

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРКТИКИ И СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ:

*МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫЧИСЛЕНИЙ И ОБРАБОТКА
РЕЗУЛЬТАТОВ*

Платов Г.А., д.ф.-м.н.



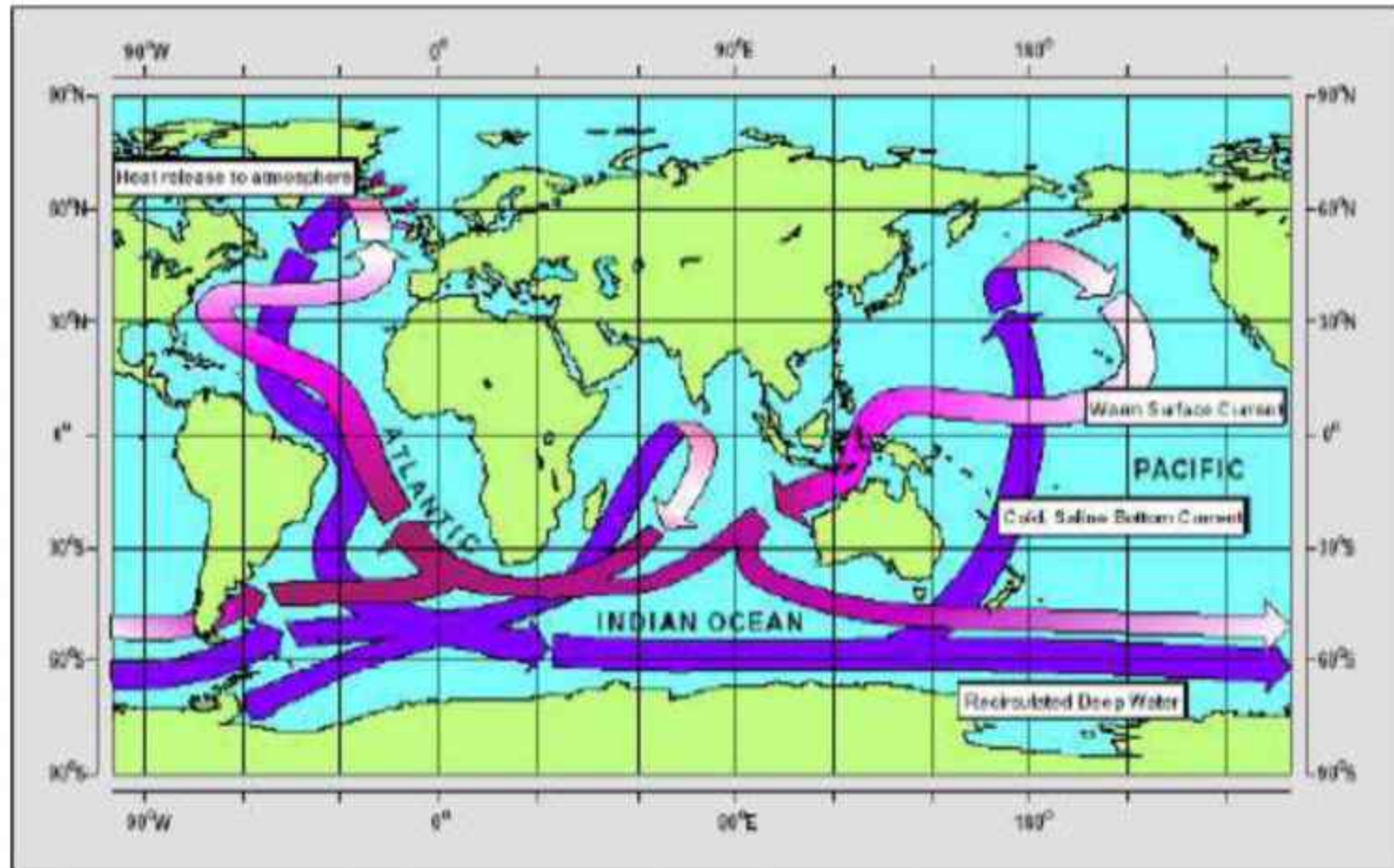


Моделируемая область



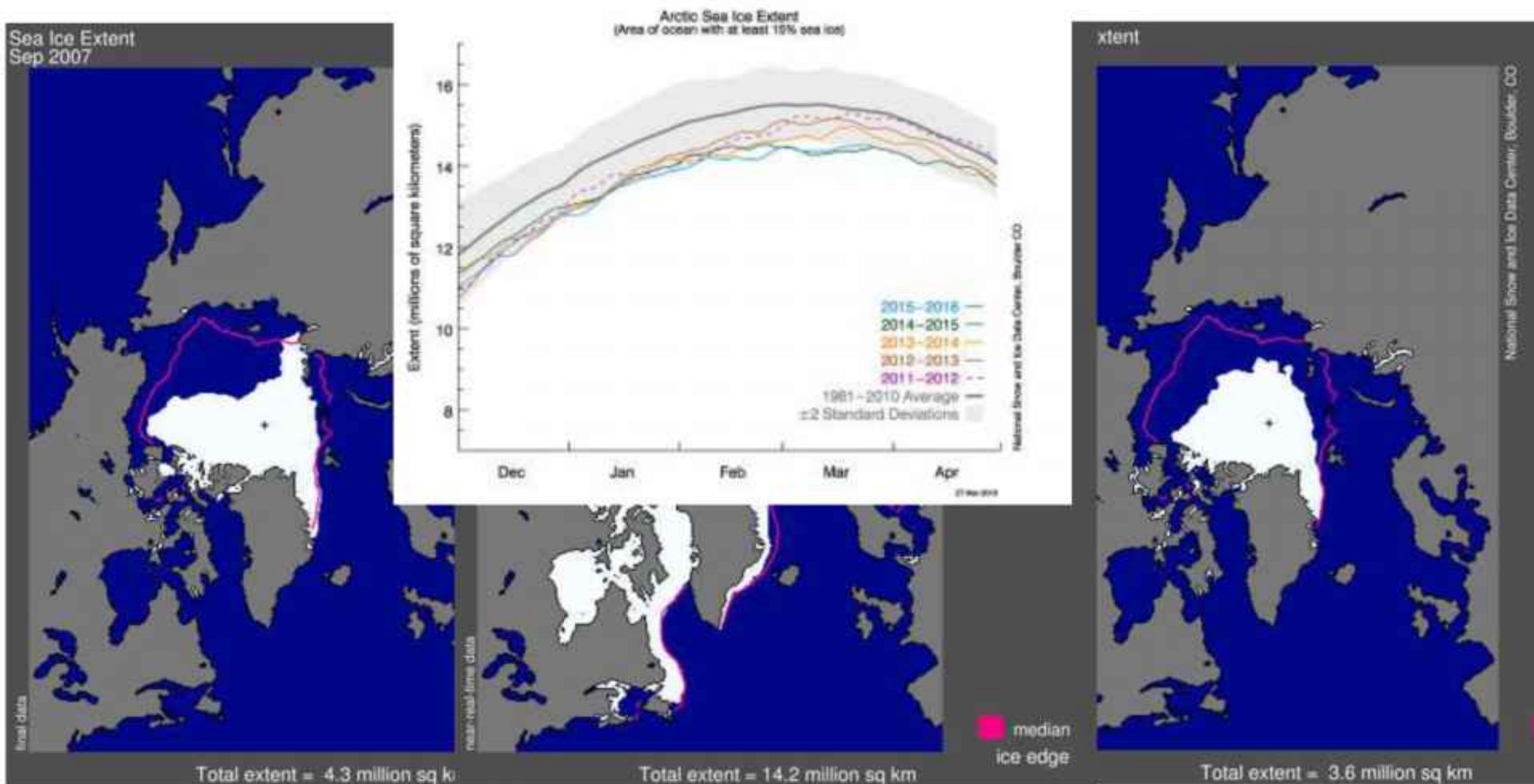
Schematic diagram of the global ocean circulation pathways, the 'conveyor' belt

(after W.Broecker, modified by E.Maier-Reimer)

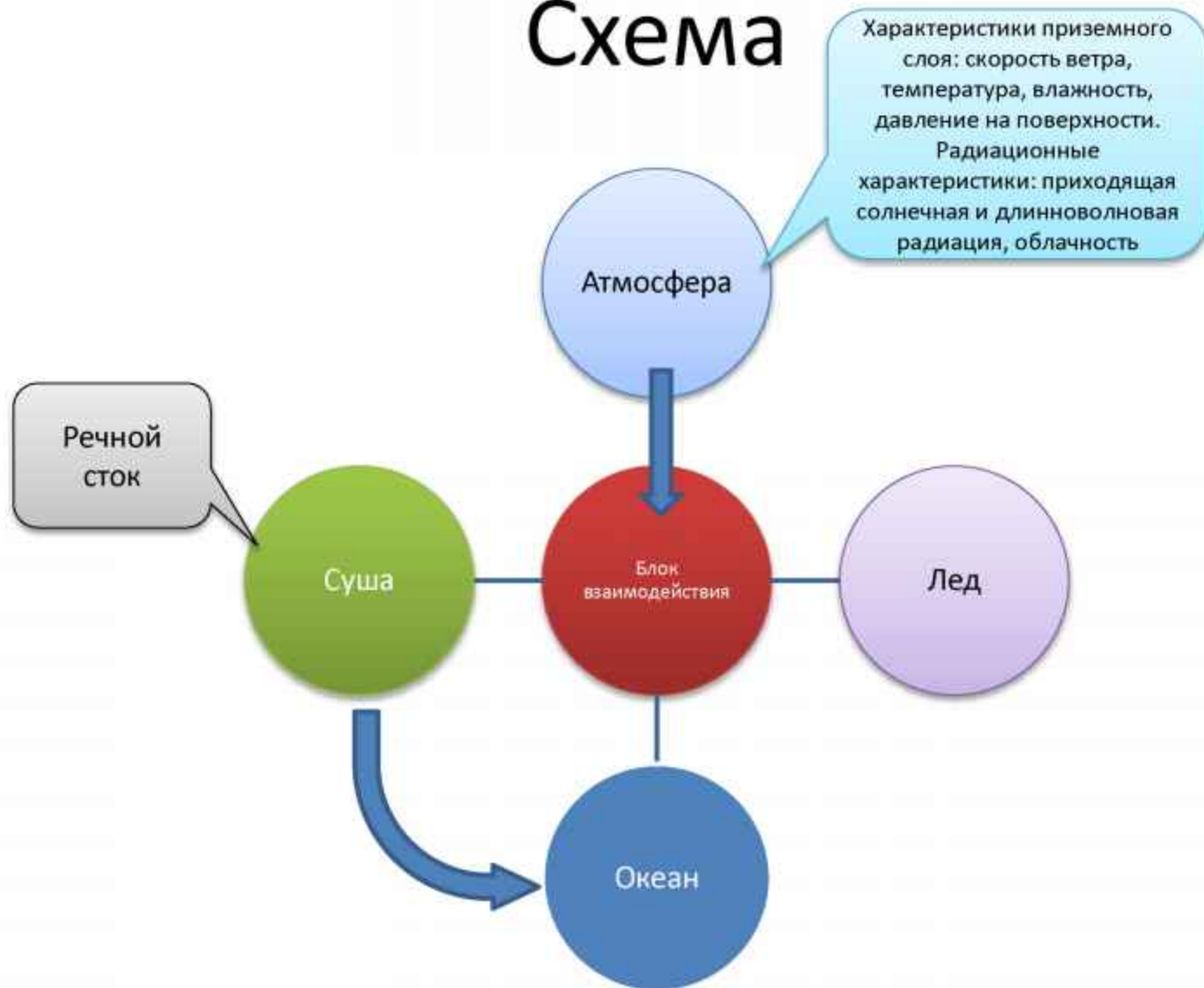


Schematic diagram of the global ocean circulation pathways, the 'conveyor' belt (after W. Broecker, modified by E. Maier-Reimer).

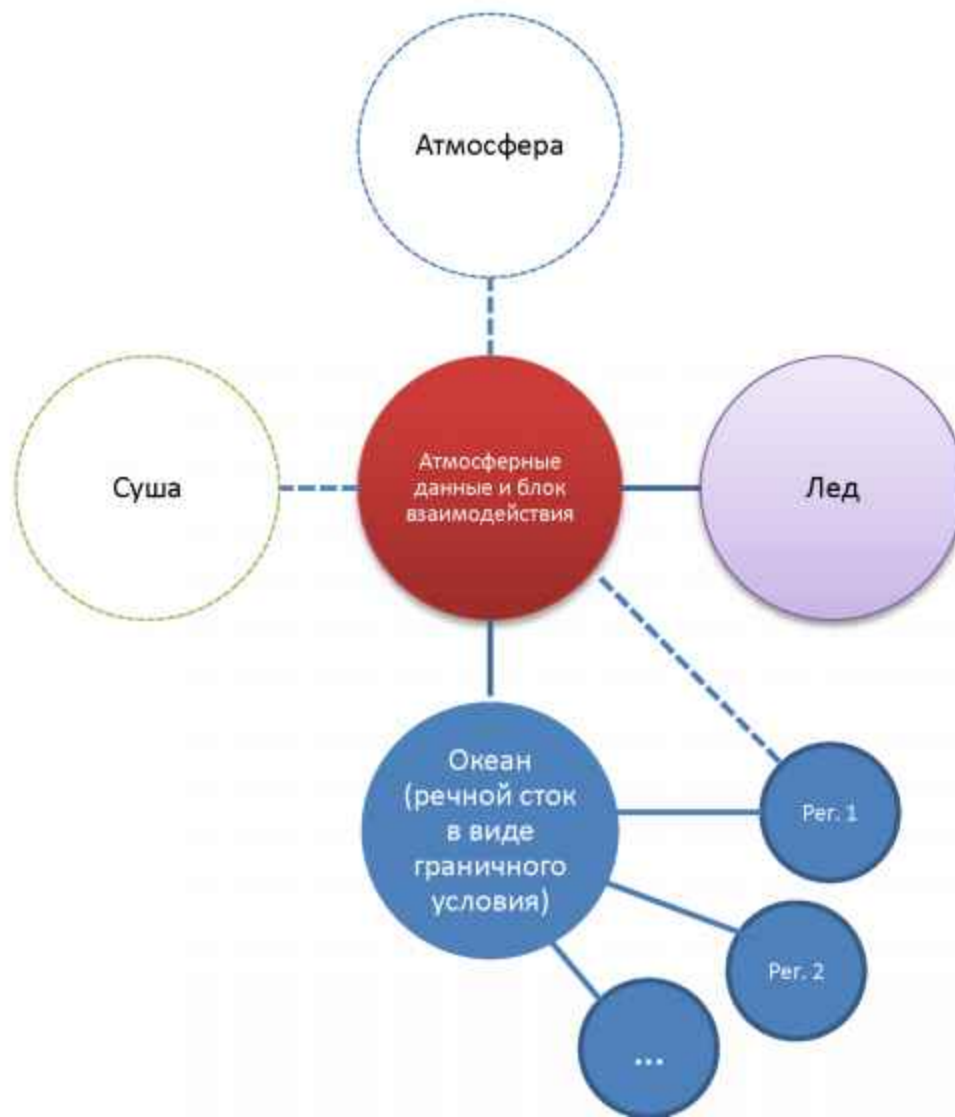
Глобальное потепление



Схема

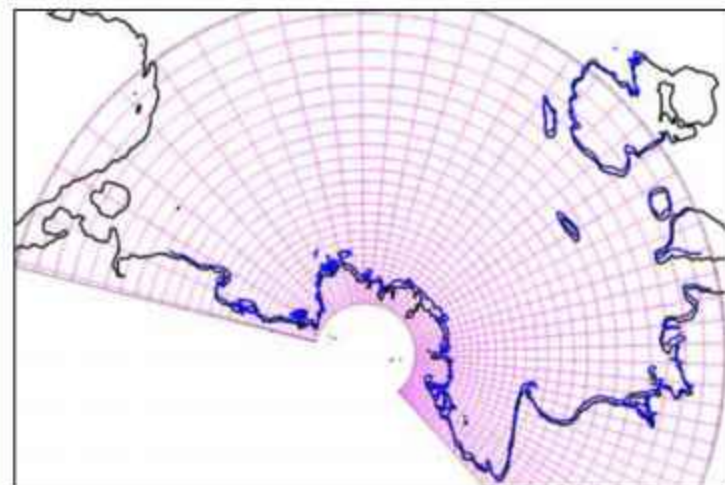


Схема



Система совместных и вложенных моделей

- Модель общей циркуляции океана ИВМиМГ СОРАН (Кузин 1982, Голубева и др. 1992, Golubeva and Platov, 2002)
- Ice model-CICE 3.1 (elastic-viscous-plastic) (W.D.Hibler, 1979, E.C.Hunke, J.K.Dukowicz, 1997, G.A.Maykut 1971, C.M.Bitiz, W.H.Lipscomb 1999, J.K.Dukowicz, J.R.Baumgardner 2000, W.H.Lipscomb, E.C.Hunke 2004)
 - Северная Атлантика и Северный Ледовитый океан
 - Горизонтальное разрешение: от 15 км (сев. полюс) до 50 км (экватор и средние широты)
 - Форсинг: реанализ NCEP/NCAR



POM (Princeton ocean model), вложенная в модель ИВМиМГ

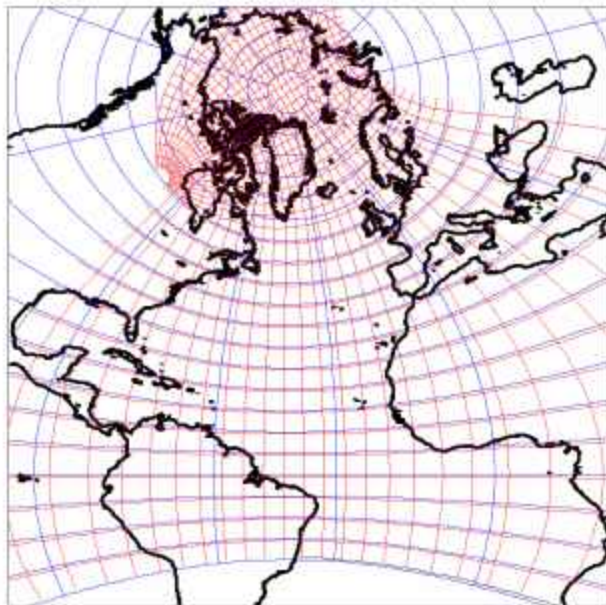
- Море Лаптевых
- Горизонтальное разрешение 100м-8км,
- Моделируемый период – до одного года

Блок усвоения данных

- Вертикальные профили температуры и солёности – Международный полярный год (IPY-2008)
- Температура поверхности (skin temperature) – спутники AVHRR Pathfinder



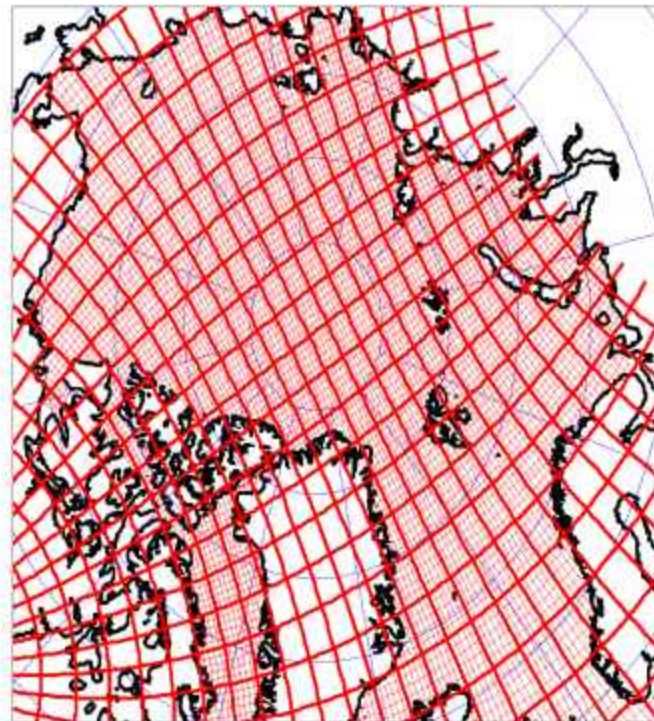
Grid and Domain



Numerical domain: from 20S Atlantic to Bering Strait

Grid specification: spherical in Atlantic ($1^\circ:1^\circ$) + reprojected bipolar grid from 65°N (Ross Murray, 1996), 33 vertical levels

The model domain was built with horizontal resolution of $1^\circ:1^\circ$ in Atlantic. The reprojected bipolar grid in Arctic has minimum spacing equal to 35km while maximum spacing is about 62km.



Уравнения модели льда

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (g\mathbf{u}) - \frac{\partial}{\partial h}(fg) + \psi,$$

$g(\mathbf{x}, h, t)$ – функция распределения льда, $\mathbf{x}$ – горизонтальные координаты (x, y) , $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ – горизонтальный градиент, $\mathbf{u}$ – скорость льда, h – толщина льда, f – скорость термодинамического роста, ψ – функция перераспределения в случае торошения.

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_{in}) + \nabla \cdot (a_{in}\mathbf{u}) = 0,$$

$$\frac{\partial v_{in}}{\partial t} + \nabla \cdot (v_{in}\mathbf{u}) = 0,$$

$$\frac{\partial v_{sn}}{\partial t} + \nabla \cdot (v_{sn}\mathbf{u}) = 0.$$

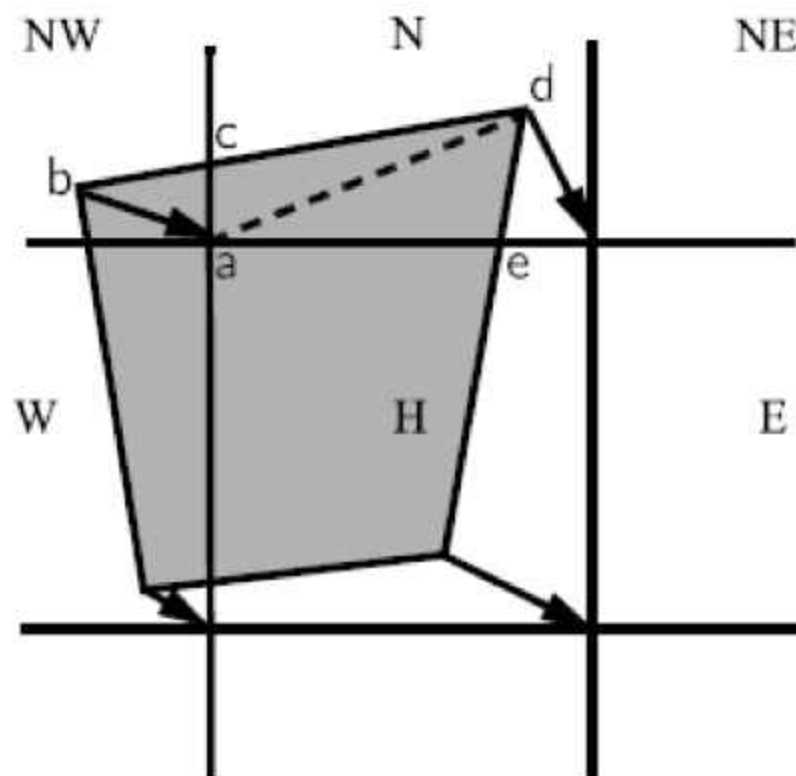
a_{in} – площадная доля льда, v_{in} – объём льда, v_{sn} – объём снега.

$$\frac{\partial (a_{in}T_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (a_{in}T_n\mathbf{u}) = 0,$$

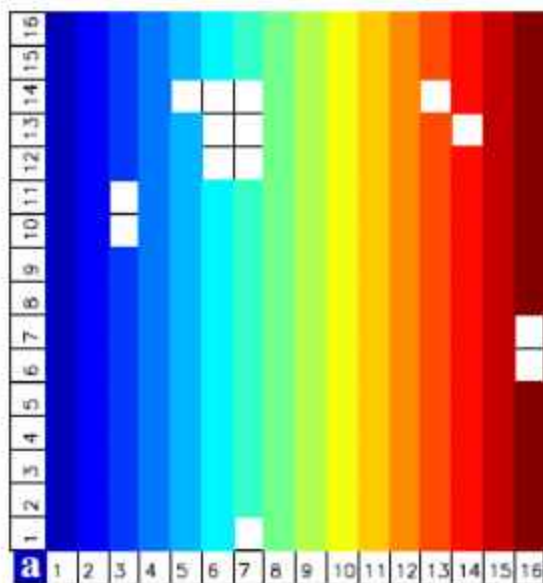
$$\frac{\partial (v_{in}S_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (v_{in}S_n\mathbf{u}) = 0,$$

T_n – температура поверхности льда, S_n – энтальпия льда или снега, солёность льда.

Адвекция

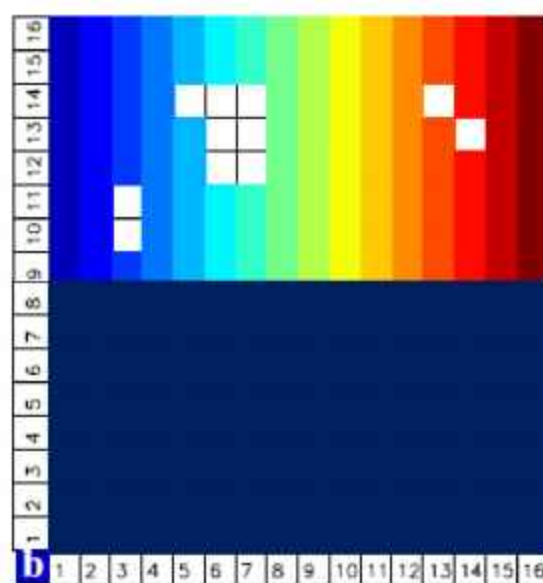


Параллелизация модели льда



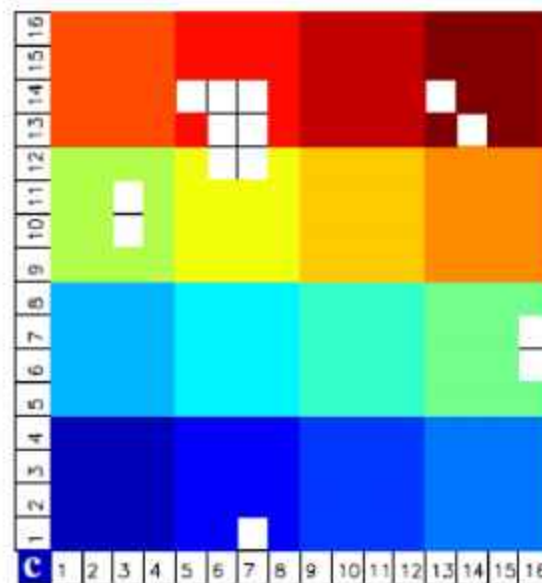
$$n_x \times n_y = 310 \times 480$$

$$(N-1)n_y = 7200$$



$$(N/N_x - 1)n_x + (N/N_y - 1)n_y = 3670$$

$$n_x + (N-2)n_y/2 = 3670$$



$$(N/N_x - 1)n_x + (N/N_y - 1)n_y = 2370$$

Эффективность параллелизации

Количество обменов

$$M_{\text{обм}} = (N_x - 1)n_x + (N_y - 1)n_y$$

Количество операций

$$M_{\text{оп}} = (n_x n_y) / (N_x N_y)$$

Общее количество операций

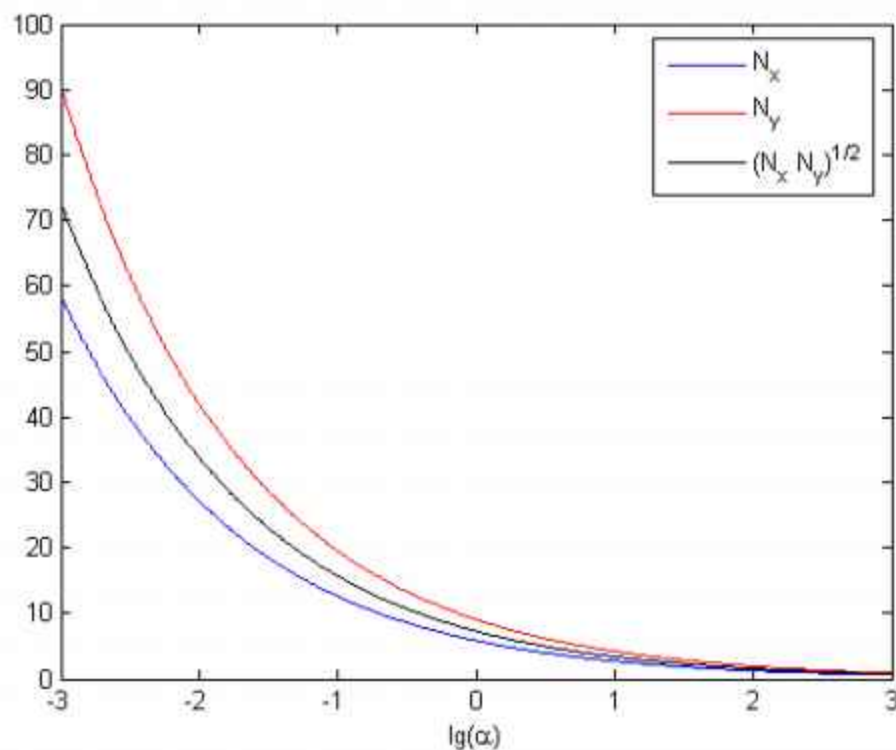
$$F(N_x, N_y) = M_{\text{оп}} + \alpha M_{\text{обм}}$$

Оптимальное количество
процессоров

$$N_x^3 = n_x^2 / \alpha n_y$$

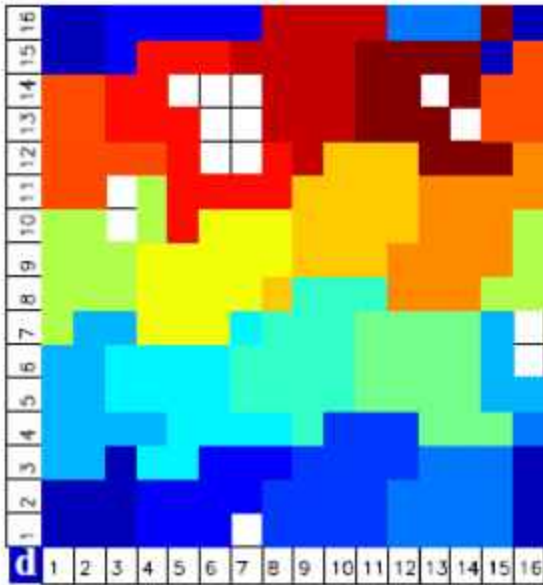
$$N_y^3 = n_y^2 / \alpha n_x$$

$$N^3 = (N_x N_y)^3 = n_x n_y / \alpha^2$$

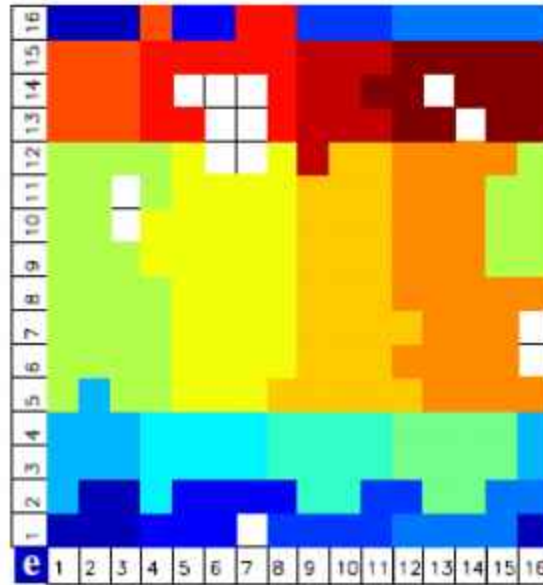


$$n_x = 310, n_y = 480$$

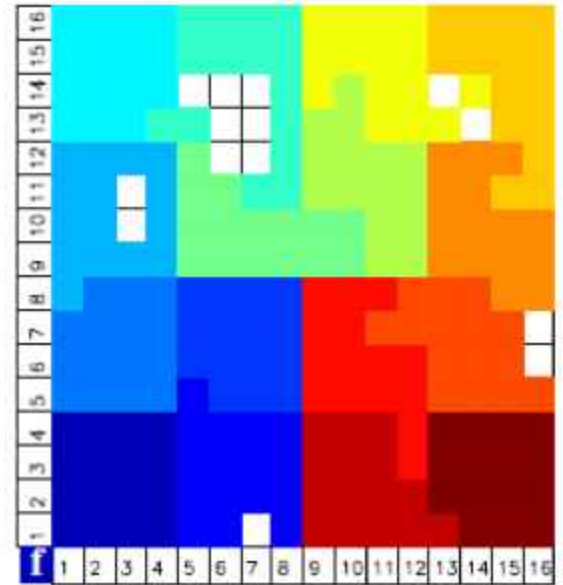
Другие схемы



a rake with block weighting

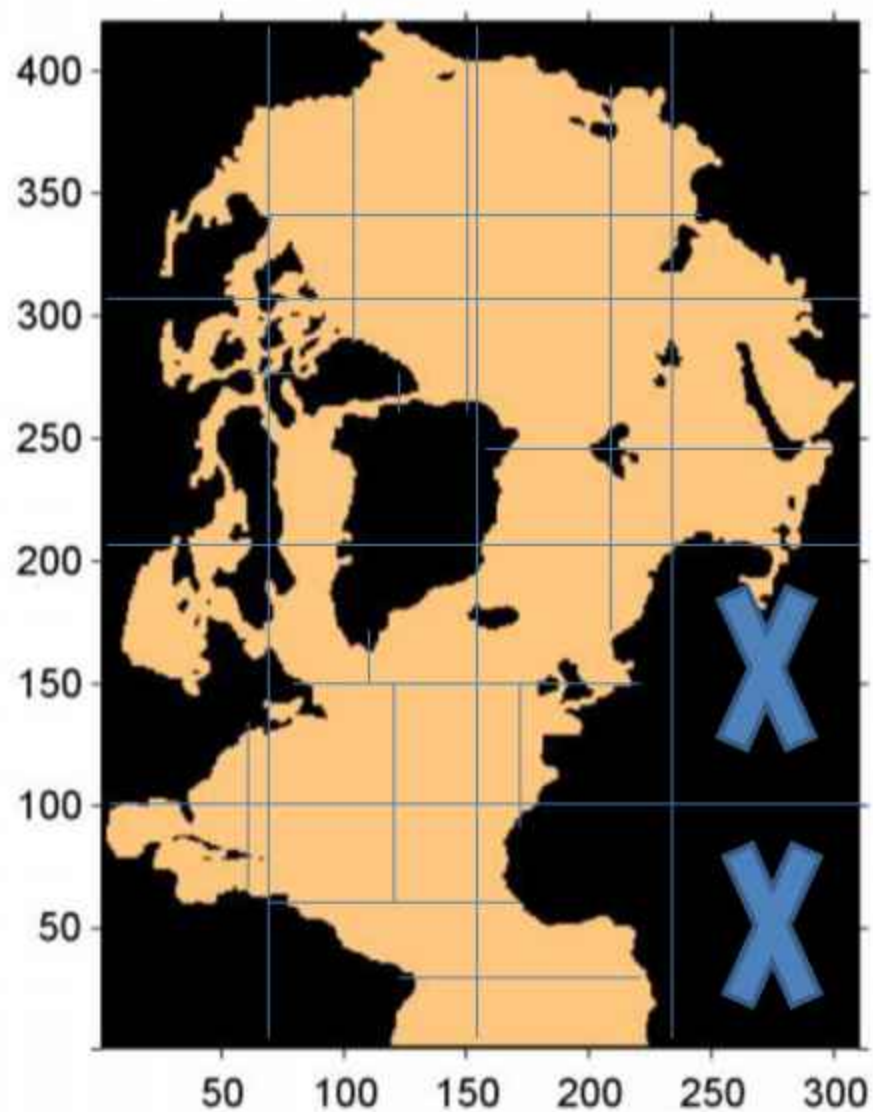
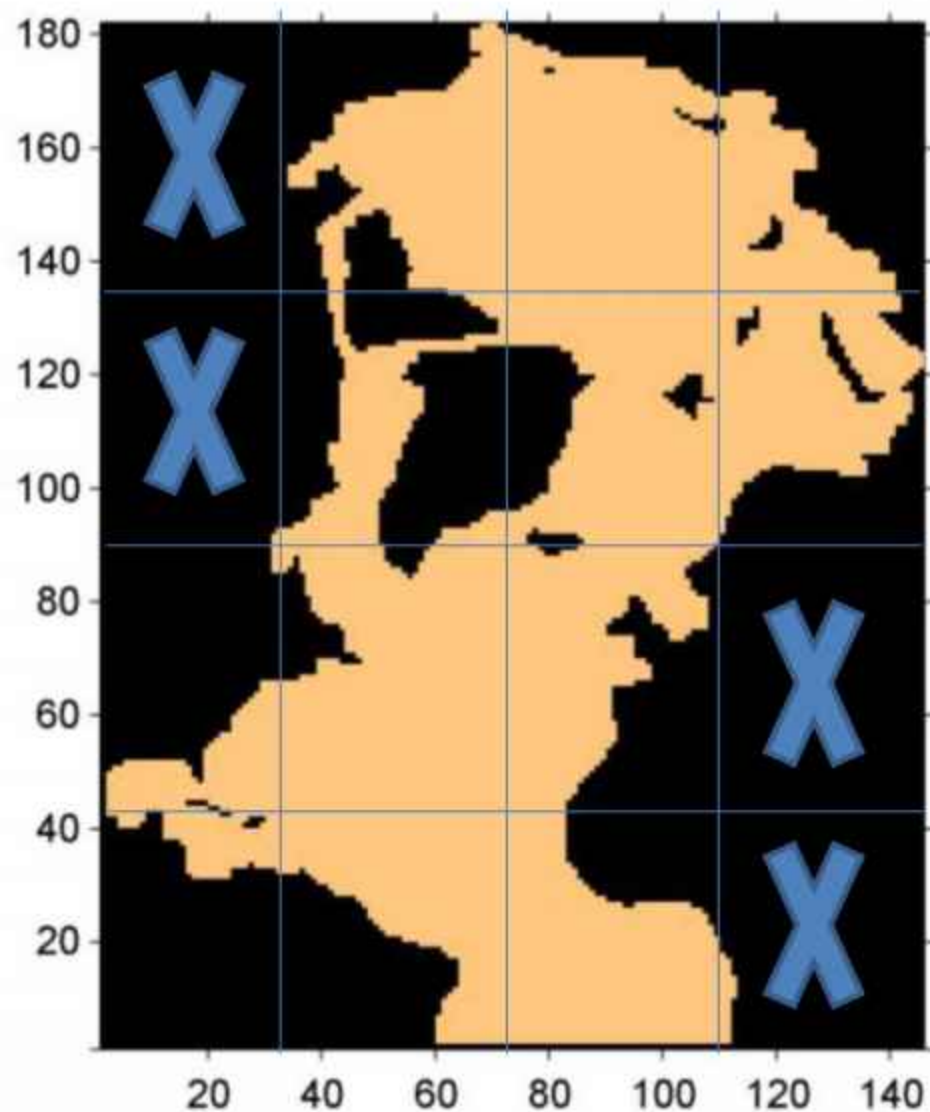


e rake with latitude weighting



f spacecurve

Область



Расчетные характеристики

- Скорость течения – $V = (u, v, w): V = \bar{V} + V'$
 - $\bar{V} = \frac{1}{H} \int_0^H (u, v) dz$ -- баротропная составляющая для которой вводится функция тока ψ : $\bar{u} = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \bar{v} = \frac{\partial \psi}{\partial x}$
 - V' -- бароклинная составляющая
- Температура и соленость – T, S – активные трассеры
- Пассивные трассеры – Q_n ($n = 1, 2, \dots$)
- Лагранжевы частицы

В океанической области Ω в системе криволинейных ортогональных координат ξ_1, ξ_2, z

рассматриваются полные нелинейные уравнения гидротермодинамики океана с учетом приближения гидростатики и Буссинеска для переменных, обозначающих компоненты скорости течения, потенциальную температуру и соленость

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - kv - lv = -\frac{1}{\rho_0 h_1} \frac{\partial p}{\partial \xi_1} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial u}{\partial z} + F(u, \mu_v),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - ku + lu = -\frac{1}{\rho_0 h_2} \frac{\partial p}{\partial \xi_2} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial v}{\partial z} + F(v, \mu_v),$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g. \quad \rho = \rho(T, S, p).$$

$$\frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v) \right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L(T) = \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial T}{\partial z} + F(T, \mu_T),$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L(S) = \frac{\partial}{\partial z} v_S \frac{\partial T}{\partial z} + F(S, \mu_S),$$

$$\begin{aligned} L(\phi) &= \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u \phi) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v \phi) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (w \phi), \\ F(\phi, \mu) &= \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\mu \frac{h_1}{h_1} \frac{\partial \phi}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\mu \frac{h_1}{h_2} \frac{\partial \phi}{\partial \xi_2} \right) \right], \\ k &= \frac{u}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} - \frac{v}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1}. \end{aligned}$$

Уравнения движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - kv - lv = -\frac{1}{\rho_0 h_1} \frac{\partial p}{\partial \xi_1} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial u}{\partial z} + F(u, \mu_v),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - ku + lu = -\frac{1}{\rho_0 h_2} \frac{\partial p}{\partial \xi_2} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial v}{\partial z} + F(v, \mu_v),$$



$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v'$$

$$\frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v) \right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

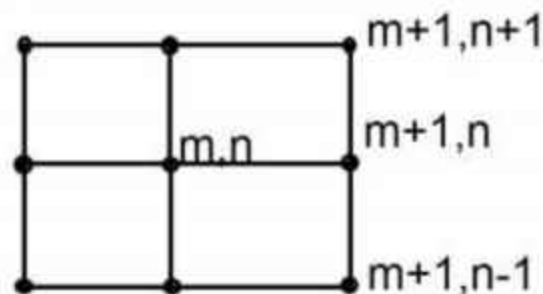
Уравнения движения. Вычисление средней

$$\bar{u}, \bar{v} \quad \longrightarrow \quad \psi$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta_H \psi) - \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\frac{l}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_2} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\frac{l}{H} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_1} \right) = - \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 \bar{G}_2) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 \bar{G}_1),$$

$$\Delta_h \psi = \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(\frac{h_2}{H h_1} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\frac{h_1}{H h_2} \frac{\partial \psi}{\partial \xi_2} \right)$$

$$D_1 \psi^{t+1} = D_0 \psi^t + F$$



Уравнения движения.

Вычисление отклонения от средней

Адвекция

$$\frac{V^{t+1} - V^t}{\Delta t} + LV^t = 0,$$

Адаптация

$$\frac{u^{t+1} - u^t}{\Delta t} - lv = F1,$$

$$\frac{v^{t+1} - v^t}{\Delta t} + lu = F2$$

Вязкость

$$\frac{V^{t+1} - V^t}{\Delta t} + (D_1 + D_2 + D_3)V^{t+1} = 0,$$

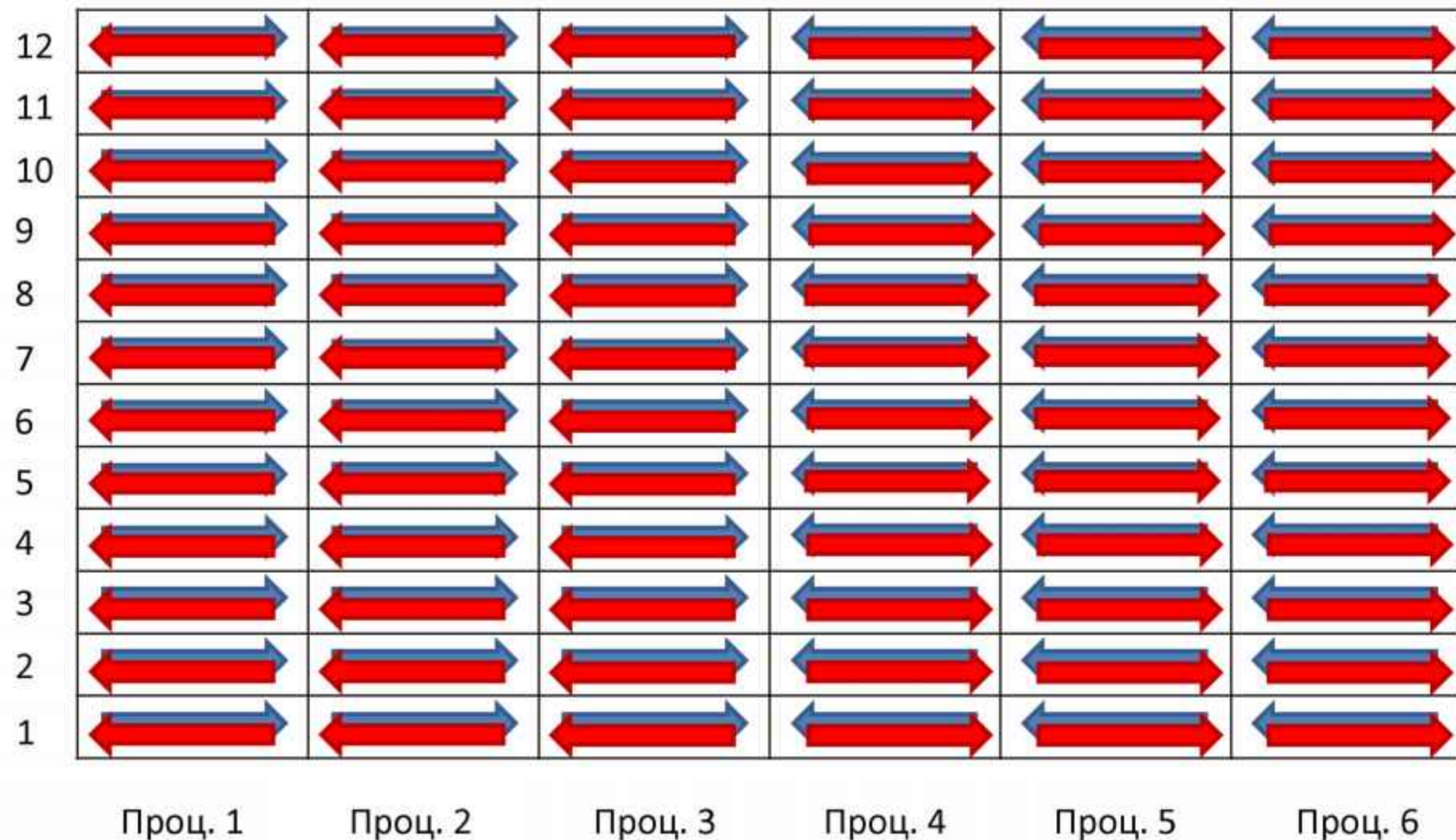


$$\frac{V^{t+1/3} - V^t}{\Delta t} + D_1 v^{t+1} = 0,$$

$$\frac{V^{t+2/3} - V^{t+1/3}}{\Delta t} + D_2 v^{t+1/3} = 0,$$

$$\frac{V^{t+1} - V^{t+1/3}}{\Delta t} + D_3 v^{t+2/3} = 0,$$

Схема прогонки



Модель океана – проблемы параллелизации

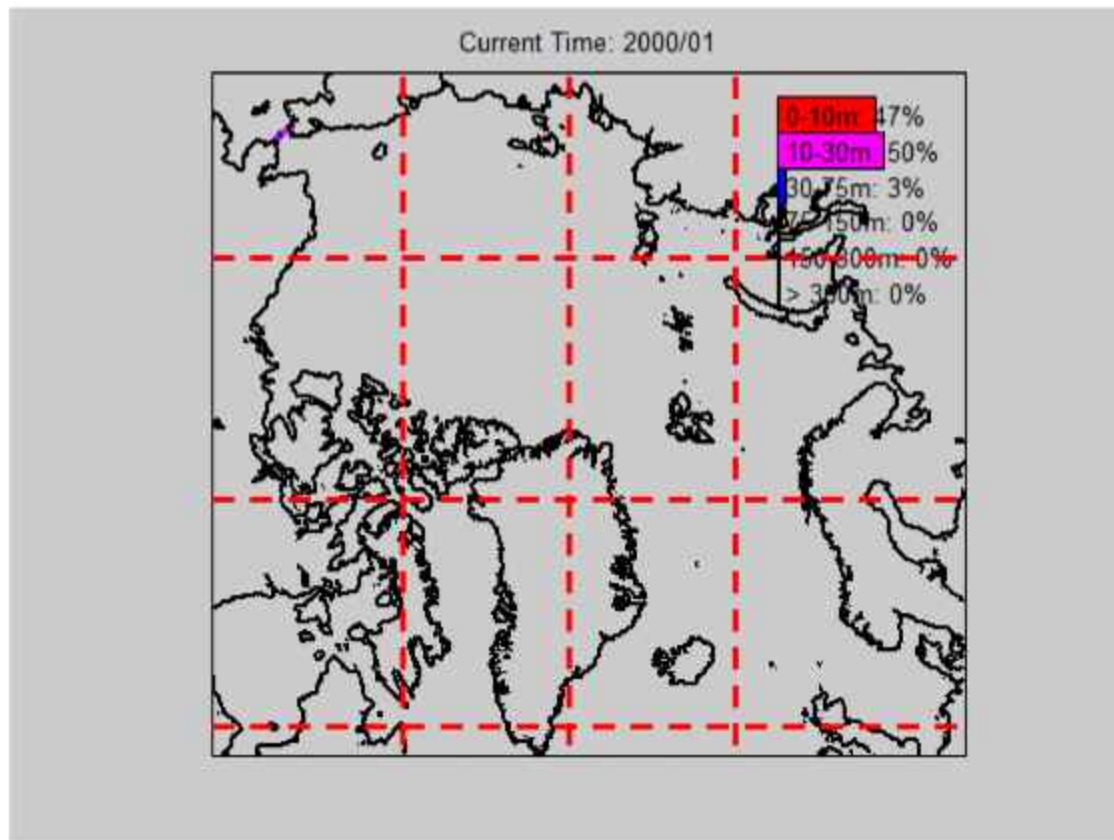
- Баротропная составляющая скорости
 - Неявная схема
 - Явная – малый шаг по времени
 - Итерации
- Бароклинная составляющая скорости
 - Неявная схема
 - Адвекция требует окаймление > 1
- Активные трассеры
- Пассивные трассеры
- Вертикальные процессы
 - Многоточечный носитель из-за параметризаций

Модель океана – проблемы параллелизации

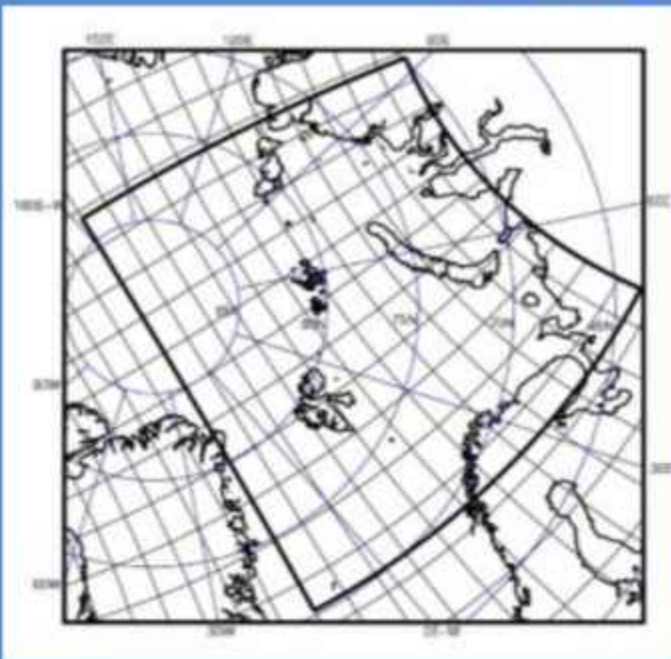
- Параметризации подсеточных масштабов
 - Вертикальное перемешивание
 - эджастмент
 - глубинная конвекция
 - выделение подледной части
 - LES подобные подмодели
 - Каскадинг
 - Ресторинг
 - Речной сток и жидкие границы
- Ввод – вывод
- Q_{sub}

Частицы-трассеры

- Переход из подобласти в подобласть



Nested regional model



- ▶ POM
- ▶ Barents and Kara Seas
- ▶ Horizontal resolution 2-20 km
- ▶ Simulated period – 215 days (Jan-Jul, 1983)

GCM receives from regional model:

- ▶ Temperature, salinity (T, S) and barotropic velocity (U, V), via second order relaxation terms

$$\left(\frac{\partial T_0}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (T_0 - T)$$

$$\left(\frac{\partial S_0}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \alpha_s \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (S_0 - S)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (u - U)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (v - V)$$

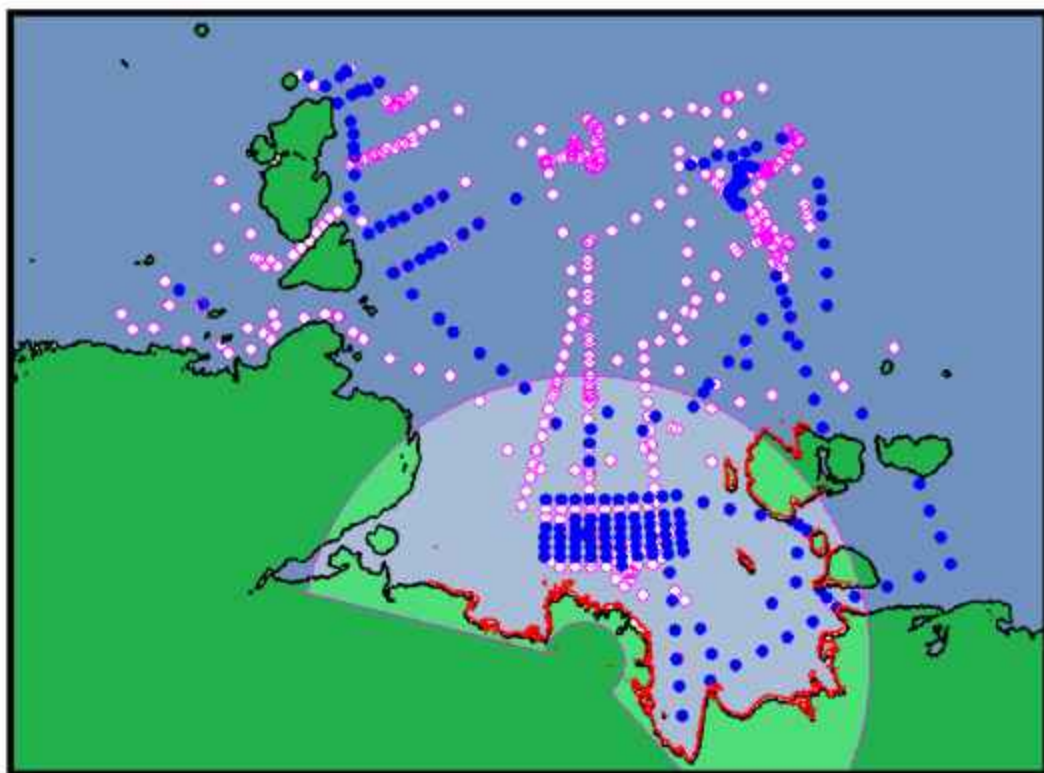
Regional model receives from GCM:

- ▶ Initial conditions: T, S, u, v, U, V, η
- ▶ Liquid boundary conditions for T, S, η and normal component of barotropic velocity (U, V)
- ▶ T and S via second order relaxation terms

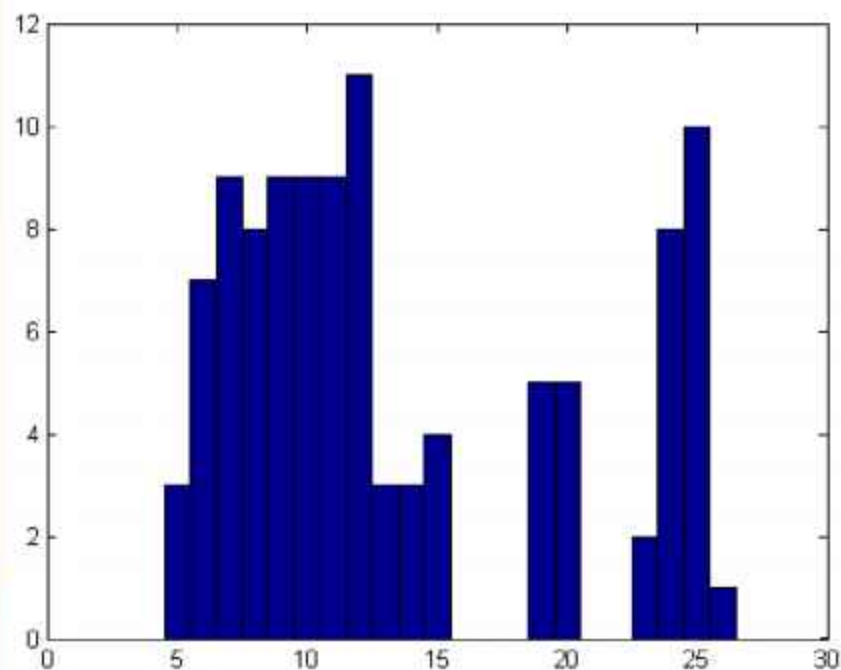
$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (T - T_0)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial t} \right)_{\text{mudging}} = \alpha_s \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial}{\partial y} \right) \right\} (S - S_0)$$

Данные IPY (Международного полярного года) 2008: сентябрь

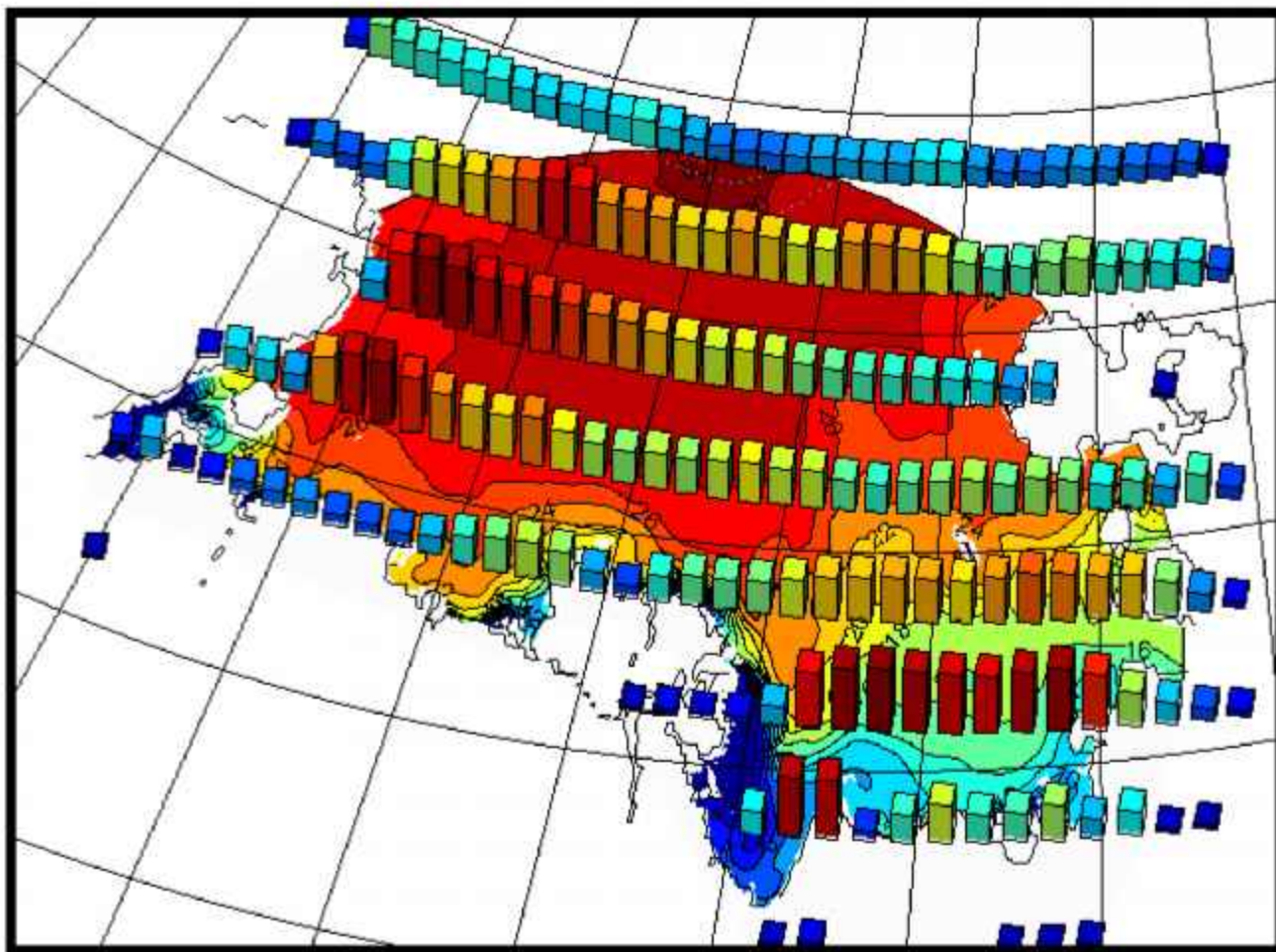


Расположение точек наблюдения вертикального распределения температуры и солености в 2008 (синие кружки соответствуют сентябрю)



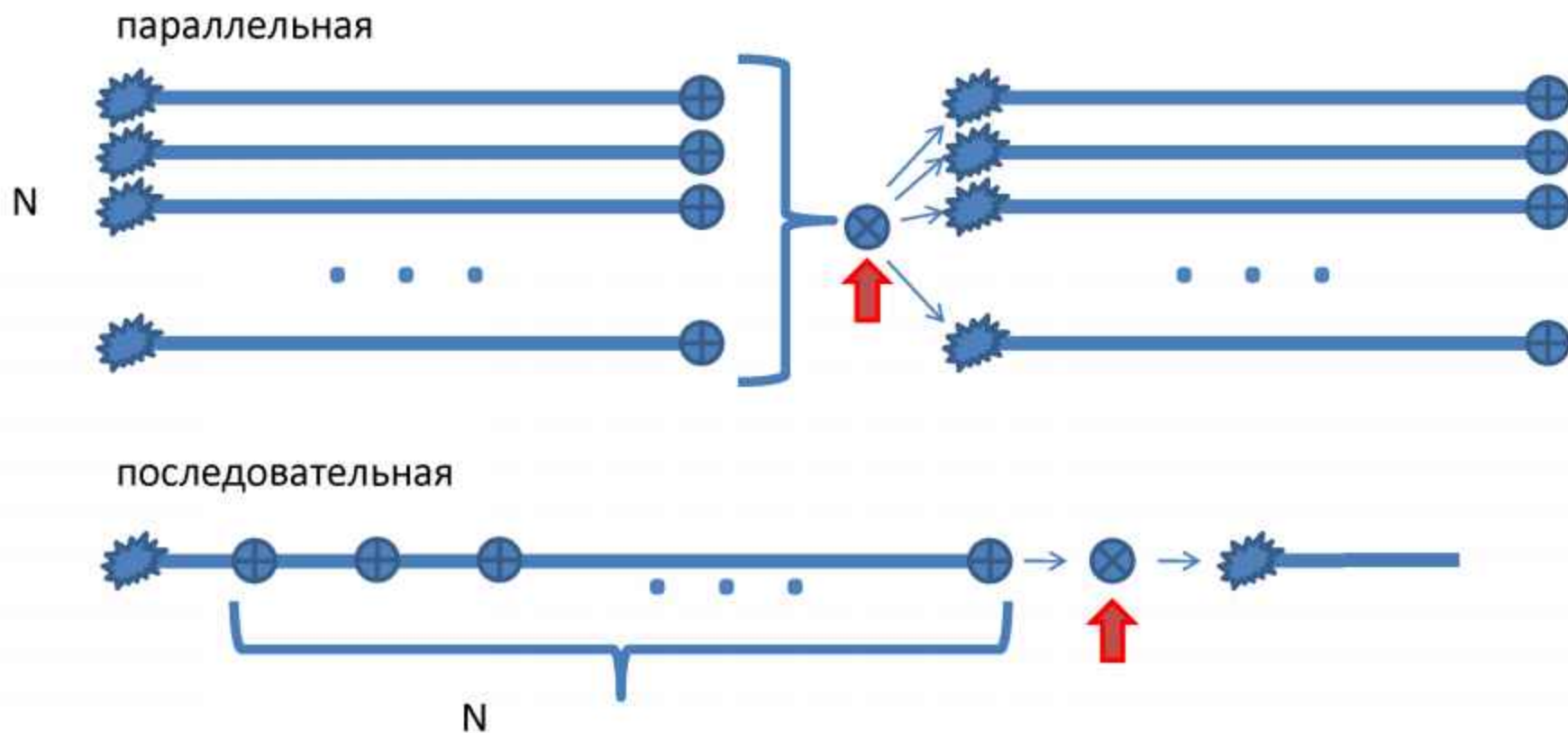
Количество наблюдений в районе моделирования по дням сентября 2008

Данные Pathfinder – сентябрь 2008



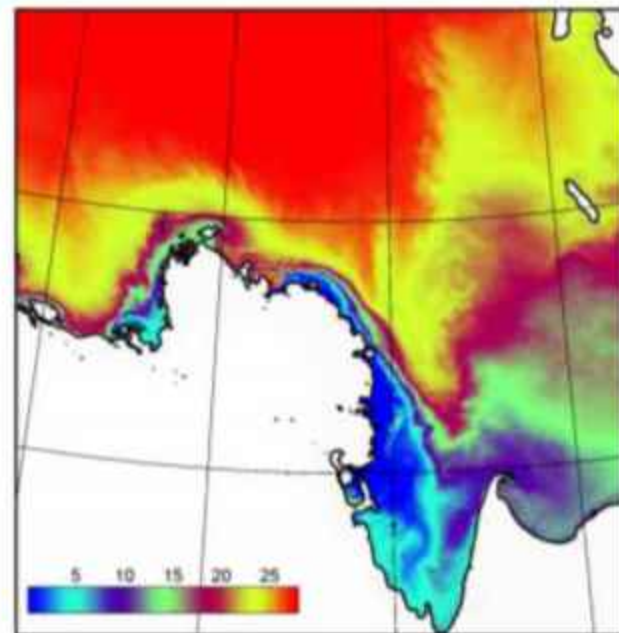
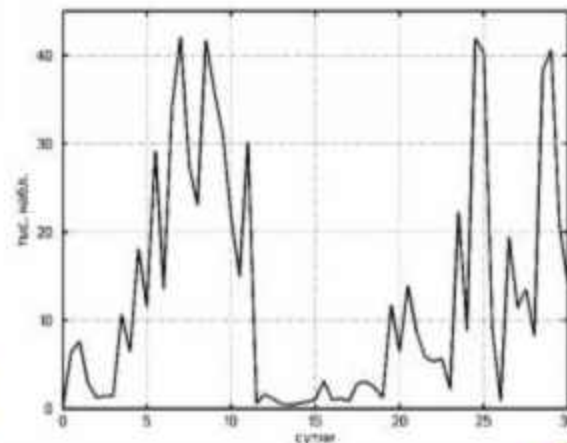
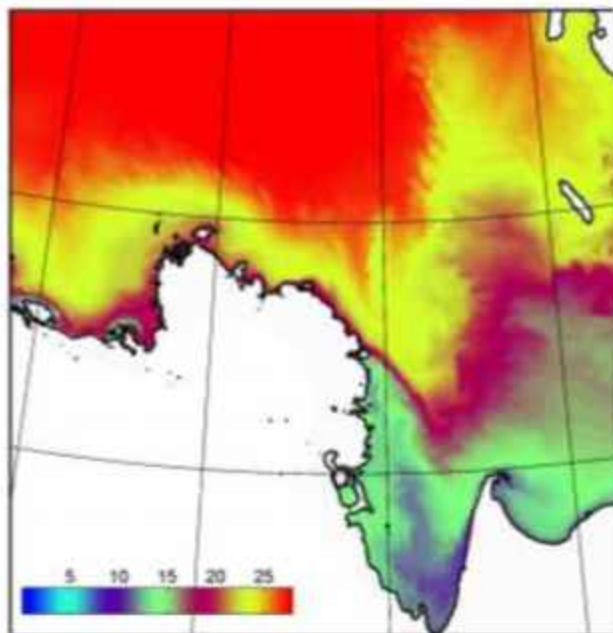
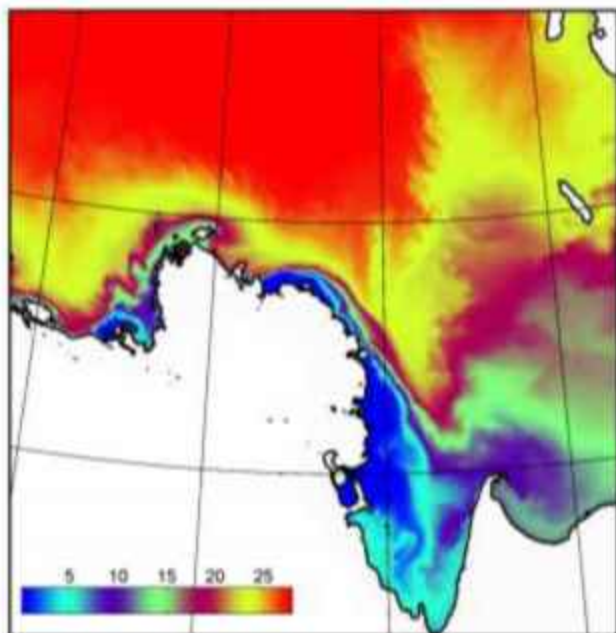
Количество имеющихся измерений температуры поверхности в боксе $1^0 \times 1^0$: макс=8250. Наибольшее количество данных имеется для района восточнее п-ова Таймыр и восточнее дельты р. Лена по направлению распространения речного стока

Схемы шага усвоения



Усвоение данных

30 суток



NetCDF

- NetCDF является набором программного обеспечения для чтения и записи файлов данных ориентированных на научное применение (в основном применяется при моделировании атмосферы и океана).
- NetCDF разработан и поддерживается Unidata.
- Unidata – это одна из восьми программ, поддерживаемых University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs (UOP).
- Unidata предоставляет данные и программное обеспечение для образования и исследований в области наук о Земле.

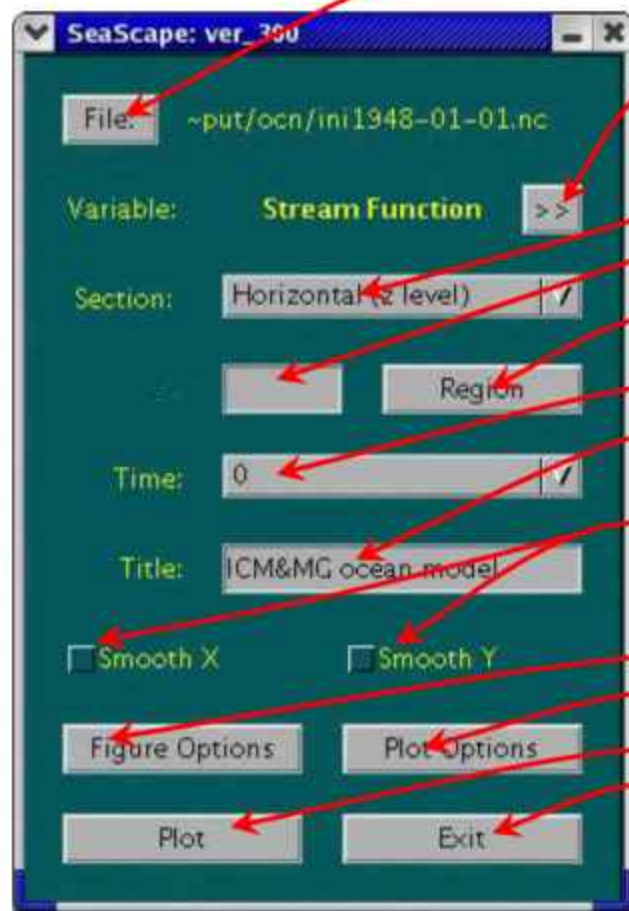
Модель данных NetCDF

- Variables (переменные)
 - N-мерные массивы данных. Переменные могут быть шести типов: текстовые – char, целые – byte, short, int, действительные – float, double.
- Dimensions (размеры)
 - описывают оси координат и массивы данных. Размер имеет имя и значение (длину). Кроме того, предполагается наличие одного неограниченного размера, который может динамически увеличиваться с поступлением новых записей (например, время).
- Attributes (атрибуты)
 - дают некоторое дополнительное описание переменной или самого файла NetCDF посредством коротких комментариев или дополнительных данных. Предполагается, что атрибуты это либо скалярные величины, либо одномерные массивы. Несмотря на отсутствие каких-либо ограничений, все же предполагается что атрибуты должны быть малыми по объему.

SeaScape

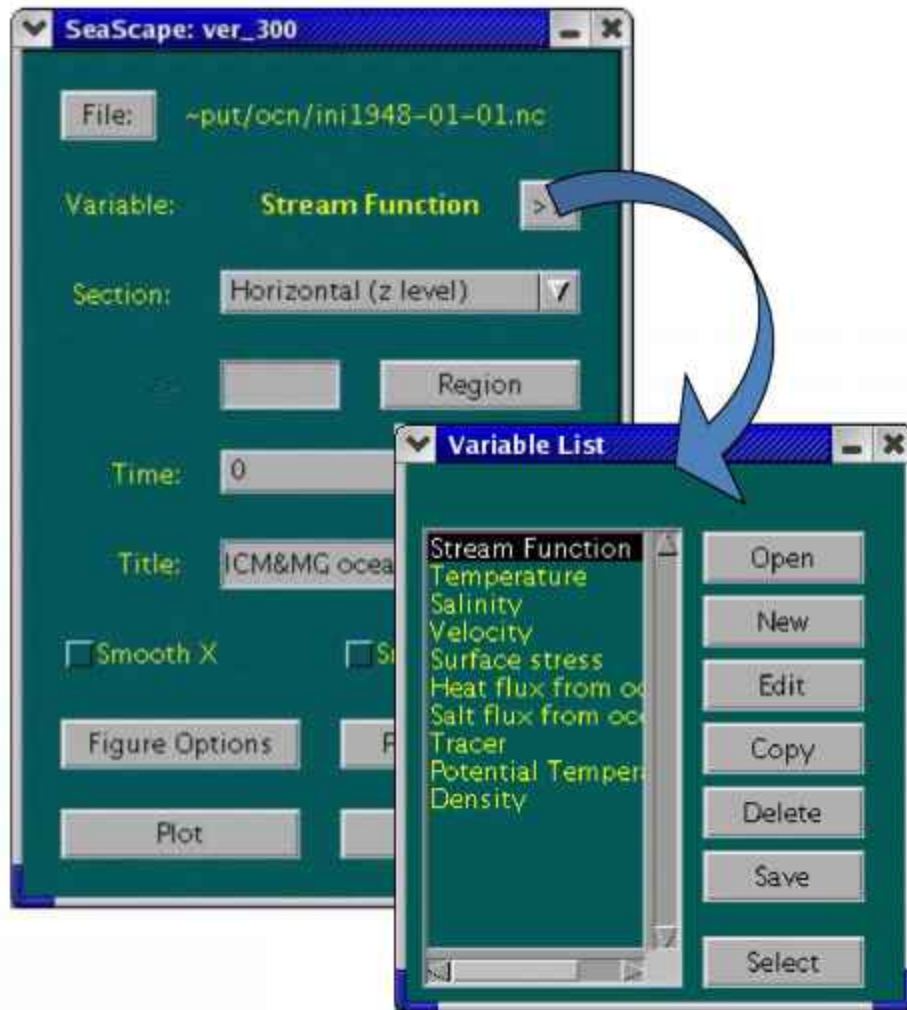


Главное окно SeaScape



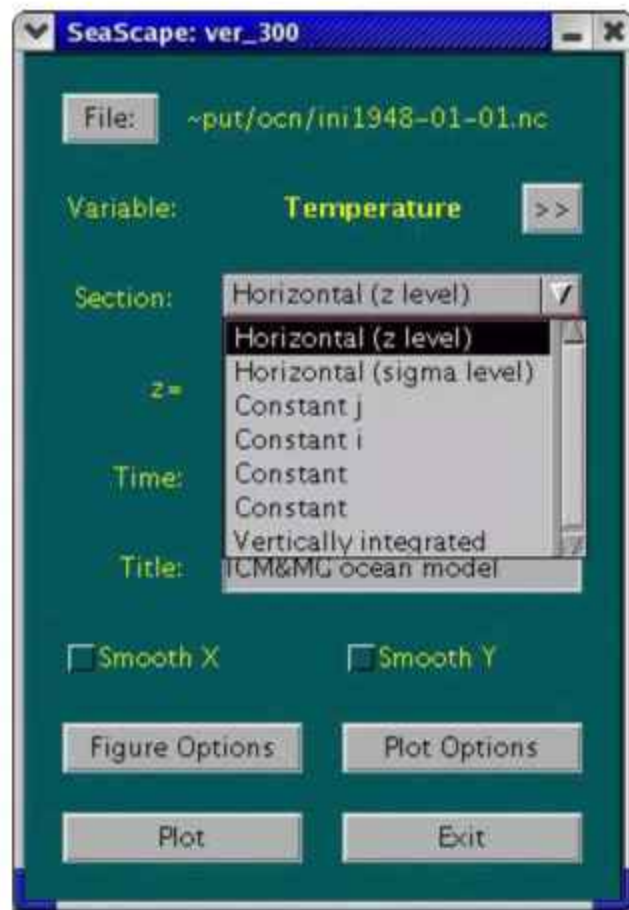
- Выбор файла
- Выбор переменной
- Выбор типа сечения
- Определение параметра сечения
- Выбор региона
- Выбор времени (записи)
- Подпись к рисунку
- Сглаживание вдоль осей координат
- Опции рисунка
- Опции переменной
- Запуск отрисовки
- Выход из SeaScape

Список переменных



- Открытие файла с другим набором переменных
- Создание новой переменной
- Изменение параметров переменной из списка
- Копирование переменной – создание новой на основе старой
- Удаление из списка
- Сохранение списка, так чтобы его можно было открыть в следующей сессии
- Выбор переменной для отрисовки

Выбор типа сечения



- Горизонтальный ($z=\text{const}$)
- Горизонтальный ($\sigma=\text{const}$)
- Вертикальный вдоль $j=\text{const}$
- Вертикальный вдоль $i=\text{const}$
- Вертикальный вдоль линии широты
- Вертикальный вдоль линии долготы
- Вертикально-интегрированное поле (горизонтальный тип)

Определение параметра сечения

Variable: **Temperature** >>

Section: Horizontal (z level)

z= 100 Region

Variable: **Temperature** >>

Section: Horizontal (sigma level)

k= 14 Region

Variable: **Temperature** >>

Section: Constant j

j= 80 Region

Variable: **Temperature** >>

Section: Constant longitude

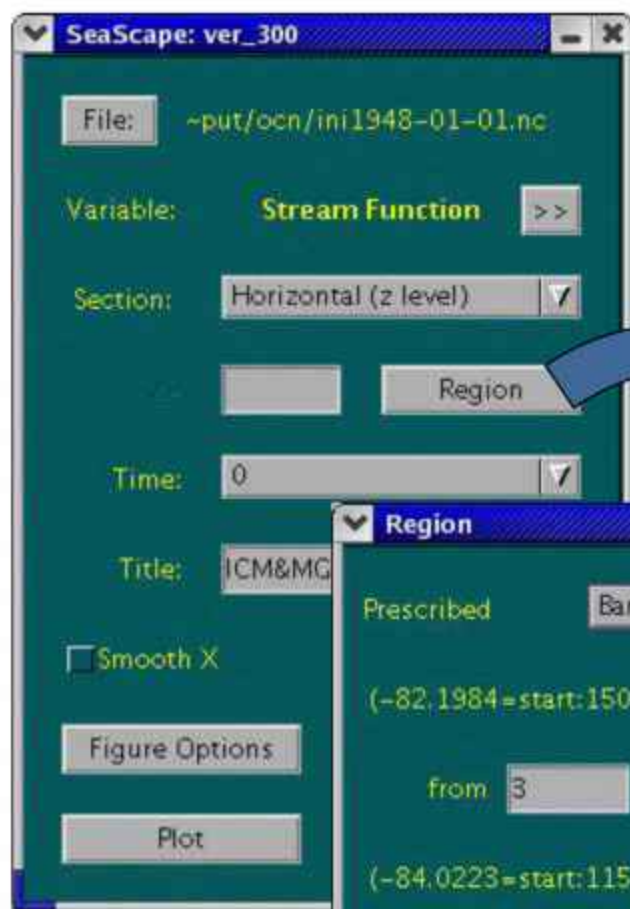
longitude 122.5 Region

Variable: **Temperature** >>

Section: Vertically integrated

z= 100\b Region

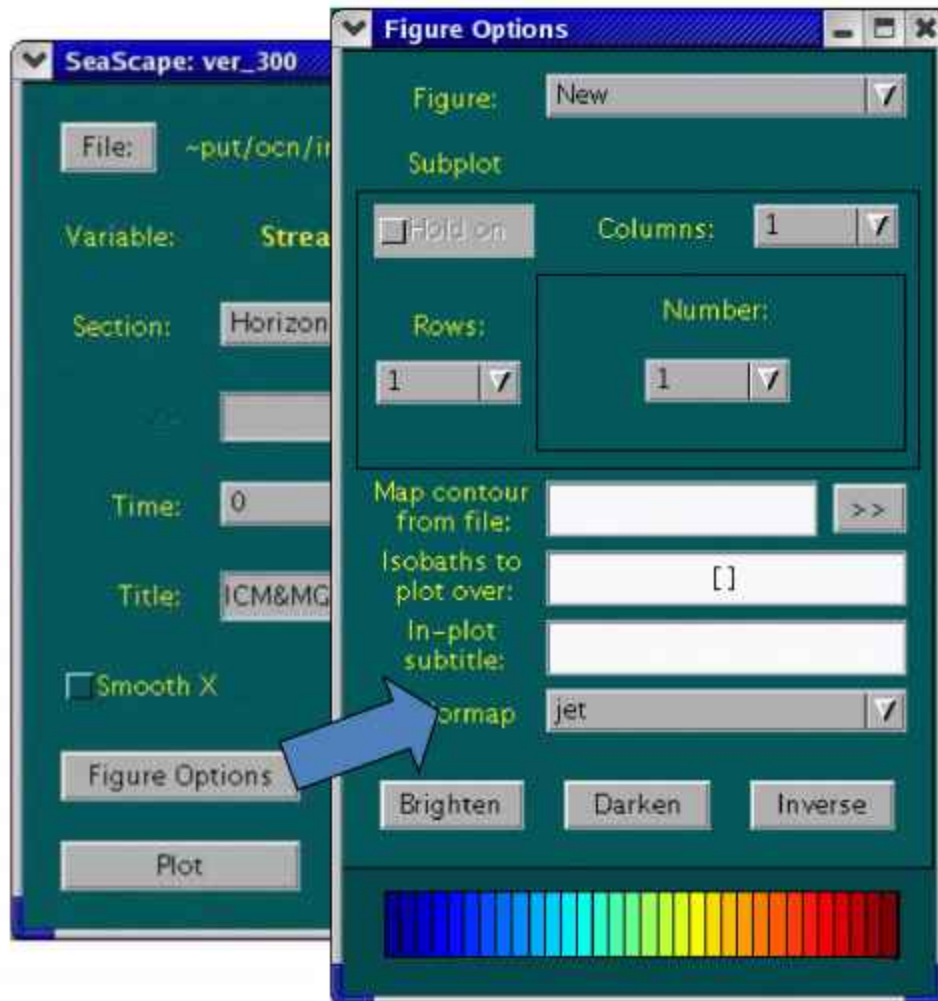
Выбор региона



- Ручной набор координат левого-нижнего и правого-верхнего угла
- Сохранение набранного под некоторым названием
- Выбор региона из списка сохраненных ранее

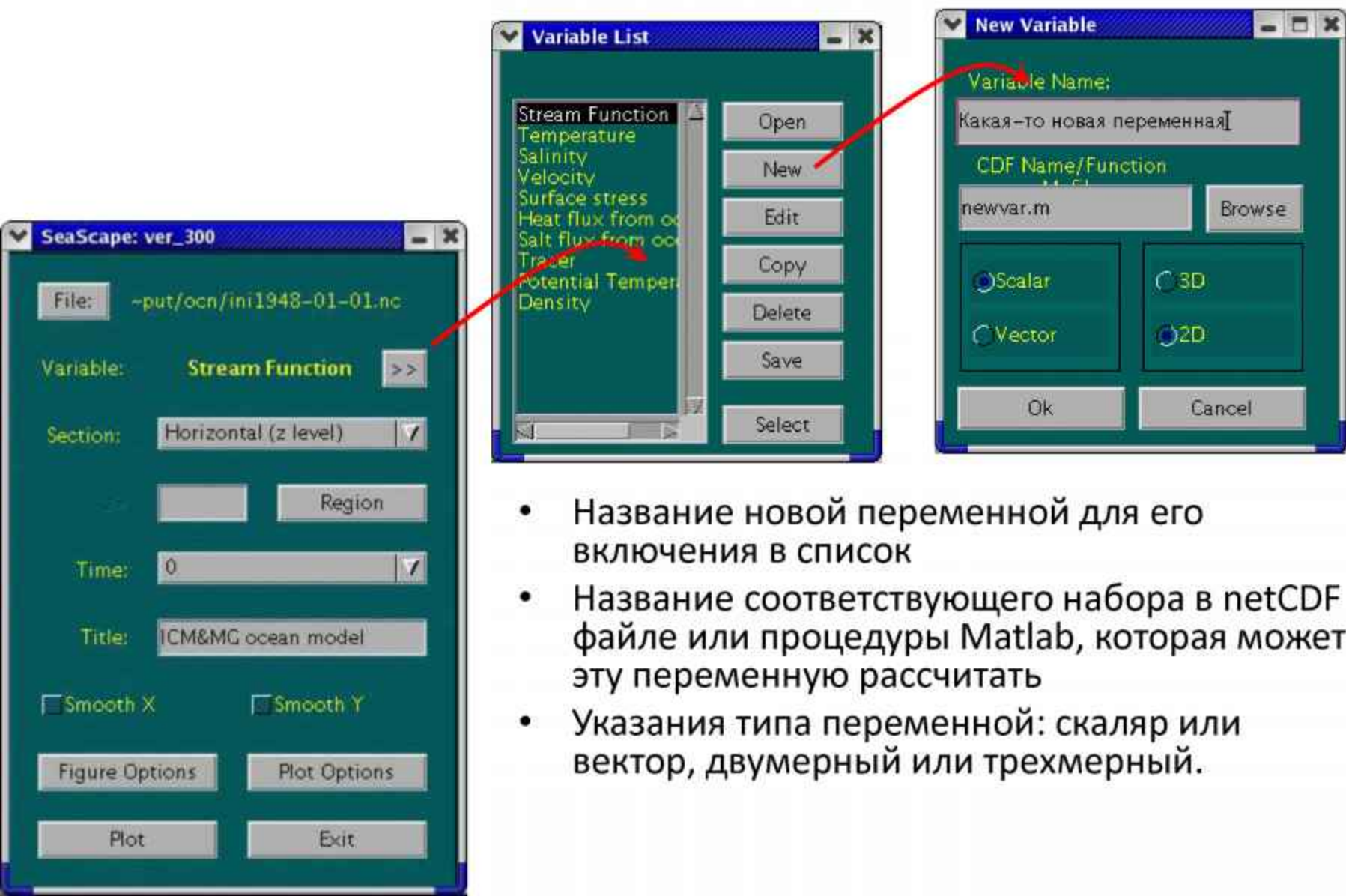


Опции рисунка



- Выбор окна-рисунка – новое или одно из уже отрисованных
- Выбор количества столбцов и строк для вложенных рисунков
- Выбор позиции рисунка в этой системе
- Выбор режима отрисовки поверх уже нарисованного
- Выбор файла с контурами карты
- Выбор изобат для нанесения их поверх рисунка
- Ввод подзаголовка в тело самого рисунка (например, а), б) и т.д.)
- Выбор цветовой палитры
- Некоторые преобразования палитры (сделать ее более яркой, более притемненной, инвертировать цвета)

Создание новой переменной

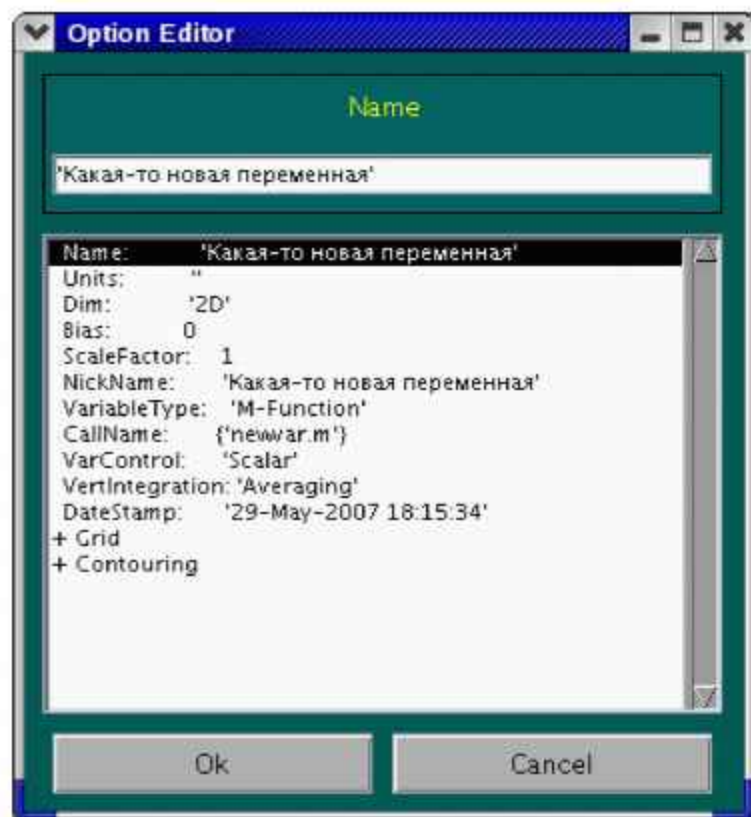


The image displays three screenshots of the SeaScape software interface, illustrating the steps to create a new variable:

- SeaScape: ver_300** (Main Plot Window): Shows the 'Variable' field set to **Stream Function**. The 'Section' is set to **Horizontal (z level)**. The 'Time' is set to **0**. The 'Title' is **ICM&MG ocean model**. The 'Figure Options' and 'Plot Options' buttons are visible.
- Variable List** (Dialog Box): Shows a list of variables including **Stream Function**, **Temperature**, **Salinity**, **Velocity**, **Surface stress**, **Heat flux from ocean**, **Salt flux from ocean**, **Tracer**, **Potential Temperature**, and **Density**. The **New** button is highlighted.
- New Variable** (Dialog Box): Shows the 'Variable Name' field set to **Какая-то новая переменная**. The 'CDF Name/Function' field is set to **newvar.m**. The 'Variable Type' is set to **Scalar**. The 'Ok' and 'Cancel' buttons are visible.

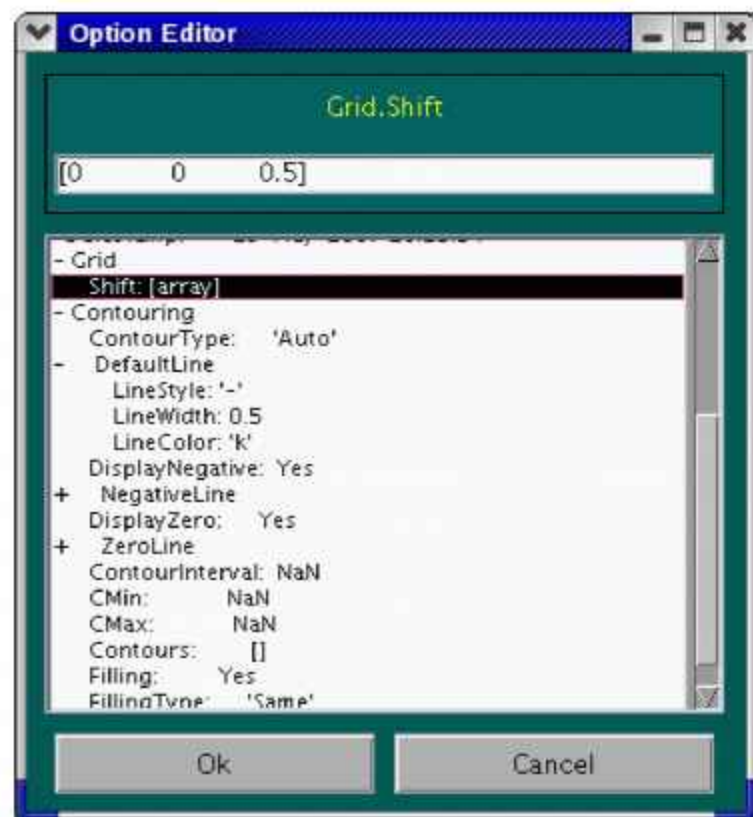
- Название новой переменной для его включения в список
- Название соответствующего набора в netCDF файле или процедуры Matlab, которая может эту переменную рассчитать
- Указания типа переменной: скаляр или вектор, двумерный или трехмерный.

Параметры переменной



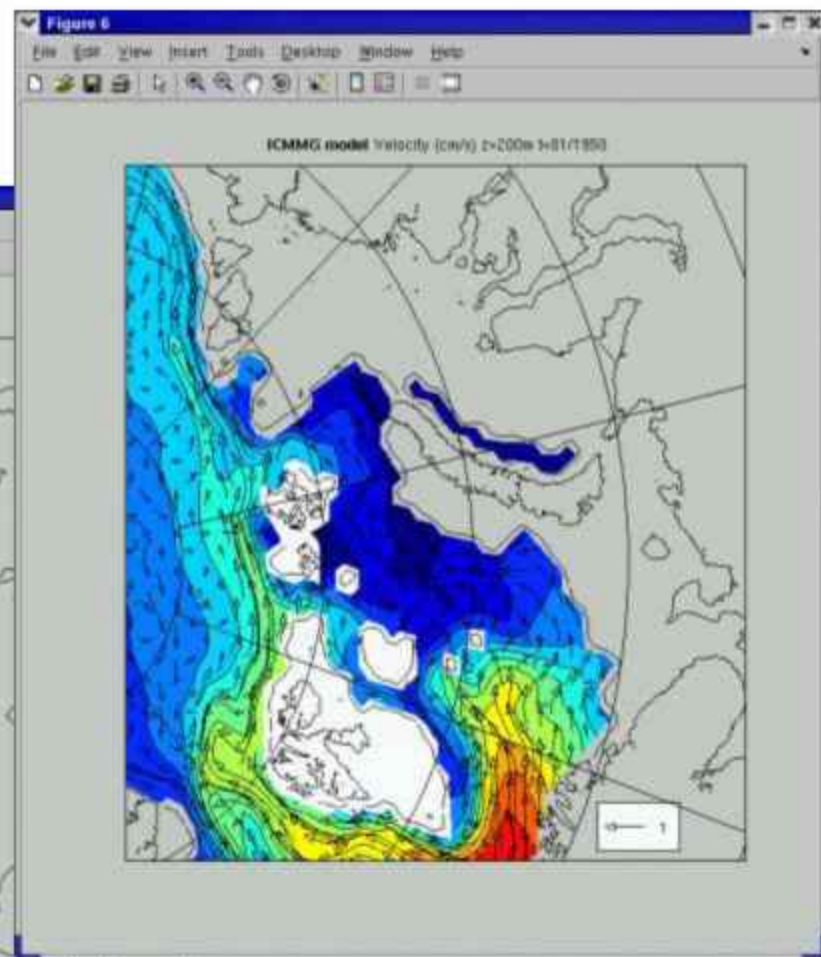
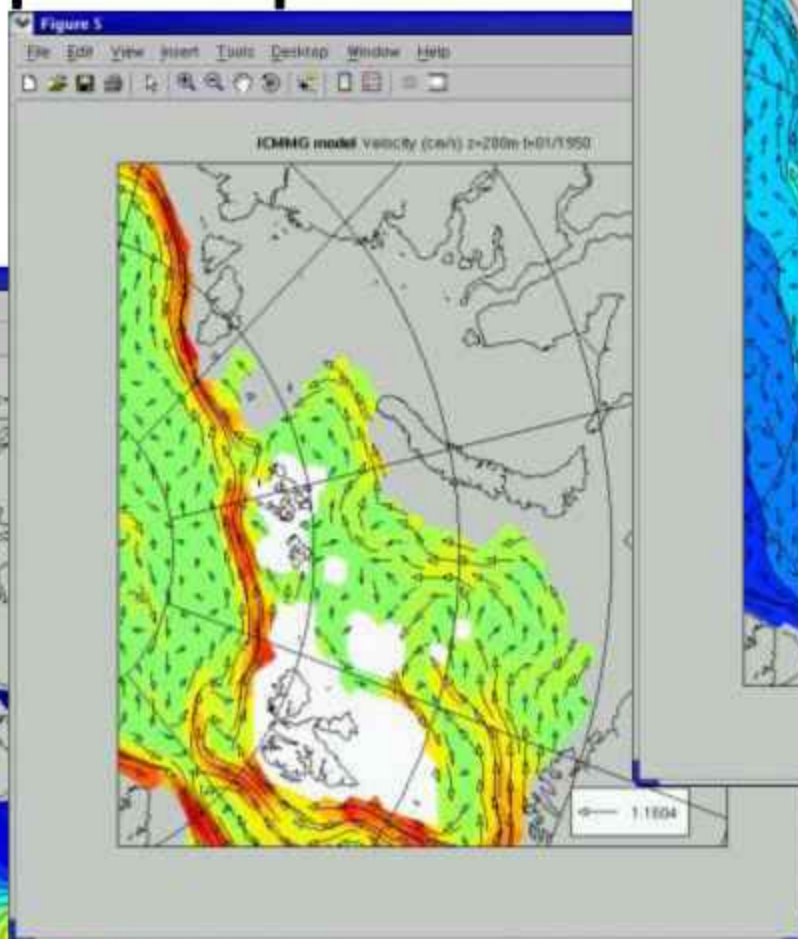
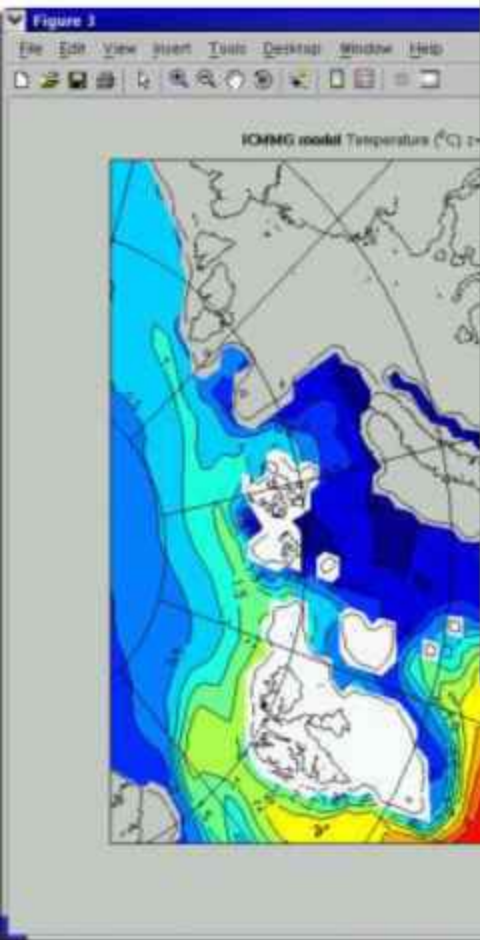
- Изменить имя переменной
- Определить единицы измерения
- Определить множитель и дополнение
- Определить тип источника переменной (netCDF или Matlab-функция)
- Определить тип вертикального интегрирования (суммирование или осреднение)
- Изменить параметры сетки на которой задана переменная
- Изменить тип контурных линий и их значения

Параметры сетки и контурных линий

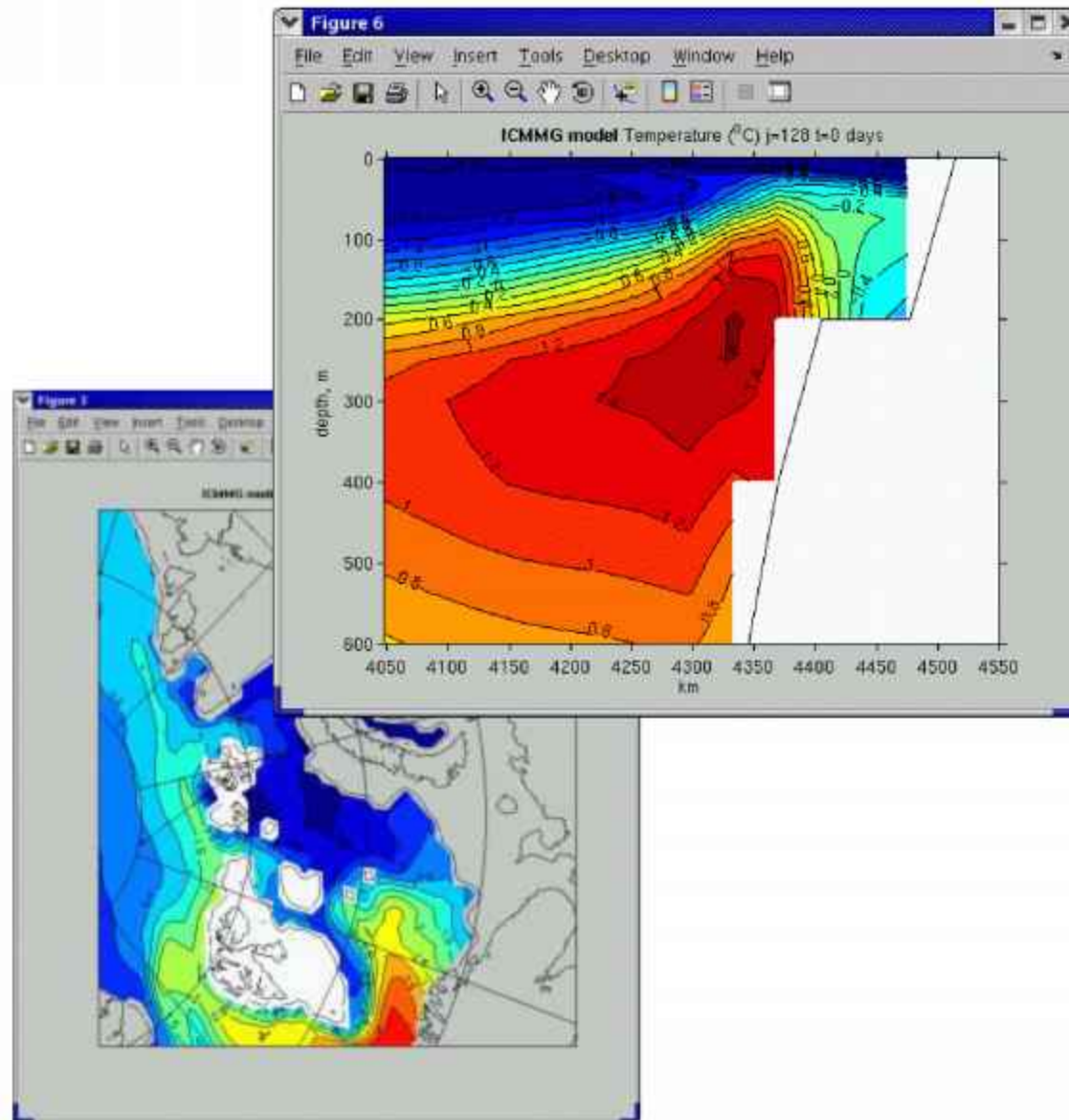
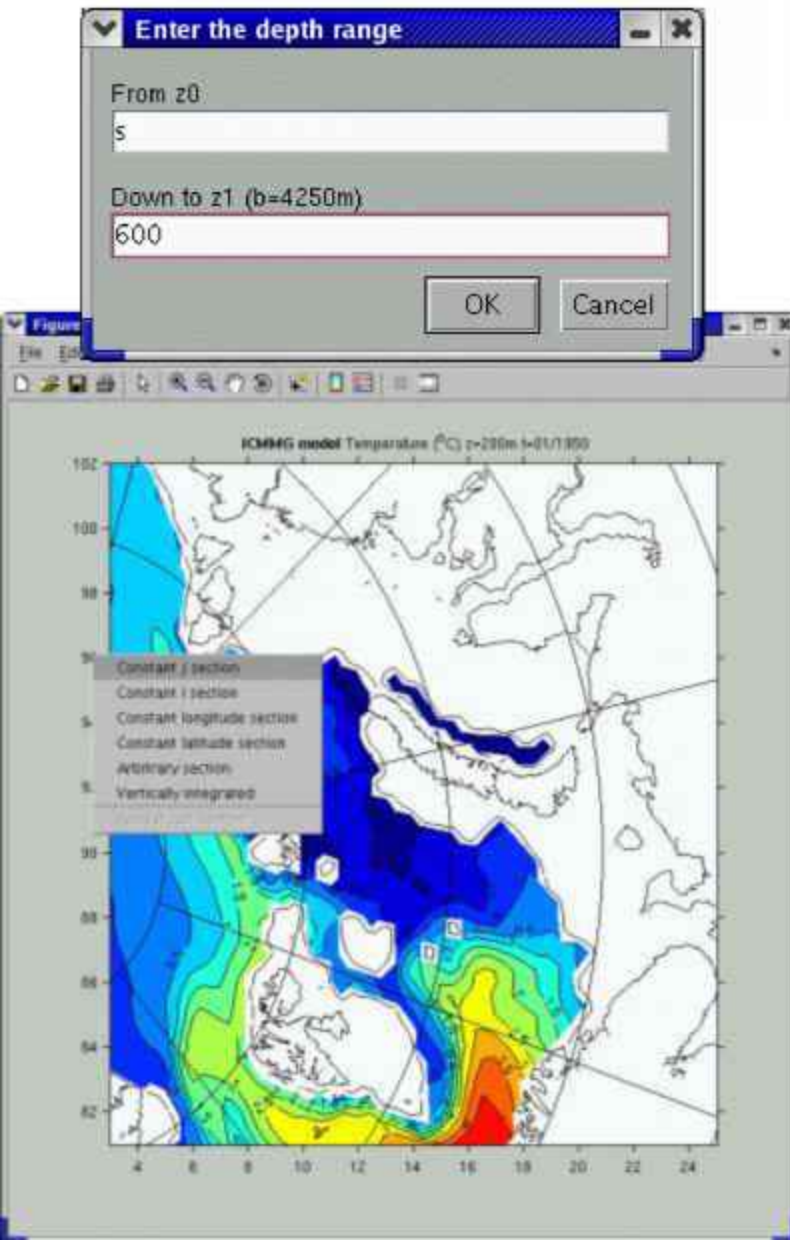


- Сетка определяется с помощью координат сдвига относительно основного узла в единицах ячейки
- Тип контуров: автоматический, определенный параметрами, определенный массивом
- Три типа линий контура: по умолчанию (положительные), отрицательные, нулевой – определяются сплошностью, толщиной и цветом
- Заливка цветом

Примеры



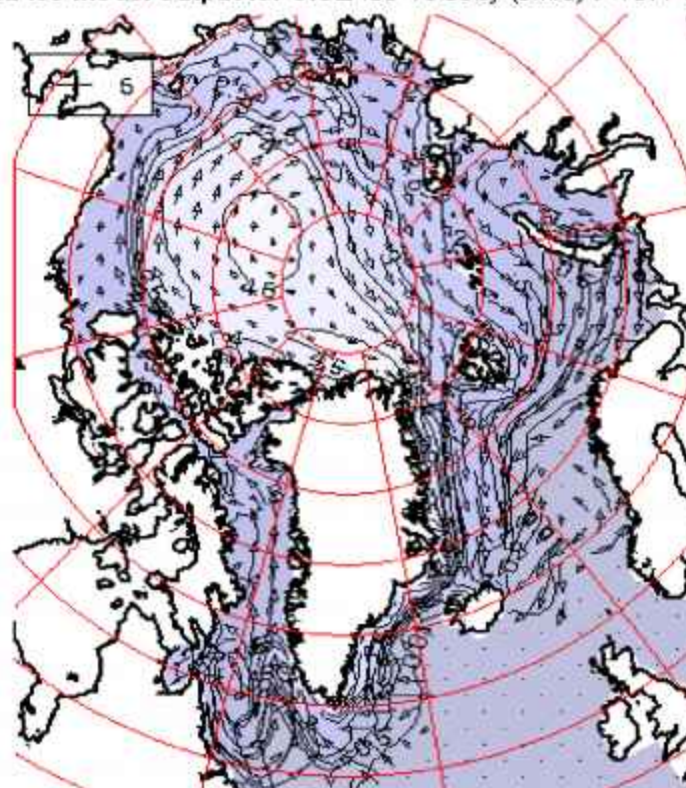
Интерактивное построение сечений



Пакетный режим

```
gui('file',[icedir,icefile], ...  
    'var','H', ...  
    'type','Z', ...  
    'value',0, ...  
    'XLim',[-25,26], ...  
    'YLim',[54,109], ...  
    'RecNo',1, ...  
    'figure', 12);  
gui('file',[icedir,icefile], ...  
    'var','Vice', ...  
    'type','Z', ...  
    'value',0, ...  
    'XLim',[-25,26], ...  
    'YLim',[54,109], ...  
    'RecNo',1, ...  
    'figure', 12, ...  
    'Arrows.ReferenceValue',5, ...  
    'hold on',1,...  
    'WhatToPresent','Vector');
```

sea ice model output for CICE Ice Velocity (cm/s) t=1611 days



Благодарю за внимание!