

CITES-2011, 3 июля, Томск

Введение в практический курс
«Моделирование мезомасштабных
атмосферных процессов на основе
современных параллельных
вычислительных технологий»

Степаненко В.М.

Московский государственный университет
(Научно-исследовательский вычислительный центр,
Географический факультет)

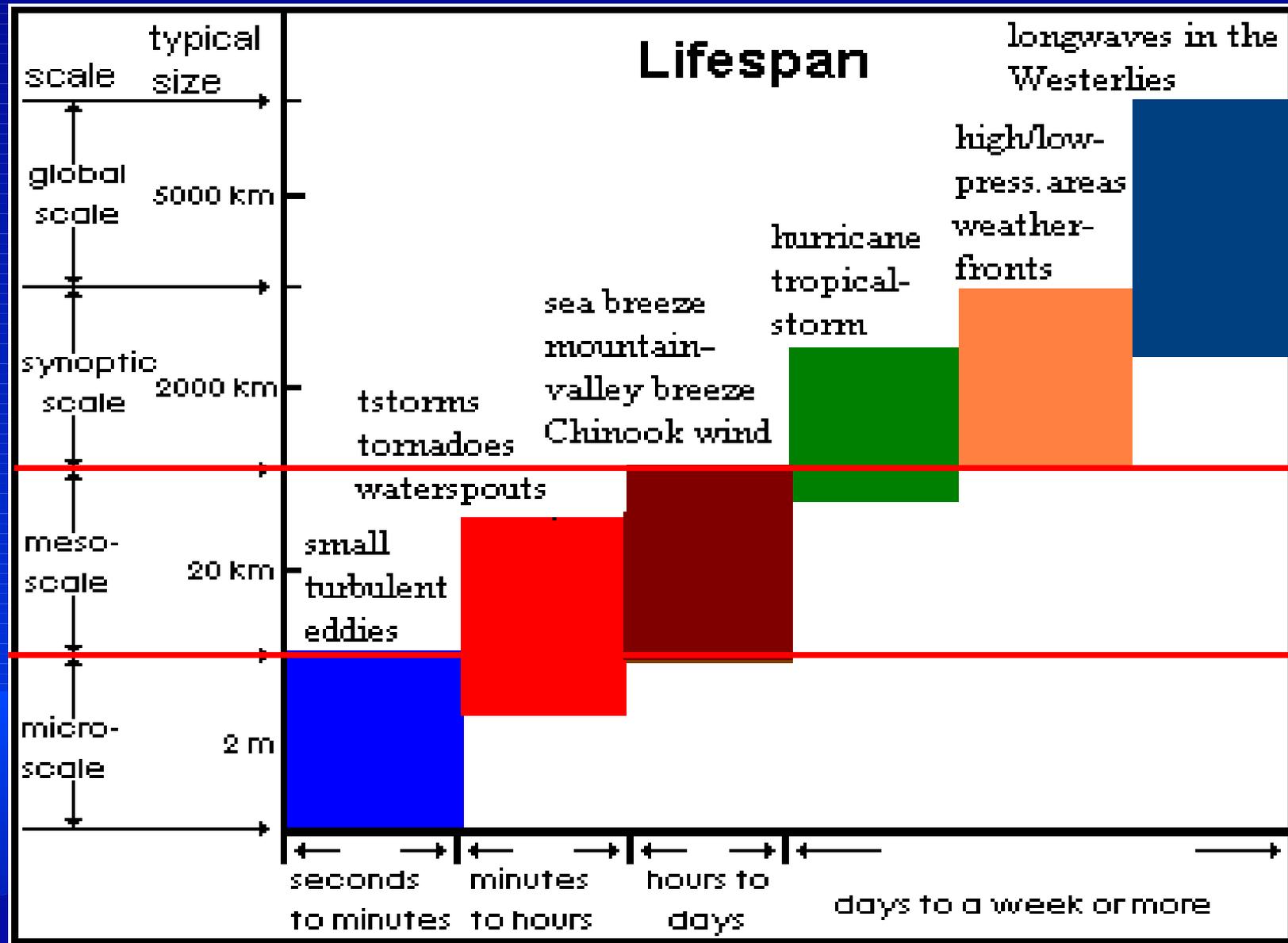
План лекции

- Общий план практических занятий CITES-2011
- Мезомасштабные атмосферные процессы
- Мезомасштабная атмосферная модель NH3D_MPI
- Параллельная реализация модели
- Бризовые циркуляции
- Постановка задачи для практических занятий

План практических занятий CITES- 2011

- Численные методы расчета регионального переноса примеси (Фадеев Р.Ю.; 6-7 июля)
- Моделирование атмосферных мезометеорологических процессов на основе современных параллельных вычислительных технологий (Степаненко В.М.; 4-5 июля)
- Вычислительные технологии оперативного регионального прогноза погоды (Ривин Г.С.; 6-7 июля)

Масштабы атмосферных процессов



Динамический критерий разделения атмосферных масштабов

Введем масштабы:

L – горизонтальный масштаб, H – вертикальный масштаб,
 U – масштаб горизонтальной скорости, W – масштаб вертикальной скорости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{U}{L} \sim \frac{W}{H}$$

$$(\vec{u} \nabla) \vec{u}_h \sim \frac{U^2}{L} \quad (\vec{u} \nabla) w \sim \frac{U^2 H}{L^2}$$

Геострофический баланс выполняется, если

$$adv/Cor \sim \frac{U^2/L}{lU} < \alpha = 10^{-1} \quad \longrightarrow \quad L > \alpha^{-1} \frac{U}{l} \sim \alpha^{-1} 10^5 \text{ м} = 1000 \text{ км}$$

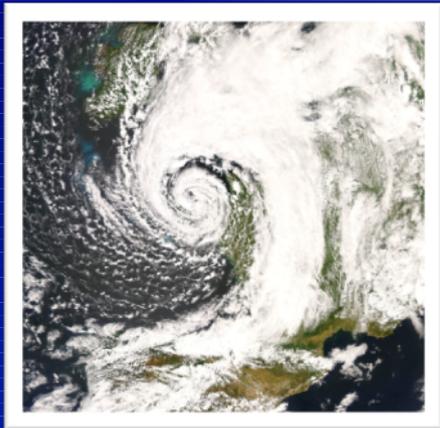
Гидростатический баланс выполняется, если

$$adv/grav \sim \frac{U^2 H}{gL^2} < \alpha = 10^{-1} \quad \longrightarrow \quad L > U \left(\frac{H}{g \alpha} \right)^{1/2} \sim 10^3 \text{ м} = 1 \text{ км}$$

Динамический критерий разделения атмосферных масштабов

	Геострофический баланс	Гидростатический баланс
Макромасштаб $L > 1000$ км	+	+
Мезомасштаб $1 \text{ км} < L < 1000$ км	-	+/-
Микромасштаб $L < 1$ км	-	-

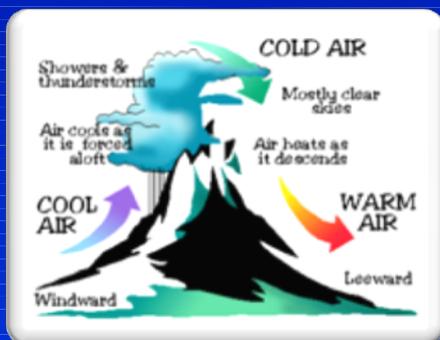
Иерархия атмосферных моделей



ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ разрешение 10-100 км
(*GFDL, ECHAM, HadCM, INM RAS, ...* - ГИДРОСТАТИКА)

**Циркуляции планетарного
и синоптического масштабов:**

пассаты, муссоны, циклоны и антициклоны, ...



РЕГИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ разрешение 1-10 км
(*MM5, WRF, Meso-NH, NH3D, ...* - НЕГИДРОСТАТИКА)

Циркуляции масштабов мезо- α , β , γ :

Бризы, фены, бора, линии шквалов, МКК, ...



МОДЕЛИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ разрешение 10-100 м

**Циркуляции масштаба атмосферного пограничного
слоя - термики, валики, ячейки, ...**

Уравнения мезомасштабной модели NH3D в σ -системе координат

Уравнение в z -системе координат

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} + lv + D_u + R_u$$

Введем σ , фоновые профили геопотенциала и температуры

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad p_* = p_s - p_t \quad f = f_s(p) + f', \quad f = \phi, \theta$$

Используя соотношения

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma}$$
$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} \frac{\sigma}{p_*} \frac{\partial p_*}{\partial x}$$

и преобразованное уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p_*}{\partial t} + \frac{\partial u p_*}{\partial x} + \frac{\partial v p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_*}{\partial \sigma} = 0$$

получаем

$$\frac{\partial p_* u}{\partial t} + \frac{\partial u^2 p_*}{\partial x} + \frac{\partial v p_* u}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_* u}{\partial \sigma} = -p_* \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} \sigma \frac{\partial p_*}{\partial x} + l p_* v + p_* (D_u + R_u)$$

Аналогично, 2-е уравнение движения принимает вид

$$\frac{\partial p_* v}{\partial t} + \frac{\partial u p_* v}{\partial x} + \frac{\partial v^2 p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_* v}{\partial \sigma} = -p_* \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} \sigma \frac{\partial p_*}{\partial y} - l p_* u + p_* (D_v + R_v)$$

Далее, учитывая

$$\frac{\partial}{\partial z} \simeq -S \frac{\partial}{\partial \sigma}$$

и

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{1}{p_*} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma}$$

имеем

$$\frac{\partial p_* \tilde{w}}{\partial t} + \frac{\partial u p_* \tilde{w}}{\partial x} + \frac{\partial v p_* \tilde{w}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_* \tilde{w}}{\partial \sigma} = -p_* S \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + p_* \tilde{w} \frac{\theta'}{\theta_s} + p_* (D_w + R_w)$$

Уравнения для скаляров

$$\frac{\partial p_* \theta'}{\partial t} + \frac{\partial u p_* \theta'}{\partial x} + \frac{\partial v p_* \theta'}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_* \theta'}{\partial \sigma} = p_* \tilde{w} S \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} - \frac{p_*}{\rho c_p} S \left(\frac{p_0}{p} \right)^\kappa \frac{\partial (Q_s + Q_l)}{\partial \sigma} + p_* (D_w + R_w)$$

$$\frac{\partial p_* q_v}{\partial t} + \frac{\partial u p_* q_v}{\partial x} + \frac{\partial v p_* q_v}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_* q_v}{\partial \sigma} = p_* (D_{q_v} + R_{q_v})$$

Эллиптическое уравнение для возмущения геопотенциала выводится путем дифференцирования по x , y и σ трех уравнений движения и суммирования результатов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u - \text{уравнение}}{p_*} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v - \text{уравнение}}{p_*} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\tilde{w} - \text{уравнение}}{p_*} \right)$$



$$\frac{\partial^2 \phi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi'}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial \sigma} S \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} = \Phi$$

Граничные условия

На верхней границе $\sigma=0$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} = 0, f = u, v, \theta', \tilde{w}, q_v$$

На нижней границе $\sigma=1$

сопряжение с подстилающей поверхностью
через потоки тепла и импульса

На боковых границах – условия излучения

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C_x \frac{\partial f}{\partial x} + C_y \frac{\partial f}{\partial y} = 0,$$
$$C_x = \frac{-\frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial x}}{((\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2)}, C_y = \frac{-\frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial y}}{((\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2)}$$

или однородное условие Неймана

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0$$

Конечно-разностная схема

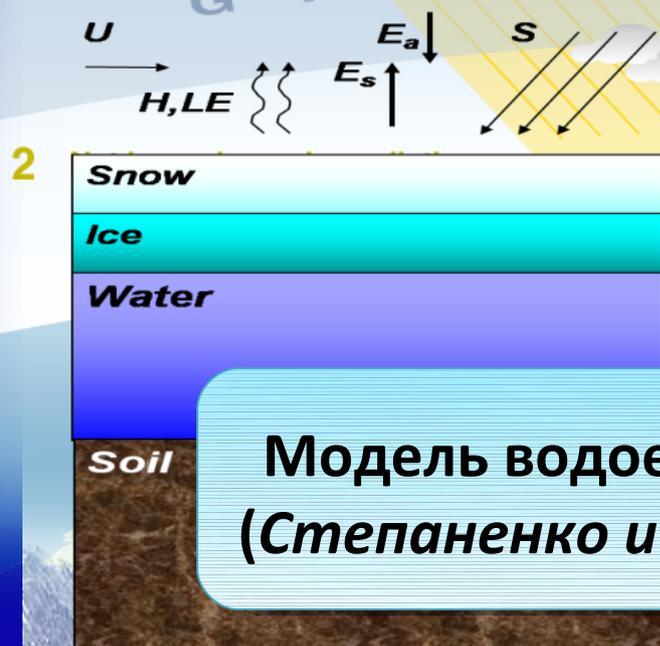
- Центральные разности для пространственных производных
- Схема “чехарда” по времени $\frac{f^{j+1} - f^{j-1}}{2 \Delta t} = F(f^j)$
- Вычислительная мода подавляется фильтром Аселина
- Короткие паразитные волны подавляются пространственным фильтром 4-го порядка
- Эллиптическое уравнение решается преобразованием Фурье и обращением трехдиагональных матриц методом прогонки

Параметризации физических процессов

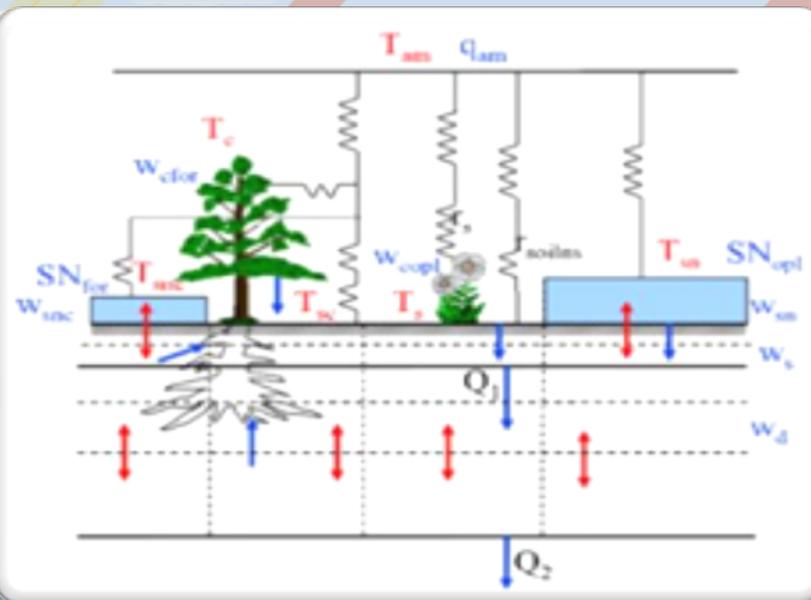
Модель переноса
солнечного и теплового
излучения
(*Chou and Suarez, 2002*)

Модель переноса атмосферных
примесей

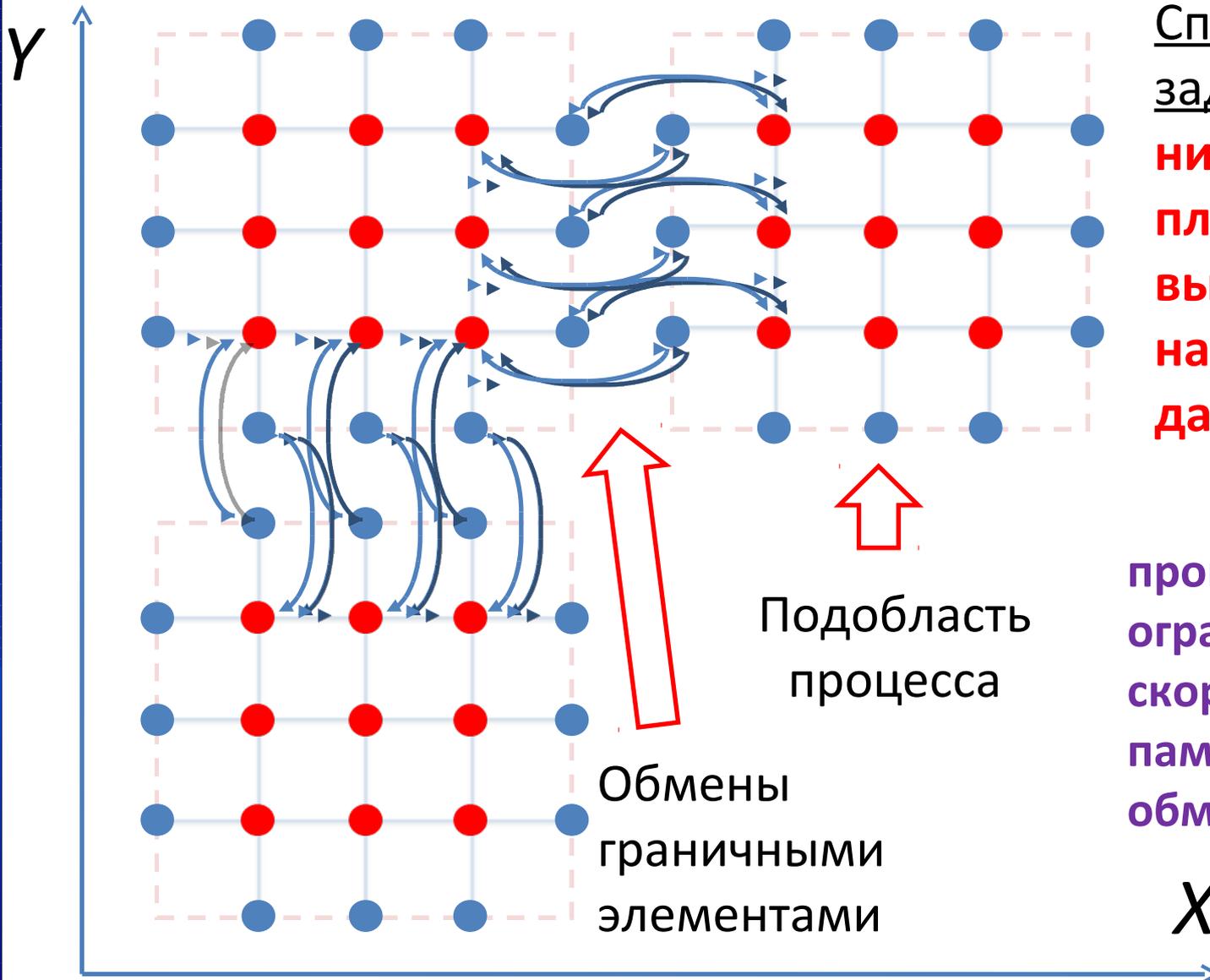
Модель снежного покрова и
деятельного слоя суши ИВМ РАН
(*Володина и др., 2000*)



Модель водоема LAKE
(*Степаненко и др., 2011*)



РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ НА МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЕ (Межпроцессорные пересылки данных при решении уравнений по явной схеме)



Специфика

задачи:

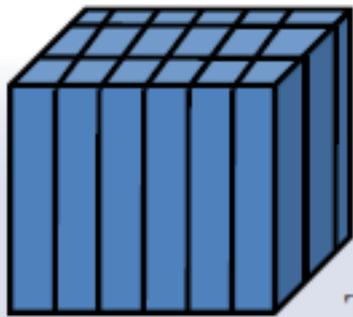
**низкая
плотность
вычислений
на единицу
данных**



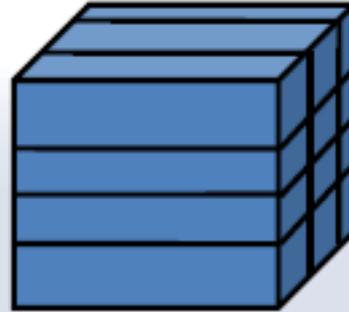
**производительность
ограничена
скоростью работы
памяти и
обменной сети**

Транспонирование массивов при решении эллиптического уравнения

1)

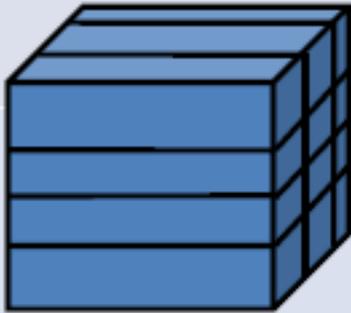


TRANS_XY_YZ

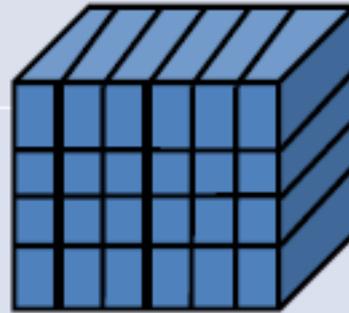


БПФ по X

2)

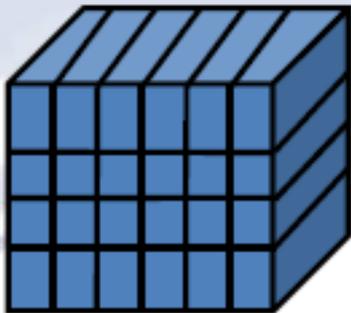


TRANS_YZ_XZ

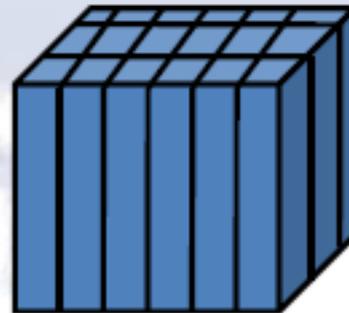


БПФ по Y

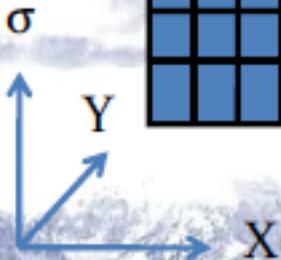
3)



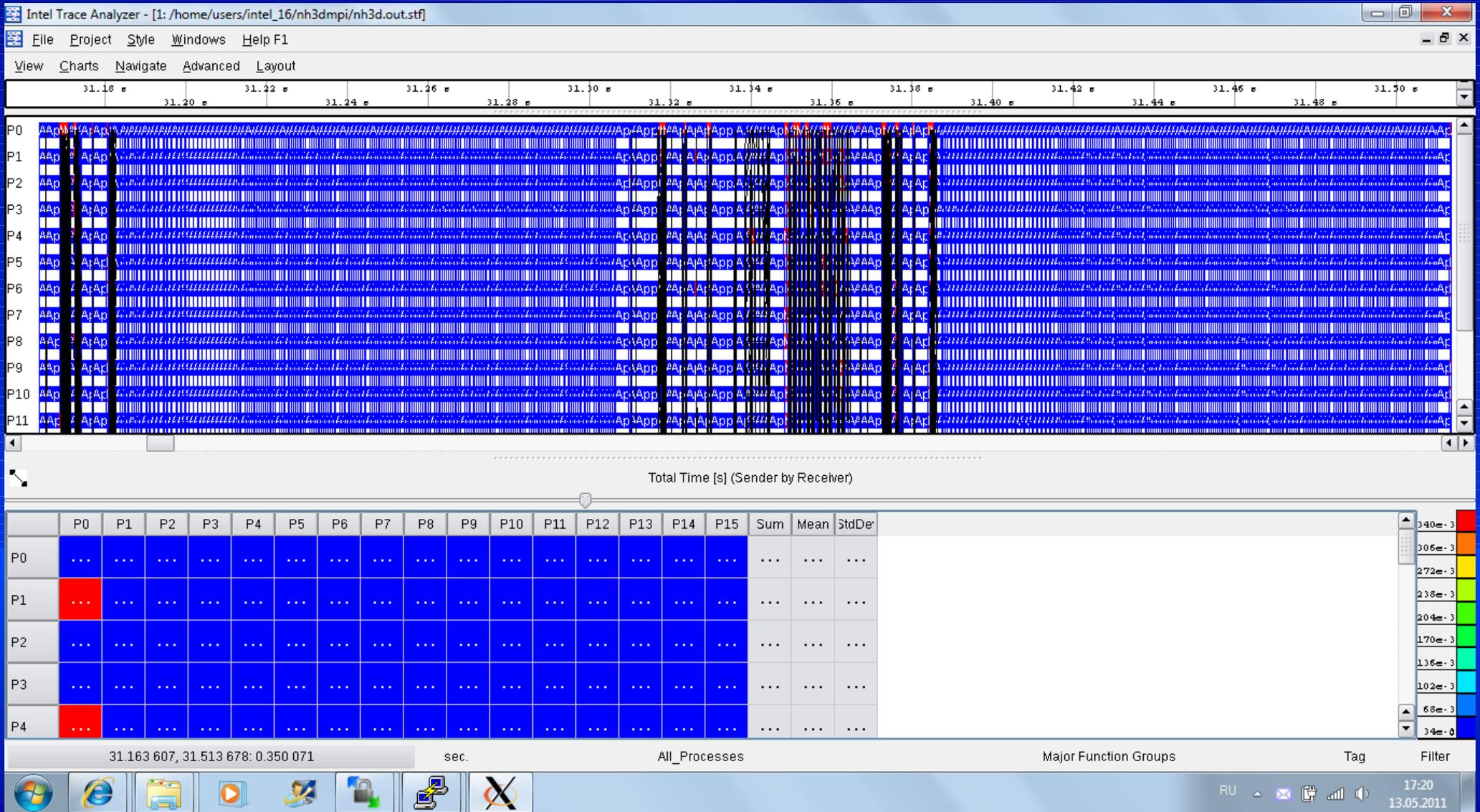
TRANS_XZ_XY



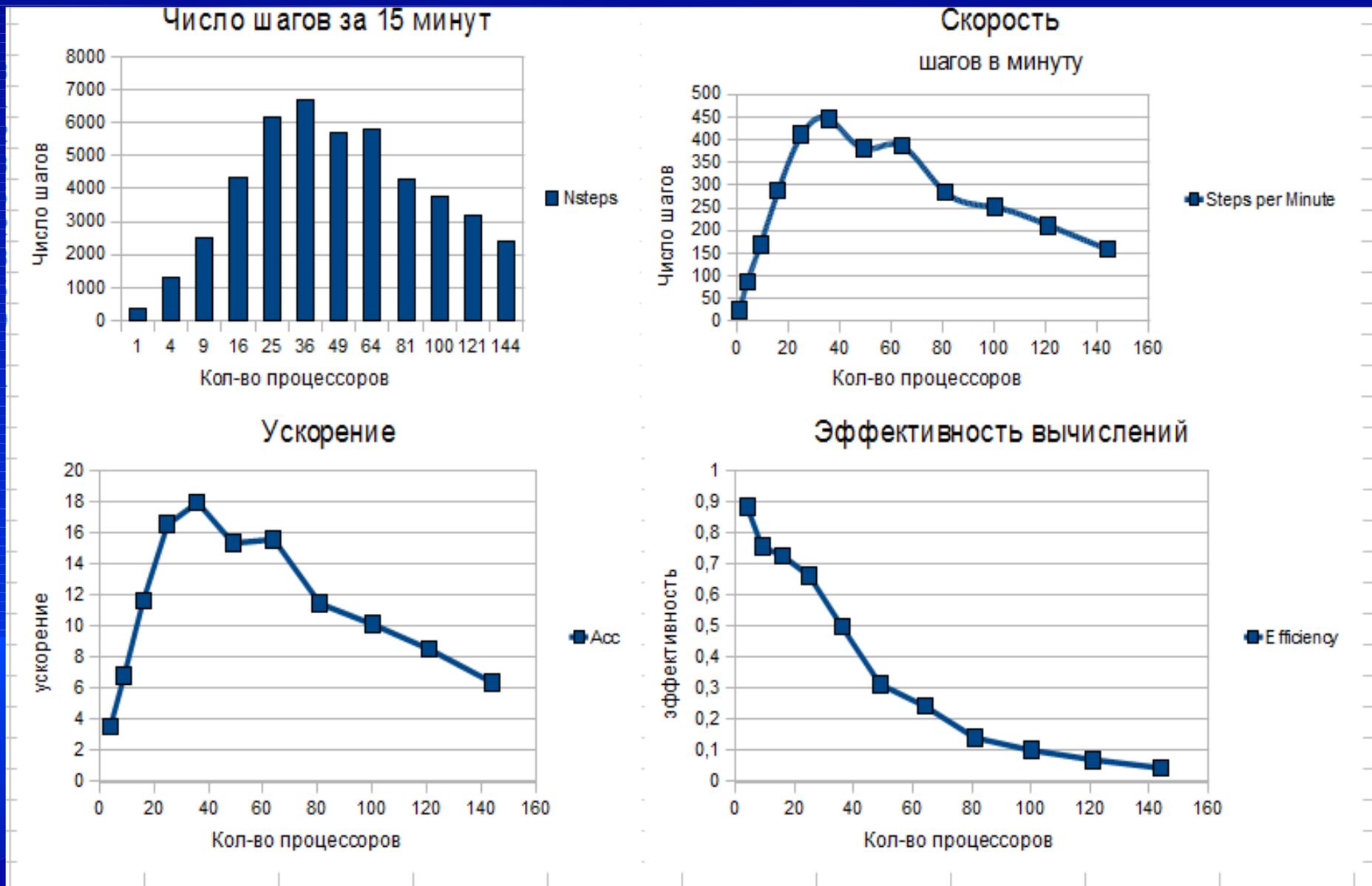
прогонка по σ



Результаты трассировки модели NH3D_MPI (16 процессоров)



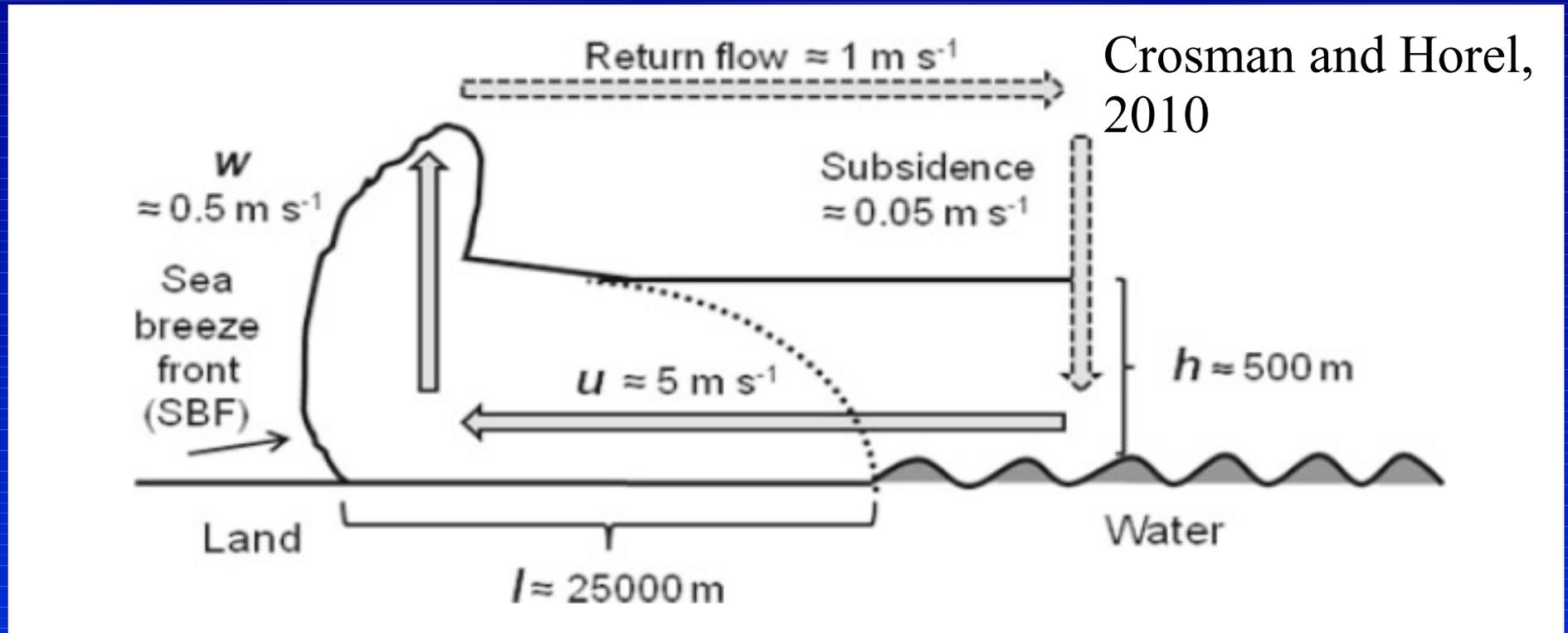
Ускорение и эффективность модели (результаты получены А.Тепловым)



Эффективность = ускорение / количество процессов

Бризы

Схема бризовой циркуляции



Виды бризовых циркуляций

- Морские, озерные бризы
- Бризы на крупных реках
- Ледовые бризы
- Бризы на границе снежного покрова
- Бризы на границе лес-поле
- Городские бризы

Параметры энергетической диагностики бризовой циркуляции

$$E_k = \frac{1}{2g} \int_S \int_0^1 p_* (u^2 + v^2 + w^2) d\sigma dS'$$

Кинетическая энергия

$$E_i = \frac{c_p}{g} \int_S \int_0^1 p_* \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \theta' d\sigma dS' = \frac{c_p}{g} \int_S \int_0^1 p_* T' d\sigma dS'$$

Внутренняя энергия

$$E_a = -\frac{1}{2} \frac{R_d}{gp_0^\kappa} \int_S \int_0^1 p^{\kappa-1} (p_* \theta')^2 \left(\frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} \right)^{-1} d\sigma dS'$$

Доступная потенциальная энергия

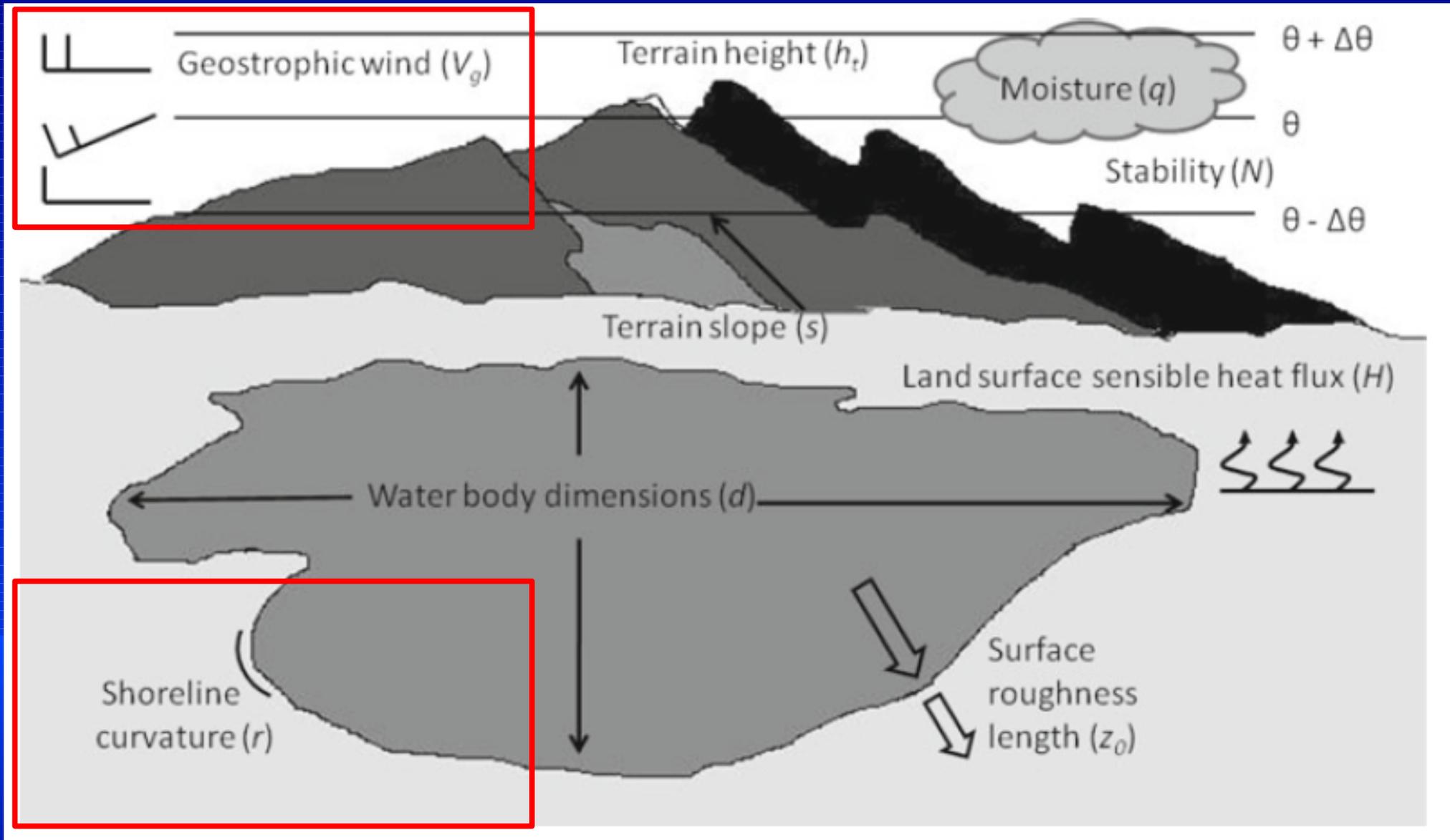
$$A_b = \int_S \int_0^1 \left(wp_* \frac{\theta'}{\theta_s} \right) d\sigma dS'$$

Генерация кинетической энергии силой плавучести

$$A_s = \int_S \int_0^1 \frac{c_p wp}{R_d \theta_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} d\sigma dS'$$

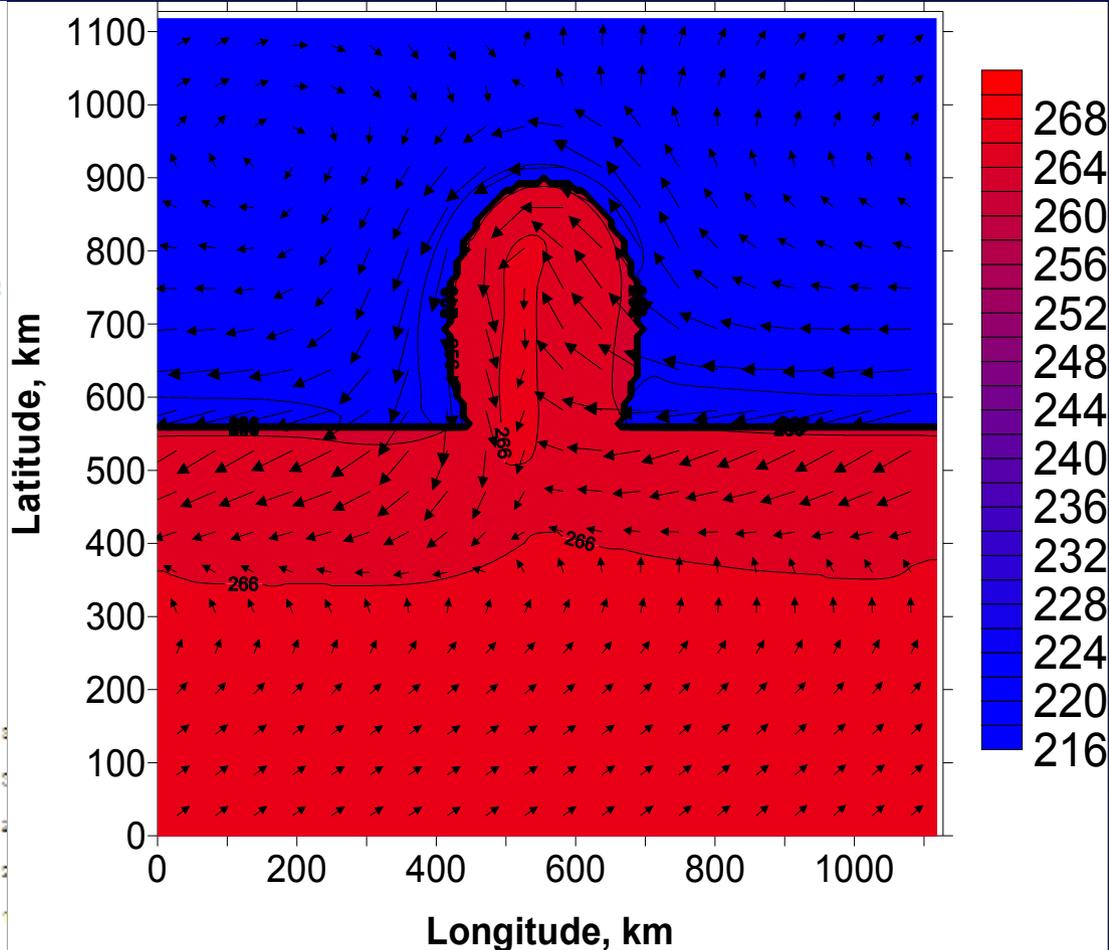
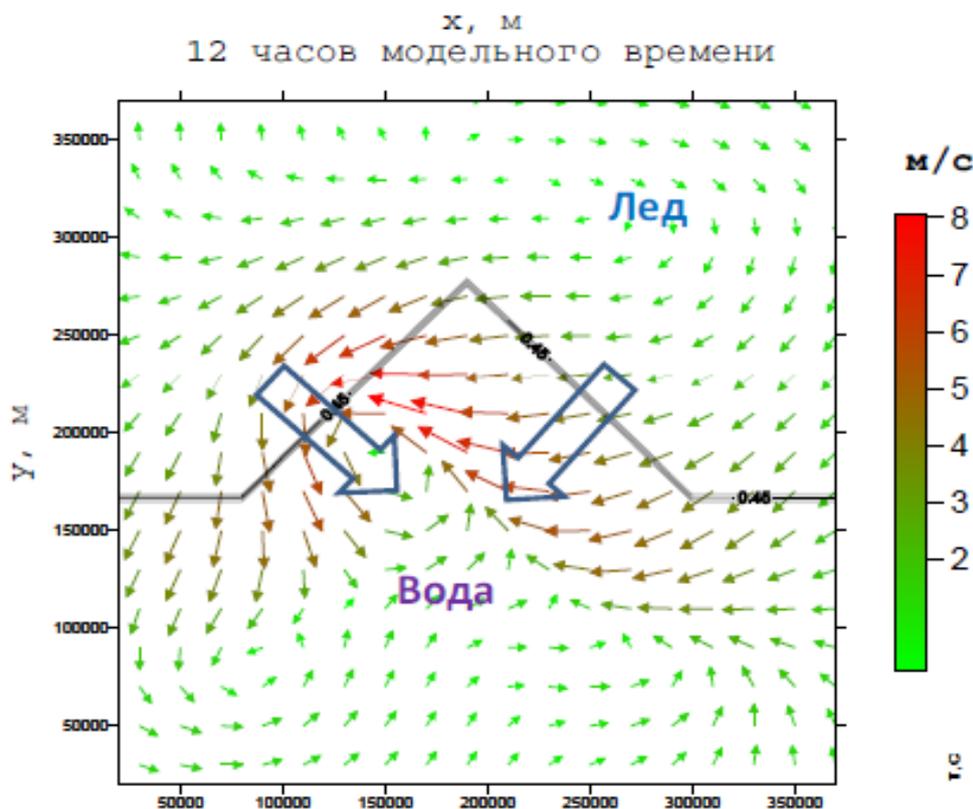
Источник внутренней энергии за счет вертикальной адвекции фоновой температуры

Факторы бризовой циркуляции



Образование вихря при конвергенции бризового течения

Образование мезоциклона на кромке
морского льда (Д.Г. Чечин)



Уравнение
завихренности

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{\partial w}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial w}{\partial y} \omega_y - (\omega_z + l) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \beta v =$$

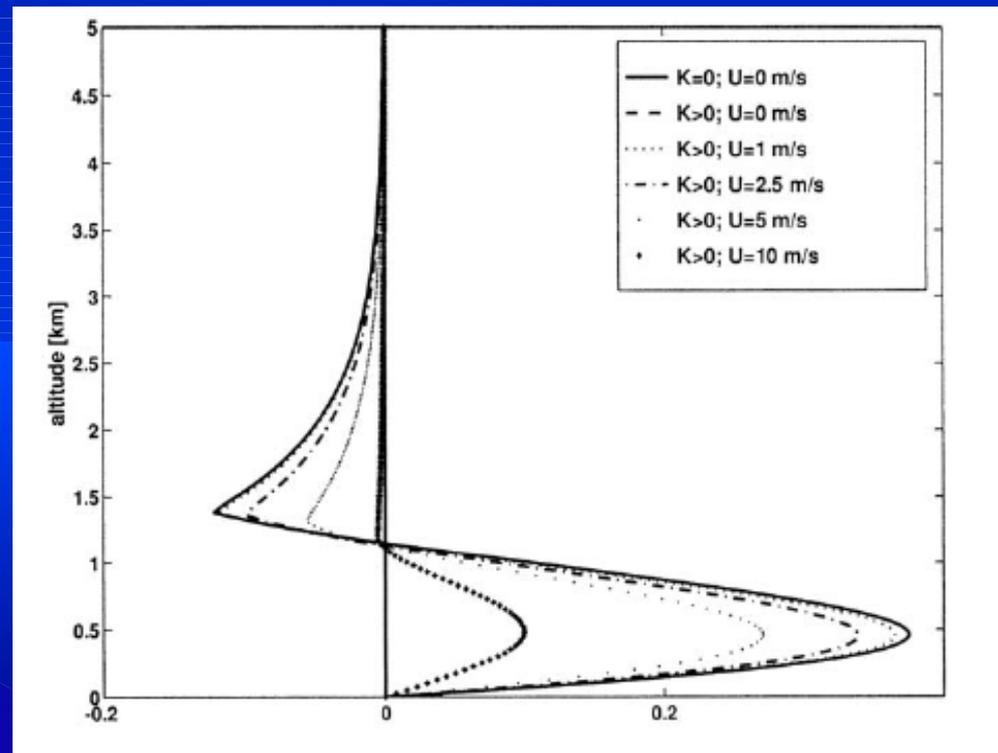
$$(\nabla_h w, \omega_h) - (\omega_z + l) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \beta v$$

Мезомасштабные потоки тепла

Для ячейки глобальной климатической модели ($n \cdot 10$ км – 100 км) мезомасштабные процессы являются подсеточными и формируют подсеточные потоки тепла, влаги и импульса

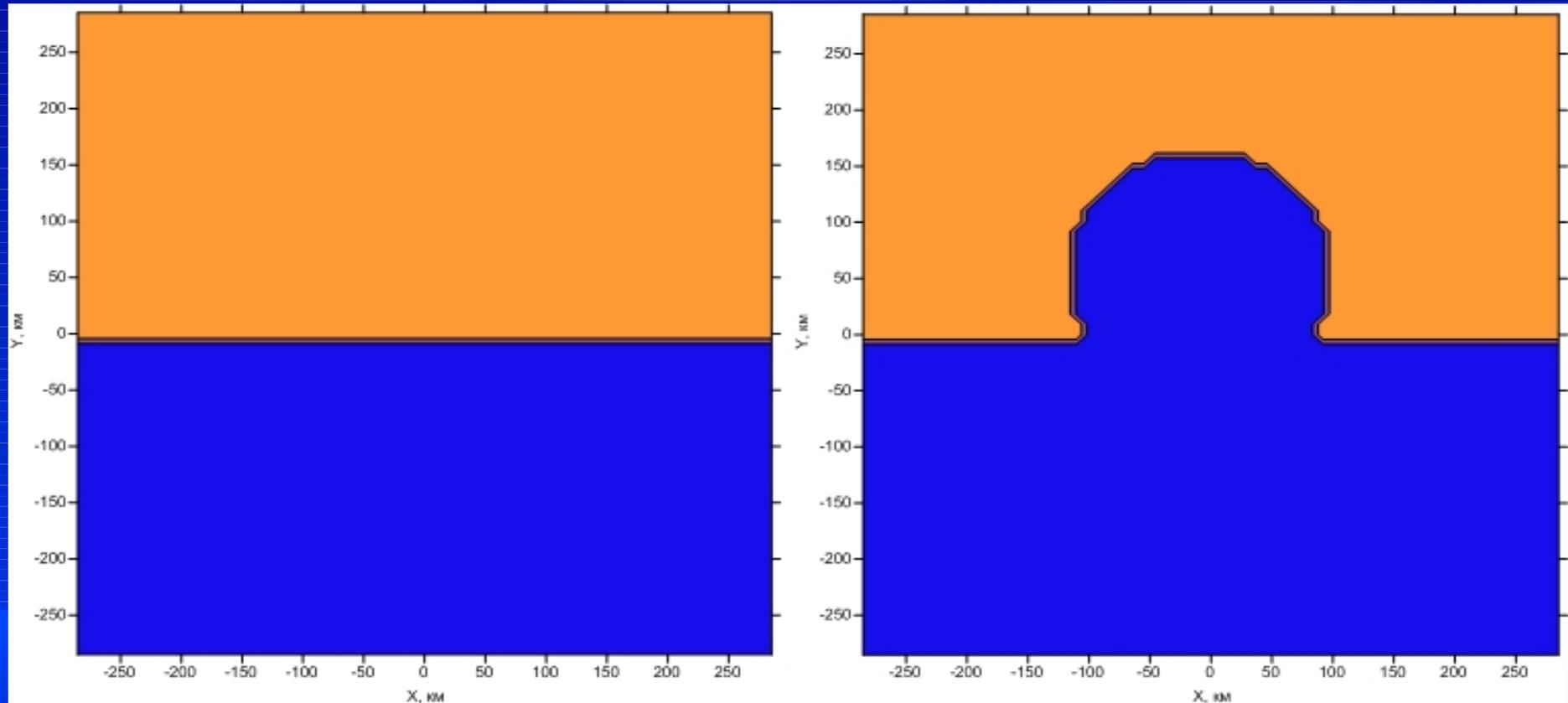
$$H = c_p \rho \overline{w' \theta'},$$
$$LE = L \rho \overline{w' q'},$$
$$f' = f - \bar{f},$$
$$f = w, \theta, q$$
$$\bar{f} = \frac{1}{S} \int_S f dS'.$$

Мезомасштабный поток тепла
(Baldi et al., 2005)



Задание 1. Моделирование динамики морского и берегового бриза

Распределение суши и моря в двух экспериментах



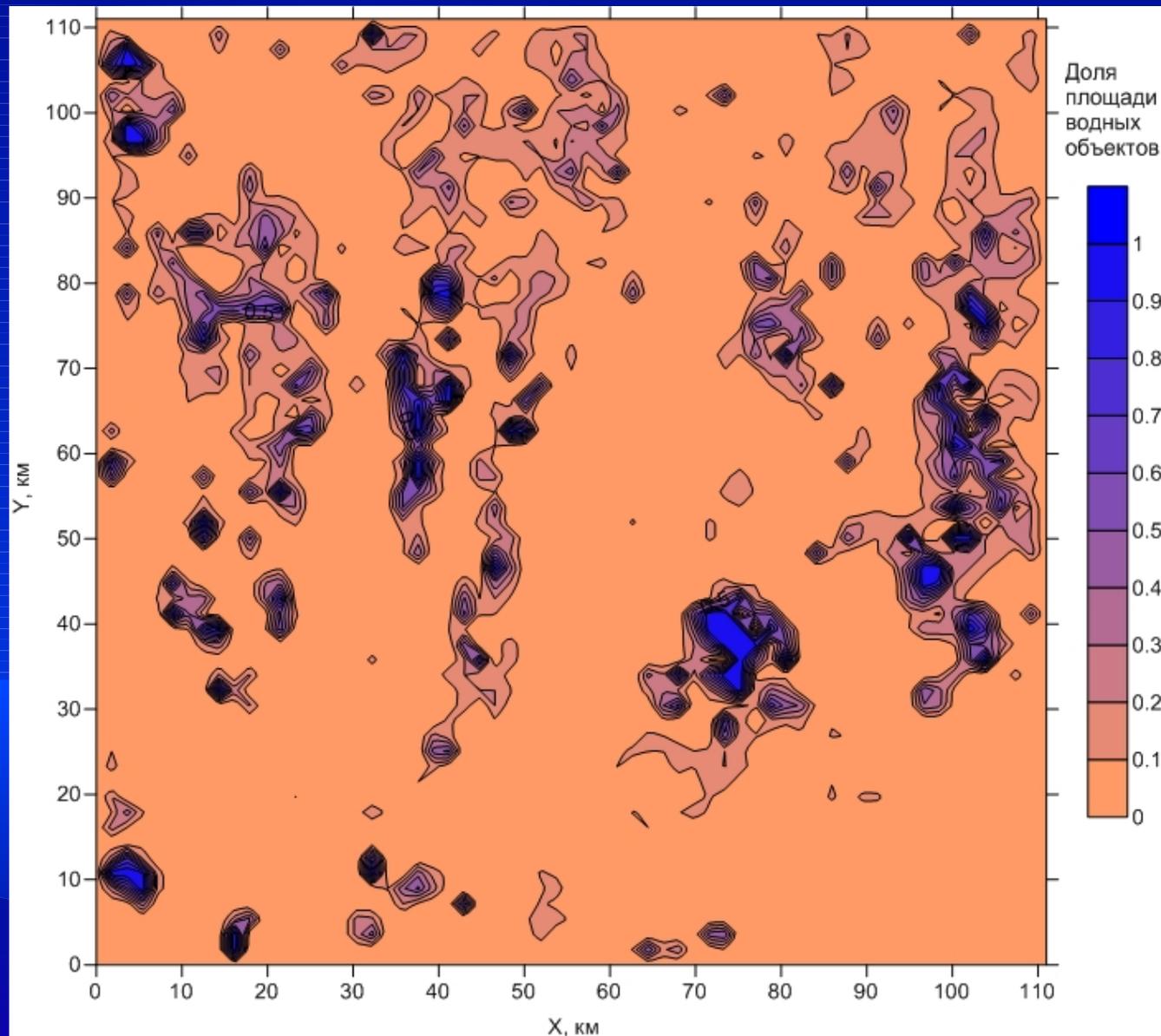
Задание 2.

Моделирование динамики ледового бриза

Задаётся распределение льда и открытой воды

Задание 3. Моделирование мезомасштабных циркуляций над гидрологически неоднородной поверхностью

- Размеры конечно-разностной сетки модели 61x61x31
- Шаг сетки по осям x и y — 1.8 км
- Шаг по времени — 2 с
- Координаты центра расчетной области: широта 62 с.ш., долгота 75 в.д.
- Начальный момент времени — 06:00 1 июля
- Начальное поле ветра соответствует почти полному покою атмосферы
- Фазовые переходы влаги в атмосфере не учитываются



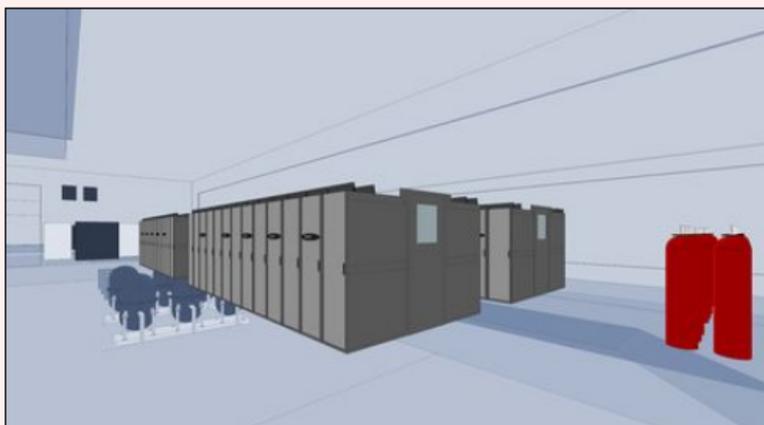
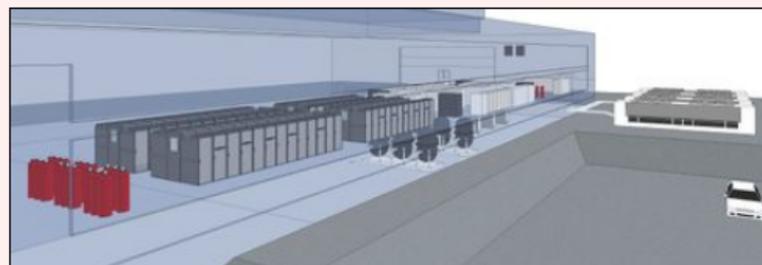
Анализ результатов численных экспериментов

- Анализа основных качественных закономерностей пространственно-временной динамики бриза
- Оценка роли фонового (геострофического) ветра
- Энергетическая диагностика бризовой циркуляции
- Оценка механизмов формирования завихренности (величин слагаемых уравнения завихренности)
- Расчет профилей мезомасштабных потоков тепла и влаги

Реализация численных экспериментов (www.parallel.ru)

Суперкомпьютерный комплекс "Ломоносов"

Общий вид комплекса:



cale fl ↓ Следующее ↑ Предыдущее Подсветить все Учить регистр Достигнут низ страницы, продолжено сверху

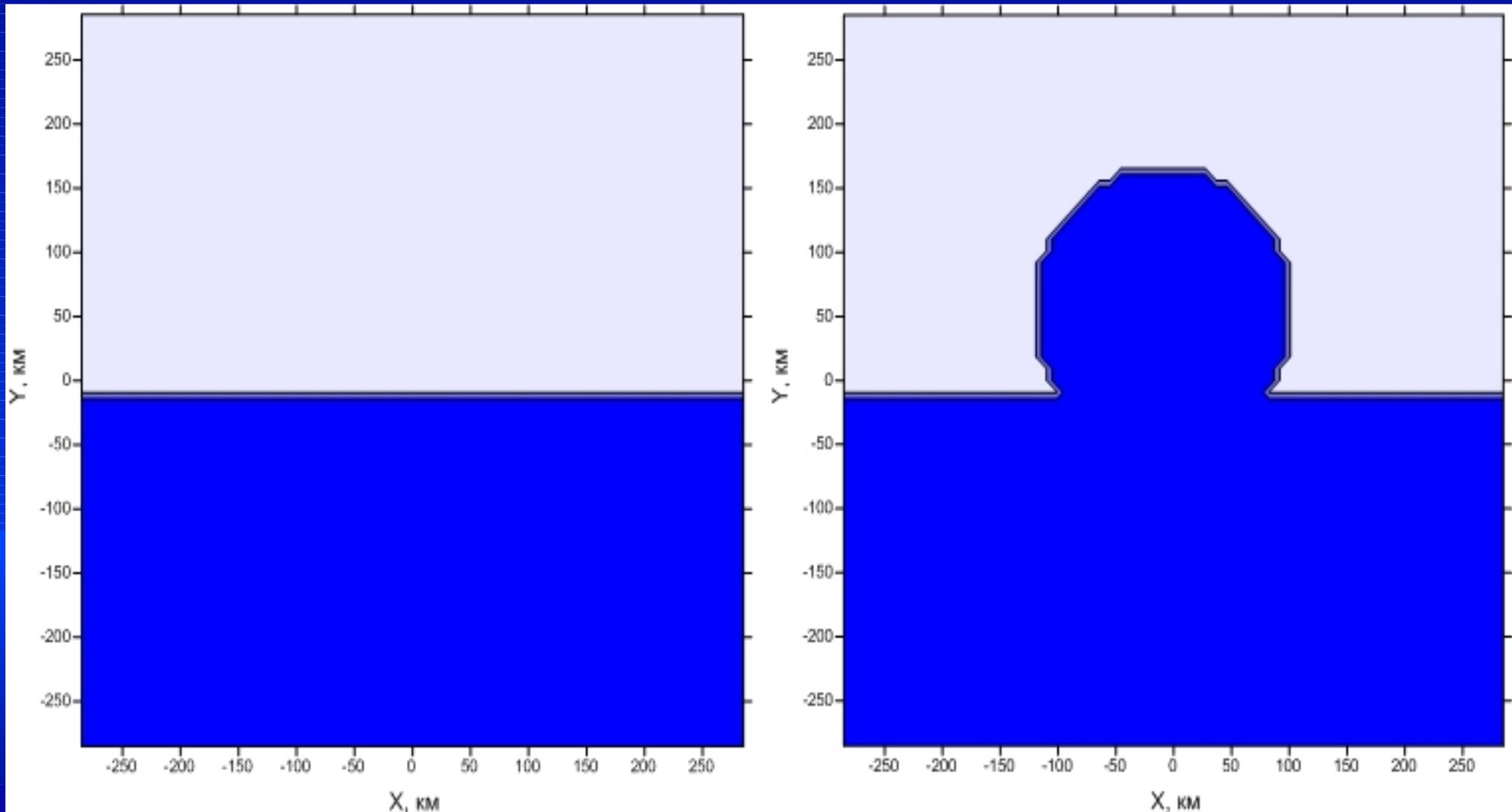
- Пиковая производительность 510 Тфлопс (с GPU – 1.3 Пфлопс)
- Производительность на Linpack 78%
- Число процессоров/ядер 10 260/44 000
- Процессор основных вычислительных узлов Intel® Xeon X5570 Nehalem

СПАСИБО!

**До встречи на практических
занятиях!**

Задание 2. Моделирование динамики ледового бриза

Распределение льда и открытой воды в двух экспериментах



Бриз на границе “лес-поле”

(Avisar, 2005)

