

**ВАРИАЦИОННАЯ АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ  
ЦКП "ИКИ-МОНИТОРИНГ" В ЗАДАЧЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ**

Захарова Н.Б. (1), Агошков В.И. (1), Лебедев С.А. (1,2), Лезина Н.Р. (1),  
Пармузин Е.И. (1), Фомин В.В. (1,3), Шелопут Т.О. (1), Шутяев В.П. (1)

(1) Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука  
Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Геофизический центр РАН, Москва, Россия

3) Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова

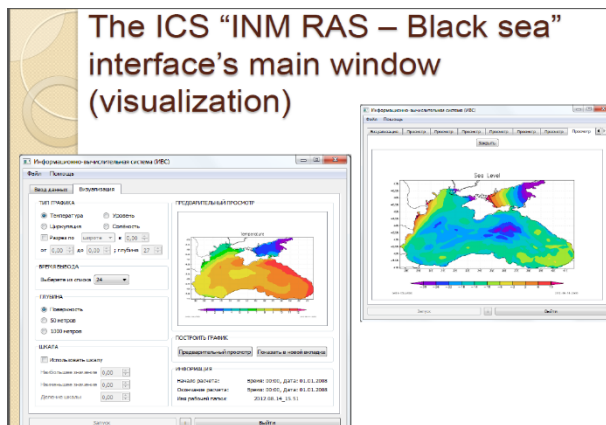
# Информационно – вычислительная система (ИВС) вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Черное море»\*

Целью работы является

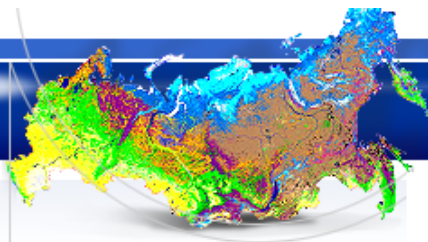
интеграция:

ИВС

и ЦКП



Программно-аппаратный комплекс ЦКП «ИКИ-Мониторинг»\*\*



ИКИ Институт космических исследований  
Российской Академии наук

Отдел "Технологий спутникового мониторинга"

Разработка методов, технологий и систем дистанционного мониторинга состояния окружающей среды и антропогенных объектов

ЦКП «ИКИ-Мониторинг» функционирует на базе разработанного в ИКИ РАН программно-аппаратного комплекса, в рамках которого реализуется автоматизированное решение базовых задач, связанных с организацией работы с данными дистанционного зондирования (сбор спутниковых данных, проведение потоковой обработки данных для формирования различных информационных продуктов, ведение архивов спутниковой информации и результатов их обработки и пр.)

\*В.И. Агошков и др. Информационно-вычислительная система "ИВМ РАН - Черное море". Москва, ИВМ РАН, 2016.

\*\*Е.А. Лупян и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.

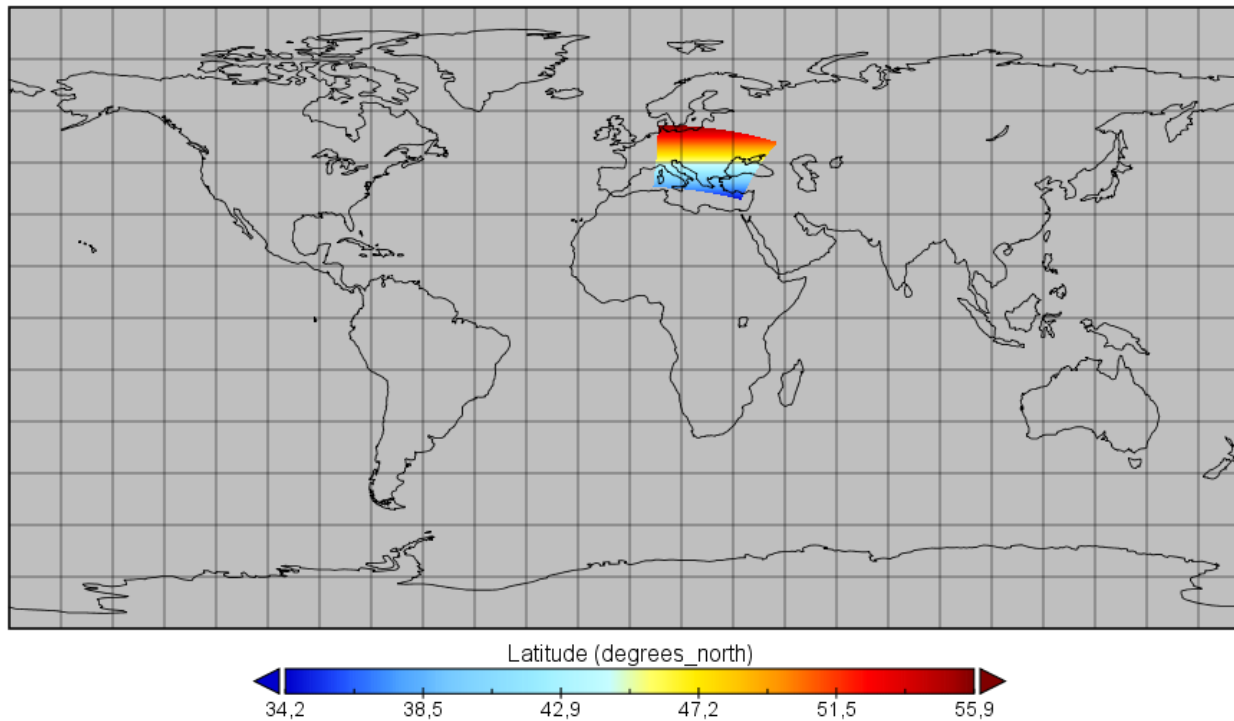
# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Оценка качества исходных данных и разработка критериев фильтрации данных для устранения ошибок
  - Оценка качества данных
  - Фильтрация данных
  - Фильтрация облачности в данных
2. Разработка комплекса программ для обработки и интерполяции получаемых из ЦКП данных дистанционного зондирования в форматы, используемые в численной модели гидротермодинамики моря и в ИВС
3. Тестирование и отладка разработанных программ
  - Тестирование и отладка разработанных программ для преобразования данных
  - Тестирование процедур ассимиляции с преобразованными данными наблюдений в ИВС
4. Численные эксперименты по ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности моря (ТПМ) в численной модели термодинамики Черного и Азовского морей
  - Эксперименты по ассимиляции среднесуточных данных
  - Эксперименты по ассимиляции мгновенных данных



# ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ

1. Оценка качества исходных данных и разработка критериев фильтрации данных для устранения ошибок

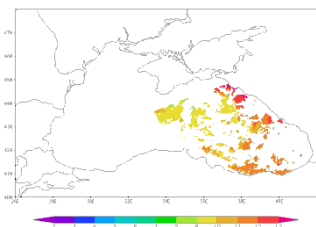


# ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДАННЫХ

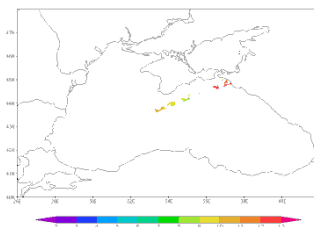
2. Разработка комплекса программ для преобразования получаемых данных дистанционного зондирования в форматы, используемые в численной модели гидротермодинамики моря и в ИВС

Преобразование данных, интерполяция данных на расчетные сетки численной модели, построение среднесуточных полей данных

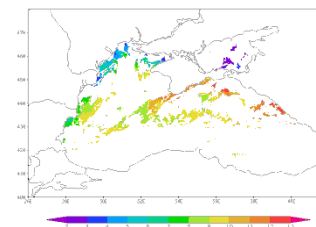
Данные о ТПМ Черного и Азовского морей за 1 января 2019 года, °C:



(09:24, VIIRS)

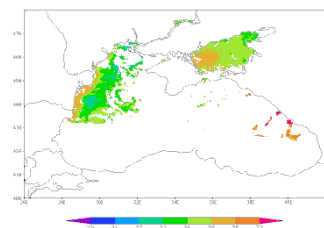


(09:30, VIIRS)

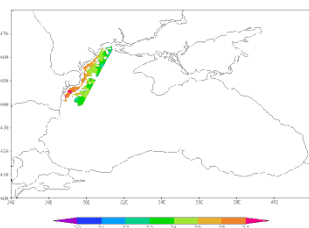


(23:24, VIIRS)

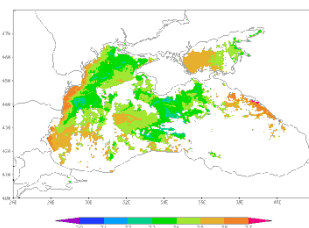
Данные о ТПМ Черного и Азовского морей за 30 июня 2019 года, °C:



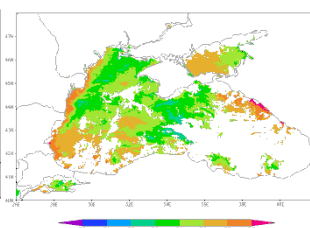
(00:06, VIIRS)



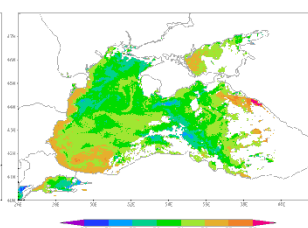
(01:05, Aqua)



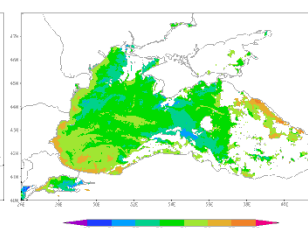
(09:54, VIIRS)



(10:35, Aqua)



(20:00, Terra)



(23:48, VIIRS)

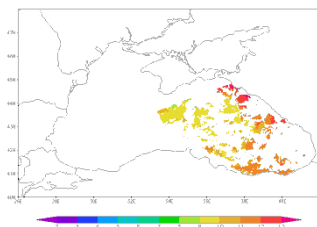
# ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДАННЫХ

2. Разработка комплекса программ для преобразования получаемых данных дистанционного зондирования в форматы, используемые в численной модели гидротермодинамики моря и в ИВС

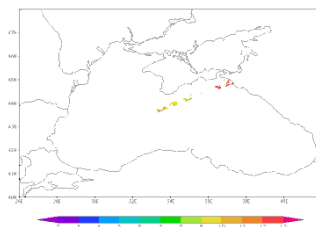
Преобразование данных, интерполяция данных на расчетные сетки численной модели, построение среднесуточных полей данных

Данные о ТПМ Черного и Азовского морей за 1 января 2019 года, °C:

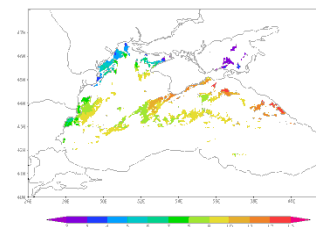
Зимний период –  
меньше данных



(09:24, VIIRS)



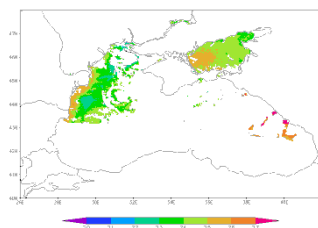
(09:30, VIIRS)



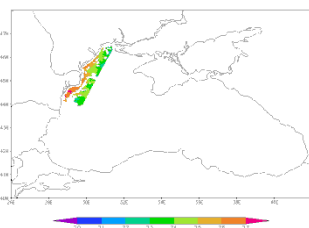
(23:24, VIIRS)

Данные о ТПМ Черного и Азовского морей за 30 июня 2019 года, °C:

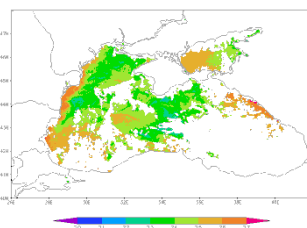
Летний период –  
больше данных



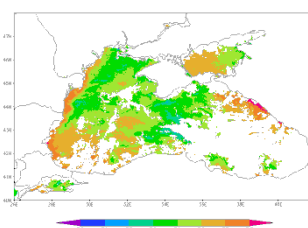
(00:06, VIIRS)



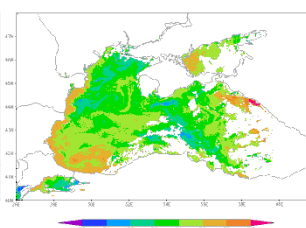
(01:05, Aqua)



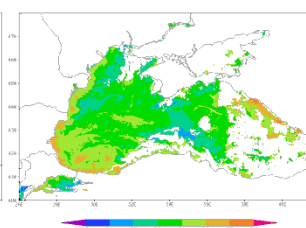
(09:54, VIIRS)



(10:35, Aqua)



(20:00, Terra)



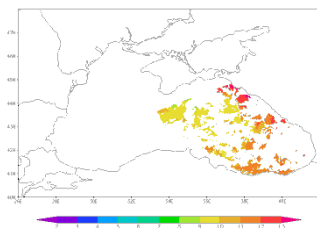
(23:48, VIIRS)

# ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДАННЫХ

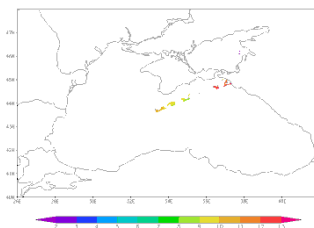
2. Разработка комплекса программ для преобразования получаемых данных дистанционного зондирования в форматы, используемые в численной модели гидротермодинамики моря и в ИВС

Преобразование данных, интерполяция данных на расчетные сетки численной модели, **построение среднесуточных полей данных**

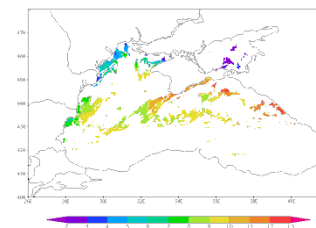
Данные о ТПМ Черного и Азовского морей за 1 января 2019 года, °C:



(09:24, VIIRS)



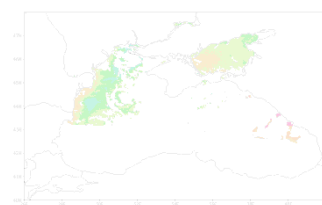
(09:30, VIIRS)



(23:24, VIIRS)

Данные о ТПМ Черного и

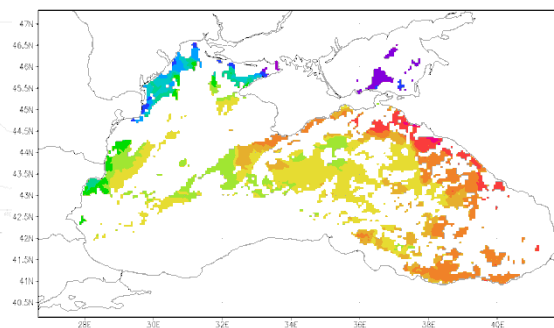
9 года, °C:



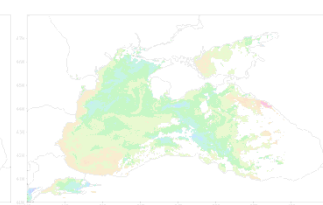
(00:06, VIIRS)



(01:05, Aqua)



(20:00, Terra)



(23:48, VIIRS)

# АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ

Численные эксперименты проводились для акватории Черного и Азовского морей (использовалась модель INMOM, разработанная в ИВМ РАН\*)

В качестве первого приближения к потоку тепла на границе использовался среднеклиматический поток за январь 2019 г., полученный по данным реанализа NCEP (National Centers for Environmental Prediction)

## ➤ Данные наблюдений для ассимиляции:

- данные температуры поверхности Черного и Азовского морей ЦКП "ИКИ - Мониторинг", подготовленные на основе измерений инфракрасного радиометра VIIRS (спутник SNPP), спектрорадиометров MODIS (спутники AQUA и Terra)
- Среднесуточные данные с портала Copernicus\*\*

➤ **Пространственное разрешение модели:** 0.05\*0.036 градуса (306x200 точек)

➤ **Уровней по глубине:** 20 ( $\sigma$ -уровни)

➤ **Шаг по времени:** 2.5 минуты

➤ **Ассимиляция:** использовались 2 типа данных наблюдений:

- Мгновенные данные. Усвоение в моменты времени, соответствующие наблюдаемым данным
- Среднесуточные данные усваивались 2 раза в сутки

➤ **Расчетное время:** 1 год (2019)

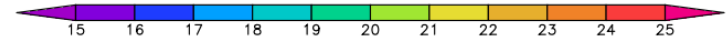
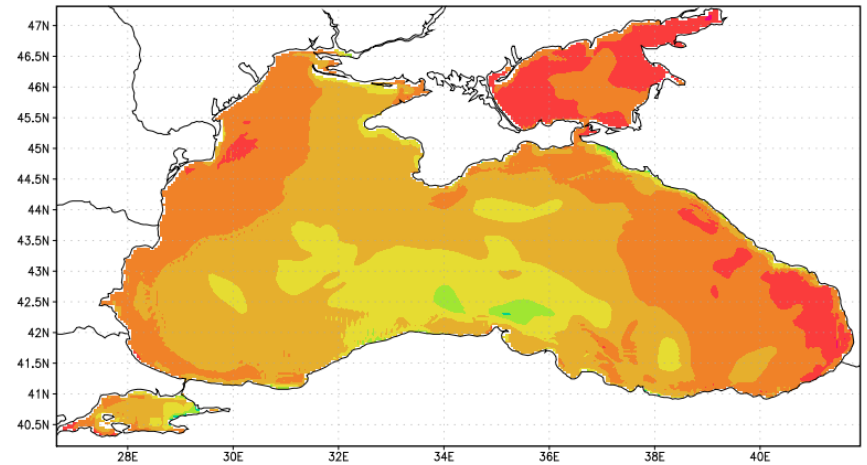
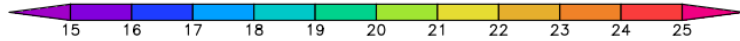
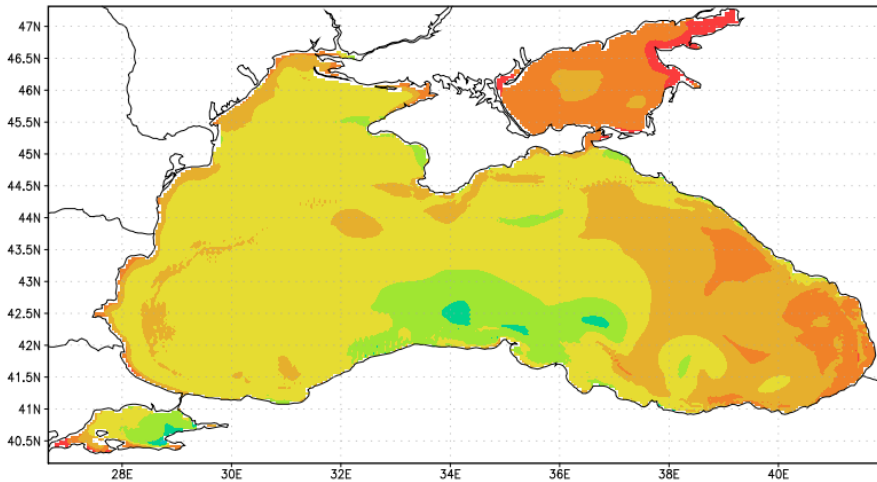
\* V. B. Zalesny, N. A. Diansky, V. V. Fomin. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012, 27(1) . P. 95-111.

\*\* <http://marine.copernicus.eu>





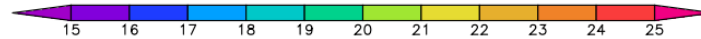
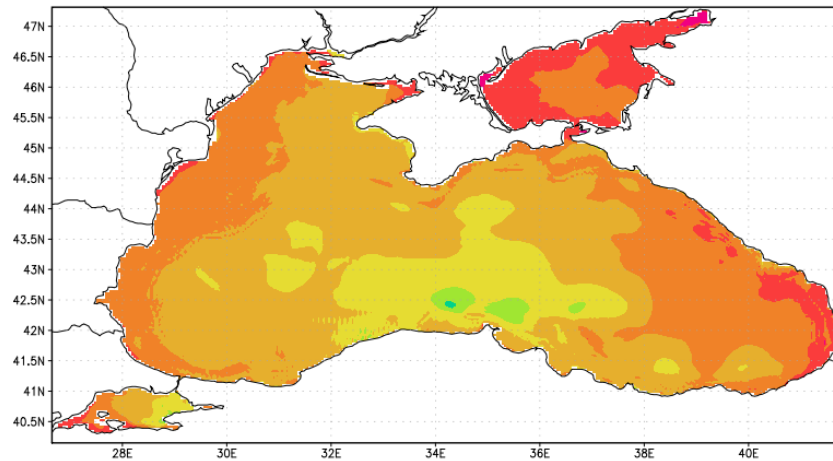
# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Расчет по модели без усвоения  
ТПМ

Расчет по модели с усвоением  
среднесуточных данных о ТПМ

Расчет по модели с усвоением  
мгновенных данных ТПМ

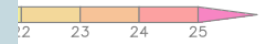
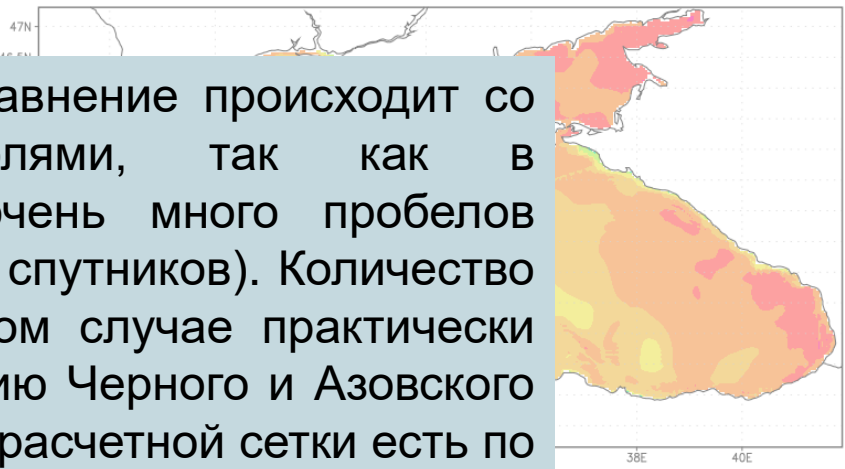
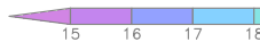
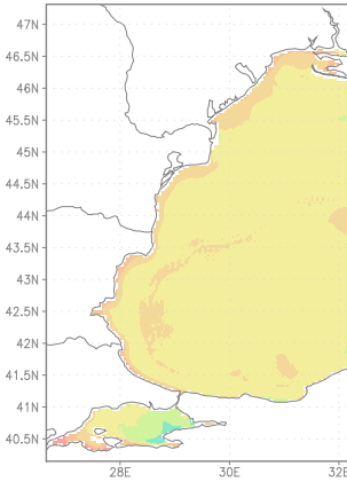


Среднемесячные поля температуры поверхности моря (ТПМ). Июнь. °С



# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

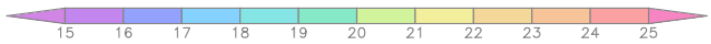
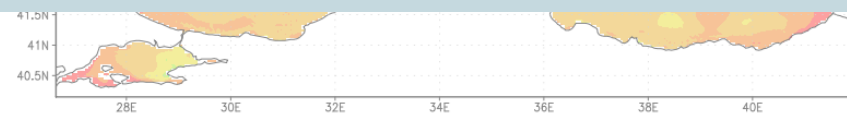
Вывод данных и их сравнение происходит со среднемесячными полями, так как в мгновенных данных очень много пробелов (отсутствуют данные со спутников). Количество данных за месяц в этом случае практически покрывает всю акваторию Черного и Азовского морей и в каждой точке расчетной сетки есть по несколько измерений. Отметим, что в модели без ассимиляции происходит релаксация к среднемесячным климатическим данным о температуре поверхности моря. Поэтому для корректного сравнения с расчетами по модели без ассимиляции был выбран именно такой промежуток осреднения результатов численных экспериментов.



Расчет по модели без усвоения ТПМ

Расчет по модели с усвоением точных данных о ТПМ

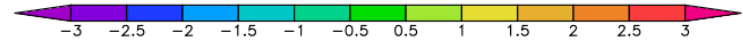
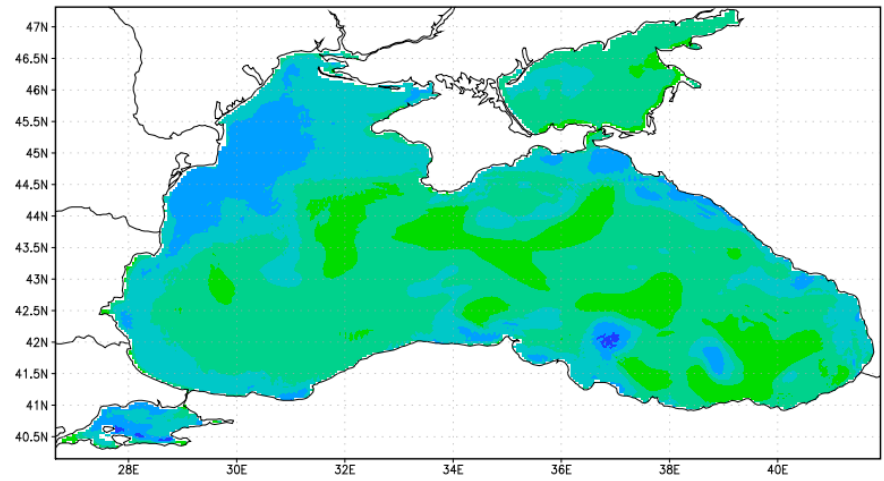
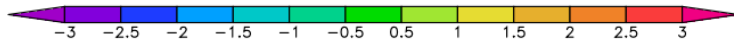
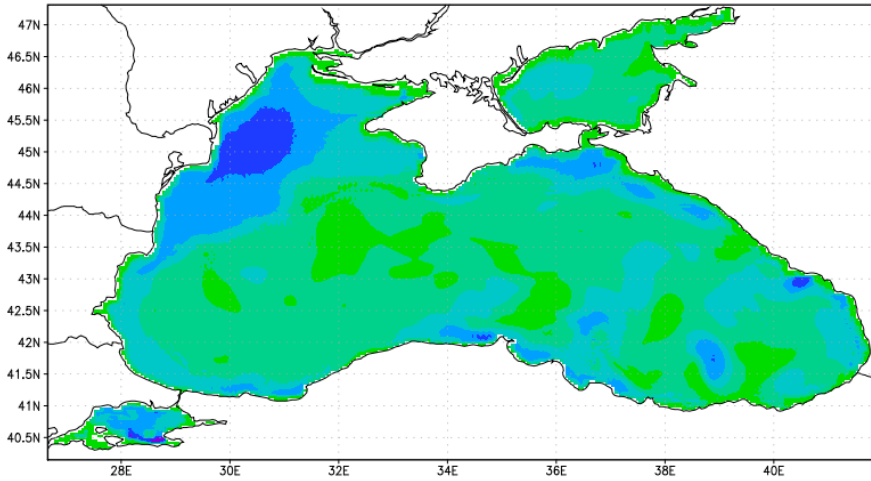
Расчет по модели с усвоением мгновенных данных ТПМ



Среднемесячные поля температуры поверхности моря (ТПМ). Июнь. °С



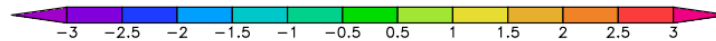
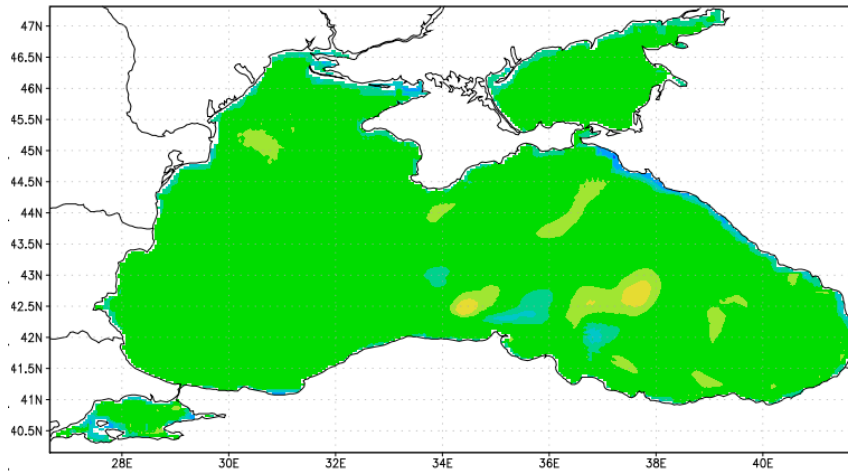
# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Модель без ассимиляции и модель с ассимиляцией среднесуточных данных ТПМ

Модель без ассимиляции и модель с ассимиляцией мгновенных данных ТПМ

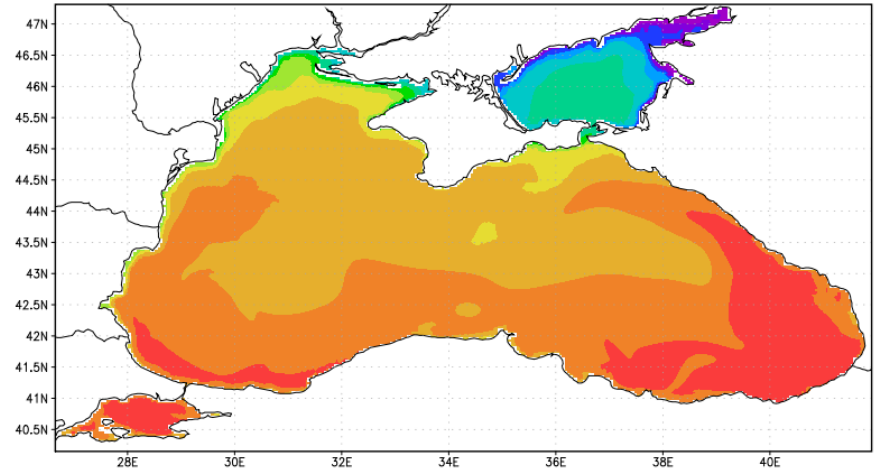
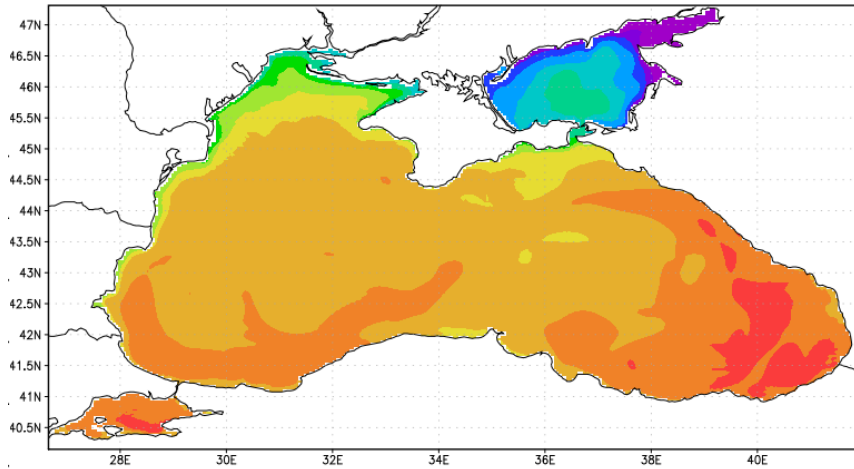
Разность в значениях ТПМ при различных ассимиляциях



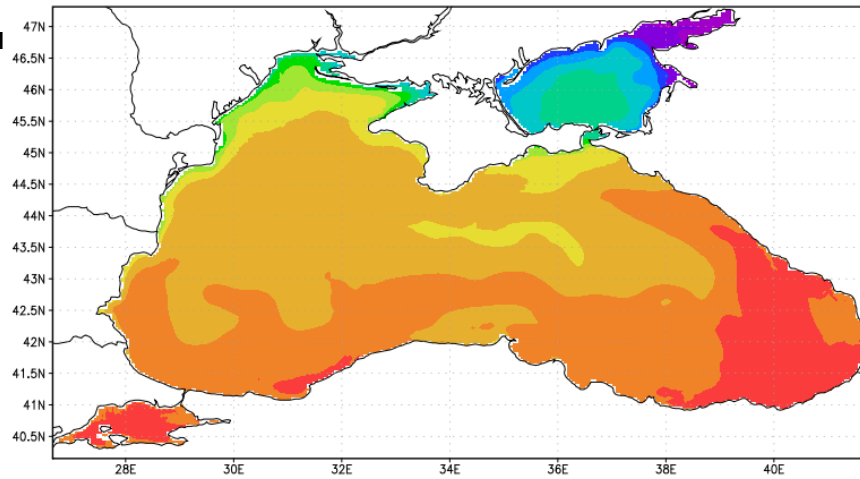
Разность в среднемесячных полях ТПМ. Июнь. °С



# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Расчет по модели без усвоения  
ТПМ



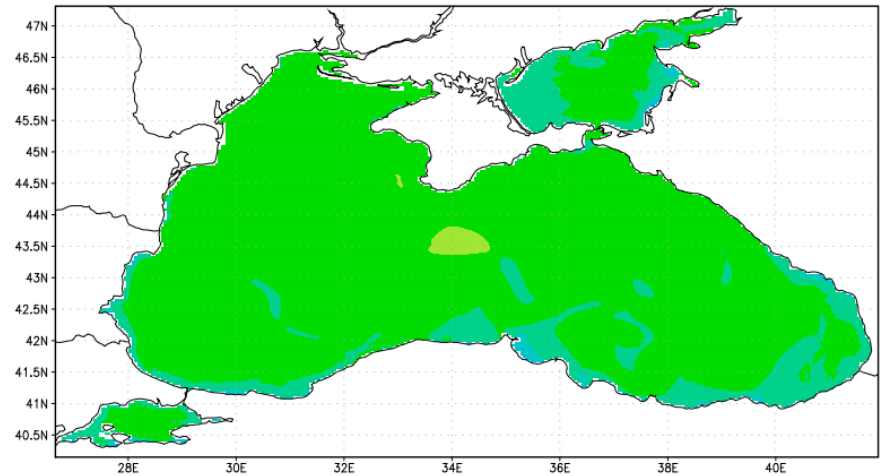
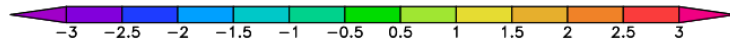
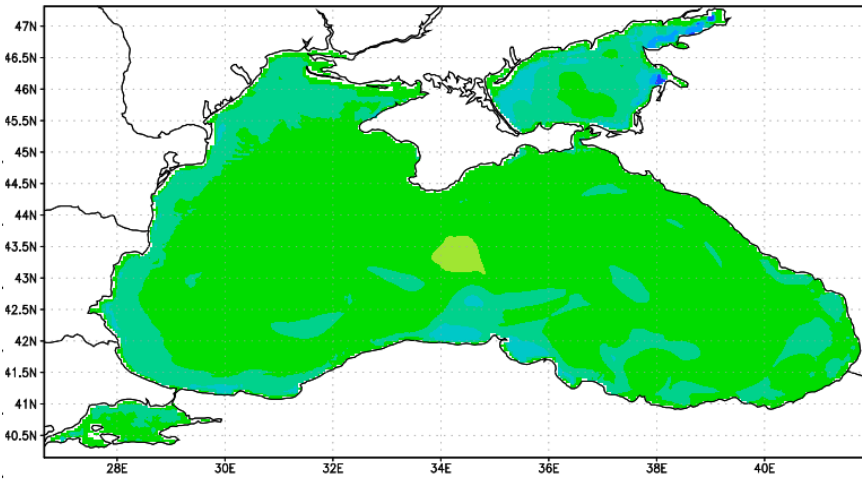
Расчет по модели с усвоением  
среднесуточных данных о ТПМ

Расчет по модели с усвоением  
мгновенных данных ТПМ

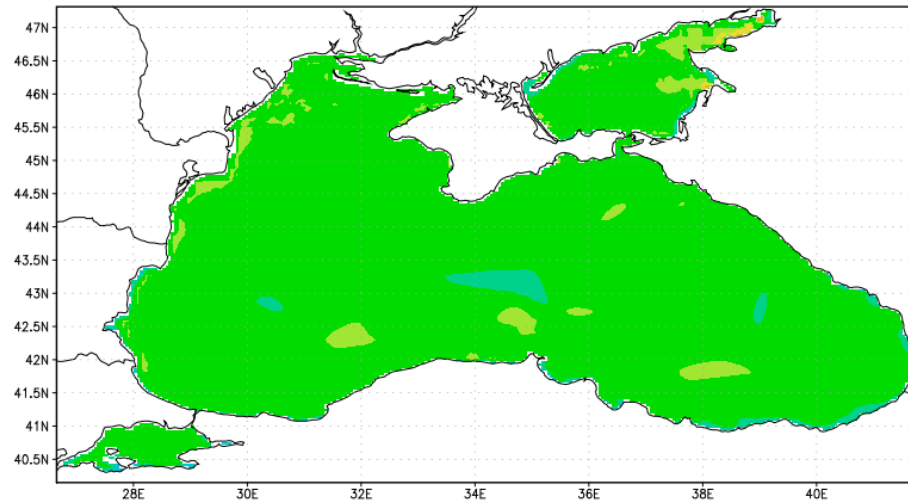
Среднемесячные поля ТПМ. Ноябрь. °C



# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Модель без ассимиляции и  
модель с ассимиляцией  
среднесуточных данных ТПМ



Модель без ассимиляции и  
модель с ассимиляцией  
мгновенных данных ТПМ



Разность в значениях ТПМ при  
различных ассимиляциях

Разность в среднемесечных полях ТПМ. Ноябрь. °С



# ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

1. Отлажена процедура обработки данных дистанционного зондирования ЦКП «ИКИ - Мониторинг», протестированы процедуры ассимиляции получаемых данных в численной модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей INMOM.
2. Показана возможность работы системы ассимиляции с данными наблюдений, имеющих существенные пробелы. Модель в данном случае выступает как интерполянт и позволяет строить согласованные поля всей системы. Причем поля температуры поверхности моря (при сравнении среднемесячных полей), полученные с ассимиляцией мгновенных данных близки к полям ТПМ, полученным при ассимиляции среднесуточных значений ТПМ.
3. При усвоении только поверхностной температуры основное влияние оказывается на температуру поверхности моря (ТПМ) и несколько слоев в глубину. Остальные параметры системы не так зависимы от усвоения ТПМ. Так, разность в солёности достигает всего 0.01 промилле, разность в скоростях около 3-5 см/сек.
4. Отметим, что технология 4D-Var требует хранения достаточно большого объема данных, так как при решении сопряженной задачи необходимо хранить данные, полученные в ходе решения прямой задачи. Также 4D-var требует дополнительных вычислительных затрат при решении прямой и сопряженной задачи при усвоении данных и использовании результатов усвоения в модели. В данном случае эти недостатки в какой-то мере были нивелированы использованием метода расщепления и применением параллельных алгоритмов решения задачи.
5. Модель удовлетворительно воспроизводит крупномасштабную гидродинамику Черного моря. Погрешность «модель без ассимиляции минус модель с ассимиляцией данных» в основной области чуть более  $1^{\circ}\text{C}$ , в северо-западной части градиент температуры воспроизведен реалистично, расчет с ассимиляцией, примерно, на  $0.5^{\circ}\text{C}$  улучшает численные расчеты модели.