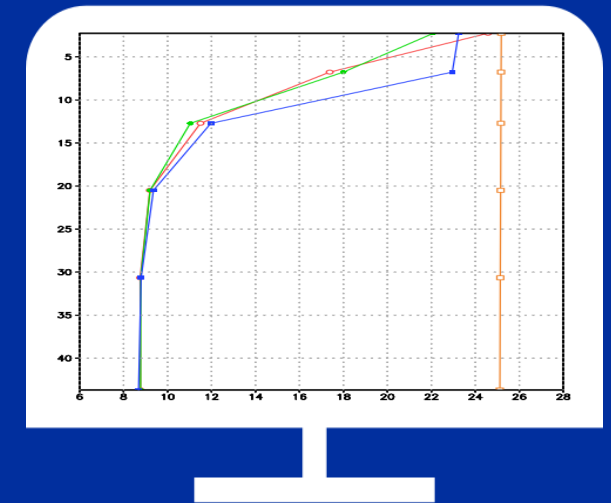
# ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

## 3D-НЕДЕЛЬНЫЕ ПОЛЯ

- Температура, соленость и геострофические скорости
- Пространственное разрешение  $1/4^\circ$
- Доступны для всей акватории
- Спутниковые наборы данных об уровне моря, ТПМ, поверхностной солености и вертикальные профили  $T, S$  дополняют друг друга
- Получены из глобального проекта ARMOR3D\* (входит в CMEMS)

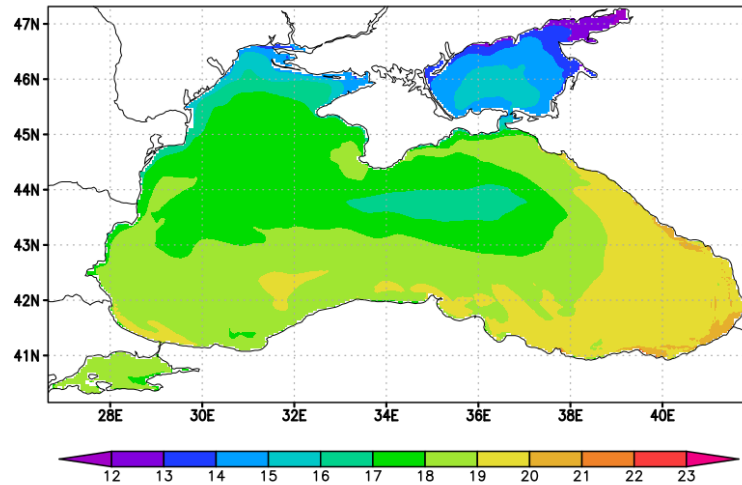
\*Guinehut S., Dhompas A.-L., Larnicol G. and Le Traon P.-Y. High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations // Ocean Sci. 2012. V. 8, P. 845-857.

Пример профилей в различных точках акватории с 15 по 22 июля 2020 года в  $\sigma$ -системе на первых 8 горизонтах,  $^\circ\text{C}$ .



зеленый -  $34.1^\circ$  в.д.  $43.7^\circ$  с.ш.,  
красный -  $39.1^\circ$  в.д.  $42.2^\circ$  с.ш.,  
синий -  $30.1^\circ$  в.д.  $42.5^\circ$  с.ш.,  
оранжевый  $36.6^\circ$  в.д.  $46.2^\circ$  с.ш.

# РЕАНАЛИЗ



Поле ТПМ осредненное за август 2021 г.

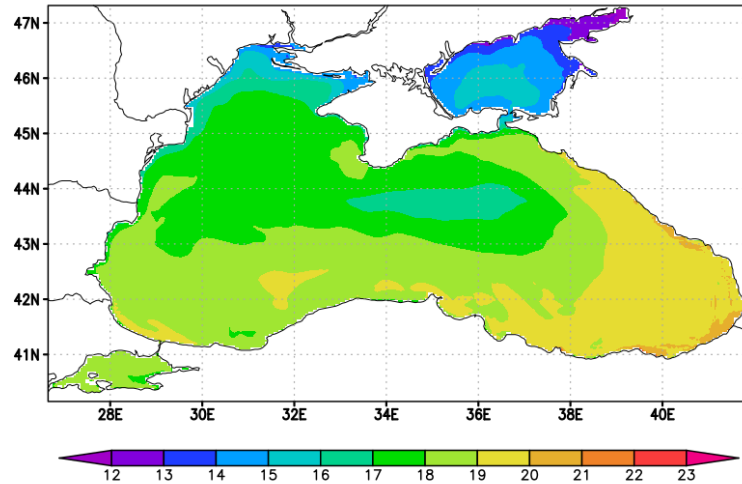
## ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА



- Ассимиляция ТПМ и 3D-недельных полей
- Расчет на 1 год
- Сетка 306x200x27 точек (широта x долгота x глубина);
- Шаг по времени  $\Delta t = 150$  секунд;
- Вывод полей о температуре, солености, циркуляции, уровне моря



# РЕАНАЛИЗ



Поле ТПМ осредненное за август 2021 г.

## ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕЙ АТЛАСА

- Температура, соленость
- Расчеты за 2015-2024 гг.
- Среднее за месяц
- 27 глубинных уровня (1-2000 м)
- Шаги сетки по X и по Y 0.05 и 0.036 градуса соответственно

# ЦИФРОВОЙ АТЛАС

ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ



На основе ассимиляции данных о ТПМ и 3D-полей температуры на основе модели INMOM построен реанализ состояния Черного и Азовского морей.



Построенный реанализ (по температуре) интегрирован в веб-ГИС платформу



Создан веб-проект, структура которого позволяет обеспечить интерактивный доступ к данным

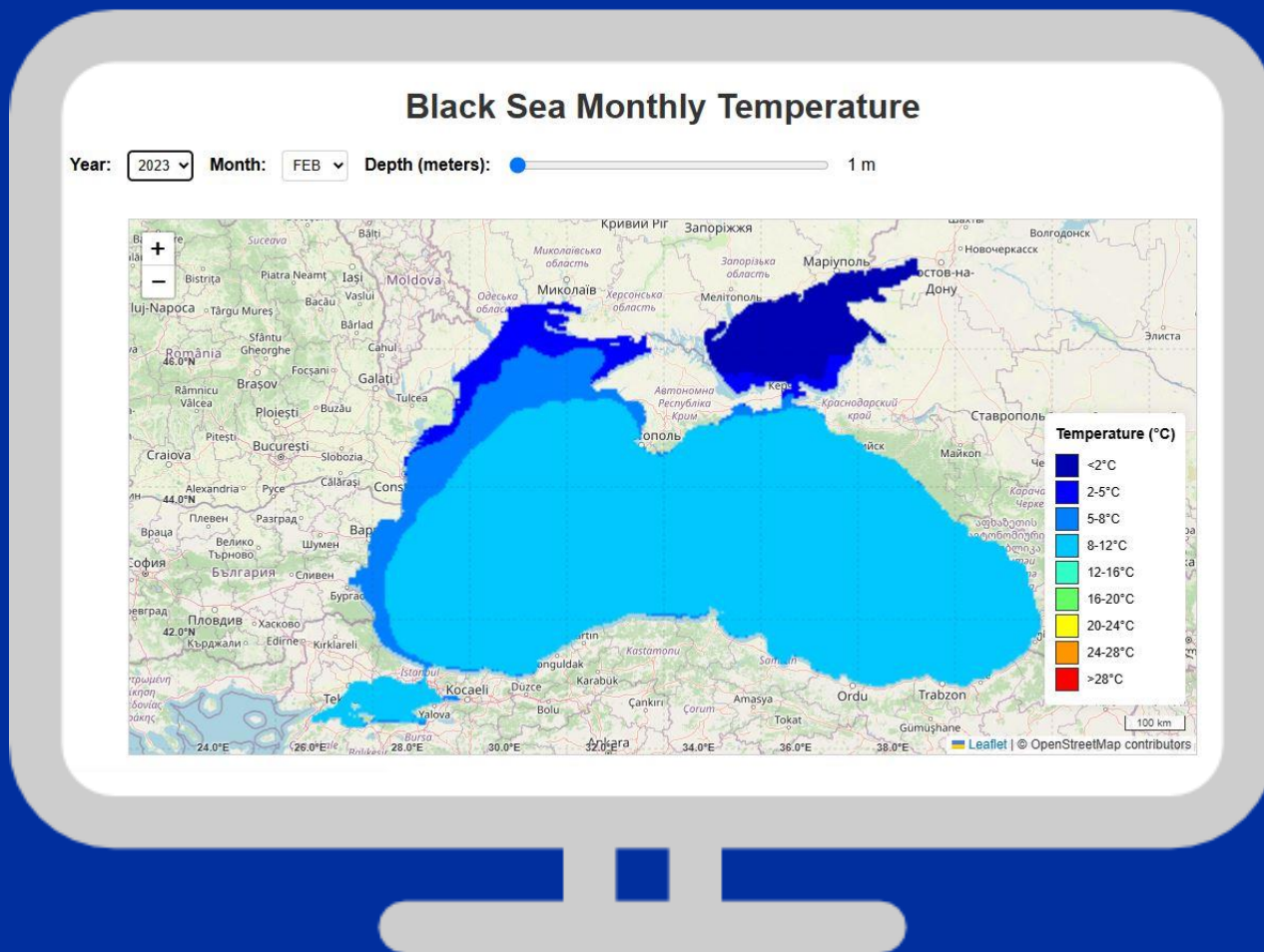


На платформе реализован инструментарий для визуализации и анализа состояния Черного моря посредством веб-технологий (JavaScript, Leaflet, Chart.js)

Цель:

Визуализация пространственно-временной изменчивости исследуемой акватории

# Ключевые функции



**Интерактивная карта**  
с цветовой визуализацией  
температуры

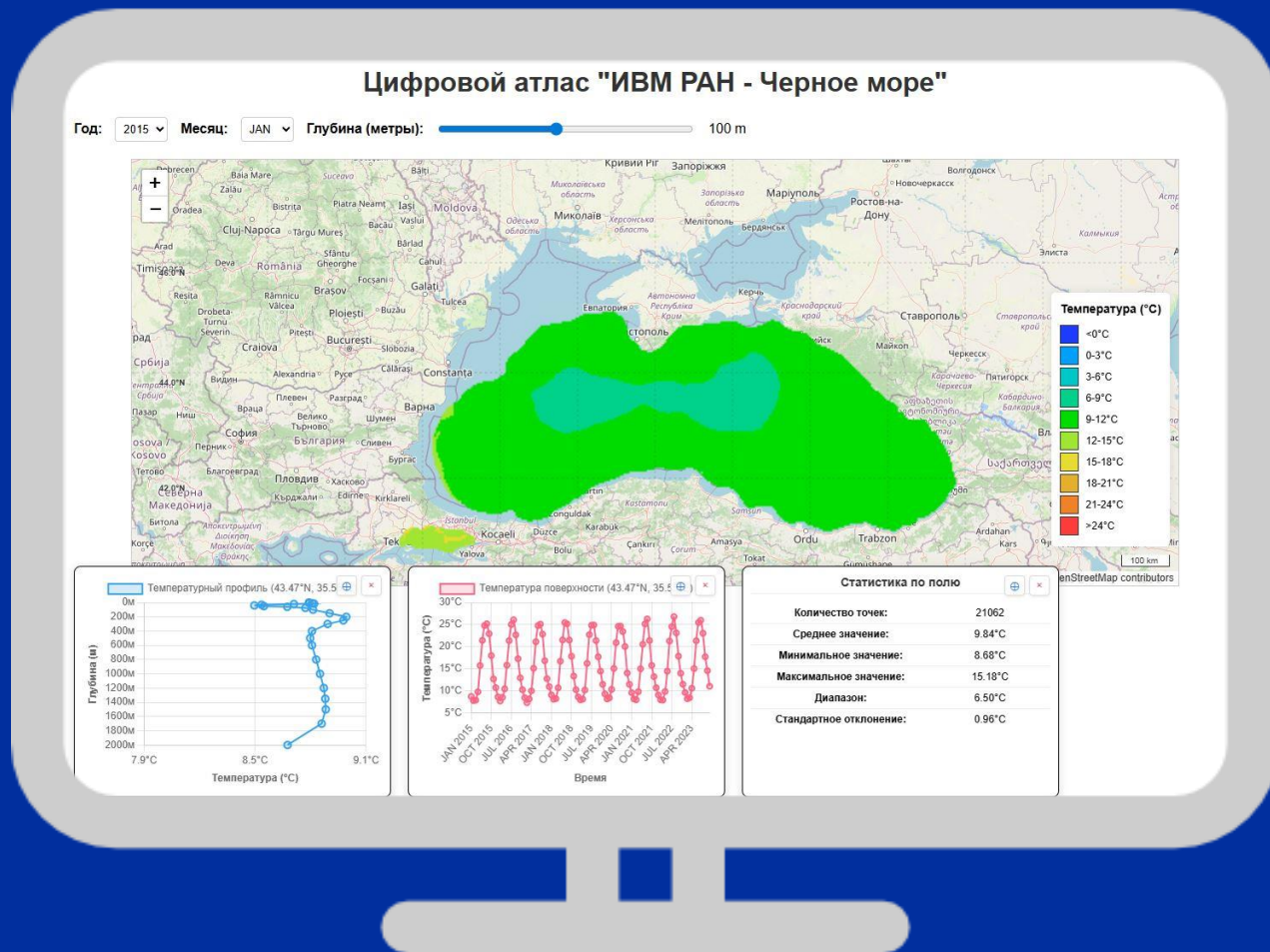


**Выбор месяца и года**  
для просмотра данных



**Слайдер глубины**  
(от 1 м до 2000 м)

# Ключевые функции



**Построение вертикального профиля по глубине (по клику на карту)**



**Статистические характеристики поля**  
среднее, минимальное, максимальное значения, стандартное отклонение и пр.

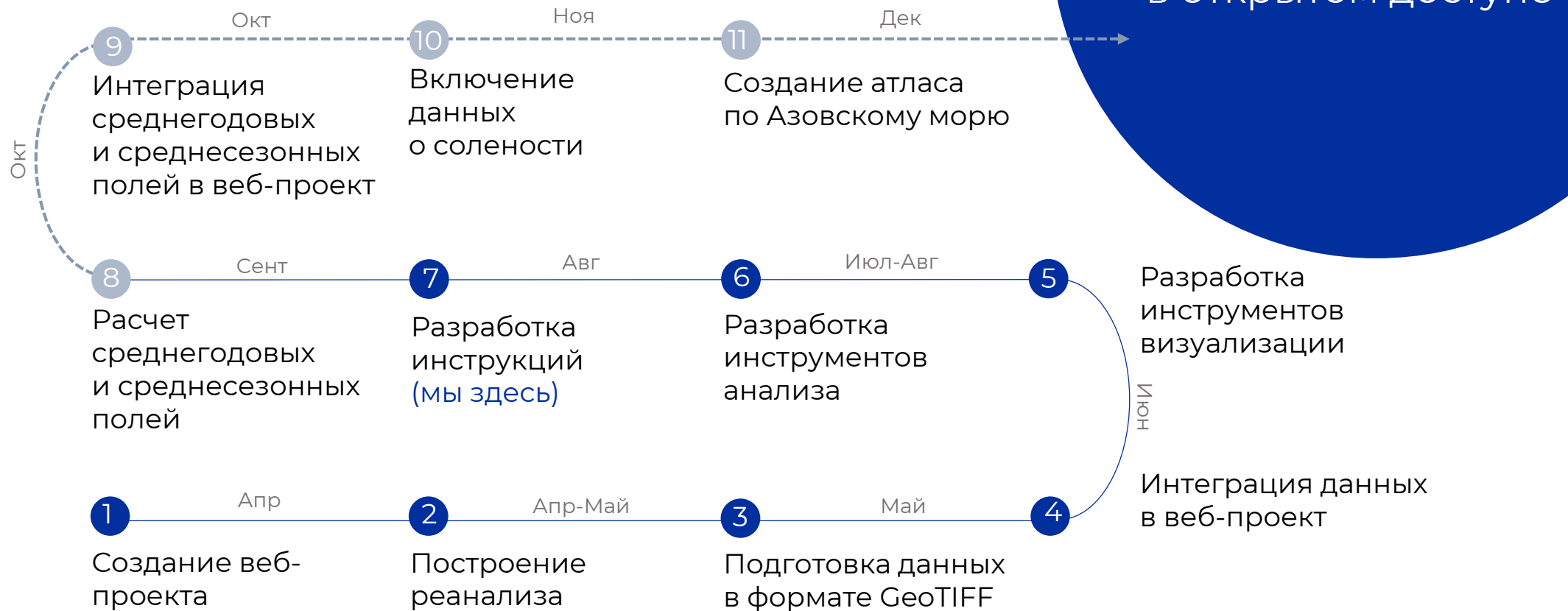


**График динамики значений**

в точке с течением времени

# СОЗДАНИЕ АТЛАСА

## Статус проекта



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## Сформирована основа

для создания более сложных информационно-аналитических систем, включающих дополнительные параметры (соленость, течения) и методы анализа.

## Создан инструментарий

для проведения комплексного анализ пространственно-временной изменчивости температурных полей через построение горизонтальных срезов, вертикальных профилей и временных рядов в произвольных точках акватории.

## Разработана и реализована веб-платформа

«Цифровой атлас ИВМ РАН – Черное море», предоставляющая исследователям интерактивный доступ к результатам многолетних гидродинамических расчетов по модели INMOM с учетом данных наблюдений.

● Работа поддержана РФФ (проект №19-71-20035)

# ВАШИ ИДЕИ ДЛЯ АТЛАСА

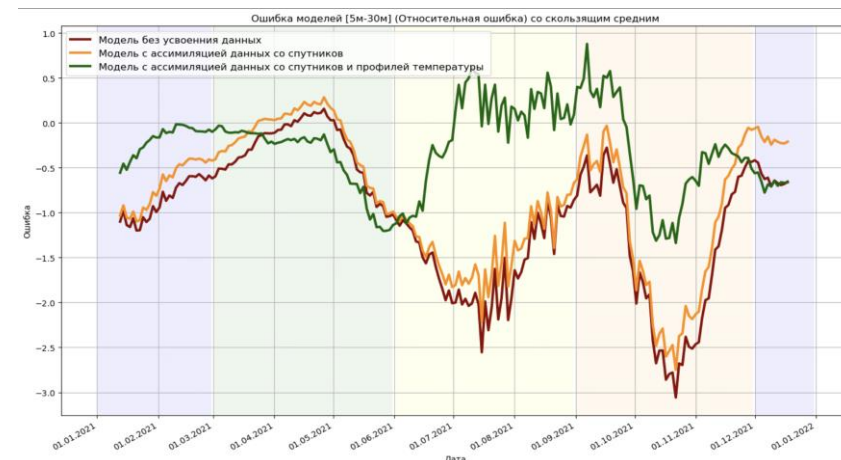
к.ф.-м.н., с.н.с. ИВМ РАН  
Захарова Наталья Борисовна  
[Zakharova\\_nb@mail.ru](mailto:Zakharova_nb@mail.ru)

# ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

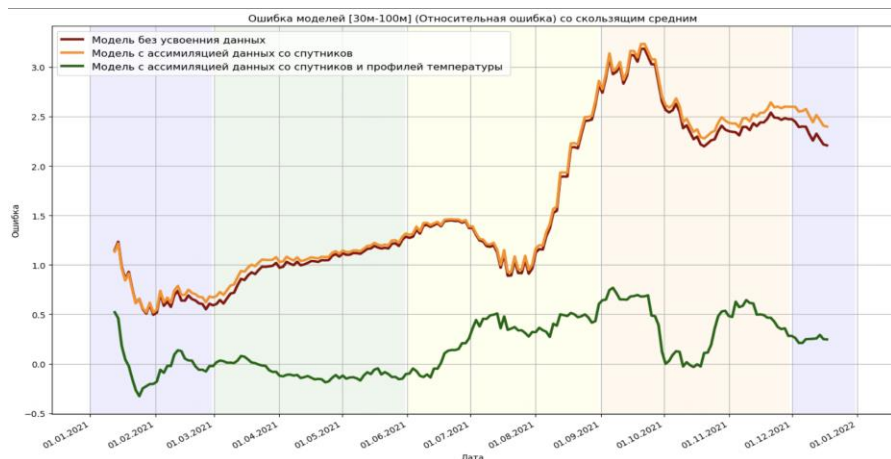
МОДЕЛЬ БЕЗ УСВОЕНИЯ,  
МОДЕЛЬ С АССИМИЛЯЦИЕЙ ТПМ,  
МОДЕЛЬ С АССИМИЛЯЦИЕЙ ТПМ  
И 3D-ПОЛЕЙ



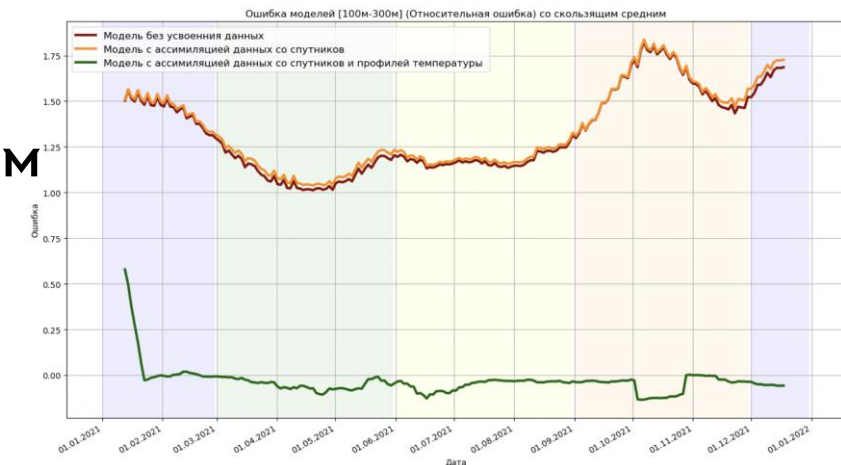
0–5 м



5–30 м



30–100 м



100–300 м

\*Оценка результатов проводится на основе сопоставления результатов расчетов с измерениями буев ARGO

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ АССИМИЛЯЦИИ ПРОФИЛЕЙ

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	
	$\delta$	RMSE	$\delta$	RMSE	$\delta$	RMSE
0-5	-0.023	1.225	0.004	1.038	<b>0.003</b>	0.845
5-30	<b>-0.069</b>	<b>2.439</b>	<b>-0.055</b>	<b>2.334</b>	<b>-0.017</b>	<b>2.164</b>
30-100	0.173	2.125	0.178	2.172	<b>0.023</b>	1.015
100-300	0.151	1.429	0.154	1.451	<b>-0.000</b>	0.322
300-800	0.073	0.703	0.074	0.706	<b>-0.005</b>	0.201
800-1500	0.003	0.215	0.003	0.215	<b>-0.001</b>	0.176

Осредненная за 2021 год ошибка, температура

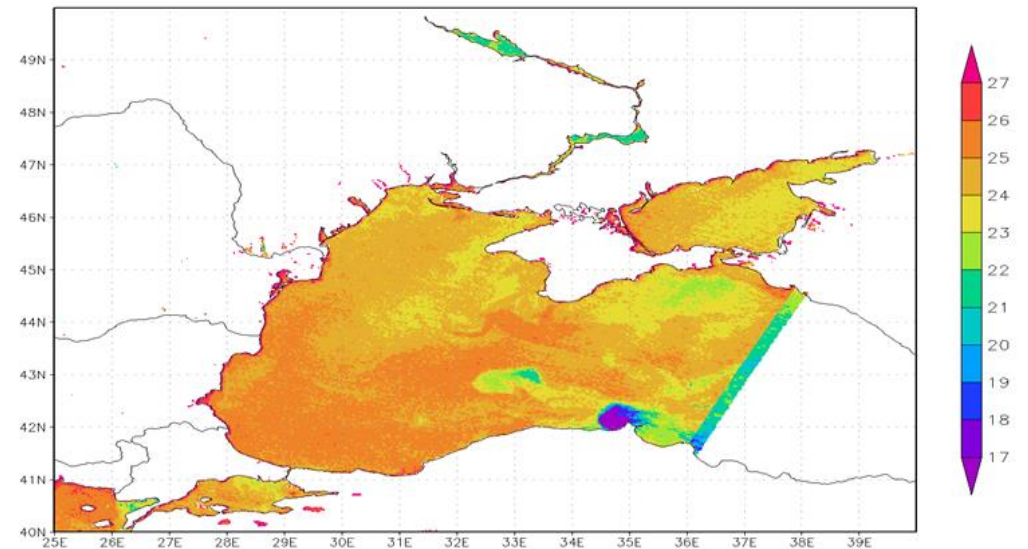
$$\delta = (T_{model} - T_{ARGO}) / T_{ARGO}$$

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

# ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для использования данных наблюдений в численной модели разрабатываются алгоритмы верификации данных, позволяющие выявлять ошибки, корректировать данные и исключать отдельные поля или выбросы.

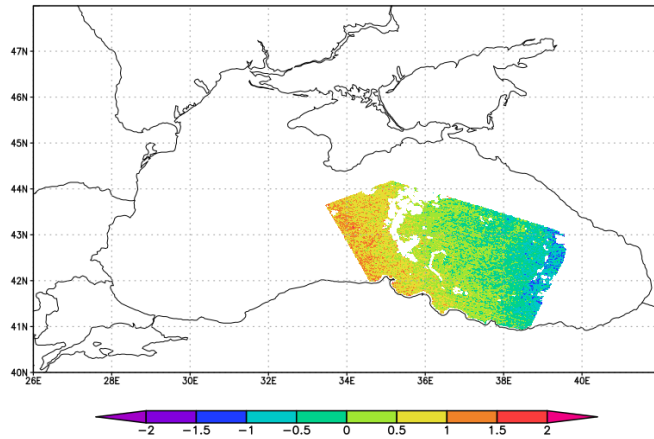
## ОШИБКИ В ДАННЫХ



Температура поверхности моря, °C

# ОШИБКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

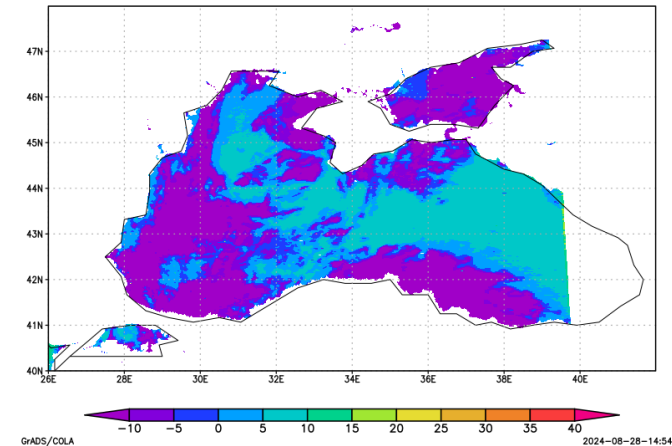
Данные не всегда согласуются между собой



Разница значений с двух спутников. Terra и SNPP

ТЕМПЕРАТУРА  
ПОВЕРХНОСТИ  
МОРЯ, °C

## МЕТЕОР-М



Данные не откалиброваны