



**Исследование суточного хода температуры вод Черного моря
на основе комплексного анализа данных дистанционного
зондирования, контактных измерений и результатов
численного моделирования**

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

Морской гидрофизический институт



15-19 ноября 2021 г.

Актуальность исследования

- Суточный ход температуры (суточный цикл) является одним из основных составляющих климатической системы, он влияет на изменчивость температуры в долгосрочном масштабе.
- Суточные колебания температуры вод приповерхностного слоя вносят существенный вклад в турбулентный обмен теплом и импульсом между океаном и атмосферой, оказывают воздействие на формирование ветров.
- Изменения стратификации вод, связанные с суточными колебаниями потоков тепла, влияют на физические и биогеохимические процессы в верхних слоях моря (океана).
- Температура поверхностного слоя моря/океана оказывает значительное влияние на точность восстановления параметров океана и атмосферы по спутниковым измерениям в микроволновом диапазоне: солёности, содержания водяного пара, скорости ветра и т.д.
- Отдельный интерес представляет суточный ход температуры для моделирования системы «океан-атмосфера», долгосрочных климатических трендов температуры и различных процессов в океане, а также для систем прогноза.
- Для практически замкнутого Черного моря мониторинг ТПМ особенно важен, так как суточный ход ТПМ влияет на бризовые ветры, которые могут оказывать существенное воздействие на процессы обмена в береговой зоне.



Используемые данные

Данные SEVIRI

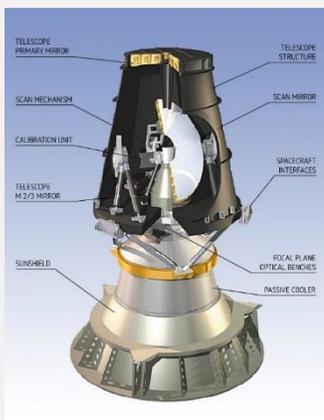
SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) - сканер с разрешением от 5 км до 1 км измеряющий в 12 спектральных каналах в оптическом и инфракрасном диапазоне. SEVIRI установлен на геостационарных метеоспутниках Meteosat (MSG). Точность измерений ТПМ составляет 0.5 К.

Анализируемые данные: температура поверхностного слоя моря.

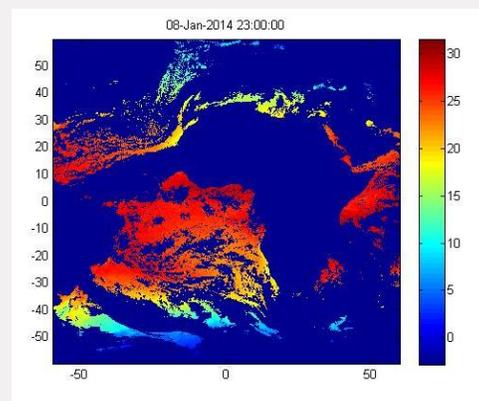
Временное разрешение – 1 час.

Пространственное разрешение – 5 км.

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

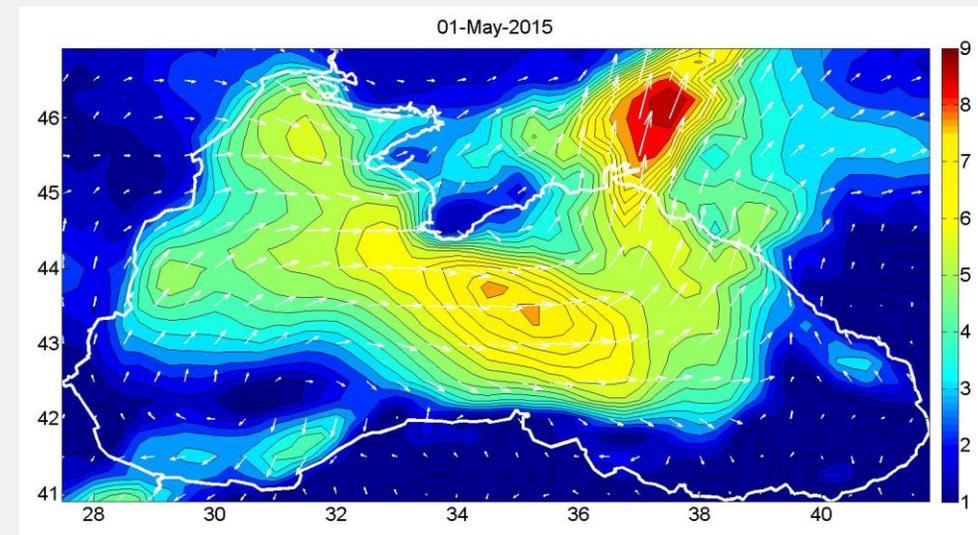


Радиометр
SEVIRI



Данные реанализов Era-Interim и Era5

- Данные реанализа Era-Interim и Era5 о направлении и величина скорости ветра на высоте 10 м для района Черного моря за 2015 г с временным разрешением 1 час и пространственным разрешением – 0,25°.
- Данные реанализа Era5 о потоках тепла, относительной влажности воздуха, температуре воздуха



Данные модели NEMO

- Данные о температуре и солености Черного моря за 2015 год (трехмерные поля). Пространственное разрешение $1/24^\circ$.
- Дискретность – 1 час.
- Горизонты: первый слой 2,5 м с центральным горизонтом ~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; 34,8 м; 42,4 м; 51,9 м; 64,1 м; 79,8 м.
- В качестве атмосферного воздействия брались данные регионального реанализа ERA5.

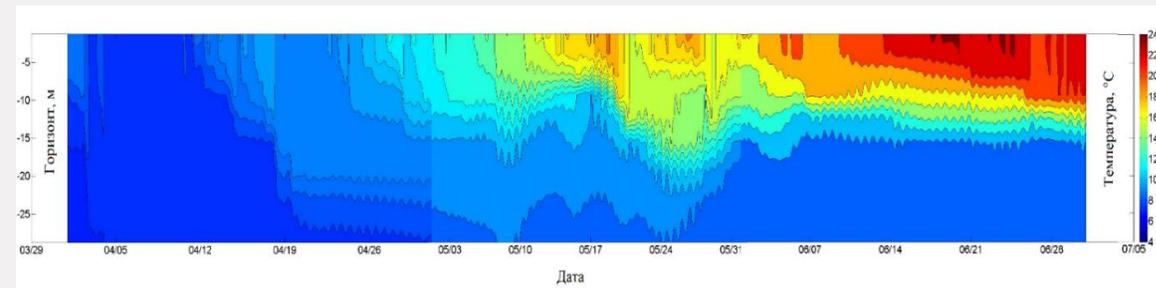
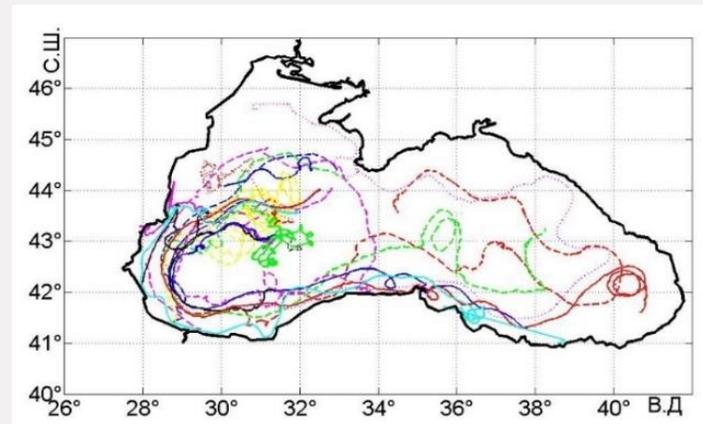


Диаграмма распределения температуры на различных горизонтах по данным модели NEMO

Данные термодрифтеров

Температура Черного моря в различные сезоны года на горизонтах (глубинах) от 0,2, 12 до 80 м за 2004-2007, 2009, 2013, 2014 года. Временное разрешение термодрифтеров (частота измерения температуры) – от 30 минут до 2 часов (в зависимости от модификации термодрифттера). Первый горизонт измерений ~0,2 м, второй ~12 м, последний горизонт измерений, а также количество горизонтов – зависят от модификации термодрифттера (максимальная глубина, на которой измерялась температура составляет ~80 м).

Источник данных: Банк океанографических данных Морского гидрофизического института РАН)



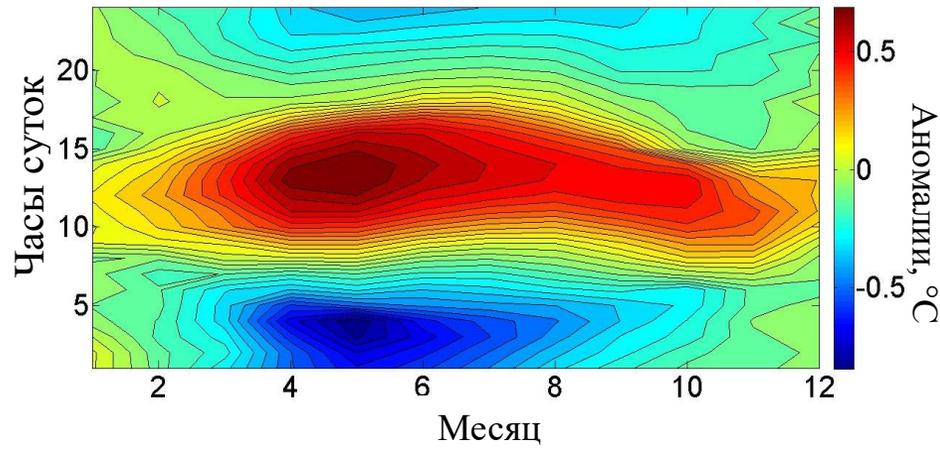
Траектории термодрифтеров за период с 2005 г. по 2007 г., 2009 г., с 2013 г. по 2014 г. Различные цвета отображают траектории различных термодрифтеров.



Исследование суточного хода ТПМ
Черного моря за длительный период
по данным сканера SEVIRI*

Средний суточный ход ТПМ по данным SEVIRI

Диаграмма среднего годовичного распределения аномалий ТПМ за 2005-2016 гг. по данным SEVIRI

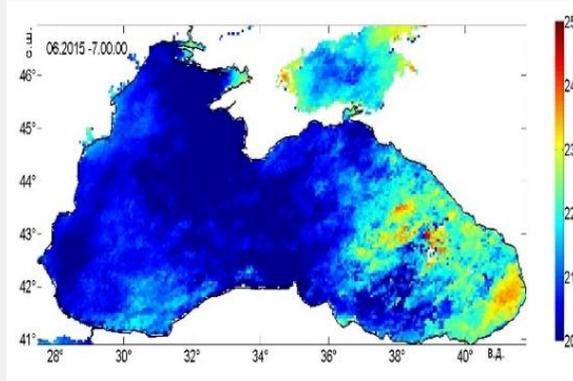


Отображает отклонение суточного хода температуры от среднего значения

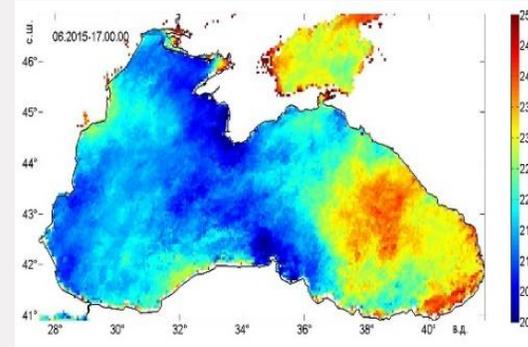
Максимальные отрицательные аномалии ТПМ приходятся на время с 4:00 до 7:00, а максимальные положительные – с 13:00 до 18:00. Наибольшие отклонения ТПМ от среднесезонных значений отмечаются в весенне-летний период (с апреля по июль), при этом наибольшие аномалии приходятся на июнь. Минимальные аномалии наблюдаются с середины ноября по март и не превышают (по модулю) $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$.

Пример:

Карты распределения средней температуры за июнь 2015 г.



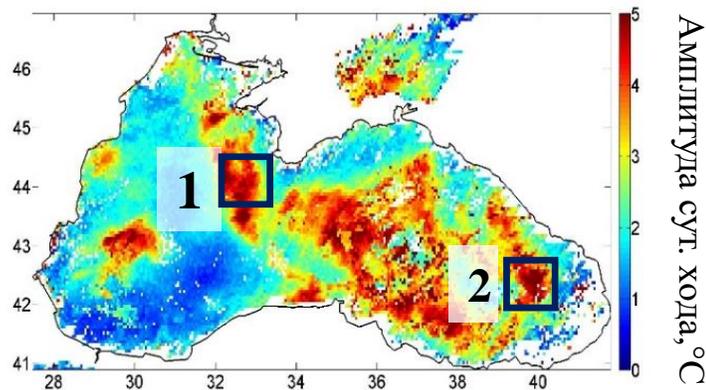
Средняя карта распределения ТПМ за июнь в 7.00



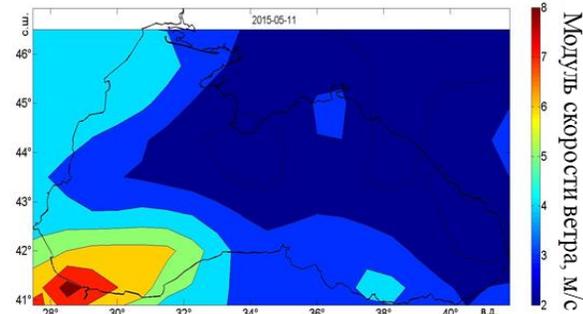
Средняя карта распределения ТПМ за июнь в 17.00

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

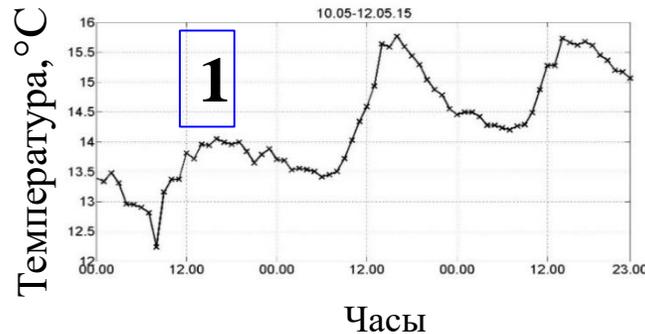
Дневной прогрев по данным SEVIRI



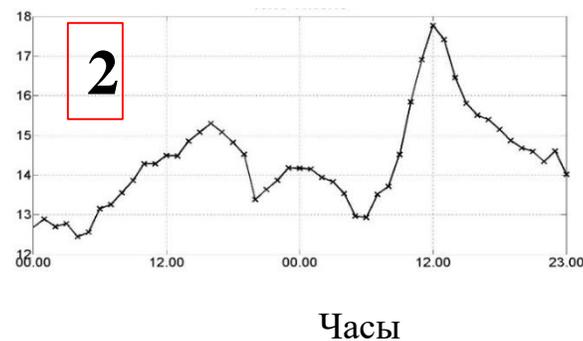
Карта распределения амплитуды суточного хода ТПМ за 11.05.2015



Карта распределения среднего за 11.05.2015 модуля скорости ветра



Графики изменения ТПМ для выбранных точек 1 и 2 Черного моря с 10.05.15 по 12.05.15.



**Амплитуда суточного хода A – разность максимального и минимального значения ТПМ за сутки*

Анализ прогрева за 11.05.15 в отдельно взятых точках Черного моря.

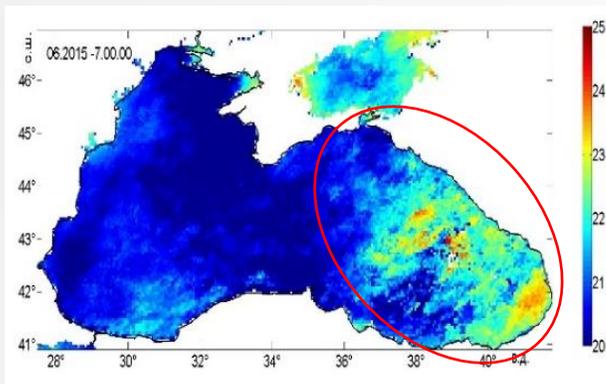
В точке 1 амплитуда суточного хода* ТПМ составила 2.4°C . В точке 2 она достигла 5.5°C . Как в точке 1, так и в точке 2 ярко выражен случай значительного прогрева поверхностного слоя моря.

Следует отметить: в некоторых точках бассейна 11.05.2015 амплитуда суточного хода достигала экстремально высоких значений и составляла $7 - 7,2^{\circ}\text{C}$.

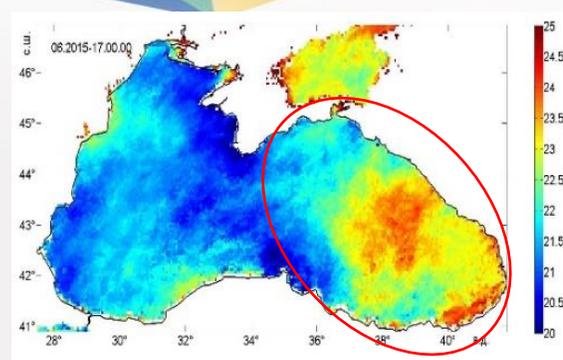
11 мая скорость ветра над основной частью Черного моря не превышала 3 м/с .

В отдельных областях она достигла 5.5°C . Над юго-западным районом Черного моря модуль скорости ветра был несколько выше, в то время как амплитуда была минимальна именно в данной области.

Пространственные особенности распределения поля ТПМ

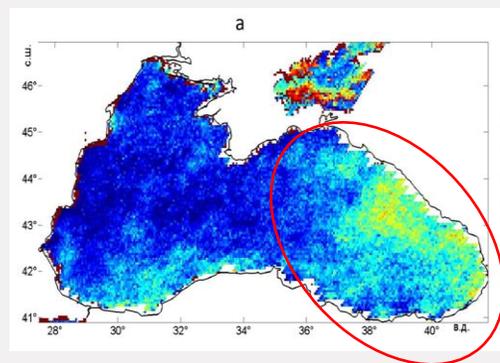


Средняя карта распределения ТПМ за июнь в 7.00

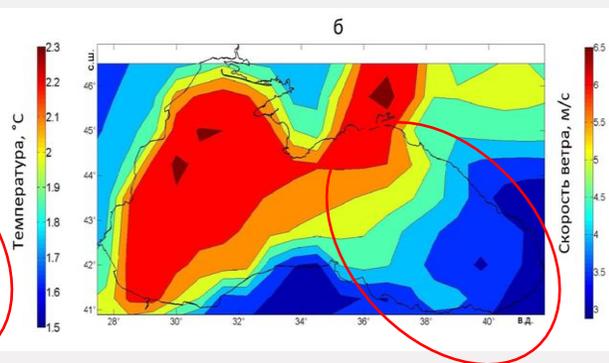


Средняя карта распределения ТПМ за июнь в 17.00

Пространственное распределение амплитуды ТПМ и поля ветра



Карта распределения средней за 2015 год амплитуды суточного хода ТПМ



Карта распределения среднего за год модуля скорости ветра (Era-Interim).

Наибольшие значения ТПМ и ее амплитуды наблюдаются в юго-восточном районе и в прибрежной части юго-западного района Черного моря.

Наименьшие значения амплитуды свойственны его центральной и западной части. Такая пространственная изменчивость связана с распределением поля скорости ветра, которое зависит от рельефа суши, окружающей Черное море.

Повышенные значения ТПМ и амплитуды суточного хода располагаются в зонах ветровой тени.

Зависимость амплитуды суточного хода от скорости ветра, сезона года и температуры воздуха и ТПМ

а

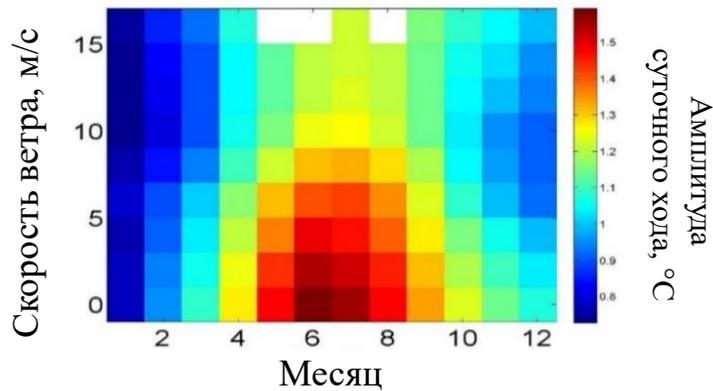


Диаграмма зависимости амплитуды суточного хода от ветра месяца года

б

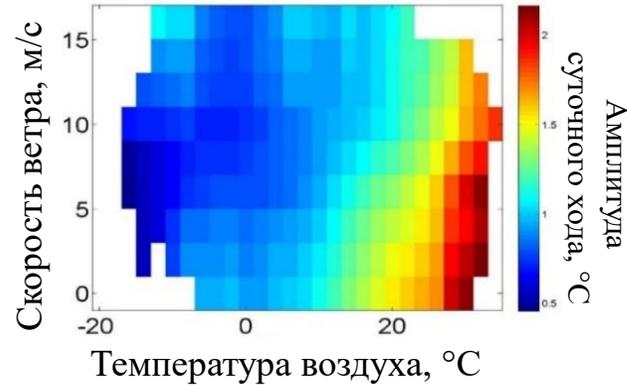


Диаграмма зависимости амплитуды суточного хода от ветра и температуры воздуха

в

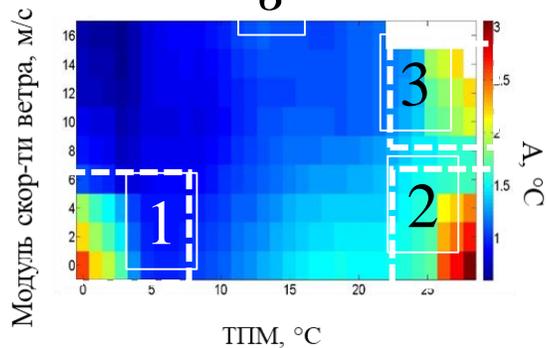


Диаграмма зависимости амплитуды суточного хода от ветра и ТПМ

- 1 – проявление шельфовых районов и мелководья;
- 2 – согласуется с диаграммами *а* и *б*;
- 3 – выхолаживание - проявлением штормов

Максимальные амплитуды суточного хода наблюдаются при низких скоростях ветра (до 6-7 м/с) с мая по сентябрь при температуре воздуха от ~16 °С и выше.

В холодный период года, при температурах воздуха до ~+10 °С и при высоких скоростях ветра амплитуда суточного хода ТПМ принимает минимальные значения.

При высоких скоростях ветра происходит интенсивное перемешивание в поверхностном слое, значительный дневной прогрев не наблюдается.



Исследование суточного хода
температуры приповерхностного слоя
Черного моря по данным
термопрофилирующих дрейфующих
буев на различных горизонтах**

Суточный ход температуры по данным отдельных дрейфтеров

Траектория движения термодрифттера №34860 с апреля по июль 2005 года

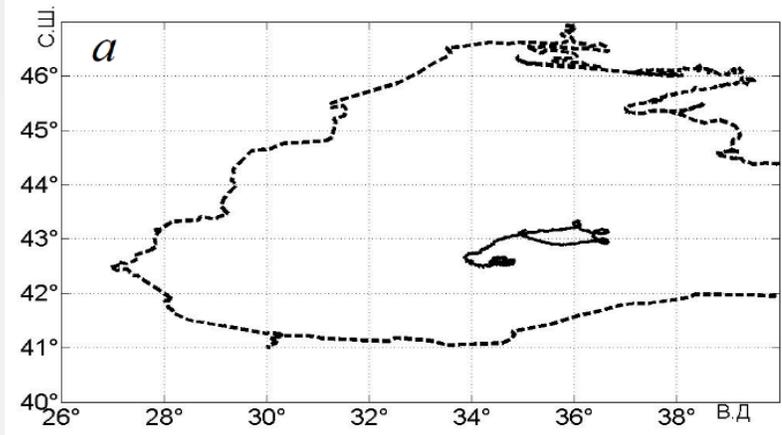
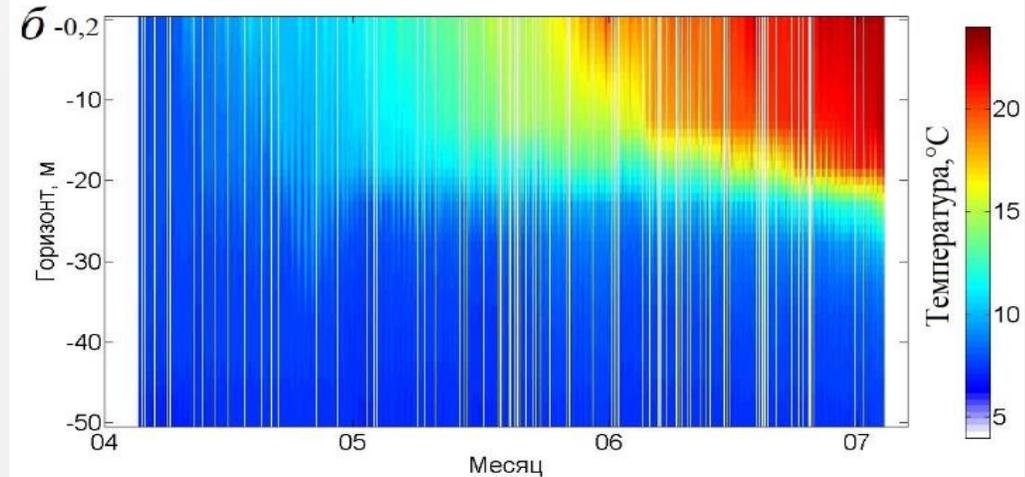
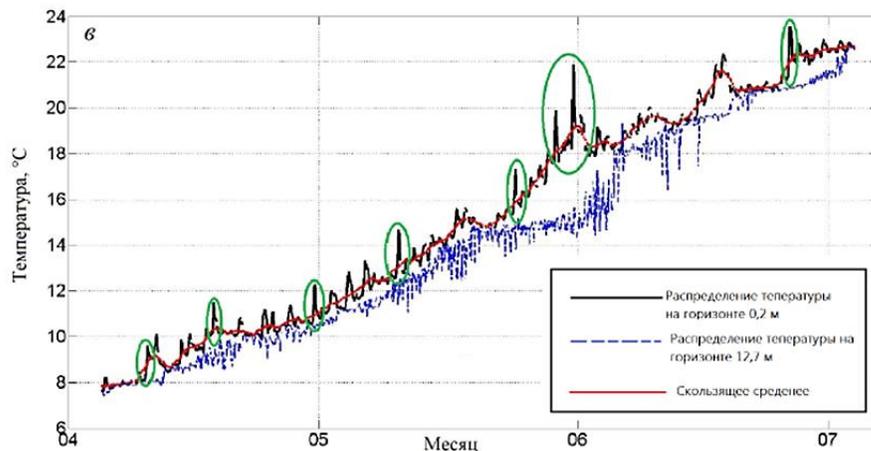


Диаграмма распределения температуры на различных горизонтах по данным термодрифттера №34860



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



На горизонте 0,2 м ярко выражены суточные колебания температуры. Колебания на горизонте 12,7 м – высокочастотные, носят сложный характер.

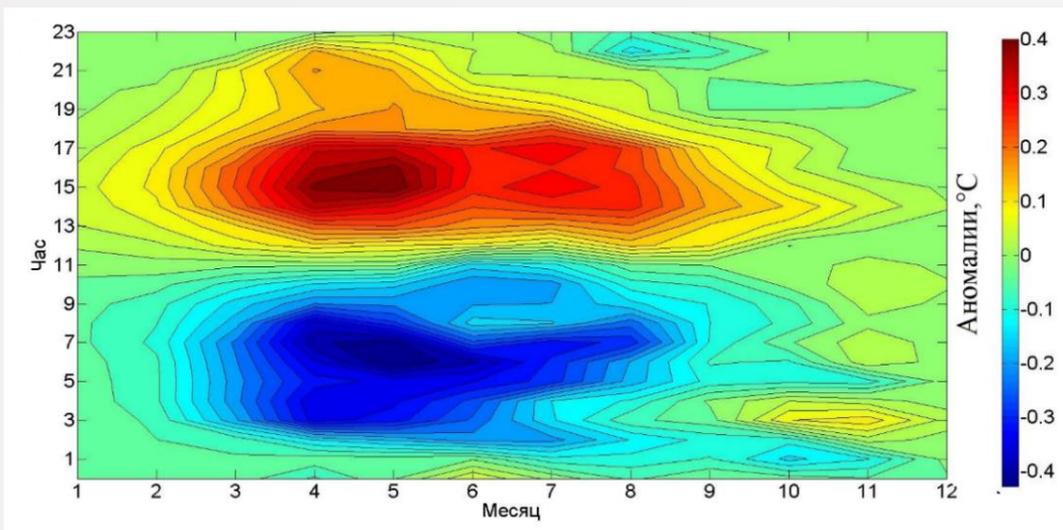
Отмечен ряд случаев значительного дневного прогрева (зеленые эллипсы на графике).

Разница максимального и минимального значения температуры за сутки (далее амплитуда суточного хода) превысила 1,5 – 2°C.

В мае зафиксировано наибольшее количество (четыре) и максимальная амплитуда событий дневного прогрева.

Особенности среднего суточного хода в различные сезоны

Диаграмма сезонной изменчивости аномалий температуры на горизонте 0,2 м по часам суток и месяцам года*



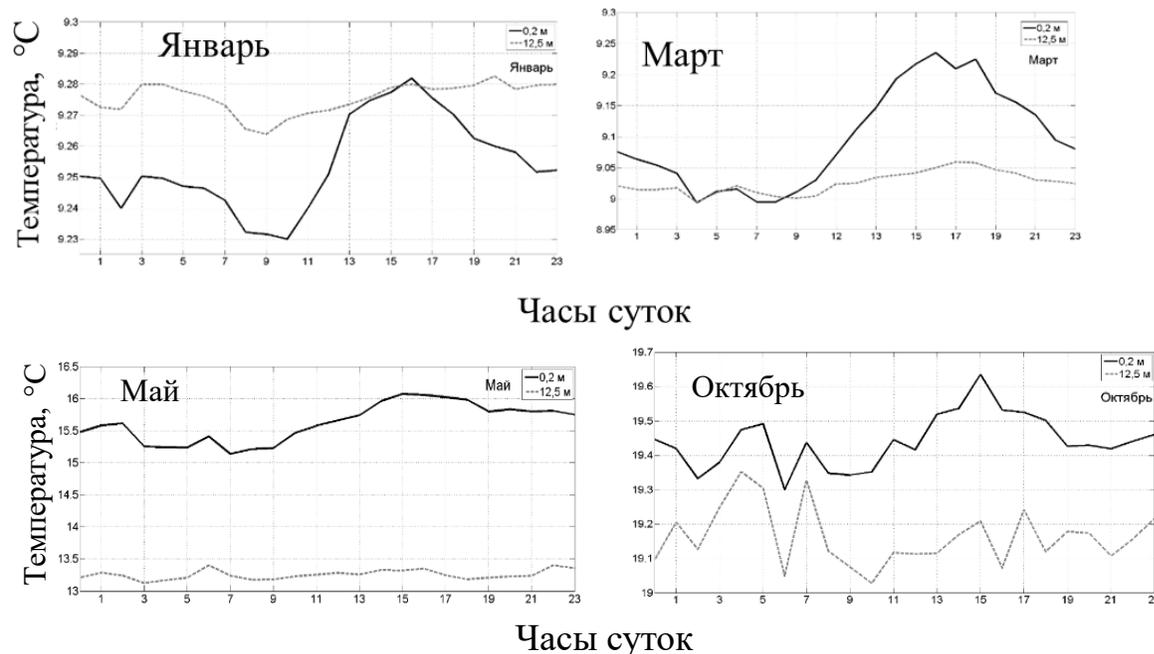
Максимальные по модулю отрицательные аномалии: с 05.00 до 09.00 ($0,2^{\circ}\text{C}$ - $0,4^{\circ}\text{C}$), максимальные положительные с 15.00 до 18.00 (также $0,2^{\circ}\text{C}$ - $0,4^{\circ}\text{C}$).

Наибольшие по модулю отклонения температуры от среднесезонных значений наблюдается в весенне-летний период.

Максимальные аномалии приходятся на май ($\sim\pm 0,4^{\circ}\text{C}$), т.е. амплитуда суточного хода в среднем составляет $0,8^{\circ}\text{C}$. Минимальные аномалии наблюдаются с середины ноября по март.

* по данным всех термодрифтеров

Графики температуры на горизонтах 0,2 м (сплошная линия) и 12,5 м (пунктирная линия)*

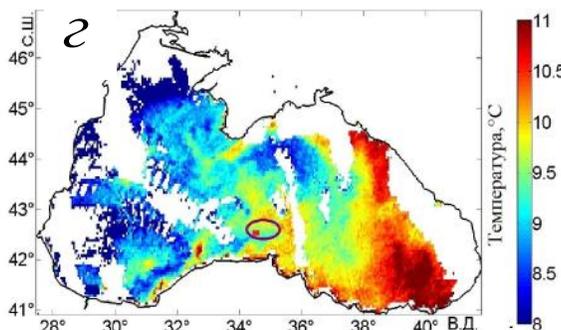
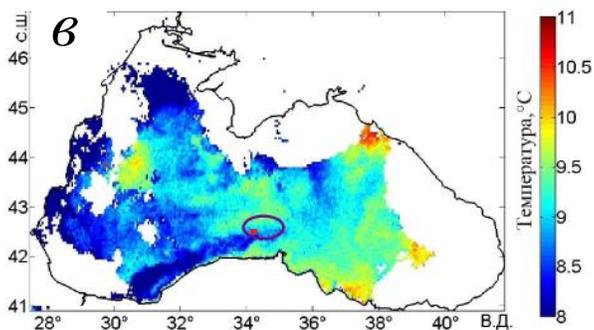
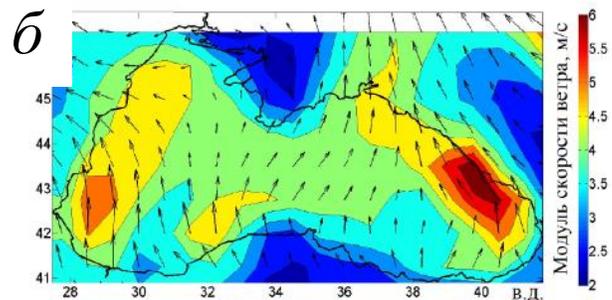
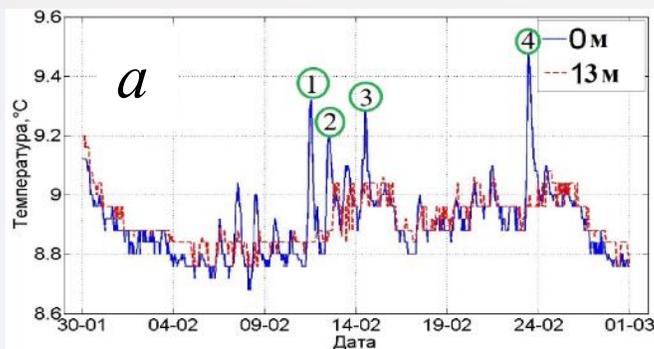


Для холодного времени года характерна незначительная разница температуры вод для горизонтов 0,2 м и 12,5 м небольшие колебания суточного хода температуры присутствуют и на глубине 12,5 м.

В теплый период года суточный ход температуры выражен только для горизонта 0,2 м. Разница температур на горизонтов 0,2 и 12,5 м значительна, **стратификация по температуре устойчива в теплый период года**, перемешивание водных слоев не происходит.

Дневной прогрев в холодный период года

Дрифтер №248990, февраль, 2014 г.



В феврале 2014 года выделено четыре случая значительного дневного прогрева.

Разность минимального и максимального значения температуры за сутки на горизонте 0,2 м достигала 0,6 °C (23.02)

11.02.2014 (Случай 1) температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась от 8,8 °C до 9,3 °C. Таким образом, величина суточного прогрева составил ~0,5 °C.

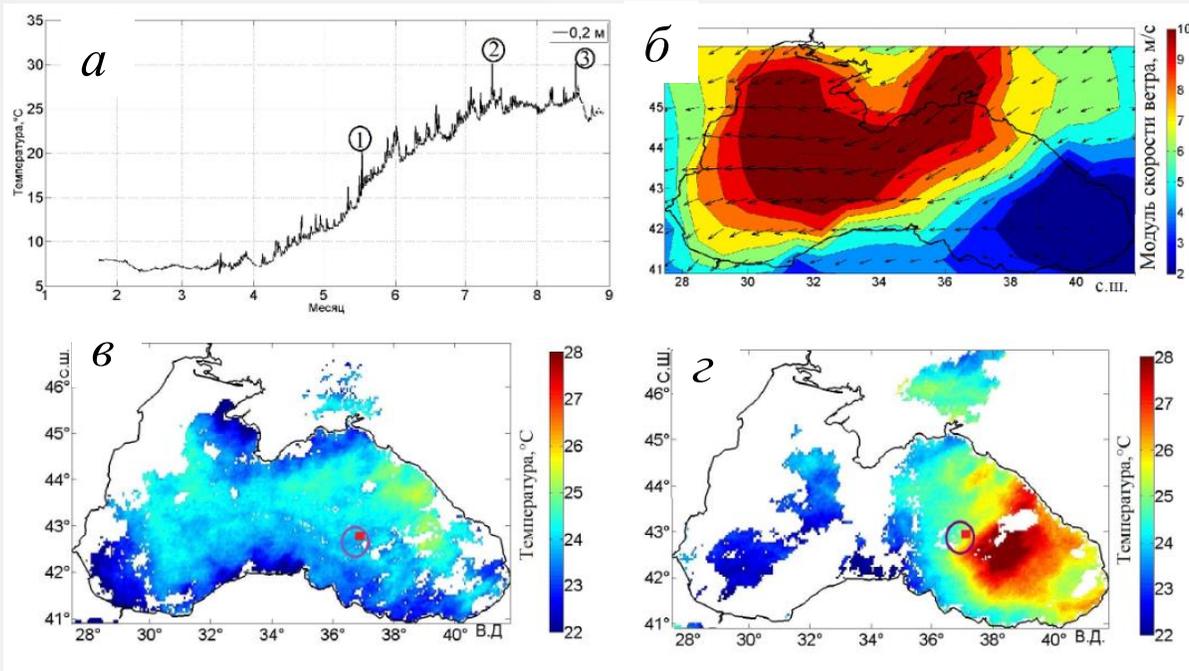
На горизонте 12,5 м за этот же период времени изменения температуры практически не наблюдалось.

Прогрева наблюдался в условиях уменьшения скорости ветра (4-5 м/с) и малой облачности.

Суточный ход температуры на горизонтах 0,2 м (сплошная линия) и 13 м (пунктирная линия) в феврале 2014 года (а);
Карта скорости ветра за 11 февраля 2014 (б);
Карта распределения ТПИМ 11 февраля 2014 в 9.00 по данным SEVIRI (в);
Карта распределения ТПИМ 11 февраля 2014 в 15.00 по данным SEVIRI (г).

Дневной прогрев в теплый период года

Дрифтер №34253, январь-август, 2005 г.



12 июля 2005 г. температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась от минимального значения $25,6^{\circ}\text{C}$ до $30,1^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T \sim 4,5^{\circ}\text{C}$).

Скорость ветра в районе пребывания дрифтера не превышала 7 м/с.

По данным радиометра SEVIRI в районе пребывания дрифтера 12 июля сохранялась безоблачная погода, а также прослеживается рассматриваемый температурный перепад.

Суточный ход температуры на горизонте 0,2 м с января по август 2005 года (а);

Карта скорости ветра за 12 июля 2005 (Era-Interim) (б);

Карта распределения ТПИМ 12 июля 2005 в 4.00 по данным SEVIRI (в);

Карта распределения ТПИМ 12 июля 2005 в 17.00 по данным SEVIRI (г).

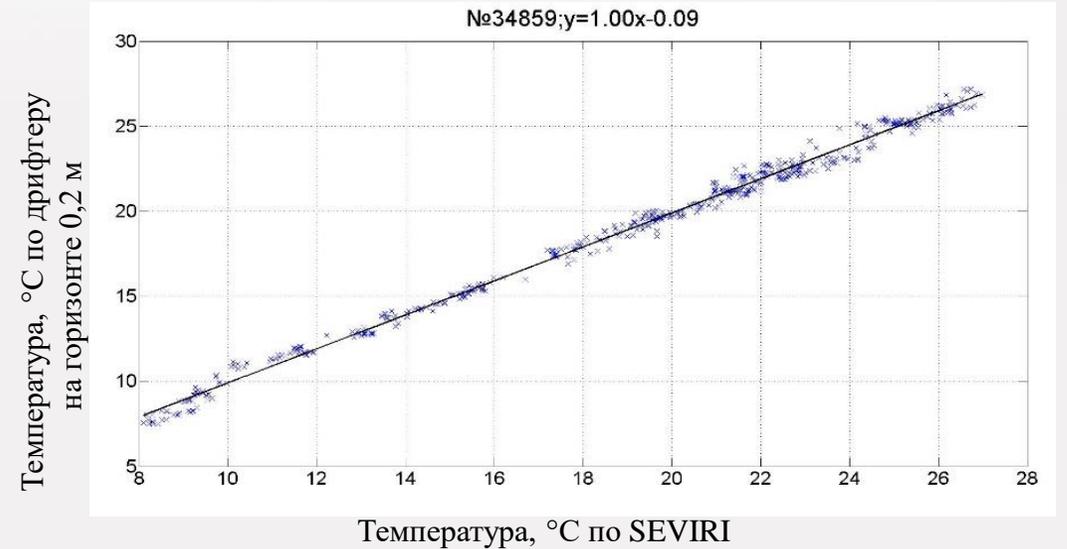
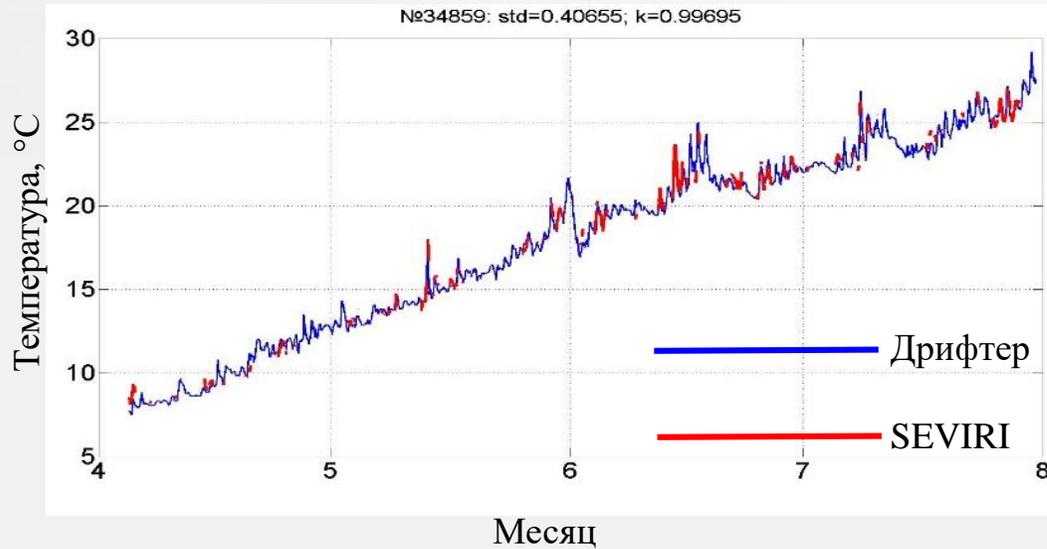
Красной точкой на рис. в и г обозначена траектория дрифтера за рассматриваемый временной интервал



Сезонная и суточная изменчивость
характеристик термического скин-слоя на
основе сопоставления спутниковых измерений
SEVIRI и данных термопрофилирующих
буев***

Сравнительный анализ данных сканера SEVIRI и термопрофилирующих дрейфующих буев

Временная изменчивость температуры по данным SEVIRI и по данным термодрифтеров



Средние значения по всем дрейферам	Коэффициент корреляции	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент регрессии (при x)	Разница средних
	0,96	0,47	0,95	0,08

Временная изменчивость температуры, полученная по контактными и спутниковым данным достаточно хорошо согласуется.

Для большей части измерений разность температур не превышает сотые доли градуса.

Случаи значительного дневного прогрева, зафиксированные дрейфером, также хорошо просматриваются и по спутниковым данным.

Средний коэффициент корреляции между рядами составляет 0,96, среднеквадратичное отклонение разницы этих данных – 0,47°C. Разница средних значений составляет 0,08°C.

Диаграмма годичного распределения аномалий суточного хода

на 0 м по данным SEVIRI

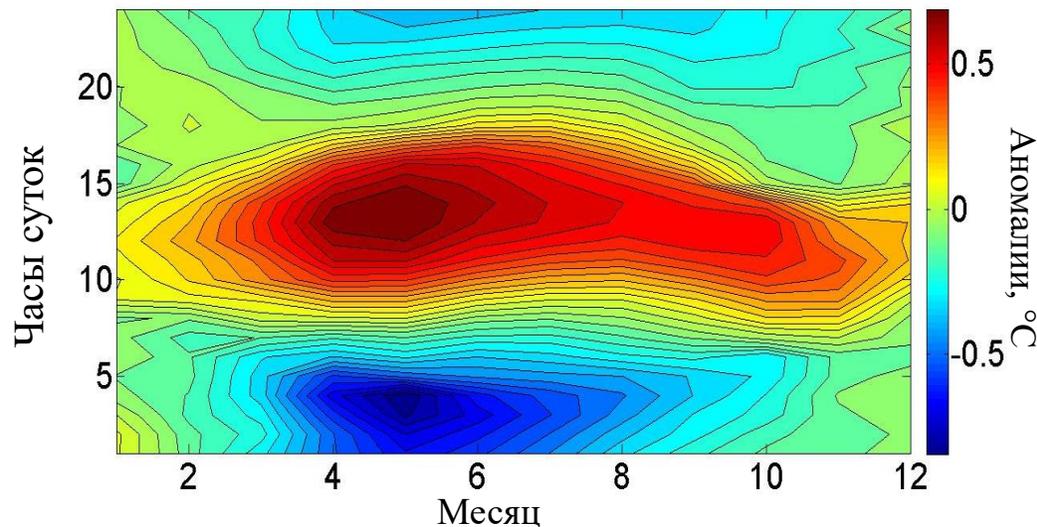


Диаграмма годичного распределения аномалий ТПМ по данным SEVIRI за 2005-2016 гг.

на 0,2 м по данным термодрифтеров

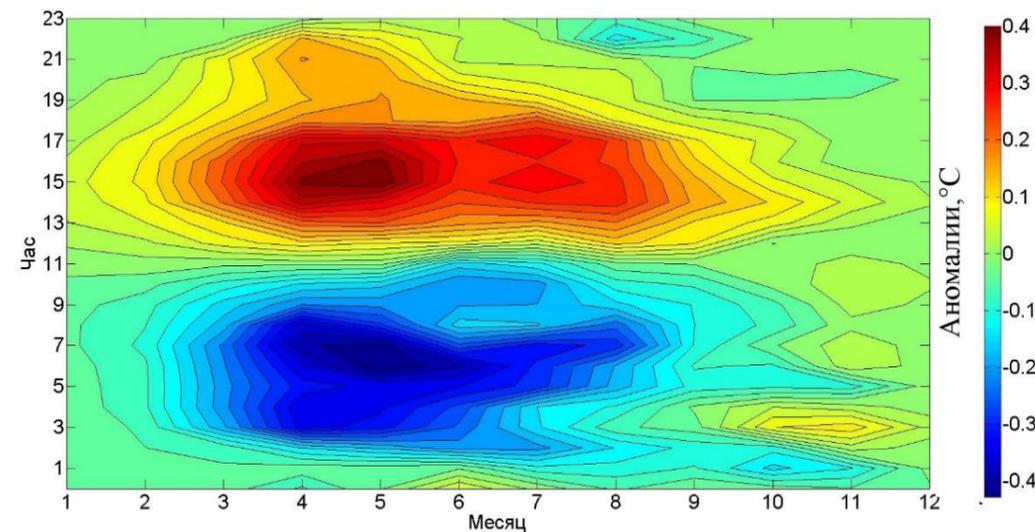


Диаграмма годичного распределения аномалий на горизонте 0,2 м

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.

Зависимость перепада температуры в приповерхностном слое dT^* от различных факторов

Диаграмма зависимости dT от ветра и месяца

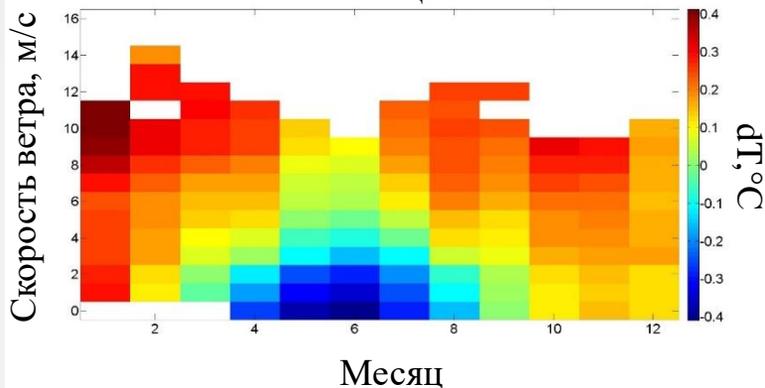


Диаграмма зависимости dT от ветра и полного потока тепла

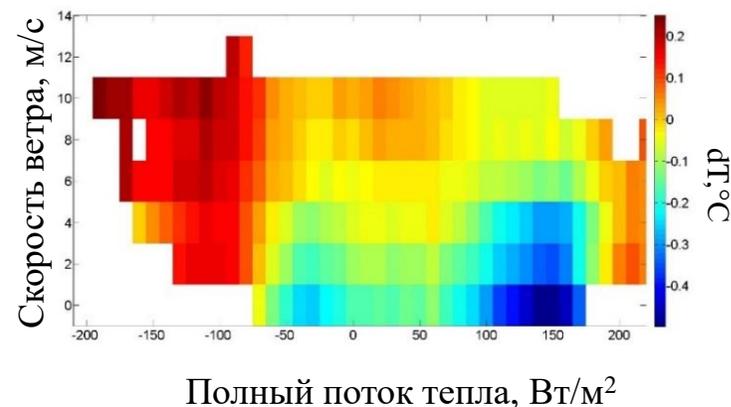
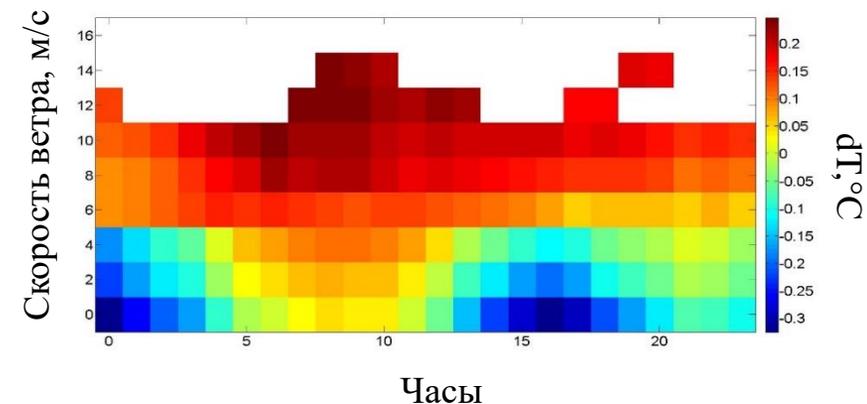


Диаграмма зависимости dT от ветра и часа суток (для мая-августа)



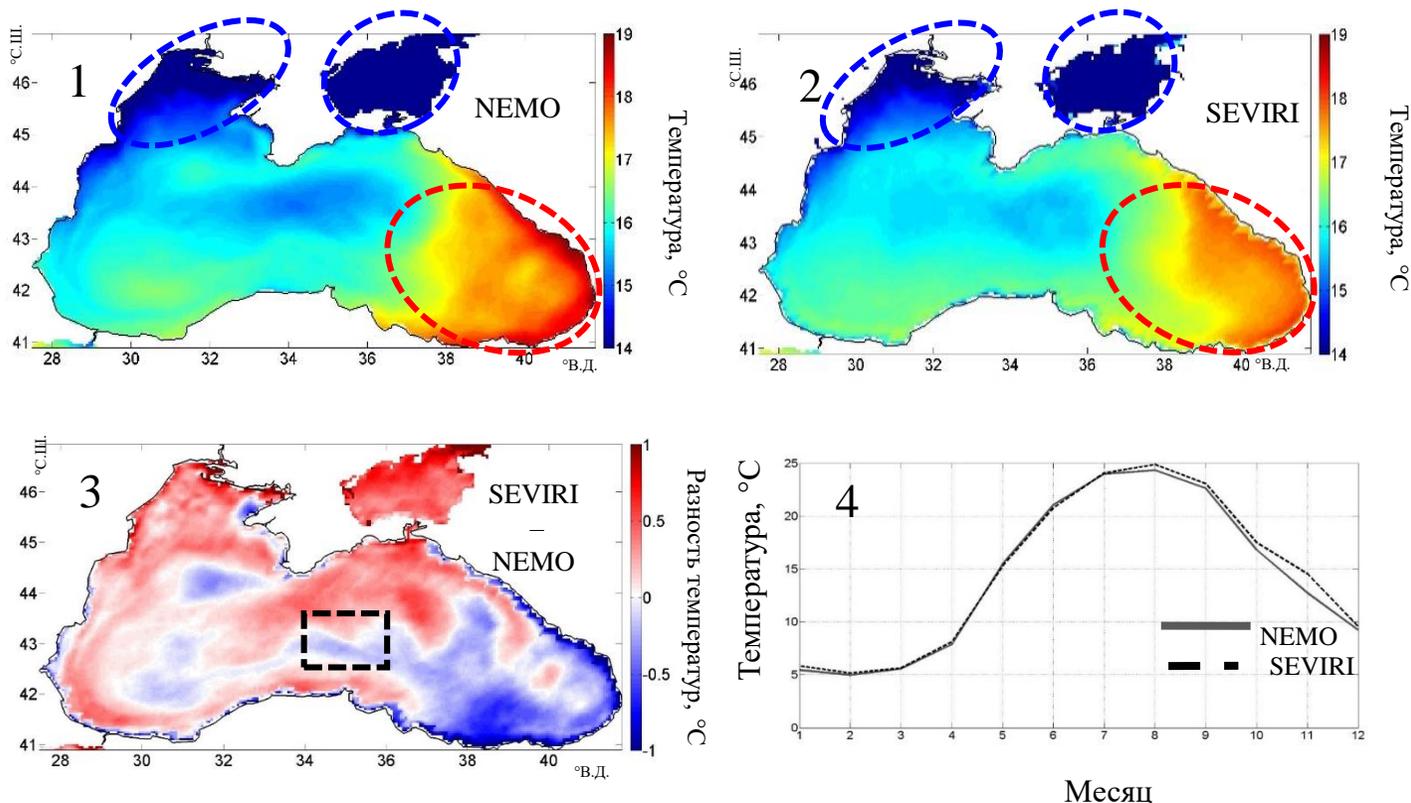
- В теплый период года, когда температуры воздуха максимальны (+18 °С и выше), и полный поток тепла направлен в море dT принимает максимальные отрицательные значения (-0,8 °С – 0,9 °С), что в первую очередь связано наличием скин-слоя (эффектом «холодной пленки»).
- С увеличением скорости ветра происходит снижение абсолютных значений dT , связанное с разрушением скин-слоя. В холодный период года, когда полный поток тепла направлен из океана в атмосферу, а температура воздуха минимальна, dT достигает максимальных положительных значений.
- В течение суток наибольшие отрицательные значения dT приходятся на вторую половину суток – в период наибольшего дневного прогрева. Ночная конвекция разрушает скин-слой, и это приводит к снижению абсолютных величин dT .

* dT – разность показаний SEVIRI и показаний термодрифтета на горизонте 0,2 м



Исследование суточного хода температуры
вод Черного моря и его влияния на
стратификацию по данным модели NEMO

Сопоставление данных модели и сканера SEVIRI



Области повышенного и пониженного значения температур на качественном уровне хорошо совпадают.

Величина разности для основной части акватории не превышает $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С января по июль значения температур практически полностью совпадают.

С августа по декабрь значения ТПМ несколько превышают модельные величины температуры. Наибольшая разница приходится на ноябрь и составляет $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Карты распределения:

- 1 – средней за год температуры на горизонте 1,3 м по данным NEMO,
- 2 – средней за год ТПМ по данным SEVIRI,
- 3 – разностная карта SEVIRI – NEMO;
- 4 – график среднемесячных значений средней по выбранному району ТПМ по данным SEVIRI и температуры на горизонте 1,3 м по данным NEMO

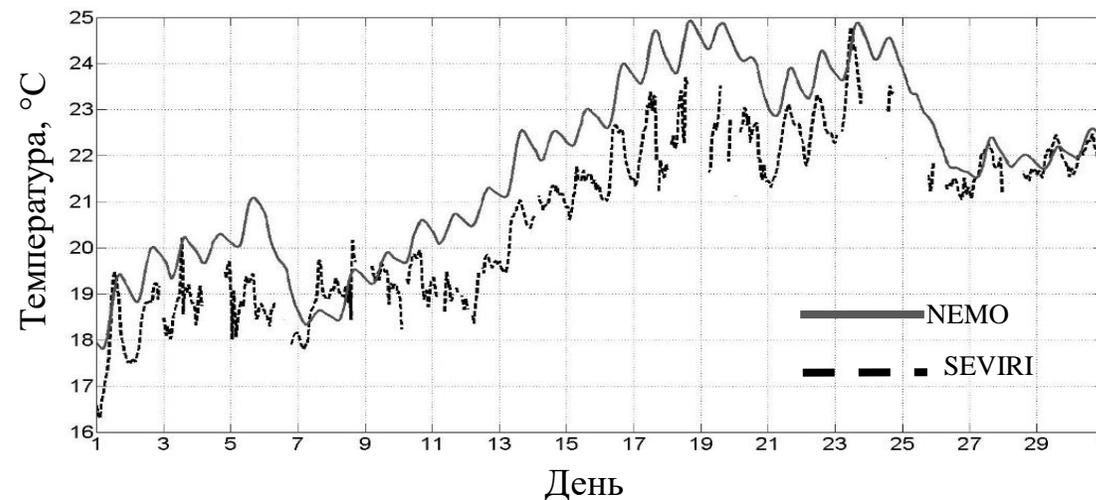
Особенности временного хода температуры по спутниковым и модельным данным

На протяжении всего месяца температура по данным NEMO оставалась выше ТПМ. Разница составляет от 0,5 °С до 2,5 °С.

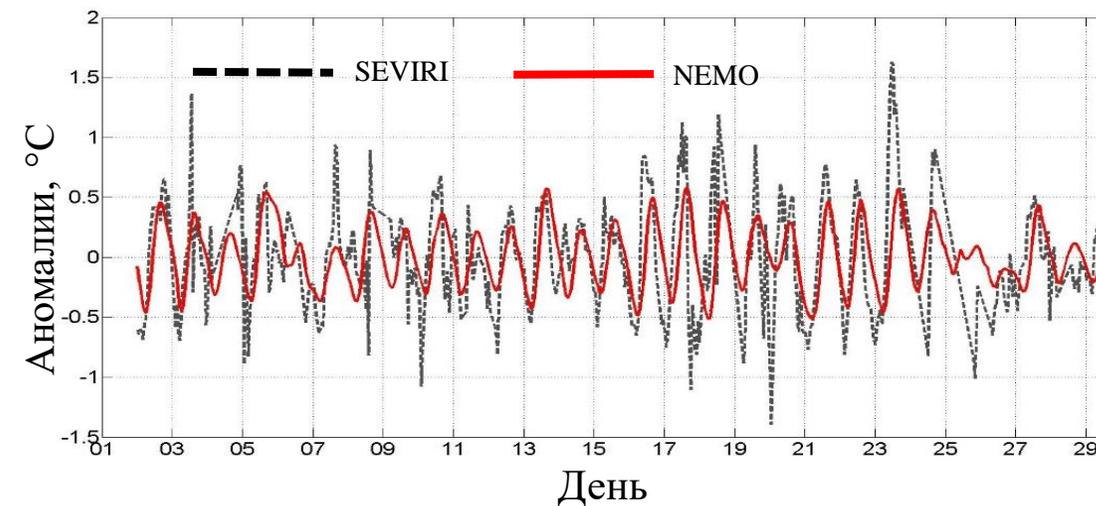
Величина ТПМ в течение суток изменяется более значительно, чем температура по данным модели.

На качественном уровне картина распределения суточного хода температуры и аномалий неплохо согласуется.

Временной ход ТПМ и температуры на горизонте 1,3 м в июне 2015 г.

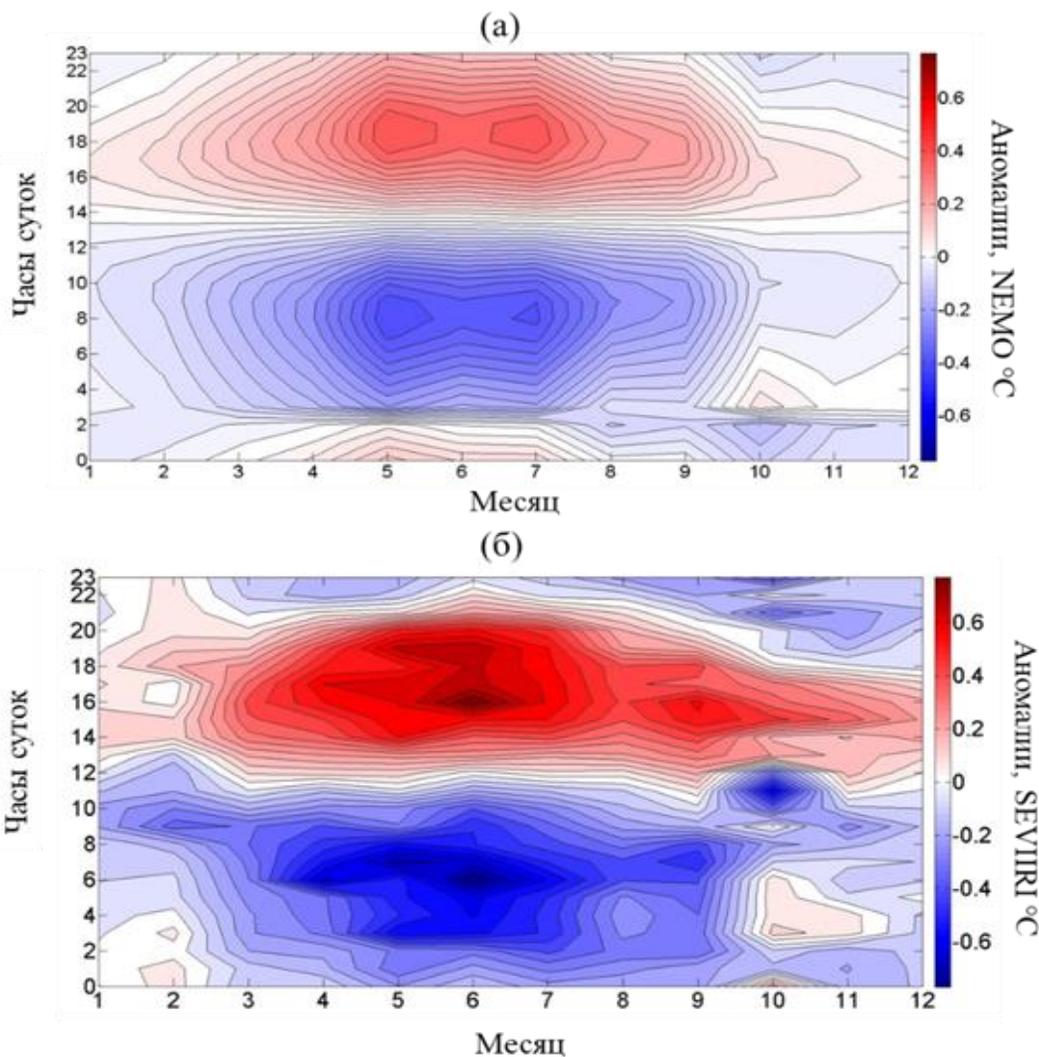


Аномалии суточного хода ТПМ и температуры на горизонте 1,3 м по данным модели*



*Аномалии суточного хода ТПМ и температуры на горизонте 1,3 м по данным модели - разность значения температуры и температуры, сглаженной фильтром с шагом 24 часа.

Средний суточный ход



По данным NEMO в 2015 году наиболее значительные отклонения температуры от среднемесячных значений наблюдаются с апреля по август, с максимальными значениями в мае – июле.

Минимальные по модулю отклонения температуры от среднемесячных значений наблюдаются с октября по март.

В течение суток максимальные по модулю отрицательные аномалии приходятся на утренние часы (7.00 – 8.00), а положительные величины на вечернее время (18.00 – 20.00) – период дневного прогрева.

Полученная картина распределения аномалий достаточно хорошо согласуется с результатами, полученными ранее по данным SEVIRI.

Диаграмма распределения аномалий среднего суточного хода температуры – отображает отклонение суточного хода температуры от среднего значения.

Спектральный анализ вертикального распределения температуры

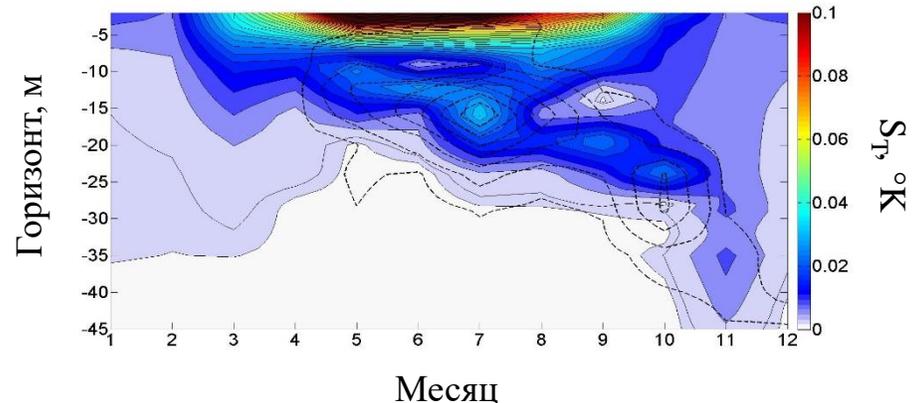
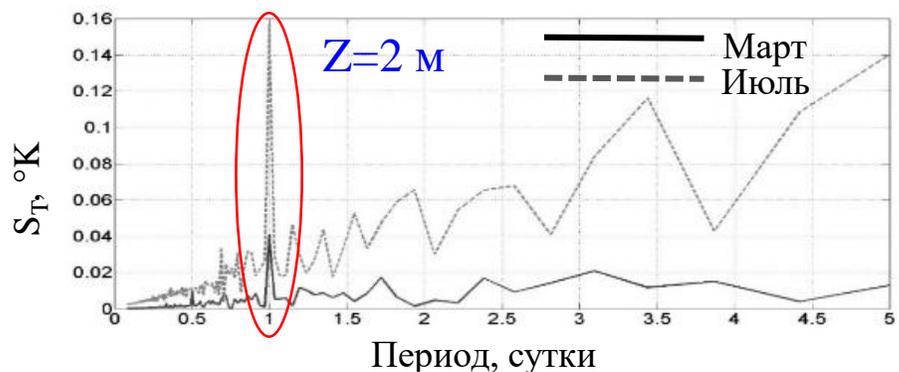
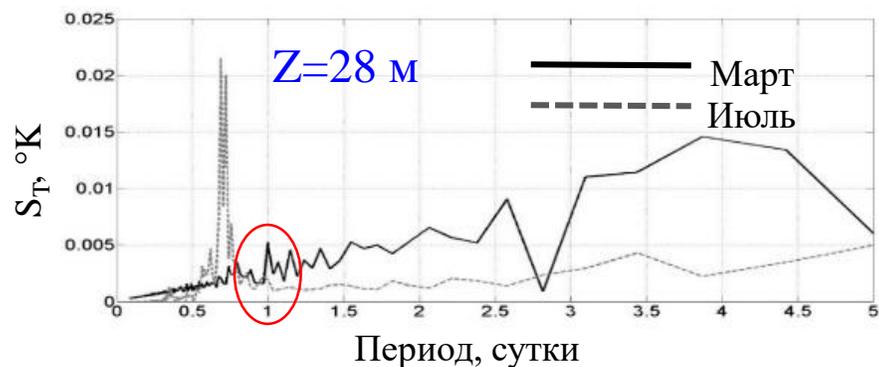


Диаграмма средних за месяц вертикальных профилей энергии для выбранной в глубоководной части бассейна точки (34° в.д., 43° с.ш.) для колебаний с $T \sim 1$ сутки и $T \sim 17$ часов (пунктирная линия).



Энергетические спектры колебаний температуры на горизонтах 2 м и 28 м для марта и июля в точке 34° в.д., 43° с.ш.



- В теплый период года наблюдаются максимальная по величине энергия суточные колебания. Этот максимум локализован в верхних слоях вод, на горизонтах до 6 м – 7 м.
- В холодный период года интенсивность суточных колебаний ниже, однако, глубина проникновения суточного хода температуры достигает 45 м – 50 м.
- **Связь со стратификацией:** в марте устойчивая стратификация отсутствует, дневной прогрев способен проникать в слои ~ 50 м. Летом, при наличии устойчивой стратификации, глубина проникновения суточных колебаний значительно меньше (~ 6 м – 10 м).

Заключение

1. По данным дистанционного зондирования рассмотрен средний суточный ход, особенности пространственного распределения, события значительного дневного прогрева ТПМ Черного моря, а также исследована связь амплитуды суточного хода с полем ветра, месяцем года, температурой воздуха, и самой ТПМ.
2. Проведен сравнительный анализ данных SEVIRI и термодрифтеров за многолетний период. Получено хорошее согласование сопоставляемых данных. Рассмотрен также средний суточный ход температуры на первом горизонте, исследованы особенности вертикального распределения суточного хода для различных месяцев года, исследованы события значительного дневного прогрева в холодный и теплый период года.
3. По данным сканера и термодрифтеров исследованы термические характеристики скин-слоя и их зависимость от таких факторов как поле ветра, потоки тепла, сезон года, время суток относительная влажность.
4. Сопоставление данных сканера с результатами расчета NEMO за 2015 год также показало хорошее соответствие данных ДЗ и результатов моделирования. Отмечено неплохое воспроизведение в результатах расчета суточного хода температуры, особенностей пространственного распределения, сезонного хода. Проанализированы особенности вертикального распределения суточного хода температуры в различные месяцы года, в том числе с помощью спектрального анализа.
5. Таким образом, в работе продемонстрирована потенциальная возможность использования данных SEVIRI для исследования процессов и явлений в Черном море.

Список использованных источников

*Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Черного моря по данным сканера SEVIRI //Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т. 35. – №. 2 (206).

**Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонный и суточный ход температуры вод Чёрного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – №. 5. – С. 268-281.

***Рубакина В.А, Кубряков А.А., Станичный С.В. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев //Исследование Земли из космоса. – 2021. – №3

Исследование выполнено
при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научного
проектов № 19-35-90084 и
Гос.задания 0555-2021-0006



Спасибо за внимание!