

# Численный прогноз погоды с разрешением 1 км -научные проблемы

М.А.Толстых

ИВМ РАН, Гидрометцентр России



# План доклада

- Мотивация и требования
- Блок решения уравнений динамики
- Проблемы разработки параметризаций
- Проблемы усвоения данных
- Проблемы эффективной параллельной реализации
- Модель ПЛАВ

# Мотивация

- Есть шанс через несколько лет догнать среднемирового уровень в глобальном численном прогнозе погоды, опираясь на уже существующие у нас разработки.
- Дальнейший прогресс будет невозможен без кардинальных изменений в модели.

# Мотивация и требования

Необходимость существенного повышения горизонтального и вертикального разрешения вследствие:

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

# 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

# Проблемы эффективной параллельной реализации -1

- Через несколько лет будет достигнута производительность 1 эксафлопс ( $10^{15}$ )
- $\sim 10^5$ - $10^6$  процессорных ядер
- Процессоры будущего – существенно многоядерны ( $\sim 100$ - $300$  ядер на кристалл).
- Доступ в «дальнюю» память станет относительно дороже в большинстве случаев.
- Необходимо смена парадигмы масштабирования (сейчас – код масштабируем, если хорошо параллелится на  $\sim 100$  процессорах, в будущем – на  $\sim 10^4$ - $10^5$  процессорах)

# 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 <sup>0</sup> : 5-10 days/hr	18 - 29	8.5 - 14	4.0 - 6.3	1.8 - 2.9	0.85 - 1.4
Seasonal <sup>1</sup> : 50-100 days/day	17 - 28	8.0 - 13	3.7 - 5.9	1.7 - 2.8	0.80 - 1.3
Decadal <sup>1</sup> : 5-10 yrs/day	57 - 91	27 - 42	12 - 20	5.7 - 9.1	2.7 - 4.2
Climate Change <sup>2</sup> : 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 -2

- Реализация только под MPI – неэффективна: в пределе на одну точку сетки 8 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

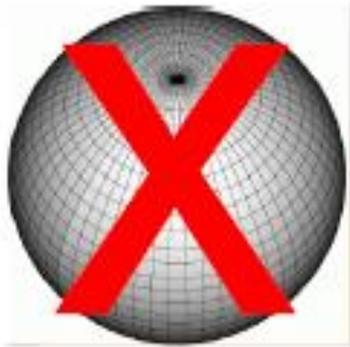
# Последствия для выбора сеток и алгоритмов

- 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.

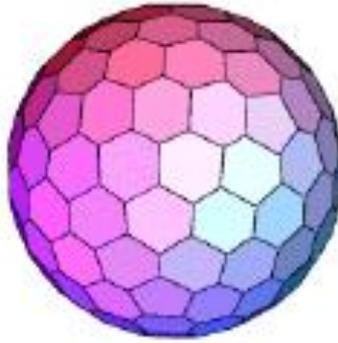
(картинки из презентации W.Skamarock, NCAR)



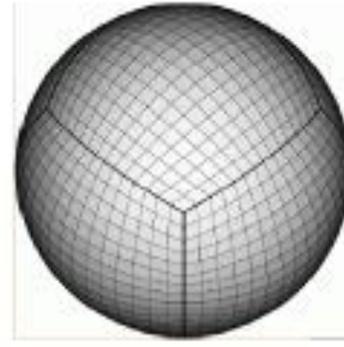
lat-long grid



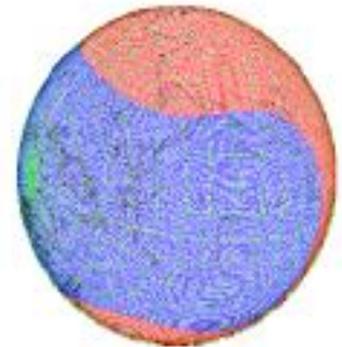
icosahedral grid  
(triangles)



icosahedral grid  
(hexagons)

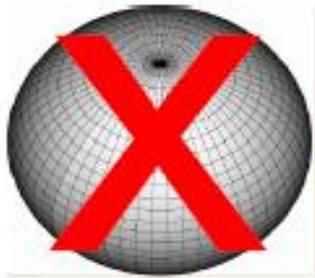


cubed sphere



Yin-Yang grid

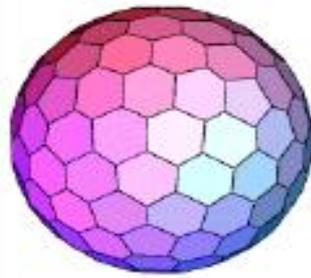
# Икосаэдральная сетка (треугольники)



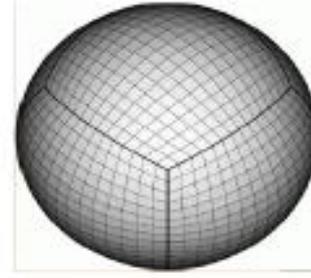
lat-long grid



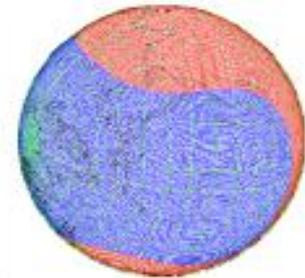
icosahedral grid  
(triangles)



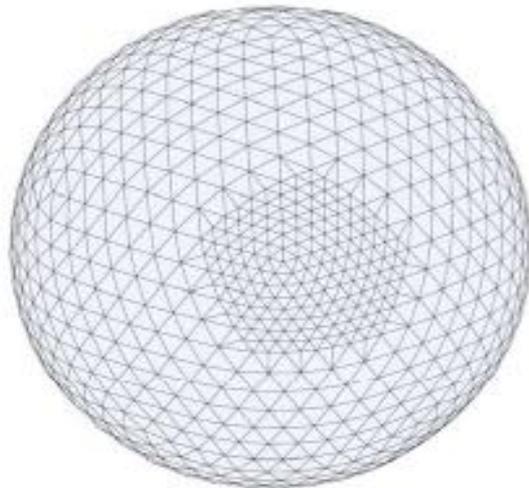
icosahedral grid  
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid



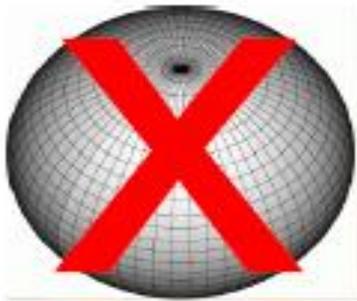
Advantages:

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.

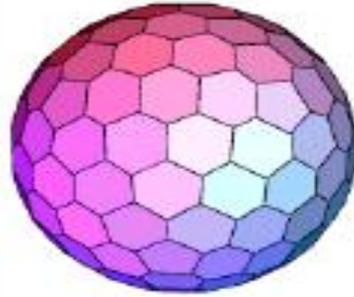
# Икосаэдральная сетка (гексагоны)



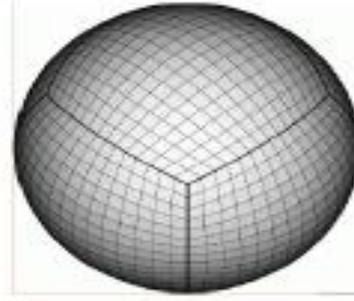
lat-long grid



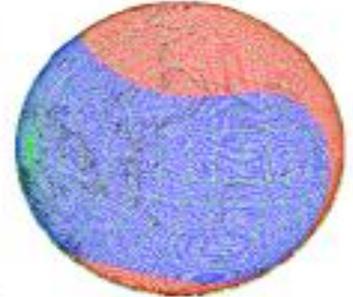
icosahedral grid  
(triangles)



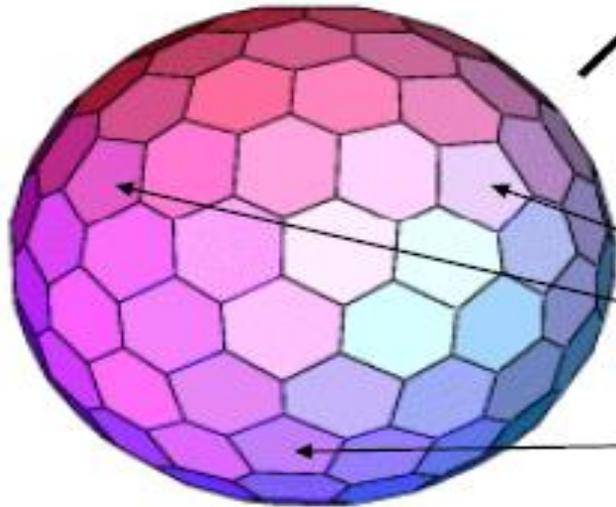
icosahedral grid  
(hexagons)



cubed sphere



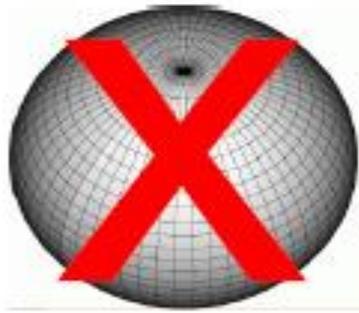
Yin-Yang grid



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



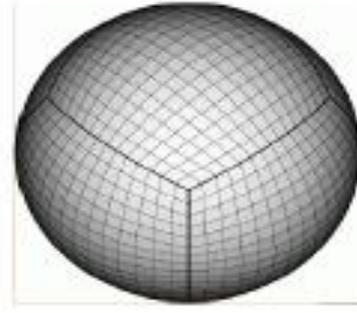
lat-long grid



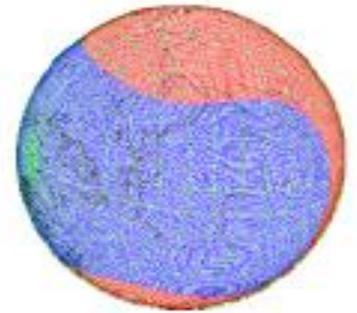
icosahedral grid  
(triangles)



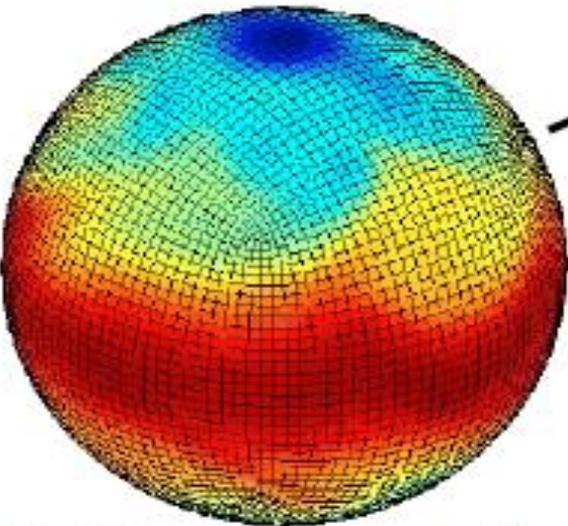
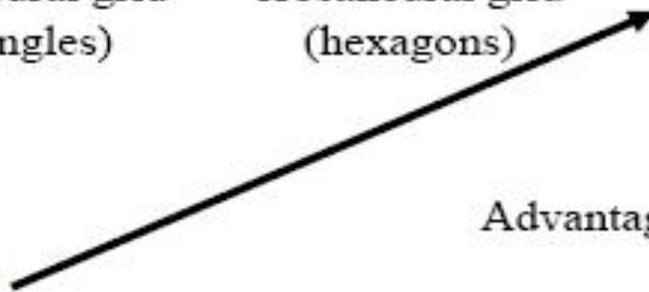
icosahedral grid  
(hexagons)



cubed sphere



Yin-Yang grid



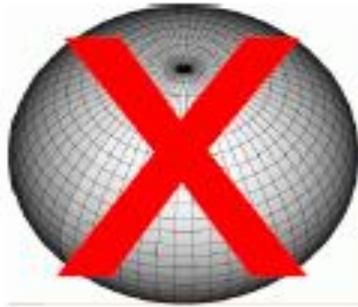
Advantages: relatively uniform resolution,  
local refinement is possible.

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



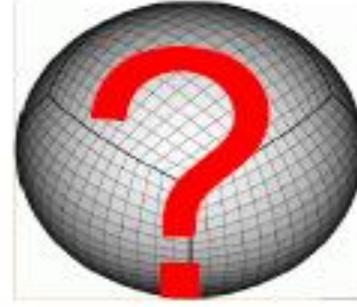
lat-long grid



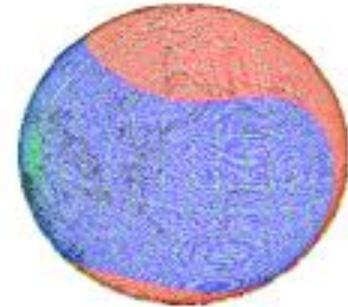
icosahedral grid  
(triangles)



icosahedral grid  
(hexagons)



cubed sphere



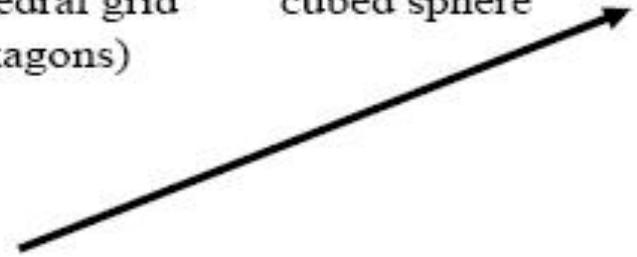
Yin-Yang grid



## Yin-Yang grid

[Yi Jing: the Book of Changes]

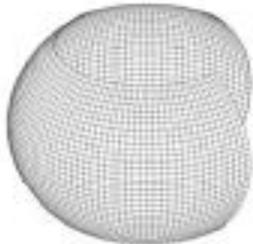
The universe (both space and time) can be divided into Yin and Yang, which is composed with *metals*(金), *water*(水), *wood*(木), *fire*(火) and *soil*(土). For example, the *moon* is due to Yin, and the *sun* belong to Yang. The energy of the atmosphere comes from the sun.



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



+

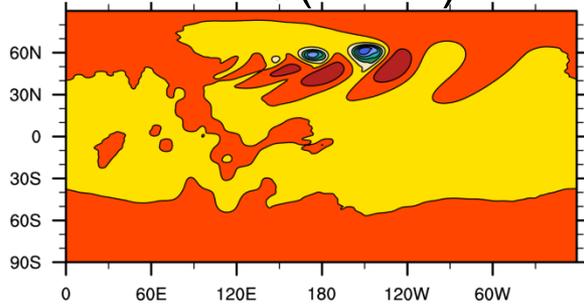
Yin-Yang composition



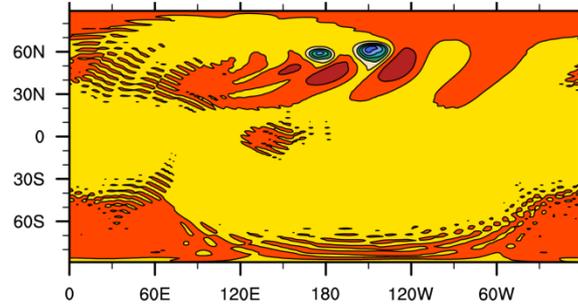
Provided by Dr. Kageyama, EBC, who is the developer of the Yin-Yang grid

# Эволюция $p_s$ , день 9 (тест Яблоновски)

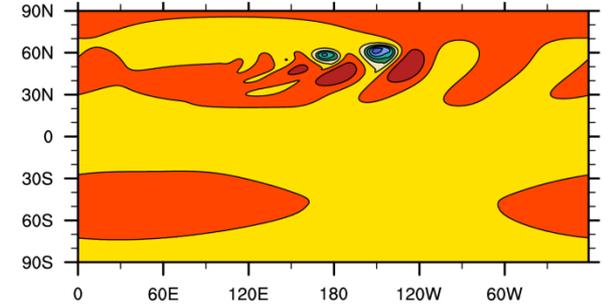
BQ (GISS)



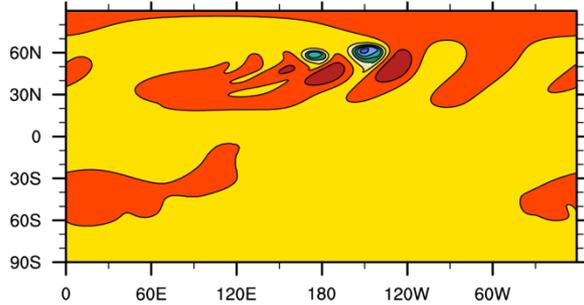
CAM-EUL



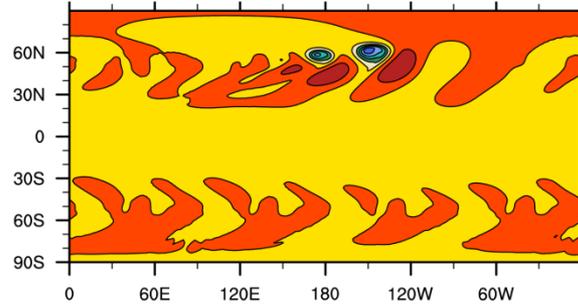
CAM-FV-isen



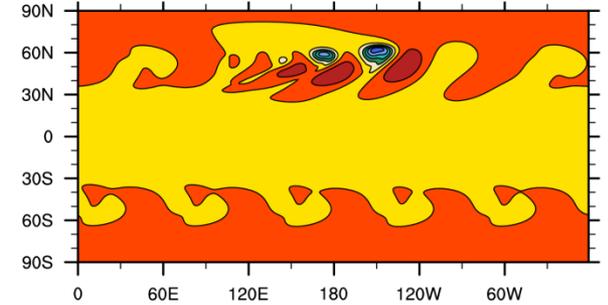
GEOS-FV



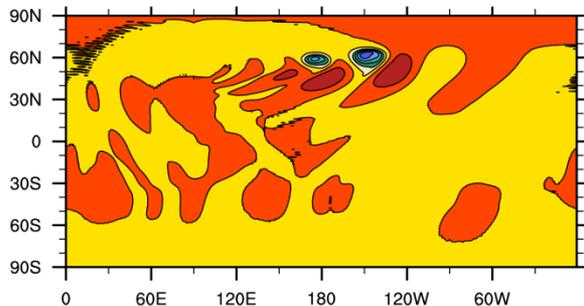
GEOS-FVCUBE



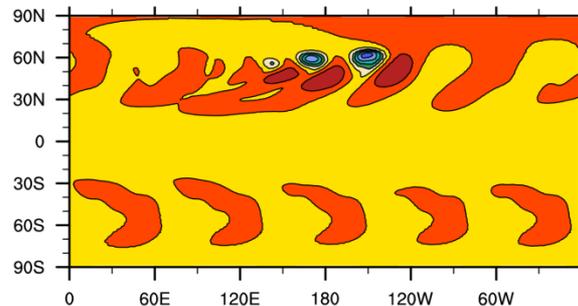
GME



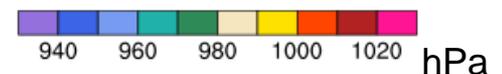
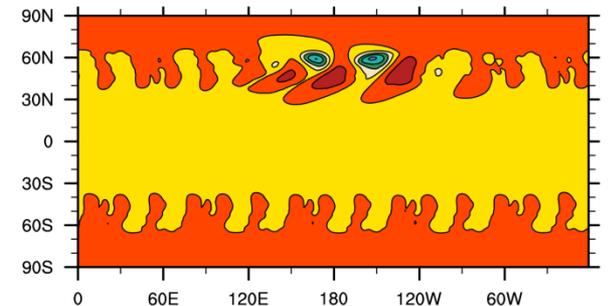
HOMME



ICON



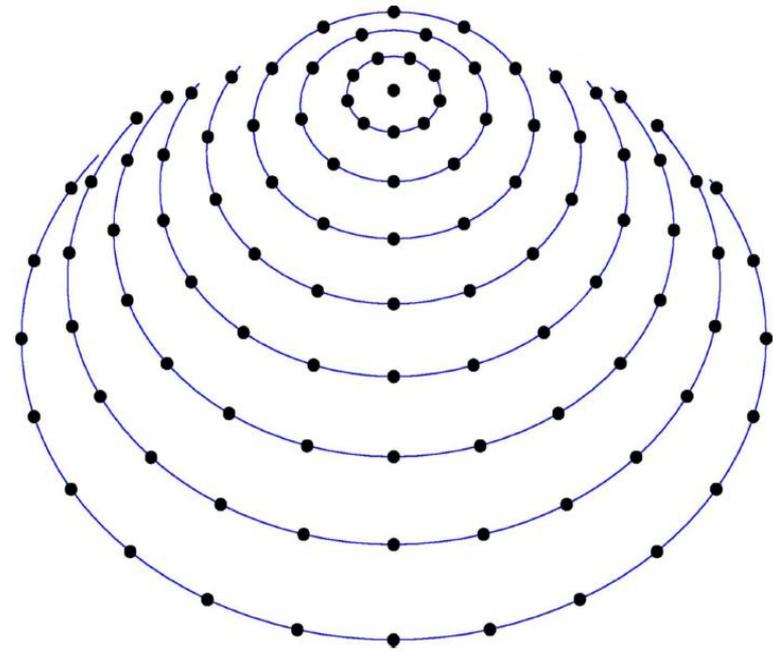
OLAM



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

# 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)



# 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)

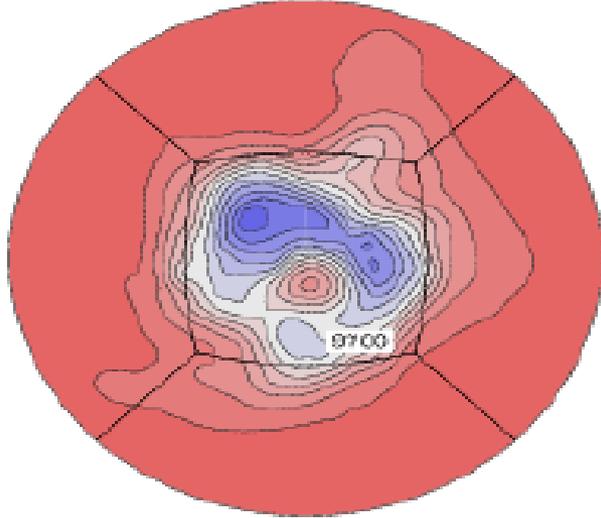
Спектральный метод не рассматривается.

Рассматривались:

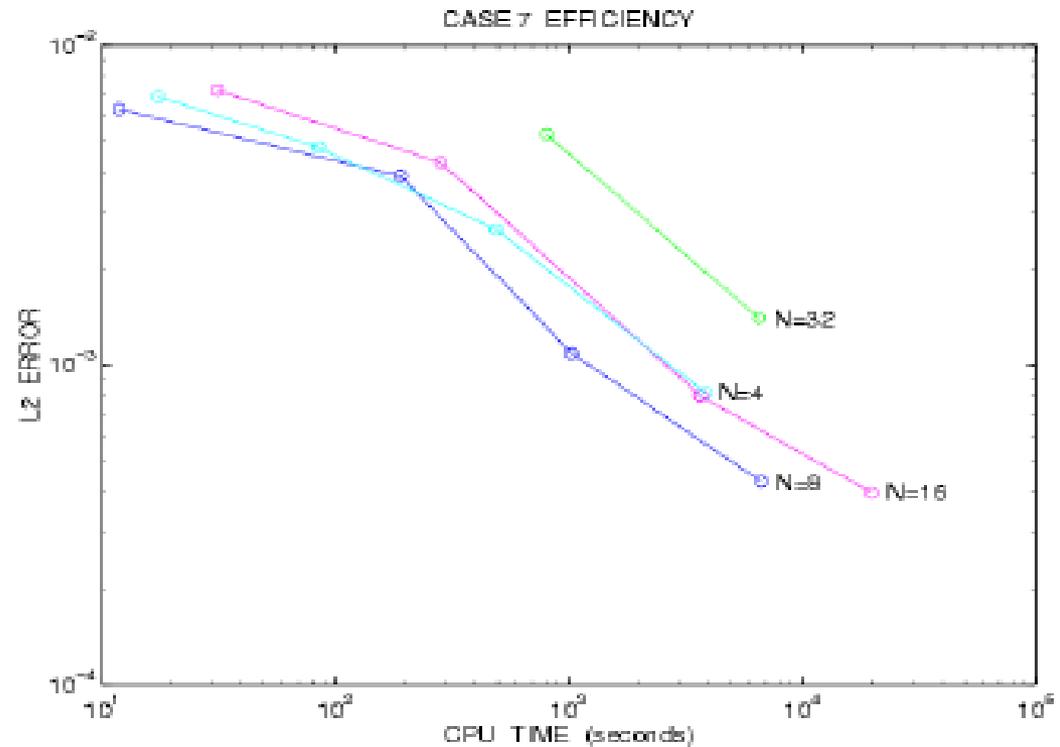
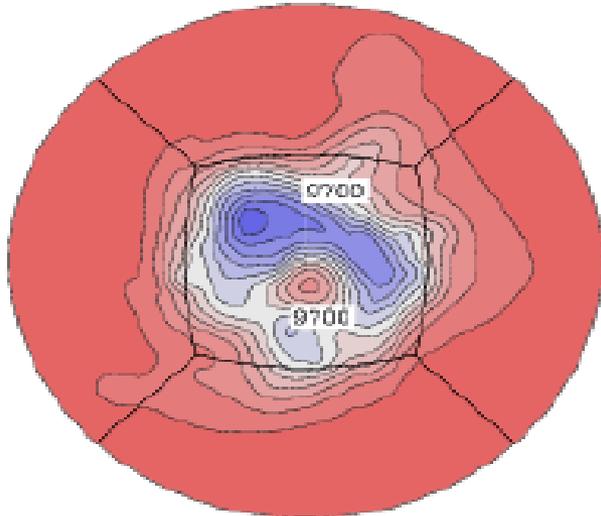
- Конечно-объемный метод
- Спектральные элементы (МКЭ с баз. функциями высокого порядка) – напр., разрывный Галеркин
- Полулагранжев метод
- Конечные разности

# Метод спектральных элементов на кубической сфере в CAM (NCAR)

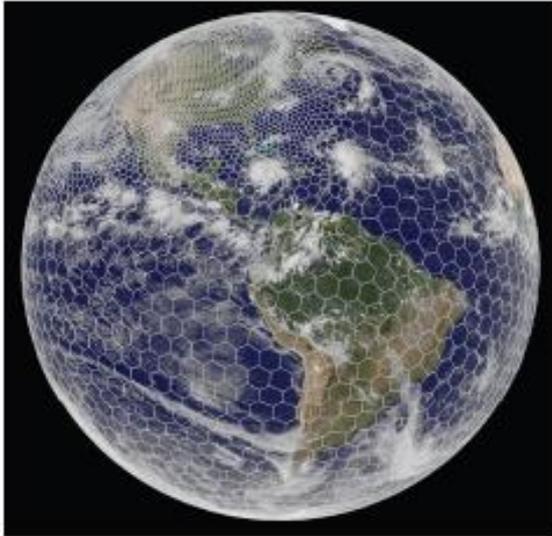
SPIC ELEM 188x8x8



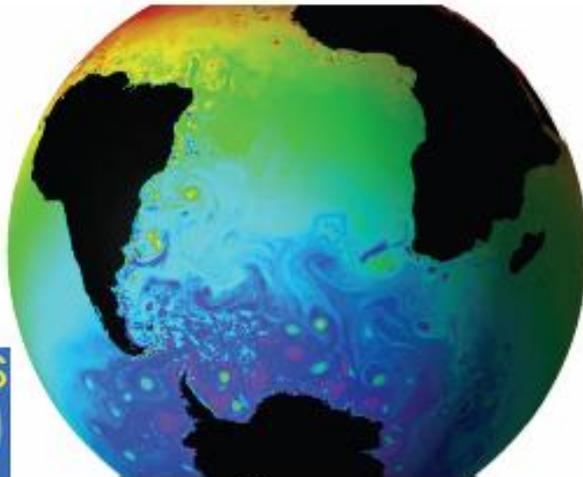
NCAR T813



# 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

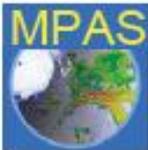
MPAS infrastructure - NCAR, LANL, others.

MPAS - Atmosphere (NCAR)

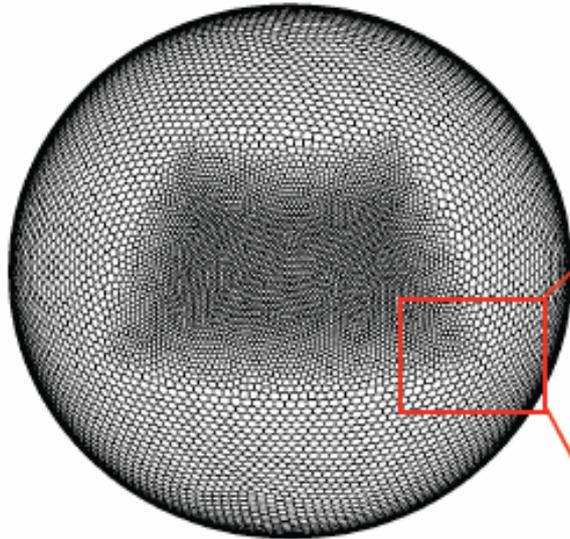
MPAS - Ocean (LANL)

MPAS - Ice, etc.

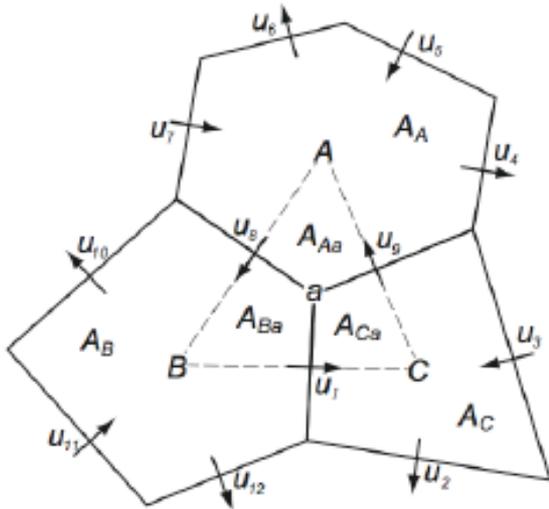
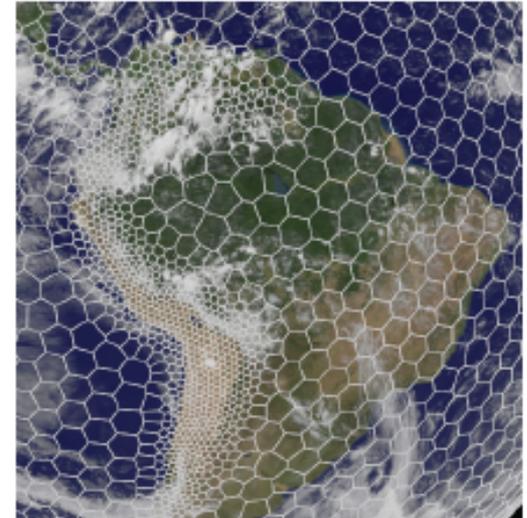
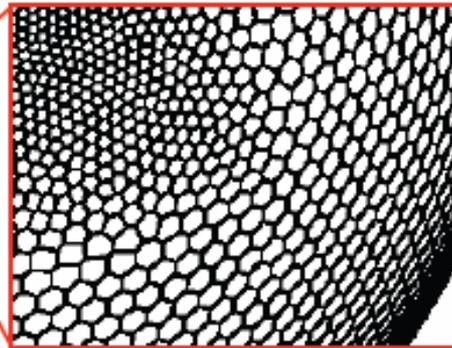
Bill Skamarock	NCAR
Joe Klemp	NCAR
Michael Duda	NCAR
Sang-Hun Park	NCAR
Laura Fowler	NCAR
Todd Ringler	Los Alamos National Lab
John Thuburn	Exeter University
Max Gunzburger	Florida State University
Lili Ju	University of South Carolina



# 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



# 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.

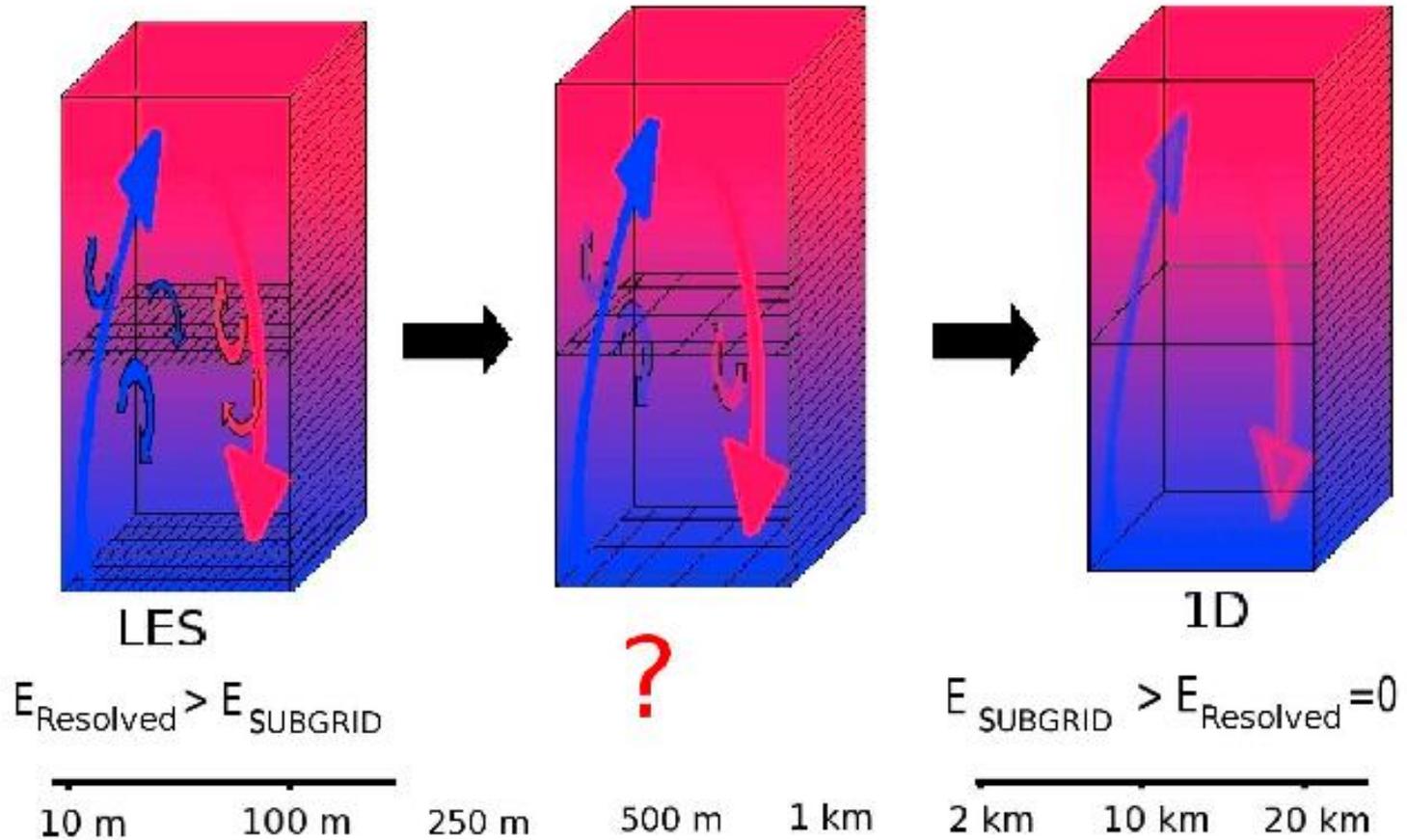
# Проблемы разработки параметризаций для модели с разрешением порядка 1

**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.

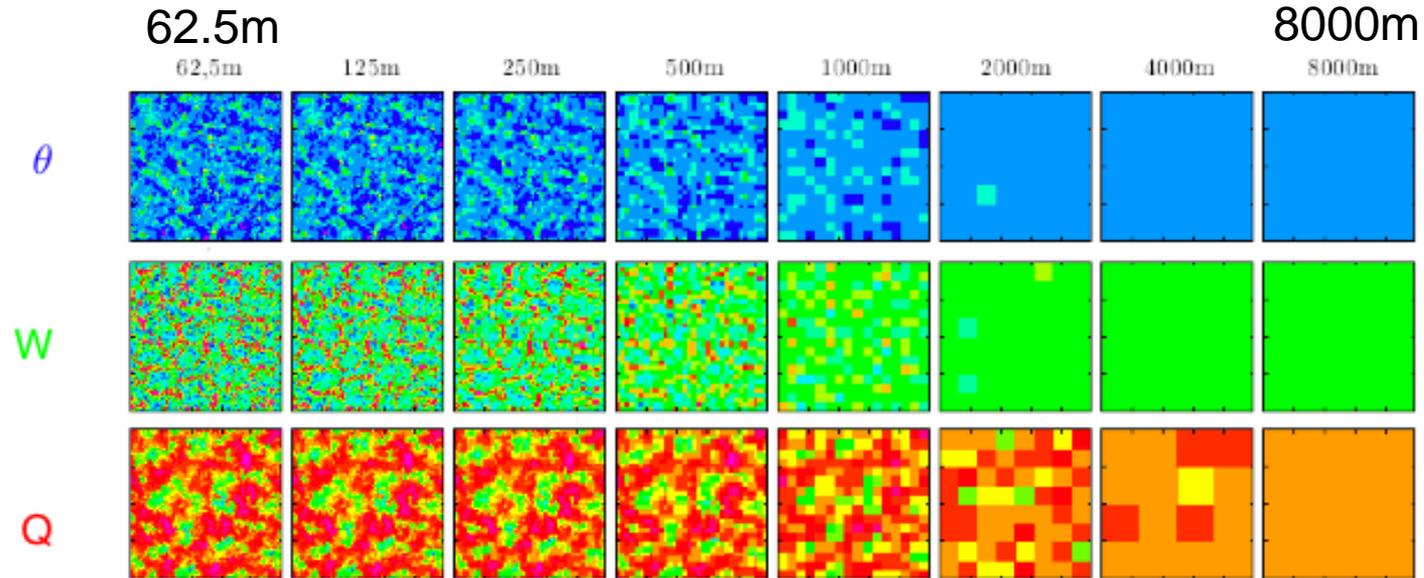
# What happens at intermediate scales ?

Use Meso-NH in LES mode to see what happens at NWP-scale



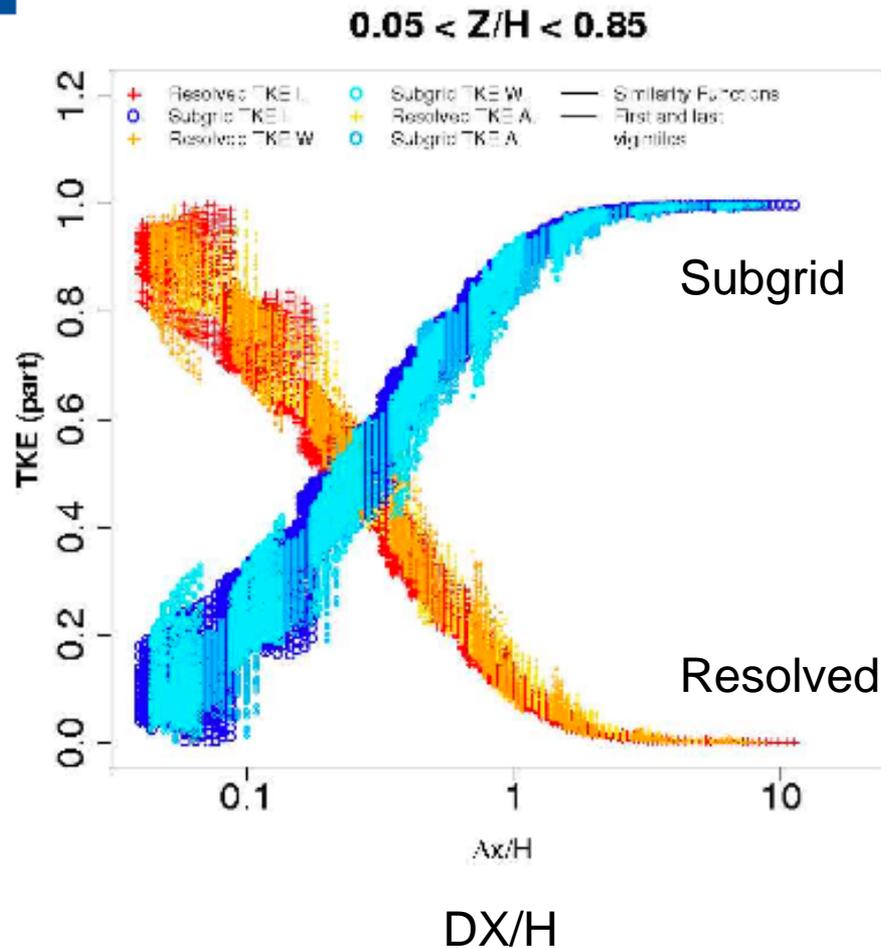
# Calculation of the resolved and subgrid TKE

Horizontal cross section in the middle of the boundary layer



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

## Partial Similarity functions : TKE in the mixed layer

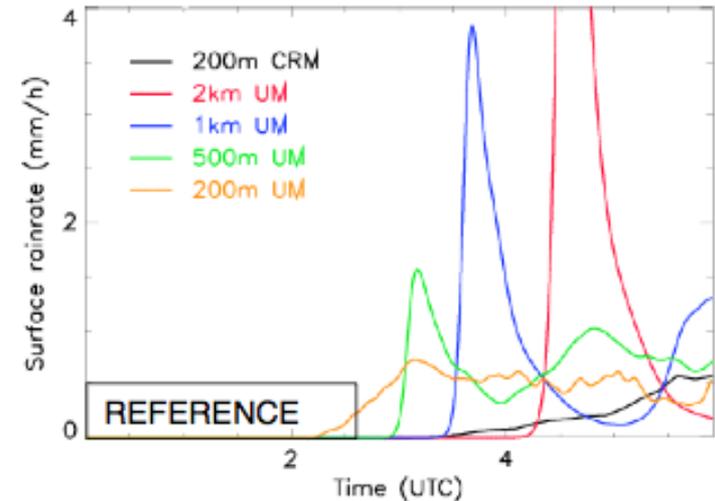


- ▶ The data follow the same function.
- ▶ For the fine meshes (near the LES), the subgrid part is smaller than the resolved one.
- ▶ When the mesh becomes coarser, the subgrid part grows up.
- ▶ For coarser meshes, the parameter becomes entirely subgrid as the resolved part is null.

# 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

# Применяемые стратегии в «серой зоне» для конвекции

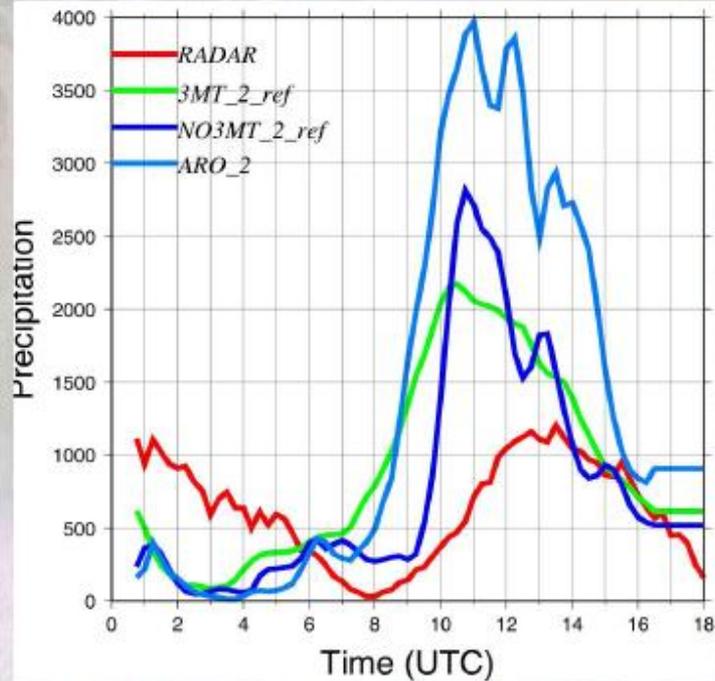
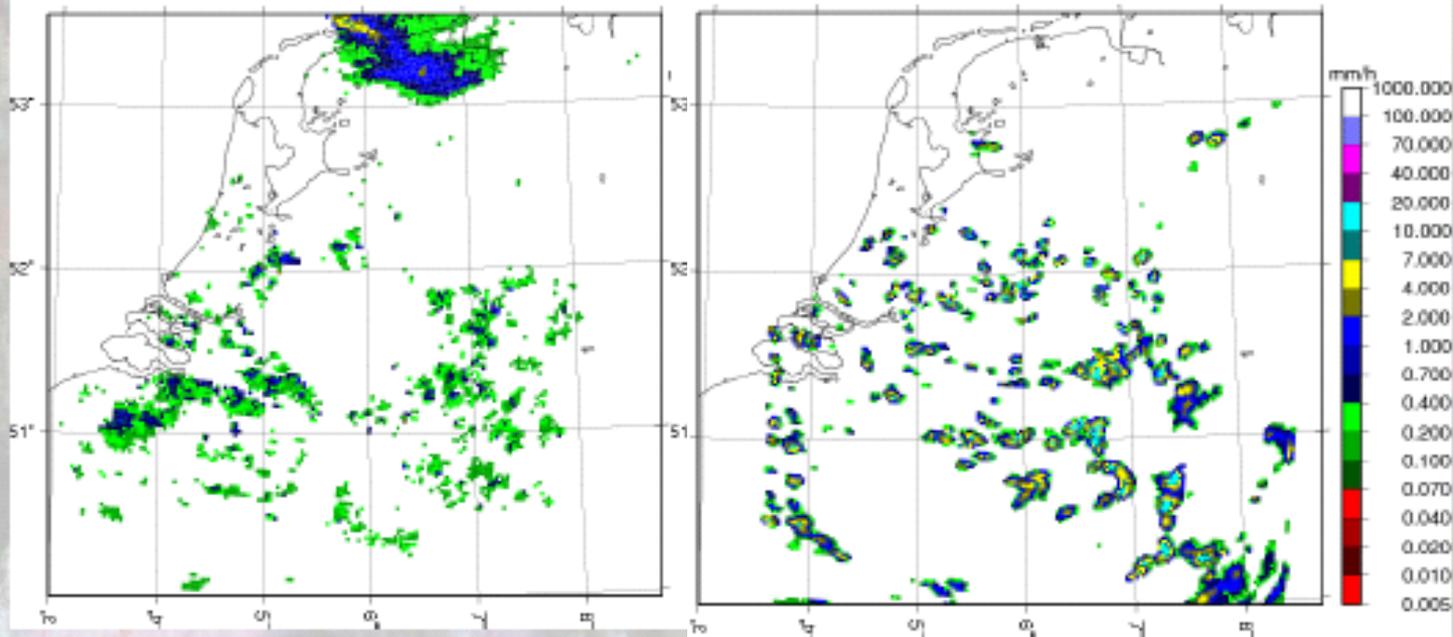
- Повысить разрешение до момента, когда вся конвекция разрешается явно
- Просто выключить параметризацию конвекции (так делают большинство)
- Совместная параметризация турбулентности и конвекции

# Опыты мезомасштабного моделирования конвекции существующими моделями

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

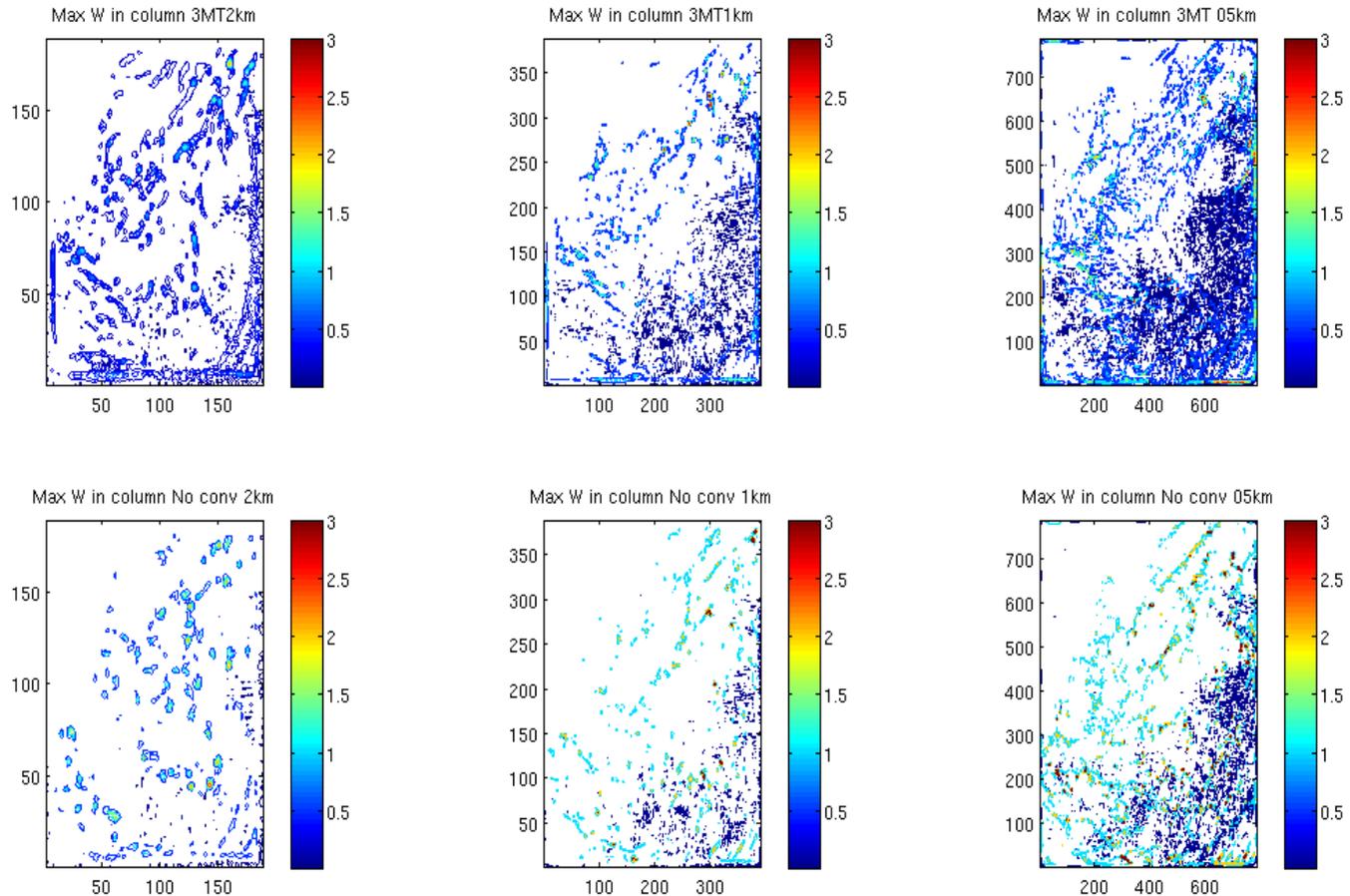
Radar NL 20060430 1100 UTC

ARO\_2 20060430 1100 UTC



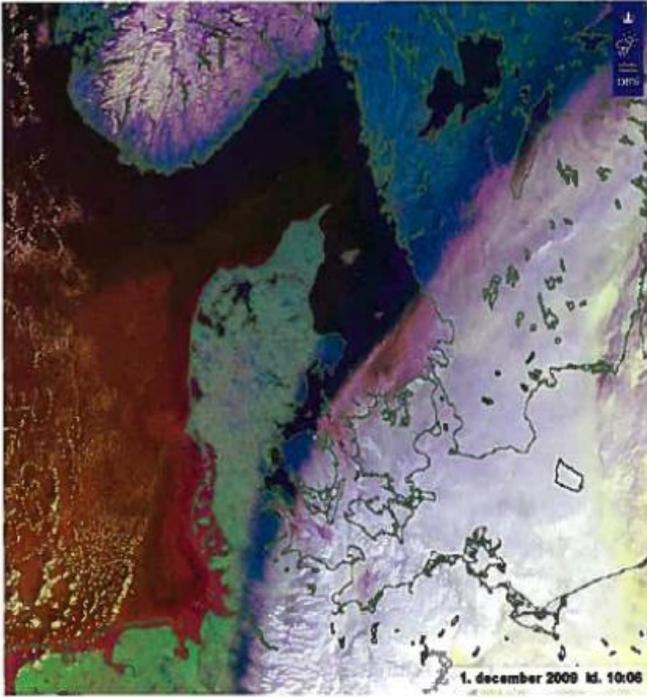
- “Fractal” behaviour, no convergence to “resolved solution”
- Observed coherent precip structures not reproducible

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



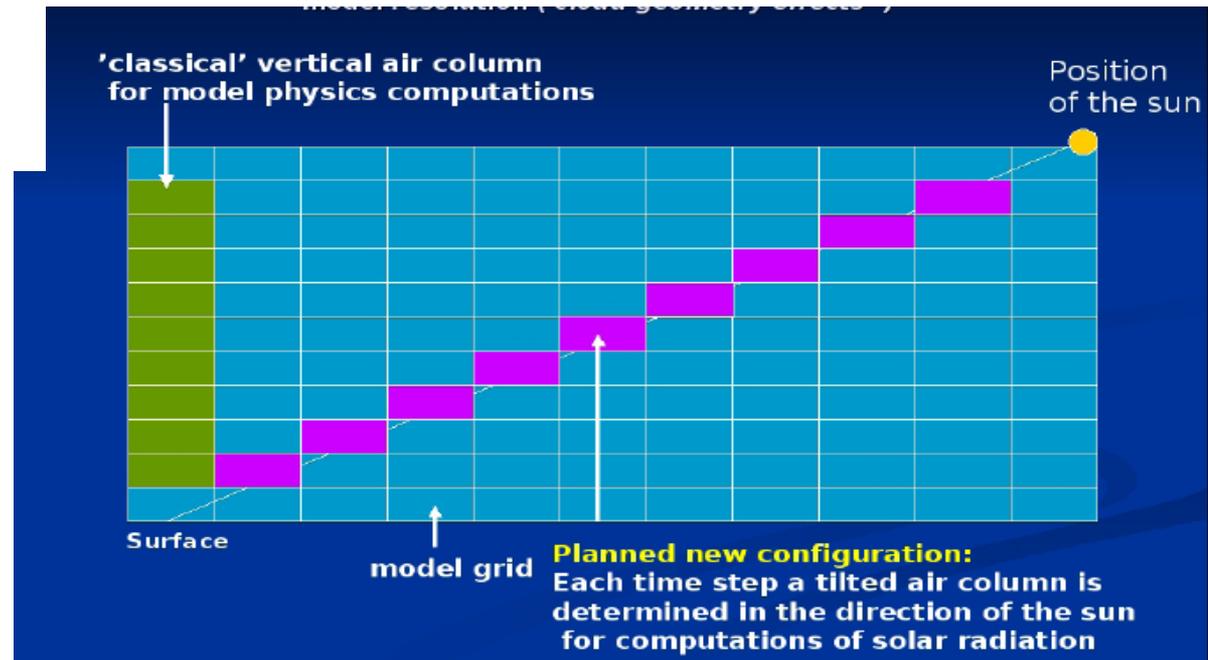
- Without convection parametrization:  
Strong upward motions, high clouds, overestimate of precip peak

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



Visuelt NOAA-billede fra dmi.dk.

Vejret, 122, februar 2010 • side 37



# Проблемы в усвоении данных при высоком разрешении

- Негауссовость/несимметричность ошибок
- Усвоение радарных данных (облачность)
- Высокая стоимость поддержки 4D-Var при изменении модели – ансамблевые фильтры Калмана?

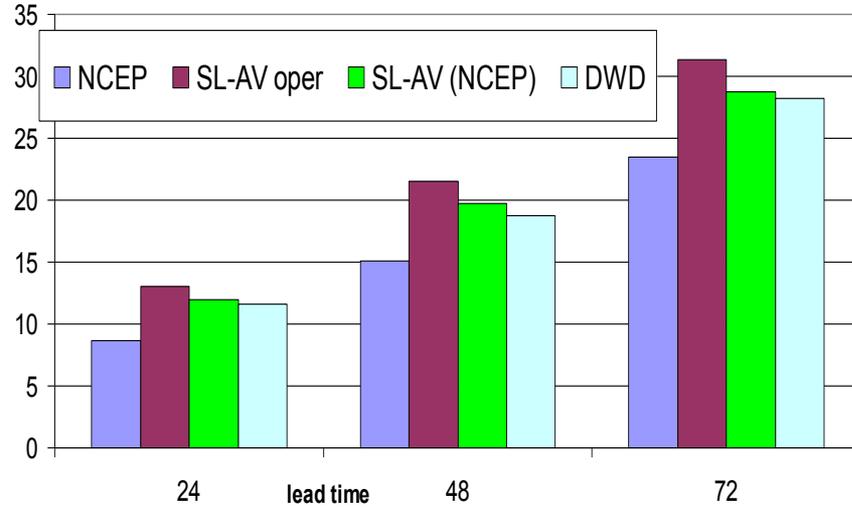
# Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ

- 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 проходящей радиации
- Разрешение опер. версии 0,9x0,72 градуса, 28 уровней. С 02 марта 2010 идет на сеть.
- Экспериментальная версия с разрешением 0,22x0,18 градуса, 50 уровней (60 к 2013 г)
- Прогнозы ежедневно (для некоторых регионов 2 раза в сутки) на

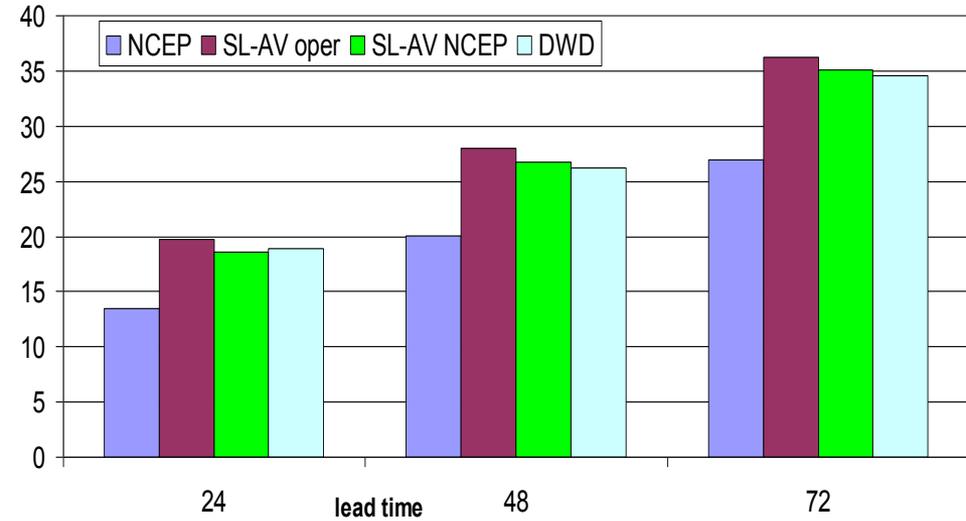
<http://meteoinfo.ru/plav-forc-rus>

# Impact of initial conditions for SL-AV model

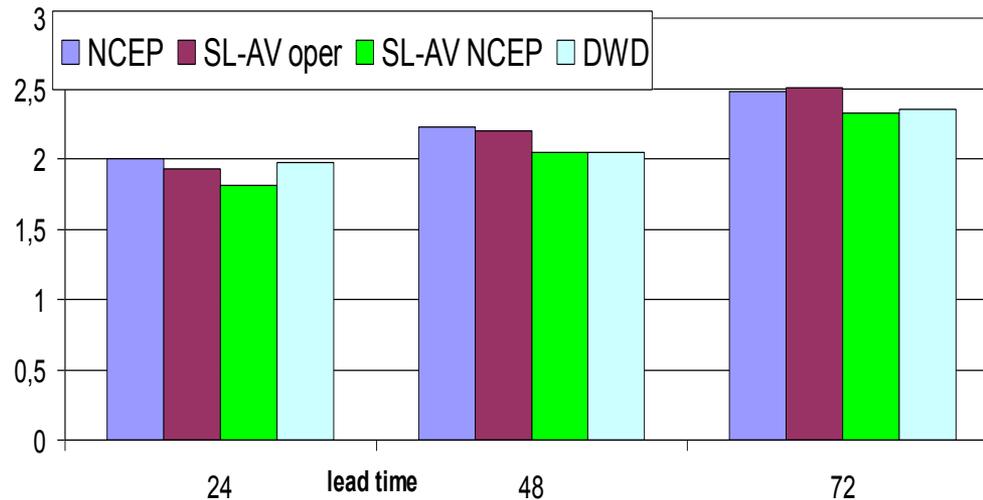
RMSE H500. Northern extratropics. 12 UTC.  
March-September 2009.



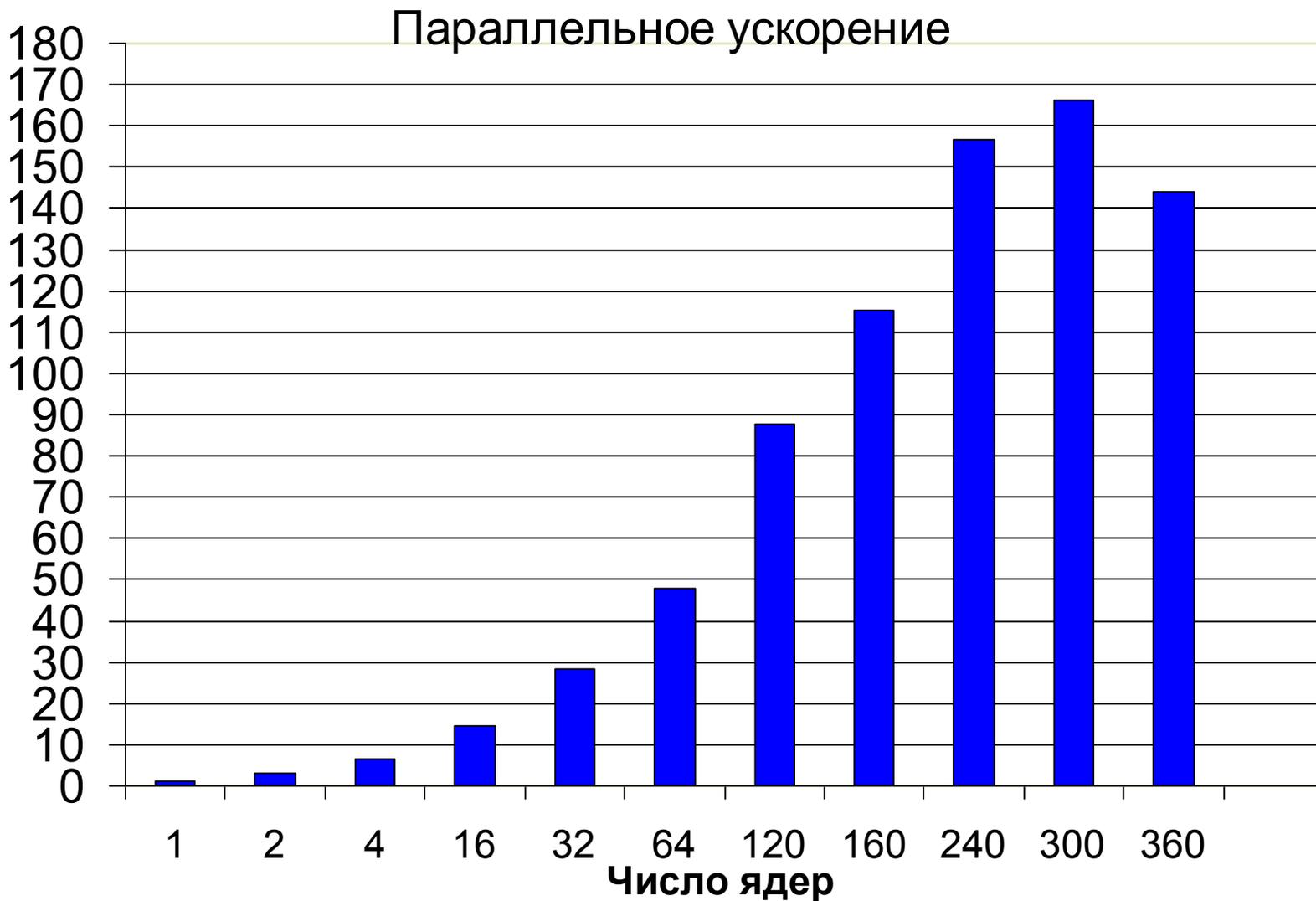
Skill score S1 for H500. Northern extratropics. 12 UTC. March-September 2009.



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



# Параллельное ускорение полулагранжевой модели атмосферы (сетка 1152x441x50)



# 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

**Спасибо за внимание!**