A global map showing meridional heat transport in the world ocean. The map uses a color scale from blue (low transport) to yellow and orange (high transport). The highest transport values are concentrated in the mid-latitude oceans, particularly in the North Atlantic and the North Pacific, where the transport is shown in bright yellow and orange. The equatorial regions show lower transport values, indicated by blue and light green colors. The map includes a grid of latitude and longitude lines.

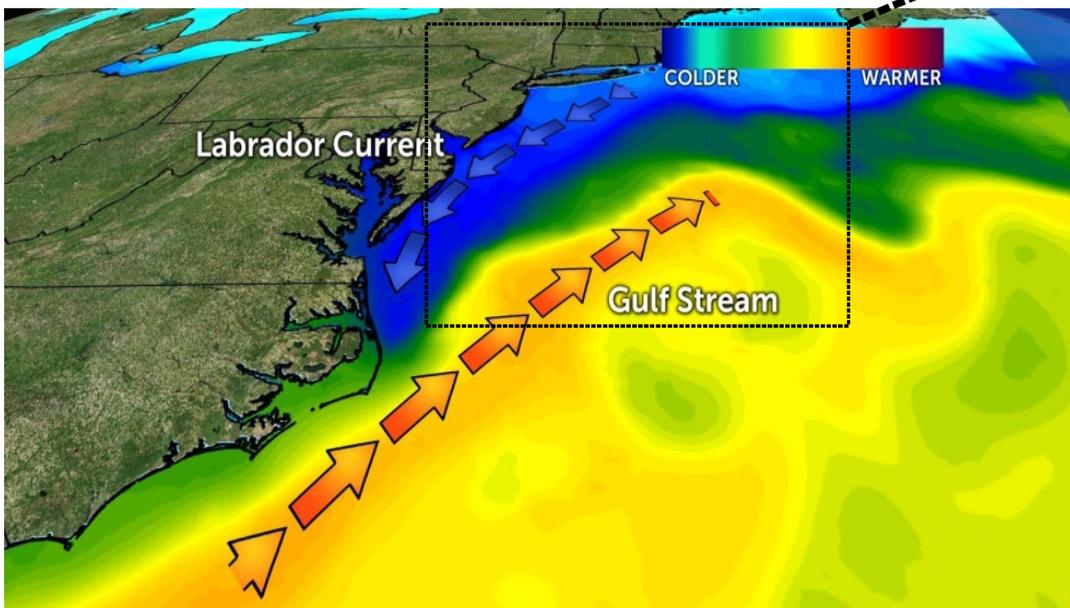
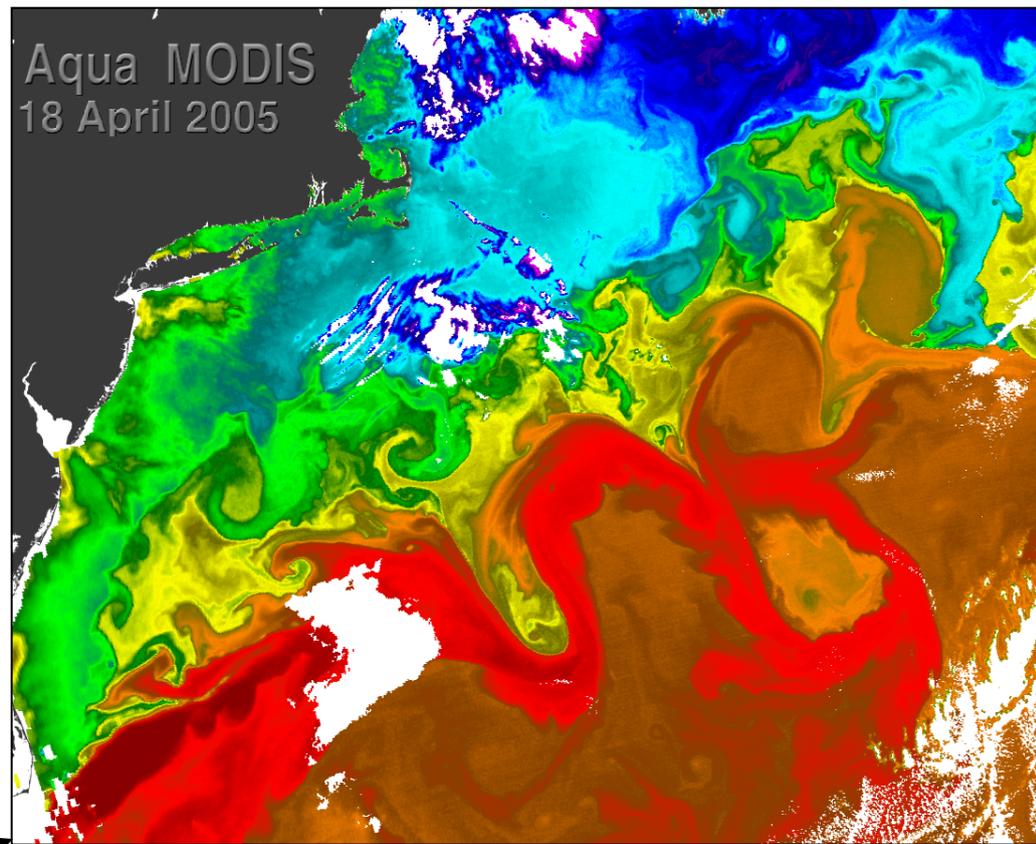
# Численное моделирование вихревого меридионального переноса тепла в Мировом океане

Ушаков К.В.  
Ибраев Р.А.



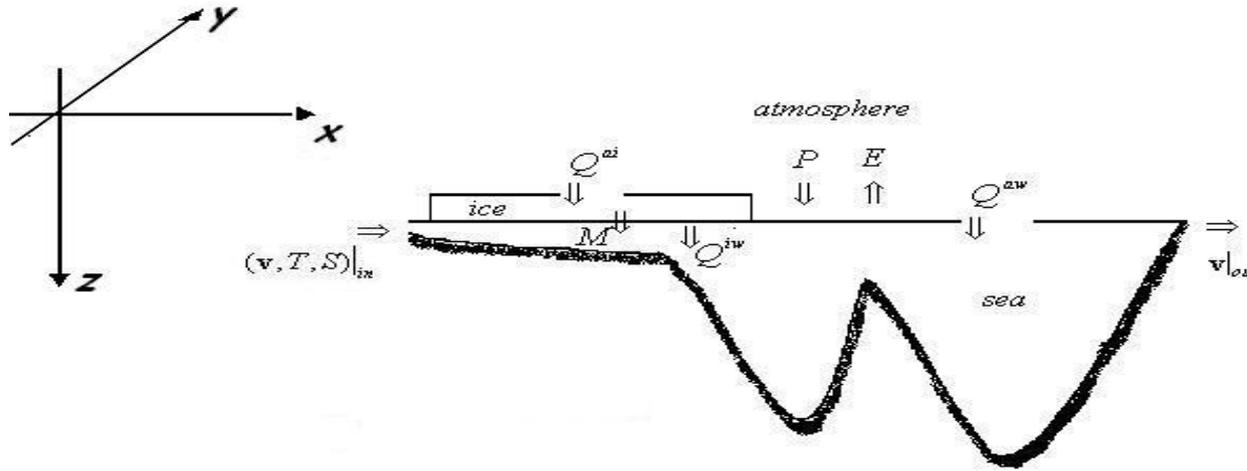
# Вихревой перенос тепла в океане

- Регулирует крупномасштабный перенос и сопоставим с ним в ряде районов
- Вносит вклад в формирование глобального климата
- Контактные наблюдения затруднительны в холодный сезон и чрезмерно затратны из-за требуемого разрешения
- В толще воды не виден со спутников
- Комбинированные оценки по всем видам наблюдений имеют пространственное разрешение  $\sim 5^\circ$



- Обеспечивает перенос поперёк среднего течения
- По ряду исследований, ответственен за нарушение арктического галоклинного слоя
- Механизм переноса – захват воды во внутренней части вихря
- Характерные масштабы вихрей:  
10 – 100 км  
10 – 100 суток

# Вихреразрешающая модель Мирового океана ИВМИО



$$G_{\zeta, z = -\zeta(\lambda, \varphi, t)}: \begin{cases} -K_m(u_z, v_z) + (u, v) \cdot \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} (1 - A)(\tau^\lambda, \tau^\varphi) \\ p = p_a \\ -c_p K_h T_z + c_p T \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} [Q_h^{aw} (1 - A) + Q_h^{iw} A] \\ -K_h S_z + S \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} S^{iw} M A \end{cases}$$

$$G_H, z = H(\lambda, \varphi): \begin{cases} -\rho_o K_m \frac{\partial(u, v)}{\partial z} = (\tau_B^\lambda, \tau_B^\varphi) \\ -\rho c_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ -\rho K_h \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

$$u_t + (v \cdot \vec{\nabla}) u - f v = -\rho_0^{-1} p_x + (K_m u_z)_z + D^u$$

$$v_t + (v \cdot \vec{\nabla}) v + f u = -\rho_0^{-1} p_y + (K_m v_z)_z + D^v$$

$$p_z = \rho g$$

$$(\vec{\nabla} \cdot v) = 0$$

$$T_t + (v \cdot \vec{\nabla}) T = (K_h T_z)_z + D^T + (c_p \rho)^{-1} Q^H$$

$$S_t + (v \cdot \vec{\nabla}) S = (K_h S_z)_z + D^S$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

$$\zeta_t + u \zeta_x + v \zeta_y + w = \rho_f^{-1} (P + M - E)$$



- Разрешение  $0.1^\circ$  на трёхполярной сетке, 49 z-уровней
- Шаг по времени 4 мин.
- Бигармоническая вязкость  $B_H = -18 \cdot 10^9 \text{ м}^4/\text{с}$
- Диффузия  $A_H = 100 \text{ м}^2/\text{с}$
- Атмосферные параметры и радиационные потоки CORE-II за 1978-1982 гг.

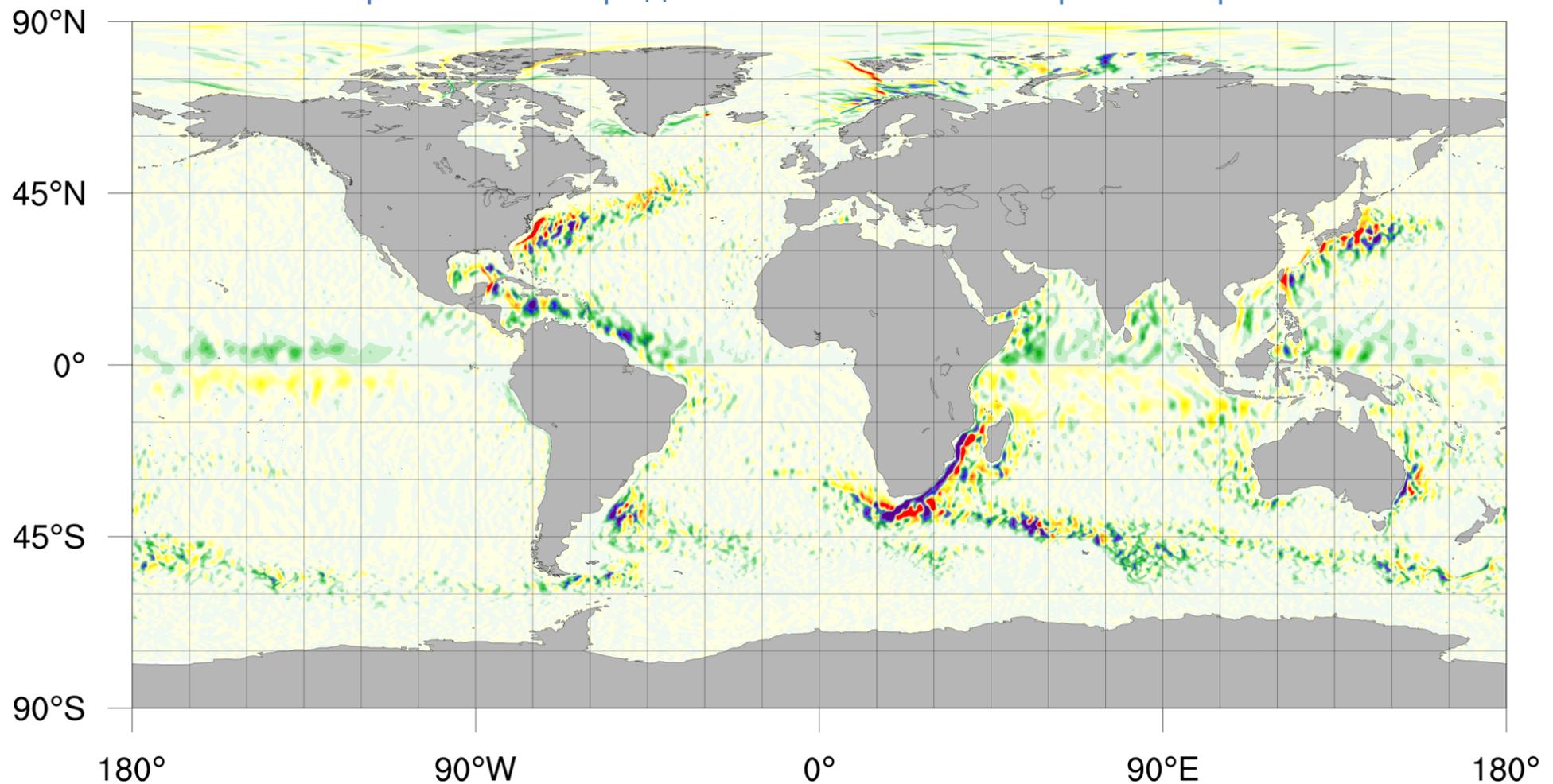
Ибраев и др., ФАО, 2012, 48(1)  
Ушаков и др., ФАО, 2016, 52(4)

$$Q_E = \underbrace{\iint \rho C_P \theta V dz dx}_{\text{полный явный перенос}} - \underbrace{\iint \rho C_P \langle \theta \rangle \langle V \rangle dz dx}_{\text{перенос среднего потока}} - \underbrace{\iint A_H \rho C_P \frac{d\theta}{dy} dz dx}_{\text{параметризованный вихревой перенос}}$$

полный явный перенос

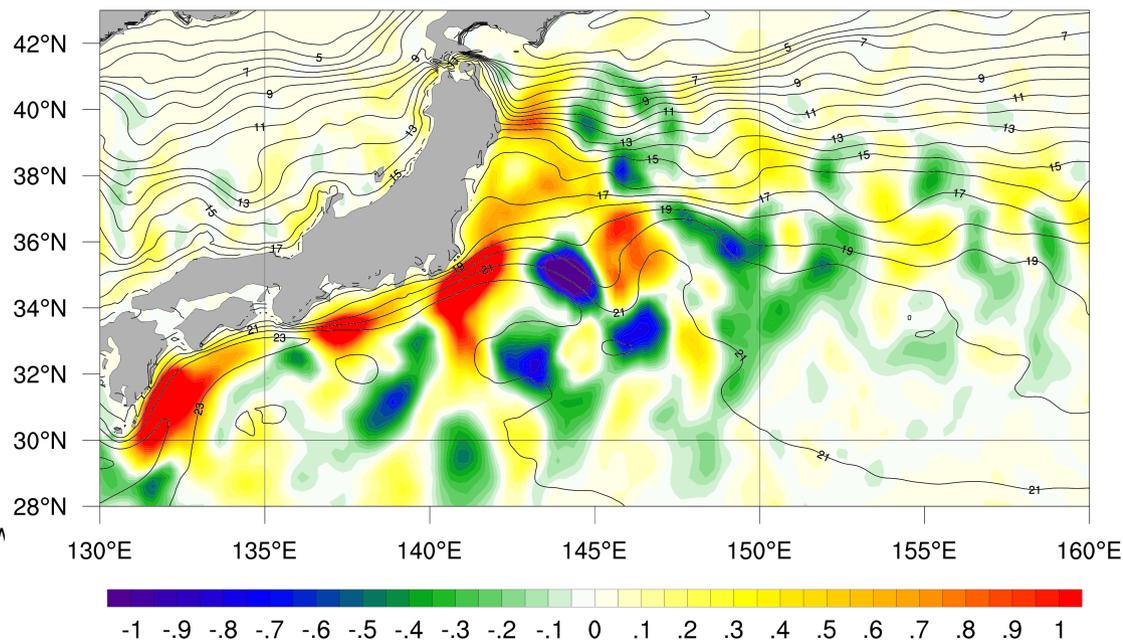
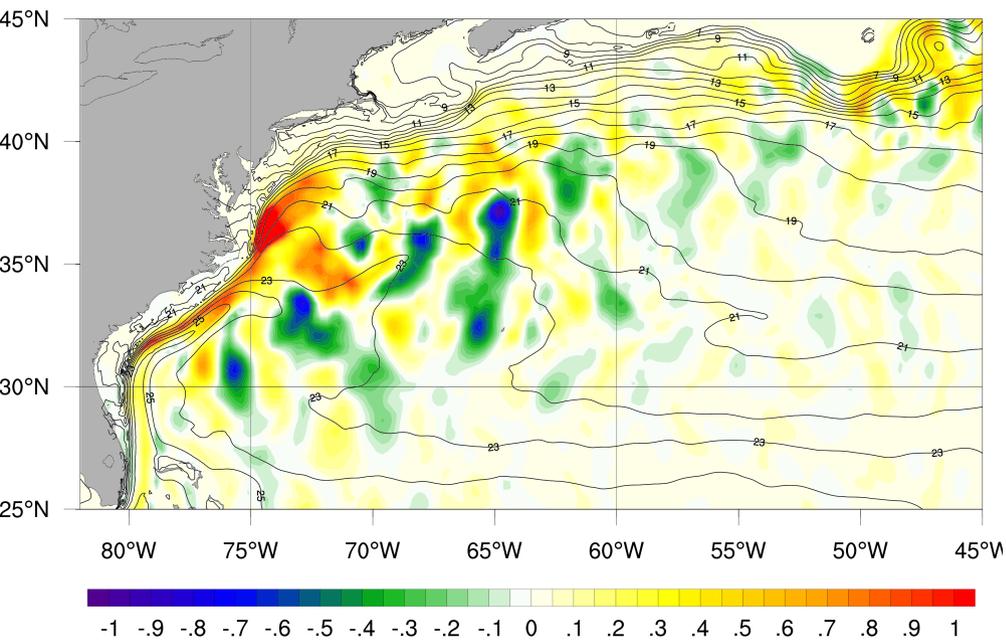
перенос среднего потока

параметризованный вихревой перенос

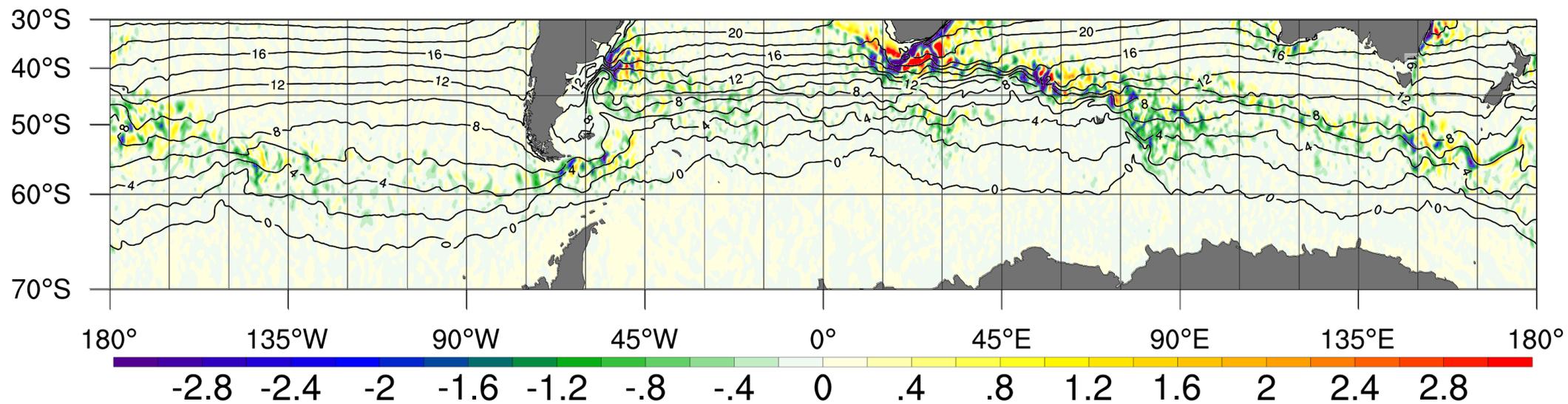


-2.8 -2.4 -2 -1.6 -1.2 -0.8 -0.4 0 .4 .8 1.2 1.6 2 2.4 2.8

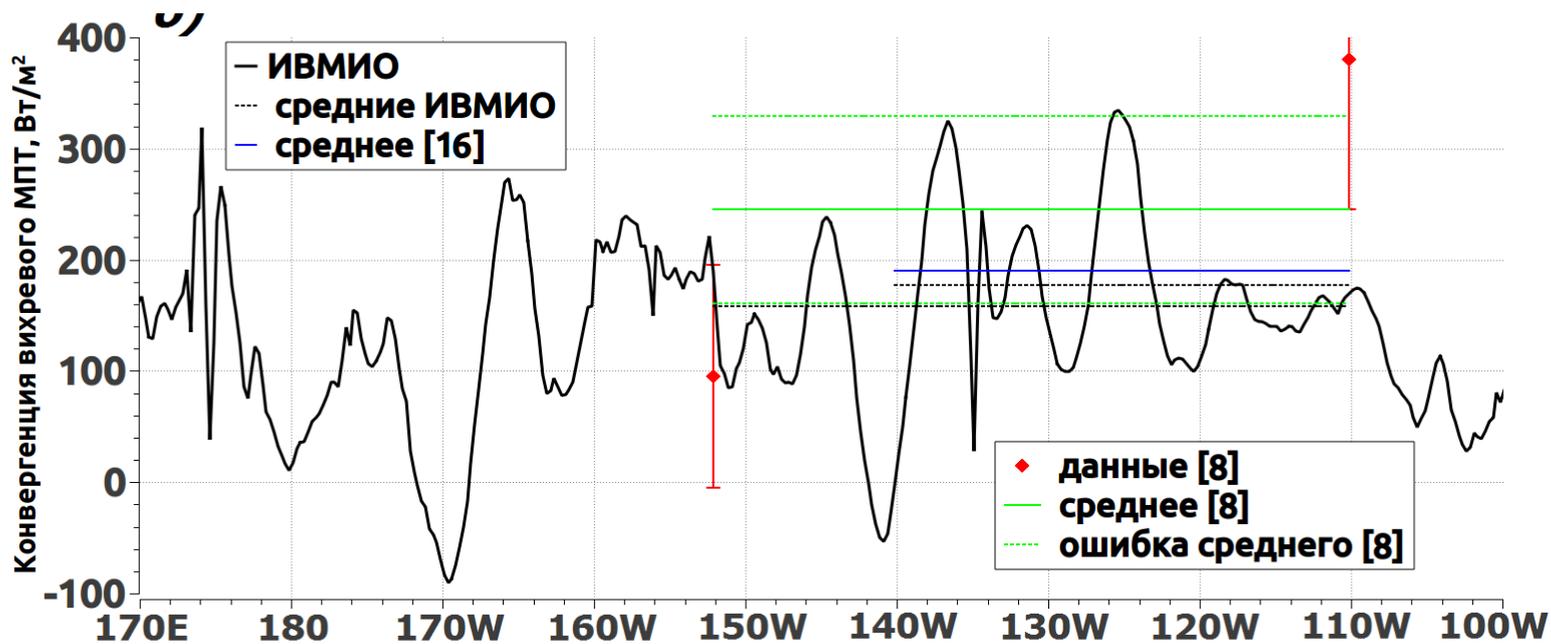
Вихревой меридиональный перенос тепла (ВМПТ),  
проинтегрированный по всей толще океана,  $10^8$  Вт/м



Гольфстрим и Кюросио, для верхнего 100-метрового слоя:  
 ВМПТ (интеграл, палитра,  $10^8$  Вт/м) и температура (осреднение, изолинии,  $^{\circ}\text{C}$ )



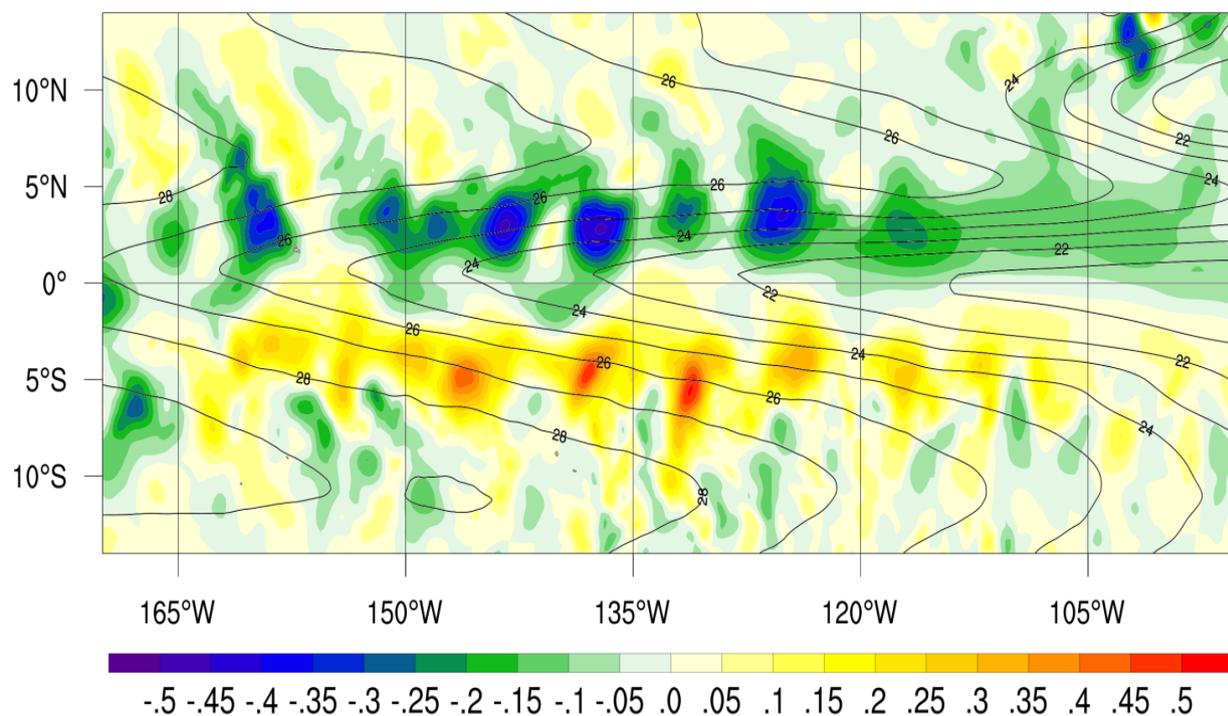
ВМПТ всей толщи океана (палитра,  $10^8$  Вт/м) и  
 температура поверхности (изолинии,  $^{\circ}\text{C}$ )



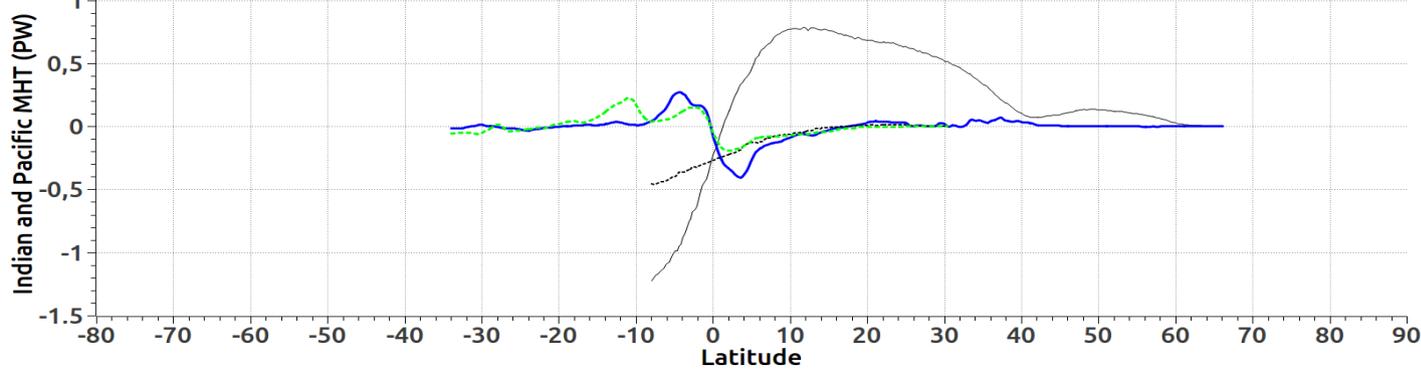
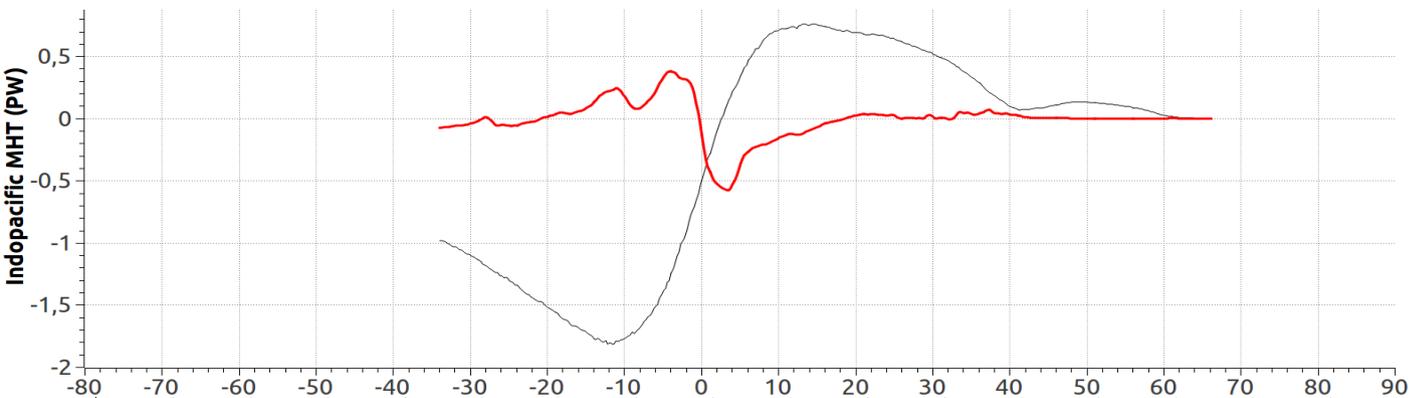
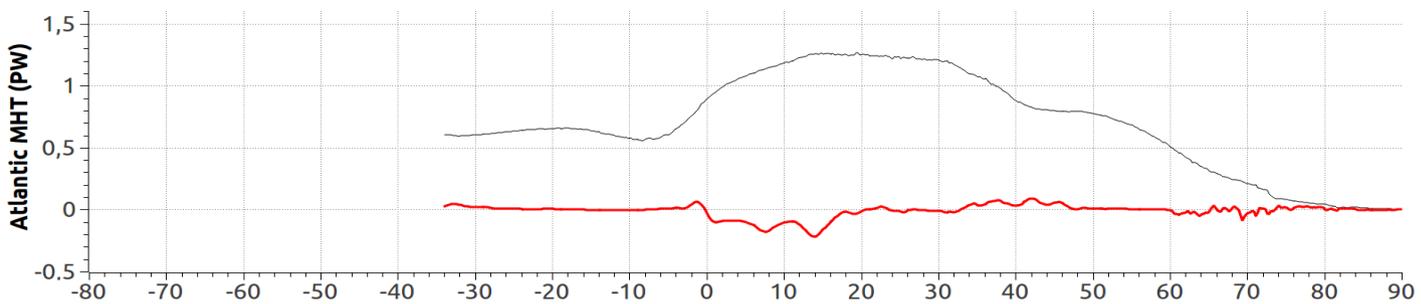
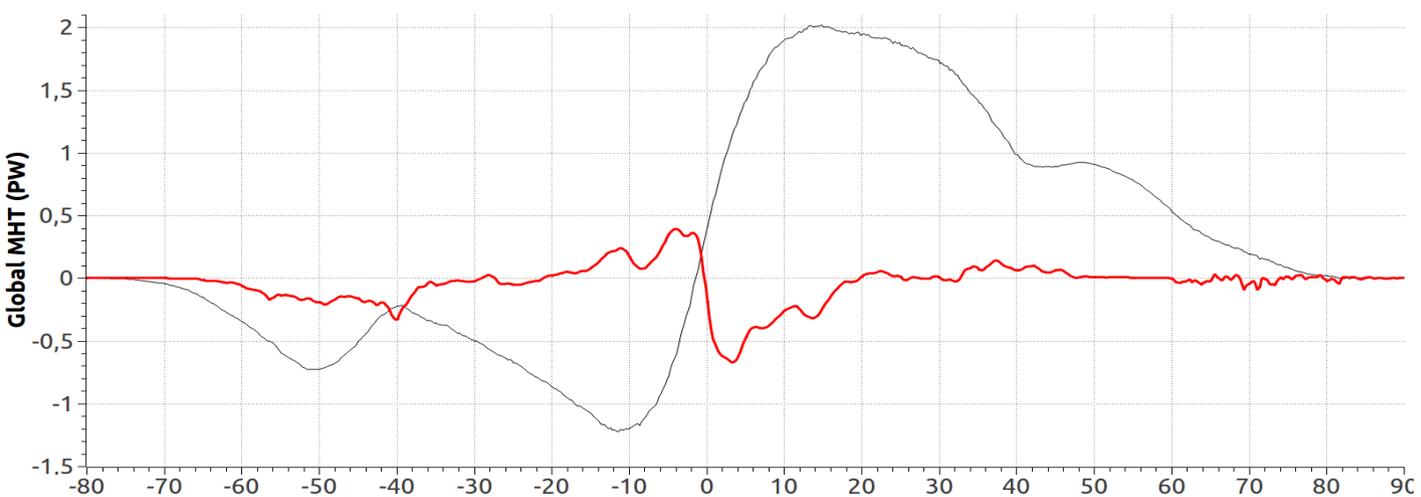
Конвергенция ВМПТ  
 на экваторе в Тихом  
 океане (Вт/м<sup>2</sup>)

[8] Bryden & Brady, J. Mar.  
 Res., 1989

[16] Jayne & Marotzke, J.  
 Phys. Oceanogr., 2002



Для верхнего 100-метрового слоя: ВМПТ (интеграл, палитра, 10<sup>8</sup> Вт/м) и  
 температура (осреднение, изолинии, °C)



Распределения по широте для полного МПТ (черные линии) и ВМПТ (цветные линии)

- Мировой океан
- Атлантический
- Индо-Тихоокеанский бассейн
- Индийский и Тихий океаны отдельно (пунктирная и сплошная линии)

Спасибо за внимание!

[www.model.ocean.ru](http://www.model.ocean.ru)