



Институт вычислительной математики РАН



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова



Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

# ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩАЯ $1/10^\circ$ МОДЕЛЬ МИРОВОГО ОКЕАНА: ФИЗИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ибраев Р.А. (ИВМ РАН)

Калмыков В.В. (ВМК МГУ)

Хабеев Р.Н. (ММ МГУ)

Ушаков К.В. (ИО РАН)

Роль Мирового океана в энергетике Земли

Массы воды океана  $\sim 270$  x массы атмосферы

Вес 10 м столба воды  $\sim$  вес всего столба атмосферы

Теплоемкость воды  $\sim 4$  x теплоемкость воздуха

Теплоемкость 2,5 м воды  $\sim$  теплоемкость всего столба атмосферы

Модели/системы прогноза погоды на сезонных и больших  
временных масштабах невозможны без адекватной модели  
Мирового океана

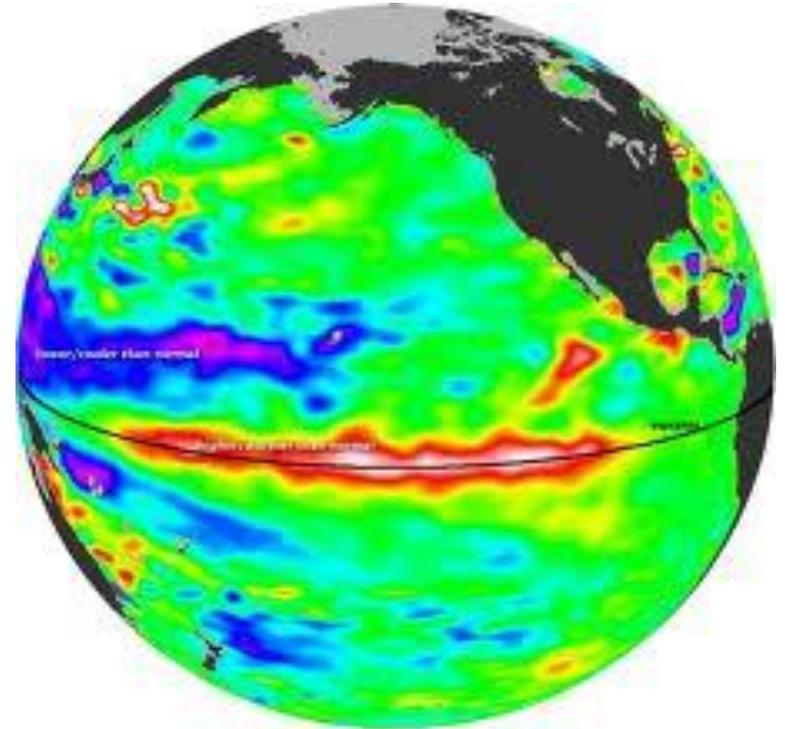
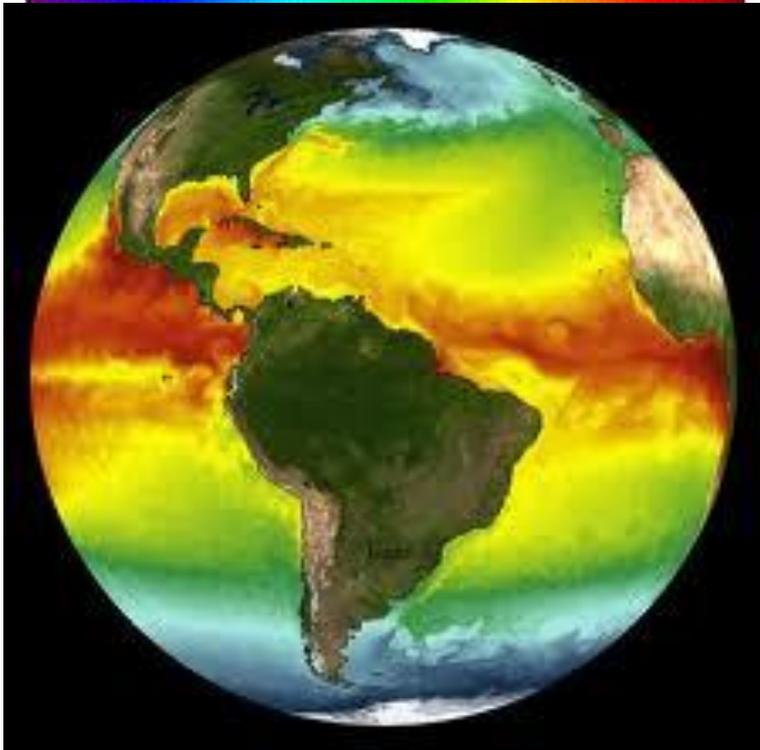
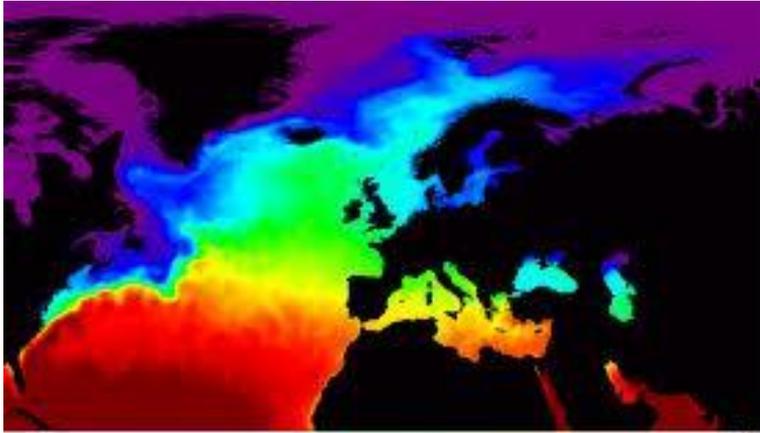
# 1. Цель исследования

## Создание модели термогидродинамических процессов Мирового океана

Модель Мирового океана предназначена для

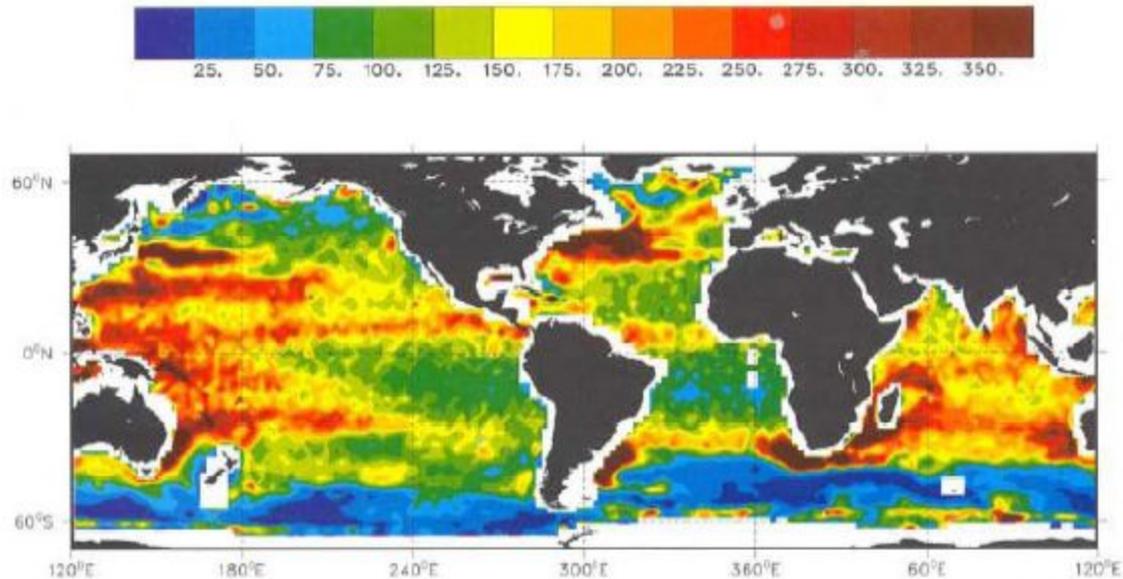
- краткосрочного прогноза погоды океана
- прогноза сезонной и межгодовой изменчивости состояния климата Земли (в рамках совместной модели океан-лед-атмосфера)

## 2. Важнейшие физические процессы



## 2. Важнейшие физические процессы

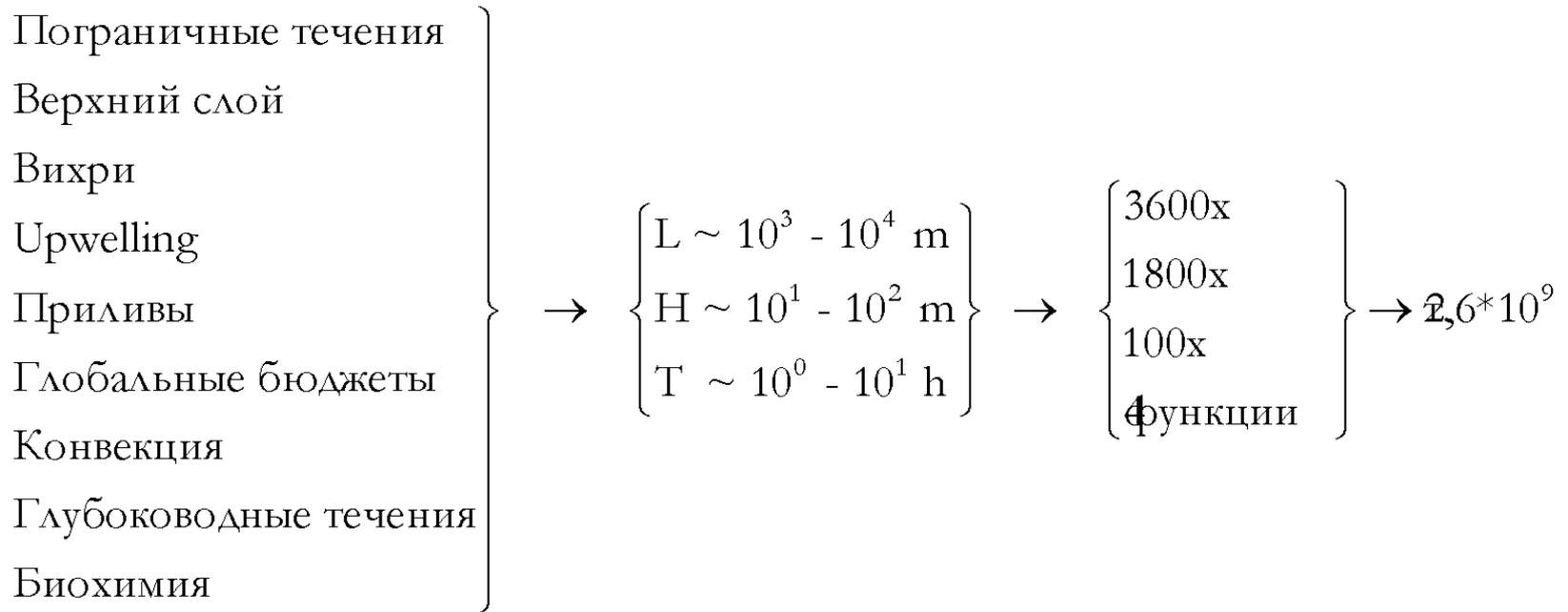
Отношение кинетической энергии вихрей к средней КЭ



Более 90% кинетической энергии поверхности содержится в вихрях.

*(Wunsch, 2002)*

## 2. Важнейшие физические процессы



### 3. Модели Мирового океана: современное состояние

модель	L	H	ССЫЛКИ
<b>MOM4</b> (Modular Ocean Model)	1°	47 z	
<b>ECCO</b> (Estimating the Circulation & Climate of the Ocean)	1° (JPL+MIT)	46 z/23 z	
<b>INMSOM</b> (Институт вычислительной математики)	1° × 1/2°	40 sigma	Дианский и др., 2009
<b>NEMO</b> (Nucleus for European Modelling of the Ocean)	1/4°	50 z	
<b>NCOM</b> (Navy Coastal Ocean Model)	1/8°	40 sigma/z	
<b>POP</b> (Parallel Ocean Model)	1/10°	40 z	Smith et al., 2000; Le Traon et al., 2002; Rainville et al., 2007
<b>OFES</b> (Ocean General Circulation Model)	1/10°	54 z	Masumoto et al., 2004; Du et al., 2005; Aoki et al., 2007
<b>MICOM</b> (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model)	1/12°	16 z	Paiva et al., 1999; Chassignet & Garraffo, 2001; Treguler et al., 2005
<b>HYCOM</b> (Hybrid Coordinate Ocean Model)	1/12°	32 l	Chassignet et al., 2006; Kelly et al., 2007
<b>NLOM</b> (Navy Layered Ocean Model)	1/8° - 1/64°	6 l	Hulbet and Hogan, 2000

There was general agreement that much higher resolution of the major model components (atmosphere, ocean, land) is a fundamental prerequisite for a more realistic representation of the climate system and more relevant predictions (e.g., extremes, convection, tropical variability, regional and local applications).

*World Modelling Summit for Climate Prediction, Reading, UK, 2008*

### 3. Модели Мирового океана: современное состояние

#### Модели климата

- расчет на 100 – 1000 лет модельного времени
- задача нахождения аттрактора системы
- эксперименты по климату ~10 суток,
- требование на скорость расчета задачи климата составляет  $10 - 100$  [(количество модельных лет)/(сутки компьютерного времени)]

#### Модели прогноза погоды (имеется в виду, как общепринятое понимание погоды атмосферы, так и погоды океана)

- расчет на 0,01 – 0,1 года.
- задача нахождения траектории системы
- прогноз на 24 часа за ~0,01 сут (~10 минут)
- требование на скорость расчета задачи прогноза  $1 - 0,1$  [(количество модельных лет)/(сутки компьютерного времени)]

### 3. Модели Мирового океана: современное состояние

## Computing Capability & Model Grid Size (km)

Peak Rate:	10 TFLOPS	100 TFLOPS	1 PFLOPS	10 PFLOPS	100 PFLOPS
Cores	1,400 (2006)	12,000 (2008)	80-100,000 (2009)	300-800,000 (2011)	6,000,000? (20xx?)
Global NWP <sup>0</sup> : 5-10 days/hr	18 - 29	8.5 - 14	4.0 - 6.3	1.8 - 2.9	0.85 - 1.4
Seasonal <sup>1</sup> : 50-100 days/day	17 - 28	8.0 - 13	3.7 - 5.9	1.7 - 2.8	0.80 - 1.3
Decadal <sup>1</sup> : 5-10 yrs/day	57 - 91	27 - 42	12 - 20	5.7 - 9.1	2.7 - 4.2
Climate Change <sup>2</sup> : 20-50 yrs/day	120 - 200	57 - 91	27 - 42	12 - 20	5.7 - 9.1

Range: Assumed efficiency of 10-40%

0 - Atmospheric General Circulation Model (AGCM; 100 levels)

1 - Coupled Ocean-Atmosphere-Land Model (CGCM; ~ 2X AGCM computation with 100-level OGCM)

2 - Earth System Model (with biogeochemical cycles) (ESM; ~ 2X CGCM computation)

\* Core counts above  $O(10^6)$  are unprecedented for weather or climate codes, so the last 3 columns require getting 3 orders of magnitude in scalable parallelization (scalar processors assumed; vector processors would have lower processor counts)

Thanks to Jim Abeles (IBM)

## 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

### 4.1. Постановка задачи

$$u_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)u - fv = -\rho_o^{-1} p_x + (K_m u_z)_z + D_u$$

$$v_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)v + fu = -\rho_o^{-1} p_y + (K_m v_z)_z + D_v$$

$$p_z = \rho g$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\zeta_t + \mathbf{v} \cdot \nabla(z + \zeta) = \rho_f^{-1}(P + M - E)$$

$$T_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)T = (K_h T_z)_z + D_T + (\rho_o c_p)^{-1} I_z \cdot (1 - A)$$

$$S_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)S = (K_h S_z)_z + D_S$$

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

# 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

## 4.1. Постановка задачи

$$G_{\zeta}, z = -\zeta(\lambda, \varphi, t): \left\{ \begin{array}{l} -K_m \frac{\partial u}{\partial z} + u \cdot \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} (1-A) \tau^\lambda \\ -K_m \frac{\partial v}{\partial z} + v \cdot \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} (1-A) \tau^\varphi \\ p = p_a \\ -c_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} + c_p T \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} [Q_h^{cw} (1-A) + Q_h^{iw} A] \\ -K_h \frac{\partial S}{\partial z} + S \rho_f^{-1} W = \rho_o^{-1} S^{iw} MA \end{array} \right.$$

$$G_S \text{ или } \left\{ \begin{array}{l} (u, v)_n = 0 \\ \frac{\partial(u, v)_\tau}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{array} \right.$$

$$G_H, z = H(\lambda, \varphi): \left\{ \begin{array}{l} -\rho_o K_m \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_B^\lambda \\ -\rho_o K_m \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_B^\varphi \\ w - u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y} = 0 \\ -\rho c_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ -\rho K_h \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{array} \right.$$

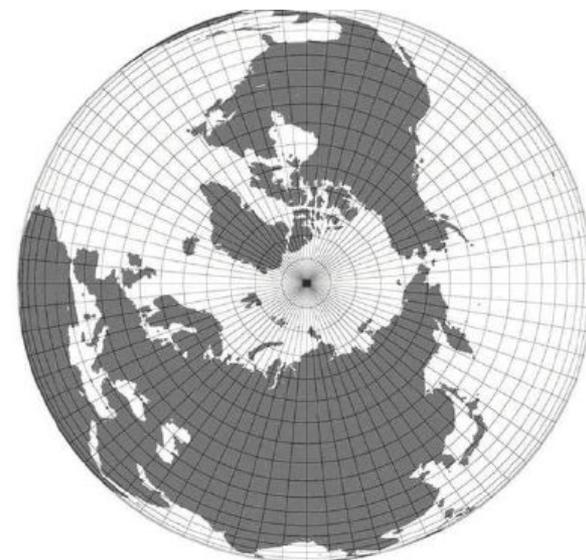
$$G_L \text{ или } \left\{ \begin{array}{l} u = u^{in} \\ v = v^{in} \\ T = T^{in} \\ T = T^{in} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} u = u^{out} \\ v = v^{out} \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{array} \right.$$

# 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

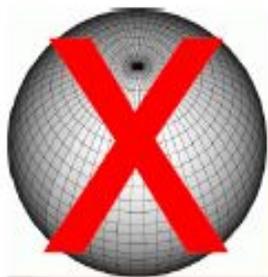
## 4.2. Системы координат. Сетки.

Проблема северного полюса в сферической системе координат (с.с.к.)

- математически вырожденная точка на северном полюсе
- шаги сетки в с.с.к.  $\rightarrow 0$ , следовательно шаг по времени  $\rightarrow 0$



### Возможные сетки на сфере



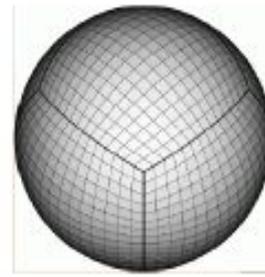
lat-long grid



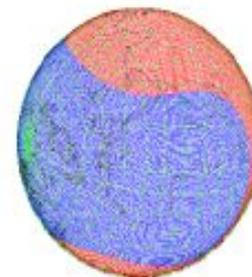
icosahedral grid  
(triangles)



icosahedral grid  
(hexagons)



cubed sphere

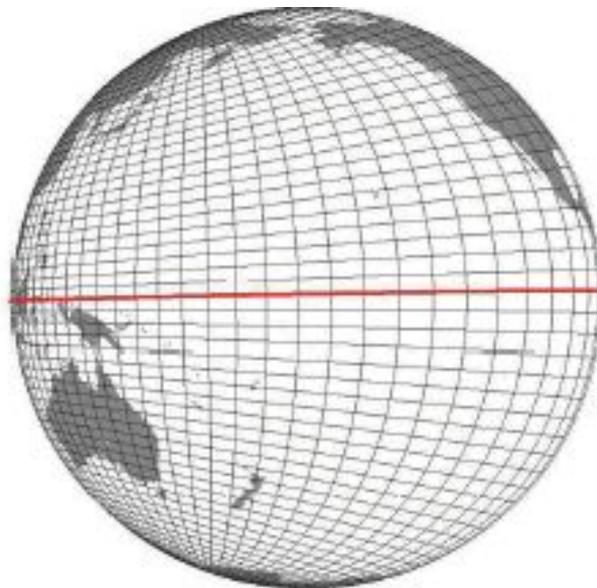


Yin-Yang grid

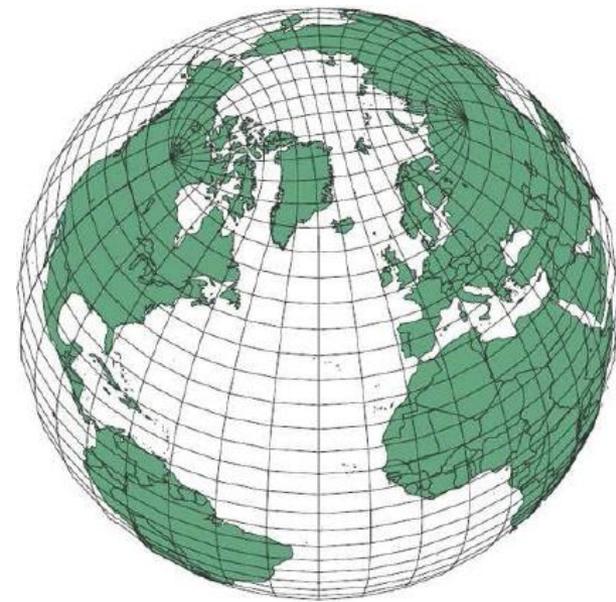
## 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

### 4.2. Системы координат. Сетки.

Сетки применяемые в  
моделях Мирового океана



*Биполярная с.к.*  
MPI-OM, POP,  
HYCOM, INMSOM



*Трехполюсная с.к.*  
MOM4.0, HIM,  
MISOM, NEMO, ИВМ-  
ИО

## 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

### 4.3. Быстрые и медленные движения.

Система уравнений включает спектр движений со скоростями:

$\Delta/\Delta$  - скорости течений;

$\Delta/\Delta$  - скорости бароклинных гравитационных волн

$\Delta/\Delta$  - скорости баротропных гравитационных волн.

$$g = 10 \text{ H / } ^2, \quad \sim 100 \rightarrow 5000 \text{ c} \Rightarrow \frac{gH}{c_{tr}} = \sqrt{\quad} \sim 30 \text{ m } 200 \text{ /}$$

Оценка шагов по времени в явных схемах

$$\Delta x = 10^3 \text{ m} \Rightarrow \begin{cases} \Delta \tau = \Delta x / c_{brcl} \sim 300 \\ \Delta t = \Delta x / c_{btr} \sim 5 \end{cases}$$

## 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

### 4.3. Быстрые и медленные движения.

Система уравнений

бароклинных движений в океане

$$\begin{cases} u_t + (\overline{v \cdot \nabla})u - fv = -\rho_o^{-1} p_x + (K_m u_z)_z + D_u \\ v_t + (\overline{v \cdot \nabla})v + fu = -\rho_o^{-1} p_y + (K_m v_z)_z + D_v \\ p_z = \rho g \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \zeta_t + \overline{v \cdot \nabla}(z + \zeta) = \rho_f^{-1}(P + M - E) \end{cases}$$

Система уравнений

баротропных движений в океане

(уравнений мелкой воды)

$$\begin{cases} U_t - fV = -gH \cdot \eta_x + R^x \\ V_t + fU = -gH \cdot \eta_y + R^y \\ \eta_t + U_x + V_y = \rho_f^{-1} W \end{cases}$$

где  $(U, V) = \int_0^H (u, v) dz$



(Killworth et al., 1991; Mellor, 1998)

## 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

### 4.4. Алгоритм распараллеливания

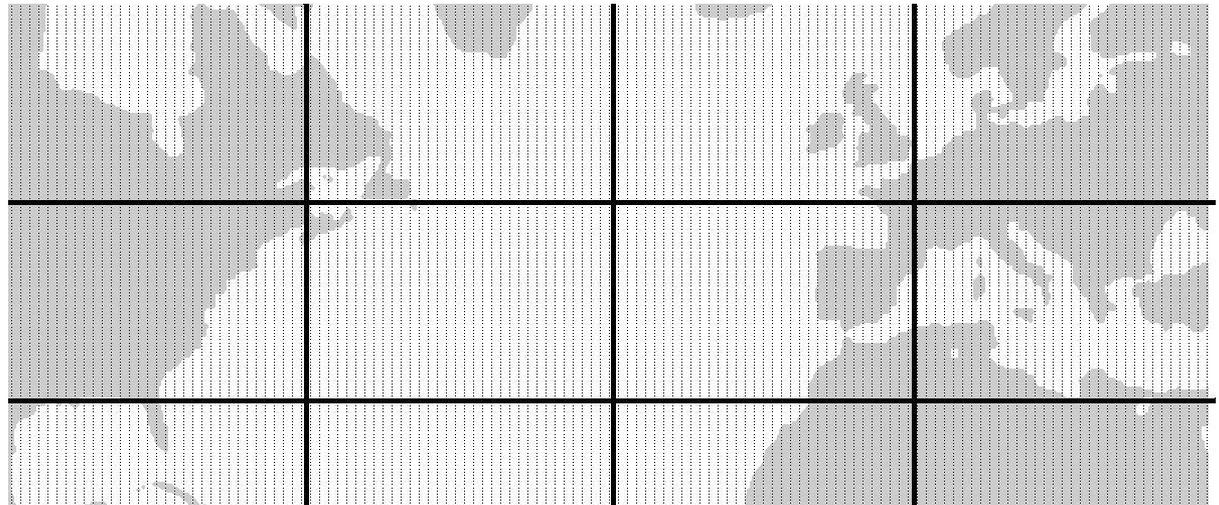
Что нужно сделать, чтобы решать модель на параллельных компьютерах с распределенной памятью

- алгоритм допускал 1-d, 2-d, 3-d декомпозицию области
- локализация вычислений



явные методы численного решения к соответствующим 1-d, 2-d, 3-d пространственным операторам задачи

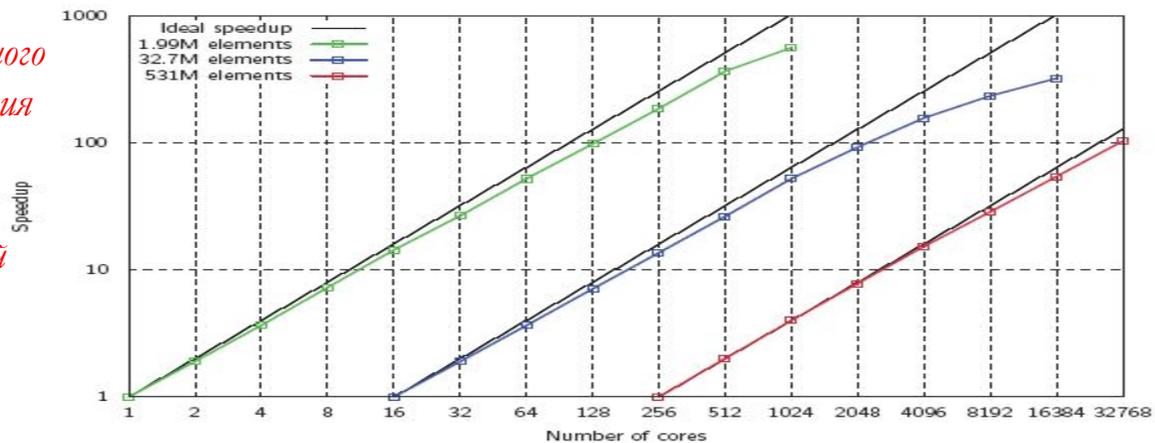
2-d декомпозиция области



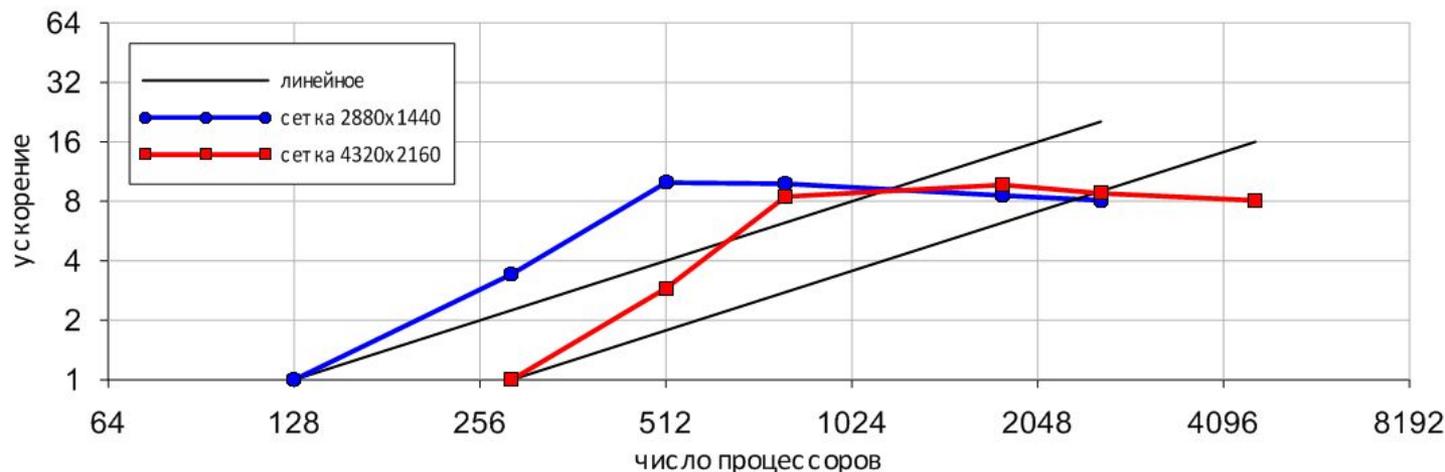
# 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

## 4.4. Масштабируемость

Определение. Масштабируемость программного обеспечения - способность программного обеспечения корректно работать на малых и на больших системах с производительностью, которая увеличивается пропорционально вычислительной мощности системы.



Scalability of adaptive mesh refinement (AMR) method for advection-diffusion. (Ghattas O., World Modelling Summit for Climate Prediction, Reading, UK, 2008)



green  $\sim 1 \times 1 \times 50 = 3.24 \text{Mp}$   
red  $\sim 1/10 \times 1/10 \times 100$   
 $= 648 \text{Mp}$

Масштабируемость модели Мирового океана ИВМ-ИО РАН на сетке с разрешением 15' x 15' и 5' x 5' (Ибраев, Калмыков, Ушаков, 2010)

# 4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

## 4.4. Масштабируемость

Алгоритм ускоренного решения системы уравнений мелкой воды на параллельных системах с распределенной памятью

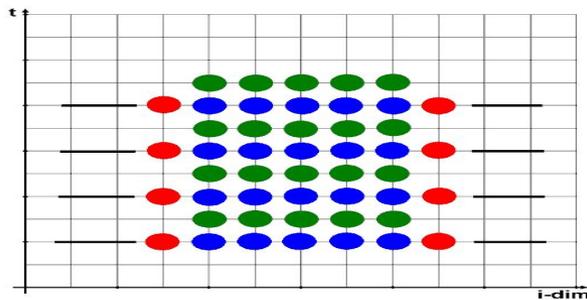


Схема исходного алгоритма

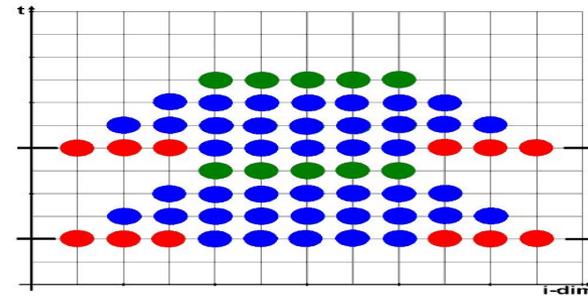
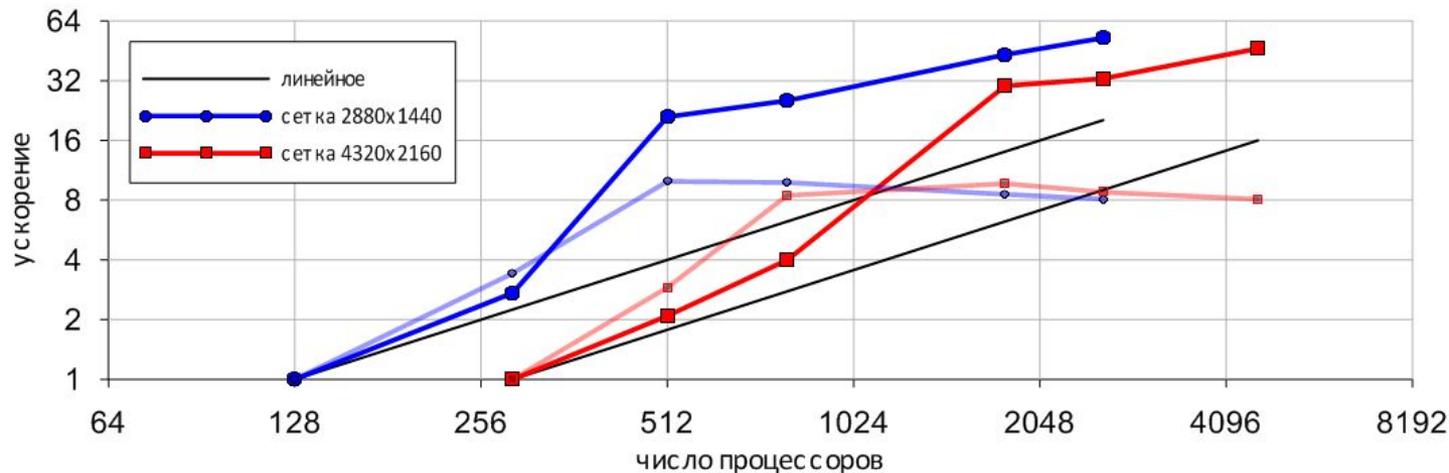


Схема модифицированного алгоритма

(Ибраев, Калмыков, 2012)



Масштабируемость модели Мирового океана ИВМ-ИО РАН на сетке с разрешением 15' x 15' и 5' x 5' (Ибраев, Калмыков, Ушаков, 2010)

# 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО

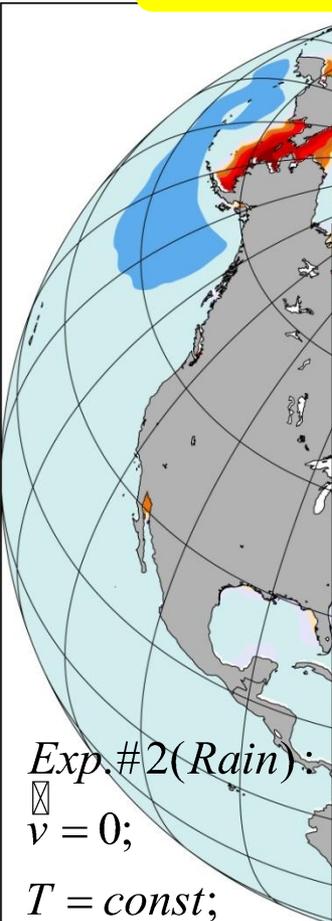
Model parameters :

$1/4^\circ \times 1/4^\circ \times 14$

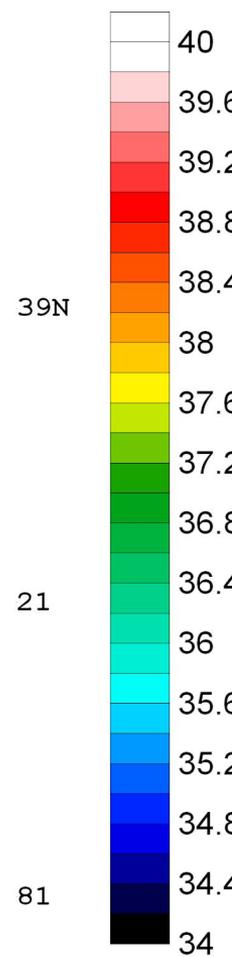
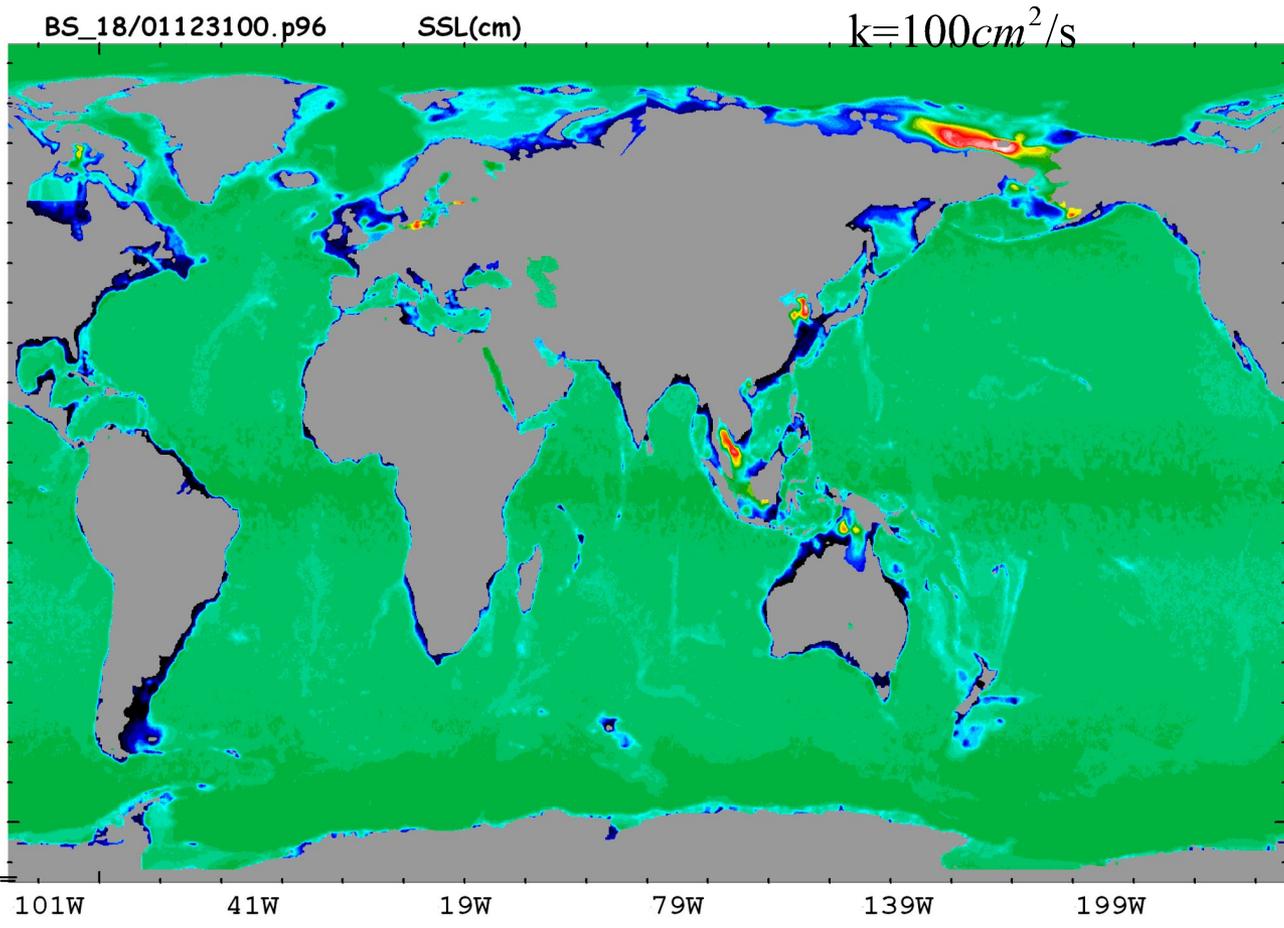
$a_{lapl} = 5000 \text{ cm}^2/\text{s}$

$a_{heat} = 1000 \text{ cm}^2/\text{s}$

$k = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$



Exp.#2(Rain):  
 $v = 0;$   
 $T = const;$   
 $S = const;$   
 air - sea fluxes = 0;  
 $P = 1 \text{ mm/day}$



## 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО

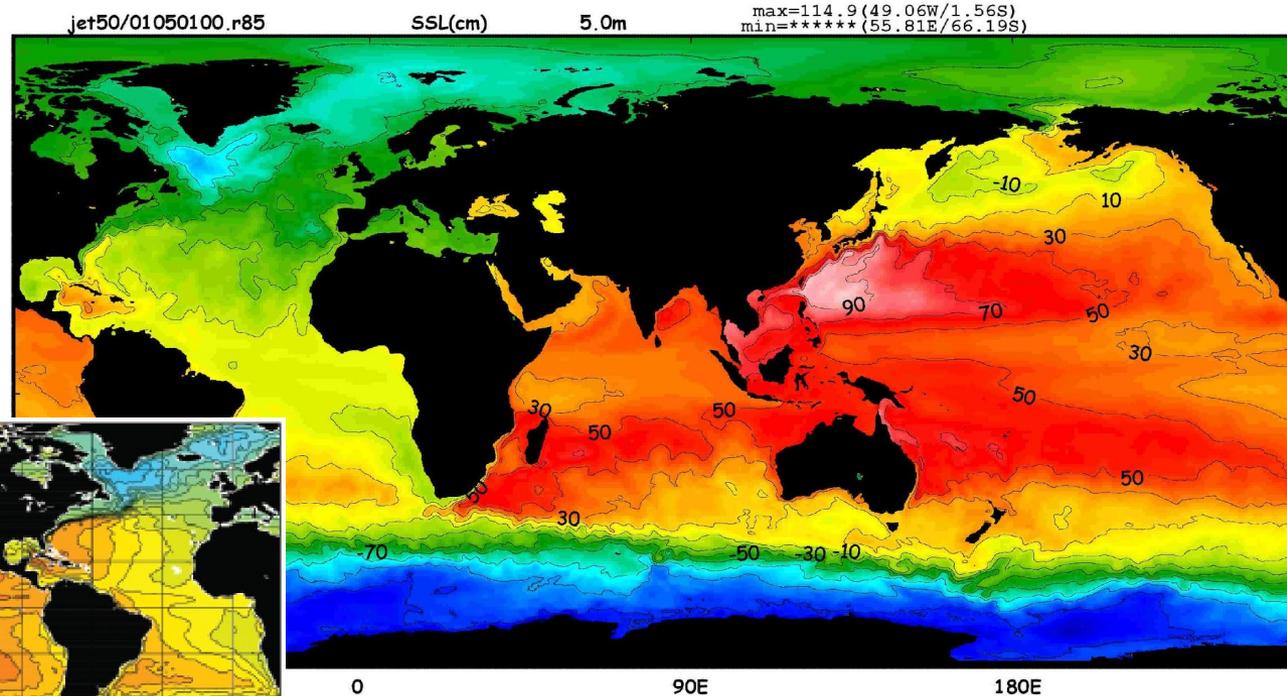


model	resolution	resolution	A_horizontal	K_verical	dt	clock time/model year
#1	60' x 30' x 32	100	5000/1000	200.-1.	12'	
#2	15' x 15' x 32	20	1250/250	200.-1.	6'	
#3	7,5' x 7,5' x 32	10	625/125	200.-1.	2'	60h (1393 процессоров)

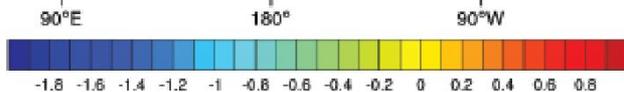
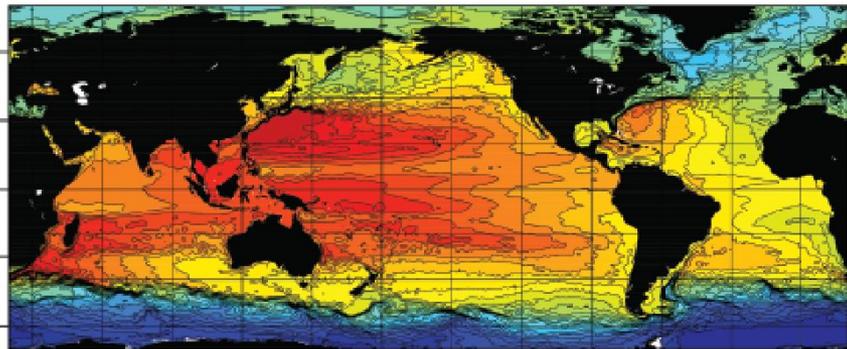
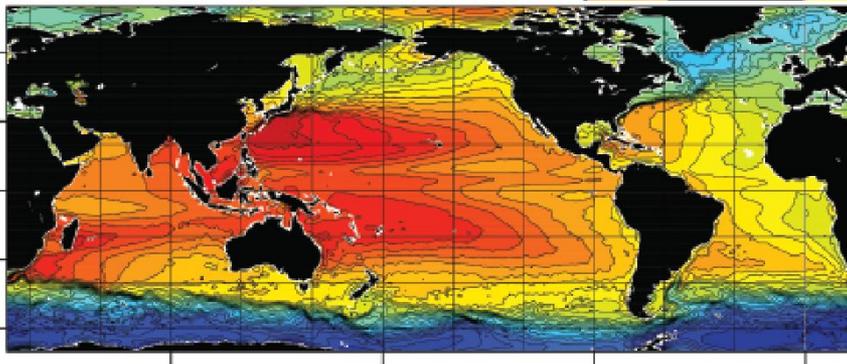
# 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО

Уровень Мирового океана,

(Модель ирового океана 1/10 x 1/10 x 49)

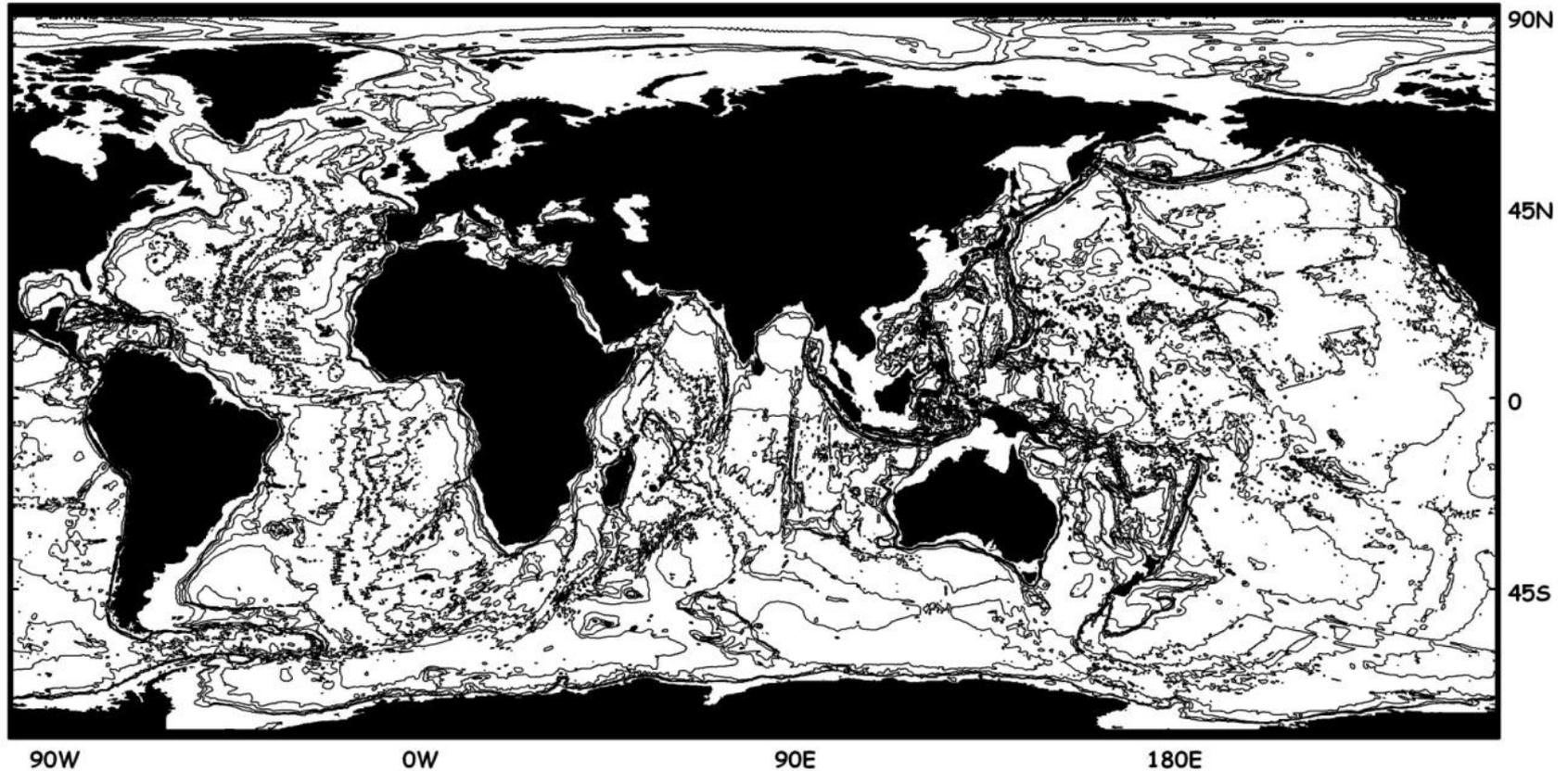


Mean sea surface height (cm) derived from surface drifters (Maximenko, Niiler, 2005)



Non-data assimilative HYCOM (5' x 5') run (Chassignet et al., 2009)

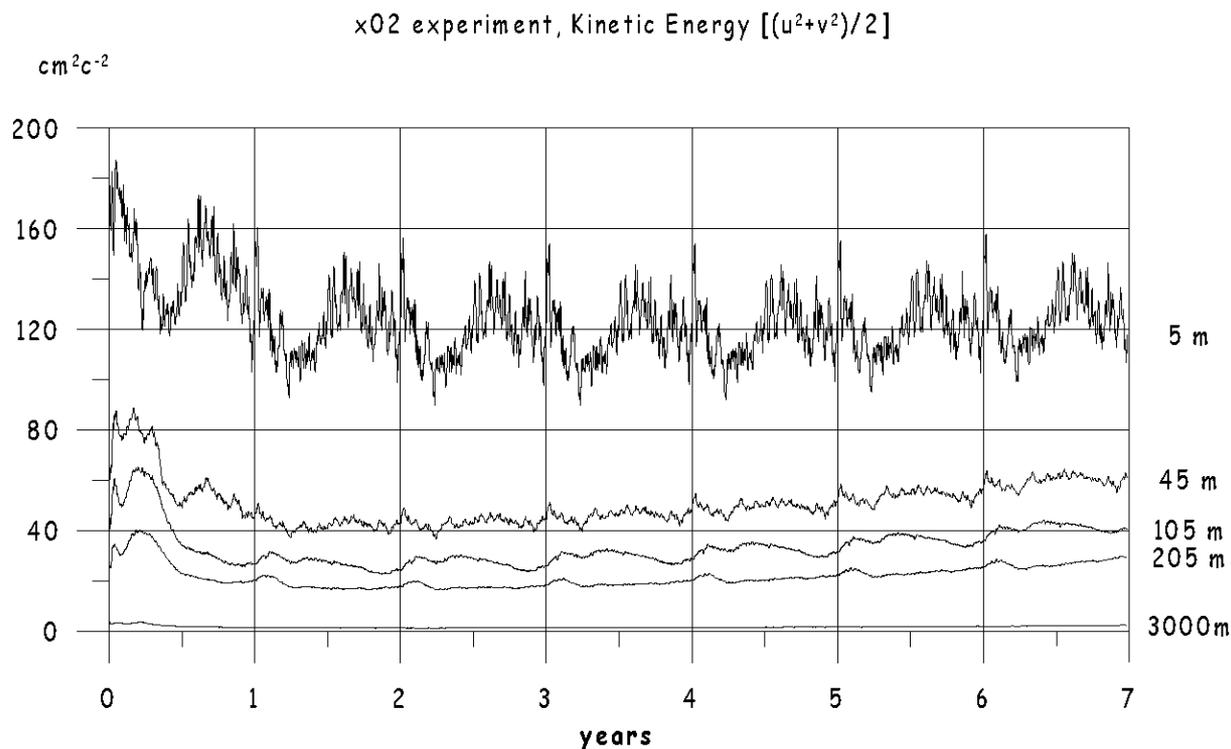
## 5. Модель Мирового океана $1/10 \times 1/10 \times 49$ ИВМ-ИО



Bottom topography,

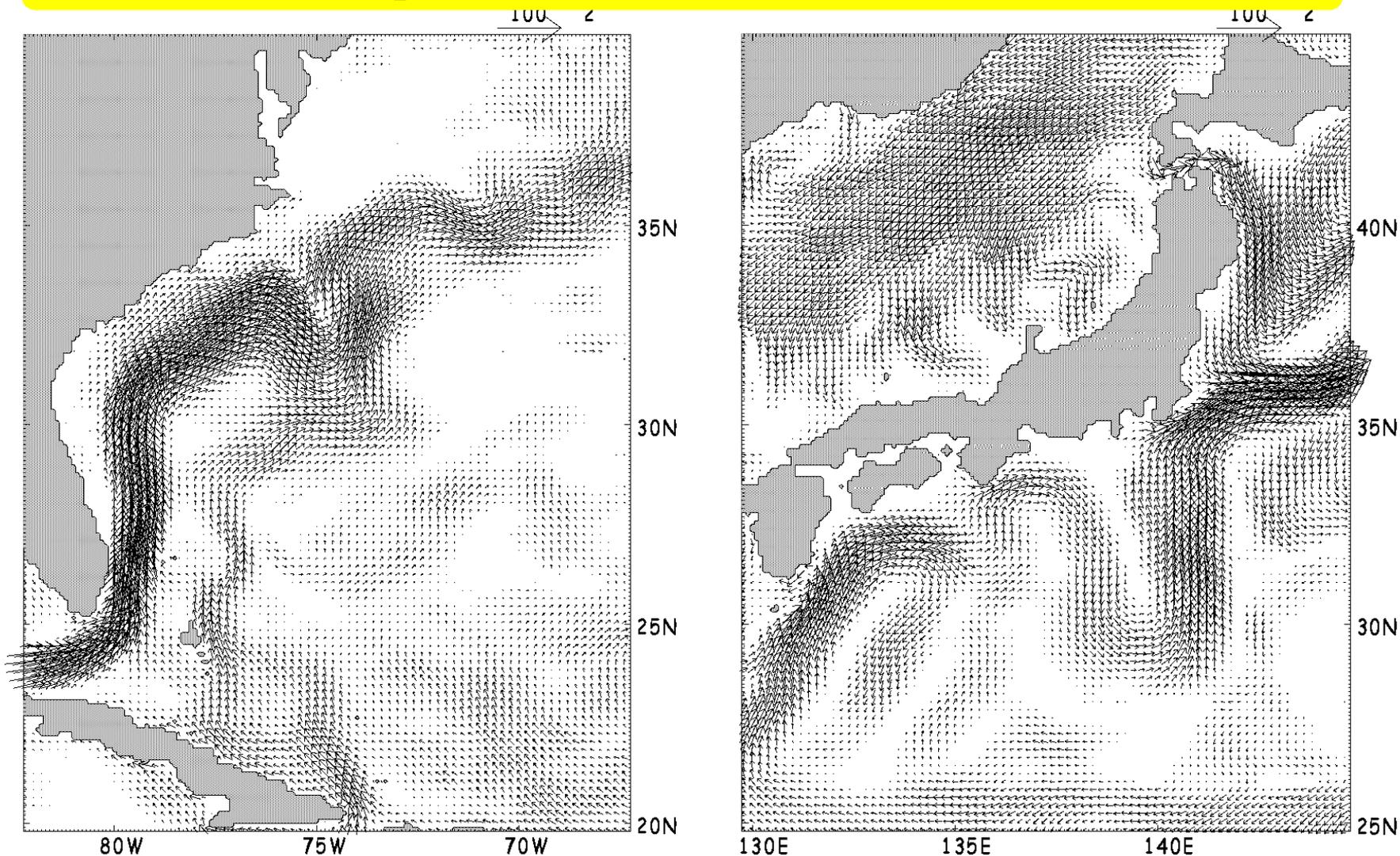
(World ocean model  $1/10 \times 1/10 \times 49$  developed in INM & IO RAS)

## 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО



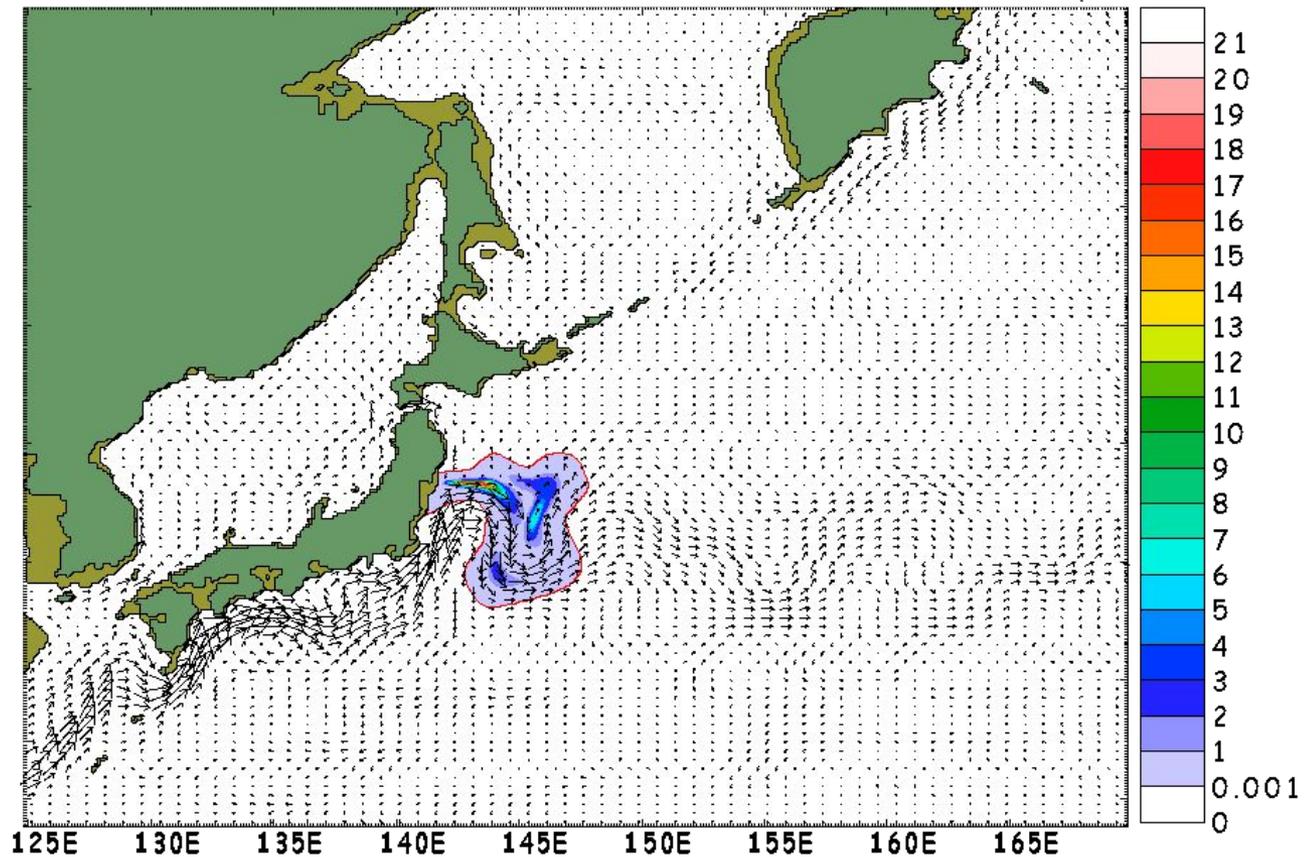
Evolution of Kinetic Energy

## 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО



Течения Гольфстрим и Куро시오 (модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49)

## 5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО



Перенос пассивной примеси от АЭС Фукусима. Состояние через 30 суток после начала поступления примеси. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49.

## 6. Проблемы

### 6.1. Реализации на параллельных компьютерах

- полная параллелизация обменов данными между памятью и файлами
- полная параллелизация подкачки данных в модель (атмосферные условия, интерполяция)
- анализ и визуализация решения

- В ИВМ РАН и ИО РАН разработана модель Мирового океана высокого пространственного разрешения. Это первая вихреразрешающая модель глобального океана в России.
- Разработаны вычислительные технологии решения модели океана на массивно параллельных компьютерах с распределенной памятью