



**Влияние различных
гидрометеорологических факторов на
амплитуду суточного хода
температуры по данным
дистанционного зондирования и
численного моделирования**

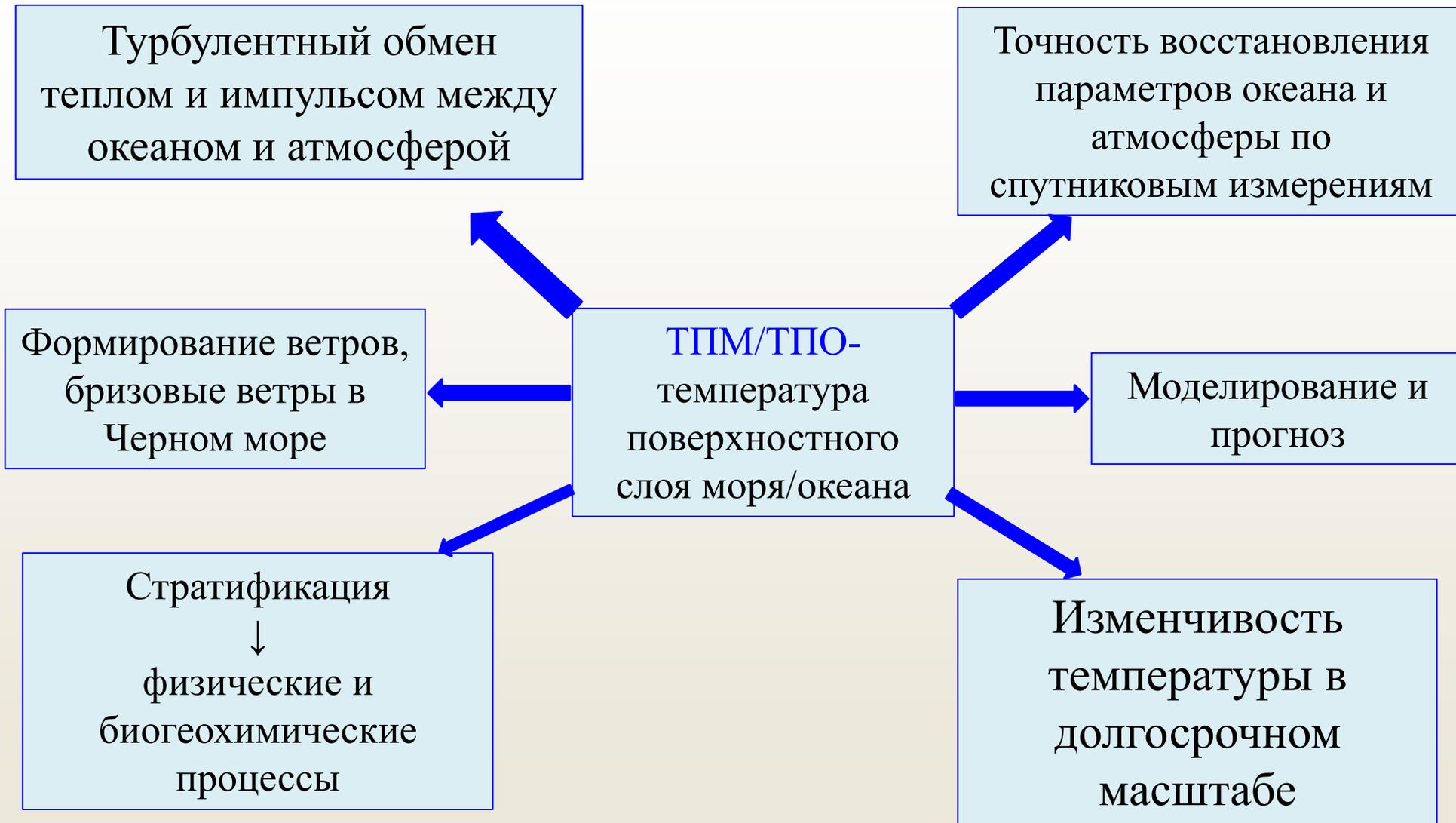
Рубакина В.А., Кубряков А.А., Кубряков А.И., Станичный С.В.



Г. Москва 14 – 18 ноября 2022 г.



Актуальность исследования

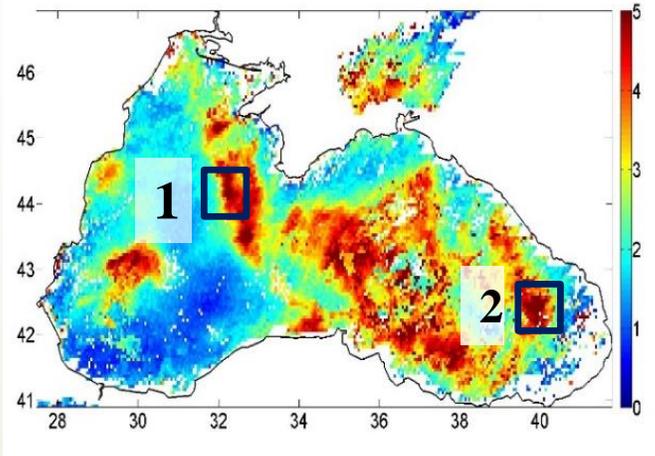


Данные реанализов Era-Interim и Era5

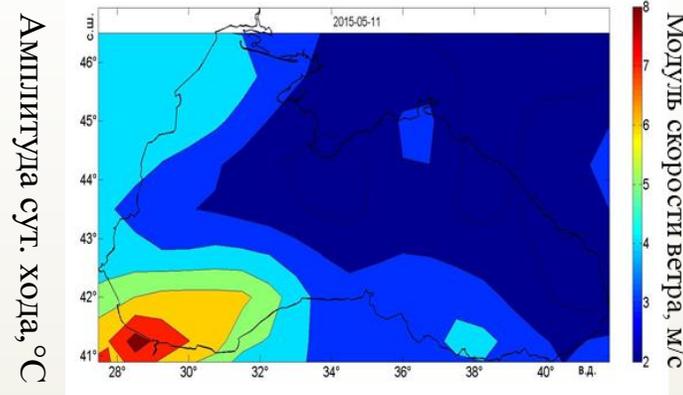
- ▶ Для анализа поля ветра использовались данные реанализа Era-Interim о **скорости ветра** на высоте 10 м с дискретностью 6 ч и пространственным разрешением $0,75^\circ$ [Dee et al., 2011], полученные из архива ECMWF <https://www.ecmwf.int/>. В работе [Garmashov et al., 2016] показано, что данные Era-Interim достаточно хорошо согласуются с контактными измерениями.
- ▶ Данные реанализа Era5 о **скорости ветра** на высоте 10 м , **температуре воздуха** на высоте 2 м, **потоках тепла**, с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и временным разрешением 1 час. Данные получены из архива <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Амплитуда суточного хода A . События значительного и экстремального дневного прогрева.

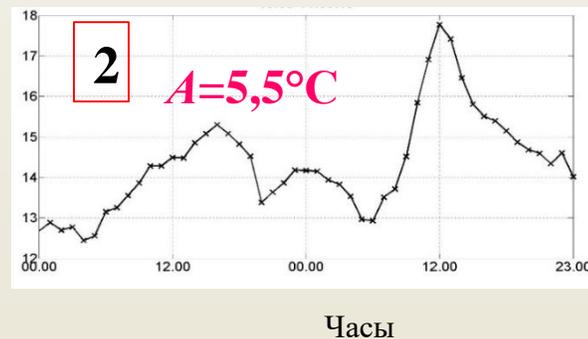
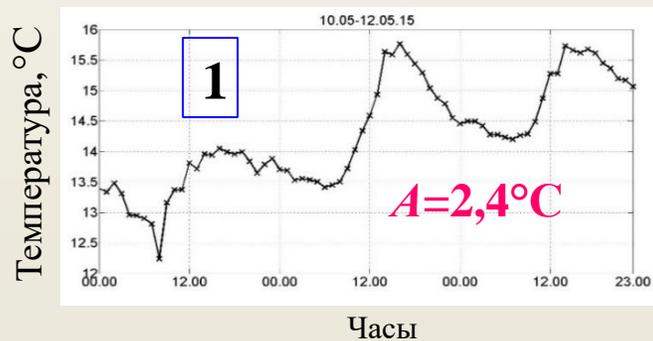
11 мая 2015 г. SEVIRI



Карта распределения амплитуды суточного хода ТПМ за 11.05.2015



Карта распределения среднего за 11.05.2015 модуля скорости ветра



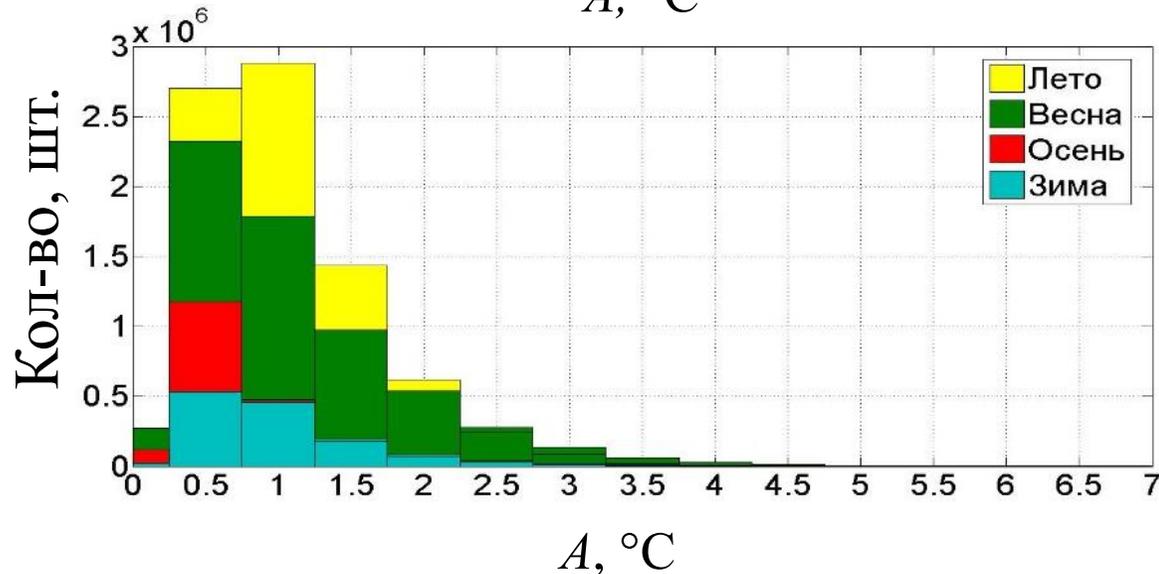
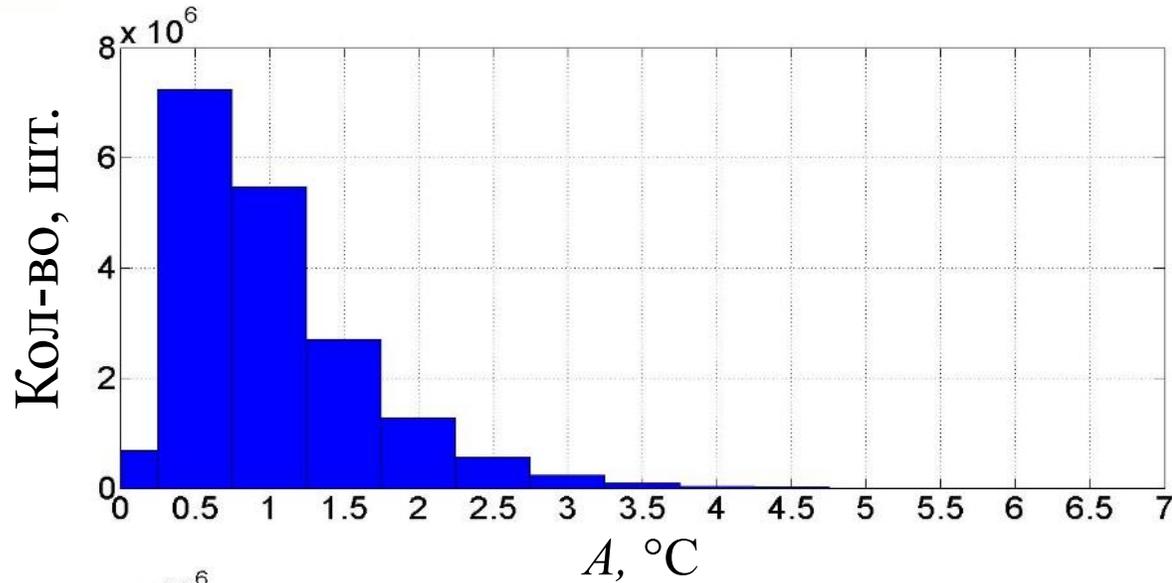
Графики изменения ТПМ для выбранных точек 1 и 2 Черного моря с 10.05.15 по 12.05.15.

Амплитуда суточного хода A — разность максимального и минимального значения температуры за сутки.

События значительного и экстремального дневного прогрева наблюдаются в условиях малооблачной погоды при низких скоростях ветра как в холодный так и в теплый период года.

Статистический анализ событий дневного прогрева

Данные за 2005-2016 гг. SEVIRI



Наиболее распространёнными являются события прогрева с A в интервале от $0,25^\circ\text{C}$ до $2,25^\circ\text{C}$. A в интервале $2,25^\circ\text{C} - 3,25^\circ\text{C}$ встречаются реже.

Количество A с величиной $3,25^\circ\text{C} - 4,75^\circ\text{C}$ исчисляется десятками тысяч значений.

Имеют место величины A равные $5-7^\circ\text{C}$ и более – наиболее редкие события значительного и экстремального дневного прогрева, их количество существенно меньше.

Картина распределения A в каждом из сезонов года имеет свои отличительные особенности:

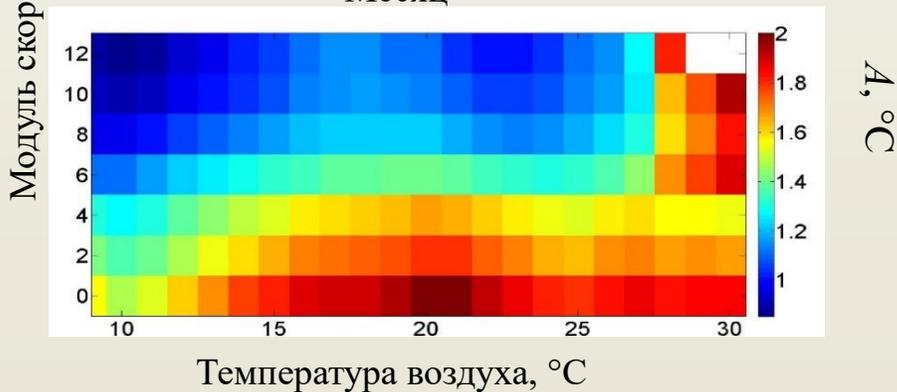
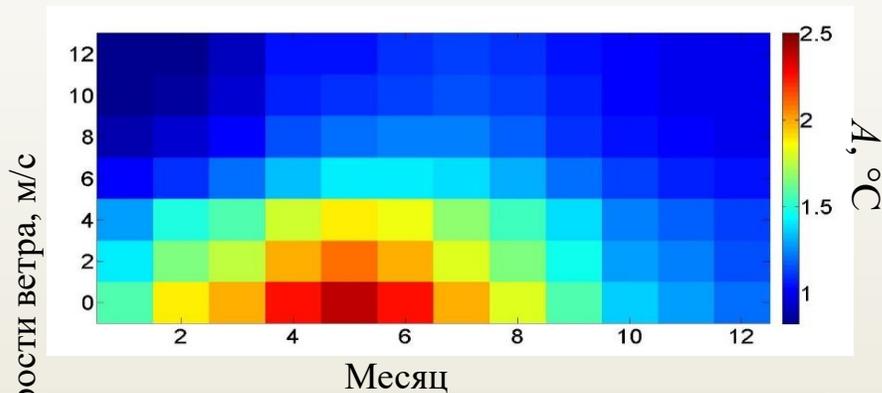
Больше всего событий прогрева, с A отличной от нуля, имеют место летом, с июля по сентябрь.

Наибольшее количество A со значениями $3,5^\circ\text{C}$ и более приходится на весну.

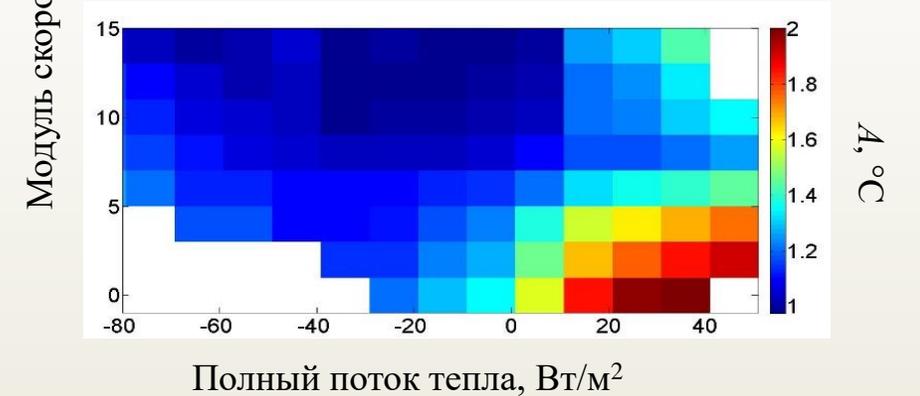
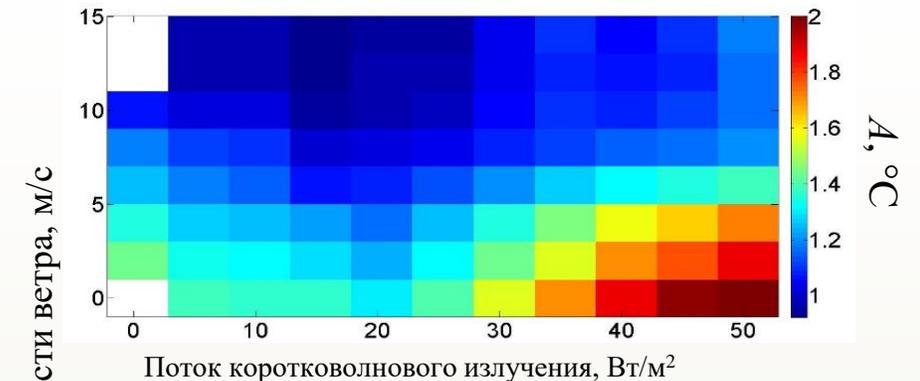
Зависимость A от различных гидрометеорологических факторов

Впервые проанализирована связь амплитуды суточного хода в Черном море с полем ветра, месяцем года, температурой воздуха, коротковолновым и полным потоком тепла.

Максимальные значения A наблюдаются при скоростях ветра до 2 – 4 м/с и значениях величины коротковолнового излучения от ~ 25 Вт/м². При скоростях ветра от 7 м/с и величинах коротковолнового излучения до 25 – 35 Вт/м², величины A не превышают $\sim 1,2$ °С. Минимальные значения A приходятся на максимальные значения скорости ветра.



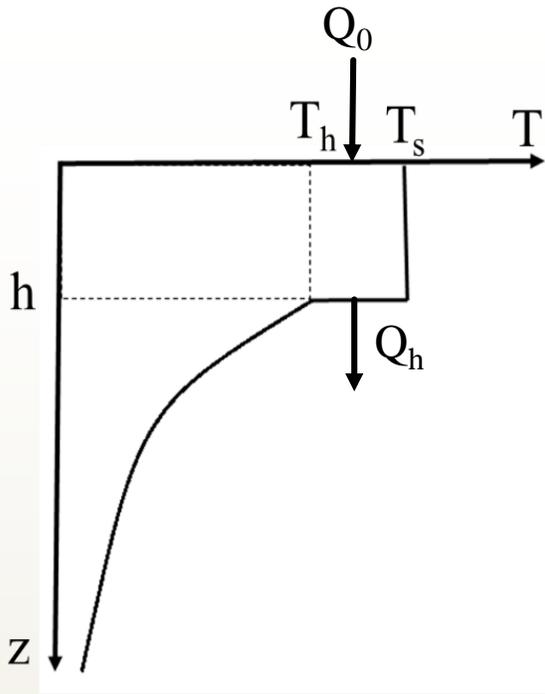
Диаграммы зависимости A от скорости ветра и различных факторов



Максимальные A наблюдаются при низких скоростях ветра в теплый период года (май-сентябрь), когда температура воздуха начинает превышать ~ 14 °С с максимумом в мае, когда суммарный поток тепла направлен в океан (положительный – в период прогрева).

В холодный период года, когда полный поток тепла направлен из океана в атмосферу, при температурах воздуха до $\sim +10$ °С и при высоких скоростях ветра A принимает минимальные значения.

Одномерная интегральная модель ВКС



$$\left\{ \begin{array}{l} h \frac{dT_s}{dt} = Q_0 - Q_h \quad (1) \\ G - D = \frac{g\alpha h}{2} (Q_0 + Q_h) \quad (2) \\ Q_h = \frac{dh}{dt} (T_s - T_h) \chi \quad (3) \\ \chi = \begin{cases} 0, \frac{dh}{dt} < 0 & (4a) \\ 1, \frac{dh}{dt} > 0 & (4b) \end{cases} \quad (4) \\ \frac{\partial T}{\partial t} = 0, z > h \quad (5) \end{array} \right.$$

D – диссипация турбулентной энергии;
 g – ускорение свободного падения;
 α – коэффициент термического расширения;
 χ – функция Хевисайда;
 $g\alpha = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot \text{°C})$.

Задача: описать суточный ход толщины ВКС, обусловленный суточным ходом потока тепла на поверхности моря, т.е. найти $h=h(t)$ и $T_s=T_s(t)$.

Параметризация: $G - D = m v_*^3$; $m \approx 1,4$; v_* – динамическая скорость.

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_s}} = \left(c_\alpha \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^{0,5} U_a;$$

c_α – коэффициент трения;

U_a – скорость ветра;

ρ_a – плотность атмосферы;

ρ_s – плотность воды.

Начальные условия:

$$t = t_0 \Rightarrow h = h_0; T_s = T_s^0; T_h = T_h^0 = T_s^0 - 1 \quad (6)$$

t – время;

h – толщина ВКС;

T_s – температура ВКС;

T_h – температура при $z=h+0$;

Q_0 – поток тепла на поверхности моря;

Q_h – поток тепла на нижней границе ВКС;

G – генерация турбулентной энергии;

Два режима:

Деградация ВКС: $\frac{dh}{dt} < 0$,

$$\begin{cases} h \frac{dT_s}{dt} = Q_0 \\ G - D = \frac{g\alpha h}{2} Q_0 \\ Q_h = 0 \end{cases}$$

Вовлечение вод в ВКС: $\frac{dh}{dt} > 0$,

$$\begin{cases} h \frac{dT_s}{dt} = Q_0 - Q_h \\ G - D = \frac{g\alpha h}{2} (Q_0 + Q_h) \\ Q_h = \frac{dh}{dt} (T_s - T_h) \end{cases}$$

*Пример расчетов
при различных
 Q_{\max} и скорости
ветра 3 м/с*

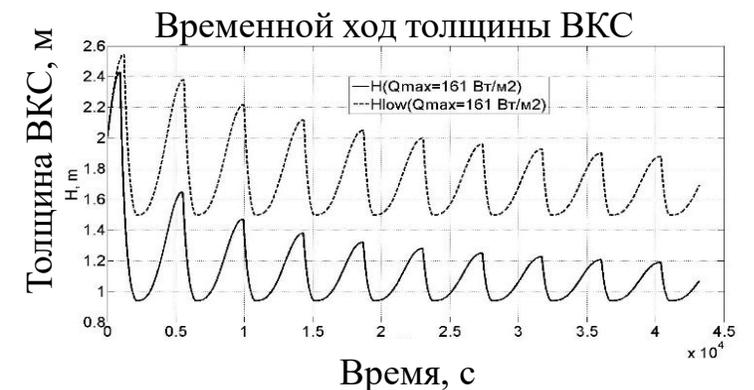
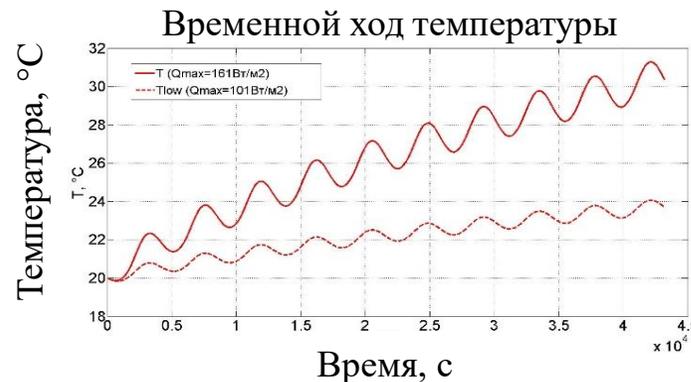
Решение:

При $\frac{dh}{dt} < 0$ (деградация ВКС):

$$\begin{cases} h(t) = \frac{K}{Q_0(t)}, \text{ где } K = \frac{2(G - D)}{g\alpha} \\ T_s(t) = \frac{1}{K} \int_{t_0}^t Q_0^2(t) dt + T_s^0 \end{cases}$$

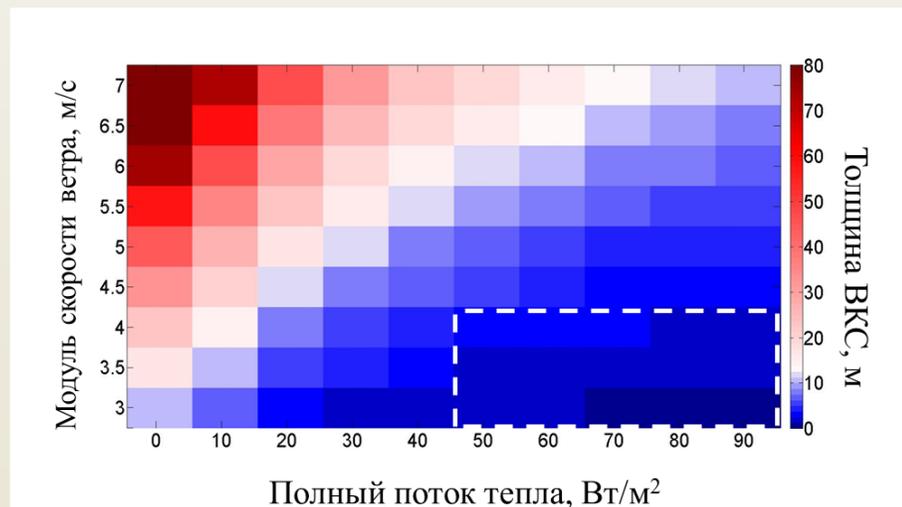
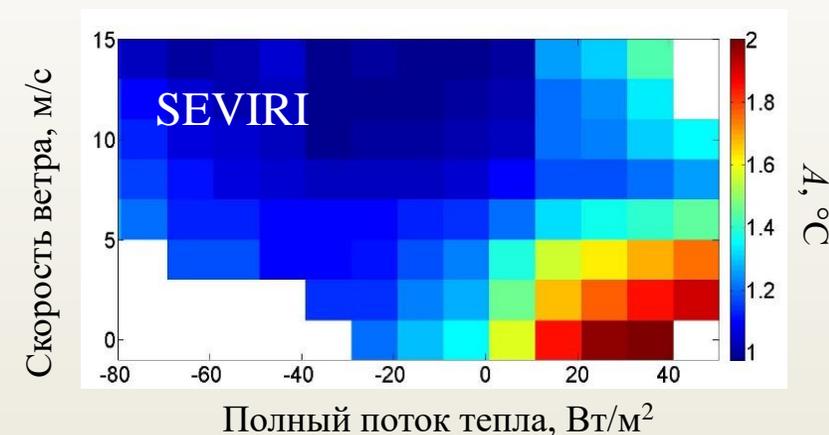
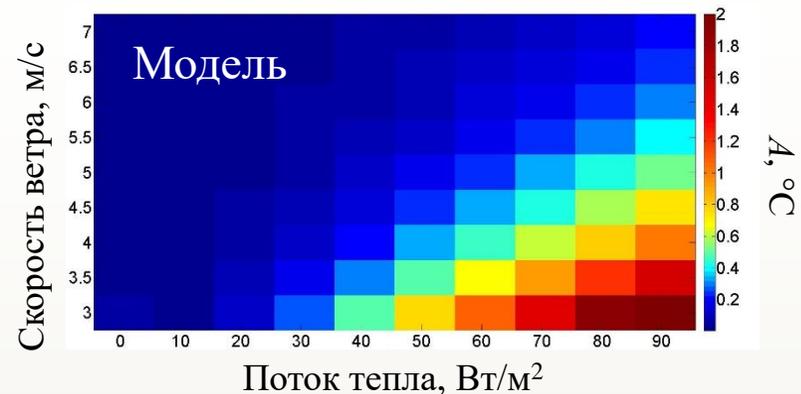
При $\frac{dh}{dt} > 0$ (вовлечение воды в ВКС):

$$\begin{cases} h(t) = \frac{K(t-t_0) + h_0^2(T_s^0 - T_h)}{\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h)} \\ T_s(t) = \frac{\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h)}{K(t-t_0) + h_0^2(T_s^0 - T_h)} \left[\int_{t_0}^t Q_0(t) dt + h_0(T_s^0 - T_h) \right] + T_h \end{cases}$$



Влияние ветра и потоков тепла на амплитуду суточного хода по данным интегральной модели

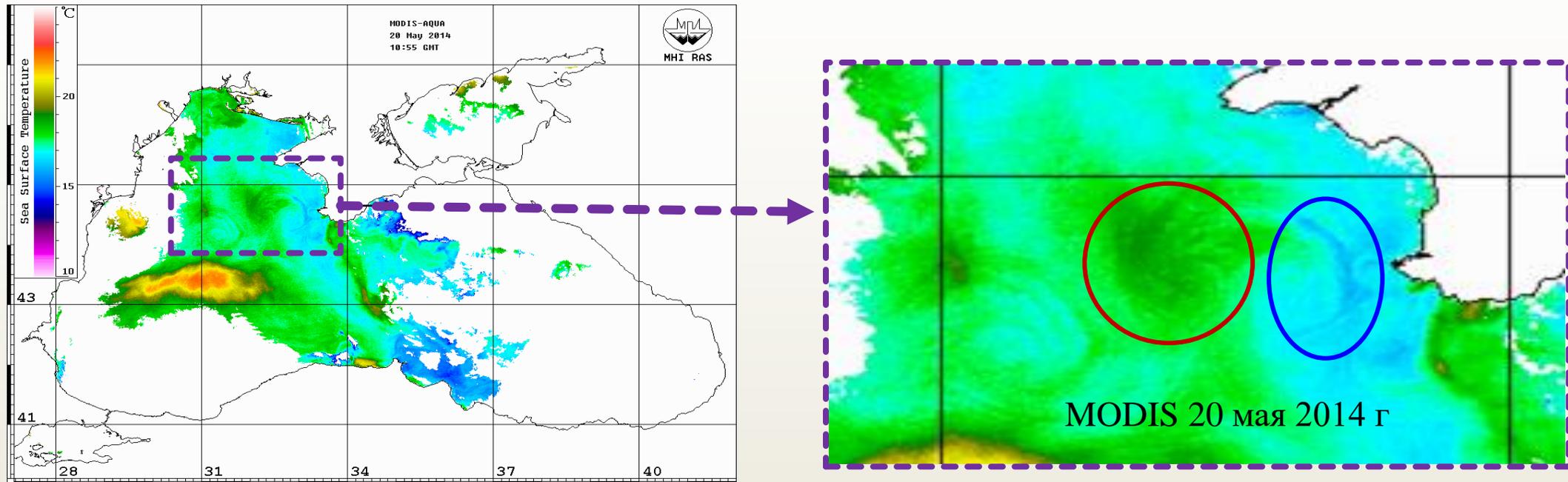
- Модель достаточно точно воспроизводит суточный ход температуры и при определенных параметрах потока тепла и скорости ветра могут быть получены амплитуды суточного хода для событий экстремального дневного прогрева.
- При минимальных скоростях ветра (3-4 м/с) и максимальных значениях потока тепла A достигает наибольших значений.
- С увеличением скорости ветра и уменьшением потока тепла A также уменьшается, при скоростях ветра от 6 – 7 м/с величина A не превышает 0,2 – 0,4°C.
- Настоящие результаты хорошо согласуются с результатами, полученными по данным SEVIRI.



Наименьшая толщина ВКС имеет место при минимальных скоростях ветра и максимальных значениях потока тепла (0,7 – 1,7 м).

Влияние вертикальной адвекции на амплитуду суточного хода температуры

Мелкомасштабные структуры в зонах прогрева



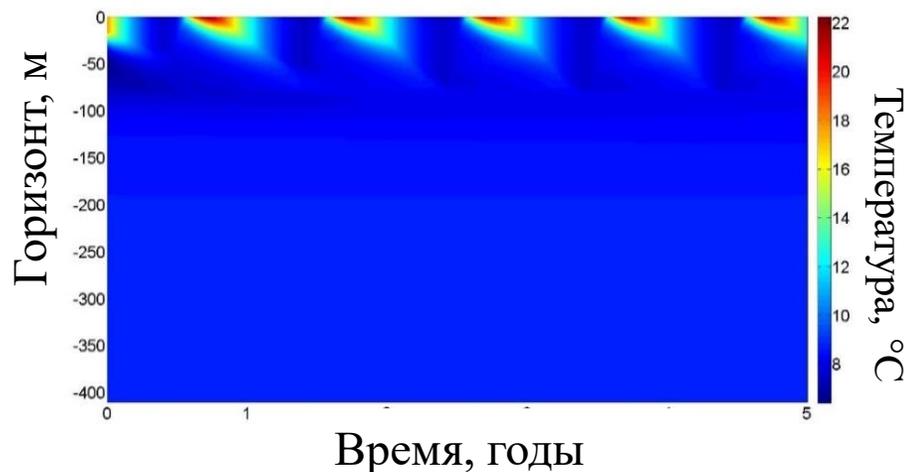
Мелкомасштабная структура проявления дневного прогрева по данным MODIS за 20 мая 2014 г.

Наибольшие значения прогрева наблюдаются в циклонической части грибовидной структуры, где вертикальная скорость направлена вверх (положительна), наименьшие значения температуры имеют место в антициклонической части этой структуры, где вертикальная скорость отрицательна

Оценка влияния вертикальной скорости по данным одномерной гидродинамической модели РОМ *[Кубрякова, Коротаев, 2017]

- Используется нерегулярная по вертикали сетка: $\Delta z = 0,05$ м от 0 до 5 м; $\Delta z = 0,2$ м от 5 до 10 м; $\Delta z = 1$ м от 10 до 30 м; $\Delta z = 2$ м от 30 до 50 м; $\Delta z = 5$ м от 50 до 110 м; $\Delta z = 20$ м от 110 до 410 м. Применяемая конечно-разностная схема обладает вторым порядком точности по времени и по пространству.
- Сезонная изменчивость атмосферных параметров задавалась по климатическим данным реанализа ERA-40. Поля атмосферных параметров были осреднены за 1971–2001 гг. по акватории центральной части бассейна.
- В качестве массива коротковолнового излучения был использован массив реанализа Era5 с временной дискретностью 1 час за 2009 год в центральной точке бассейна Черного моря с координатами 34° в.д., 43° с.ш.

Временная изменчивость температуры по боксовой модели Черного моря (центр)

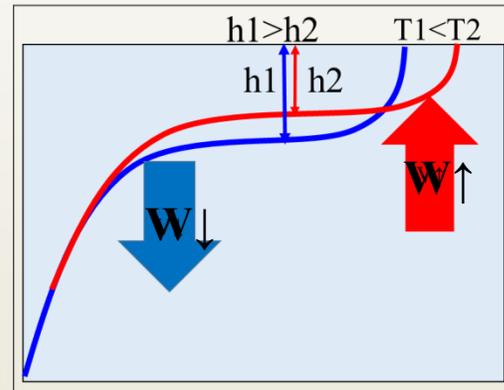
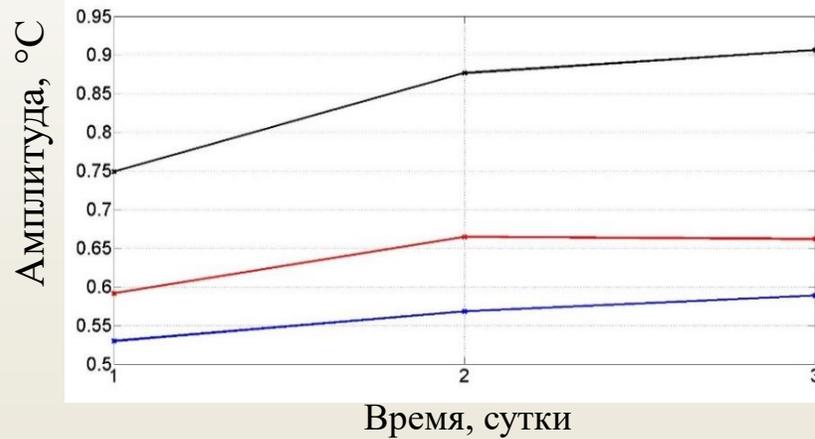
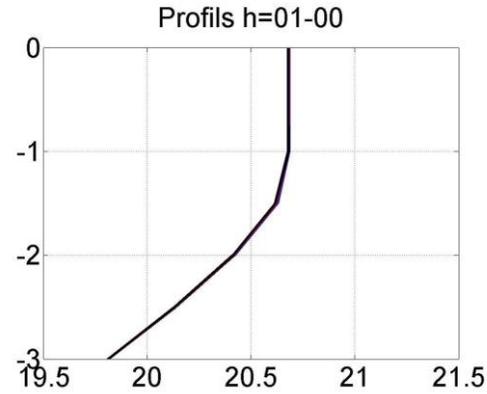
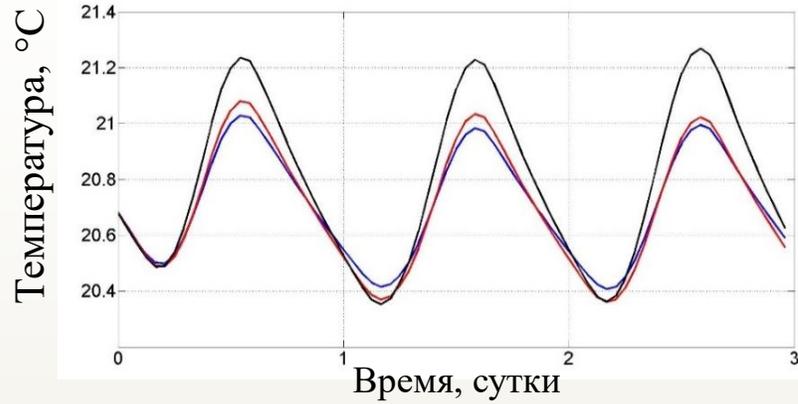


Исходные параметры расчета: постоянная вертикальная скорость равная нулю, заданные величины компонент напряжения трения τ ветра по x и y . Точка для рестарта расчета модели – 25 июня, после рестарта расчет выполнен для трех дней.

Эксперимент: при начальной неизменной очень малой скорости ветра (<1 м/с) вертикальную скорость принимали равной -10^{-5} , 0 , 10^{-5} м/с во всем слое 0 – 410 м. Знак «+» при величине вертикальной скорости – поднятие вод, знак «-» - смена направления вертикальной скорости на противоположное, т.е. – опускание вод.

Связь дневного прогрева с вертикальной скоростью на основе результатов расчета одномерной модели РОМ* *[Кубрякова, Коротаев, 2017]

13



Амплитуда суточного хода температуры при положительной вертикальной скорости ~ в 2 раза превышала амплитуду при отрицательной скорости.

Подъем скачка плотности приводит к тому, что при одинаковой скорости ветра толщина ВКС уменьшается из-за увеличения диссипации турбулентности, амплитуда суточного хода A увеличивается.



$$\frac{\partial h}{\partial t} = W; h = h_0 + \int W dt$$

$$\Delta T \sim \frac{Q}{h} \sim \frac{Q}{h_0 + \int W dt};$$

Выводы

В работе выполнено исследование влияния различных гидрометеорологических факторов на амплитуду суточного хода A по данным дистанционного зондирования и численного моделирования. Получены следующие результаты:

1. Проведенный статистически анализ величин A показал, что наиболее распространёнными являются событиями прогрева с A в интервале от $0,25^{\circ}\text{C}$ до $2,25^{\circ}\text{C}$. Имеют место величины A равные $5-7^{\circ}\text{C}$ и более – наиболее редкие события значительного и экстремального дневного прогрева, их количество существенно меньше. Распределения A в каждом из сезонов года имеет свои отличительные особенности, больше всего событий прогрева, с A отличной от нуля, имеют место летом, с июля по сентябрь. Наибольшее количество A со значениями $3,5^{\circ}\text{C}$ и более приходится на весну.
2. По данным SEVIRI наибольшие величины A имеют место в условиях малых скоростей ветра (до $5 - 6$ м/с, при максимальных значениях потоков коротковолновой радиации, в период прогрева, когда полный поток тепла направлен в море, т.е. в весенне-летний период при температурах воздуха от $+14^{\circ}\text{C}$.
3. Результаты расчета интегральной модели ВКС хорошо согласуются со спутниковыми данными. Модель достаточно точно воспроизводит суточный ход температуры и при определенных параметрах потока тепла и скорости ветра могут быть получены амплитуды суточного хода для событий экстремального дневного прогрева.
4. A при положительной вертикальной скорости \sim в 2 раза превышала A при отрицательной скорости. При положительной вертикальной скорости происходит подъем термоклина к поверхности, стратификация обостряется, соответственно, турбулентный поток тепла в глубину ослабевает, в результате поверхностный слой нагревается более интенсивно. Когда вертикальная скорость направлена от поверхности происходит опускание термоклина, соответственно, объем прогреваемых вод увеличивается, стратификация ослабевает, суточный прогрев не столь интенсивен.



Спасибо за внимание!