

Вычислительные технологии среднесрочного и сезонного прогноза погоды

(Основные тенденции развития
глобальных численных моделей
атмосферы)

М.А.Толстых

ИВМ РАН, Гидрометцентр России



Вычислительные технологии

Численные методы + реализация на
параллельных компьютерах

Вычислительные технологии

- **Глобальные модели**
- Системы усвоения данных наблюдений
- Модели для сезонного прогноза – те же, что и для среднесрочного, но с более грубым разрешением. Некоторые параметризации (радиация) необходимы более точные, чем для моделей среднесрочного прогноза
- В последние годы, численные модели сезонного прогноза = совместная модель атмосферы, поверхности суши, океана, морского льда

План доклада

- Мотивация и требования
- Проблемы эффективной параллельной реализации глобальной модели атмосферы
- Выбор сетки
- Выбор пространственной дискретизации
- Выбор метода интегрирования по времени
- Некоторые перспективные глобальные модели атмосферы
- Особенности реализации параметризаций процессов подсеточного масштаба
- Что у нас

Глобальные оперативные модели прогноза погоды

Forecast Centre (Country)	2011	2012	2013
ECMWF (Europe)	T _L 1279 L140	T _L 1279 L140	tbd
Met Office (UK)	25 km L70	20km L70	tbd
Météo France (France)	T _L 798c2.4 L70 (10km on W Europe)	T _L 798c2.4 L70 (10km on W Europe)	tbd
DWD (Germany)	20 km L60	20 km L70 (5 km for Europe)	20 km L70 (5 km for Europe)
HMC (Russia)	0.72°x0.9° L51 T169 L31	0.72°x0.9° L51 T339 L63	0.19°x0.22° L60 T679L63(10)
NCEP (USA)	T878; L64 (7.5) T382; L64 (16)	T878; L64 (7.5) T382; L64 (16)	T878; L91 (7.5) T382; L91 (16)
CMC (Canada)	(0.45°x0.3°) L80	(0.35°x0.23°) L80	(0.35°x0.23°) L90
CPTEC/INPE (Brazil)	20 km L96	10 km L96	10 km L128
JMA (Japan)	T _L 959 L60	tbd	Tbd
CMA (China)	TL639 L60, GRAPES 50kmL35	GRAPES 25 km L60	GRAPES 26 km L60
NCMRWF (India)	25 km L70	25 km L70	tbd
BoM (Australia)	25 km L70	25 km L90	tbd

Глобальные оперативные модели среднесрочного прогноза погоды

- Типичное разрешение: 20-35 км по горизонтали, 80 уровней по вертикали
- Большинство моделей уже не спектральные, хотя среди лидирующей по качеству прогнозов стран спектральных моделей пока примерно половина

Мотивация и требования -1

Необходимость существенного повышения горизонтального и вертикального разрешения вследствие:

- Необходимости улучшения воспроизведения тропической циркуляции – явное описание глубокой конвекции
- Прогресса выч. техники

Мотивация и требования - 2

- Модель будущего обязательно должна включать блоки переноса малых газ. составляющих, гидрометеоров и др.

=>

- Численные схемы для уравнения переноса должны сохранять массу переносимой величины
- Строгое сохранение энергии видится желательным, но необязательным

Требования к будущей модели

- Высокое (порядка 1 км) горизонтальное разрешение означает необходимость негидростатических уравнений. (Как следствие, применение сигма-координаты в чистом виде неперспективно)
- В глобальной модели – регулярная широтно-долготная сетка неприменима
- Вычислительная эффективность: время интегрирования на 1 сутки при заданной точности на данной вычислительной системе
- Точность = воспроизведение спектра + фазовые и амплитудные ошибки

Шаг сетки по горизонтали для различных задач моделирования атмосферы в зависимости от производительности вычислительной системы (NWP= численный глобальный прогноз погоды)

1 км – разрешение, необходимое для явного описания глубокой конвекции

Из отчета World Modelling Summit for Climate Prediction, Всемирная метеорологическая организация, 2009

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 $O(10^4)$ 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)

Проблемы эффективной параллельной реализации -1

- Через 5-10 лет будет достигнута производительность 1 эксафлопс (10^{15})
- Тактовую частоту процессоров повышать нельзя (квадратичный рост тепловыделения)
- Если делать суперкомпьютер по современным технологиям на процессорах общего назначения – эксафлопсный компьютер требует 1 ГВт энергии (включая систему охлаждения)!
- Если учесть уменьшение размера топологии микросхем до 12нм к 2020 г. (уменьшение задержек), водяное охлаждение, все равно эксафлопсный компьютер на процессорах общего назначения требует ~100 МВт!

Проблемы эффективной параллельной реализации -2

- $\sim 10^5$ - 10^6 процессорных ядер
- Процессоры будущего – существенно многоядерны (~ 100 - 300 ядер на кристалл).
- Как будут выглядеть экзафлопсные ВС, пока неясно, но без ускорителей они, вероятно, не обойдутся. (GPU? Intel MIC? Векторный процессор, интегрированный в процессор общего назначения (Intel SandyBridge)?)
- В любом случае, доступ в «дальнюю» память станет относительно дороже в большинстве случаев.

Проблемы эффективной параллельной реализации -3

- Необходимо смена парадигмы масштабирования (сейчас – код масштабируем, если хорошо параллелится на ~ 100 процессорах, в будущем – на $\sim 10^4$ - 10^5 процессорах)
- Реализация только под MPI – неэффективна: в пределе на одну точку сетки 6 соседних, которые надо хранить и пересылать.
- Обмены MPI между ядрами на общей памяти чуть медленнее, чем OpenMP (в пределе).
- Только OpenMP – не позволяет использовать распределенную память различных узлов.

=>

- Гибридная технология MPI+OpenMP или что-то новое
- Спец. языки / препроцессоры для GPU / ускорителей

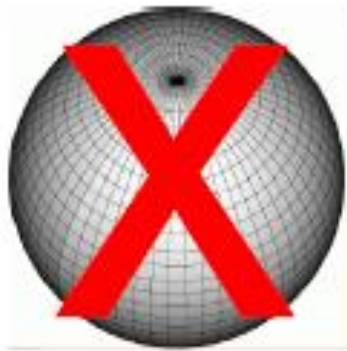
Последствия для выбора сеток и алгоритмов

- Необходимо по возможности обеспечить локальность обращений в память (использование кэш-памяти)
- Минимизация глобальных коммуникаций
- Исключение полярных фильтров и аналогичных методов как недопустимых для масштабируемости
- Численные методы, делающие больше вычислений при заданном количестве обращений к памяти приветствуются! (методы высокого порядка, напр., полулагранжев – при некоторых ограничениях)

Выбор сетки

- Традиционные широтно-долготные сетки имеют сгущение меридианов у полюсов.

(картинки из презентации W.Skamarock, NCAR)



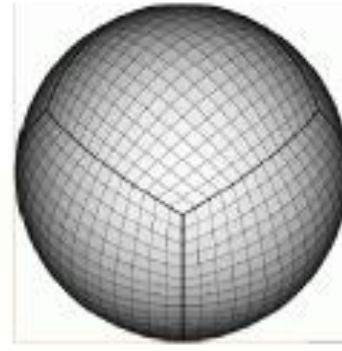
lat-long grid



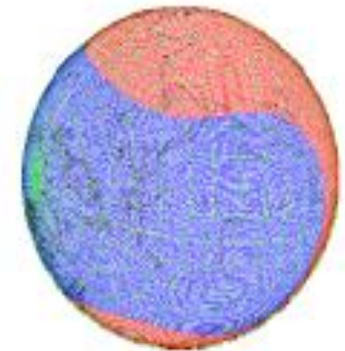
icosahedral grid
(triangles)



icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid

Икосаэдральная сетка (треугольники)



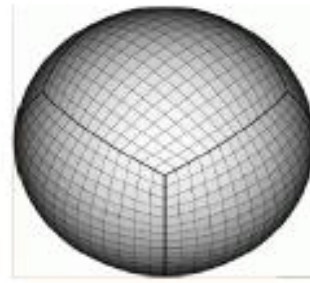
lat-long grid



icosahedral grid
(triangles)



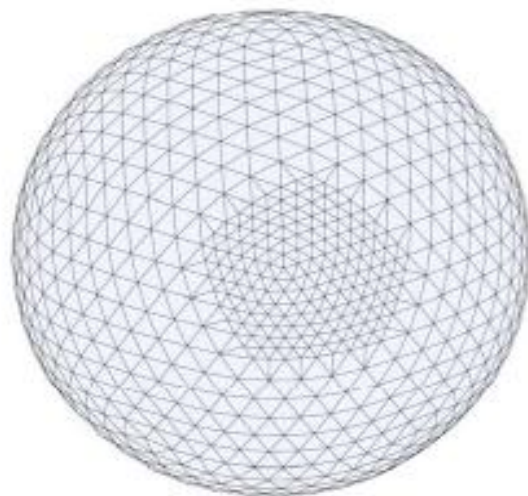
icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid



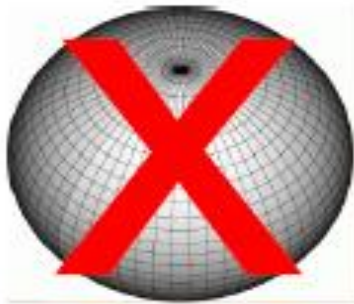
Advantages:

relatively uniform resolution,
easy to refine locally and globally.

Disadvantages: non-conformal,

irregular grid, high order
discretization is difficult.
Complex coding and data
structures may be needed.

Икосаэдральная сетка (гексагоны)



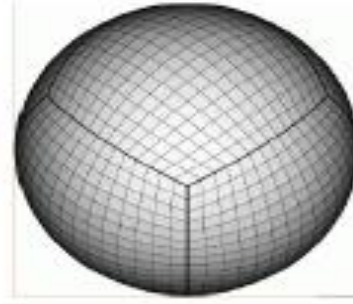
lat-long grid



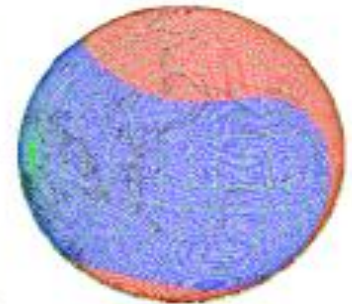
icosahedral grid
(triangles)



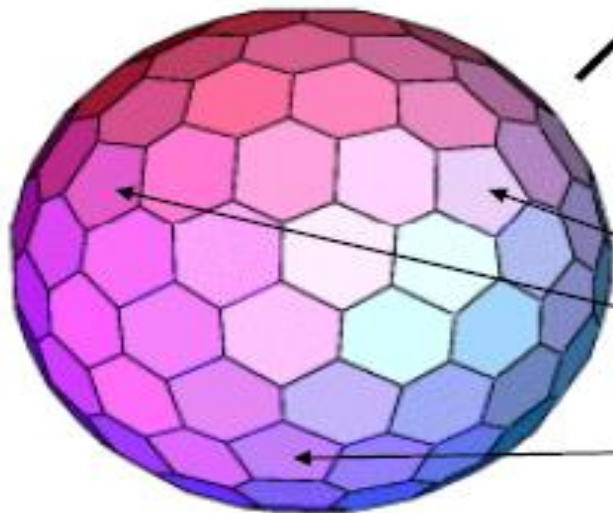
icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid



Advantages: relatively uniform resolution,
global refinement possible.

Disadvantages: non-conformal,
high order discretization
not easy to implement.
difficult to locally refine.
12 special cells (pentagons).

Кубическая сфера



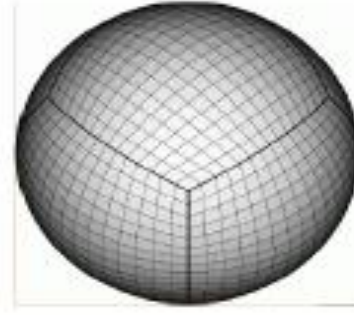
lat-long grid



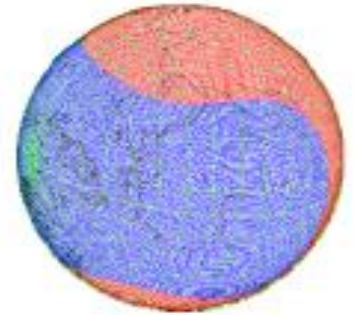
icosahedral grid
(triangles)



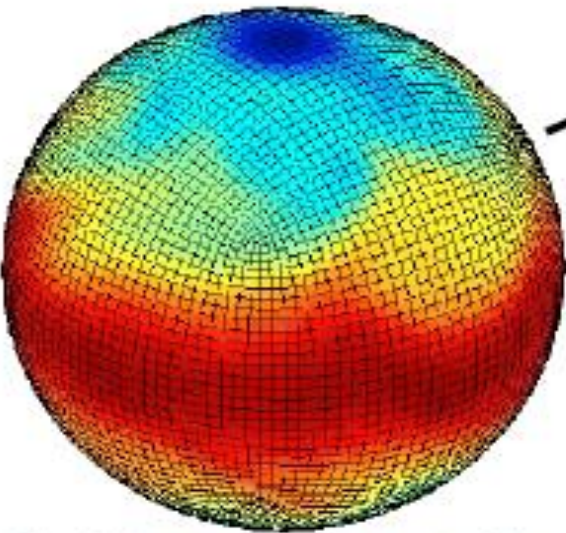
icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid



Advantages: relatively uniform resolution,
local refinement is possible.

Disadvantages: possibly non-conformal,
8 special points (the corners).
plane boundaries need special
treatment.

Two nonhydrostatic implementations.
Do we see the corners and plane boundaries?

Figure 1.4: Instantaneous plot of the temperature field at 500mb obtained using the atmospheric isomorph of MITgcm

Сетка Инь-Янь



lat-long grid



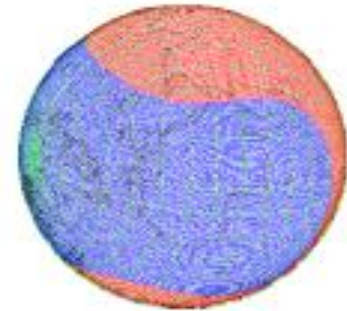
icosahedral grid
(triangles)



icosahedral grid
(hexagons)



cubed sphere



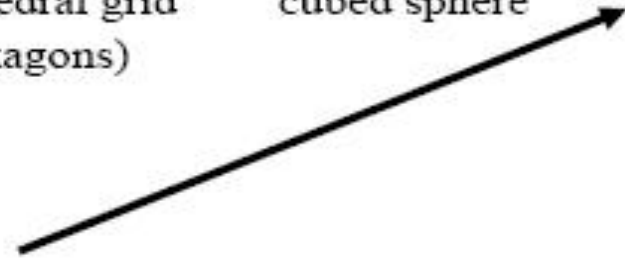
Yin-Yang grid



Yin-Yang grid

[Yi Jing: the Book of Changes]

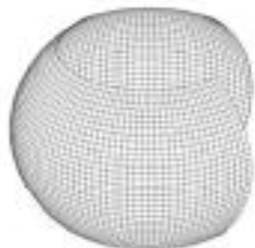
The universe (both space and time) can be divided into Yin and Yang, which is composed with *metals*(金), *water*(水), *wood*(木), *fire*(火) and *soil*(土). For example, the *moon* is due to Yin, and the *sun* belong to Yang. The energy of the atmosphere comes from the sun.



Linear integration (i.e. piecewise-constant fluxes) is stable, conservative, but inaccurate.

Higher-order flux integration can be designed to be conservative and accurate, but have not proven stable.

Yang (N) system



Yin (E) system



Yin-Yang composition



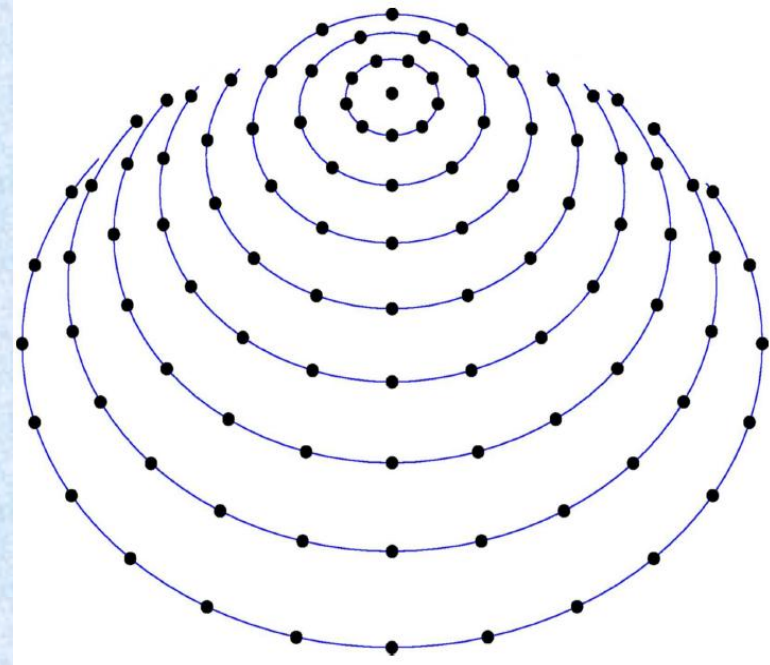
+

=

Provided by Dr. Kageyama, EBC, who is the developer of the Yin-Yang grid

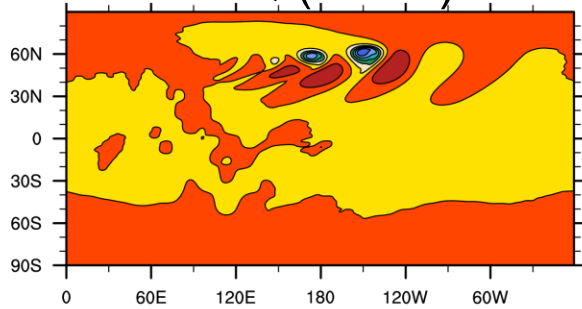
Редуцированная широтно-долготная сетка

- Давно используется в спектр. моделях, которые не имеют будущего
- В конечных разностях/объемах/... - возможна при специальной формулировке модели (напр., полулагранжева адвекция, Фурье по долготе)
- *(см. постер В.В.Шашкина)*

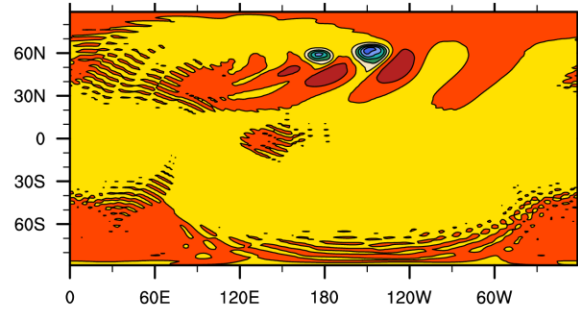


Эволюция p_s , день 9 (тест Яблоновски)

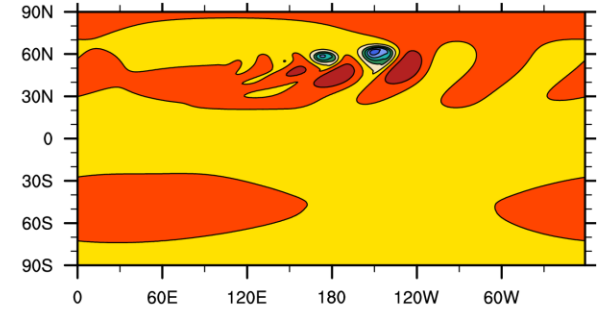
BQ (GISS)



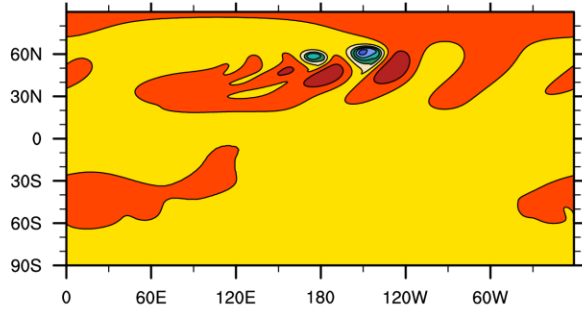
CAM-EUL



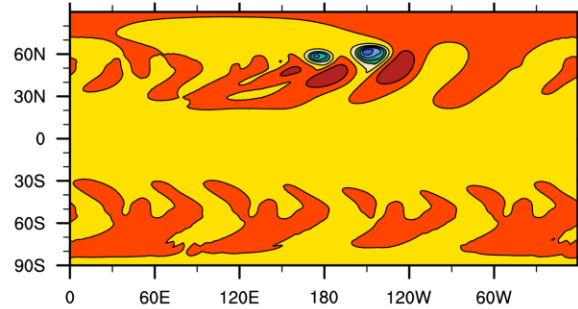
CAM-FV-isen



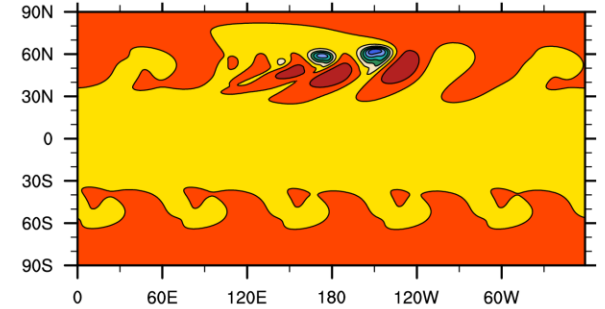
GEOS-FV



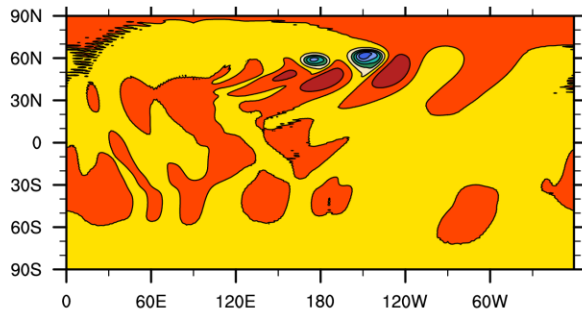
GEOS-FVCUBE



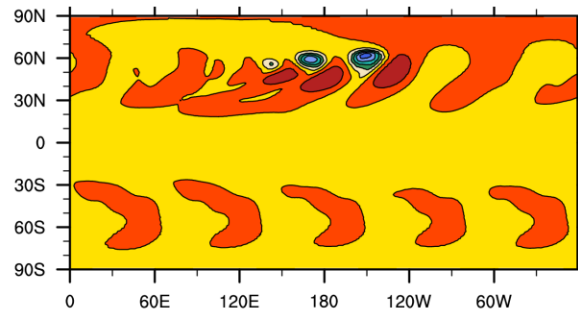
GME



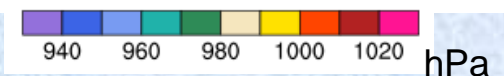
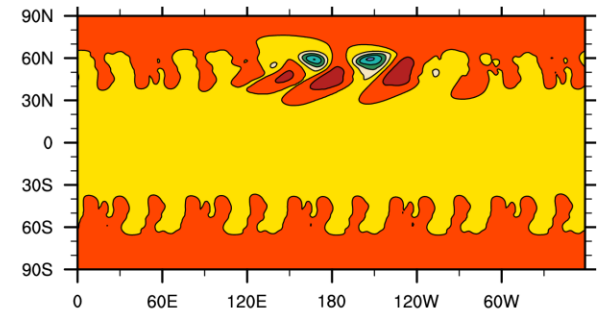
HOMME



ICON



OLAM



with $\alpha=0^\circ$, resolution $\approx 1^\circ \times 1^\circ$ L26

Выбор сетки

- Все сетки имеют потенциальные недостатки:
- Прямоугольные сетки: специальные точки, границы, изотропия
- Другие сетки: точность и эффективность программирования?
- Пока нет окончательного решения

Выбор пространственной дискретизации

(~ 30 статей за последние 10 лет)

Спектральный метод не рассматривается.

Рассматривались:

- Конечно-объемный метод
- Спектральные элементы (МКЭ с баз. функциями высокого порядка) – напр., разрывный Галеркин
- Полулагранжев метод
- Конечные разности

Требования, предъявляемые к численным методам моделирования процессов переноса

- Транспортивность;
- Локальность;
- **Консервативность;**
- Сохранение формы сигнала;
- Вычислительная эффективность.

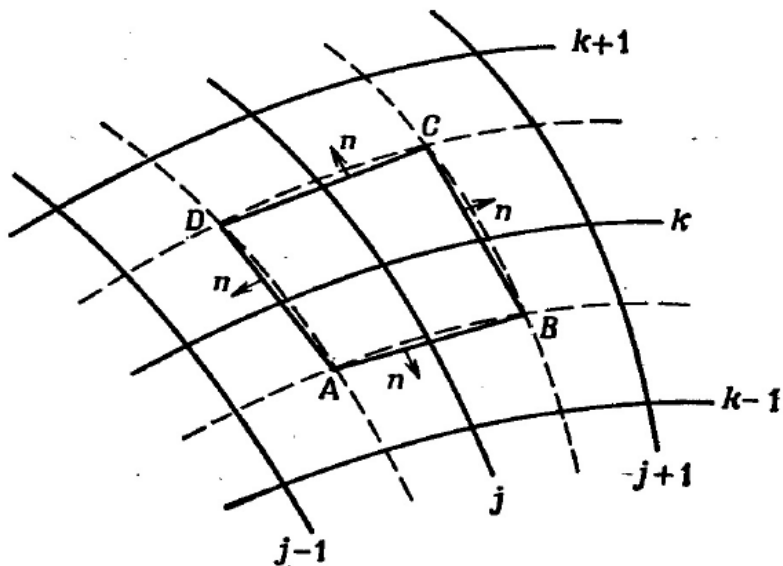
Метод конечных объемов

$$\int_{ABCD} \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial y} \right) dx dy = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \bar{f} dV + \int_{ABCD} \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} ds = 0,$$

$$\mathbf{H} = (\bar{F}, \bar{G})$$

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} ds = \bar{F} dy - \bar{G} dx.$$



$$\frac{\partial A f_{jk}}{\partial t} + \sum_{AB}^{DA} (\bar{F} dy - \bar{G} dx) = 0,$$

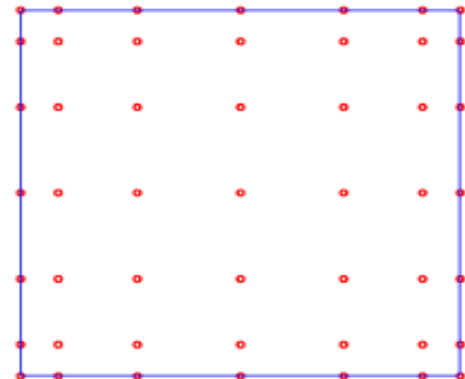
Метод спектральных элементов на кубической сфере в CAM (NCAR)

- Solve the equations of interest in weak/integral formulation
- Work in the space of piecewise continuous polynomials on the sphere
- Tile the sphere with quadrilateral elements (the cubed-sphere)
- Within each element, approximate integrals with Gauss-Lobatto quadrature



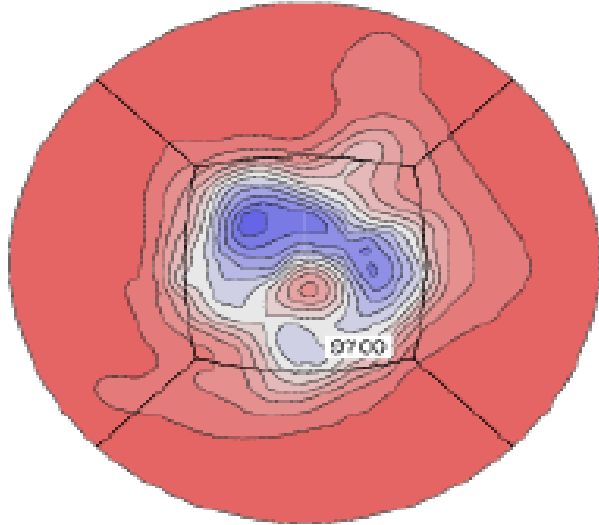
Each element Ω is mapped to the unit square. Integration over the element is approximated by quadrature using the Gauss-Lobatto nodes (shown in red)

$$\int_{\Omega} f \approx \sum_{\Omega} f$$

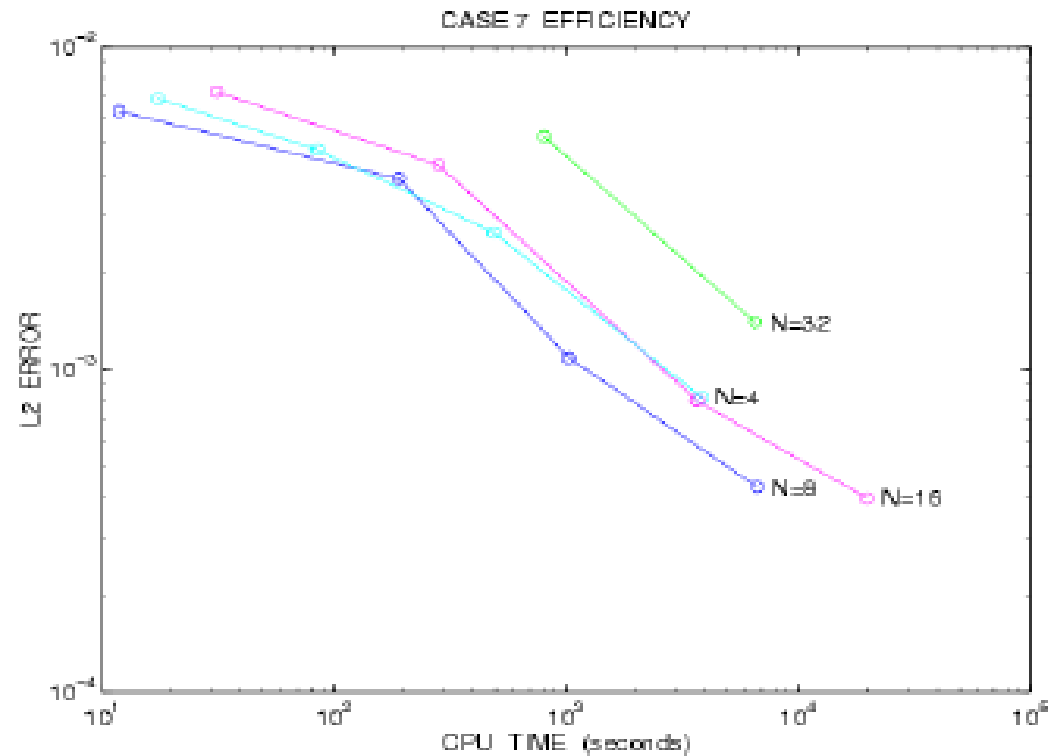
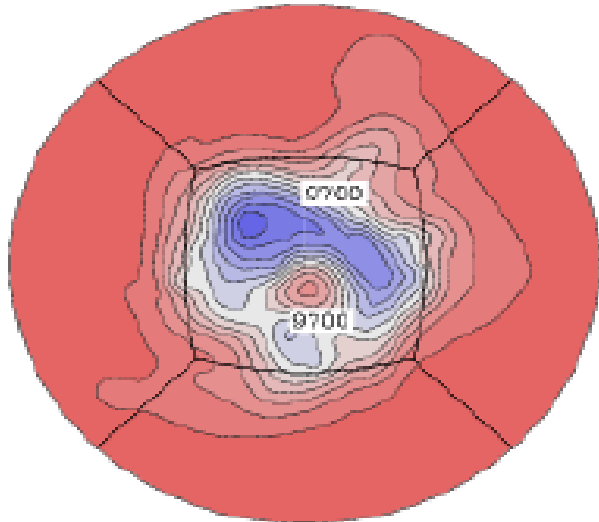


Метод спектральных элементов на кубической сфере в CAM (NCAR)

SPIC ELEM 188x8x8



NCAR T213



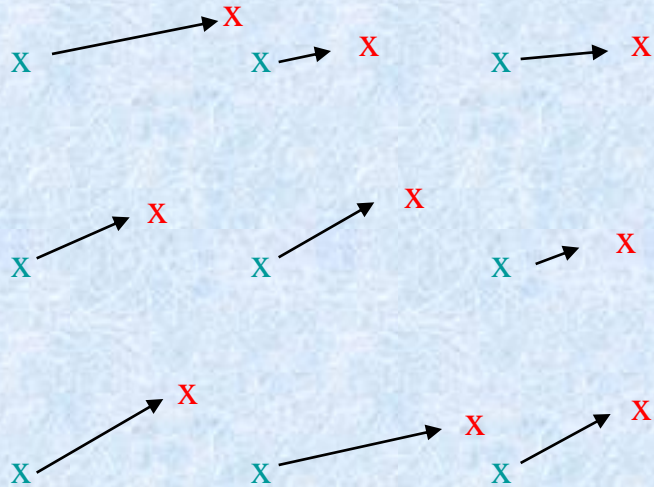
Спектральные эл-ты на куб. сфере

- Как и всякий эйлеров метод высокого порядка, подвержен нелинейной неустойчивости. Применяется «гипердиффузия» - сочетания бигармонического оператора и оператора 8го порядка

Полулагранжев метод.

Полная производная может быть записана в двух видах:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}}_{\text{Eul. point of view}} \equiv \frac{d}{dt}$$



Лагранжев подход: Имея **регулярное** распределение частиц, на следующем же шаге по времени мы получаем **нерегулярное** распределение частиц

Полулагранжев подход: Конечные точки траекторий частиц всегда (на каждом шаге по времени) совпадают с узлами постоянной во времени сетки.

Идея полулагранжева метода

Одномерное нелинейное уравнение переноса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 = \frac{du}{dt} \rightarrow u_j^{n+1} = u_*^n$$

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t}$$

Исходная
точка
траектории

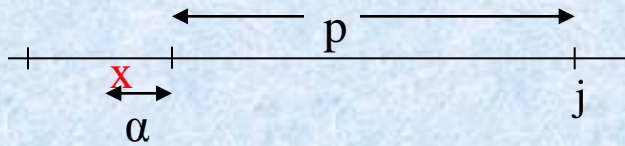
$$\frac{dx}{dt} = u$$

Нет квадратичных нелинейностей

Уравнение движения для
определения исходной точки
траектории

Аналогия со схемой направленных разностей

Линейное уравнение переноса с постоянной скоростью
без правой части (точное определение исходной точки траектории)



$$\frac{d\varphi}{dt} \equiv \frac{\partial\varphi}{\partial t} + U_0 \frac{\partial\varphi}{\partial x} = 0 \quad \frac{dx}{dt} = U_0$$

Исходная точка траектории
частицы, прибывшей в точку j :

$$X_* = X_j - U_0 \Delta t \quad (\text{против потока})$$

$$U_0 \Delta t = (p + \alpha) \Delta x \quad p: \text{целое}$$

Линейная интерполяция

$$\varphi_*^n = (1 - \alpha) \varphi_{j-p}^n + \alpha \varphi_{j-p-1}^n$$

Схема направленных разностей

$$\varphi_j^{n+1} = (1 - \alpha) \varphi_{j-p}^n + \alpha \varphi_{j-p-1}^n$$

α - число Куранта при $p=0$

Устойчивость в одномерном случае

$$\varphi_*^n = (1 - \alpha)\varphi_{j-p}^n + \alpha\varphi_{j-p-1}^n$$

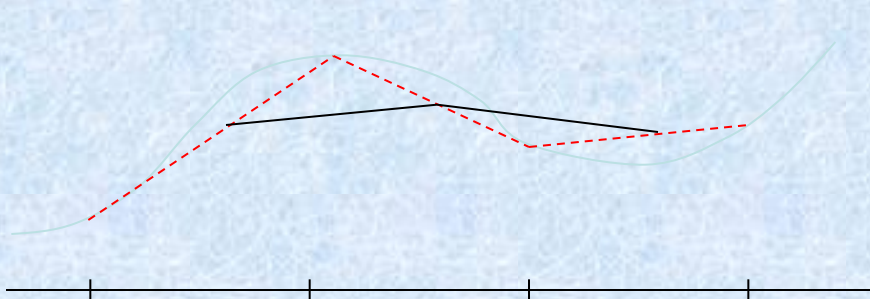
Устойчивость по фон Нейману:

$$\varphi_j^n = \varphi_0 \lambda^n e^{ikj\Delta x} \longrightarrow \lambda = \left[1 - \alpha(1 - e^{ik\Delta x}) \right] e^{-ipk\Delta x}$$

$$|\lambda|^2 = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)[1 - \cos(k\Delta x)]$$

$|\lambda| \leq 1$ при $0 \leq \alpha \leq 1$

Т.е. точка интерполяции
лежит между 2мя узлами
сетки, используемыми
для интерполяции



Диссипация

Итерационное вычисление траекторий (одномерный случай)

$$x^{(n+1)} = x_F - V^{(n)} \Delta t$$

Для простоты взяли двухслойную схему, а скорость – в конечной точке траектории.

Пусть V изменяется линейно между узлами сетки

$$V = a + b \cdot x \Rightarrow b = dV/dx \text{ (дивергенция)}$$

$$x^{(n+1)} = x_F - a \Delta t - \Delta t b x^{(n)}$$

Для сходимости этой процедуры, она должна иметь решение в виде

$$x = \lambda^n + K; \quad (|\lambda| < 1)$$

Подставляя, получаем $K = (x_F - a \Delta t) / (1 + b \Delta t)$ и $\lambda = -b \Delta t$

Поэтому должно выполняться

$$\Delta t < \frac{1}{|b|}$$

Итерационное вычисление траекторий (одномерный случай)

$$\Delta t < \frac{1}{|b|}$$

Это условие означает, что траектории, выпущенные назад из соседних узлов сетки, не пересекаются.

Это условие существенно слабее условия Куранта!
Основное преимущество полулагранжева метода

Современные **полулагранжевы** **схемы** устраняют ограничение величины шага по времени условием Куранта,. На практике, **шаг по времени** в полулагранжевых моделях атмосферы может быть **в 3-5 раз больше**, чем в эйлеровых моделях. Ошибка аппроксимации составляет

$$O((\Delta x)^4 / \Delta t)$$

(при постоянной скорости ветра).

Полулагранжев метод. Итоги

- Недостаток полулагранжевого метода в классическом варианте – отсутствие свойства сохранения нормы переносимой величины
- Появились работы по сочетанию метода конечных объемов и полулагранжева метода, устраняющие это недостаток. (Nair et al, MWR 2002, Zerroukat et al, QJRMS, 2006). *См. постер В.В.Шашкин, М.А.Толстых*
- Массивно-параллельная реализация требует большего количества обменов, чем у эйлеровых методов.

Методы интегрирования по времени, применяемые в глобальных моделях

- Большинство глобальных (гидростатических) моделей применяет полунеявный метод (явный по медленным процессам, неявный по быстрым). В негидростатических моделях однако полностью неявный метод несколько дороже
- WRF-NMM – явный по горизонтали, неявный по вертикали
- WRF-ARW – полностью явный

Некоторые перспективные, экспериментальные глобальные модели атмосферы

Вариант конечно-объемного метода на икосаэдральной сетке

■ Governing equation

Satoh 2002,2003 Mon.Wea.Rev.

■ Full compressible system

- Acoustic wave → Planetary wave

■ Flux form

- Finite Volume Method
- Conservation of mass and energy (Satoh 2002, 2003)

■ Deep atmosphere (option)

- Including all metrics terms and Coriolis terms

■ Solver

■ Split explicit method

- Slow mode (advection etc.) : Large time step
 - 2nd order / 3rd order Runge-kutta sheme
- Fast mode (acoustic mode) : small time step
 - Forward-Backward method

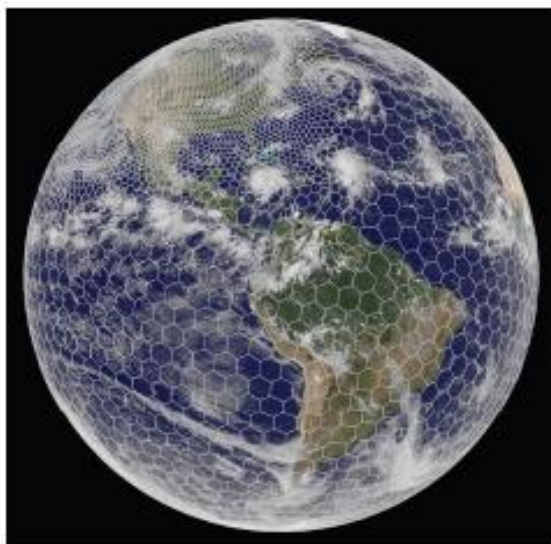
■ HEVI (Horizontal Explicit & Vertical Implicit)

- 1D-Helmholtz equation

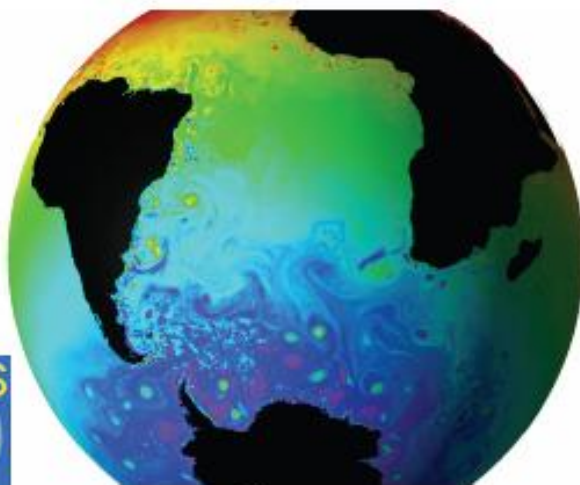
DYCORE of NICAM

=The new modified icosahedral grid + new nonhydrostatic scheme
→ Suitable to long term simulation (climate simulation)

Model for Prediction Across Scales: MPAS



Atmosphere



Ocean

Modeling system for unstructured icosahedral (hexagonal) meshes using selective grid refinement

Jointly developed, primarily by NCAR and LANL, for weather, regional climate, and climate applications

MPAS infrastructure - NCAR, LANL, others.

MPAS - Atmosphere (NCAR)

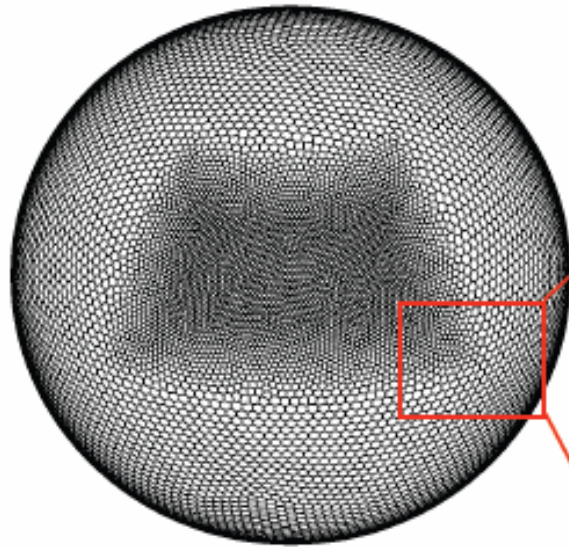
MPAS - Ocean (LANL)

MPAS - Ice, etc.

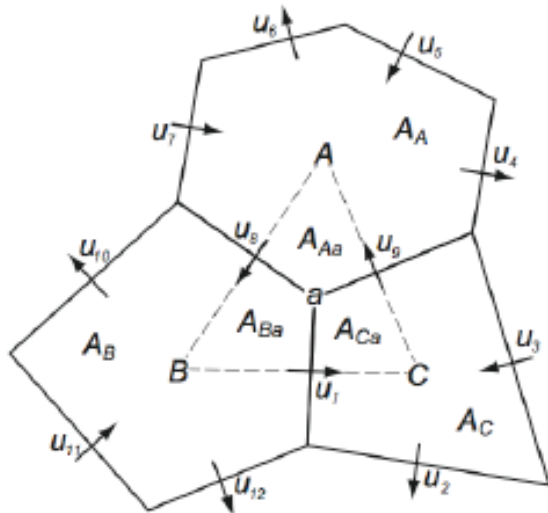
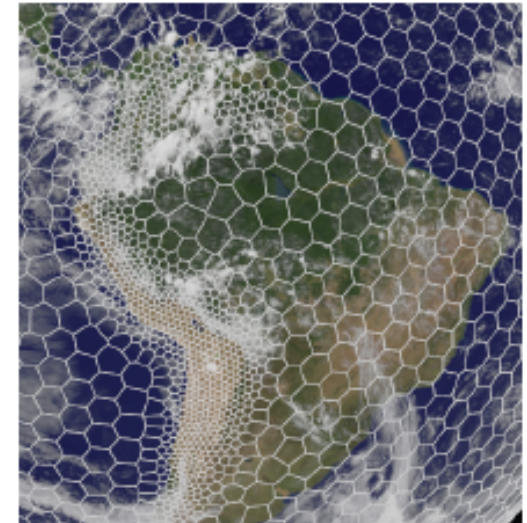
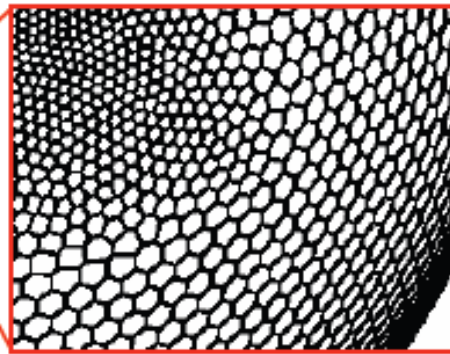
Bill Skamarock	NCAR
Joe Klemp	NCAR
Michael Duda	NCAR
Sang-Hun Park	NCAR
Laura Fowler	NCAR
Todd Ringler	Los Alamos National Lab
John Thuburn	Exeter University
Max Gunzburger	Florida State University
Lili Ju	University of South Carolina



Conforming, Variable-Resolution Voronoi Meshes



A conformal mesh is a mesh with no hanging nodes.



Conjecture: Smooth refinement on conformal meshes should mitigate many refinement problems.

Why a C-grid staggering?

- Provides good accuracy for the fast (gravity-wave) modes
- Avoids the parasitic mode inherent in an A grid
- Proper reconstruction of Coriolis term ensures stationary geostrophic modes



Dynamical Core Development

SW solver:

- Williamson et al (JCP 1992) test case results are similar to other icosahedral-grid models.
- Robust initial tests with variable resolution meshes.

Atmospheric solvers:

- Conservative (flux-form) equations
- Split-explicit 3rd order Runge Kutta time integration
- Hydrostatic solver (pressure coordinate), nonhydrostatic solver (height coordinate)
- Both solvers run on the sphere, on doubly-periodic flat planes, and 2D (x,z) slabs

Test Suite:

- *Global*: Jablonski & Williamson (2006) baroclinic wave simulations on the sphere
- *3D periodic flat planes*: Squall-lines and supercells
- *2D (x,z) slab*: Squall lines, mountain waves, density currents



From J.Côté presentation at PDEs2010



Environment
Canada

Environnement
Canada

Canada



Experiments with Different Discretizations for the Shallow- Water Equations on the Sphere

“Partial differential Equations on the Sphere ”
Potsdam, BD, August 24-27, 2010

Abdessamad Qaddouri , Janusz Pudykiewicz, Monique Tanguay
Claude Girard & Jean Côté
Atmospheric Science & Technology

Conclusion

- Lat-Lon & Yin-Yang equivalent
 - Ying-Yang better at poles
- Icosahedral on its way:
 - staggering?
 - time-stepping?



Масштабируемость или эффективность? (1)

- Масштабируемость на 100000 ядрах на современных архитектурах, подразумевает явную либо явно-неявную схему, без полулагранжевой адвекции. => Очень малый шаг по времени.
- ЧПП и моделирование климата ограничивает шаг по времени аппроксимацией по времени тех процессов, которые мы хотим разрешить.
- Некоторые разработки массивно-параллельных программных комплексов модели прогноза погоды (как минимум, частично) финансируются производителями суперкомпьютеров.
- С другой стороны, спектральная полунеявная полулагранжева модель ЕЦСПП масштабируется как минимум на 5000 ядрах.

Масштабируемость или эффективность? (2)

Полунеявные алгоритмы интегрирования по времени:

- Прогресс в архитектуре компьютеров, вероятно, приведет к появлению $O(100)$ ядер на общей памяти. Известно, что полунеявный солвер масштабируется на $O(1000)$ (MPI) процессорах.
- Многие вихреразрешающие модели (LES), сжимаемые и несжимаемые, включают неявный трехмерный солвер и не жалуются на плохую масштабируемость.
- Вероятно, полунеявные солверы будут соревноваться с горизонтально явными – вертикально неявными методами.

Масштабируемость или эффективность? (3)

Полулагранжева адвекция

(позволяет использовать шаг по времени в несколько раз больше, чем эйлеровы схемы):

- Полулагранжева адвекция масштабируется на $O(1000)$ (MPI) ядрах.
- Неэффективна на икосаэдральных сетках.
- Выигрыш благодаря полулагранжевой адвекции меньше при разрешении порядка 100 м, но все же есть.
- Успешно используется в канадской оперативной мезомасштабной модели MC2 (опер. версия с разрешением около 2 км; во время Олимп. игр в Ванкувере работала эксперим. версия с разрешением в 1 км!).
- Полулагранжева адвекция, сохраняющая массу, в 1,5 раз дороже, но масштабируется.
- Вероятно серьезное соревнование при субкилометровых разрешениях с эйлеровой адвекцией.

Негидростатические нюансы

- Уравнения – лучше полные, сжимаемые (наличие естественного стока энергии в звуковые волны)

=>

- дополнительное эволюционное уравнение
- Сложнее построить полунеявный солвер

Верхнее граничное условие

- В негидростатической модели условие жесткой крышки приводит к отражениям волн. Большинство решает эту проблему введением повышенной диссипации в верхних слоях
- Радиационное граничное условие крайне трудно сочетается с полунеявным методом для грав. волн

Особенности реализации блока параметризаций процессов подсеточного масштаба

- Вплоть до горизонтального разрешения около 2-3 км, большая часть параметризаций можно рассматривать как локально одномерные (кроме , возможно облачности)
- Массивно-параллельные вычисления по вертикальным колонкам, можно независимо рассчитывать $O(10^6)$ колонок

Проблемы разработки параметризаций для модели с разрешением порядка 1

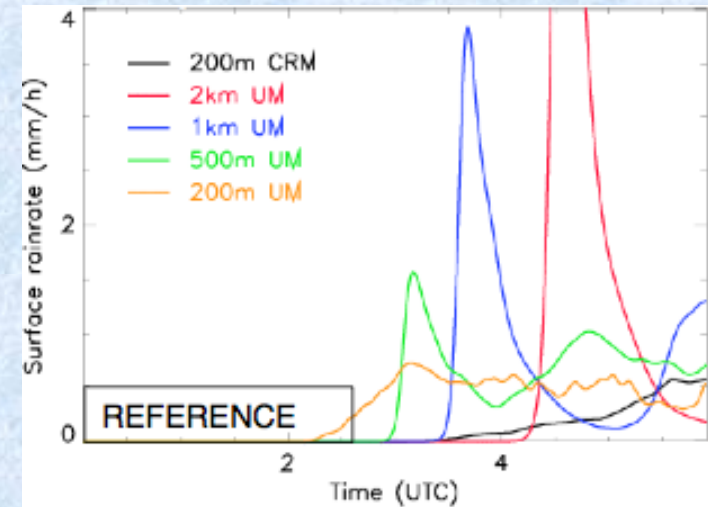
км (J. Onvlee, **WWRP/WG-MWFR**, доклад на WGNE 2010)

- Глубокая конвекция: 500м – 5км – диапазон частичного разрешения конвекции. Ни полное отключение параметризации конвекции, ни полное включение не работают достаточно хорошо
- «Серая зона» для параметризации погранслоя: становится необходимым трехмерное описание турбулентности.

Необходимость трехмерных параметризаций процессов подсеточного масштаба?

Указания на необходимость трехмерной параметризации турбулентности:

- Эксперименты с прототипами трехмерной параметризации турбулентности (Piotrowski, JCP, 2009)
- Большая чувствительность воспроизведения конвекции к настройкам горизонтальной диффузии в моделях

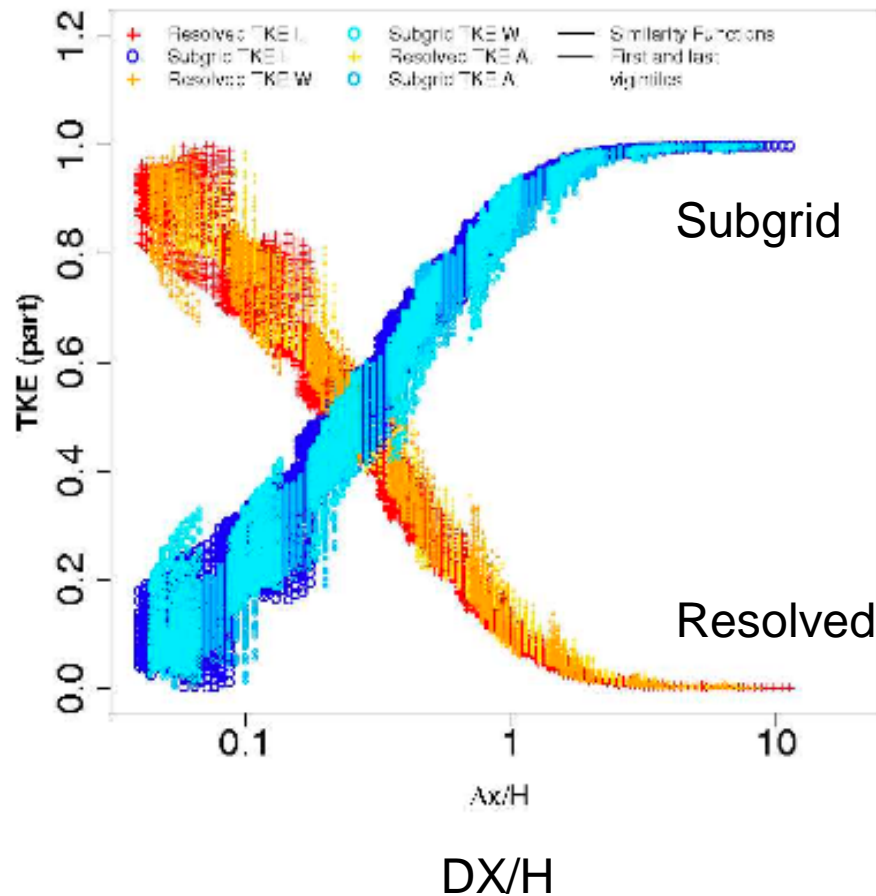


GCSS deep convection working group case 4:

- Increasing delay of rain onset with decreasing resolution
- 3D turbulence reduces overshoot and difference in time of onset precipitation

Partial Similarity functions : TKE in the mixed layer

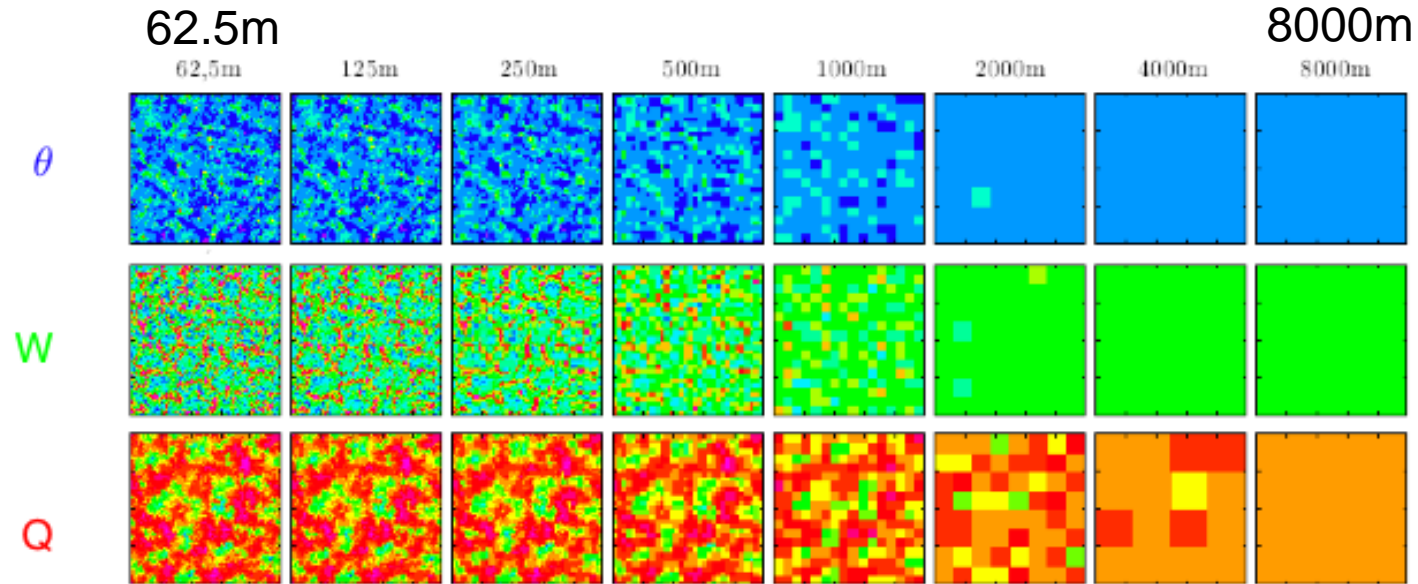
$0.05 < Z/H < 0.85$



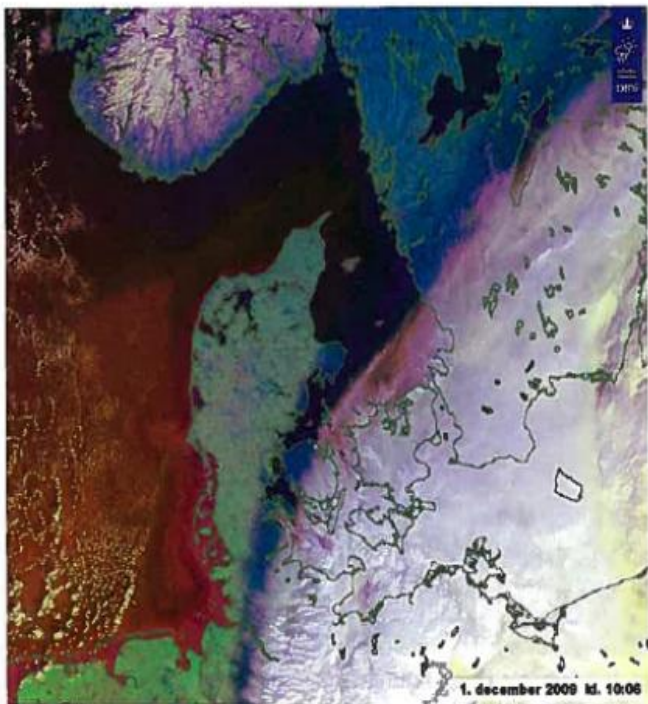
- ▶ The data follow the same function.
- ▶ For the fine meshes (near the LES), the subgrid part is smaller than the resolved one.
- ▶ When the mesh becomes coarser, the subgrid part grows up.
- ▶ For coarser meshes, the parameter becomes entirely subgrid as the resolved part is null.

Calculation of the resolved and subgrid TKE

Horizontal cross section in the middle of the boundary layer



Averaging over larger boxes of original 62.5m results in Meso-NH



Visuelt NOAA-billede fra dmi.dk.

Vejret, 122, februar 2010 • side 37

Влияние трехмерной структуры облаков на радиационный баланс: необходимость трехмерного представления радиации

'classical' vertical air column for model physics computations



Position of the sun

Surface

model grid

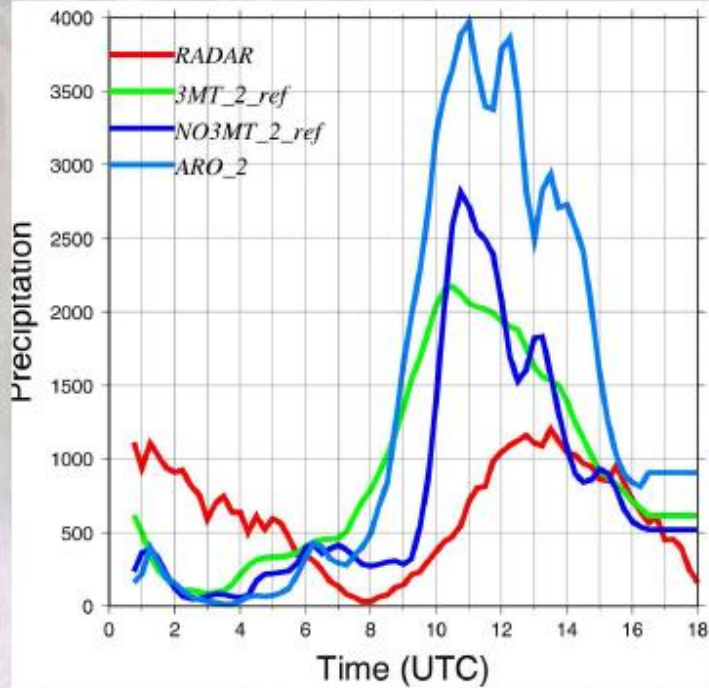
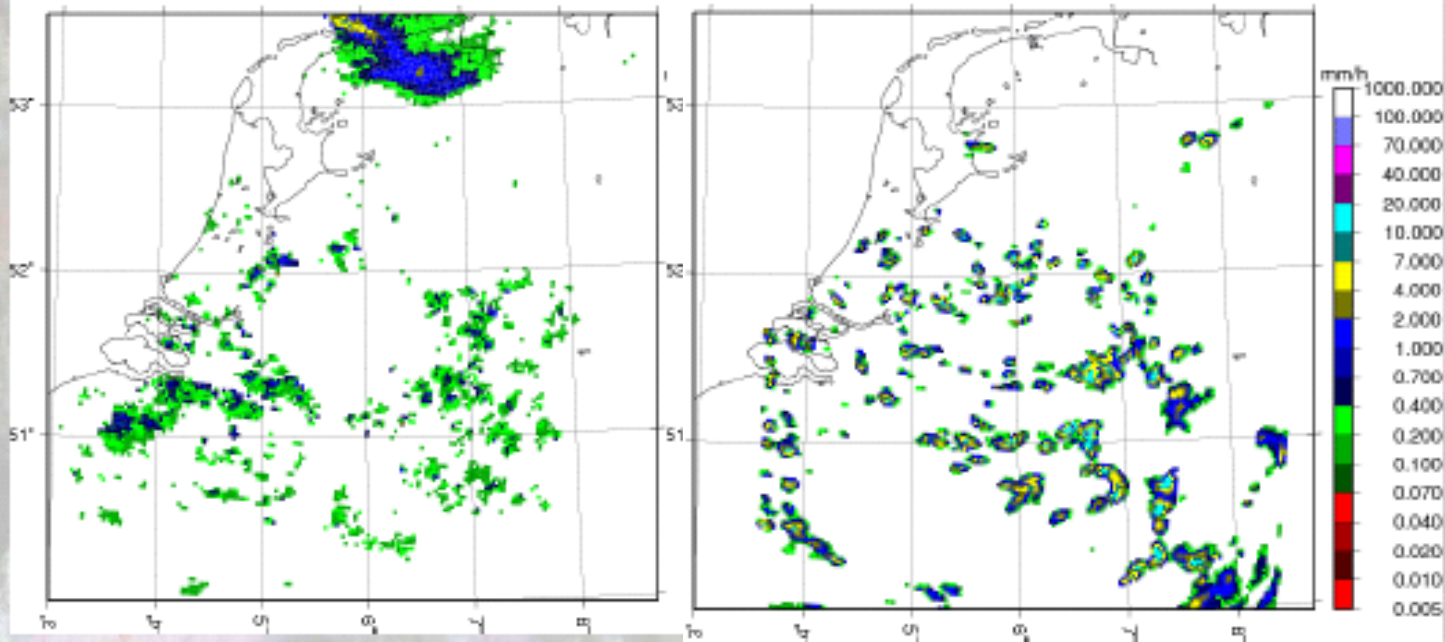
Planned new configuration:
Each time step a tilted air column is determined in the direction of the sun for computations of solar radiation

Опыты мезомасштабного моделирования конвекции существующими моделями

(J. Onvlee, **WWRP/WG-MWFR**, доклад на WGNE 2010)

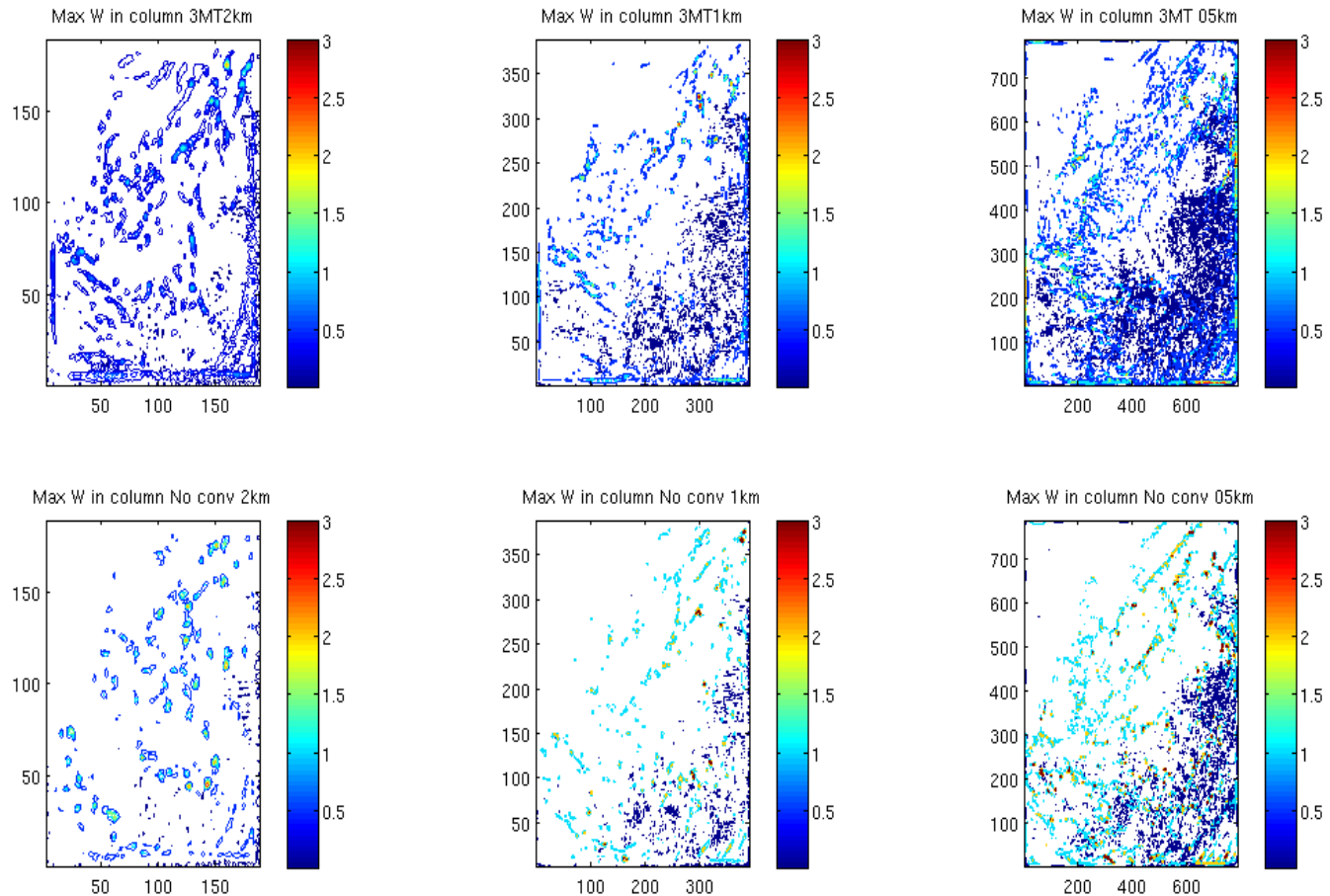
Radar NL 20060430 1100 UTC

ARO_2 20060430 1100 UTC



- “Fractal” behaviour, no convergence to “resolved solution”
- Observed coherent precip structures not reproducible

ALARO/AROME exp at 2, 1 and 0.5km with/without deep convection parametrization



- Without convection parametrization:
Strong upward motions, high clouds, overestimate of precip peak

Применяемые стратегии в «серой зоне» для конвекции

- Повысить разрешение до момента, когда вся конвекция разрешается явно
- Просто выключить параметризацию конвекции (так делают большинство)
- Совместная параметризация турбулентности и конвекции

Требования к программной реализации + стандартизация

Цели –

- Портатбельность кода на любые платформы без переделок
- Облегчение работы современных оптимизирующих компиляторов
- Легкость распараллеливания MPI+OpenMP
- Работа над кодом других людей без участия автора
- Легкость отладки, в т.ч. параллельной

Непосредственно реализация

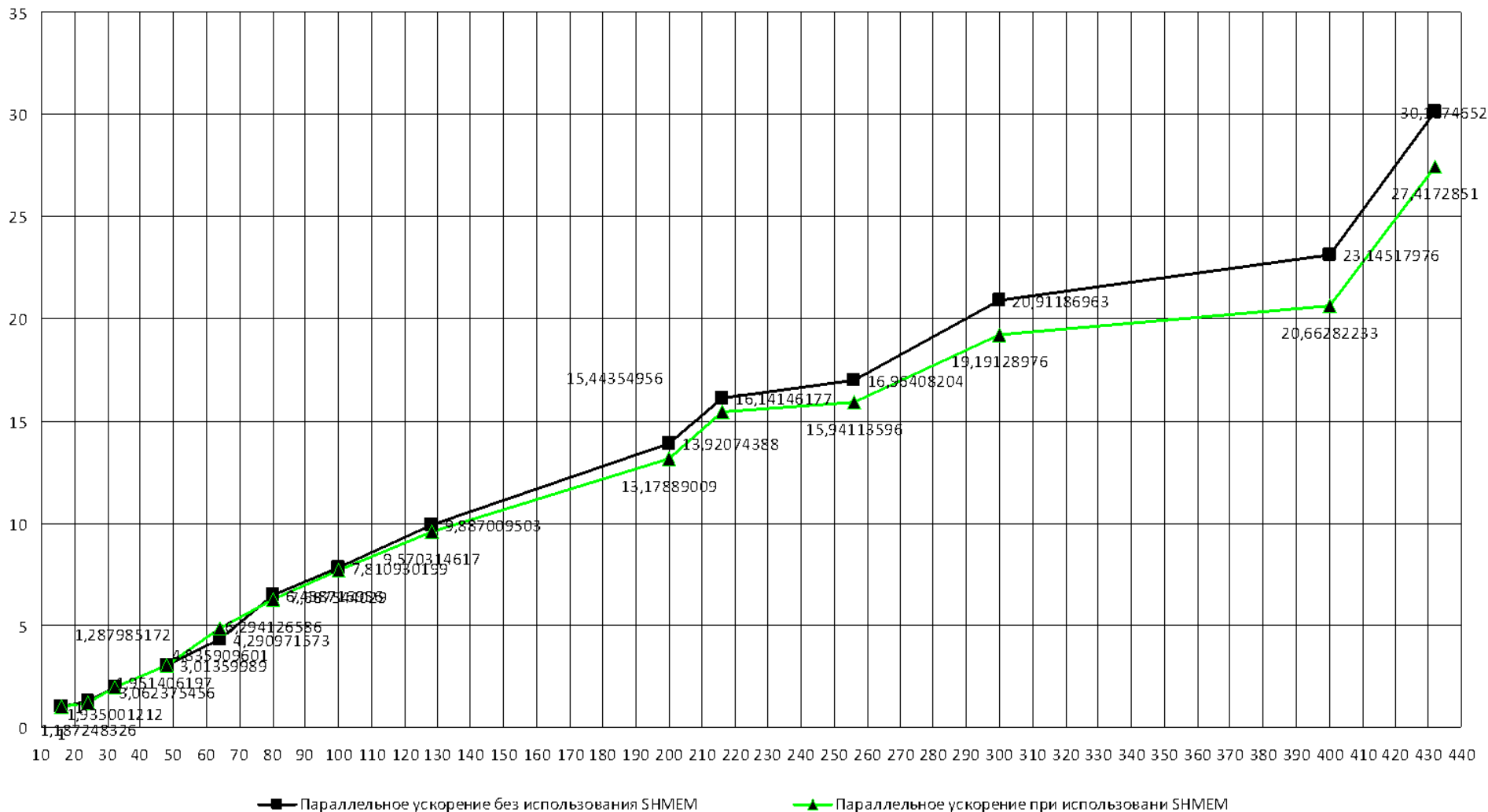
- Только Фортран95 (=Фортран90-Фортран4)
- - MODULE (нет INCLUDE, COMMON)
- Широкое использование структур и сложных типов
- Разумное структурирование
- Использование интерфейсных блоков для проверки правильности интерфейсов (делается автоматически на большинстве современных систем)
- IMPLICIT NONE

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ

- Полулагранжев динамический блок собственной разработки: несмещенная сетка по горизонтали, разности 4-го порядка по горизонтали; полунеявная схема по времени.
- Параметризации ALADIN/LACE (включая микрофизику)
- - Собственная параметризация болот
- - Ведутся работы по включению «полусвоей» параметризации приходящей радиации
- Планируется (совместно с НИВЦ МГУ, ИВМ РАН) включение усовершенствованной многослойной параметризации почвы.
- Разрешение опер. версии 0,9x0,72 градуса, 28 уровней. Принята в качестве основного численного метода среднесрочного прогноза. С 02 марта 2010 идет на сеть.
- Экспериментальная версия с разрешением 0,22x0,18 градуса, 51 уровень (60 к 2013 г)
- Прогнозы ежедневно (для некоторых регионов 2 раза в сутки) на <http://meteoinfo.ru/plav-forc-rus>

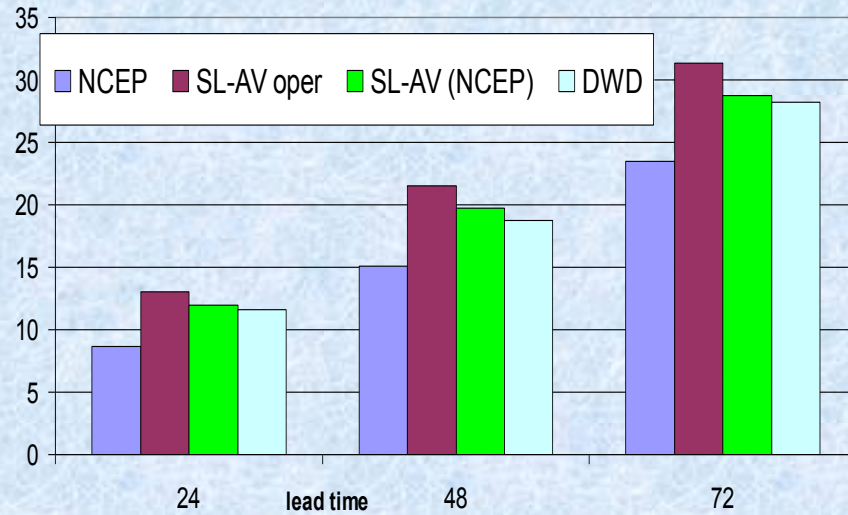
Параллельное ускорение модели ПЛАВ с разрешением около 20 км в средних широтах на BC SGI Altix 4700

Шаги с расчётом радиации

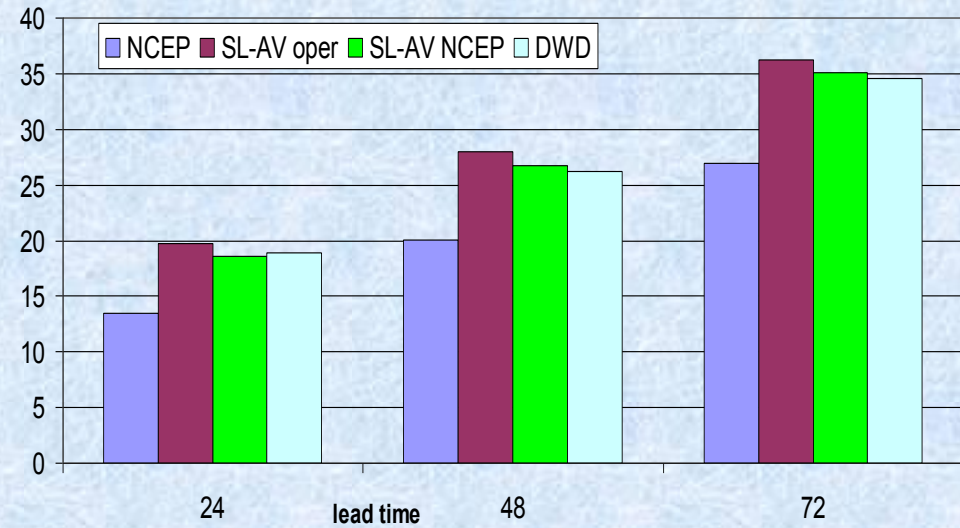


Impact of initial conditions for SL-AV model

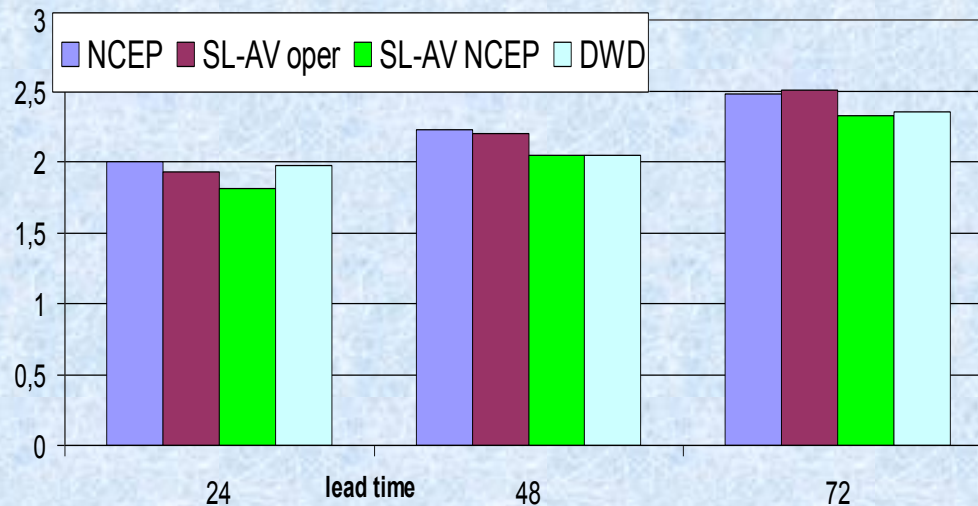
RMSE H500. Northern extratropics. 12 UTC.
March-September 2009.



Skill score S1 for H500. Northern extratropics. 12 UTC. March-September 2009.



RMSE T850. Northern extratropics. 12 UTC.
March-September 2009.



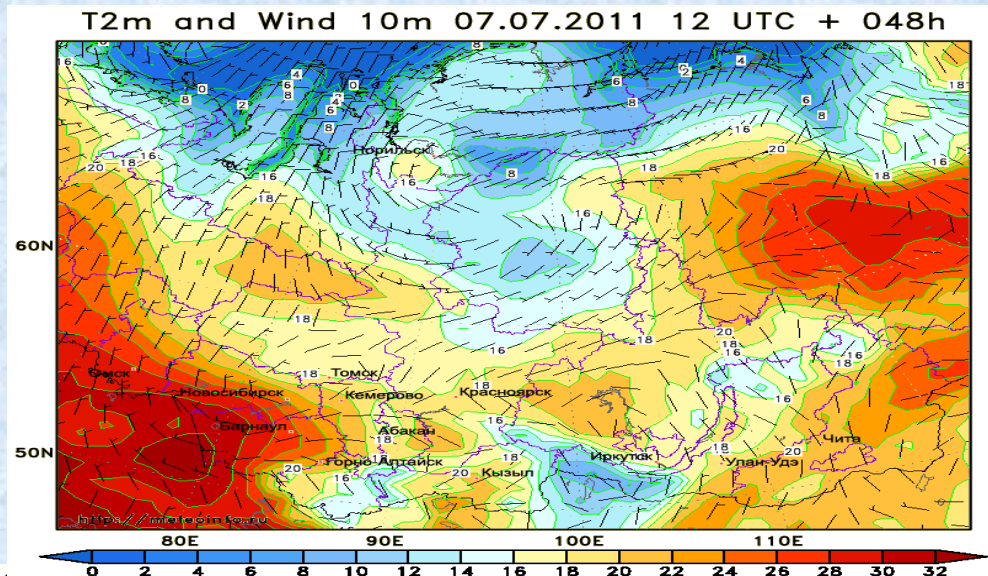
Выводы

- Реализация глобальной модели атмосферы с разрешением порядка 1 км требует обширных исследований:
- Блок динамики: выбор алгоритмов и их реализация для несуществующих пока компьютерных архитектур
- Параметризации: трехмерная параметризация погранслоя, (квази)трехмерная параметризация радиации, интерфейс с блоком динамики. Эффективная реализация для несуществующих пока компьютерных архитектур.
- Если не приступить в ближайшее время к решению этих проблем (в кооперации), можно сильно отстать

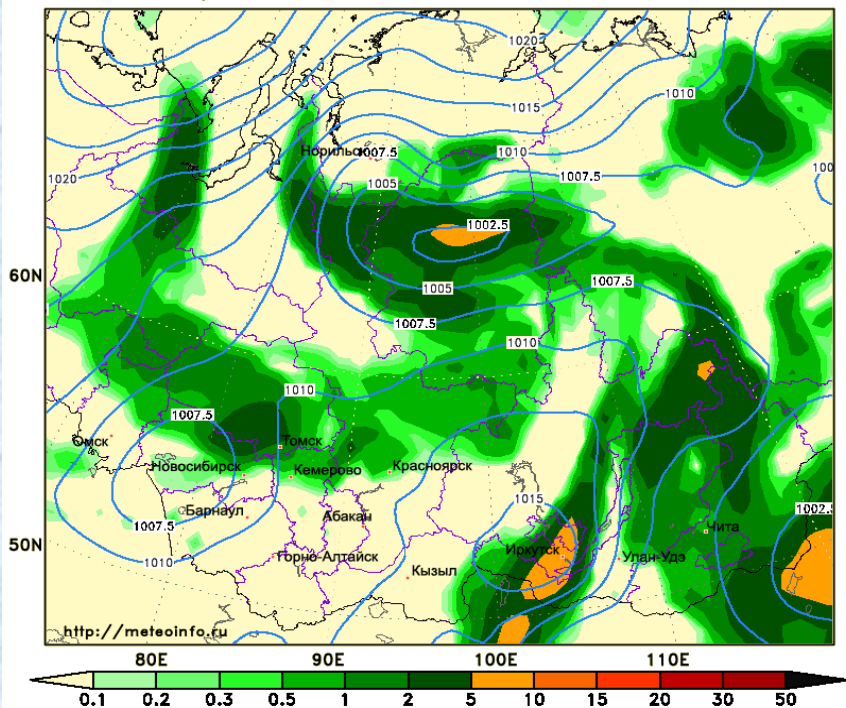
Развитие темы

- Устный доклад Р.Ю.Фадеев, М.А.Толстых
«Метод численного решения негидростатических уравнений сжимающейся атмосферы при решении проблем предсказания погоды»
- Постеры
- В.В.Шашкин, М.А.Толстых «Полулагранжева модель мелкой воды на сфере на редуцированной сетке, сохраняющая массу»
- А.В.Шляева, М.А.Толстых «Локальная ансамблевая схема усвоения данных наблюдений для прогноза погоды: тесты на модели мелкой воды»

Спасибо за внимание!



Precipitation 07.07.2011 12 UTC + 042h



Precipitation 07.07.2011 12 UTC + 048h

