

# **СЕЗОННЫЙ И СУТОЧНЫЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРЫ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ТЕРМОПРОФИЛИРУЮЩИХ ДРЕЙФУЮЩИХ БУЕВ И МОДЕЛИ NEMO**

**Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Мизюк А.И.**

**Морской гидрофизический институт**

**Город Севастополь**

**2019 год**



# Актуальность исследования

Особый интерес для наблюдений и исследований представляет суточный ход температуры верхнего слоя моря (океанах), который влияет на множество процессов, происходящих в окружающей среде. Так как именно суточные колебания вносят существенный вклад в турбулентный обмен теплом и импульсом между океаном и атмосферой, оказывают воздействие на формирование ветров.

Температура поверхностного слоя моря (далее ТПС) оказывает значительное влияние на функционирование экосистемы Земли и ее климат. Параметр ТПС непосредственно используется в расчетах турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой. ТПС оказывает значительное влияние на точность восстановления параметров океана и атмосферы по спутниковым измерениям в микроволновом диапазоне, а именно: соленость, содержание водяного пара, скорость ветра и т.д.

Для Черного моря мониторинг ТПС особенно важен, так как суточный ход ТПС формирует бризовые ветры. Они, в свою очередь, могут оказывать существенное воздействие на процессы обмена в зоне берега.

Суточный ход температуры также вызывает периодическую стратификацию и перемешивание верхнего слоя моря, которое является важнейшим процессом, определяющим интенсивность вертикального обмена теплом, солью и биогенами.

# Используемые данные

# Данные сканера SEVIRI

SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) - сканер с разрешением от 5 км до 1 км измеряющий в 12 спектральных каналах в оптическом и инфракрасном диапазоне (облачность, водяной пар, температура океана).

SEVIRI установлен на геостационарных метеоспутниках Meteorosat второго поколения (MSG). Данный радиометр позволяет получать изображения поверхности Земли каждые 15 минут. Точность измерений ТПИМ составляет 0.5

Источник данных: <http://www.osi-saf.org/>.

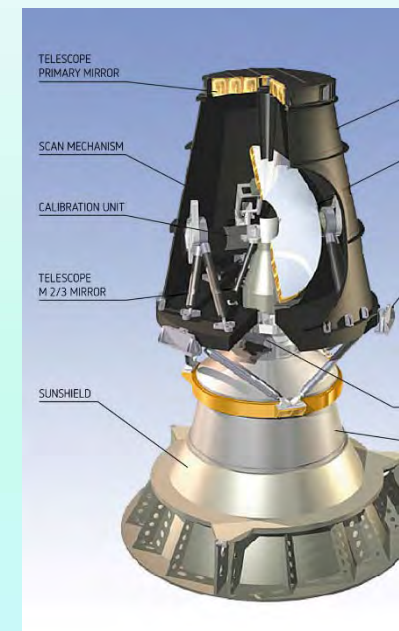
Анализируемые данные: температура поверхностного слоя моря.

Временное разрешение – 1 час.

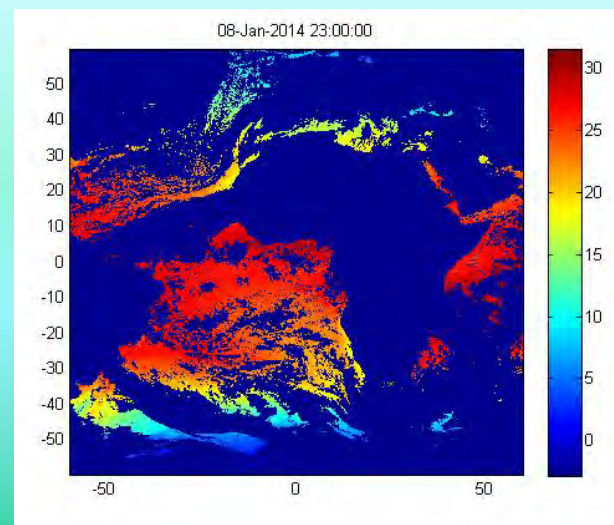
Пространственное разрешение – 5 км.



Спутник Meteorosat Second Generation (MSG)



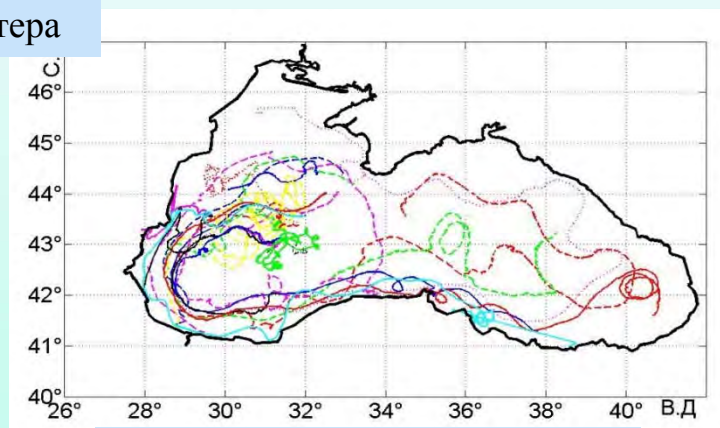
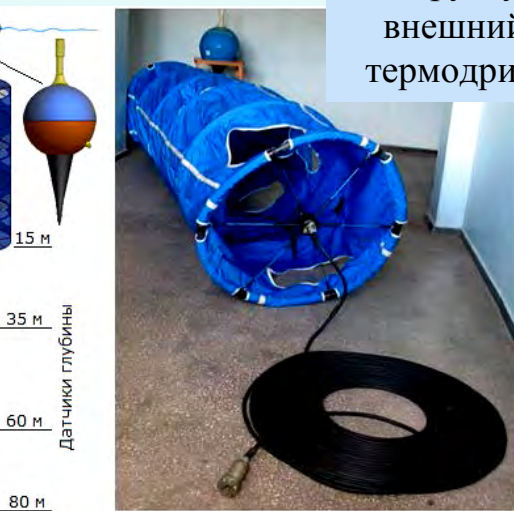
Радиометр SEVIRI





# Данные термопрофилирующих дрейфующих буев (термодрифтеров)

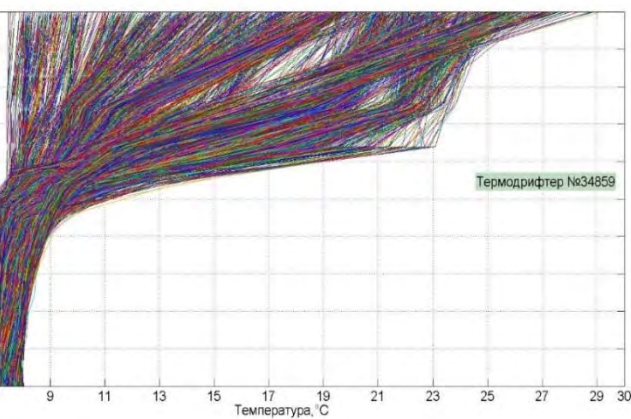
Структура и внешний вид термодрифтера



Траектории термодрифтеров, используемых в работе

**Источник данных:** Банк океанографических данных Морского гидрофизического института РАН) за 2004-2007, 2009, 2013, 2014 года.

**Анализируемые данные:** температура Черного моря в различные сезоны года на различных горизонтах (глубинах) от 0,2 до 80 м. Временное разрешение – 0,5-1 час.



Первая модификация термодрифтера *SVP-BTC60* с термолинией до глубины около 80 м была разработана в МГИ в 2004 г.

Характеристики *SVP-BTC60* и результаты длительного натурного эксперимента, выполненного в Черном море, рассмотрены в статьях [1 – 3].

К 2009 г. была разработана новая модификация термодрифтера с термолинией до глубины около 80 м [4].

Более подробная информация о дрейфтерах и дрейфтерных экспериментах представлена в статье [4].

и температуры для Черного моря, построенные по данным термодрифтера №34859 за период с апреля по август

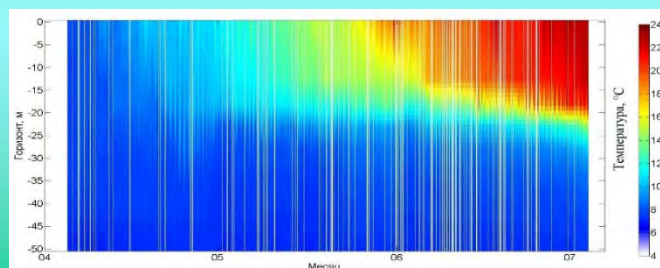


Диаграмма распределения температуры на различных горизонтах по данным термодрифтера №34860

# Данные модели NEMO

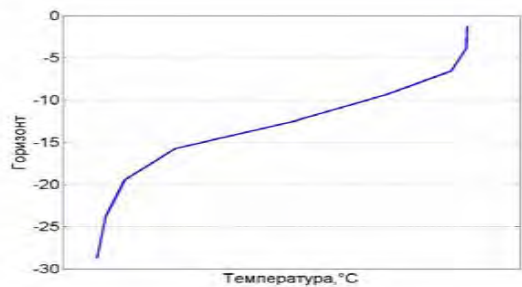
Данные о температуре и солености Черного моря за 2015 год (трехмерные поля).  
Пространственное разрешение  $1/24^\circ$ .

Дискретность – 1 час.

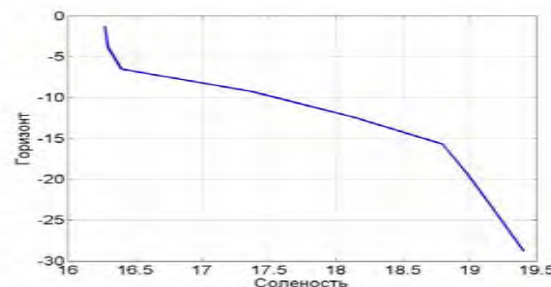
Горизонты: 1,3 м; 3,8 м; 6,5 м; 9,4 м; 12,4 м; 15,7 м; 19,4 м; 23,7 м; 28,8 м.

Параметризация: Меллора – Ямады.

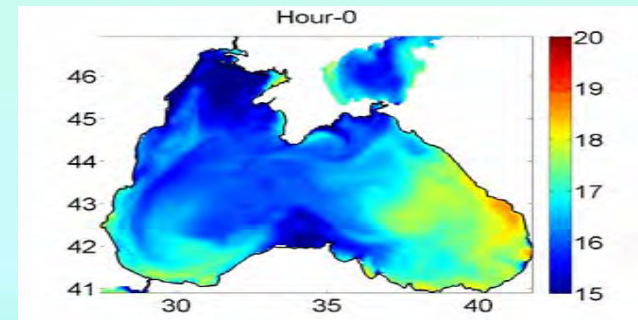
В качестве атмосферного воздействия брались данные регионального реанализа ERA5.



Средние за май карты распределения температуры на различных горизонтах



Средние за май карты распределения солености на различных горизонтах



Карты распределения средней по часам температуры на горизонте 1,3 м в мае 2015

г.

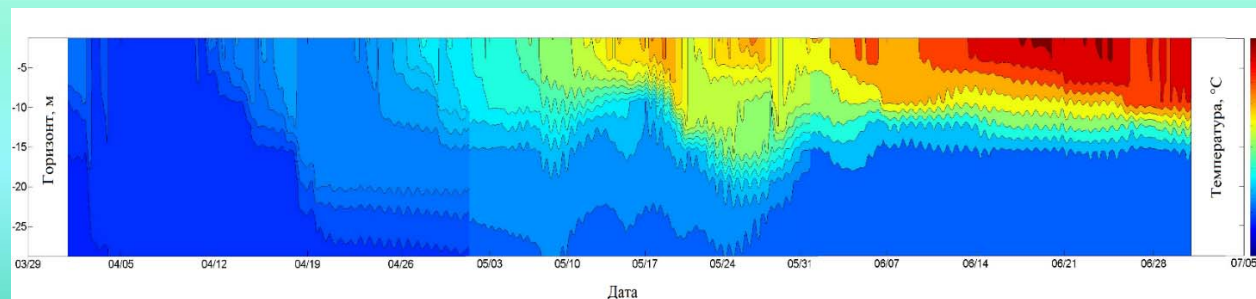


Диаграмма распределения температуры на различных горизонтах по данным модели NEMO

# Данные реанализа «Era-Interim»

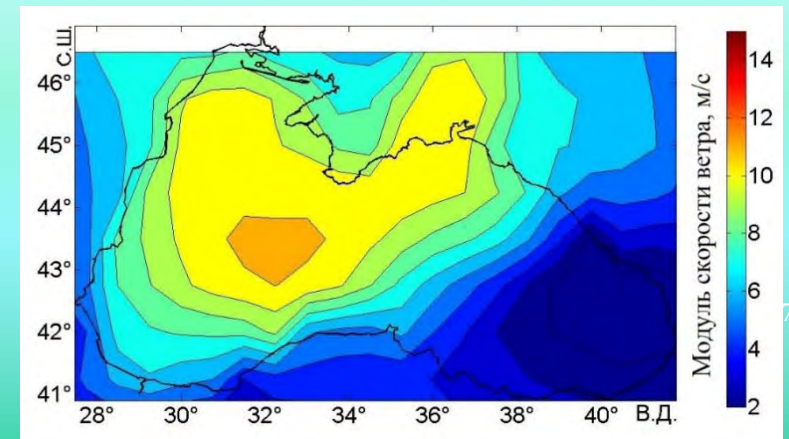
Для анализа поля ветра использовались данные реанализа «Era-Interim» о скорости ветра на высоте 10 м для района Черного моря.

(Источник данных: <https://www.ecmwf.int/>).

**Анализируемые данные:** направление и величина скорости ветра.

Временное разрешение – 6 часов.

Пространственное разрешение – 80 км.





# 1. Высокочастотная изменчивость температуры по измерениям буев-профилемеров

Траектория движения  
термодрифтёра №34860  
апреля по июль 2005 года

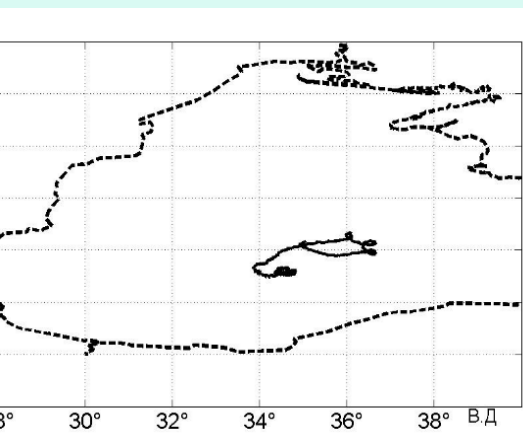
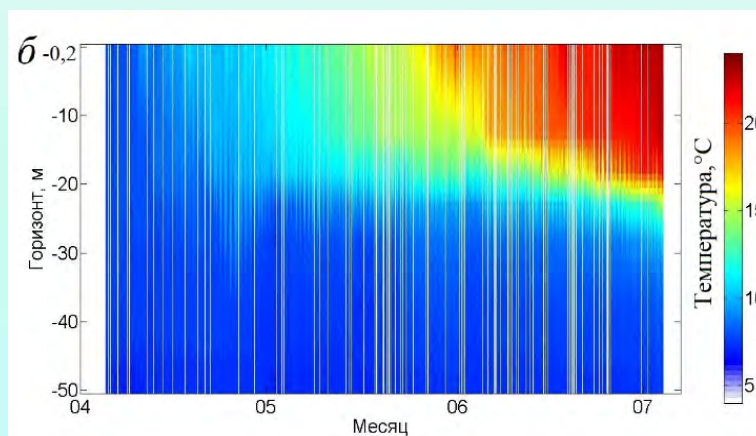
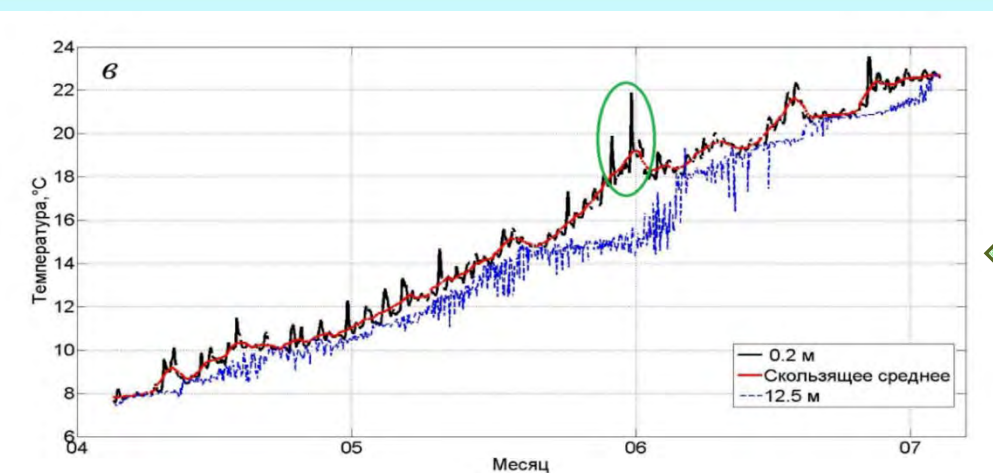


Диаграмма распределения  
температуры на различных горизонтах  
по данным термодрифтёра №34860



С середины апреля наблюдается плавное увеличение температуры. Прогрев начинает достигать глубин 25 м, и к началу июля увеличение температуры затрагивает горизонты 30 м.



Суточный ход температуры на горизонтах 0,2 и 12,5 м  
по данным термодрифтёра №34860

На горизонте 0,2 м ярко выражены суточные колебания температуры.

Колебания на горизонте 12,5 м высокочастотные, носят сложный характер.

На протяжении всей работы термодрифтёра отмечен ряд случаев значительного дневного прогрева. Амплитуда суточного хода превысила 3,5°C (май).



## 2. Средний сезонный и суточный ход температуры на поверхности

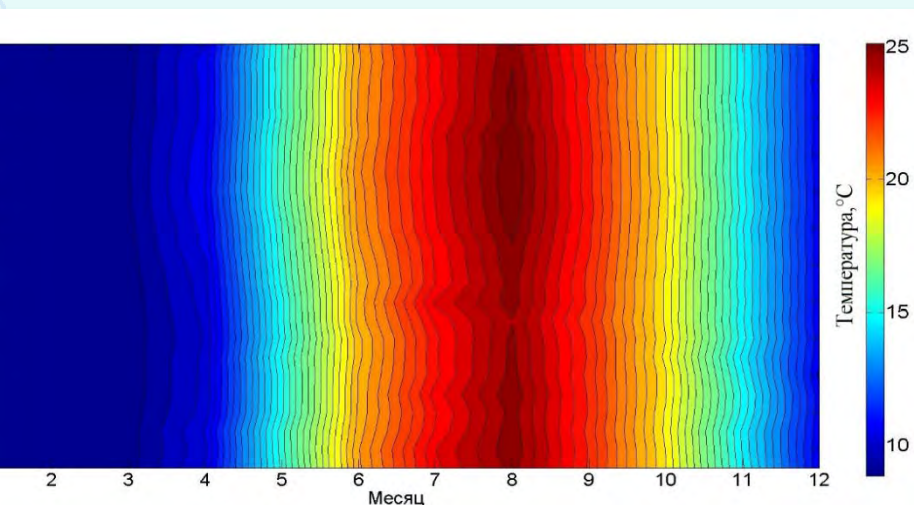


Диаграмма годичного распределения температуры на горизонте 0,2 м по часам суток и месяцам года

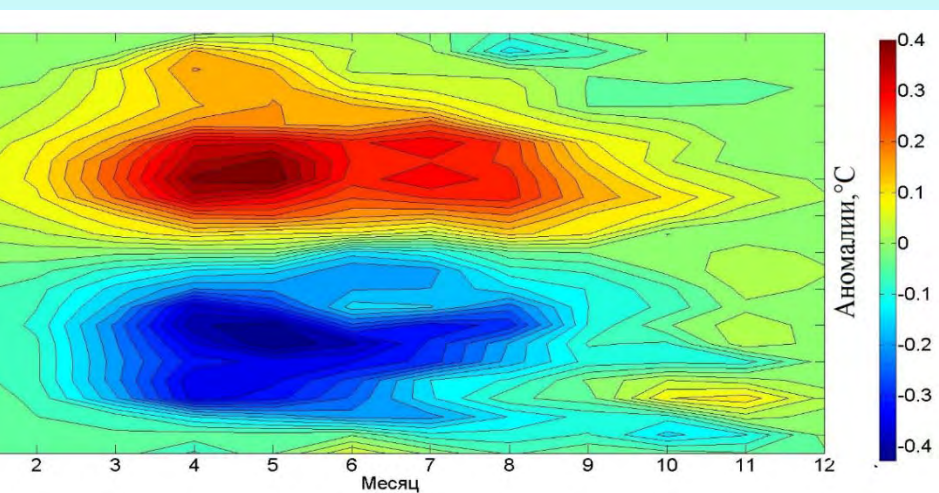


Диаграмма годичного аномалий на горизонте 0,2 м.

- Диаграмма распределения средней температуры на горизонте 0,2 м в зависимости от времени суток и месяца отображает сезонную динамику среднего суточного хода на поверхности.
- Основной вклад в изменчивость температуры вод на поверхности даёт сезонный ход. Максимальные значения температуры наблюдаются в июле-августе (до 25,5°C). Минимальные температуры приходятся на февраль-март.

- Для того чтобы выделить суточный ход температуры на диаграмме годичного распределения температуры на горизонте 0,2 м был вычтен ее средний сезонный ход (диаграмма аномалий).
- Максимальные по модулю отрицательные аномалии температуры приходятся на время с 05.00 до 09.00 (0,2-0,4°C), максимальные положительные с 15.00 до 18.00 (также 0,2-0,4°C).
- Наибольшие по модулю отклонения температуры от среднесезонных значений наблюдается в весенне-летний период, наибольшие аномалии приходятся на май (~±0,4°C).

# Диаграмма годичного распределения аномалий суточного хода

на 0 м по данным SEVIRI

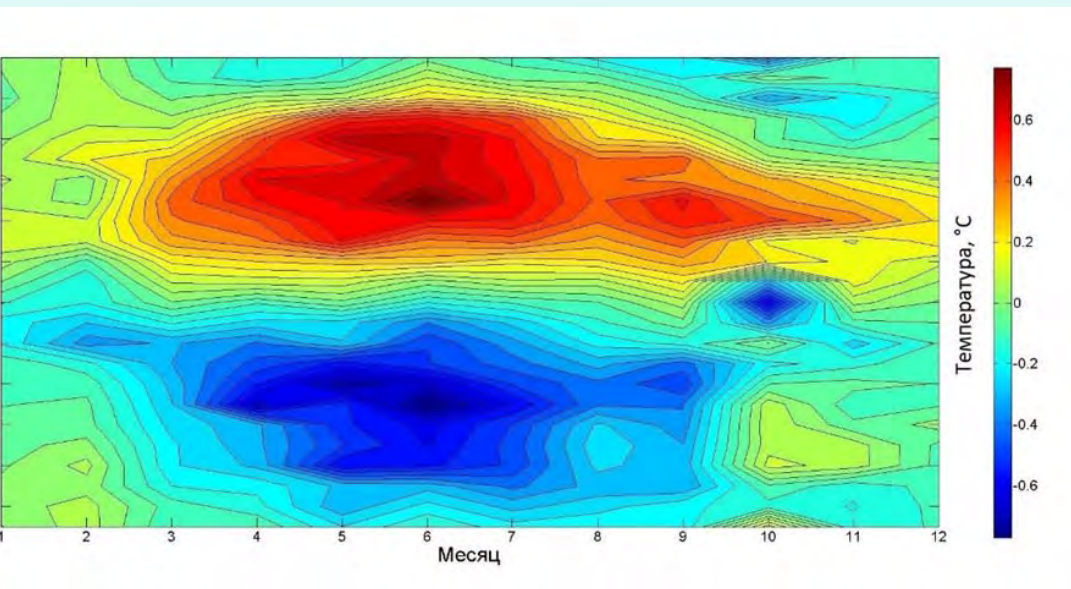


Диаграмма годичного распределения аномалий ТПМ

на 0,2 м по данным термодрифтеров

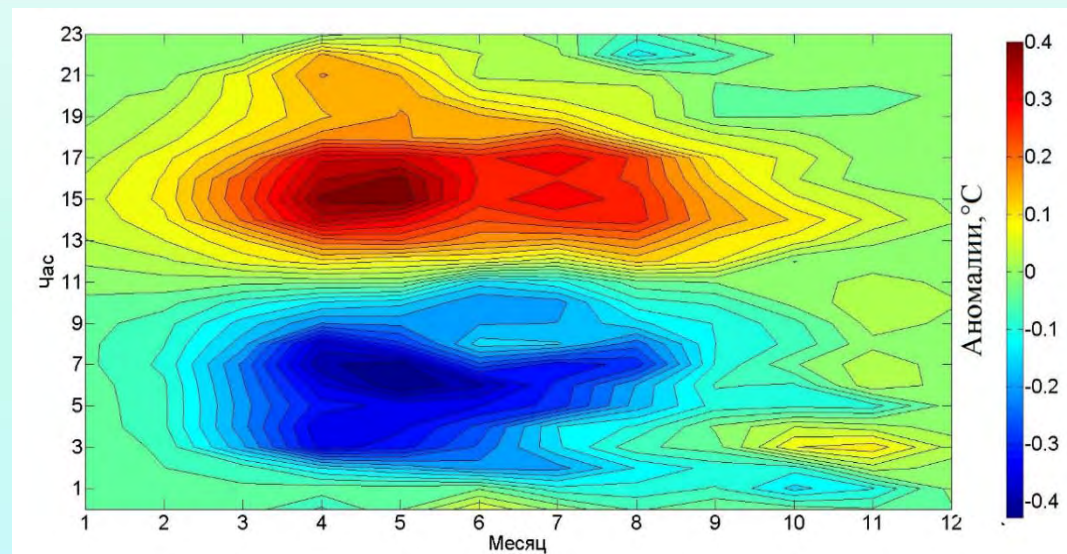
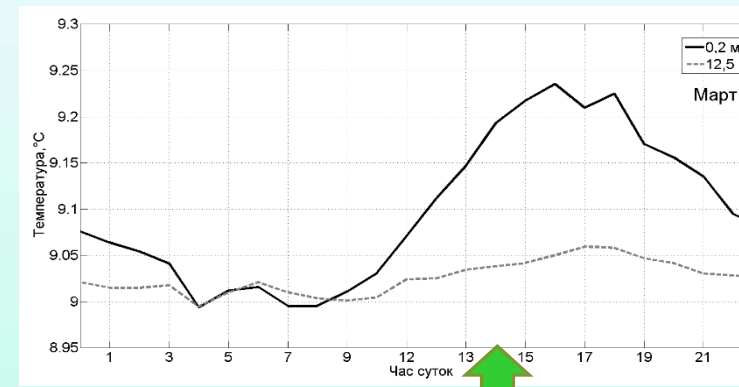
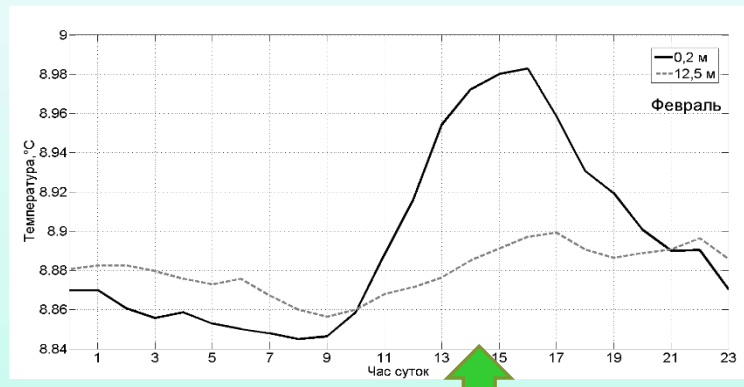
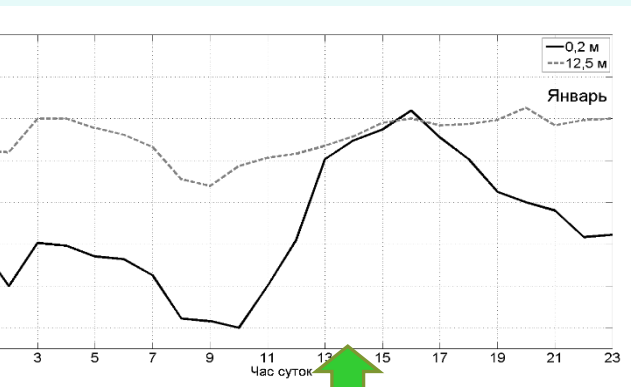


Диаграмма годичного распределения аномалий на горизонте 0,2 м

Распределение аномалий температуры поверхностного слоя для обоих массивов данных носят схожий характер. Численные различия могут объясняться отличием в сроках и методах получения этих массивов данных.

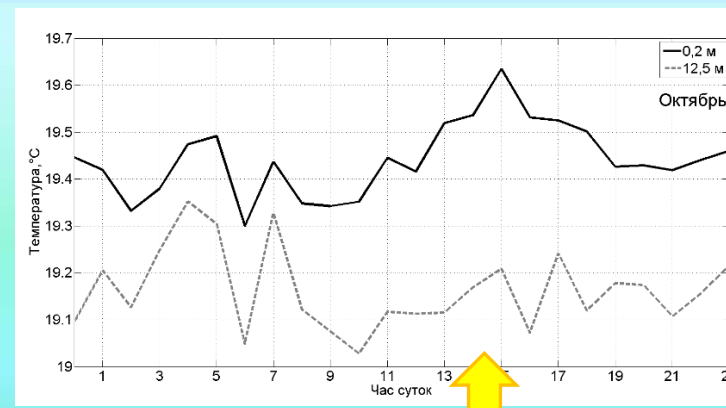
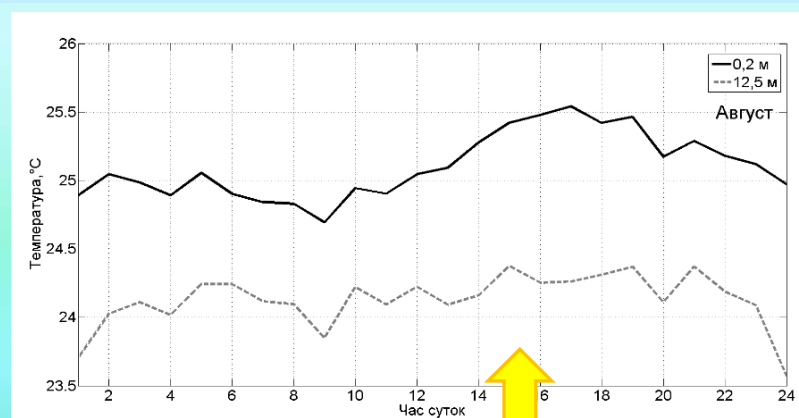
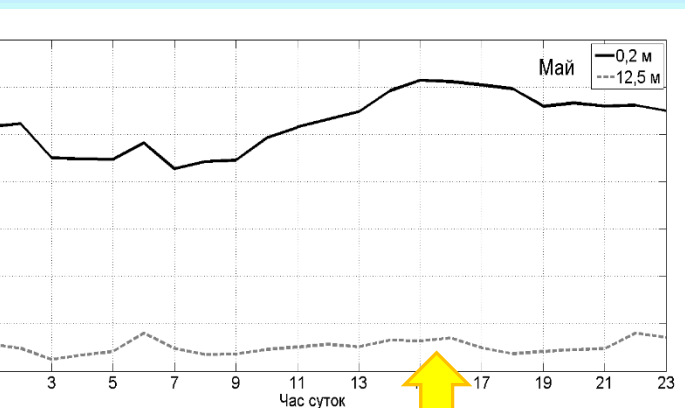
### 3. Особенности суточного хода температуры в холодный и теплый период года



небольшие колебания суточного хода температуры присутствуют и на глубине 12,5 м, с минимумом в 7-9 часов (локально).

В – температура на горизонте 0,2 м меньше, чем на горизонте 12,5 м.

Март – днем поверхность нагревается сильнее, чем слой 12,5 м, а в период ночного охлаждения температура становится меньше, чем на этом горизонте, что говорит о том, что ночью воды могут перемешиваться до этих слоев.



В теплый период года суточный ход температуры ярко выражен только для горизонта 0,2 м.

На примерах графиков температур для мая, августа и октября видно, что **стратификация по температуре устойчива** в теплый период года, перемешивание водных слоев не происходит.

# Дневной прогрев



# Амплитуда суточного хода

каждой точке, где определялась температура, было найдено ее максимальное и минимальное значение за сутки, а также их разность – амплитуда суточного хода температуры (ее  $A$ ).

холодного периода года  
критическими считались те случаи перегрева, когда разница минимального и максимального значения температуры за сутки превышала  $0,3^{\circ}\text{C}$ .

теплого периода года  
критическими считались те случаи перегрева, когда разница минимального и максимального значения температуры за сутки превышала  $2^{\circ}\text{C}$ .

Для данных SEVIRI был рассчитан временной ход средних по бассейну значений  $A$ .

Максимальные значения наблюдаются в весенне-летнее время (2-3°), а зимние составляют (1-1.5°)

Пример карты  
распределения  
амплитуды суточного  
хода  
(за 2.07.2015)

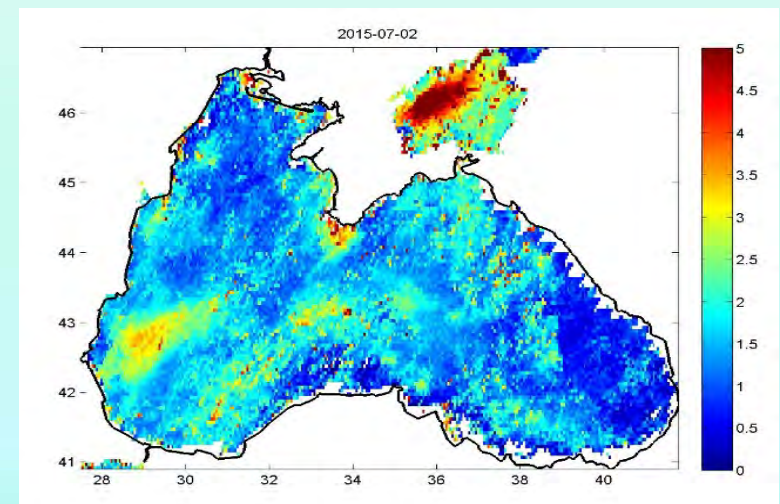
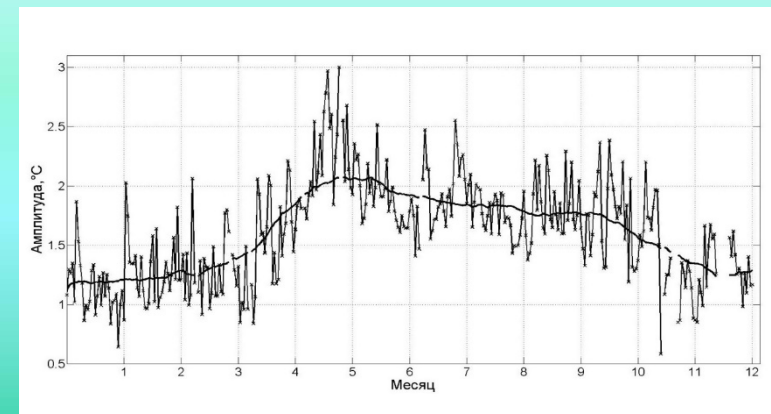


График  
изменения  
среднего  
значения  
амплитуды  
суточного  
хода за 2015

год



## 4. Дневной прогрев в холодный период года по данным термодрифтеров

в феврале 2014 года по данным термодрифтера №248990 были выделены четыре случая значительного дневного прогрева. Разность минимального и максимального изменения температуры за сутки на горизонте 0,2 м достигала 0,6°C (23.02)

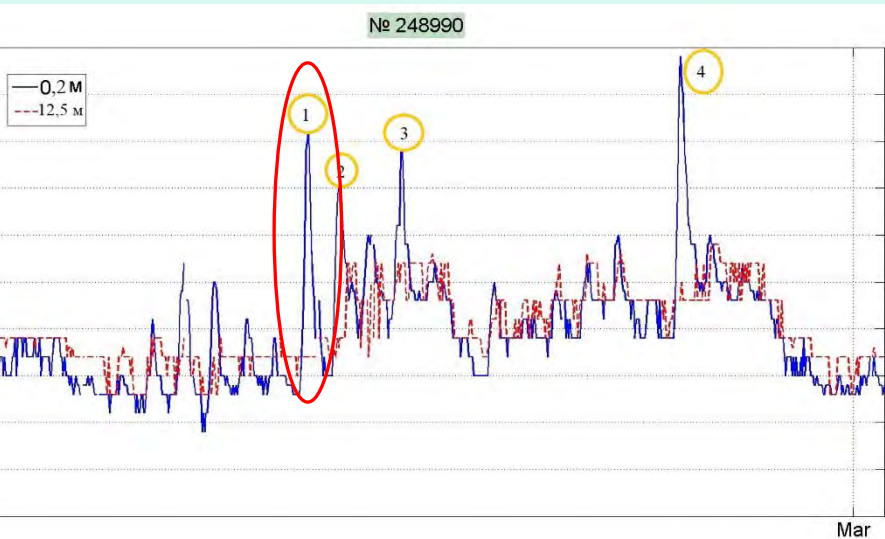
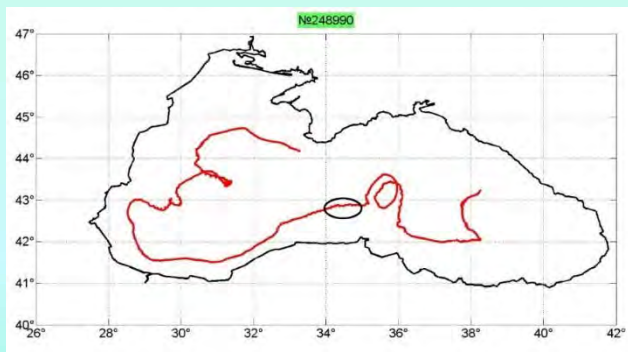
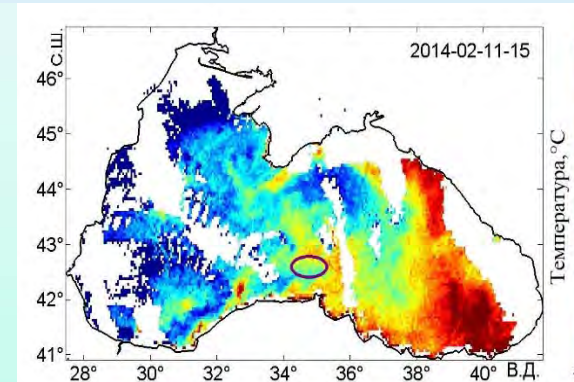
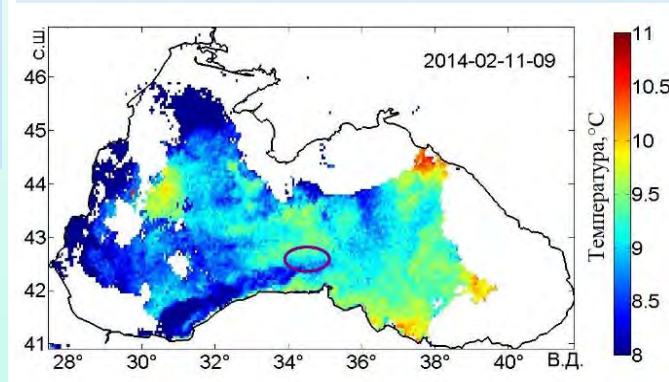
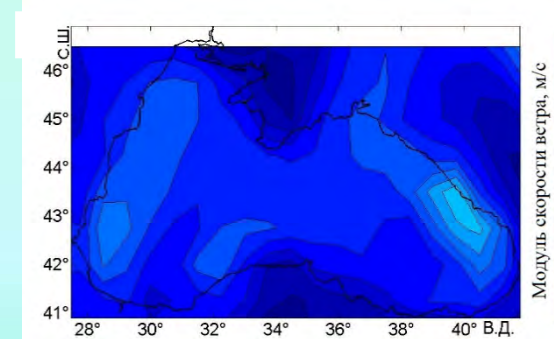


График изменения температуры на горизонтах 0,2 м и 12,5 м в феврале 2014 года

Карты распределения ТПМ 11 февраля 2014 в 9.00 и в 15.00 по данным SEVIRI



Траектория №248990



Карта распределения среднего модуля скорости ветра за 11 февраля 2014

**11.02.2014** температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась от минимального значения 8,8°C до максимального 9,3 °C. Таким образом, величина суточного прогрева составил ~0,5 °C.

На горизонте 12,5 м за этот же период времени изменения температуры практически не наблюдалось. Это указывает на то, что перемешивания поверхностного слоя с более глубинными не происходило.

Данному случаю прогрева способствовали соответствующие условия: сравнительно небольшая скорость ветра (4-5 м/с) и достаточно низкая облачность над большей частью акватории за указанный промежуток времени.

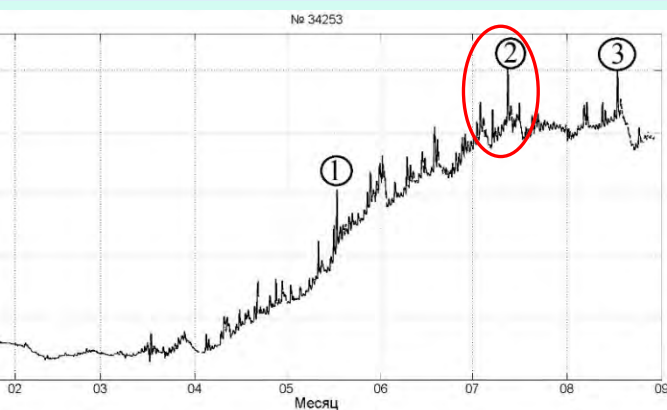


## 5. Дневной прогрев в теплый период года по данным термодрифтеров

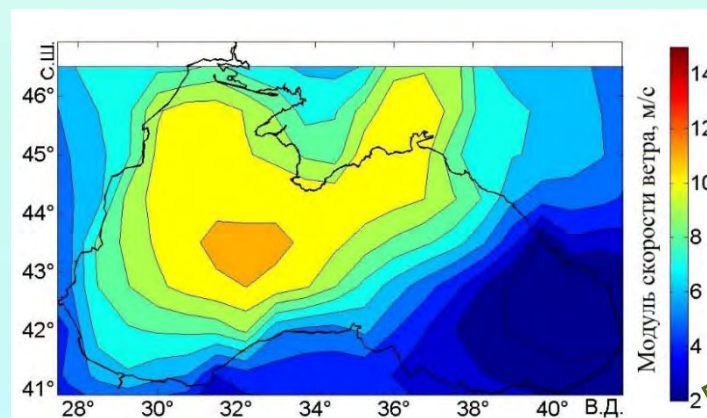
на примере данных дрейфтера № 34253 более подробно рассмотрены случаи дневного прогрева в 2005 году.

Время функционирования термодрифтера (с января по август 2005 года) в теплый период года (май-август) было выделено на рис. 4. Детально проанализирован случай дневного прогрева 12 июля 2005 (№2).

Суточный ход температуры на горизонте 0,2 м

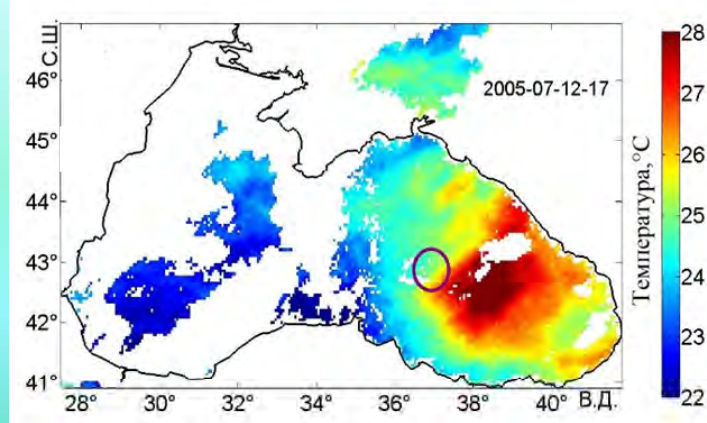
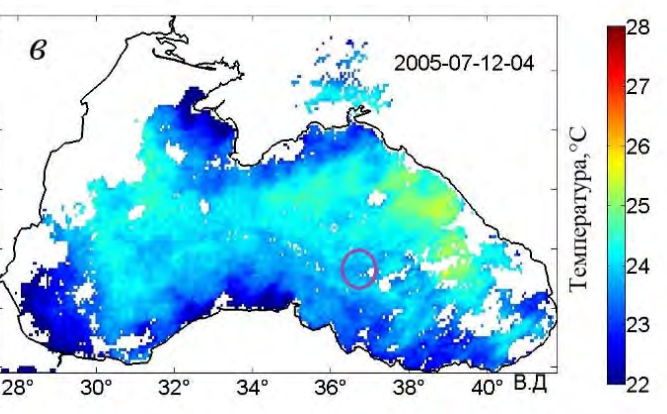


Карта распределения среднего модуля скорости ветра



- 12 июля 2005 г. температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась с минимального значения 25,6°C до 30,1°C. Величина суточного прогрева составила ~4,5 °C.

По данным реанализа «Era-Interim» скорость ветра в районе пребывания дрейфтера не превышала 7 м/с.



- По данным радиометра SEVIRI в районе пребывания дрейфтера 12 июля сохранялась безоблачная погода, а прослеживается температурный перепад.

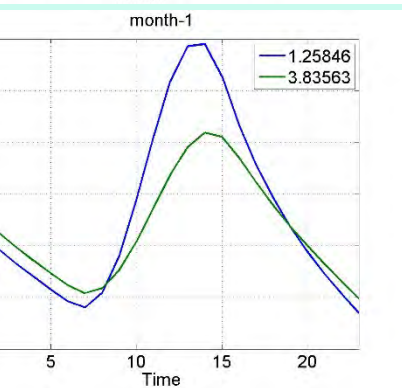
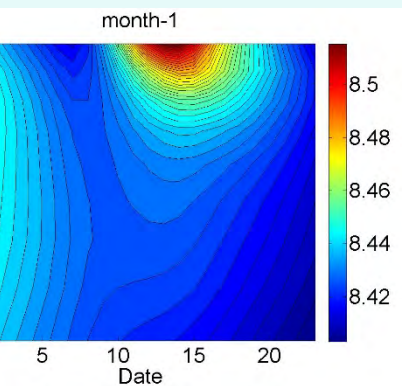
Карты распределения ТПМ по данным SEVIRI за 04.00 и 17.00 12 июля 2005

# Суточный ход по модели NEMO

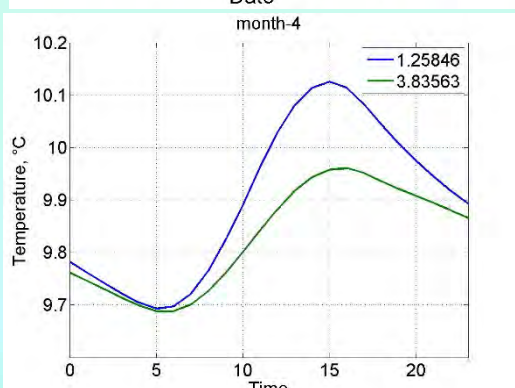
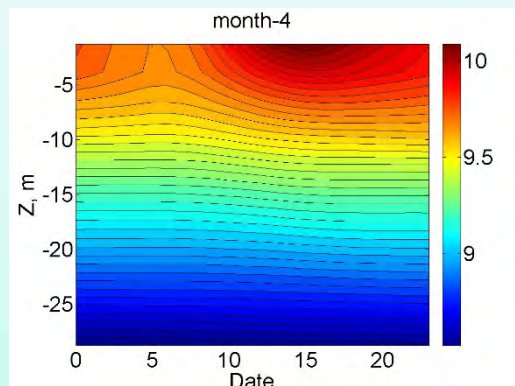


# Суточный ход температуры на различных горизонтах в Черном море по данным модели NEMO

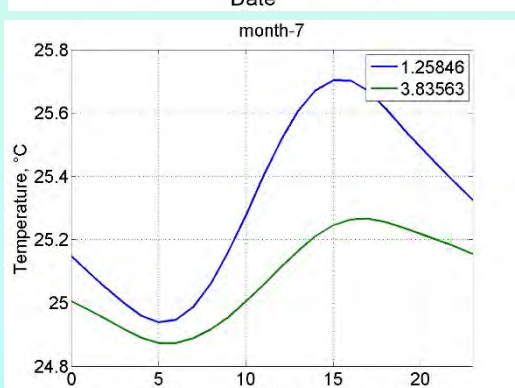
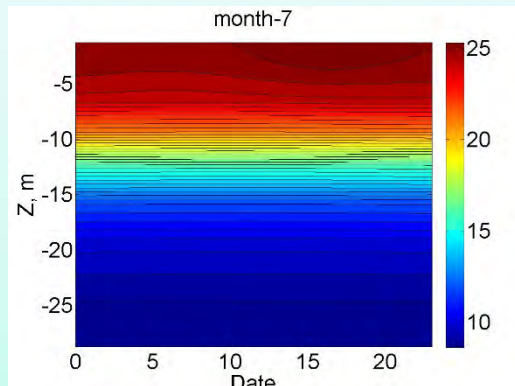
1



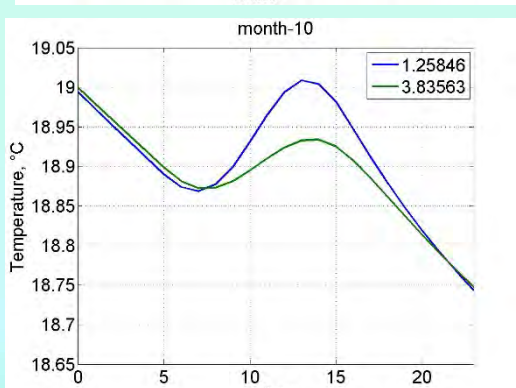
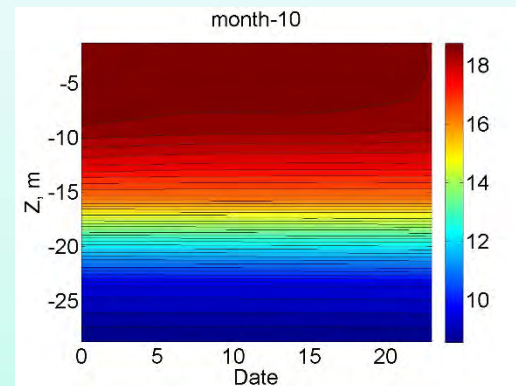
4



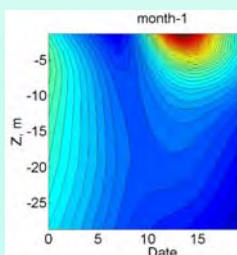
7



10



Диаграммы вертикального распределения среднего суточного хода температур на различных горизонтах



Графики среднего суточного хода температур на различных горизонтах 1,3 м

Суточный ход температуры для различных сезонов имеет **ряд особенностей:**

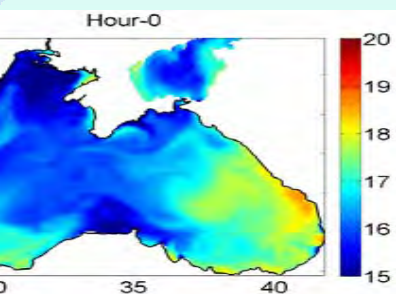
**январь-март:** на горизонте 1,3 м максимум температуры – в 13-14 ч. Суточный ход наиболее выражен для слоя ~1-10 м. В дневные часы температура на горизонте 1,3 м ниже, чем на горизонте 3,8 м. Разница температур на этих горизонтах минимальна. В дневные часы происходит прогрев поверхности.

**апрель-май:** на поверхности максимум температуры – в 15-16 ч. Суточный ход наиболее выражен для слоя ~1-5 м.

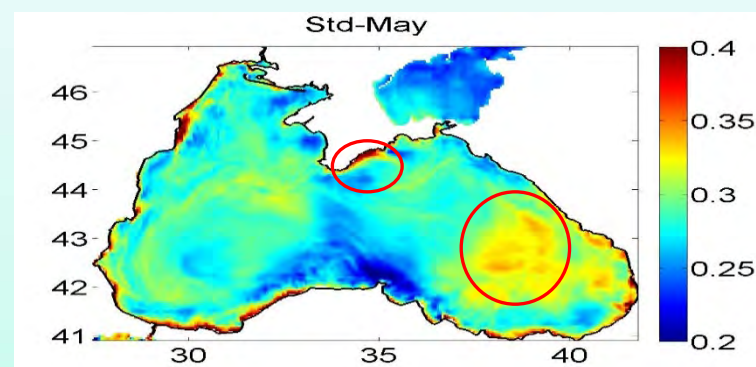
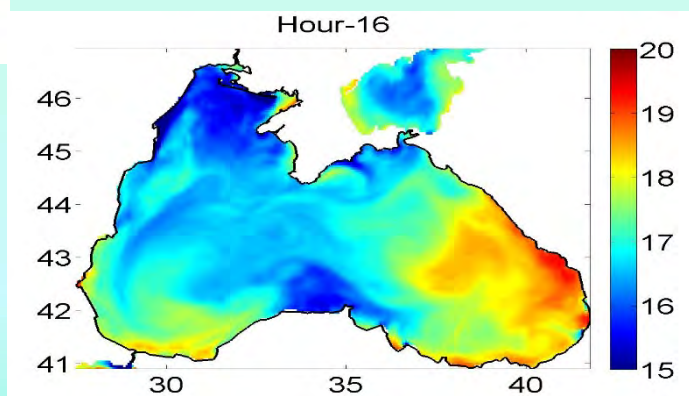
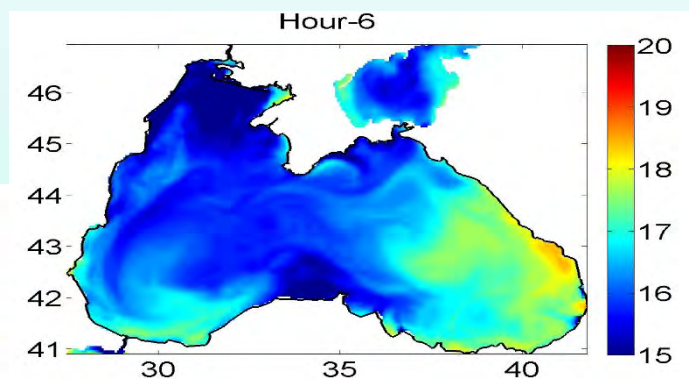
**июнь-сентябрь:** на горизонте 1,3 м максимум температуры – в 15-16 ч. Суточный ход наиболее выражен для горизонта поверхности моря.

**октябрь-декабрь:** на всех горизонтах присутствует слабо выраженный суточный ход. Разница температур на различных горизонтах минимальна.

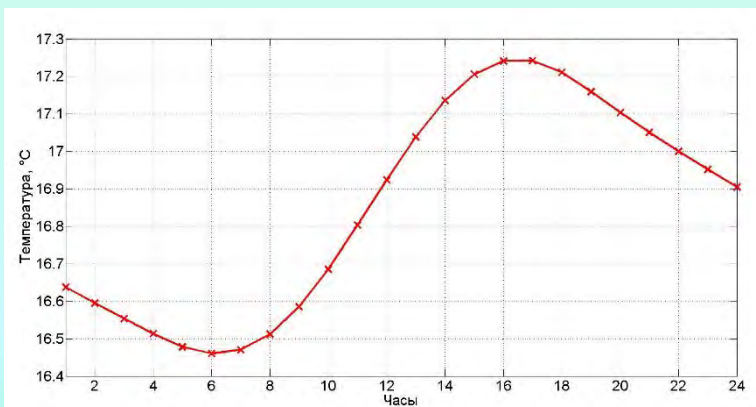
# Суточный ход температуры в мае 2015 г.



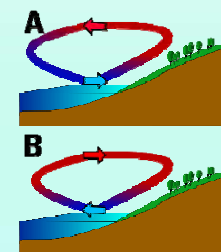
Карты распределения  
средней температуры  
в мае на горизонте  
1,3 м



Карта распредел  
средней СКО  
температуры за  
на горизонте 1,3 м



Средний суточный  
температуры  
бассейну за ма  
горизонте 1,3 м



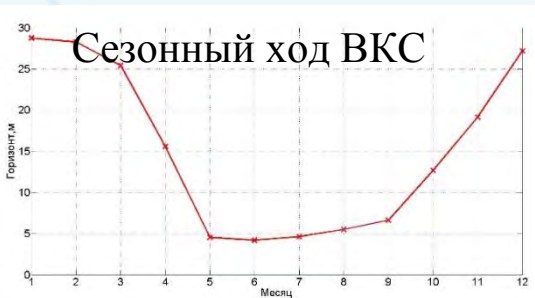
температура минимальна в утренние часы (0-6 ч), достигает максимальных значений в 16-18 ч.

**пространственные особенности в распределении температуры:** максимальные температуры приходятся на южную часть бассейна (Кавказские и Понтийские горы образуют зону ветровой тени).

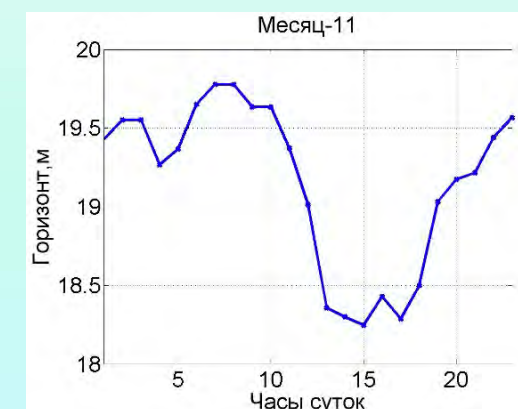
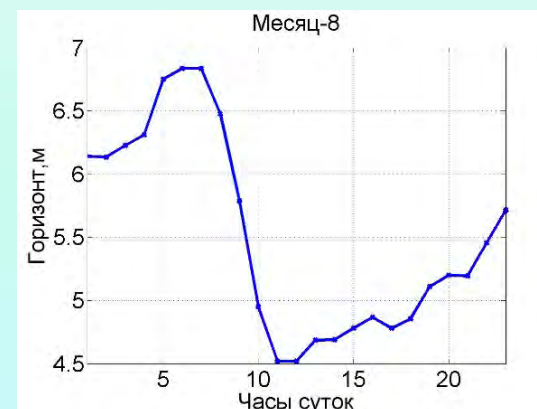
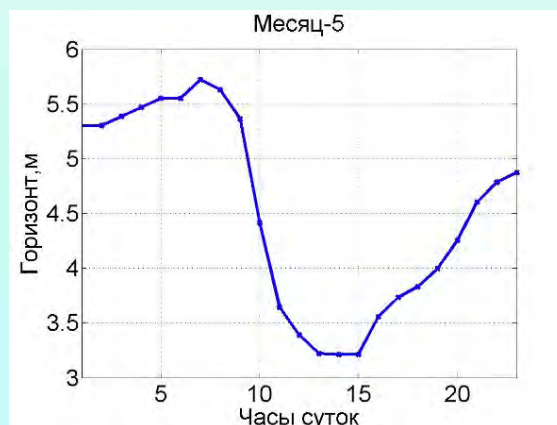
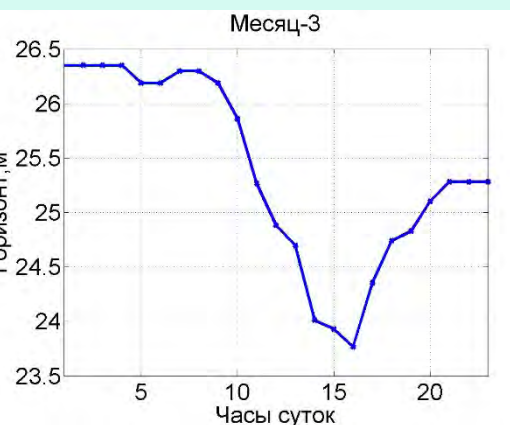
**особенности пространственного распределения среднеквадратичного отклонения (СКО):** СКО принимает максимальные значения в прибрежной зоне (например в районе ЮБК) и в юго-восточной части бассейна.

Высокие значения СКО в прибрежных районах могут быть связаны с наличием бризов в этих частях бассейна.

# Оценка суточного хода глубины ВКС по значениям потенциальной плотности



Глубина ВКС определялась как глубина, на которой потенциальной плотность жидкости меньше потенциальной плотности верхнего уровня измерений на выбранную величину (критерий разницы плотности  $dr$ ). В качестве критерия  $dr$  была выбрана величина  $0,07 \text{ кг/м}^3$ .



Во все сезоны наблюдается наличие суточного хода глубины залегания ВКС:

**Зима:** глубина залегания ВКС ~26-29 м. Минимальная глубина приходится на 14-16 ч.

**Весна:** глубина залегания ВКС варьируется от ~23-27 в марте до ~3,5-6 м в мае. Минимальная глубина приходится на 13-15 ч.

**Лето:** глубина залегания ВКС находится в пределах 3,5-7 м. Минимум приходится на 13-16 часов.

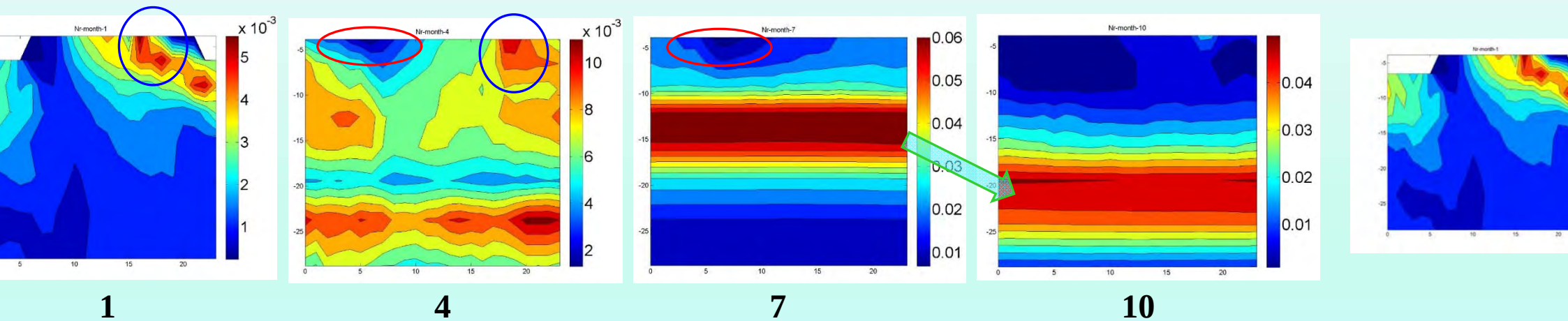
**Осень:** происходит заглубление ВКС. Глубина залегания ВКС изменяется от ~5,5 м (в сентябре) до ~20 м (в ноябре). Минимальная глубина залегания ВКС приходится на 14-17 ч.

**Сезонный ход:** наибольшая глубина залегания ВКС – зима ( $\geq 27-30$  м); минимальная глубина залегания ВКС – май (~4-7 м).



# Оценка суточного хода глубины ВКС по значениям частоты Брента — Вяйсяля (N)

Диаграммы вертикального распределения частоты Брента-Вяйсяля в различные месяцы



**январь-март:** отсутствие устойчивой стратификации на всех рассматриваемых горизонтах. Наличие максимумов  $N$  в 16.00-17.00 (дневной термоклин).

**апрель-май:** появление и развитие стратификации на горизонтах 5-25 м. Минимум  $N$  — утренние часы (ночная конвекция).

**июнь-август:** устойчивая стратификация на горизонтах 10-20 м. Горизонты от поверхности до ~7-10 м имеют меньшие значения  $N$ , минимум — 5.00-7.00 (ночная конвекция).

**сентябрь-декабрь:** происходит «опускание» стратифицированных слоев, заглубление ВКС.

*Частота Брента-Вяйсяля (частота плавучести) — частота с которой элемент жидкости перемещённый вертикально в стратифицированной среде будет в этой среде осциллировать. Используется для определения условий устойчивой или неустойчивой стратификации.*

Для океана:

$$N \equiv \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}},$$

где  $\rho$  — потенциальная плотность,  $\frac{d\rho}{dz}$  — изменение плотности с глубиной.



# Обобщения и выводы

В представленной работе проведено исследование сезонного и суточного хода температуры вод Черного моря на горизонтах 0,2-8 м по данным двадцати буюв-профилемеров, которые функционировали в Черном море в различные годы в различные сезоны.

Основной вклад в изменчивость температуры вод на поверхности даёт сезонный ход. Максимальные значения температуры наблюдаются в июле-августе (до  $25,5^{\circ}\text{C}$ ) во второй половине суток. Минимальные температуры приходятся на февраль-март. Наибольшие по модулю отклонения температуры от среднесезонных значений наблюдается в весенне-летний период, наибольшие аномалии приходятся на май.

На горизонте 0,2 м наблюдается наличие более или менее выраженного суточного хода для всех месяцев, кроме ноября и декабря. Для холодного времени года характерна незначительная разница температуры вод для горизонтов 0,2 м и 12,5 м. Для горизонта 0,2 м ярко выражен суточный ход температуры.

В январе температура на горизонте 0,2 м меньше, чем в глубинных слоях (на горизонтах 12,5 м). В феврале днем температура поверхностного слоя становится выше, чем на горизонте 12,5 м. В марте большую часть суток горизонт 0,2 м имеет более высокую температуру, чем глубинные слои. В утренние часы происходит снижение температуры на горизонте 0,2 м до значений, близких к температуре на горизонте 12,5 м. В теплый период года суточный ход температуры ярко выражен только для горизонта 0,2 м, присутствует устойчивой стратификации по температуре.

Исследованы случаи максимального дневного прогрева в холодный и теплый период года. Формирования значительного дневного прогрева происходит при соответствующих условиях – малой облачности и низкой скорости ветра. Во всех рассмотренных случаях данные условия выполнялись, что подтверждается данными реанализа «Era-Interim» и данными сканера SEVIRI.

## Обобщения и выводы

Выполнен анализ сезонного и суточного хода температуры на различных горизонтах и глубины залегания ВКС Черного моря по данным модели NEMO за 2015 г.

Отмечены особенности суточного хода температуры по вертикали и глубины залегания ВКС в различные сезоны года.

**Январь-март:** на горизонте 1,3 м максимум температуры – в 13-14 ч. Суточный ход наиболее выражен для слоя ~1-10 м. В дневные часы происходит прогрев поверхности. **Апрель-май:** на поверхности максимум температуры – в 15-16 ч. Суточный ход наиболее выражен для слоя ~1-5 м. **Июнь-сентябрь:** на горизонте 1,3 м максимум температуры – в 15-16 ч. Суточный ход наиболее выражен для горизонтов поверхности моря. **Октябрь-декабрь:** на всех горизонтах суточный ход выражен слабо. Разница температур на различных горизонтах минимальна.

Во все сезоны наблюдается наличие суточного хода глубины залегания ВКС.

Наибольшая глубина залегания ВКС отмечена зима ( $\geq 27-30$  м); минимальная глубина залегания ВКС – в мае и сентябре (~4-7 м).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!





# ЛИТЕРАТУРА

1. Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Коротаев Г.К. и др. Термопрофилирующий дрейфующий буй. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 143 – 154.
2. Лунев Е. Г., Толстошеев А. П., Мотыжев С. В. Особенности информационного обеспечения термопрофилирующих дрейфующих буйев //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. – 2004. – Т. 11. – С. 132.
3. Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В. Исследование верхнего слоя Черного моря помощью термопрофилирующих дрейфующих буйев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 116 – 123.
4. А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев, С.В. Мотыжев. Анализ результатов натурных экспериментов термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана //Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 9 – 32.

# Оценка суточного хода глубины ВКС по значениям частоты Брента — Вайсяля (N)

Диаграммы вертикального распределения частоты Брента-Вайсяля в различные месяцы по часам суток

