



Параметризация охлаждения океана под тропическим циклоном

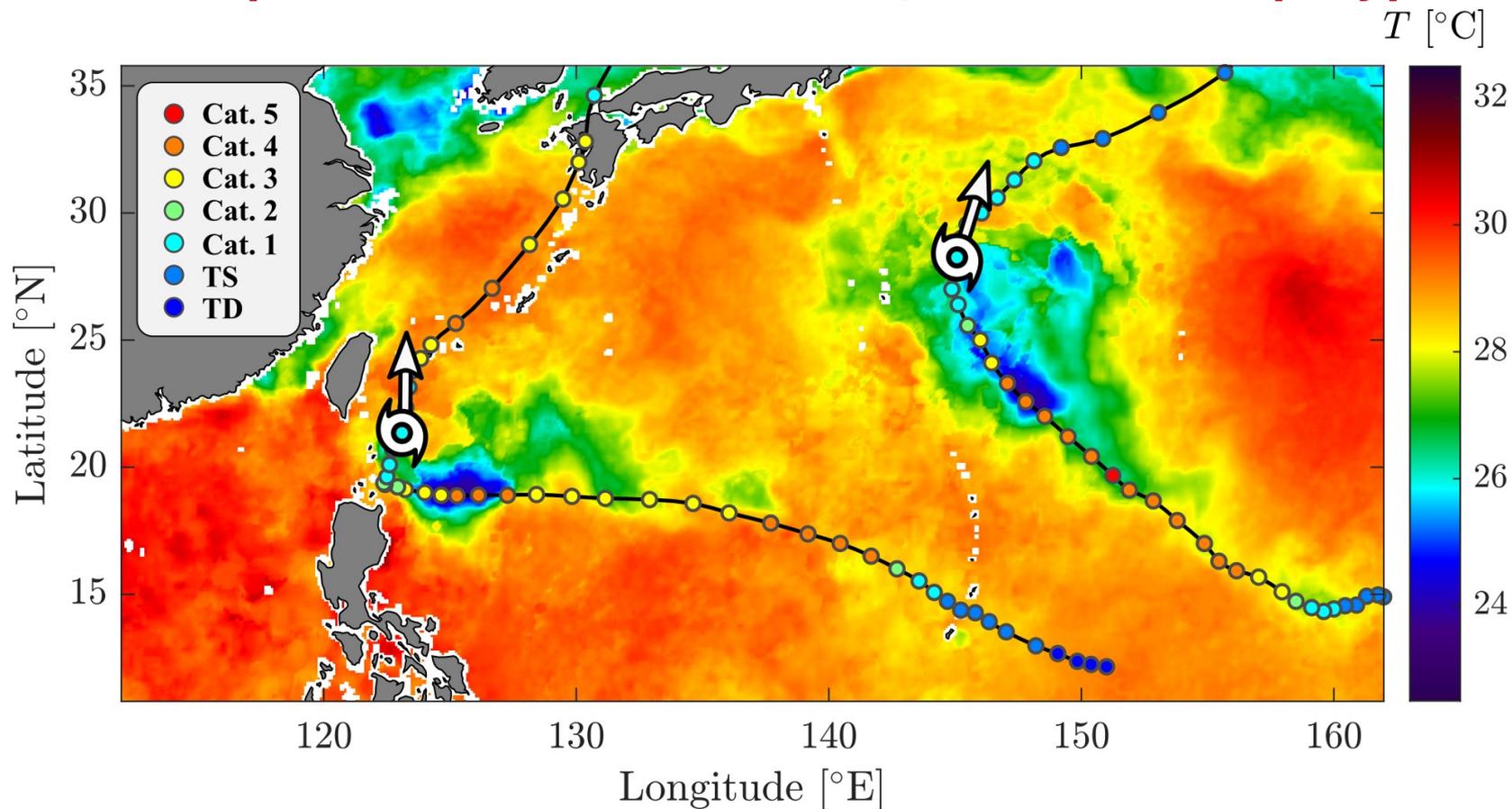
Павел Пиваев^{1,2}, Владимир Кудрявцев^{1,2}

¹МГИ, Севастополь, Россия

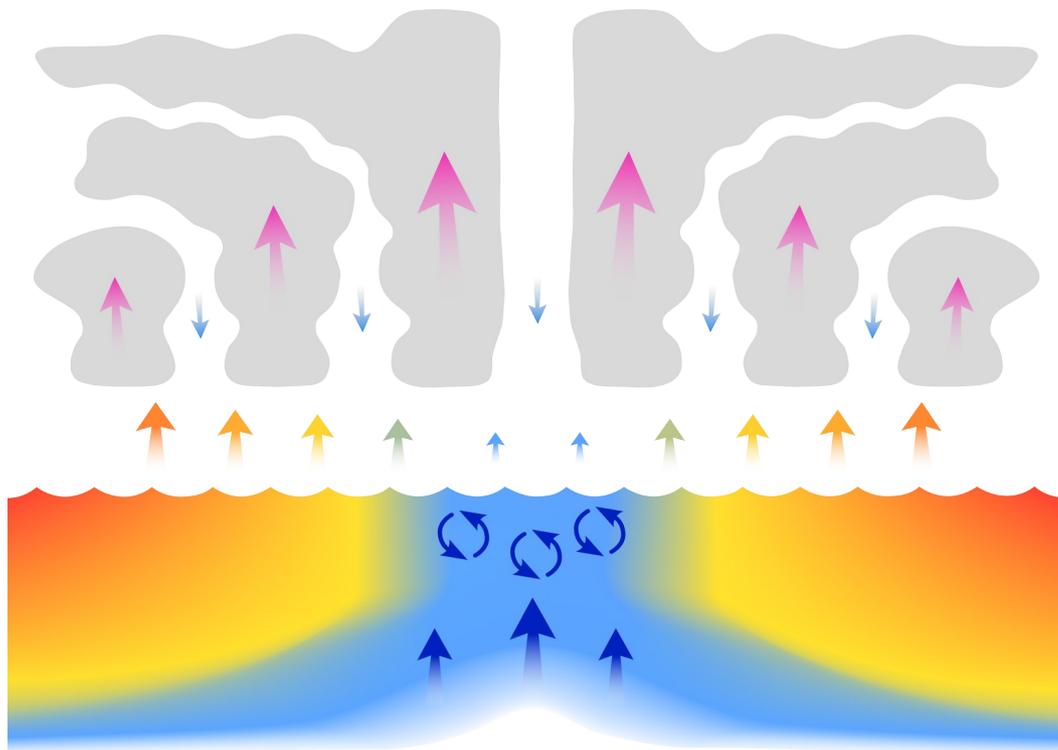
²РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия

Введение:

Проявление тропических циклонов (ТЦ) в поле температуры



Введение: Влияние океана на ТЦ



Bister and Emanuel (1998):

$$U_m^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s - T_o}{T_o} (k_s - k_a)$$

максимальная
скорость ветра

зависит от ТПО (SST)

Падение ТПО на **несколько градусов** способно подавить поток энтальпии (скрытого тепла) [Emanuel1998].

Охлаждение поверхности способствует **ослаблению** ТЦ.

Описание охлаждения поверхности **критически важно** для прогнозирования интенсивности ТЦ [Emanuel, 1999, Bender2000].

Введение:

Упрощённые модели охлаждения поверхности океана

| | Аномалия ТПО | Толщина ПС |
|-------------------------|--|--|
| Валидированные | [1] Vincent et al. (2012b) [2] Wei et al. (2018) [3] Liu et al. (2019) [4] Kudryavtsev et al. (2019a) [5] Kudryavtsev et al. (2019b) [6] Oey (2023) | [7] Price (2009) |
| Невалидированные | — | [8] Mei and Pasquero (2013) [9] Balaguru et al. (2015) [10] Miyamoto et al. (2017) |

Обзор показывает, что эти модели:

- 1) проверялись на **ограниченном** наборе ТЦ в одном районе Мирового океана [1, 2, 3, 5, 6] или вовсе не проверялись [8, 9, 10].
- 2) имеют **ограничения**, связанные с применимостью к «быстрым» ТЦ [4, 7, 8, 9, 10].
- 3) **не учитывают** влияние апвеллинга на охлаждение поверхности океана [1, 6].

Введение

Цель:

Построение параметрического описания охлаждения поверхности океана под влиянием движущихся ТЦ, основанного на закономерностях формирования толщины перемешанного слоя в широком диапазоне условий окружающей среды.

Задачи:

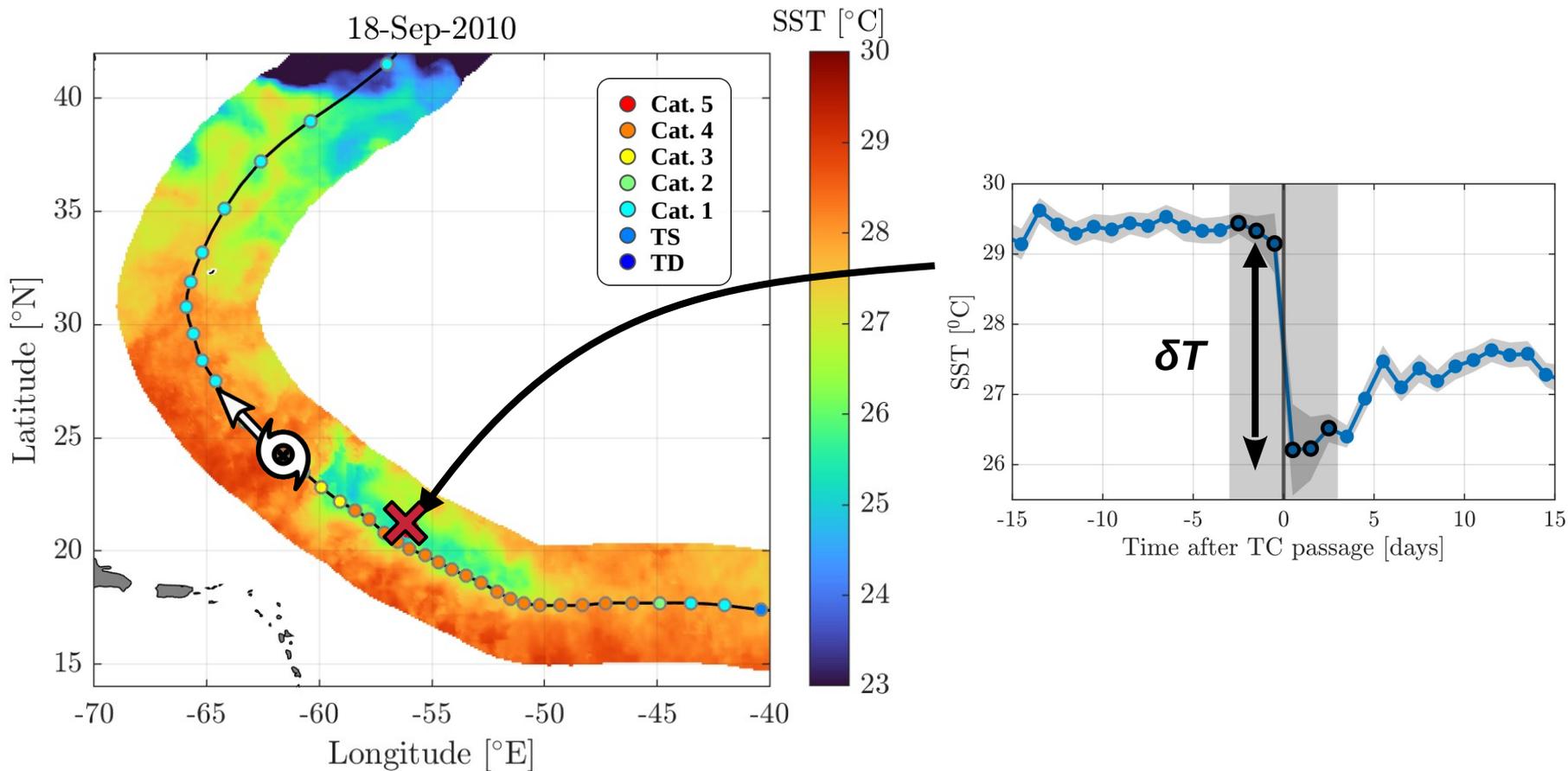
1. Создать базу данных аномалий температуры поверхности океана (ТПО) и толщины перемешанного слоя (ПС), сформированных прохождением ТЦ.
2. Исследовать толщину ПС на наличие предполагаемых связей и закономерностей и построить параметризацию толщины ПС.
3. Провести сравнение работоспособности построенной параметризации с упрощёнными моделями из других работ.

1. Материалы и методы:

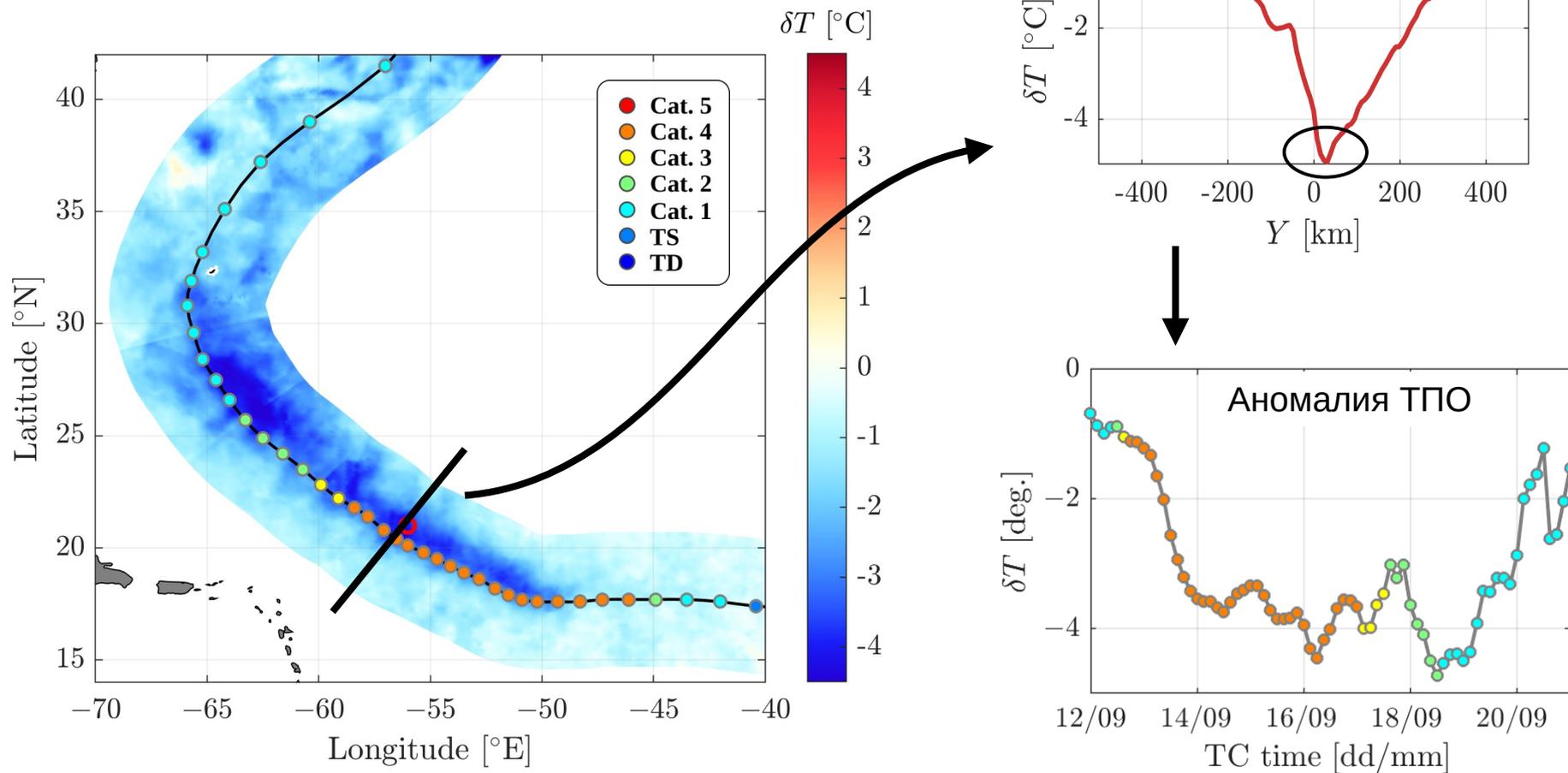
Исходные данные

| База данных | Разрешение |
|--|---|
| IBTrACKS – параметры ТЦ и их положение | dt = 3 часа |
| REMSS OISST – спутниковая температура поверхности океана (SST) | dt = 1 день dx,dy = 0.09° |
| ISAS20 – данные Argo на регулярной сетке (профили $T(z)$ и $S(z)$ и плотности по TEOS-10) | dt = 1 месяц dx,dy = 0.5°, dz: 187 z-уровней от 1 to 5500 м |

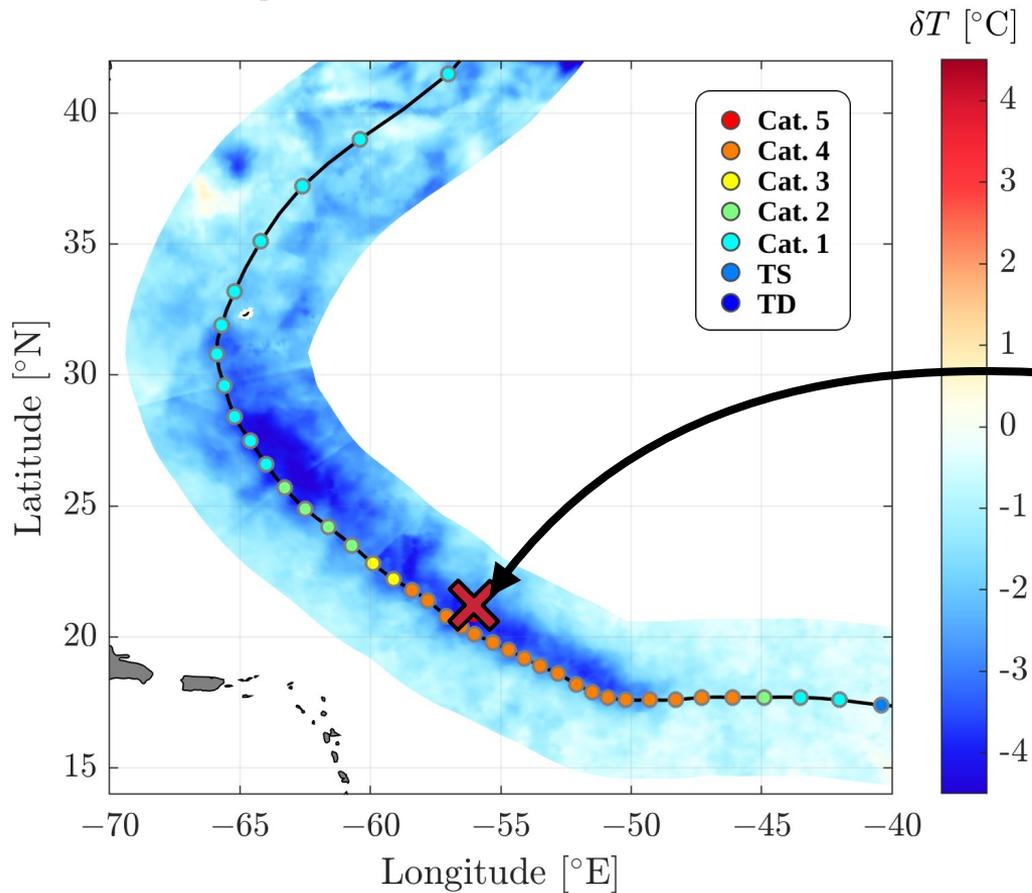
1. Материалы и методы: Оценка аномалии ТПО



1. Материалы и методы: Оценка аномалии ТПО



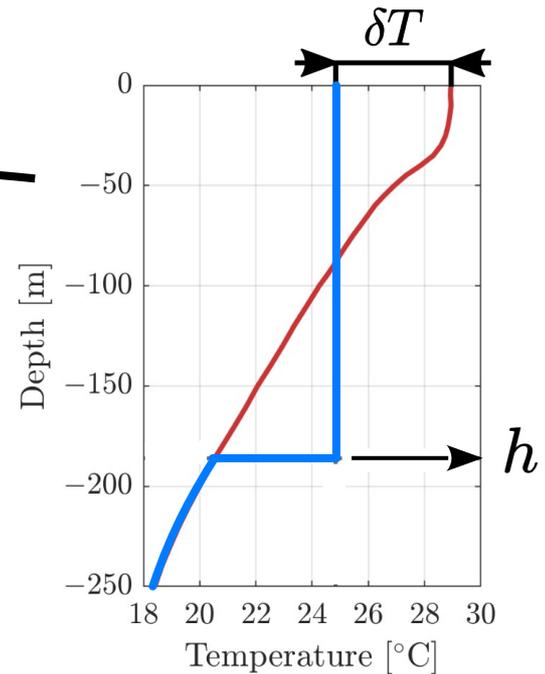
1. Материалы и методы: Оценка толщины ПС



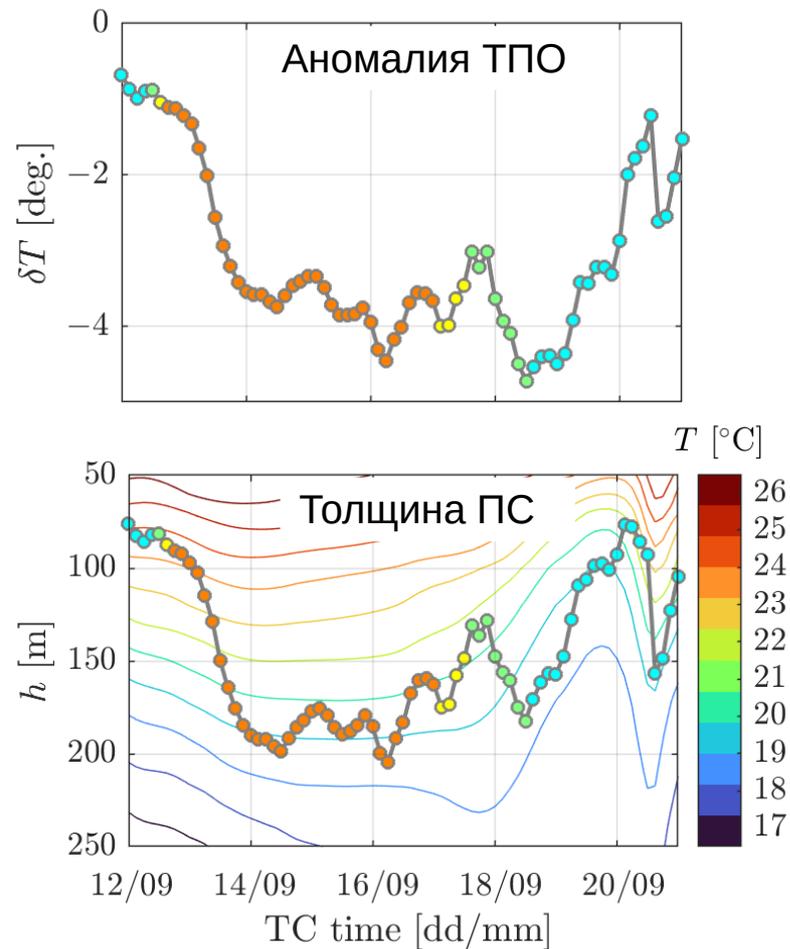
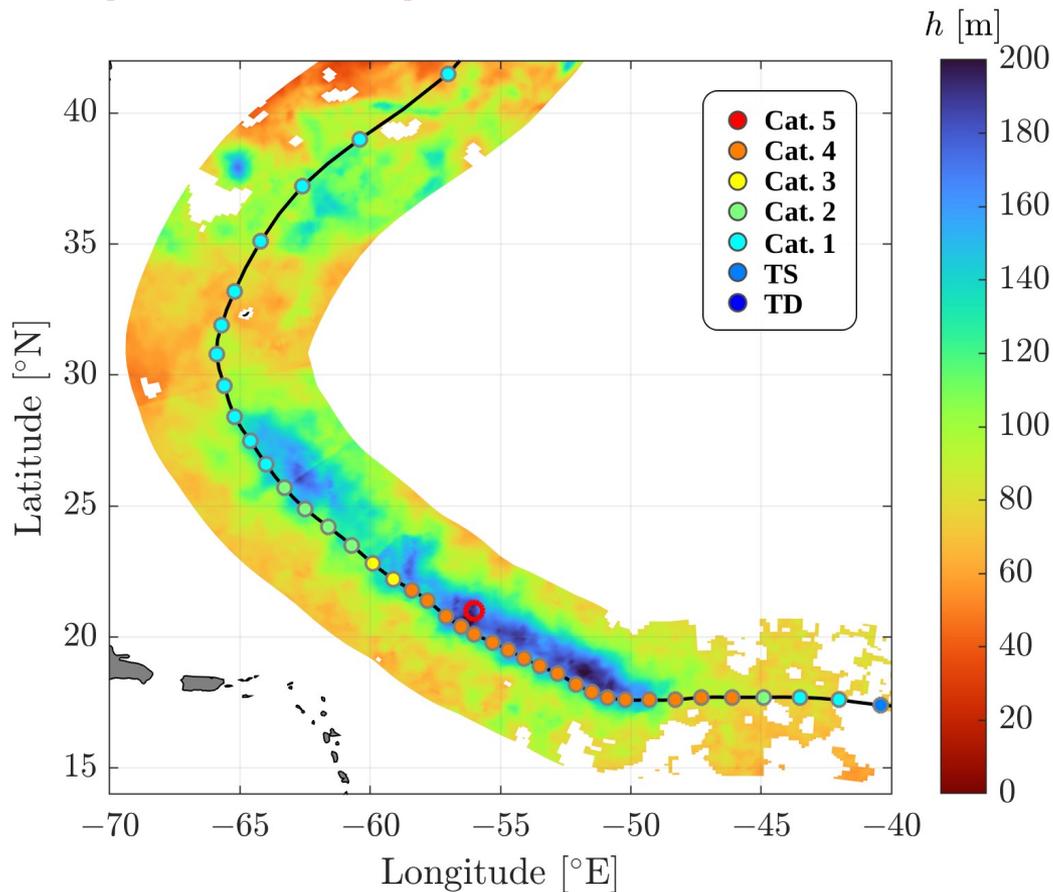
REMSS
OISST

ISAS

$$\delta T = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 T(z) dz - T(0)$$

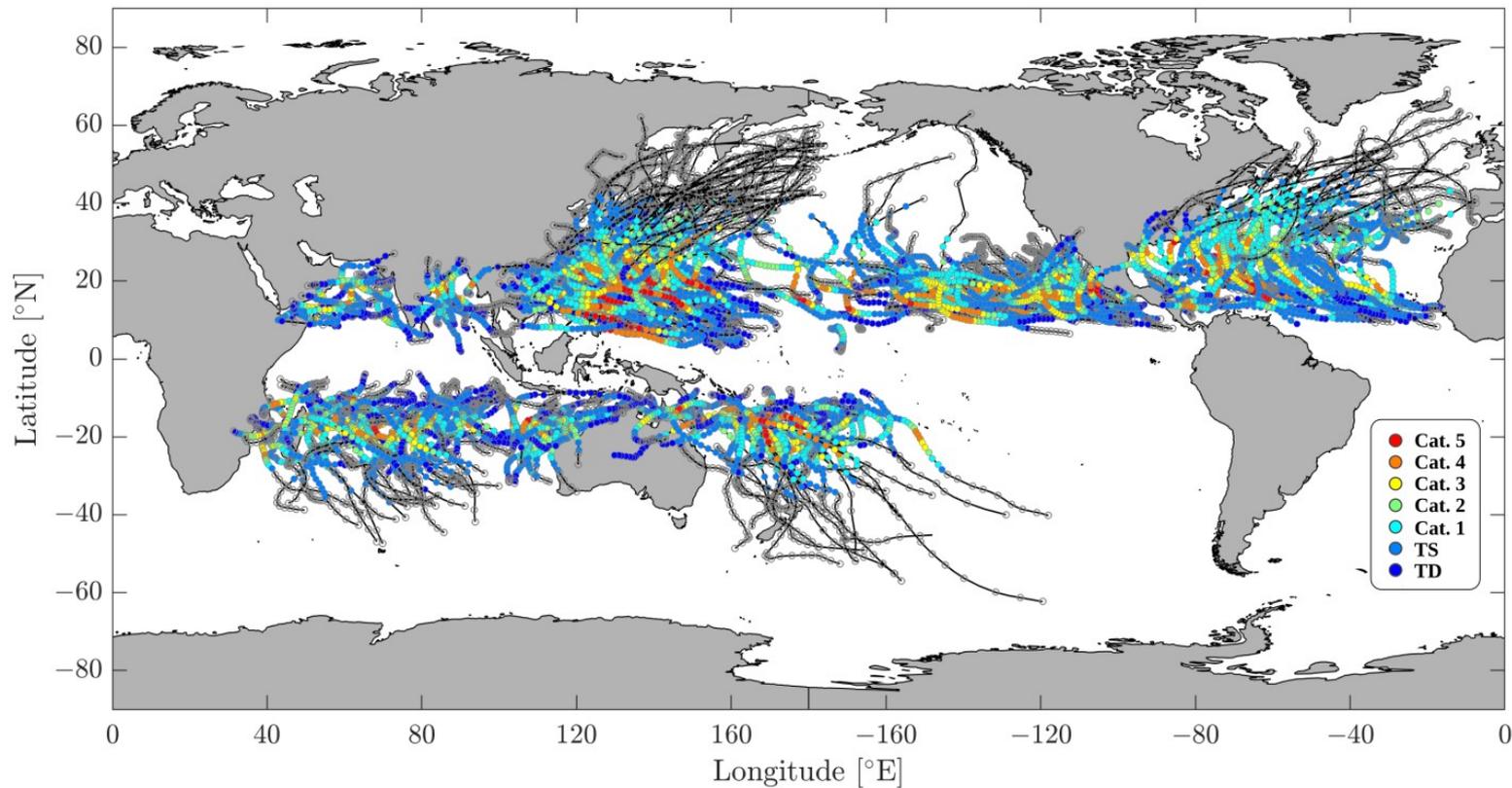


1. Материалы и методы: Оценка толщины ПС



1. Материалы и методы: Оценка толщины ПС

Все ТЦ категории 1 и выше за 2010 – 2020 гг.



2. Параметризация толщины ПС: Масштабирование толщины ПС

Из соображений размерности масштаб ПС:

$$h \longrightarrow \frac{|\mathbf{M}|^{2/3}}{\Delta b^{1/3}} \propto \frac{|\mathbf{u}_m|^2}{\Delta b}.$$

Если предположить, что толщина, делённая на масштаб ПС, есть величина постоянная, то мы получаем гипотезу о постоянстве глобального Ri [Pollard et al. 1973]:

$$\frac{hN_{\text{eff}}^{1/2}}{M^{1/2}} = \text{const}$$

Измерений потока массы M нет.

$$\Delta b = \frac{g}{\rho_0} \left[\rho(-h) - \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz \right]$$

альтернативная запись:

$$\Delta b = \frac{1}{2} h N_{\text{eff}}^2$$

$$N_{\text{eff}}^2 = -\frac{2}{h^2} \int_{-h}^0 z N^2(z) dz$$

2. Параметризация толщины ПС: Масштабирование потока массы

$$\mathbf{M} = \int_{-h}^0 \mathbf{u} dz$$

Линейное уравнение для потока массы
с учётом радиационного затухания [Bell, 1978]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} + f \mathbf{k} \times \mathbf{M} = \boldsymbol{\tau} - \varepsilon \bar{N} \mathbf{M}$$



$$\frac{\partial \hat{M}}{\partial \hat{x}} + (i\hat{V}^{-1} + \hat{D})\hat{M} = \hat{\tau}$$

безразмерные переменные:

$$\hat{x} = x/R_m, \hat{y} = y/R_m$$

$$\hat{M} = Mf/u_*^2, \hat{\tau} = \tau/u_*^2$$

комплексная запись:

$$M = M_x + iM_y,$$

$$\tau = \tau_x + i\tau_y$$

Решение автомодельно*:

$$\hat{M}(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{V}^{-1} \int_{-\infty}^{\hat{x}} d\hat{x}' \hat{\tau}(\hat{x}', \hat{y}) \exp \left[- (i\hat{V}^{-1} + \hat{D})(\hat{x} - \hat{x}') \right]$$

*Если поле ветра зависит только от
введённых безразмерных координат

2. Параметризация толщины ПС: Масштабирование потока массы

Профиль ветра в ТЦ:
$$\frac{U(r)}{U_m} = \frac{2(r/R_m)}{1 + (r/R_m)^2}$$

Параметризация численного решения:

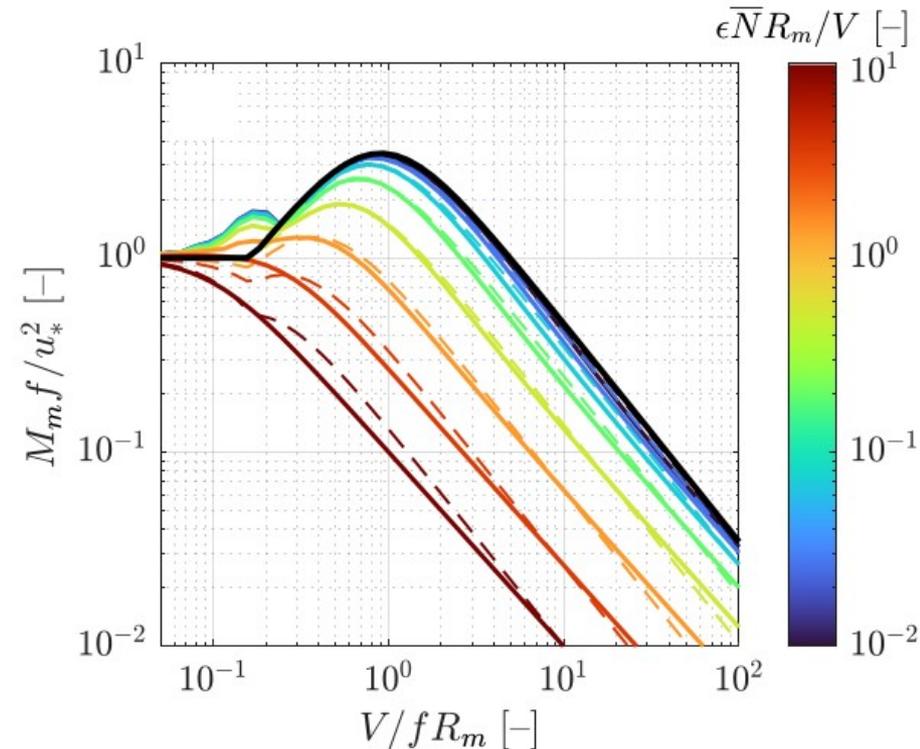
$$\frac{M_m f}{u_*^2} = \Phi\left(\frac{V}{fR_m}, \frac{\varepsilon \bar{N} R_m}{V}\right) \quad \Phi(\hat{V}, \hat{D}) = \frac{\Phi_0(\hat{V})}{1 + c\varphi(\hat{V})\hat{D}}$$

$$\hat{V} = V/fR_m$$

безразмерная
скорость ТЦ [Price 1981]

$$\hat{D} = \varepsilon \bar{N} R_m / V$$

безразмерный параметр
затухания потока массы



2. Параметризация толщины ПС: Масштабирование толщины ПС

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = \Phi^{1/2} \left(\frac{V}{fR_m}, \epsilon \frac{\bar{N}R_m}{V} \right)$$

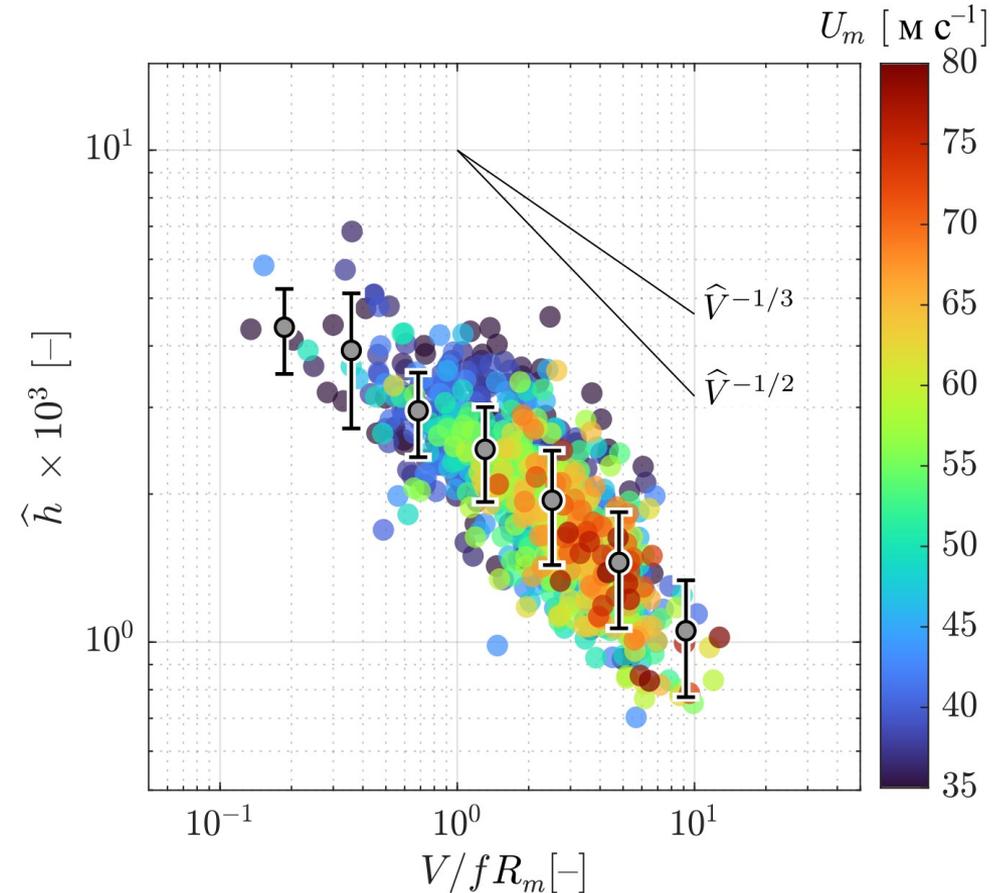
↑
безразмерное время
действия ТЦ [Price 1981]

Из рисунка следует:

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} \propto \left(\frac{V}{fR_m} \right)^{-a}, \quad a \lesssim \frac{1}{2}$$

Подтверждение моделей ПС

[Price 2009] и [Miyamoto et al. 2017],
справедливых для **быстрых** ТЦ

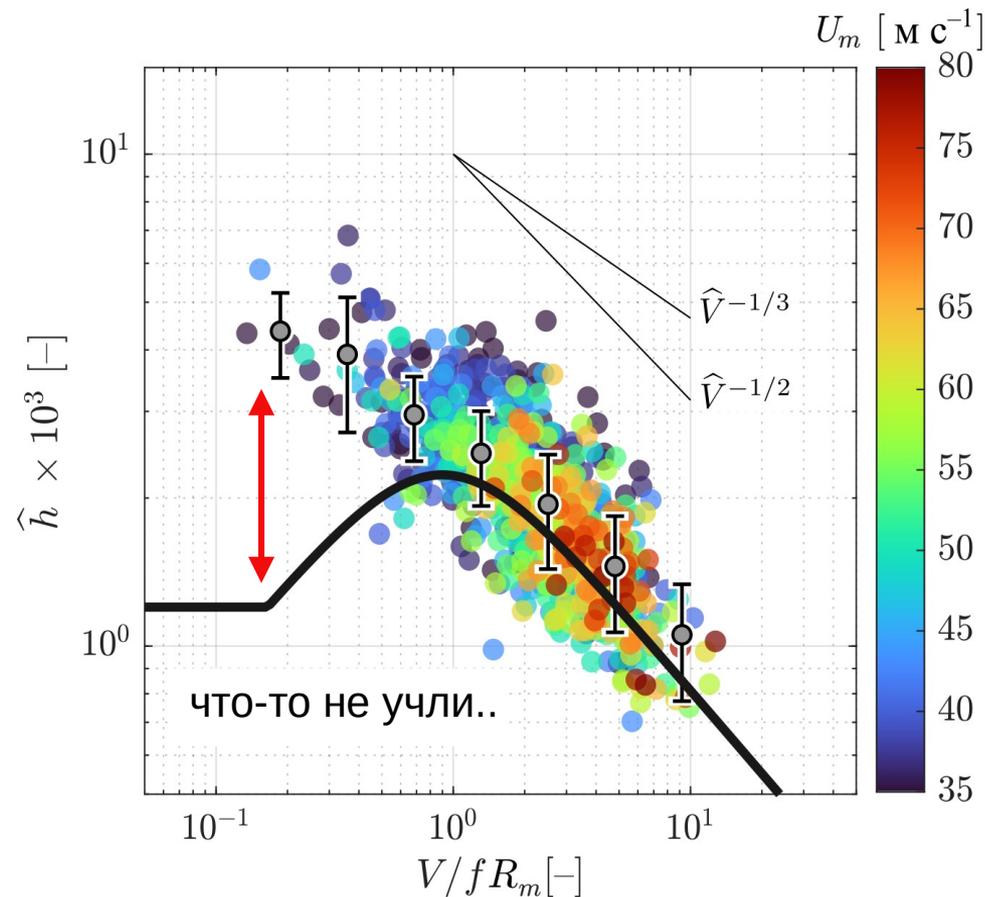


2. Параметризация толщины ПС: Масштабирование толщины ПС

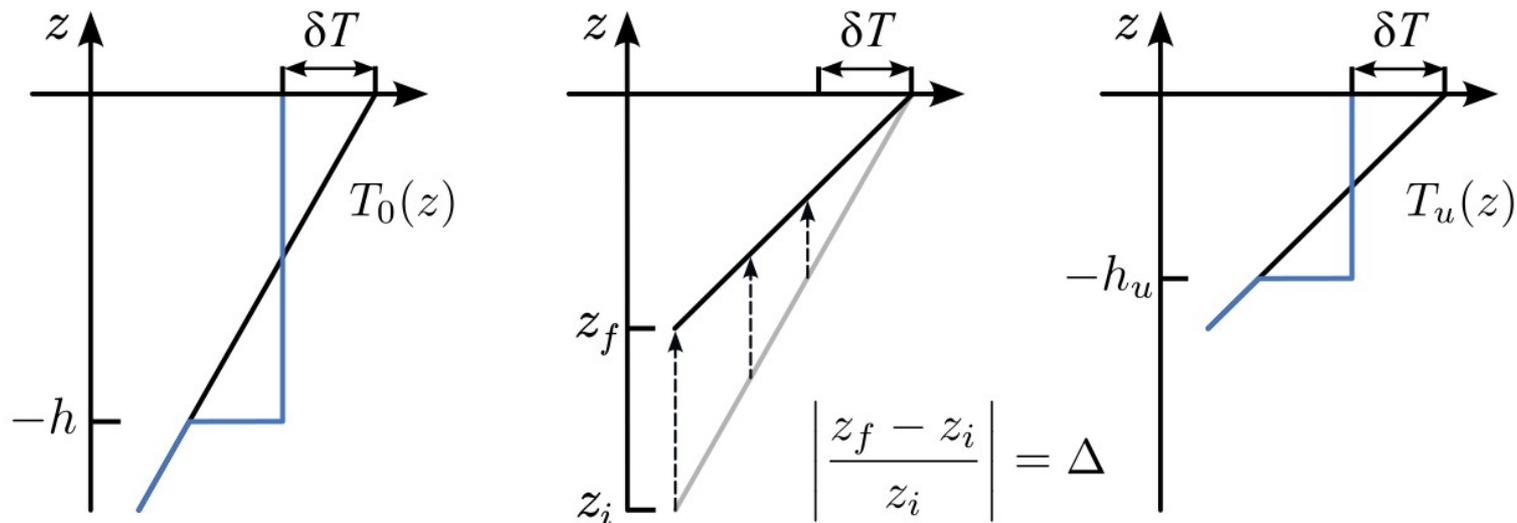
$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = \Phi^{1/2} \left(\frac{V}{fR_m}, \epsilon \frac{\bar{N}R_m}{V} \right)$$

при $\epsilon \frac{\bar{N}R_m}{V} = 0$ (поток массы не затухает)
 $\Phi = \Phi_0$

$$\Phi_0(\hat{V}) = \begin{cases} a\varphi(\hat{V}) \left(\frac{\hat{V}_m}{\hat{V}} \right)^n & , \hat{V} > \hat{V}_c \\ 1 & , \hat{V} \leq \hat{V}_c \end{cases}$$



2. Параметризация толщины ПС: Влияние апвеллинга на толщину ПС



$$\frac{h}{h_u} = 1 + \Delta, \quad \Delta = 2.5c_* \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \left(\frac{\overline{N}}{f} \right) \left(\frac{f R_m}{V} \right) \quad [Kudryavtsev et al. 2019b, Zhang et al. 2024]$$

2. Параметризация толщины ПС: Определение констант

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = \Phi^{1/2} \left(\frac{V}{fR_m}, \epsilon \frac{\bar{N}R_m}{V} \right)$$

$$\Phi(\hat{V}, \hat{D}) = \frac{\Phi_0(\hat{V})}{1 + c\phi(\hat{V})\hat{D}}$$

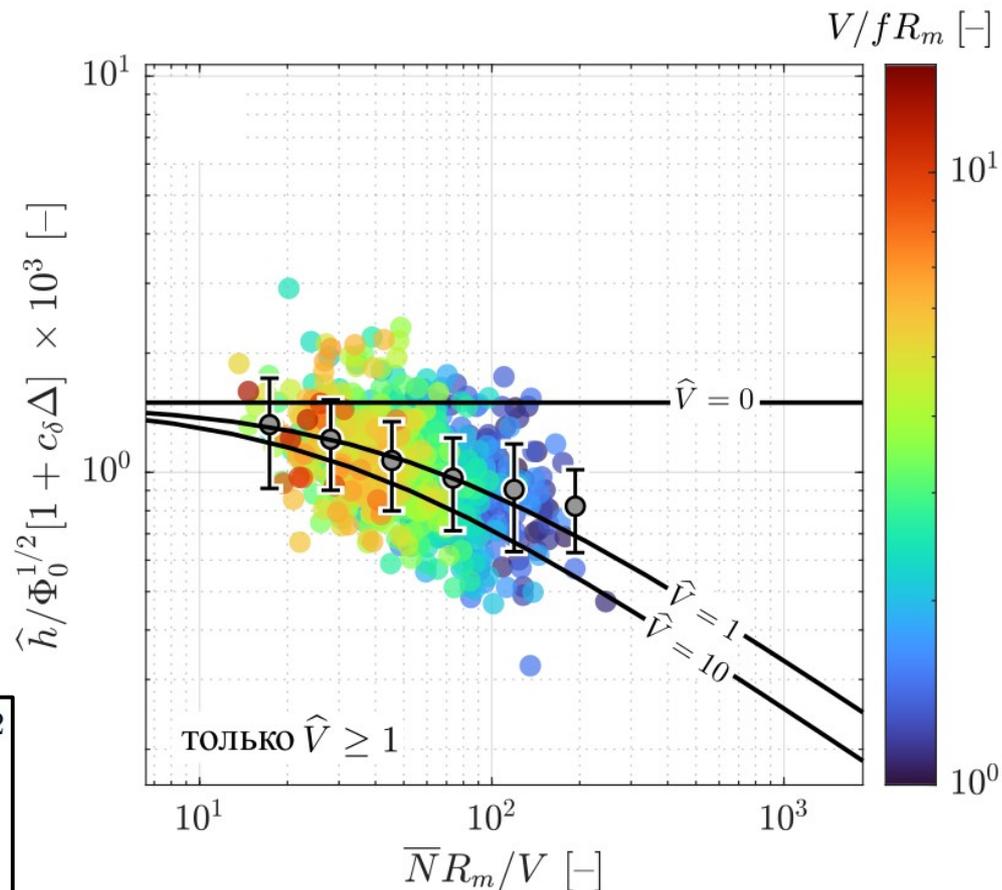
↑
безразмерный параметр затухания полного потока

$$\phi(\hat{V}) = \frac{(\hat{V}/\hat{V}_m)^{2n}}{1 + (\hat{V}/\hat{V}_m)^{2n}}$$

$$c_h = 1.5e-3$$

$$\epsilon = 7.6e-3$$

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = c_h(1 + c_\delta\Delta) \left[\frac{\Phi_0(\hat{V})}{1 + c\epsilon\phi(\hat{V})\hat{D}} \right]^{1/2}$$



3. Применение параметризации толщины ПС

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = c_h(1 + c_\delta\Delta) \left[\frac{\Phi_0(\hat{V})}{1 + c\epsilon\phi(\hat{V})\hat{D}} \right]^{1/2}$$



$$\delta T = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 T(z) dz - T(0)$$

Параметризация толщины ПС

вход — параметры ТЦ, начальный профиль $\rho(z)$

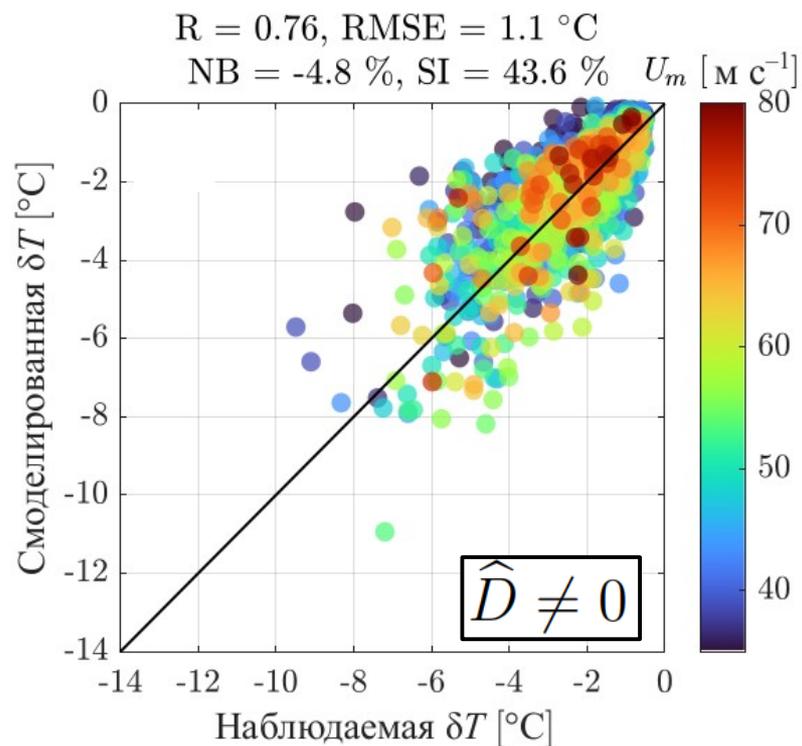
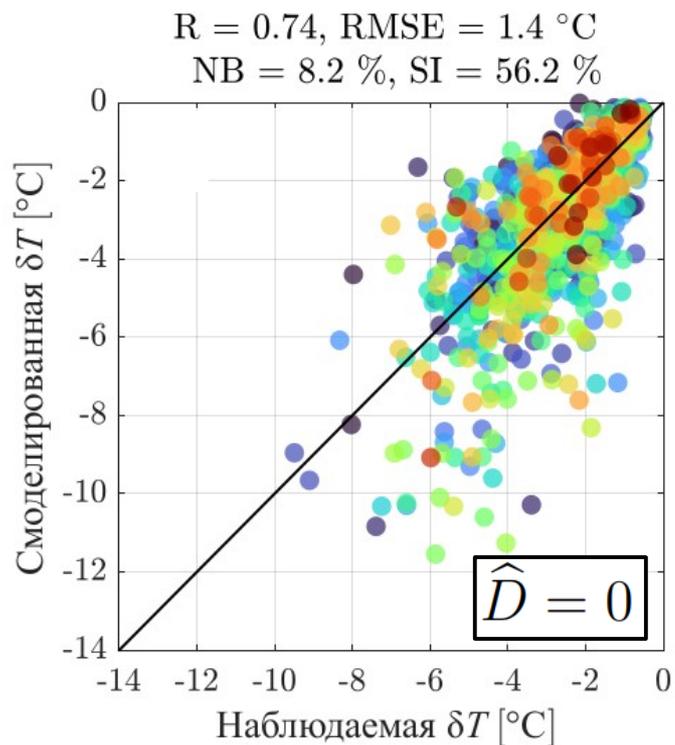
Оценка аномалии ТПО

вход — толщина ПС, начальный профиль $T(z)$

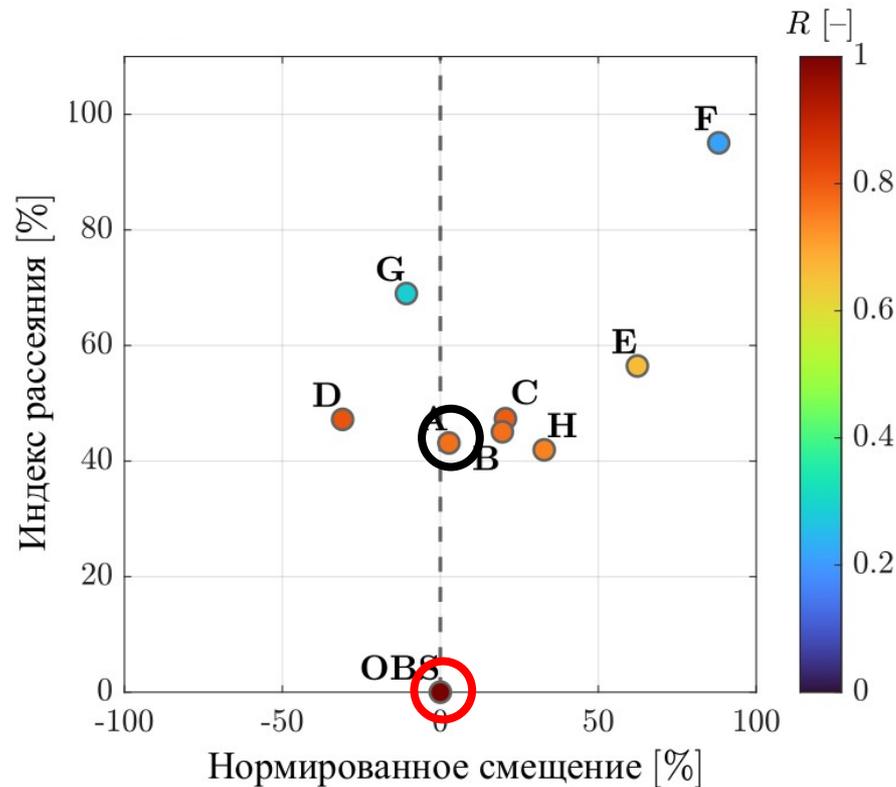
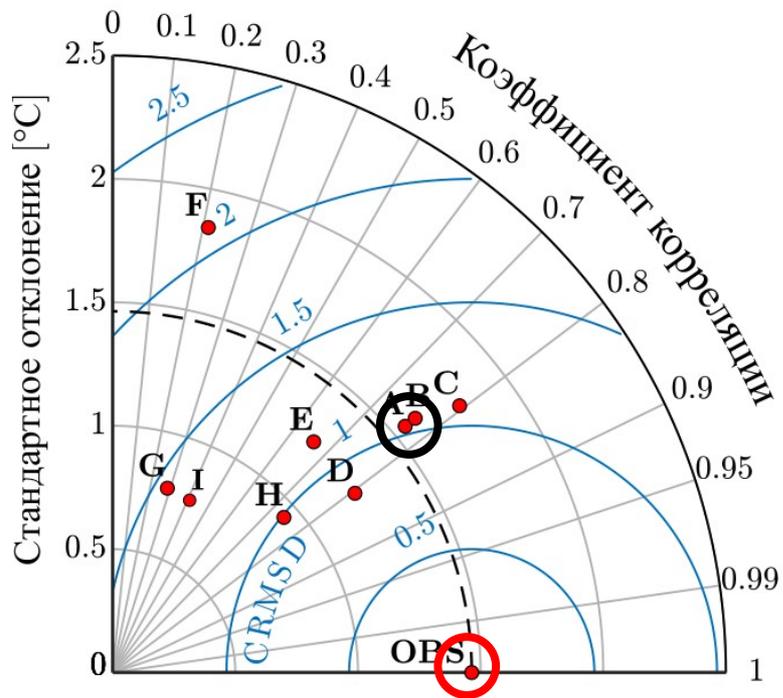
3. Применение параметризации толщины ПС:

Аномалия ТПО

$$\frac{h(fN_{\text{eff}})^{1/2}}{U_m} = c_h(1 + c_\delta\Delta) \left[\frac{\Phi_0(\hat{V})}{1 + c\epsilon\phi(\hat{V})\hat{D}} \right]^{1/2}$$



3. Применение параметризации толщины ПС: Сравнение с другими моделями



Заключение

- Сформирована база данных аномалий температуры поверхности океана (ТПО) и толщины перемешанного слоя (ПС), сформированных прохождением тропических циклонов (ТЦ) в разных районах Мирового океана в разные годы.
- Созданная база данных позволила провести анализ закономерностей формирования толщины ПС с помощью теории подобия.
- Для анализа была построена параметризация максимального модуля потока массы в ПС, создаваемого ТЦ. Параметризация основана на свойстве автомодельности уравнения для потока массы, в котором учтено явление радиационного затухания.
- В результате анализа впервые была экспериментально подтверждена автомодельность толщины ПС по двум безразмерным параметрам: безразмерной скорости движения ТЦ и безразмерному времени затухания потока массы.
- Также впервые было обнаружено влияние апвеллинга на оценку толщины ПС, полученной с использованием принципа сохранения тепла в вертикальном столбе воды.
- Построена параметризация толщины ПС, которая совместно законом сохранения тепла в столбе воды, формирует параметрическое описание интенсивности охлаждения поверхности океана, связанного с прохождением ТЦ
- Сравнение результатов моделирования аномалии ТПО с помощью полученной параметризации и с помощью моделей из других работ, показало, что построенное параметрическое описание охлаждения поверхности океана даёт весьма хорошие результаты.