

**Вычислительно-информационные технологии
для математического моделирования
естественных и антропогенных изменений
климата и природной среды**

**Лаборатория суперкомпьютерного моделирования
природно-климатических процессов,
Научно-исследовательский вычислительный центр,
МГУ им. М.В.Ломоносова
Отчет за 2011 г.**



Коллектив лаборатории

- Лыкосов В.Н. – д.ф.-м.н., зав. лаб. (гл.н.с. ИВМ РАН)
- Глазунов А.В. – к.ф.-м.н., с.н.с. (с.н.с. ИВМ РАН)
- Степаненко В.М. – к.ф.-м.н., с.н.с.
- Юрова А.Ю. – к.г.н., с.н.с. (н.с. Гидрометцентра России)
- Кулямин Д.В. – к.ф.-м.н., н.с.
- Мортиков Е.В. – м.н.с. (аспирант ИО им. П.П. Ширшова РАН)
- Чечин Д.Г. – м.н.с. (аспирант ИФА им. А.М. Обухова РАН)
- Тыртышникова Т.К. – вед. программист

Гранты

- РФФИ 09-05-00379, «Численное моделирование генерации, переноса и стока метана в системе деятельный слой суши - атмосфера», НИВЦ МГУ, рук.: В.М. Степаненко (290 тыс.) - завершен
- РФФИ 10-05-00981, «Исследование и параметризация процессов, связанных с вращением Земли и воздействующих на структуру турбулентности в пограничном слое атмосферы», ИВМ РАН, рук.: А.В. Глазунов (310 тыс.)
- РФФИ 11-05-00434, «Математическое моделирование спектральной структуры атмосферной турбулентности», ИВМ РАН, рук.: В.Н. Лыкосов (400 тыс.)
- РФФИ 11-05-01190, «Мониторинг и моделирование динамики парниковых газов в региональной климатической системе Западной Сибири», ИМКЭС СО РАН (г. Томск), рук.: И.Г. Окладников (330 тыс.)
- РФФИ 11-05-12018-офи-м, «Моделирование отклика климатической системы на разрушение метаногидратов шельфа морей восточной Арктики», ИВМ РАН, рук.: В.П. Дымников (800 тыс.)
- МК-5218.2010.5 «Параметризация гидрологических процессов на суше для климатических моделей будущего поколения» (грант Президента России молодым кандидатам наук), НИВЦ МГУ, рук.: В.М. Степаненко (600 тыс.) - завершен

Основные показатели

	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Статьи в российских реферируемых журналах	4	2	3	4	6	3
Статьи в зарубежных журналах (и др. изданиях)	1	(3)	(5)	2	5	1 (1)
Статьи в сборниках	1	1	1	5	1	1
Доклады на международных конференциях (в России + за рубежом)	10 (8+2)	14 (11+3)	14 (9+5)	11 (6+5)	12 (3+9)	15 (7+8)
Доклады на национальных конференциях	4	2	3	7	5	5



Вольное Дело

Благотворительный фонд Ольги Дерипаски

ДИПЛОМ

Победителю конкурса работ
на присуждение грантов О.В. Дерипаска
талантливым студентам, аспирантам и молодым ученым
Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова

*Кулямин
Дмитрий Вячеславович*

научный сотрудник
Научно-исследовательский вычислительный центр

Цикл статей
«Квазидвухлетние колебания зонального ветра
в экваториальной стратосфере»

Ректор Московского университета
академик В.А. Садовничий

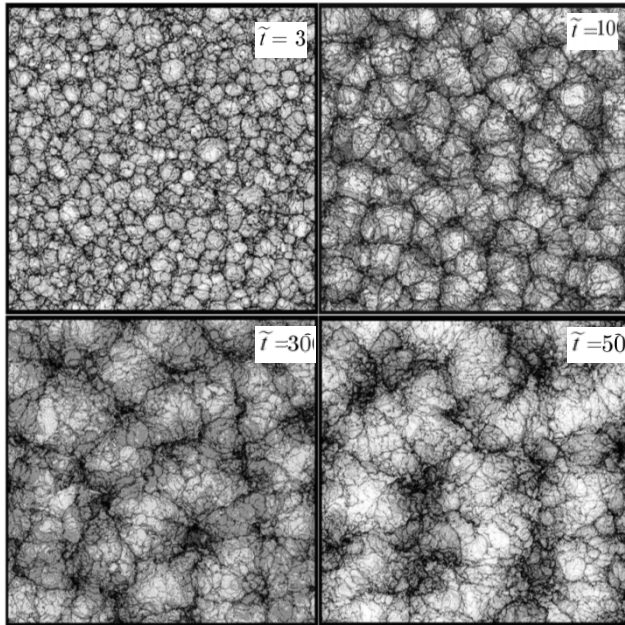
Учредитель фонда «Вольное дело»
О. В. Дерипаска

2011

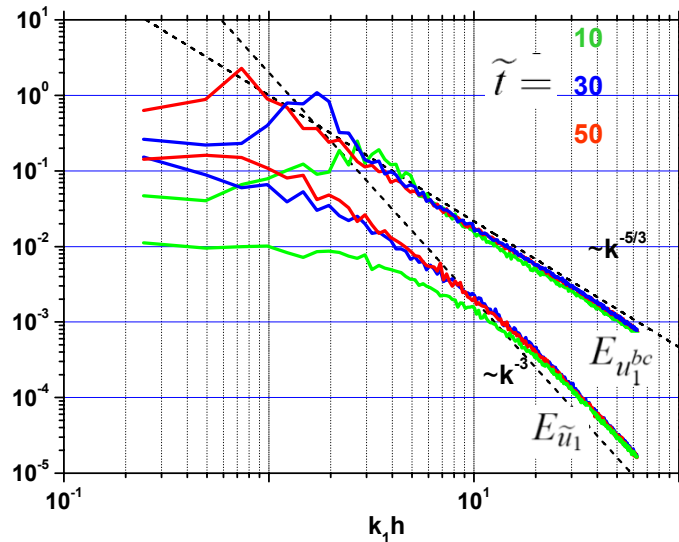
Наиболее значимые научные результаты

I. С помощью вихреразрешающей модели на суперкомпьютере «Ломоносов» проведено исследование турбулентных процессов, приводящих к образованию крупномасштабных когерентных структур, изучены закономерности роста конвективных термиков и проанализированы спектральные характеристики атмосферной турбулентности на масштабах от 1 до 10 км. Обнаружены и объяснены новые закономерности в распределениях крупномасштабных флуктуаций температуры, выявлены механизмы, создающие предпочтительные условия для роста масштаба и энергии конвективных термиков, а также получены новые данные о поведении растущего по высоте пограничного слоя атмосферы при достижении статистически равновесного состояния.

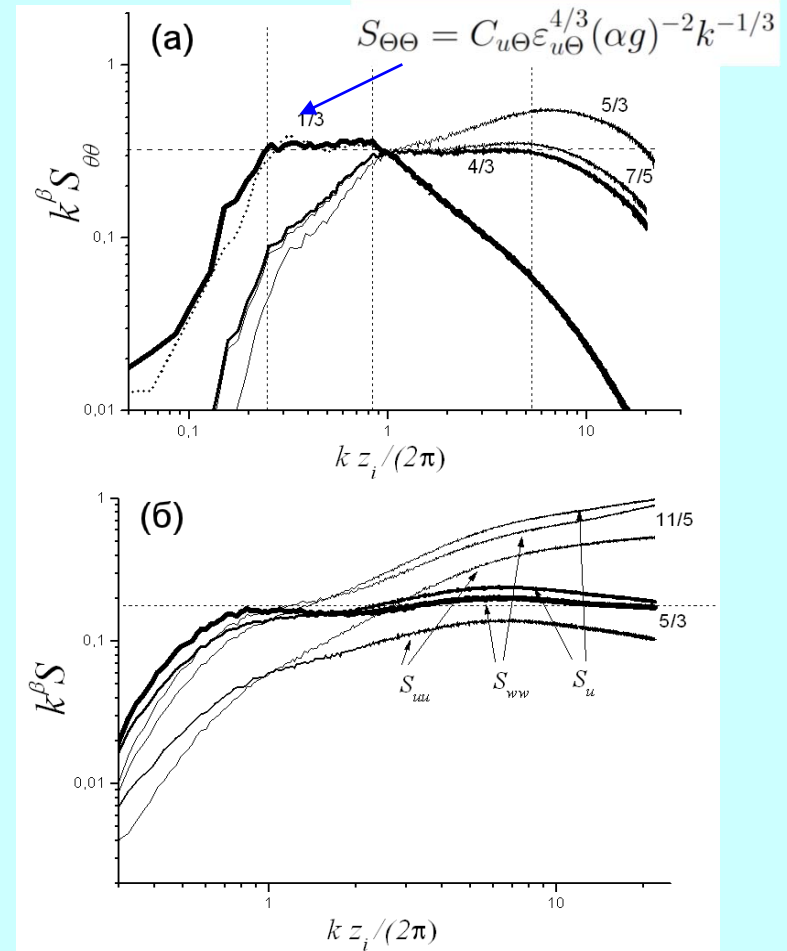
Конвекция Релея – Бенара (рост масштабов, генерация двумерной компоненты течения)



Спектр дисперсии горизонтальной компоненты скорости (u_1 вдоль x_1), баротропная и бароклинная компоненты



Растущий по высоте конвективный пограничный слой атмосферы (автомодельность спектральных распределений, фиксация относительных горизонтальных масштабов)



В крупномасштабных пространственных спектрах дисперсии потенциальной температуры четко выделяются степенные зависимости $S \sim k^{-1/3}$ и $S \sim k^{-4/3}$ (неклассические спектральные распределения).

Наиболее значимые научные результаты

II. Метод погруженной границы для численного воспроизведения течений вязкой несжимаемой жидкости реализован на графических процессорах и применен для описания как стационарных, так и нестационарных криволинейных границ на прямоугольных сетках. Рассмотрены особенности реализации итерационных методов и расчетов, связанных с аппроксимацией краевых условий на графических процессорах. В основу вычислительной технологии положена методика программирования CUDA. Проведены расчеты на кластере из восьми графических процессоров Nvidia Tesla T10 второго поколения и на суперкомпьютере “ГрафИТ!/GrapIT!” (Nvidia Tesla M2050). Результаты этих расчетов свидетельствуют о возможности эффективного моделирования течений в областях сложной конфигурации на данной архитектуре и применении метода погруженной границы для описания криволинейных границ на прямоугольных сетках.

Система уравнений Навье-Стокса

Рассматривается течение вязкой несжимаемой жидкости в области Ω , ограниченной границей Γ , в которой расположено N_b погруженных областей Ω_b^k с границами Γ_b^k

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} &= \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B\mathbf{u}|_{\Gamma} &= U_{\Gamma}, \mathbf{u}|_{\Gamma_b^k} = U_{\Gamma_b^k}(t) \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}, t_0) &= U_0(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Omega\end{aligned}$$

$\mathbf{u} \equiv (u, v, w)$ – вектор скорости, p – давление
 ρ, μ – плотность и вязкость жидкости, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематическая вязкость

- дискретизация уравнений Навье-Стокса на прямоугольных сетках
- необходимы специальные способы аппроксимации краевых условий на криволинейных границах Γ_b^k

Программная реализация

Реализация на графических процессорах

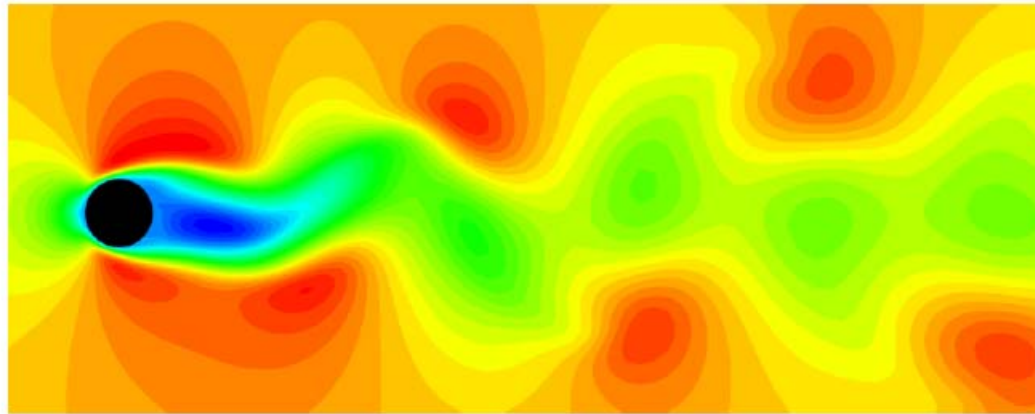
- CUDA, MPI
- Nvidia Tesla S1070 (T10)
<http://tesla.parallel.ru>
- Nvidia Tesla M2050, суперкомпьютер "ГрафИТ"/ "GraphIT"
<http://gpu.parallel.ru/graphit.html>

Реализация на центральном процессоре

- OpenMP
- Intel Xeon 5620 2.4Hz
<http://tesla.parallel.ru>
- Intel Xeon 5472 3.0Hz, СКИФ МГУ "Чебышёв"
http://parallel.ru/cluster/skif_msu.html

Течение вокруг кругового цилиндра

$Re = 100$, $\Omega = [30D \times 15D]$



	C_D	C_L	St
Williamson, 1989	-	-	0.164
Braza, 1986	1.36 ± 0.015	0.25	-
Liu, 1998	1.35 ± 0.012	0.339	0.164
Tseng, 2003	1.42	0.29 (rms)	0.164
Lai, 2000	1.4473	0.3299	0.165
Berthelsen, 2008	1.38 ± 0.01	0.34	0.169
	1.42 ± 0.008	0.348	0.168

Наиболее значимые научные результаты

III. Реализованы консервативные конечно-разностные схемы КАБАРЕ и предиктор-корректор с центральными разностями на смещенной сетке для решения уравнений Сен-Венана динамики руслового потока. Проведены тестовые расчеты с усеченными уравнениями Сен-Венана, совпадающими по виду с записанными в дивергентном виде уравнениями мелкой воды. Получено численное решение в случае растекающейся под действием силы тяжести капли, для которого известно аналитическое решение. Показано, что в обеих схемах возникают паразитные осцилляции, но в разных частях профиля капли (т. е. при разных числах Куранта). Предложена комбинация двух схем, в которой эта проблема устранена и которая удовлетворительно воспроизводит форму аналитического решения.

Параметризация рек в климатических моделях: мотивация

- Оценка средних и экстремальных значений годового стока, уровня рек
- Влияние крупных рек на термохалинную циркуляцию океана
- Вынос реками растворенного органического углерода — биохимия океана (образование CH_4 и т.д.)

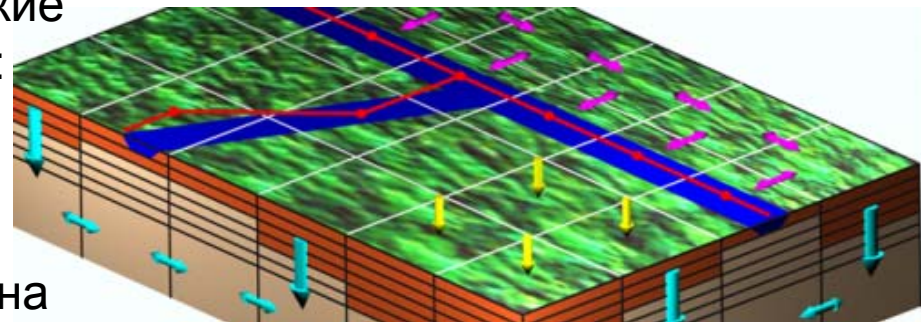
В современных моделях диагностические соотношения типа формулы Маннинга:

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} \left(\frac{\partial h_b}{\partial x} \right)^{1/2}$$

Новая модель — уравнения Сен-Венана

$$\frac{\partial SU}{\partial t} + \frac{\partial SU^2}{\partial x} = -gS \frac{\partial (h + h_b)}{\partial x} + S \frac{\partial}{\partial x} \nu \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{gS |U| U}{RC_s^2},$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial SU}{\partial x} = E_{tr}.$$

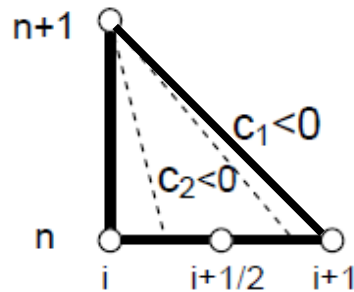


Конечно-разностная схема для уравнений Сен-Венана

Схема КАБАРЕ с новой экстраполяцией

1. Предиктор:
$$h_{i+1/2}^{n+1/2} = h_{i+1/2}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x_{i+1/2}} \left[h_{i+1}^n U_{i+1}^n - h_i^n U_i^n \right]$$

2. Экстраполяция:
$$\left(h_i^{n+1} \right)^d = 2h_{i+1/2}^{n+1/2} - h_{i+1}^n, \quad (U_{i+1}^n < 0),$$



$$\left(h_i^{n+1} \right)^c = h_{i-1/2}^{n+1/2} + h_{i+1/2}^{n+1/2} - h_i^n,$$

$$h_i^{n+1} = \Delta x_{i+1/2}^* \left(h_i^{n+1} \right)^d + (1 - \Delta x_{i+1/2}^*) \left(h_i^{n+1} \right)^c,$$

$$\Delta x_{i+1/2}^* = \min \left[\left| U_{i+1}^n \right| \Delta t, \Delta x_{i+1/2} \right],$$

+монотонизатор

3. Корректор:

$$h_{i+1/2}^{n+1} = h_{i+1/2}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{4\Delta x_{i+1/2}} \left[h_{i+1}^{n+1} \left(U_{i+1/2}^{n+1} + U_{i+3/2}^{n+1} \right) - h_i^{n+1} \left(U_{i-1/2}^{n+1} + U_{i+1/2}^{n+1} \right) \right]$$

Аналитическое решение (С. Frei, Tellus A 45, 44 (1993))

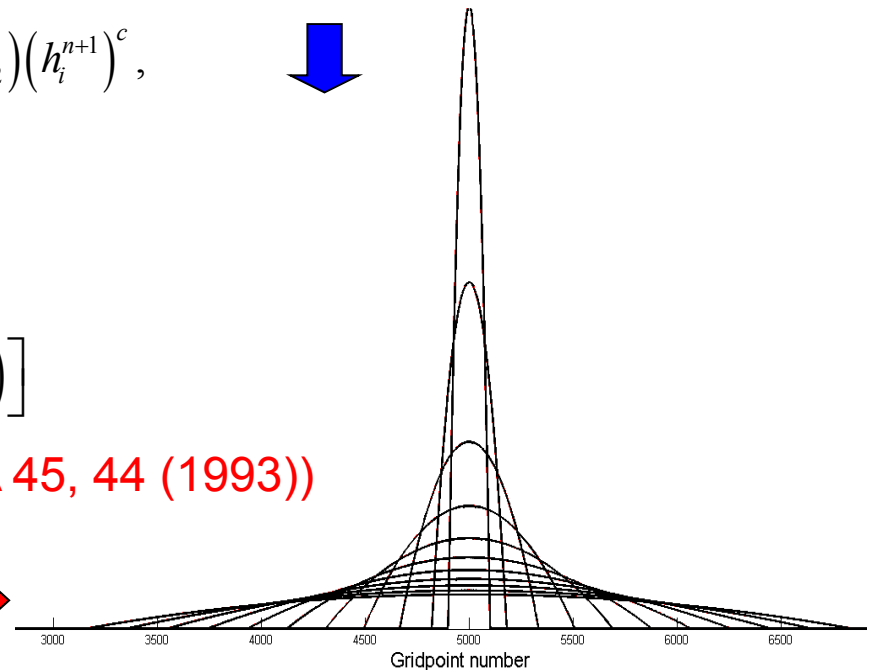
$$h(x, t) = \lambda^{-1} \left[1 - (x/\lambda)^2 \right], \quad u(x, t) = x(\lambda_t/\lambda),$$

$$t = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\lambda(\lambda-1)} + \ln(\sqrt{\lambda-1} + \sqrt{\lambda}) \right]$$

Тест на примере уравнений мелкой воды:

$$\frac{\partial h U}{\partial t} + \frac{\partial h U^2}{\partial x} = -g h \frac{\partial h}{\partial x},$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U}{\partial x} = 0.$$



План работ на 2012 г.

- Численные эксперименты с вихреразрешающей моделью пограничного слоя атмосферы с целью исследования процессов, приводящих к существенным нарушениям автомодельности поведения крупномасштабных когерентных структур.
- Численное моделирование с помощью метода погруженной границы гидродинамических течений в верхнем слое океана в условиях существования торосистого ледового покрова.
- Разработка версии мезомасштабной атмосферной модели НИВЦ МГУ с высоким пространственным разрешением (~100 м – 1 км). Численные эксперименты по воспроизведению мезомасштабных атмосферных процессов в Арктике и анализ спектральных свойств атмосферной турбулентности.
- Разработка совместной модели термосферы и нижних слоев атмосферы и исследование процессов их динамического взаимодействия.

БЛАГОДАРЮ

За ВНИМАНИЕ!

