



Оценка характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений и данных термопрофилирующих буев

Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В.
Морской гидрофизический институт

*г. Москва, г. Севастополь
2020 г.*



Актуальность исследований

Вопрос сопоставления контактных данных и данных дистанционного зондирования является одним из наиболее актуальных в современной океанологии. Хотя спутниковые наблюдения имеют ряд неоспоримых преимуществ, без контактных измерений корректная интерпретация данных спутниковых сенсоров крайне затруднена, а порой невозможна. Кроме того, контактные измерения позволяют получить информацию не только о поверхности океана, но и о вертикальном распределении различных параметров вод.

Сопоставление данных дистанционного зондирования с измерениями дрейфтеров сопряжено с определенными специфическими трудностями и проблемами:

- поля ТПМ, получаемые по данным спутников и по данным дрейфтеров, усредняются по разным пространственным масштабам (как в горизонтальном, так и вертикальном направлении). Для спутниковых данных температура измеряется в слое порядка долей мм, а осреднение по площади – порядка км (площади осреднения зависят от пространственного разрешения соответствующего прибора);
- первый горизонт измерений у термодрейфтеров расположен на глубине 0,2-0,25 м в точке, координаты которой фиксированы;
- имеют место несовпадения моментов времени измерений, погрешности географической привязки данных спутниковых данных, а также погрешности определения расположения дрейфтеров, отличия в технических параметрах сканеров, сбои в работе приборов.

Одним из наиболее важных факторов отличия радиационной температуры морской поверхности и температуры верхнего слоя вод, определяемым *in situ* является наличие **скин-слоя с выраженным перепадом температуры**, который образуется из-за энергообмена океана с атмосферой. Именно поэтому вопрос анализа физических характеристик скин-слоя столь актуален.

Использование ежечасных спутниковых и контактных измерений температуры позволяет получить гораздо больший объем данных об изменчивости термических характеристики верхнего слоя, в частности, перепада температуры в скин-слое и ее суточной изменчивости.

Используемые данные

Данные SEVIRI

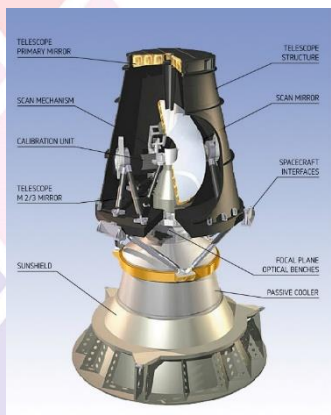
SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) - сканер с разрешением от 5 км до 1 км измеряющий в 12 спектральных каналах в оптическом и инфракрасном диапазоне. SEVIRI установлен на геостационарных метеоспутниках Meteosat (MSG). Данный радиометр позволяет получать изображения поверхности Земли каждые 15 минут. Точность измерений ТПМ составляет 0.5 К.

Анализируемые данные: температура поверхностного слоя моря.

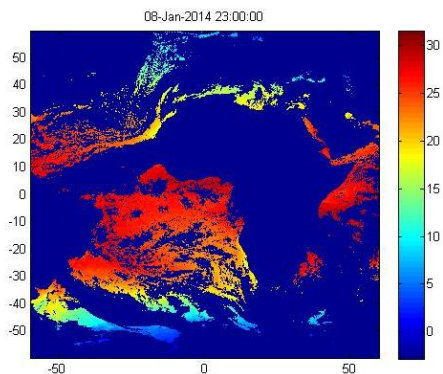
Временное разрешение – 1 час.

Пространственное разрешение – 5 км.

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



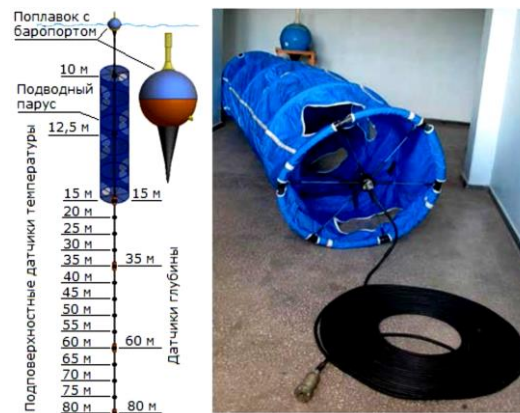
Радиометр SEVIRI



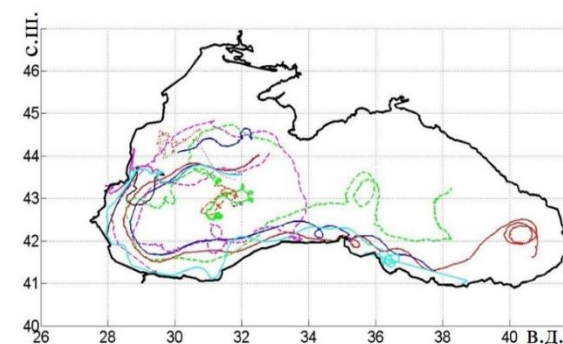
Данные термодрифтеров

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 термодрифтера). Первый горизонт измерений ~0,2 м, второй ~12 м, последний горизонт измерений, а также количество горизонтов – зависят от модификации термодрифтера (максимальная глубина, на которой измерялась температура составляет ~80 м).

Источник данных: Банк океанографических данных Морского гидрофизического института РАН)



Структура и внешний вид термодрифтера* (*Толстошеев и др., 2014)



Траектории термодрифтеров за период с 2005 г. по 2007 г., 2009 г., с 2013 г. по 2014 г., данные которых использовались в работе

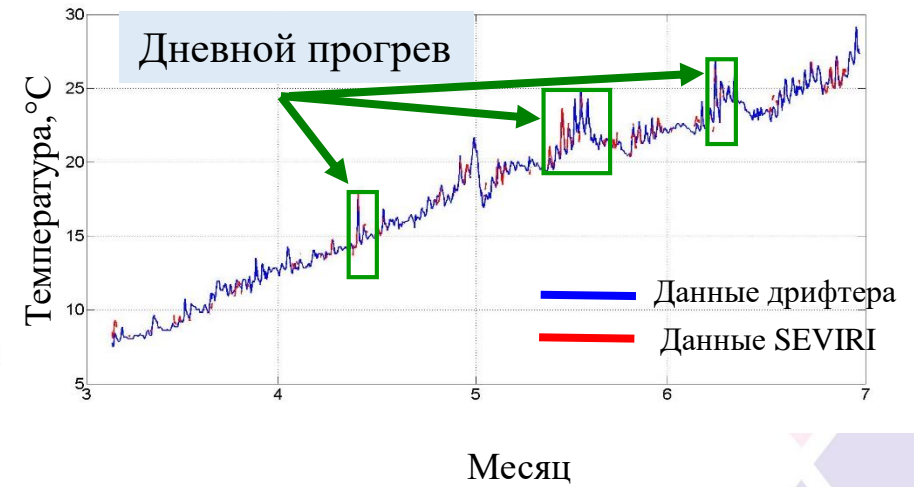
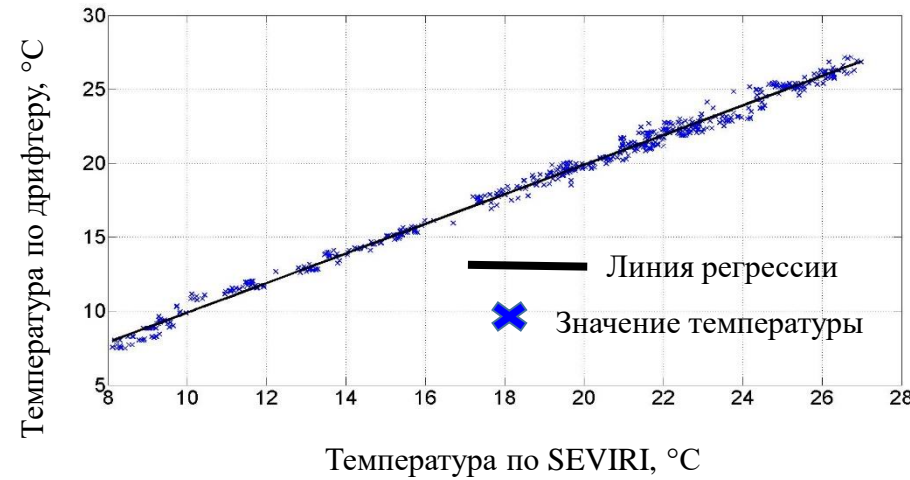
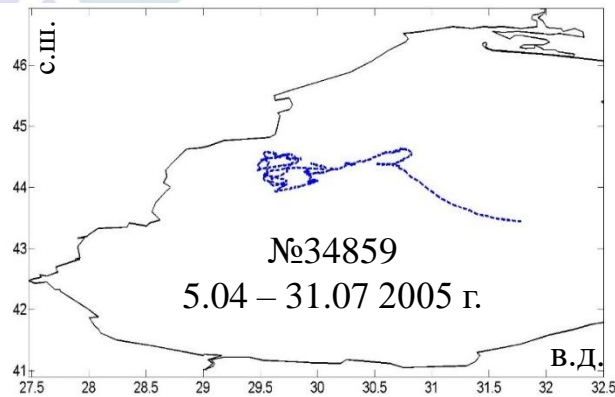
Данные реанализов Era-Interim и Era5

1. Данные реанализа Era5 о **направлении и величина скорости ветра** на высоте 10 м для района Черного моря за 2005-2016 гг. с временным разрешением 1 часов и пространственным разрешением – $0,25^\circ$.
2. Данные реанализа Era5 об **относительной влажности воздуха** на высоте 10 м, с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и временным разрешением 1 час.
3. Данные реанализа Era-Interim о **температуре воздуха** на высоте давления (2 м) с пространственным разрешением $0,75^\circ$ и временным разрешением 6 часов. Данные получены из архива <https://www.ecmwf.int/>.
4. Данные реанализа Era-Interim о **потоках тепла**, с пространственным разрешением $0,75^\circ$ и временным разрешением 12 часов.

Источник данных: <https://cds.climate.copernicus.eu/>, <https://www.ecmwf.int/>.

Суточная и сезонная
изменчивость температуры вод
приповерхностного слоя по
данным SEVIRI и
термодрифтеров

Временная изменчивость температуры по данным SEVIRI и по данным отдельных термодрифтеров



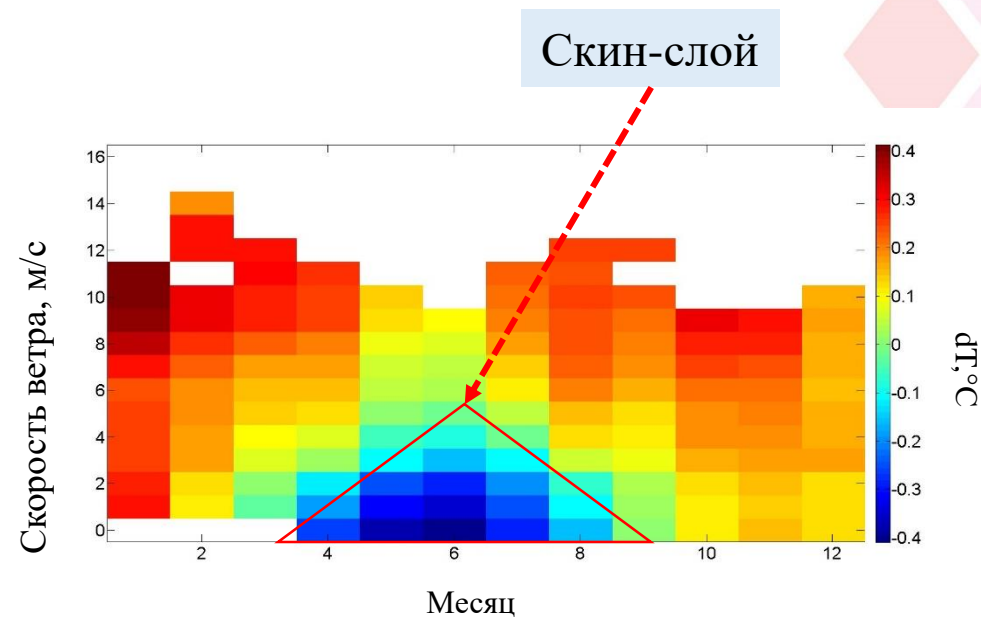
- Для большей части измерений разность показаний температур не превышает сотые доли градуса.
- Разница средних значений составляет $0,1^{\circ}\text{C}$.
- События значительного дневного прогрева, которые определены по данным термодрифтера, также хорошо отображают данные сканера.
- Коэффициент корреляции между рядами равен ~ 1 , среднеквадратичное отклонение разницы этих данных — $0,41^{\circ}\text{C}$.

	Коэффициент корреляции	Среднеквадратичное отклонение, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент регрессии	Разница средних значений
Для дрейфера №34859	~ 1	0,41	~ 1	0,1
Для всего массива данных	0,99	0,57	~ 1	-0,06

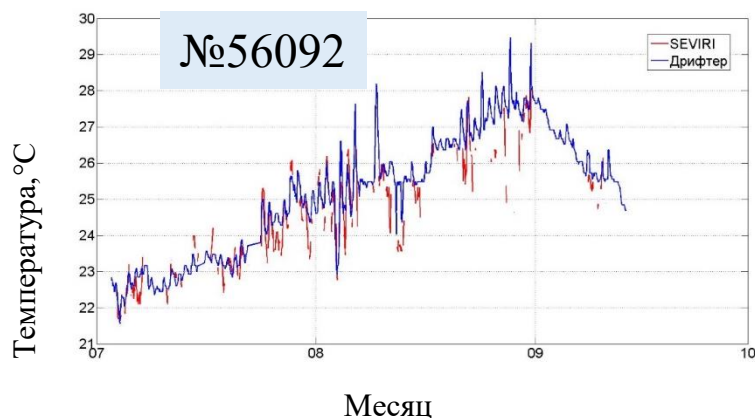
dT - разность ТПМ по данным SEVIRI и температуры на горизонте 0,2 м по данным дрейфера

Зависимость dT от сезона года

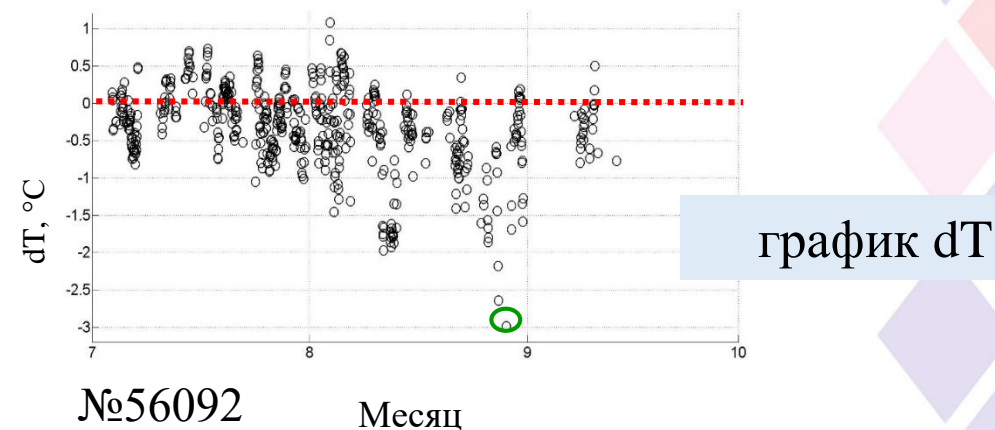
- В теплый период года (апрель-август) dT принимает отрицательные значения ($(-0,1)^\circ\text{C} - (-0,4)^\circ\text{C}$) при низких скоростях ветра ($0 - 4$ м/с).
- Максимальные отрицательные значения ($-0,3^\circ\text{C} - (-0,4)^\circ\text{C}$) приходятся на май-июнь, скорости ветра при этом не превышают 2-3 м/с.
- Минимальная по модулю dT ($0-(\pm 0,05)^\circ\text{C}$) в показаниях наблюдается при высоких скоростях ветра – 7-8 м/с и выше – для всех сезонов года.
- В холодный период года (январь – март) при скоростях ветра от 0 до 10 м/с наблюдается положительная разница показаний.
- Максимальные положительные значения dT – ($+0,3^\circ\text{C}$) – ($+0,4^\circ\text{C}$) имеют место в январе-феврале, скорости ветра при этом достигают 8-12 м/с. Большая (положительная) разница показаний приходится осенний период при скоростях ветра от 6 до 12 м/с.



Пример

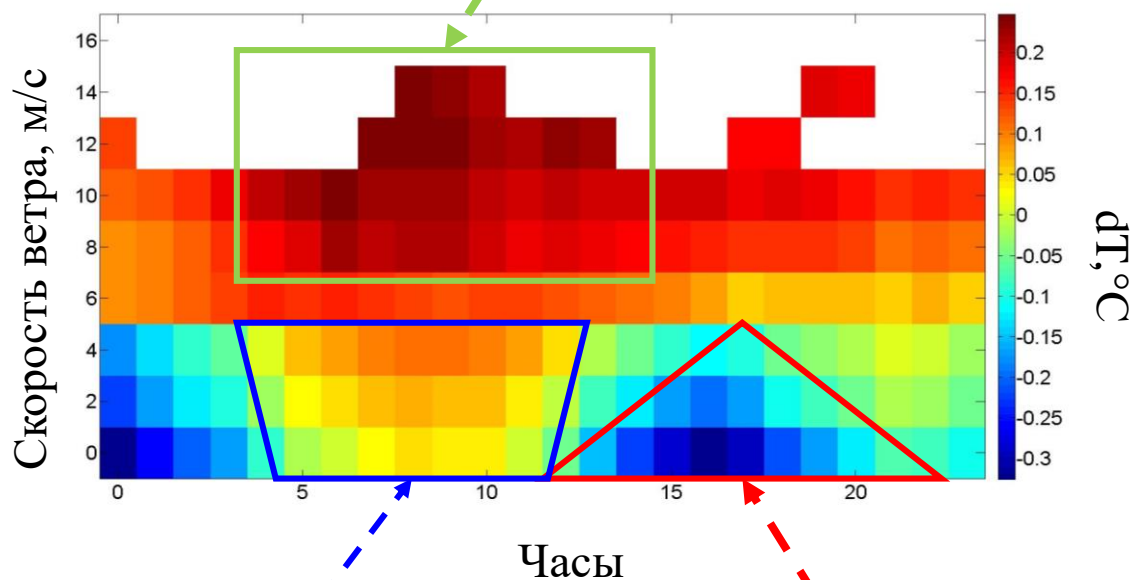


Суточный ход температуры по данным термодрифтера №56092 (с 3.07.2006 по 19.09.2006), и суточный ход ТПМ по SEVIRI



dT и время суток

Разрушение скин-слоя, штормовое выхолаживание, проблемы атмосферной коррекции, барашки и пена на поверхности



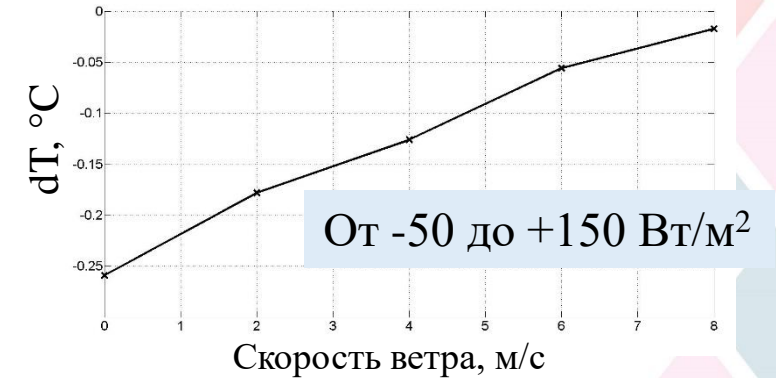
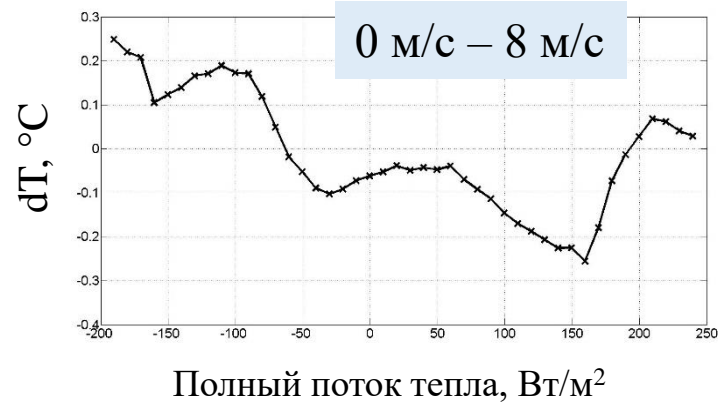
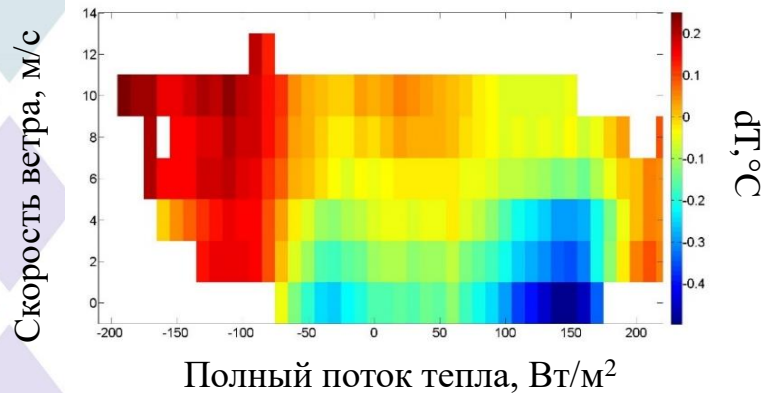
Ночная конвекция

Дневной прогрев

- Отрицательные dT ($-0,15$ °C – $(-0,05$ °C)) расположены в диапазоне низких скоростей ветра (от 0 до 7 м/с) и приходится на вторую половину суток и ночное время.
- Минимальные по модулю значения dT приходится на период с 5.00 до 11.00.
- При совсем слабых ветрах (0-2 м/с) эффект холодной пленки наблюдается на протяжении всех суток.
- Положительные значения dT принимает при скоростях ветра от 8 м/с и выше, в дневные часы.
- Максимальные положительные dT (от $+0,1$ ° до $+0,15$ °) приходится на первую половину суток (с 9.00 до 13.00) при скоростях ветра от 5 м/с до 11 м/с.
- Положительные dT , также проявляются и в ночные часы при скоростях ветра более 9 м/с.
- В диапазоне скоростей ветра 7 м/с и выше dT положительны в течение всех суток.

Связь dT с различными факторами

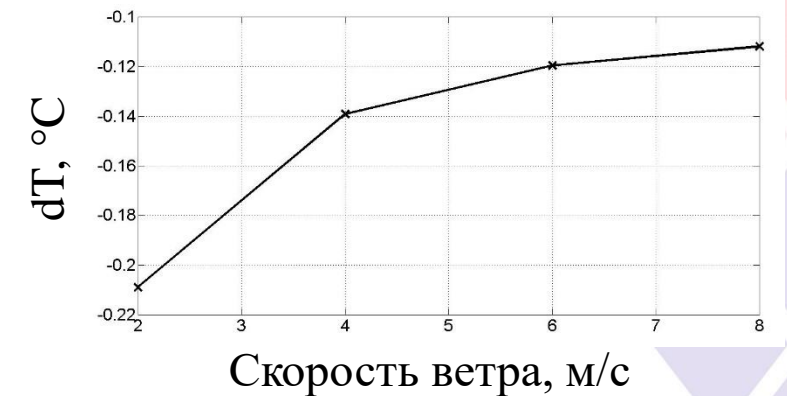
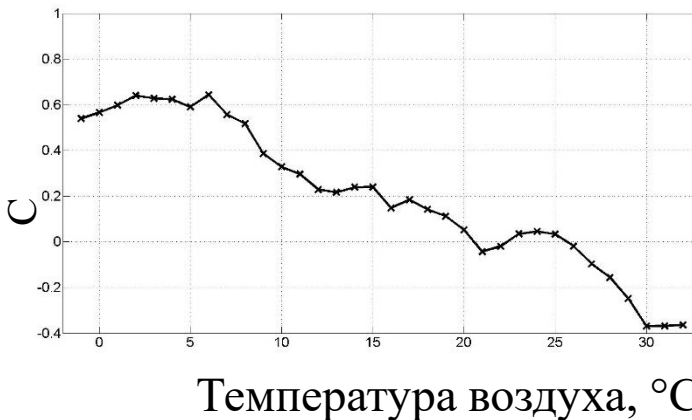
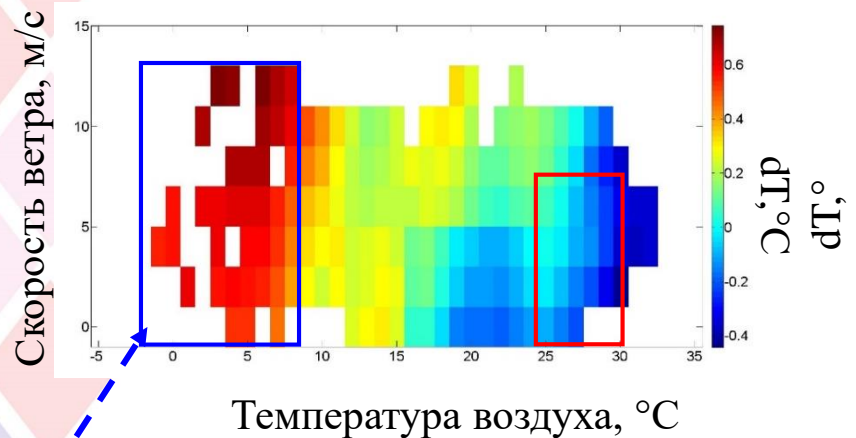
Зависимость dT от полного потока тепла



- При скоростях ветра до 7 м/с dT имеет преимущественно отрицательные значения практически не зависимо от величины суммарного потока тепла и его знака.
- Максимальные по модулю отрицательные dT приходятся на штилевые условия (0-2 м/с).
- С увеличением скорости ветра (от 7 м/с и выше) модульные значения dT стремятся к минимальным величинам.
- Максимальные положительные значения dT наблюдаются при больших отрицательных полных потоках тепла (т.е. охлаждение моря) при скоростях ветра более 4 м/с.
- Хотя, в целом, имеется некоторая тенденция к снижению величины dT при росте полного потока тепла, ярко выраженной зависимости от его величины не наблюдается.
- При величине полного потока тепла в диапазоне от -50 до +150 Вт/м² зависимость величины dT от скорости ветра (в диапазоне 0 – 8 м/с) практически линейна. Абсолютное значение dT снижается, что может свидетельствовать о уменьшении скин-эффекта и разрушении скин-слоя с возрастанием скорости ветра.

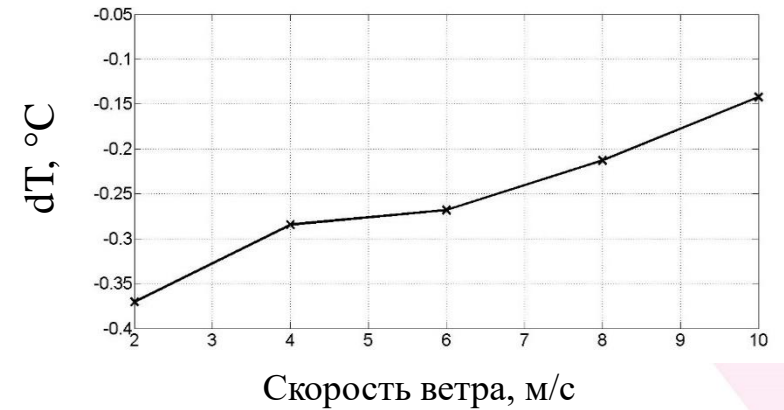
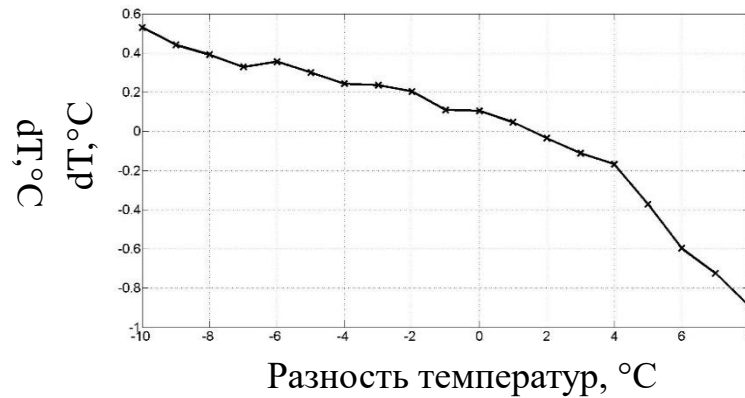
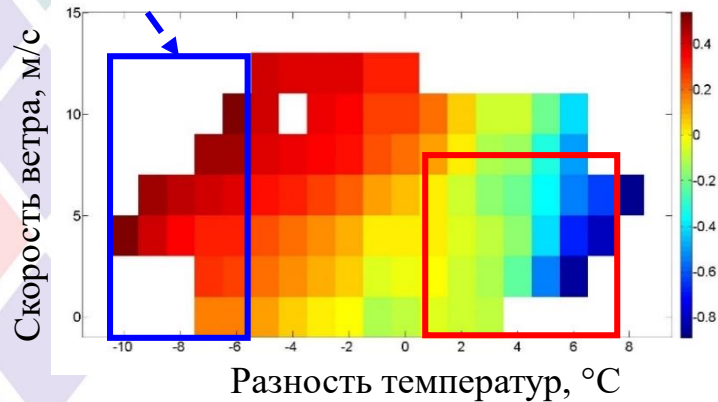
Зависимость dT от температуры воздуха

- Максимальные положительные dT (от $+0,4$ °C до $+0,7$ °C) находятся в диапазоне минимальных температур воздуха (от -1 °C до $\sim +8$ °C при всех рассматриваемых скоростях ветра (0 – 12 м/с).
- dT принимает отрицательные значения, когда температура воздуха достигает $+18$ °C. С ее дальнейшим ростом абсолютные значения dT также увеличиваются.
- Максимальные по модулю отрицательные dT имеют место при наиболее интенсивном прогреве, при температуре $+27$ °C и выше и скоростях ветра до 8 м/с.
- При температуре воздуха $\sim +20$ °C и выше dT становится отрицательной и начинает возрастать (по модулю). Максимальная отрицательная dT ($-0,26$ °C) достигается при наибольшем значении температуры воздуха $+29$ °C. Для температурного интервала от $+25$ °C до $+30$ °C абсолютная величина dT снижается при увеличении скорости ветра от 2 м/с и выше.



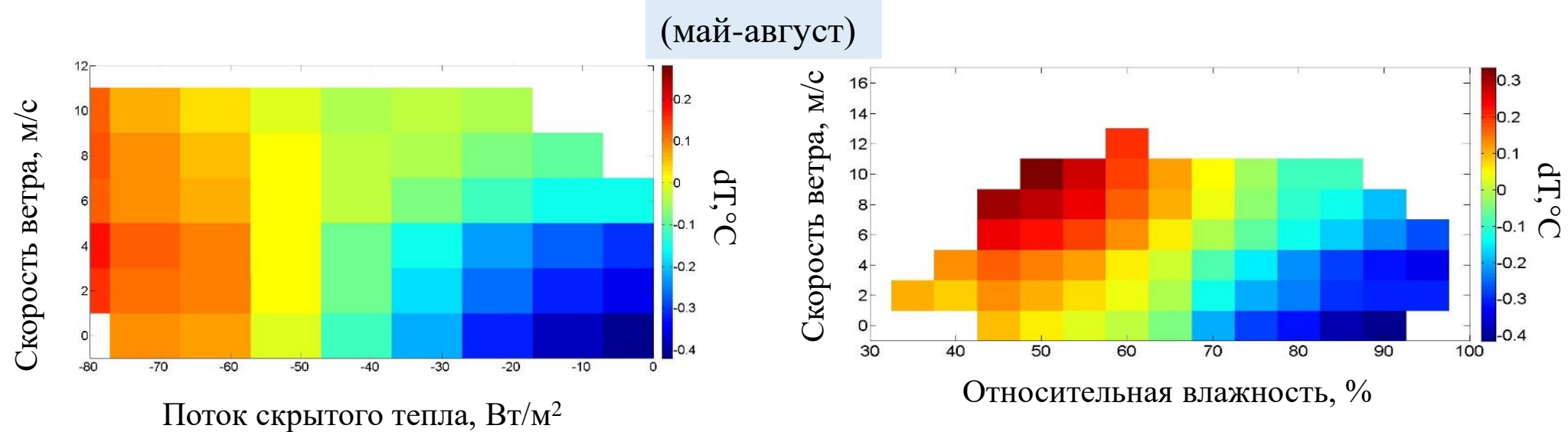
dT и разность температур воздуха и ТПМ

Выхолаживание/
Холодный
период года



- Максимальные положительные dT ($+0,4\text{ }^{\circ}\text{C} - +0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в случае, когда температура воздуха значительно ниже, чем ТПМ (на $6\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), при любых скоростях ветра.
- С уменьшением разницы температур до $2\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина dT уменьшается и стремится к своим минимальным по модулю значениям, при этом с увеличением скорости ветра dT увеличивается.
- Знак dT меняется для штилевых условий, когда разность между температурой воздуха и ТПМ минимальна ($(-1)\text{ }^{\circ}\text{C} - 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Максимальные отрицательные значения dT имеют место, когда температура воздуха становится выше ТПМ на $4\text{ }^{\circ}\text{C} - 8\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Наибольшие отрицательные величины dT ($-0,8\text{ }^{\circ}\text{C} - (-0,9)\text{ }^{\circ}\text{C}$) достигаются при разнице температур в $6\text{ }^{\circ}\text{C} - 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростях ветра от 2 м/с до 6 м/с . С увеличением скорости ветра для области отрицательных значений dT , ее абсолютная величина снижается.
- При увеличении разности температур воздуха и ТПМ, величина dT (и ее модуль) уменьшается. Когда температура воздуха становится выше ТПМ, dT меняет свой знак на «-», начинается плавное увеличение абсолютного значения dT .
- Максимальные отрицательные значения dT наблюдаются, когда разность температур достигает $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. График зависимость dT от скорости ветра при разности температур воздуха и ТПМ в диапазоне от $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ носит схожий характер с аналогичными графиками, рассматриваемыми для зависимости dT от потоков тепла и температуры воздуха.

Связь dT с потоком скрытого тела и относительной влажностью



- С увеличением (по модулю) величины потока скрытого тепла значение dT уменьшается (с учетом знака). При величинах потока скрытого тепла $\sim (-50)$ Вт/м² и ниже (по модулю) величина dT становится отрицательной, а ее абсолютные значения возрастают в диапазоне скоростей ветра от 0 до 10 м/с.
- Положительные значения dT принимает при низких скоростях ветра в интервале значений потока скрытого тепла (-80) Вт/м² – (-50) Вт/м². Максимальные по модулю отрицательные dT наблюдаются при минимальных величинах потоков скрытого тепла, т.е. при наименее интенсивном испарении.
- Такая зависимость связана с изменением **относительной влажности**. При больших значениях относительной влажности (70% – 90%), когда испарение минимально (величины потока скрытого тепла также минимальны) с увеличением скорости ветра абсолютная величина dT снижается.
- Максимальные отрицательные значения dT $(-0,3)^\circ\text{C}$ – $(-0,4)^\circ\text{C}$ имеют место при относительной влажности 85% - 90% и скоростях ветра до 4 м/с, когда процесс испарения наименее интенсивен. Водяной пар является одним из наиболее важных факторов атмосферной коррекции ИК-измерений.

Заключение

1. Полученные значения СКО, разницы средних значений, коэффициентов корреляции, коэффициентов регрессии показывают хорошее согласование сопоставляемых данных. По общим массивам для сравниваемым данным коэффициент корреляции для всех дрефтеров составляет 0,99, среднеквадратичное отклонение – 0,57 °С, коэффициент регрессии – ~1, разность средних значений – (-0.06) °С.
2. Когда полный поток тепла направлен из атмосферы в море, происходит прогрев приповерхностного слоя, значения температуры воздуха велики (от +18 °С и выше), при малых скоростях ветра (до 4 – 6 м/с) dT принимает максимальные по модулю отрицательные значения ((-0,8) °С - (-0,9) °С) – «холодная пленка». С увеличением скорости ветра происходит снижение абсолютных значений dT, связанное с разрушением скин-слоя.
3. Когда происходит остывание вод приповерхностного слоя (холодный период года), полный поток тепла направлен из моря в атмосферу, температура воздуха минимальна, dT принимает максимальные положительные значения, (+0,4 °С - +0,7 °С).
4. В теплый период года зависимость dT от времени суток следующая. Максимальные по модулю отрицательные значения dT (-0,15 °С – (-0,05 °С) при малых скоростях ветра приходятся на вторую половину суток, когда дневной прогрев достигает наибольшей интенсивности, и скин-слой наиболее развит. В утренние часы и при высоких значениях скорости ветра абсолютные значения dT минимальны – разрушение скин-слоя вследствие ночной конвекции и действием ветра.
5. Наибольшие отрицательные по модулю значения dT (при низкой скорости ветра) наблюдаются при минимальных значениях потоков скрытого тепла (~ (-50) Вт/м² и ниже), процесс испарения наименее интенсивен, а относительная влажность максимальна (85% - 90%).



Спасибо за внимание!



Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проектов № 19-35-90084 и № 20-35-70034

