



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 ~ 270 x массы атмосферы

Вес 10 м столба воды \sim вес всего столба атмосферы

Теплоемкость воды ~ 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

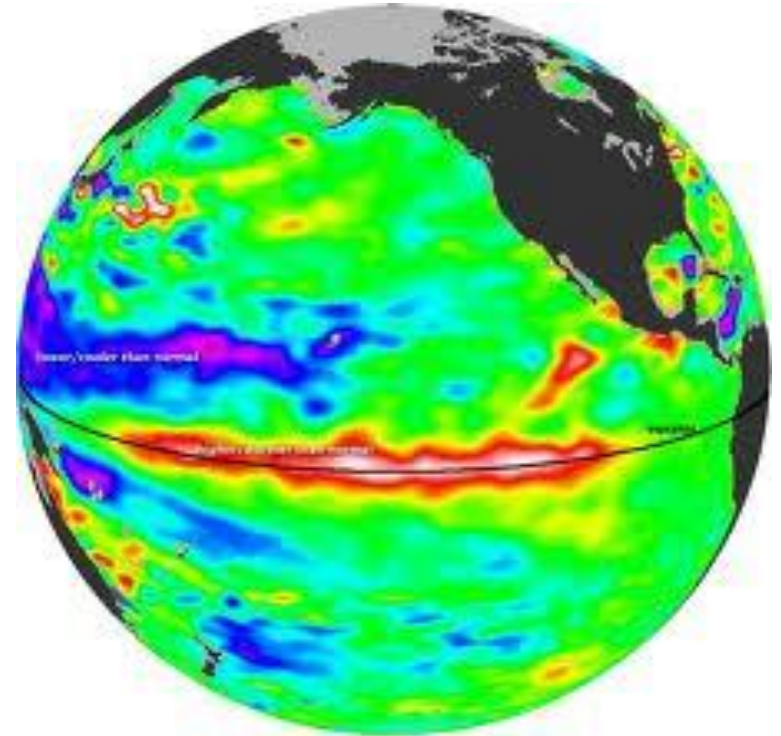
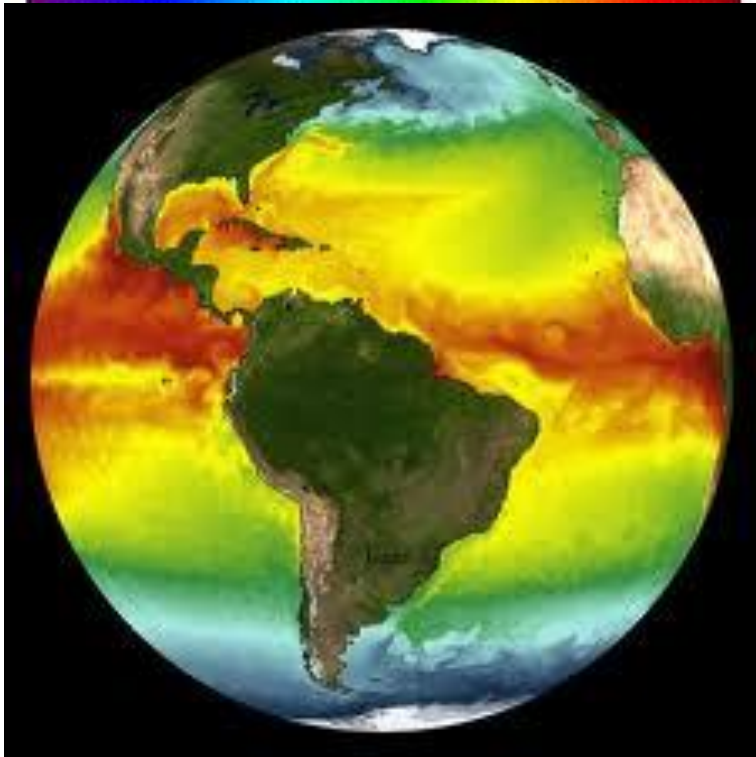
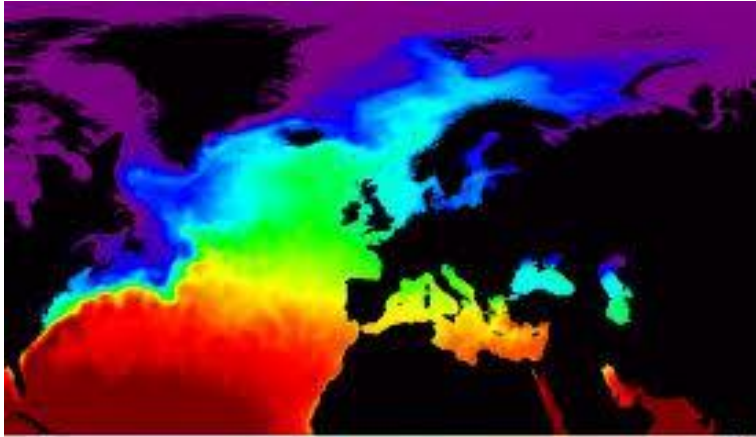
1. Цель исследования

Создание модели термогидродинамических процессов Мирового океана

Модель Мирового океана предназначена для

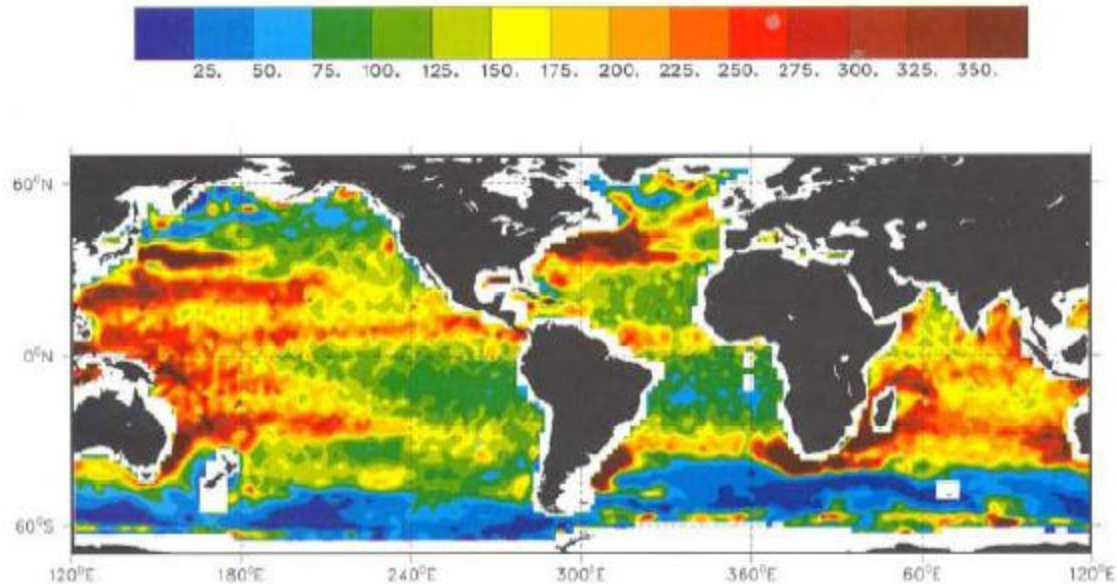
- краткосрочного прогноза погоды океана
- прогноза сезонной и межгодовой изменчивости состояния климата Земли (в рамках совместной модели океан-лед-атмосфера)

2. Важнейшие физические процессы



2. Важнейшие физические процессы

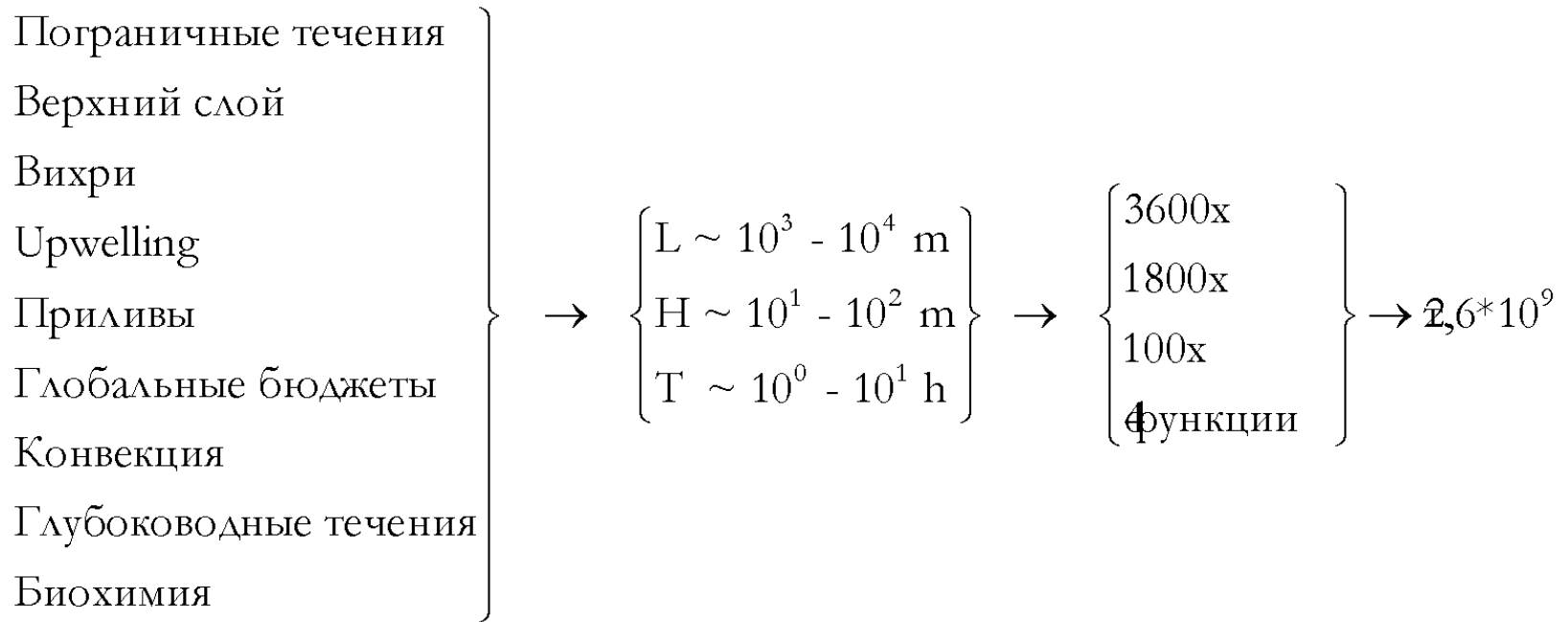
Отношение кинетической энергии вихрей к средней КЭ



Более 90% кинетической энергии поверхности содержится в вихрях.

(Wunsch, 2002)

2. Важнейшие физические процессы



3. Модели Мирового океана: современное состояние

модель	L	H	ССЫЛКИ
MOM4 (Modular Ocean Model)	1°	47 z	
ECCO (Estimating the Circulation & Climate of the Ocean)	1° (JPL+MIT)	46 z/23 z	
INMSOM (Институт вычислительной математики)	1° × 1/2°	40 sigma	Дианский и др., 2009
NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)	1/4°	50 z	
NCOM (Navy Coastal Ocean Model)	1/8°	40 sigma/z	
POP (Parallel Ocean Model)	1/10°	40 z	Smith et al., 2000; Le Traon et al., 2002; Rainville et al., 2007
OFES (Ocean General Circulation Model)	1/10°	54 z	Masumoto et al., 2004; Du et al., 2005; Aoki et al., 2007
MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model)	1/12°	16 z	Paiva et al., 1999; Chassignet & Garraffo, 2001; Treguler et al., 2005
HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)	1/12°	32 l	Chassignet et al., 2006; Kelly et al., 2007
NLOM (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 ⁰ : 5-10 days/hr	18 - 29	8.5 - 14	4.0 - 6.3	1.8 - 2.9	0.85 - 1.4
Seasonal ¹ : 50-100 days/day	17 - 28	8.0 - 13	3.7 - 5.9	1.7 - 2.8	0.80 - 1.3
Decadal ¹ : 5-10 yrs/day	57 - 91	27 - 42	12 - 20	5.7 - 9.1	2.7 - 4.2
Climate Change ² : 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

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

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

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

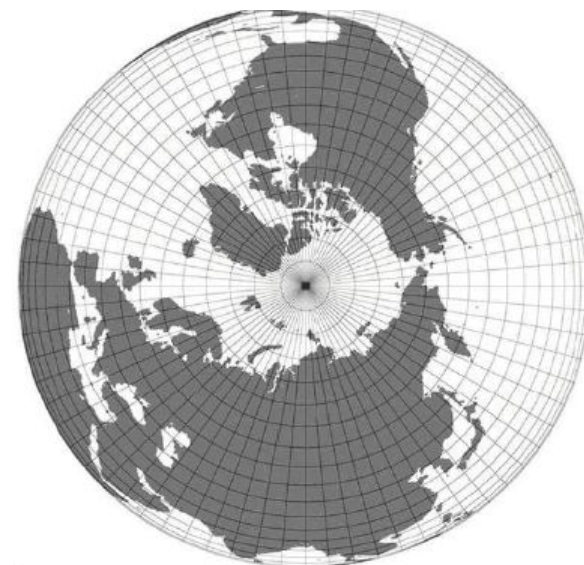
$$G_L \text{ или } \left\{ \begin{array}{l} u = u^{in} \\ v = v^{in} \\ T = T^{in} \\ T = T^{in} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} u = u^{out} \\ v = v^{out} \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{array} \right.$$

4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

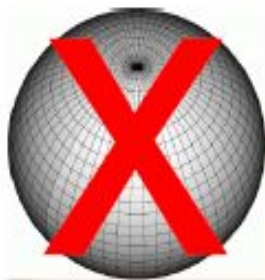
4.2. Системы координат. Сетки.

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



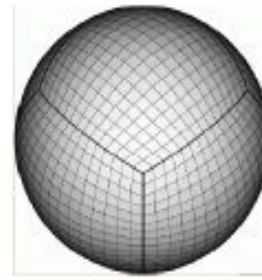
lat-long grid



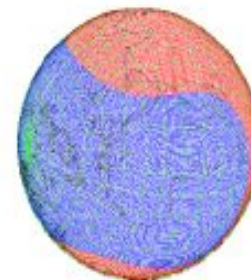
icosahedral grid
(triangles)



icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere

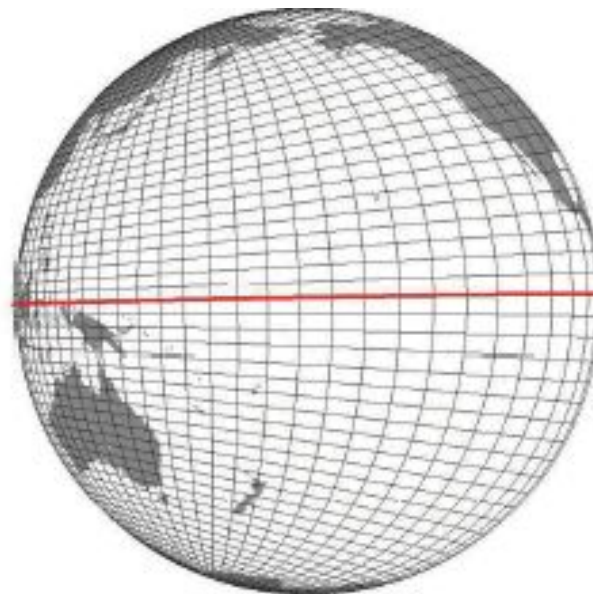


Yin-Yang grid

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,
MISCOM, NEMO, ИВМ-
ИО

4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

4.3. Быстрые и медленные движения.

Система уравнений включает спектр движений со скоростями:

Δ/Δ - скорости течений;

Δ/Δ - скорости бароклинических гравитационных волн

Δ/Δ - 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

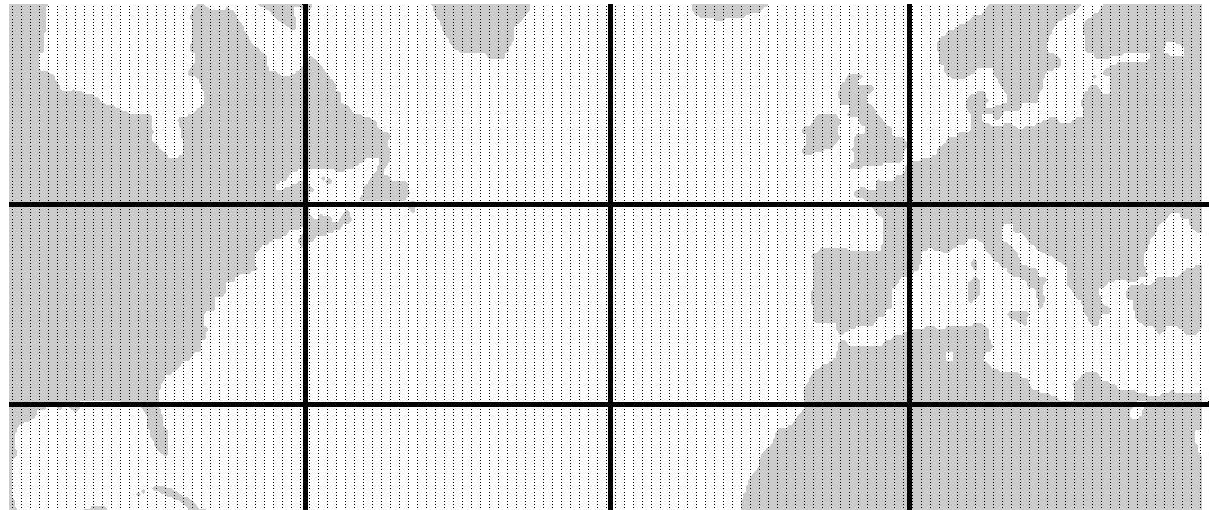
Что нужно сделать, чтобы решать модель на параллельных компьютерах с распределенной памятью

- 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

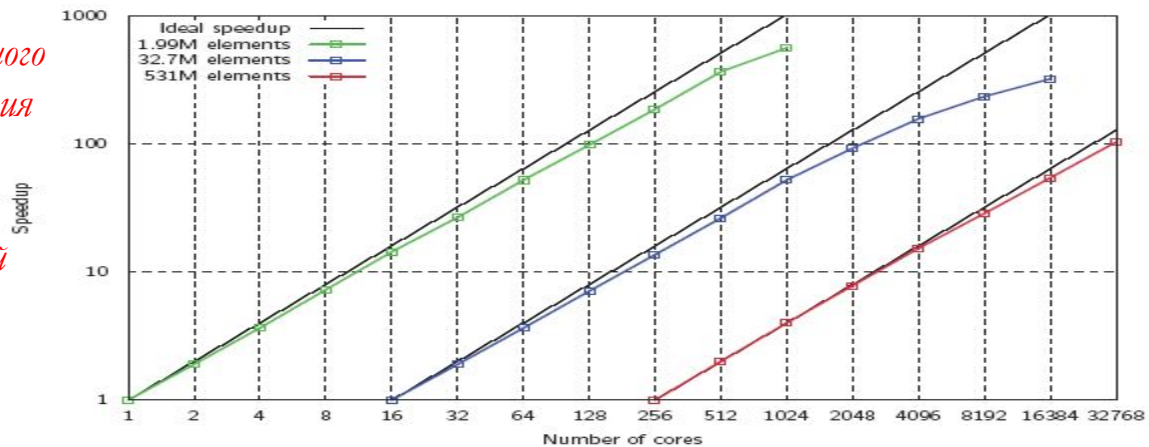
2-d декомпозиция области



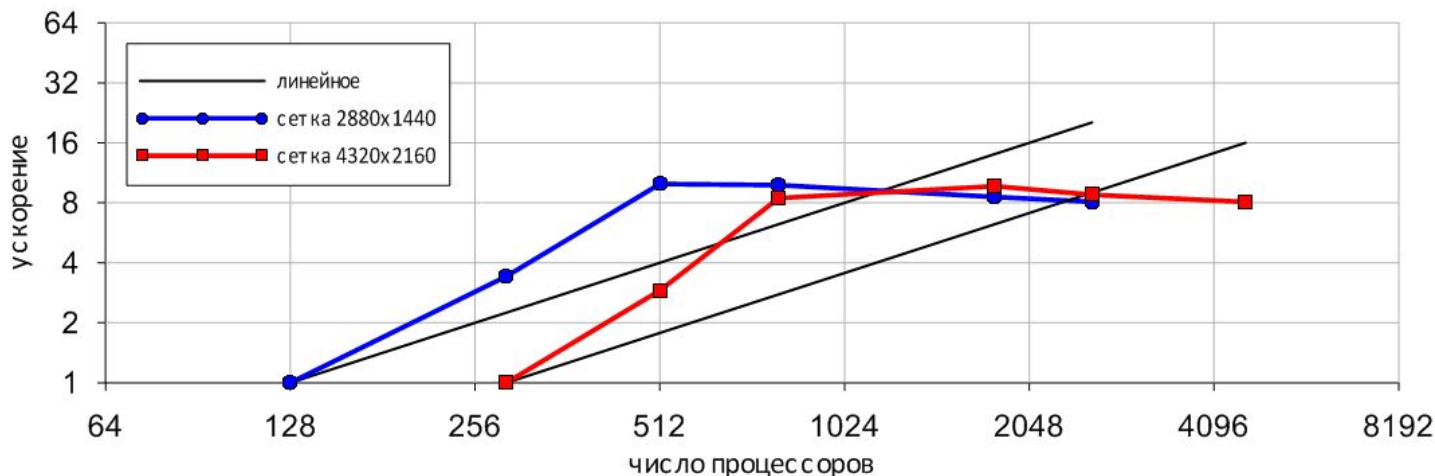
4. Модель Мирового океана ИВМ-ИО

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

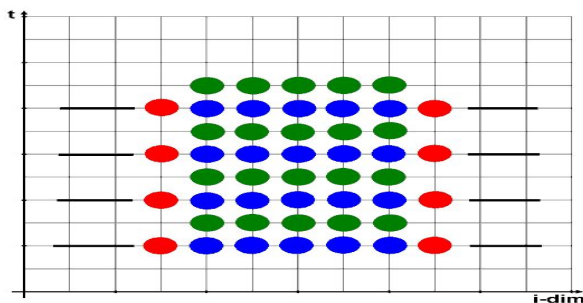


Схема исходного алгоритма

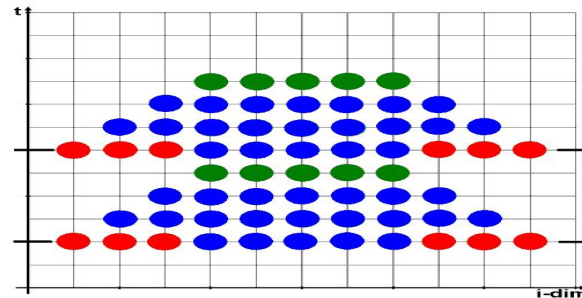
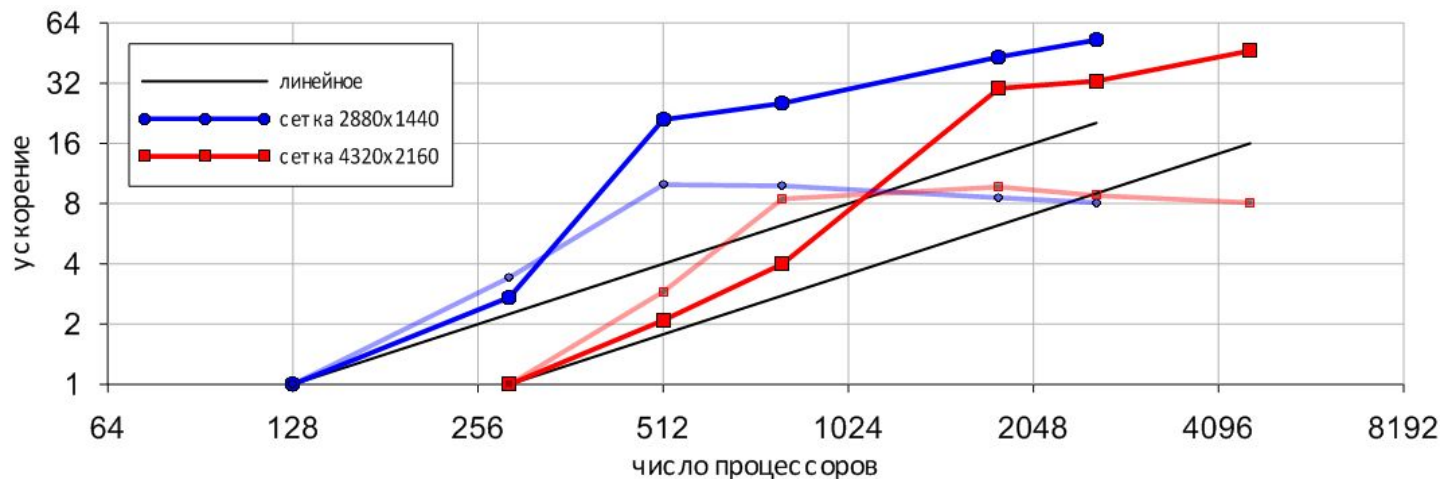


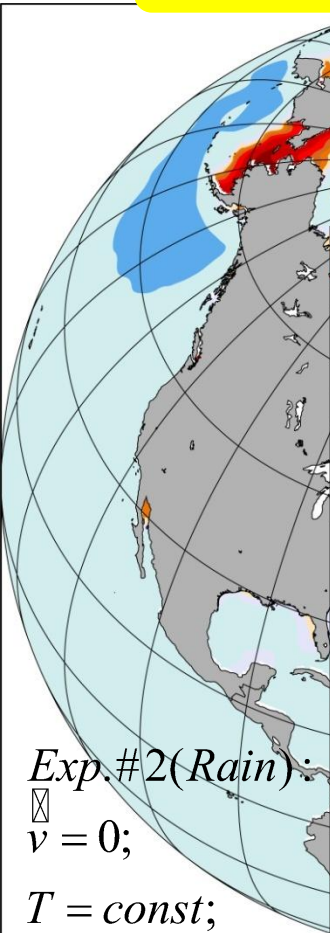
Схема модифицированного алгоритма

(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):

$v = 0;$

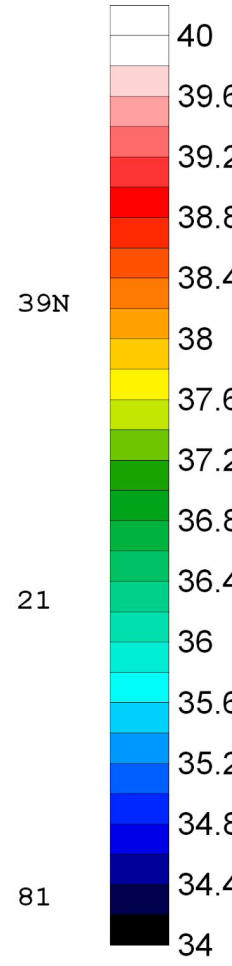
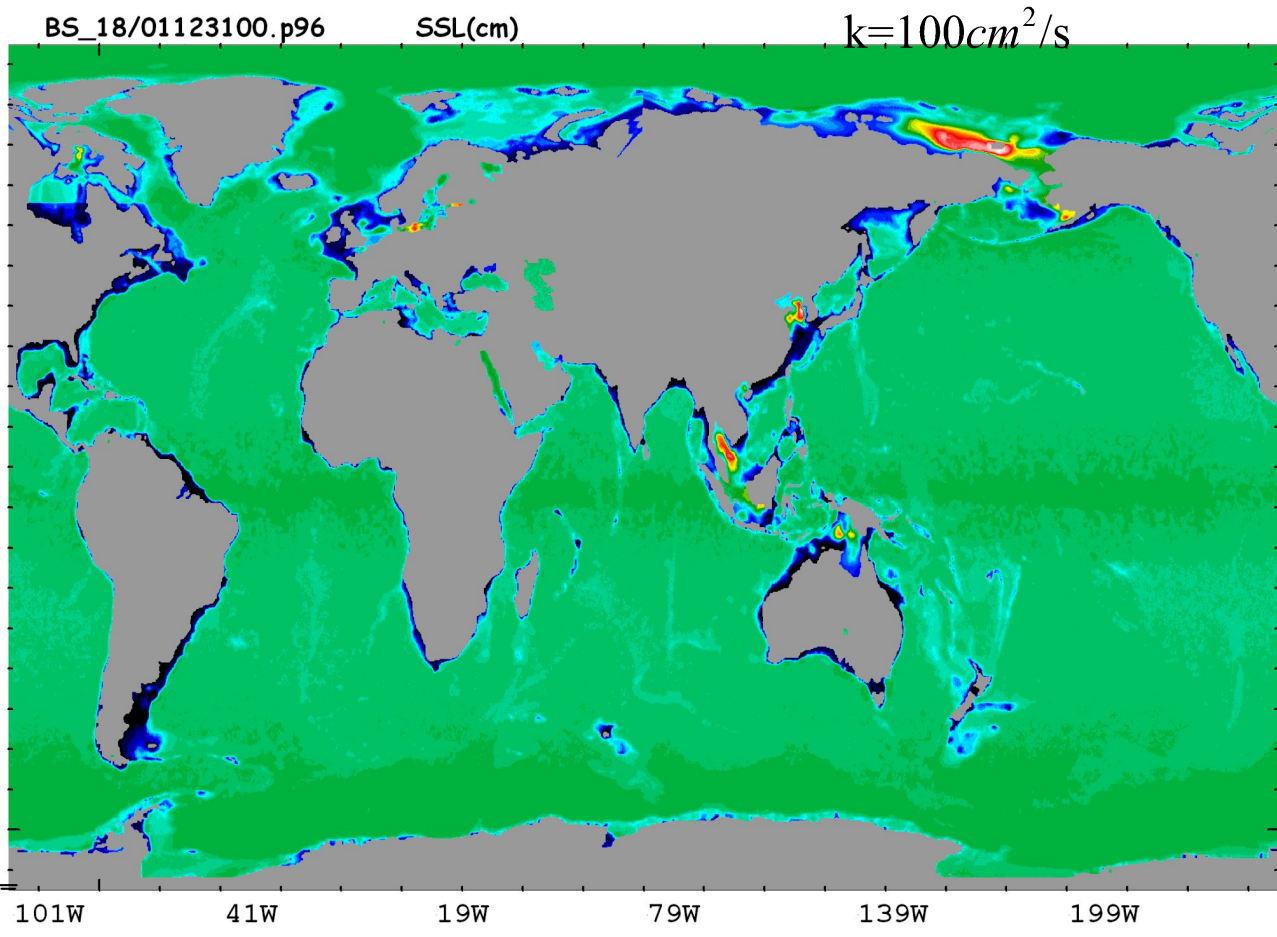
$T = const;$

$S = const;$

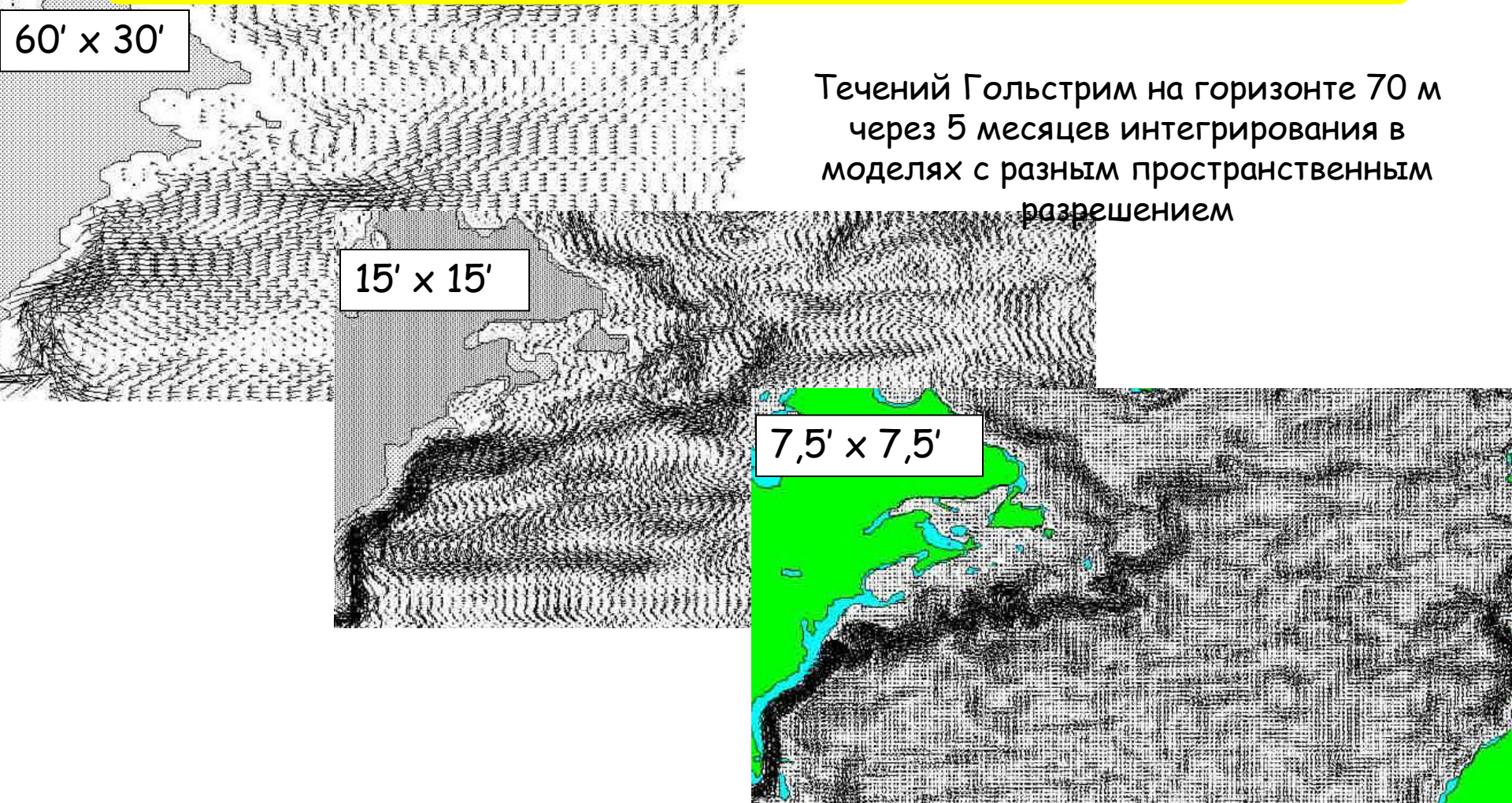
air - sea fluxes = 0;

$P = 1 \text{ mm/day}$

22 24 26



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

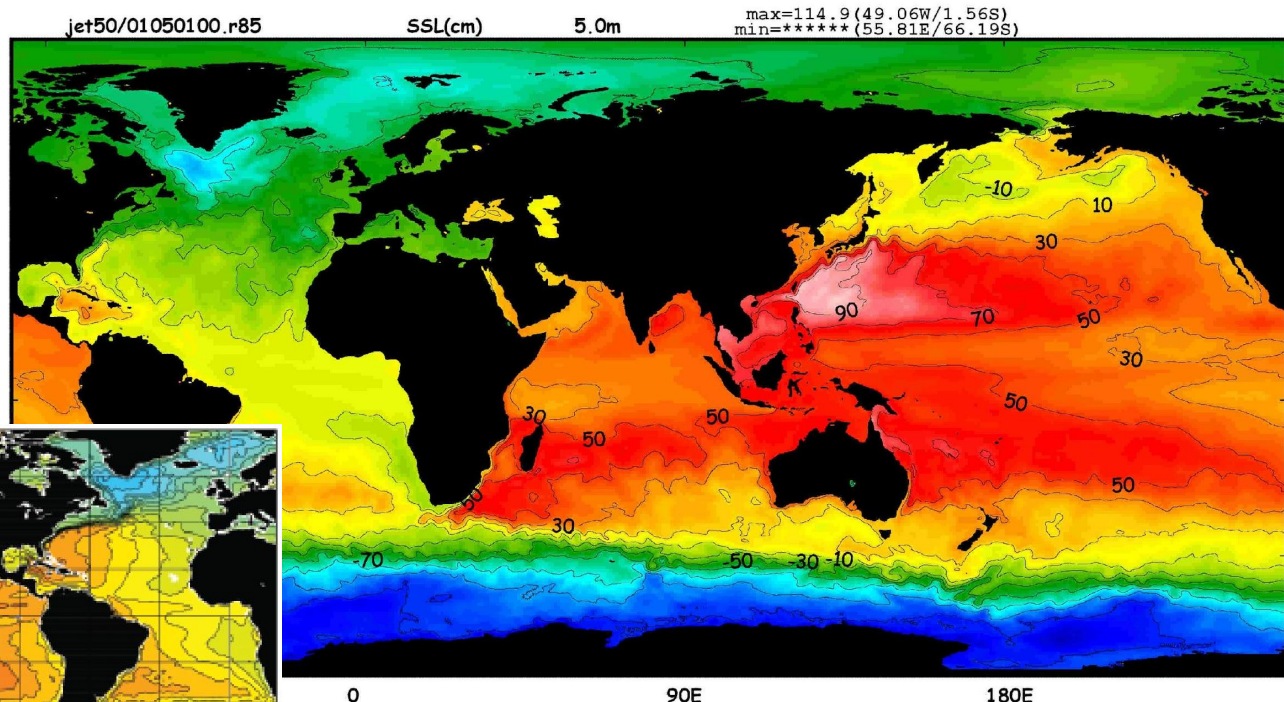


model	resolution	resolution	A_horizontal	K_verical	dt	clock time/model year
#1	60' x 30' x 32	100	5000/1000	200.-1.	12'	
#2	15' x 15' x 32	20	1250/250	200.-1.	6'	
#3	7,5' x 7,5' x 32	10	625/125	200.-1.	2'	60h (1393 процессоров)

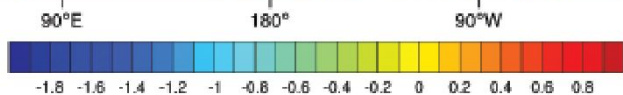
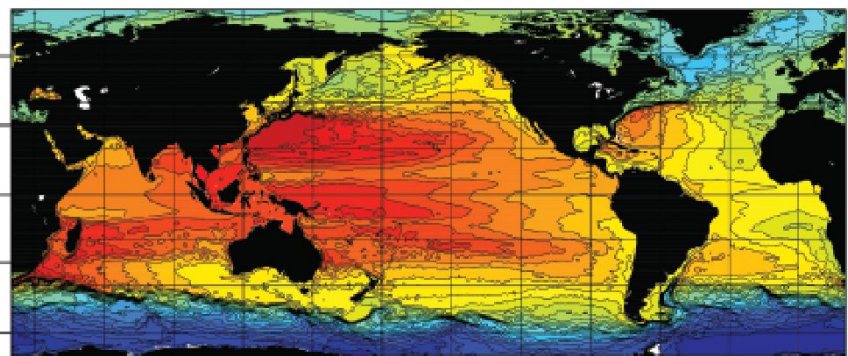
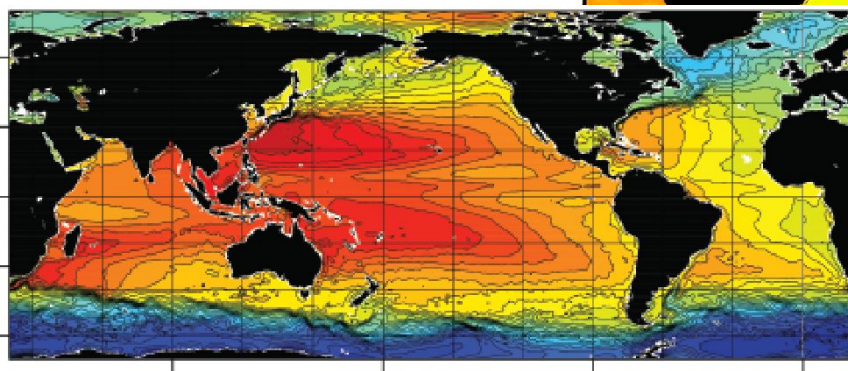
5. Модель Мирового океана 1/10 x 1/10 x 49 ИВМ-ИО

Уровень Мирового океана,

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

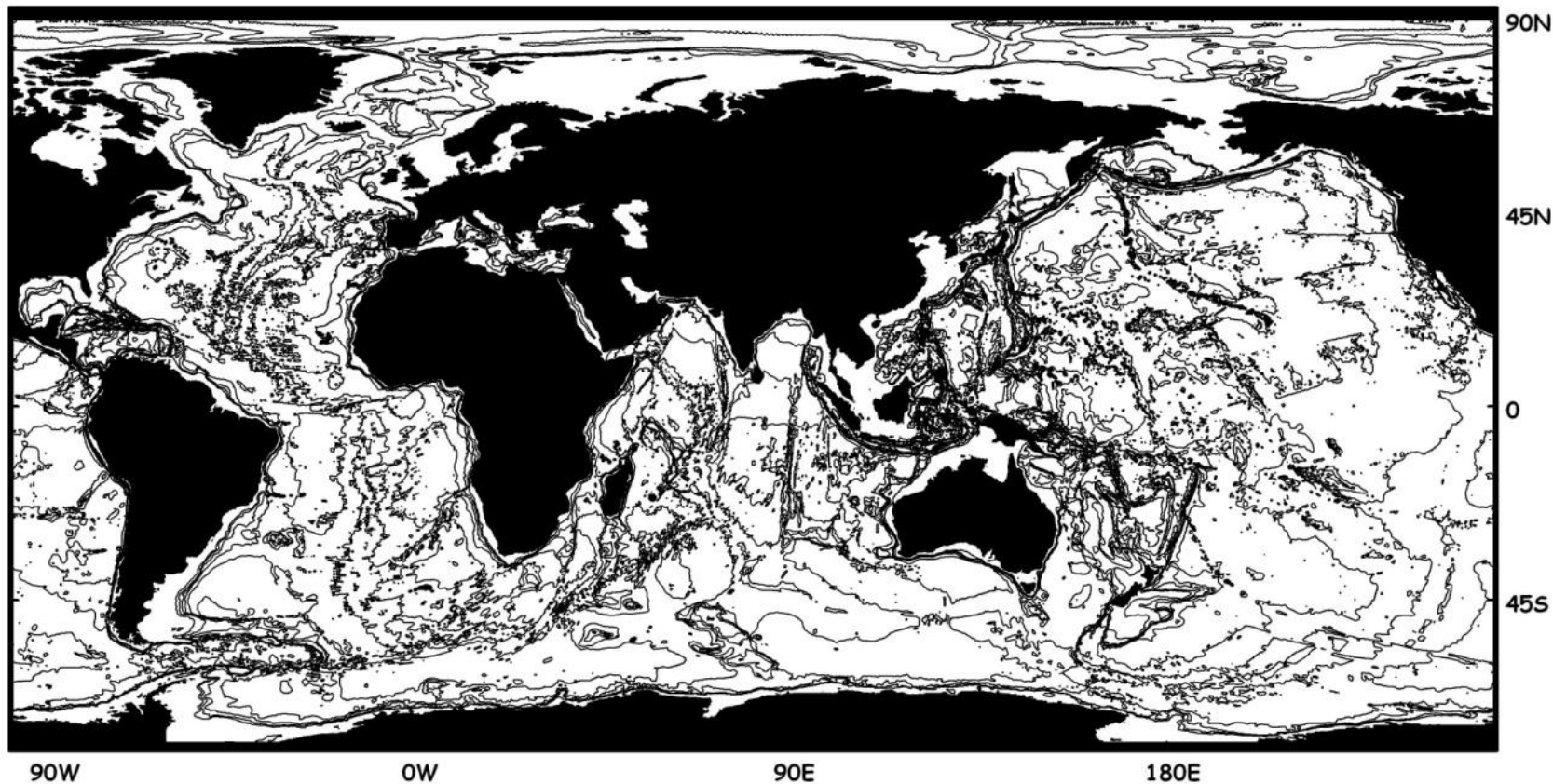


Mean sea surface height (cm) derived from surface drifters (Maximenko, Niiler, 2005)



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

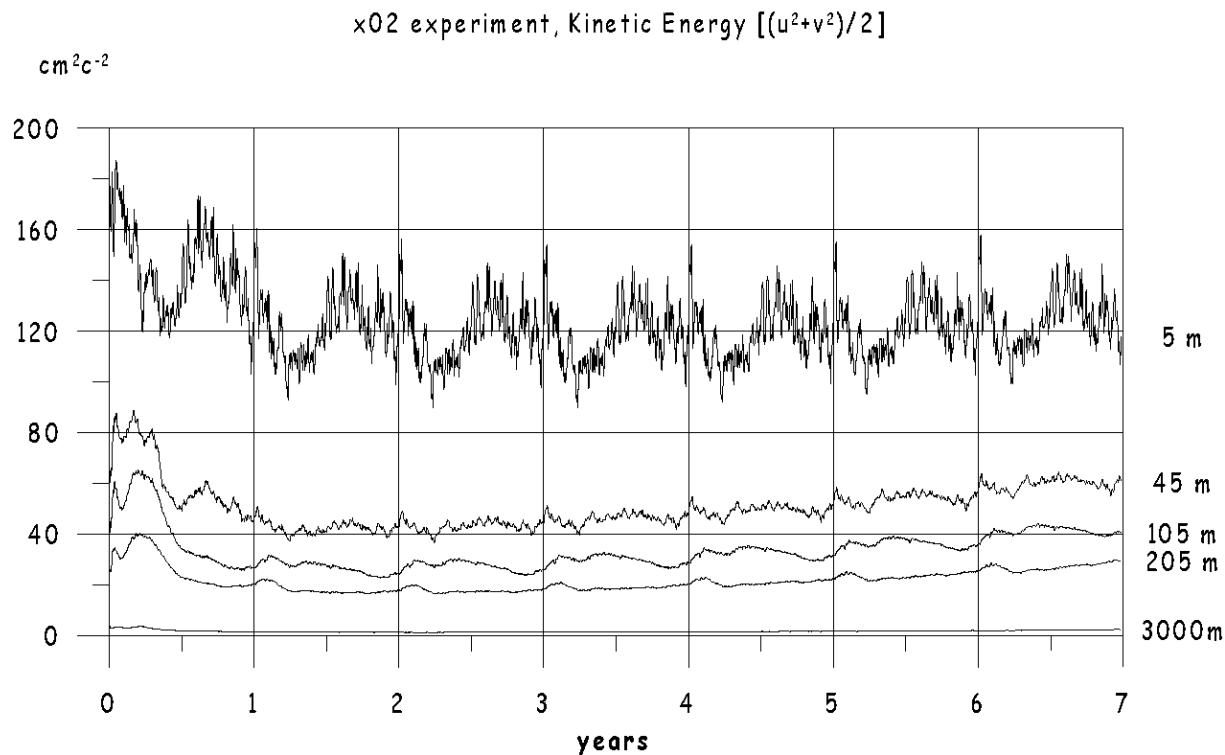
5. Модель Мирового океана $1/10 \times 1/10 \times 49$ ИВМ-ИО



Bottom topography,

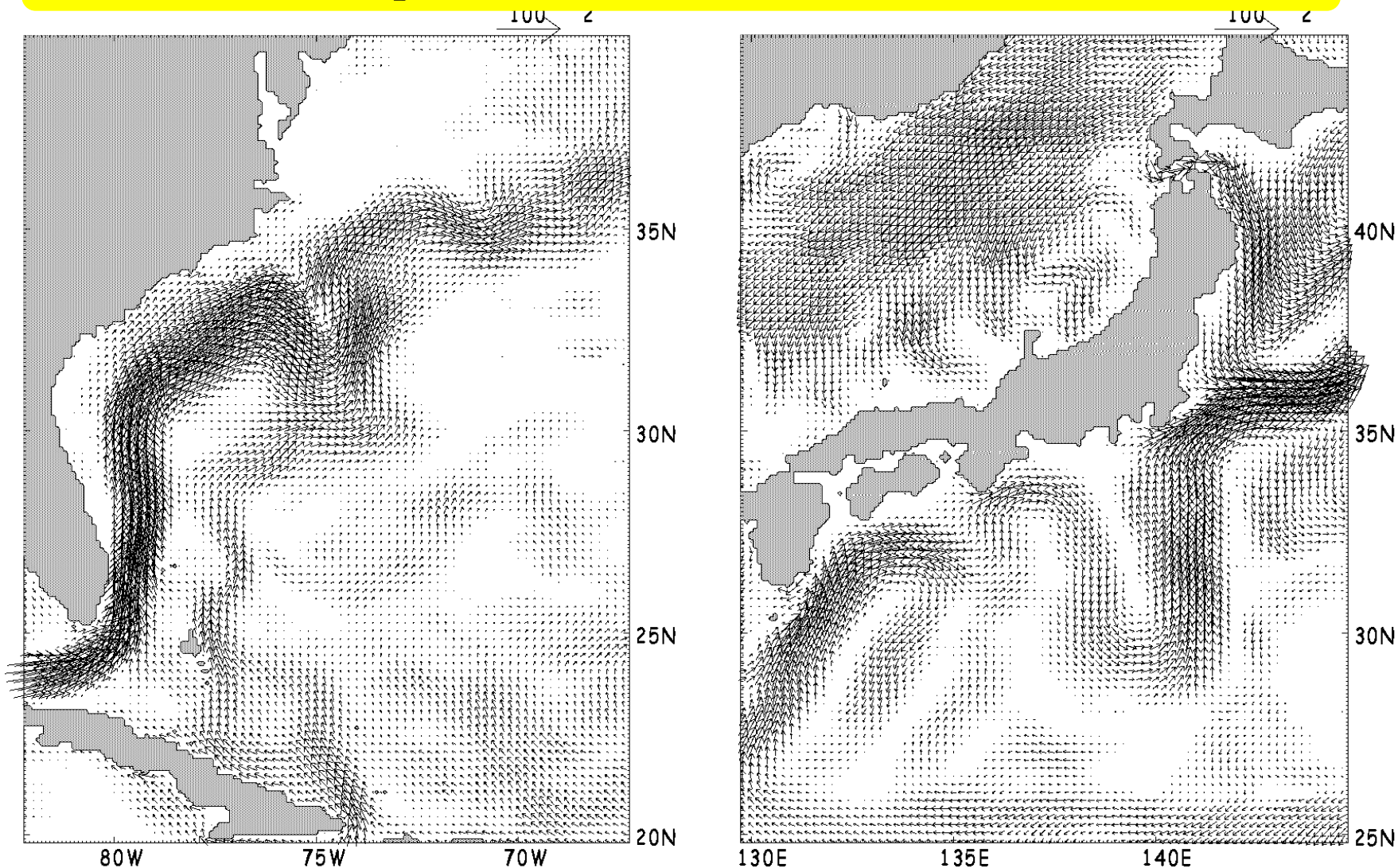
(World ocean model $1/10 \times 1/10 \times 49$ developed in INM & IO RAS)

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



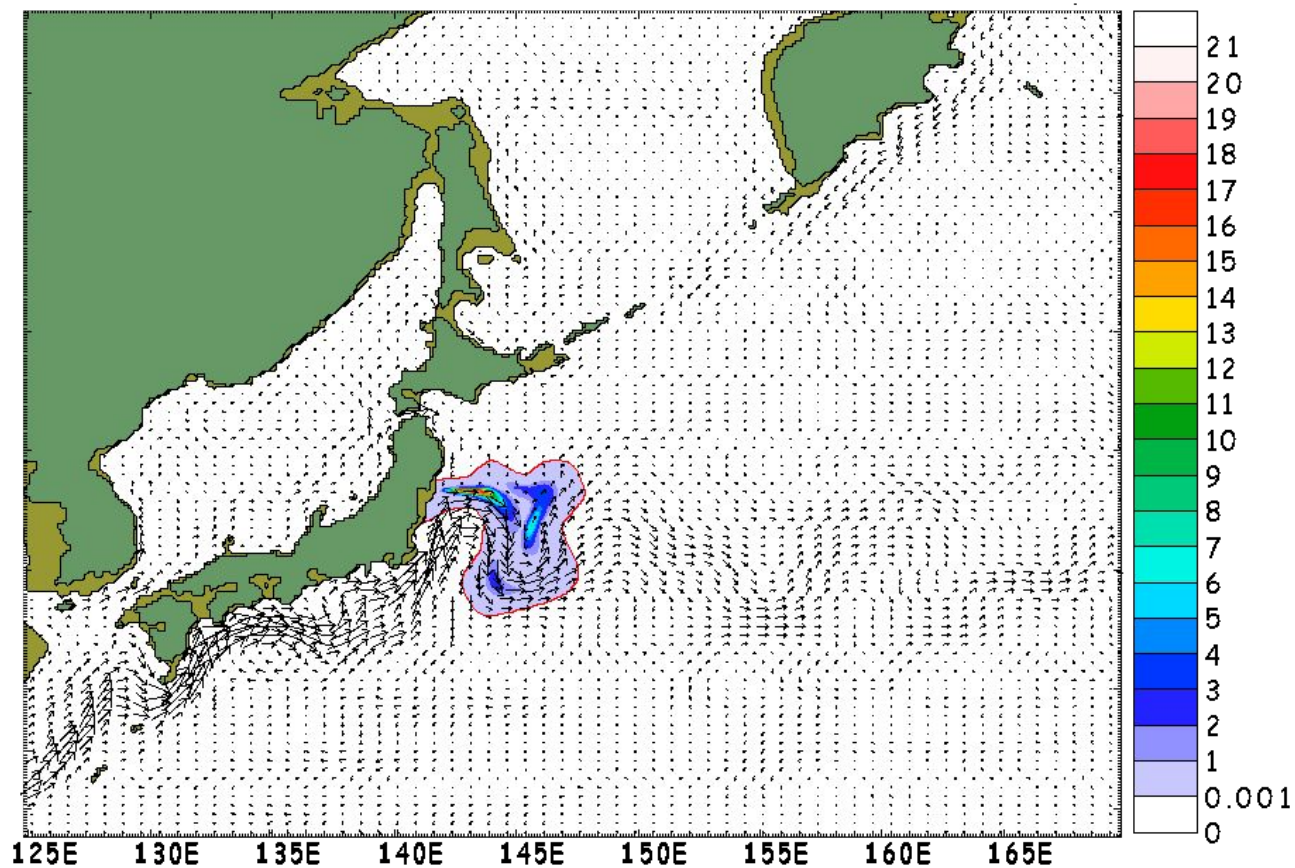
Evolution of Kinetic Energy

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