



Применение суперкомпьютеров в численном прогнозе погоды

**М.А.Толстых, Р.Ю.Фадеев, В.В.Шашкин,
С.В.Травова, Г.С.Гойман, В.Г.Мизяк, В.С.Рогутов,
К.А. Алипова**

Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН,
Гидрометцентр России,
Московский физико-технический институт

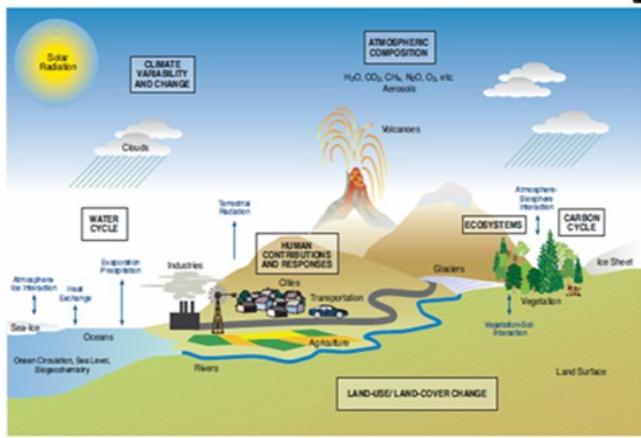
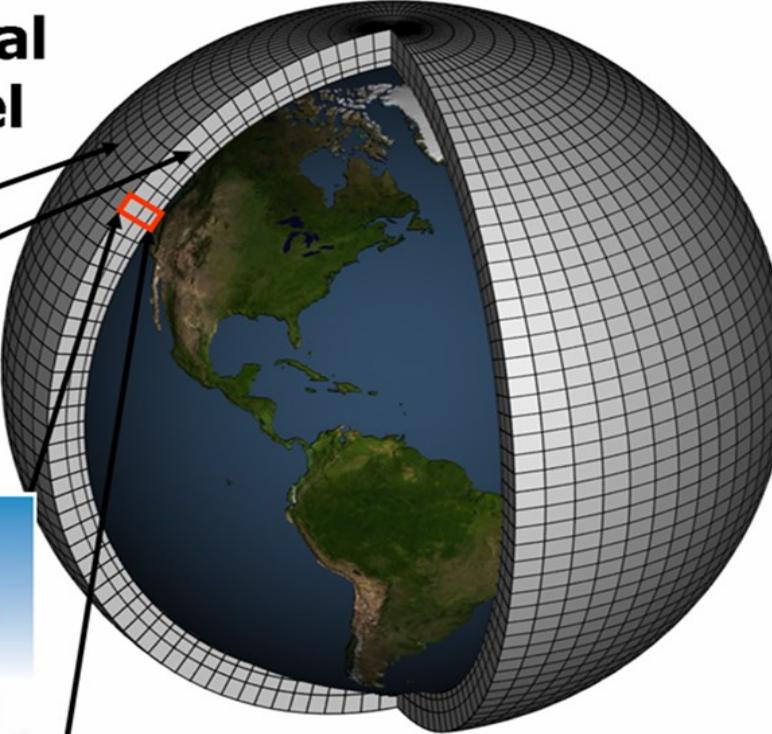


Как устроена модель атмосферы

Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)

Vertical Grid (Height or Pressure)



Гидродинамика, метеорология – движение воздуха

Оптика атмосферы, физика облаков – расчет нагрева от солнца и охлаждения от поверхности

Теория турбулентности – приземный слой воздуха

География, гидрология суши – процессы на поверхности и под ней

Взаимодействие атмосферы с океаном и льдом

Глобальная модель атмосферы

- **Динамическое ядро:** 3D уравнения типа Рейнольдса (осредненные уравнений Навье-Стокса) на вращающейся сфере с рядом упрощений. (до разр. 8-10 км - гидростатика)
 - требует некоторую степень неявности в интегрировании по времени (полунеявная схема либо НЕ-VI)
 - 25-45 % времени расчетов.
- **Правые части уравнений (параметризации процессов подсеточного масштаба):**
 - обычно одномерные расчеты по вертикальной колонке
 - значения в узле сетки (k,i,j) зависят только от значений ($1:K_{\max},i,j$)
 - 55-75 % времени расчетов

Бесшовный прогноз состояния атмосферы:

- В атмосфере нет искусственных границ между временными масштабами (Shukla, 2005; Hoskins, QJ 2013).
- «Хорошая» модель атмосферы должна правильно воспроизводить все временные масштабы в рамках единого набора параметризаций (возможно, с различными параметрами).
- «Бесшовные» модели: Великобритания, США, Германия, *Россия*

Необходима адаптация модели атмосферы для применения на масштабах времени от нескольких дней до нескольких лет.

Типы прогнозов

и технологии (численные, гидродинамические), применяемые в Гидрометцентре России.



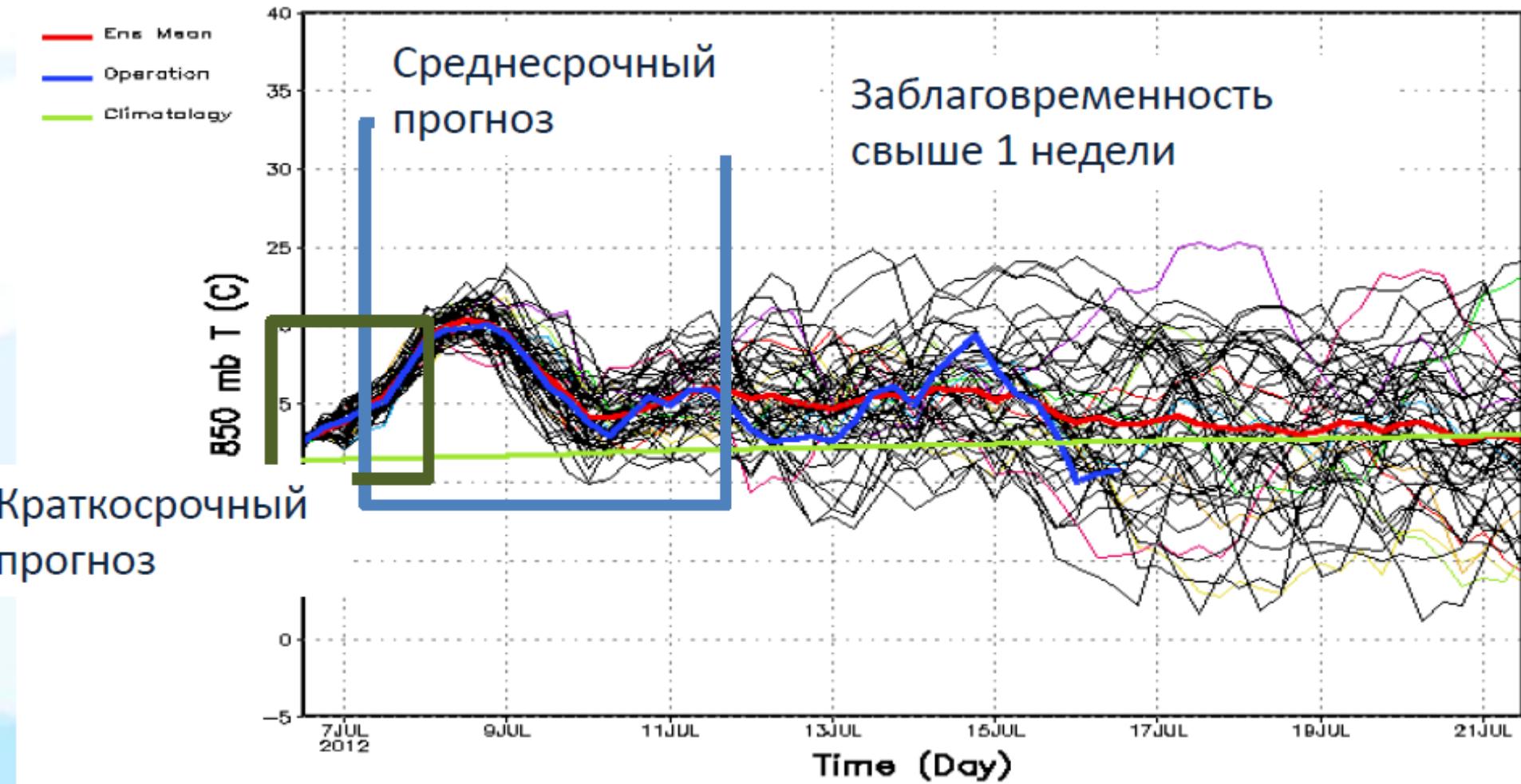
Числа указаны для глобальных моделей, в том числе:

тип и заблаговременность прогноза,

характерная сложность модели, требуемая мощность вычислительной системы и время расчета прогноза.

Оперативность прогноза налагает ограничения на время счета.

Предсказуемость атмосферных процессов



Global weather prediction models

Forecast Centre (Country)	Computer (Sustained) [Peak performance] in TFlop/s	High resolution Model (FC Range in days)
ECMWF (Europe)	Cray XC40, 3610 nodes x 2 (2 x ~166TFlops) [8.5PFlops]	TCo1279 L137 ~9km Coupled O-A (10)
Met Office (UK)	Cray XC40 3040+3040+6720 nodes (Unknown) [15.5PFlops]	~10 km L70 (7)
Météo France (France)	BULL, Intel E5 v4 - Broadwell EP, 1800 nodes x 2. 40 cores/node. [2 x ~2.1PFlops]	T _L 1798(C2.2) L105 (4)
DWD (Germany)	NEC SX Aurora; 178+232 nodes with 8 vector engines per node, 8 cores per VE (total 11392+14848 cores) SP 200+260	13 km L90 (7.5)
HMC (Russia)	Cray XC40-LC, 976 nodes x36 cores [1293 Tflops]	(0.16-0.24)°x0.225° L51 (10) T339 L31 (10)
NCEP (USA)	DELL (73.592 x 2 cores) (450 TFs sust., 4302 x2 TFs peak)	FV3-based, C768 L64 (16) (13 km)
CMC (Canada)	Cray XC40, 854 nodes x 2	0.23°x0.23° L80 (10)
CPTEC/INPE (Brazil)	CRAY XE 17472 cores (17.6) [256] CRAY XC50 4160 cores (193) [313.5]	T666 L64 (11)
JMA (Japan)	CRAY XC50 (Vendor: Hitachi), 2*2816 nodes [2x9,083]	TL959 L100 (11)
CMA (China)	Sugon, 98432 cores	GRAPES(0.25L60) (10)
KMA (Korea)	Cray XC40; 2 x 69,696 cores (2x45) [?]	~25km L70 (12)
NCMRWF (India)	IBM iDataPlex 1052 nodes (16 cores per node) (?) [350 TF]	~17km L70 (10)
BoM (Australia)	Oracle Blade 6000, 576 nodes (12 cores (5) [?]	40km, L70 (10)

Глобальные модели численного прогноза

- Сейчас в мире всего 14 глобальных моделей (13 в таблице + ВМС США)
- Из них всего **9** собственной разработки:
 - Россия, Европейский центр, США, Великобритания, Франция, Германия, Канада, Япония, Китай.
- Только Франция и Великобритания самостоятельно развиваются свои модели, ориентированные как на прогноз погоды так и на климат.
- 7 оригинальных моделей – полулагранжевы.
- Типичное разрешение на 2020 г - 9-20 км.

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ

(ПолуЛагранжева, на основе уравнения
Абсолютной Завихренности)

Модель ПЛАВ использует в качестве прои
переменных абсолютную завихренность и
горизонтальную дивергенцию.

- Цели разработки: высокая точность при минимальных вычислительных затратах =>
- Численные методы высокого порядка
- Полулагранжев метод, полунеявный алгоритм интегрирования по времени



Люди, без которых модель не была бы создана



Г.И.Марчук
08.06.1925-24.03.2013

Отечественная школа моделирования атмосферы и океана.

Модель Земной системы INMCM является единственной отечественной совместной моделью атмосферы и океана с 2003 года, участвующей в международном проекте IPCC.

Люди, без которых модель не была бы создана

Знакомство с численным прогнозом погоды

Параметризации
процессов подсеточного
масштаба



Жан-Франсуа Желен
16.01.1950-08.01.2015

История развития модели ПЛАВ

- 1994-1996 Постдок Толстых М.А. в Метео-Франс и INRIA (прототип модели)
- 1998-2000 Грант ЕС INTAS96-2074 (развитие)
- 10.2002-02.2005 Группа ПЧММА в Гидрометцентре (разработка технологии применения в опер. среднесрочном прогнозе)
- 03.2005 Лаборатория
- 2008 – внедрение в долгосрочном прогнозе
- 2010 – внедрение в среднесрочном прогнозе
- 2015 – внедрение ПЛАВ20 в среднесрочном прогнозе
- 2014-2016 – разработка многомасштабной (бесшовной) версии

Глобальная модель атмосферы ПЛАВ

ПЛАВ: Полулагранжева, на основе уравнения для абсолютного вихря.

- Конечно-разностный полу неявный полулагранжев блок решения уравнений гидротермодинамики атмосферы собственной разработки. (*Tolstykh et.al., GMD, 2017*).
- Набор параметризаций процессов подсеточного масштаба ALADIN/ALARO с рядом модификаций.
- Свободно-распространяемые блоки расчета коротко- и длинноволновой радиации CLIRAD SW +RRTMG LW.
- Модель почвы ИВМ РАН – НИВЦ МГУ.
- Параметризация подинверсионных облаков, учет наклона орографии в GWD и учет шероховатости льда собственной разработки
- Параметризация морского льда (температура поверхности, шероховатость,...)



Применение модели ПЛАВ



Оперативные среднесрочные
прогнозы

0.225° по долготе, 0.16°-0.24° по широте, 51
уровней.

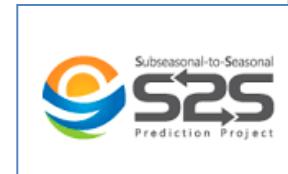
Перспективная система
ансамблевого среднесрочного
прогноза (предстоят испытания)

0.9° по долготе, 0.72° по широте, 96 уровней.

Долгосрочные прогнозы

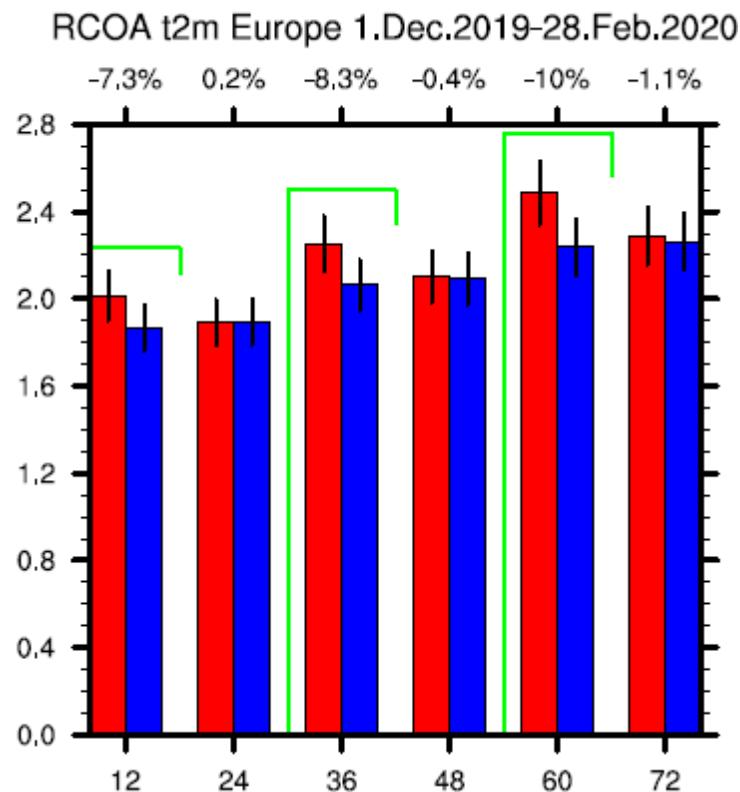
(WMO S2S Prediction project)

1.4°x1.1°L28 в настоящее время,
0.9°x0.72°L96, в ближайшем будущем.

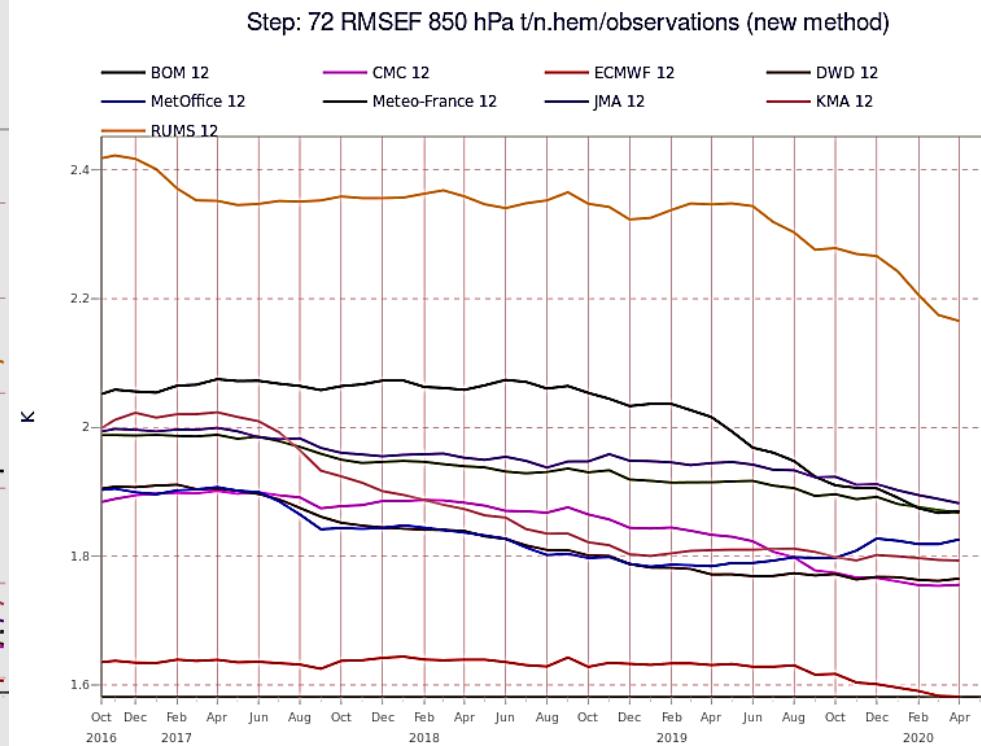
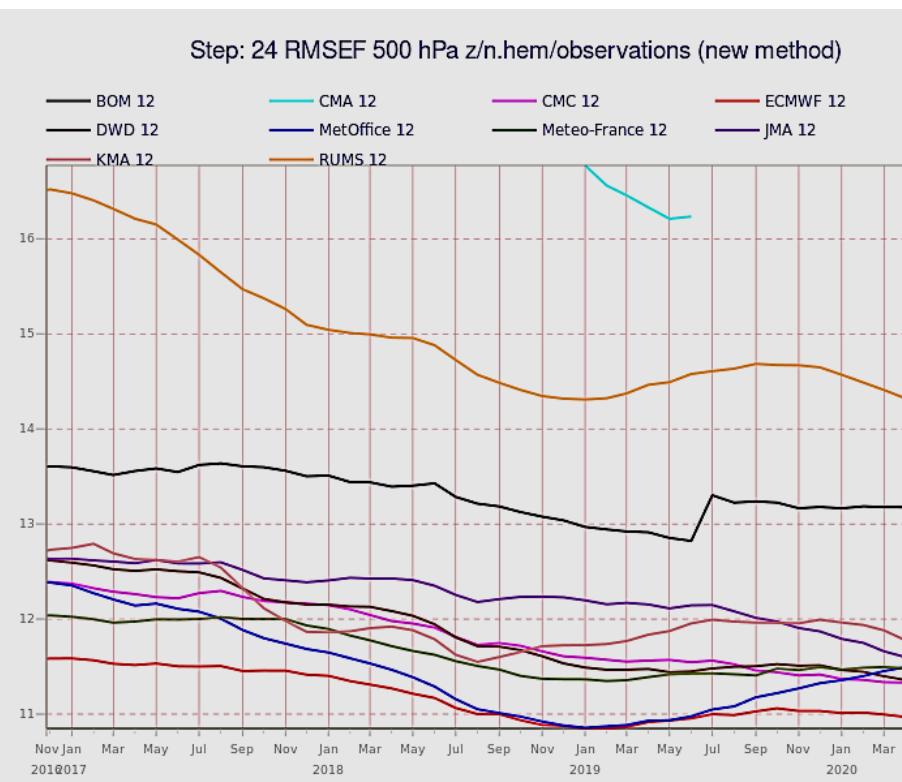


Недавние работы по развитию модели

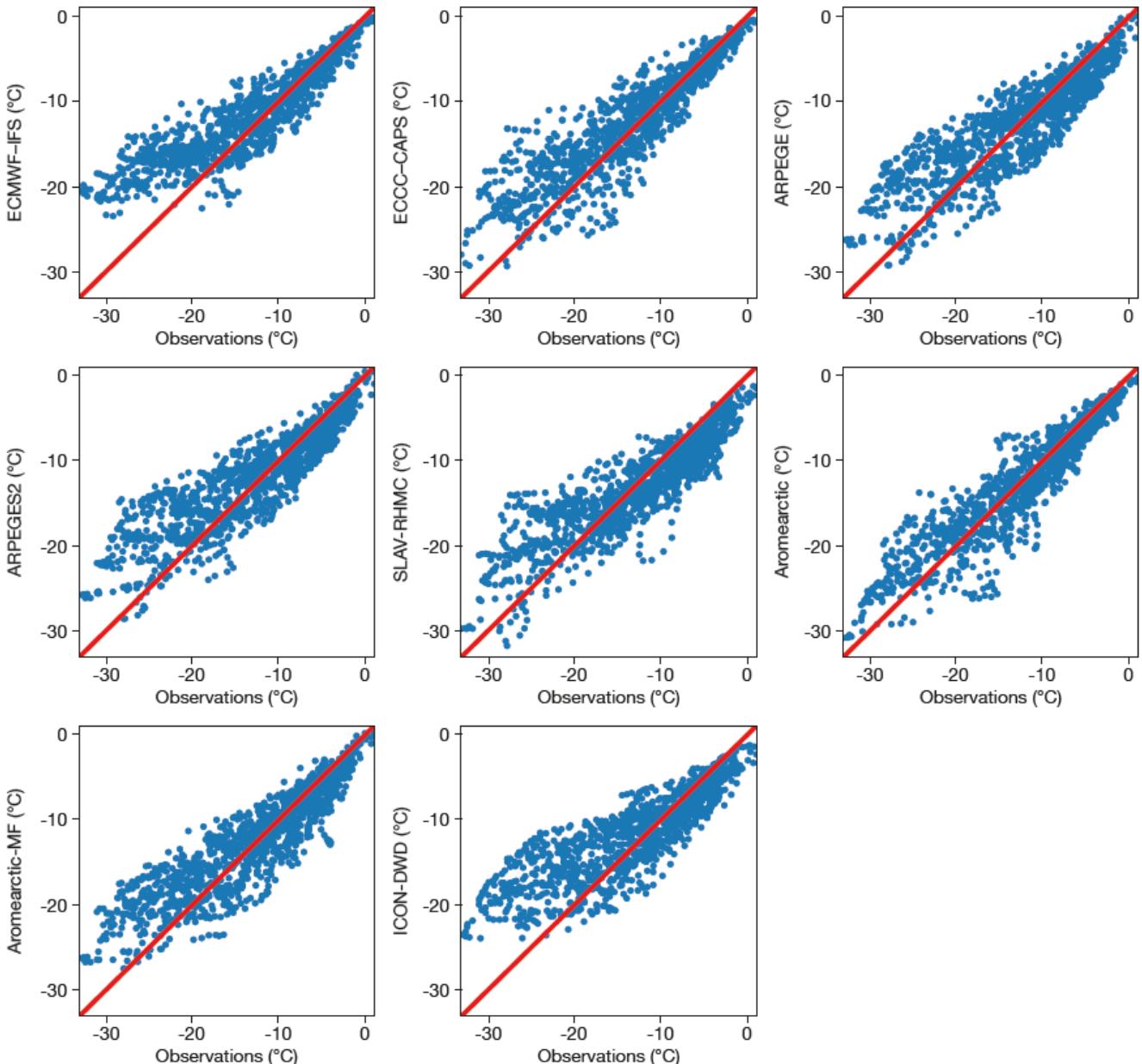
- Усовершенствованное подключение модели почвы ИВМ РАН – НИВЦ МГУ
- Усовершенствованное описание длины шероховатости
- Квазиоперативная реализация системы ансамблевого прогноза
- Работы по повышению масштабируемости будущей оперативной версии ПЛАВ10 при использовании ~4000 ядер



Изменение среднекв. ошибки прогноза на 24 часа для высоты поверхности 500 гПа (слева) и температуры 850 гПа (справа) на 72 часа в период 2017-2020 гг. в модели ПЛАВ (оранжевая линия) в модели ЕЦСПП (красная линия), модели метеослужбы Великобритании (синяя линия). Внетропическая часть Северного полушария. Скользящее среднее за 12 месяцев.



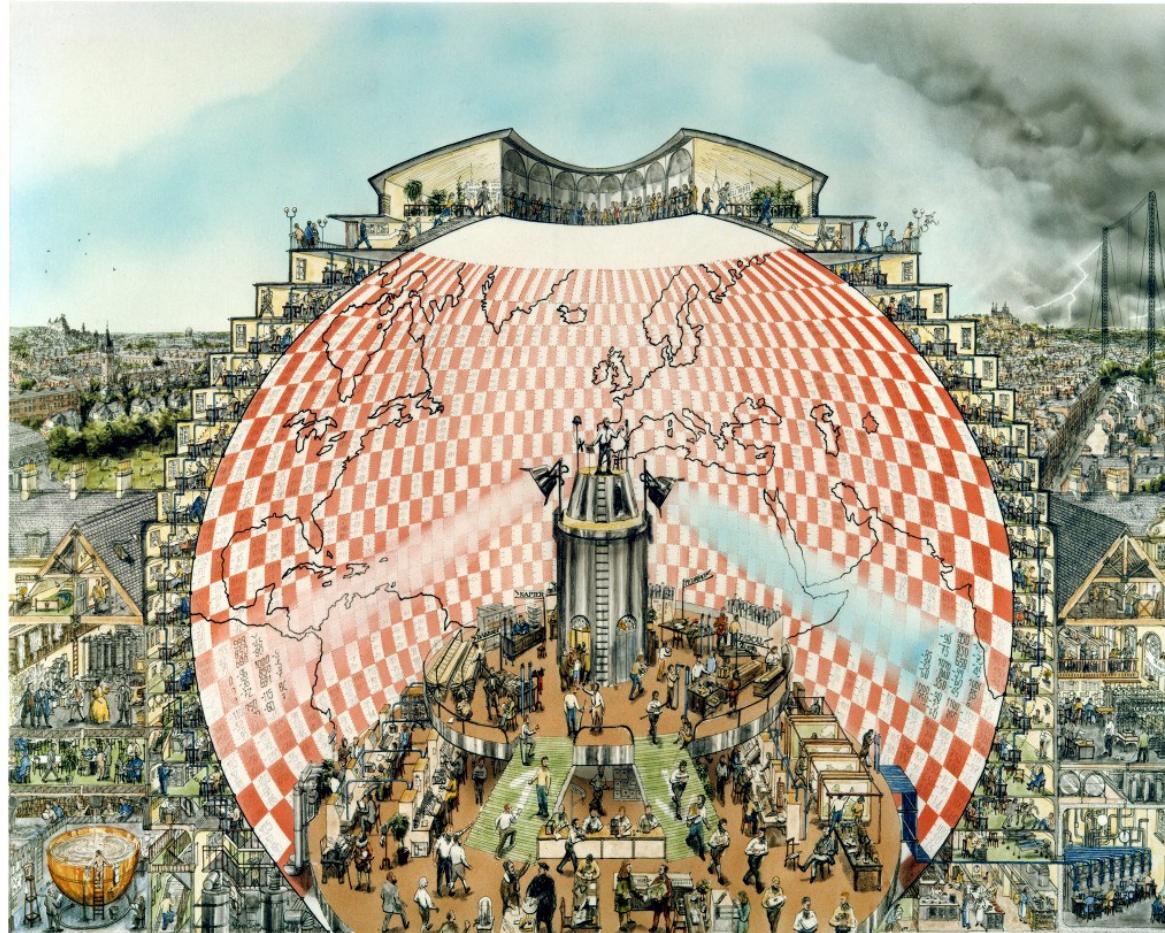
Диаграммы рассеяния, прогноз Т2м на 24ч на станции Соданкуюла (Финляндия) 02-03.2018 YOPPsiteMIP ECMWF Newsletter No. 165, nov.2020



<https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2020/19830-newsletter-no-165-autumn-2020.pdf>

Temperature forecasts and observations. Hourly near surface temperature forecasts for day 1 at Sodankylä, Finland, compared to observations from (top left to bottom right): ECMWF–Integrated Forecasting System (ECMWF-IFS), Environment and Climate Change Canada–Canadian Arctic Prediction System (ECCC-CAPS), Météo-France ARPEGE version without variable sea-ice surface temperature (ARPEGE), Météo-France with variable sea-ice surface temperature (ARPEGES2), Russian Federal Service For Hydrometeorology and Environmental Monitoring (SLAV-RHMC), Met Norway (Aromeartic), Météo-France (Aromeartic-MF) and the German national weather service (ICON-DWD).

A view on global numerical weather prediction models



"Weather Forecasting Factory" by Stephen Conlin, 1986.

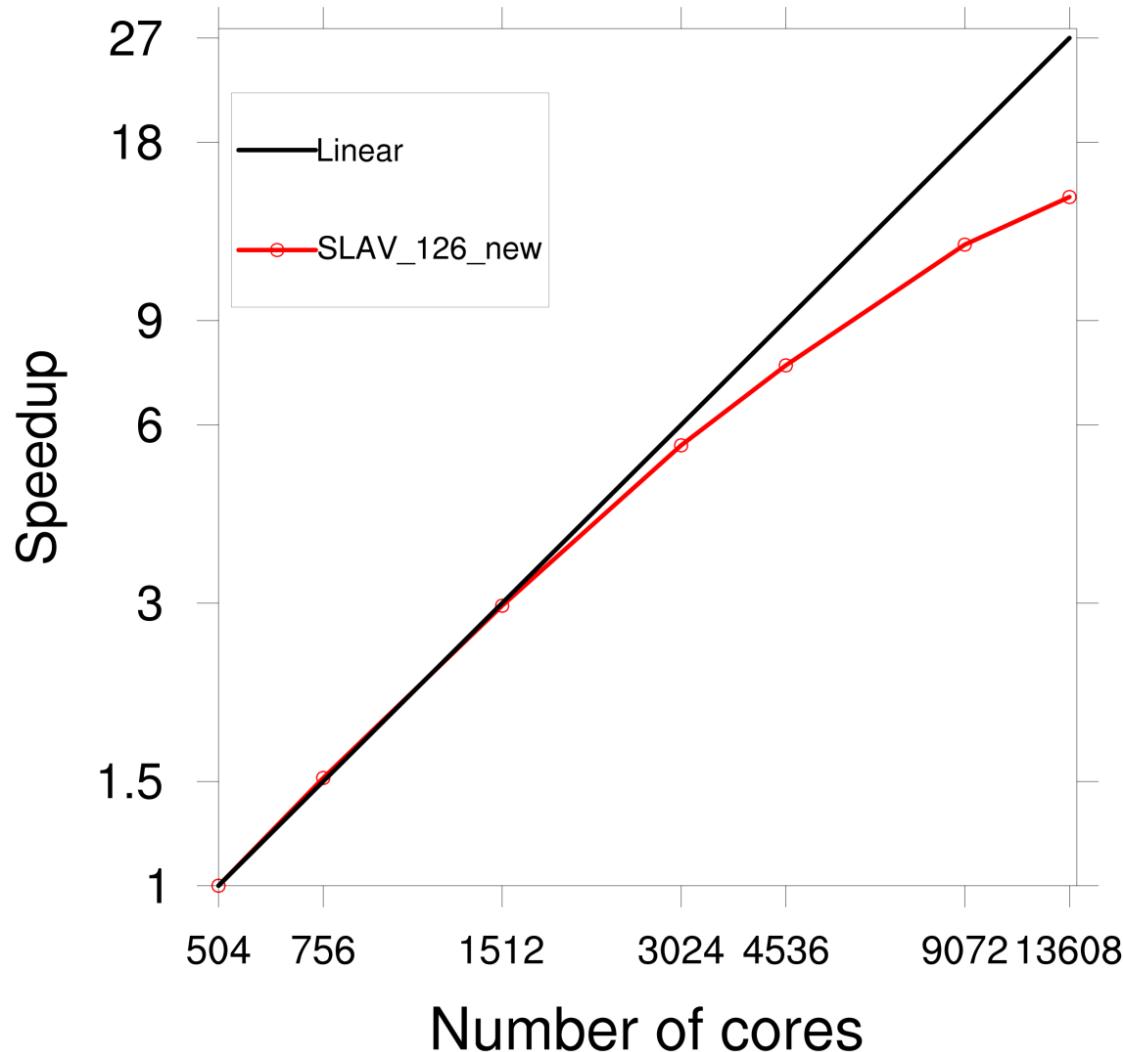
Based on the description in 'Weather Prediction by Numerical Process', by L.F. Richardson, 1922

Сильная масштабируемость ПЛАВ на Cray XC40 x86

Broadwell

3024x1513x126 grid, max. 6 OpenMP threads.

53% efficiency at 13608 cores, 64 % at 9072 cores



Мотивация работ по дальнейшей оптимизации

- Новая версия модели SLAV10 ~10км разрешение, 104 вертикальных уровня (сетка 3600x1946x104)
- Должна работать в оперативном режиме на ~4000 ядрах
- Должна рассчитывать прогноз на 24 часа за менее, чем 20 мин
- На конец года, 24-часовой прогноз рассчитывался 42 минуты
- Некоторые центры применяют вычисления с одинарной точностью (ECMWF, NCEP) Váňa, F., Düben, P., Lang, S., Palmer, T., Leutbecher, M., Salmond, D., Carver, G.: Single Precision in Weather Forecasting Models: An Evaluation with the IFS. Mon. Weather. Rev. **145**, 495–502 (2017).

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

Полулагранжева адвекция

- Большие шаги по времени (типично, 5-10 CFL)
- Большой шаблон обмена данными между процессорами.
- Некоторые обходные пути

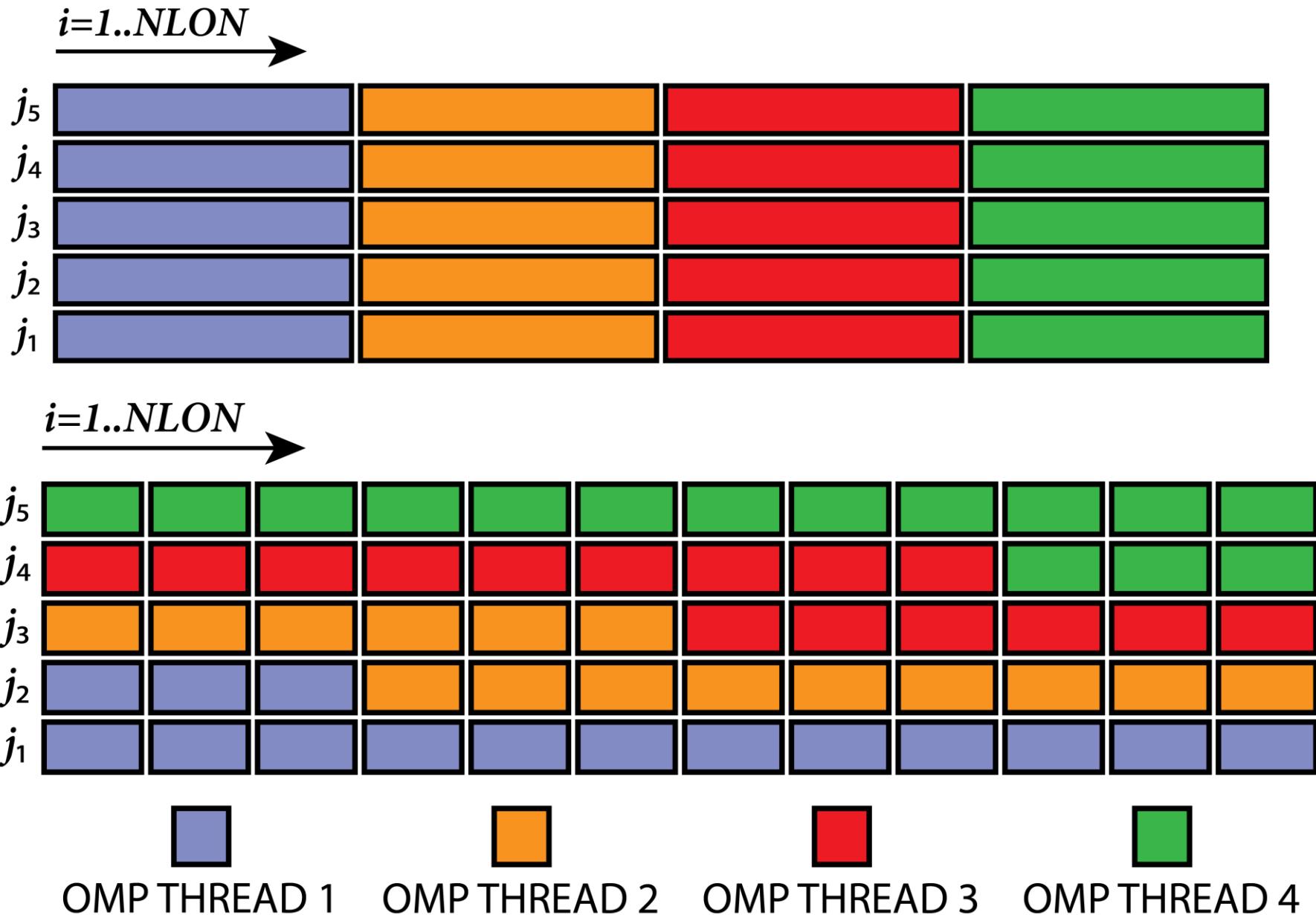
Применяемые подходы к оптимизации

- Одинарная точность в наиболее вычислительноемком блоке (полулаганжева адвекция)
- Оптимизация длины вектора в блоке расчета параметризаций подсеточного масштаба
- Уменьшение объема пересылаемых данных в транспозициях данных (переход на одинарную точность)

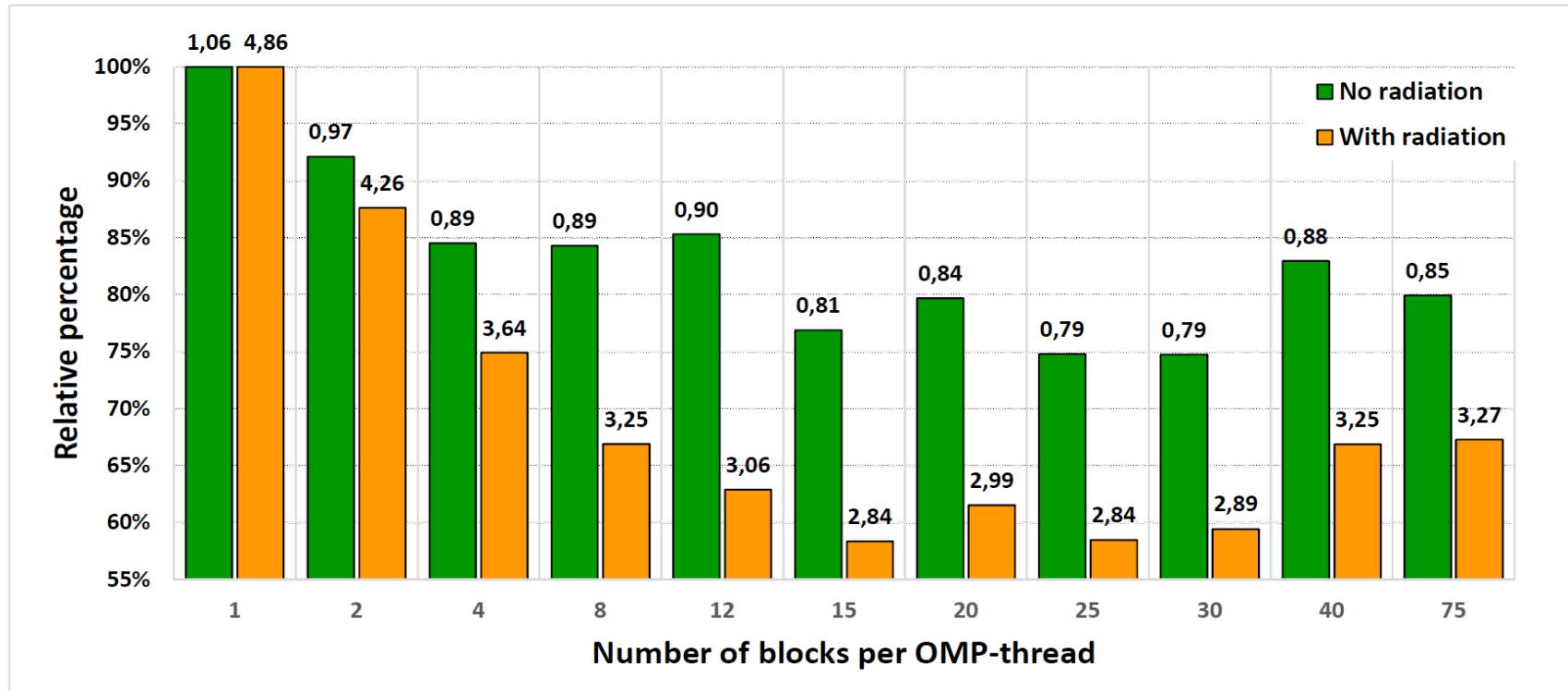
Оптимизация длины вектора при расчете правых частей (параметризаций)

- (i,k,j) index ordering in most part of RHS code where i – longitude, k – vertical index, j – latitude. Typical local arrays are dimensioned with (I_{max},K_{max})
- i is the variable of OpenMP parallelization (range 1:3600) – the vector length is 3600/N_{openmp}
- The code already uses thread-local arrays
- Splitting this dimension into smaller parts improves memory access

Оптимизация OpenMP

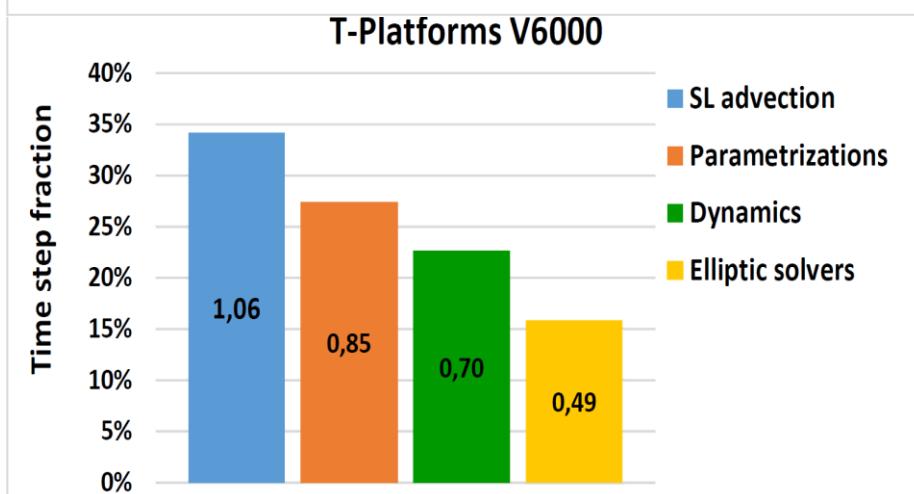
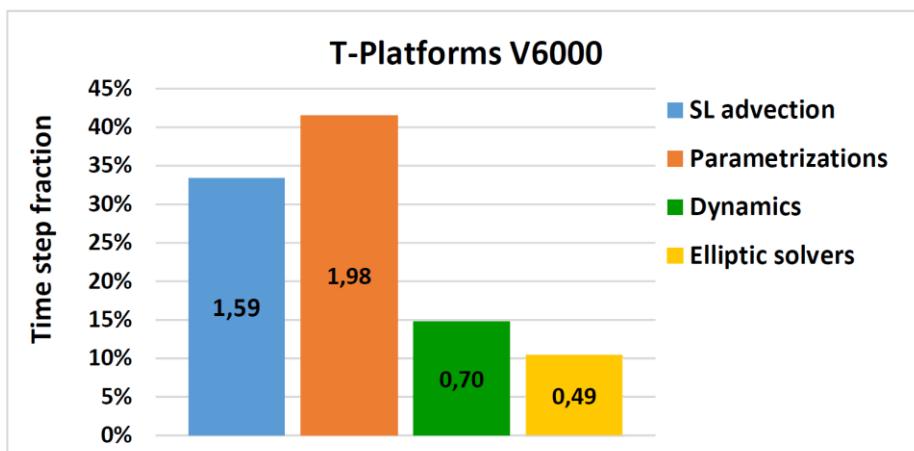
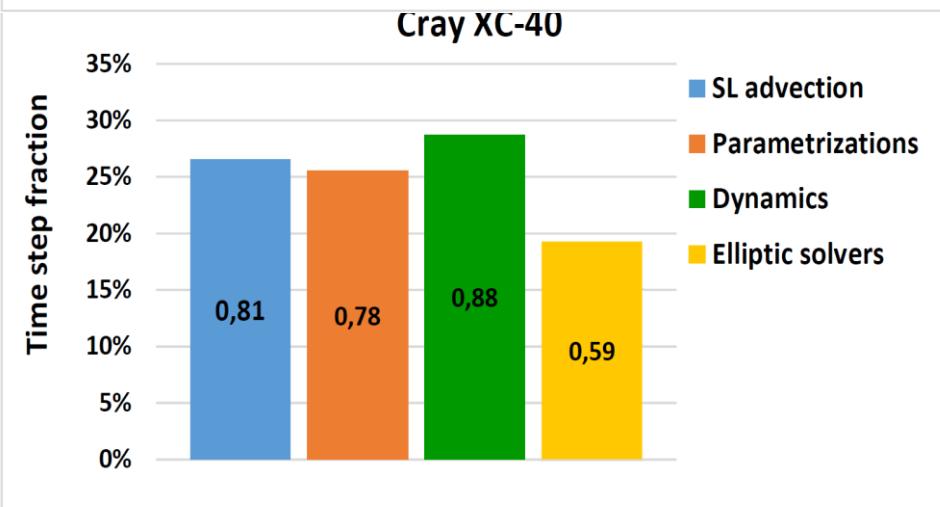
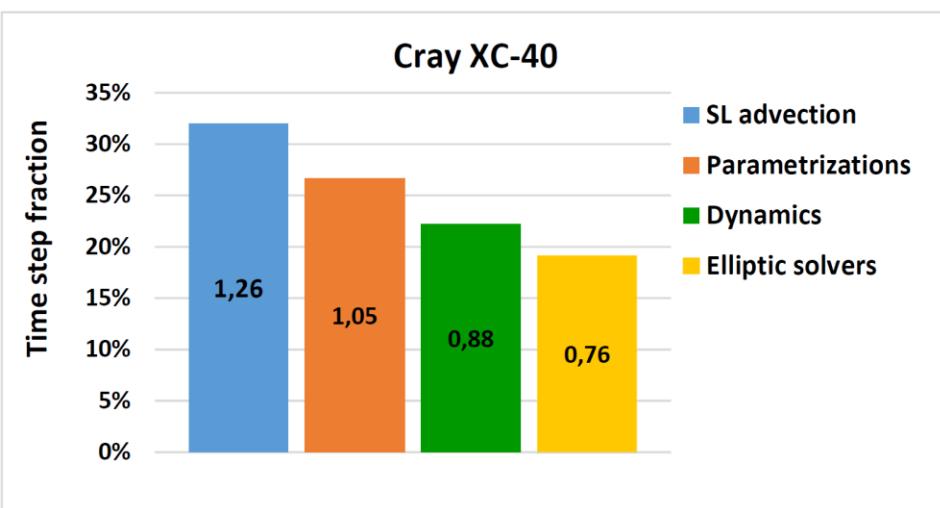


Результаты оптимизации длины вектора в вычислениях параметризаций процессов подсеточного масштаба



Cray XC40. The numbers above the bars show the wall-clock time in seconds.

Оптимизация будущей версии ПЛАВ10 на 3888 проц. ядрах Cray XC40 (слева) и 3880 проц. ядрах T-Platforms V6000 (справа); до (сверху) и после (внизу) оптимизаций. Выигрыш: 23 %
 Число в столбце означает время выполнения данной части кода (сек).



Спасибо за внимание!

1. Tolstykh, M., Shashkin, V., Fadeev, R., and Goyman, G.: Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core, Geosci. Model Dev., 10, 1961-1983, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1961-2017>, 2017.
2. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.С., Рогутов В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды. Метеорология и Гидрология, 2018, N 11, С. 90-99.
3. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты , Метеорология и Гидрология 2019 N 1
4. Шашкин В.В. ,Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы полулангранжевой моделью атмосферы ПЛАВ, Метеорология и Гидрология 2019 N 1
5. С.В. Травова (Махнорылова), М.А.Толстых, В.В.Шашкин. Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020 N 1