

Дальнейшее ускорение параллельной версии модели ПЛАВ

М.А. Толстых^{1,2}, Г.С. Гойман^{1,3,2}, Е.О. Бирючева^{1,2}, Р.Ю.Фадеев^{1,2,3}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН,

²Гидрометцентр России,

³Московский физико-технический институт



Тенденции развития численного прогноза погоды

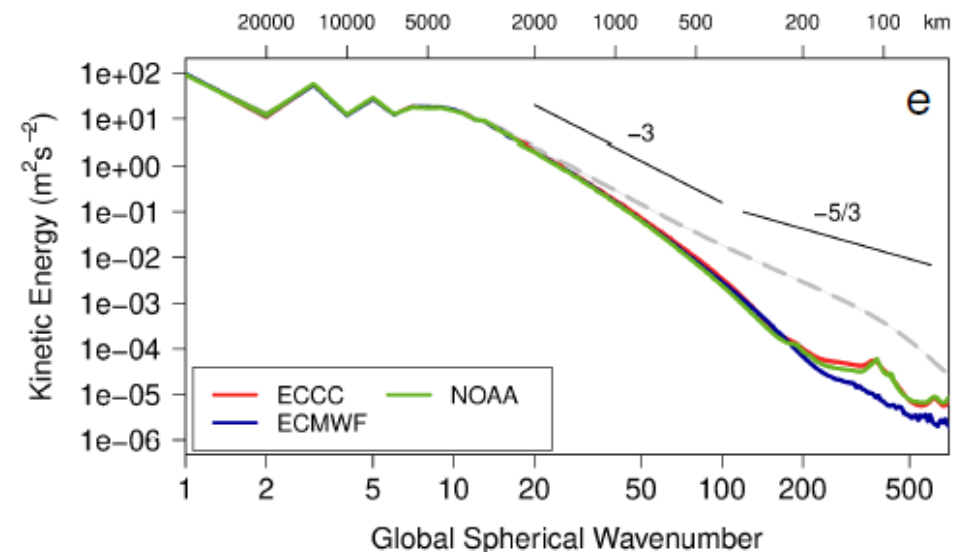
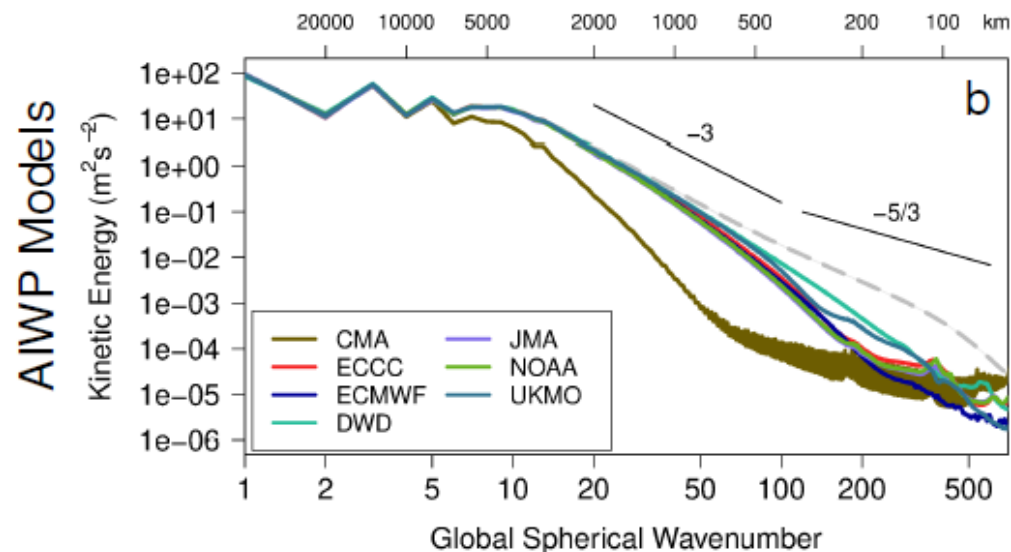
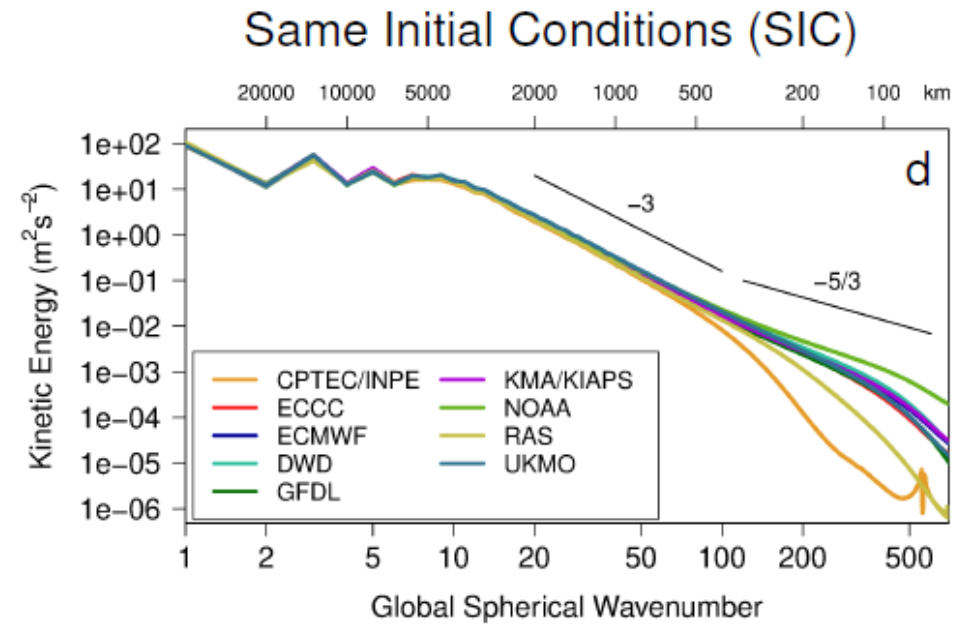
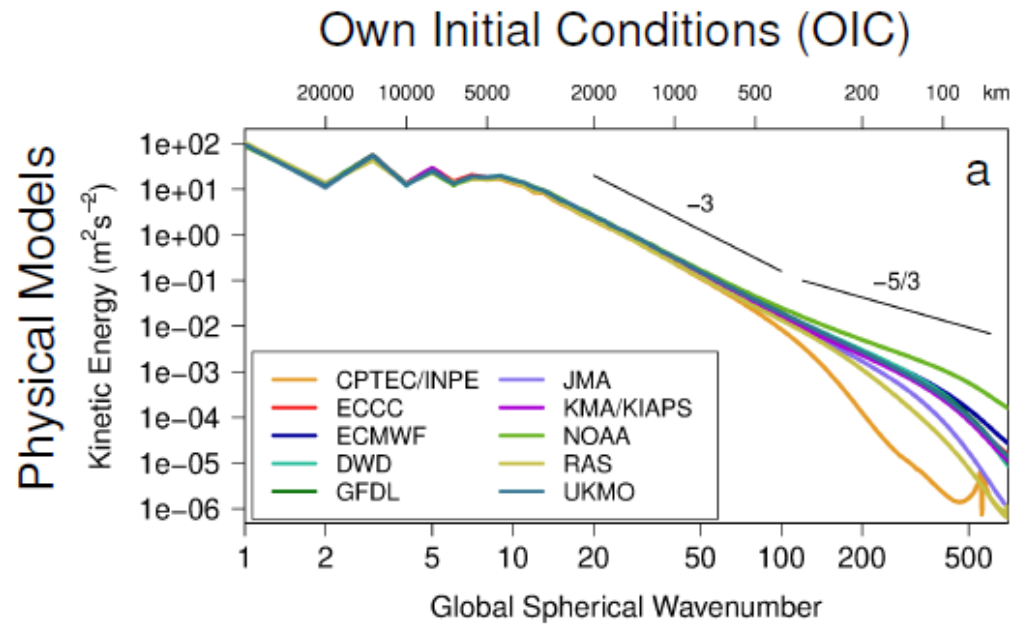
- Быстрое развитие ИИ моделей для среднесрочного и субсезонного прогноза погоды
- Развитие и успешное применение гибридных моделей
- Компьютеры все больше предоставляют основную мощность на GPU

С другой стороны

- Пока трудно обучить ИИ модель для сезонного прогноза и моделирования климата из-за ограниченной длины набора данных (обычно реанализ ERA5) – 47 лет с данными спутников
- ИИ модели пока имеют недостатки – плохой спектр кинетической энергии, приводящий к заглаживанию экстремальных явлений; несохранение массы и энергии
- Гибридные модели пока показывают лучшие результаты

Развитие «классических» моделей по-прежнему актуально, необходима адаптация к GPU. Желательно больше вычислений в одинарной точности

Spectral kinetic energy density at 250 hPa, 10-days forecast



SL-AV global atmosphere model

- Joint development of INM RAS and Hydrometcentre.
- One of ~11 original global operational NWP models
- Hydrometcentre is one of five designated WMO Global Producing centers for Sub-Seasonal Prediction



 WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

WMO Lead Centre for Sub-seasonal Prediction Multi-Model Ensemble

The Lead Centre for Sub-seasonal Predictions Multi-Model Ensemble (LC-SSPMME) coordinates multi-model ensembles of sub-seasonal forecasts by maintaining an archive containing a set of model fields, by creating graphical products from individual and multi-model ensembles under an agreed format and by creating verification statistics. To provide WMO Members with reliable multi-model ensembles in real time, the LC-SSPMME uses forecast data from several sub-seasonal prediction systems. Forecast data is provided by WMO Global Producing Centres for Sub-seasonal Predictions and by Contributing Centres.

[FORECAST CHARTS](#)[VERIFICATION STATISTICS](#)

Further information on forecast products and forecast digital data is [here](#).

Global producing centre for Sub-Seasonal Predictions (GPC-SSP)


Beijing


Brazil


ECMWF

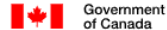

Moscow


Tokyo

The GPC-SSP are committed to fulfilling a set of mandatory functions aiming to enhance consistency and usability of forecast information and to facilitate the exchange of data. The timely provision of forecast data to the LC-SSPMME is one of the mandatory functions ([WIPPS](#)).

Contributing centres


Exeter


Montreal


Seoul


Toulouse


Washington

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ

(ПолуЛагранжева, на основе уравнения
Абсолютной Завихренности)



- **Конечно-разностный полунявный полулагранжев блок решения уравнений динамики атмосферы:** несмещенная сетка (Z grid), конечные разности 4го порядка (Tolstykh, Shashkin, Fadeev, Goyman, Geosci. Mod Devel. 2017).
- **Параметризации процессов подсеточного масштаба ALADIN/ALARO,**
- **Блоки расчета коротко- и длинноволновой радиации CLIRAD SW + RRTMG LW,**
- **Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН –НИВЦ МГУ, параметризация неорографического ГВС: из модели климата ИВМ РАН, доработаны**
- **Параметризации и усовершенствования собственной разработки**
- **Пока простая модель эволюции ТПО**

SL-AV applications at Hydrometcentre of Russia



Medium-range deterministic forecast
0.1° in longitude , 0.08-0.13° in latitude,
104 levels (SLAV10)

Medium-range ensemble prediction system
0.225° in longitude, 0.16°-0.24° in latitude , 51 levels (104 levels
in progress)

**Subseasonal and seasonal ensemble
forecast**
0.9°x0.72°L96

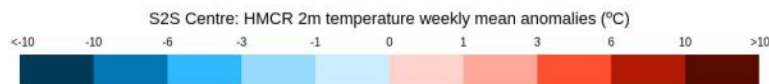
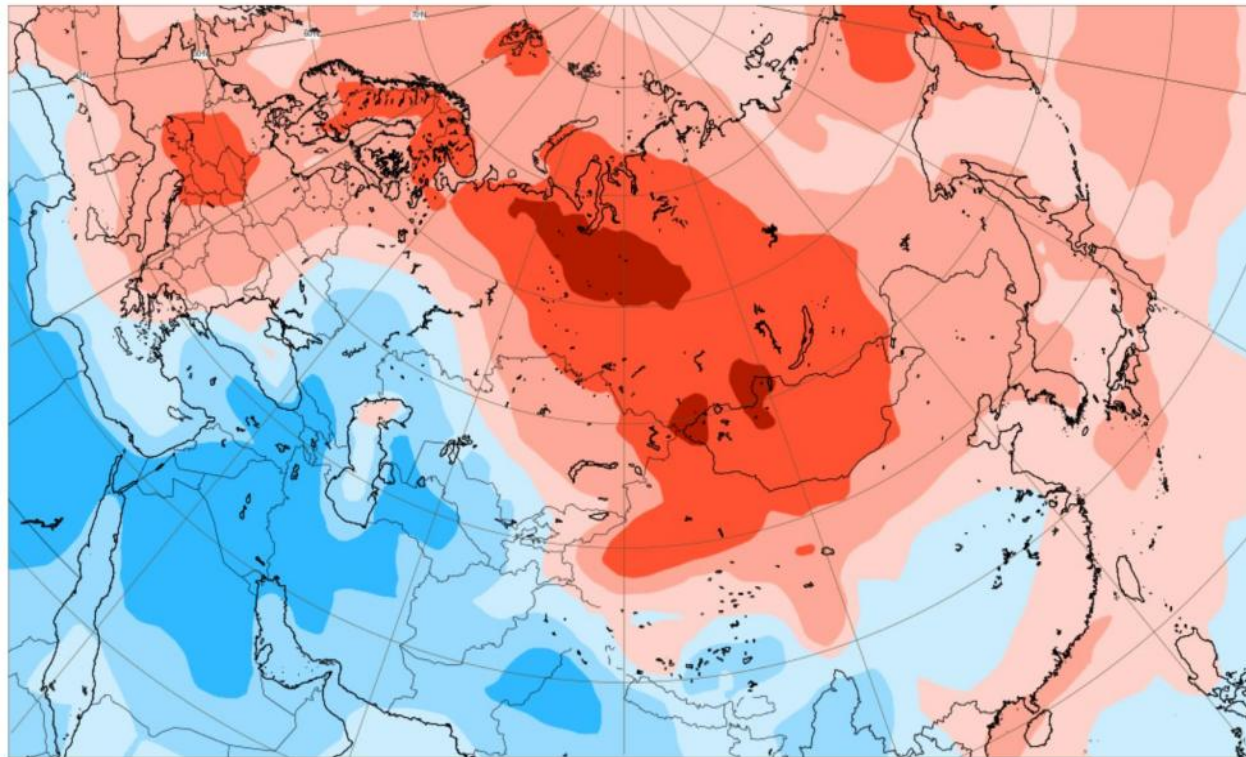
Subseasonal forecast

- The impact of atmospheric initial conditions is less important than for medium range forecast
- Many practical applications for 2-3 weeks forecasts (power generation, agriculture, etc)
- Usually presented as weekly anomalies and probabilities
- WMO S2S project (2014-2023)

Прогноз аномалий приземной температуры на неделю 6-13.04.2026 г от 26.03 (<https://charts.ecmwf.int/wmo/charts>)

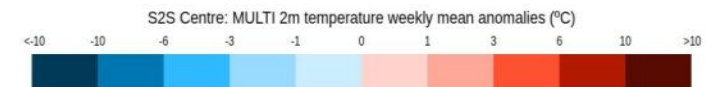
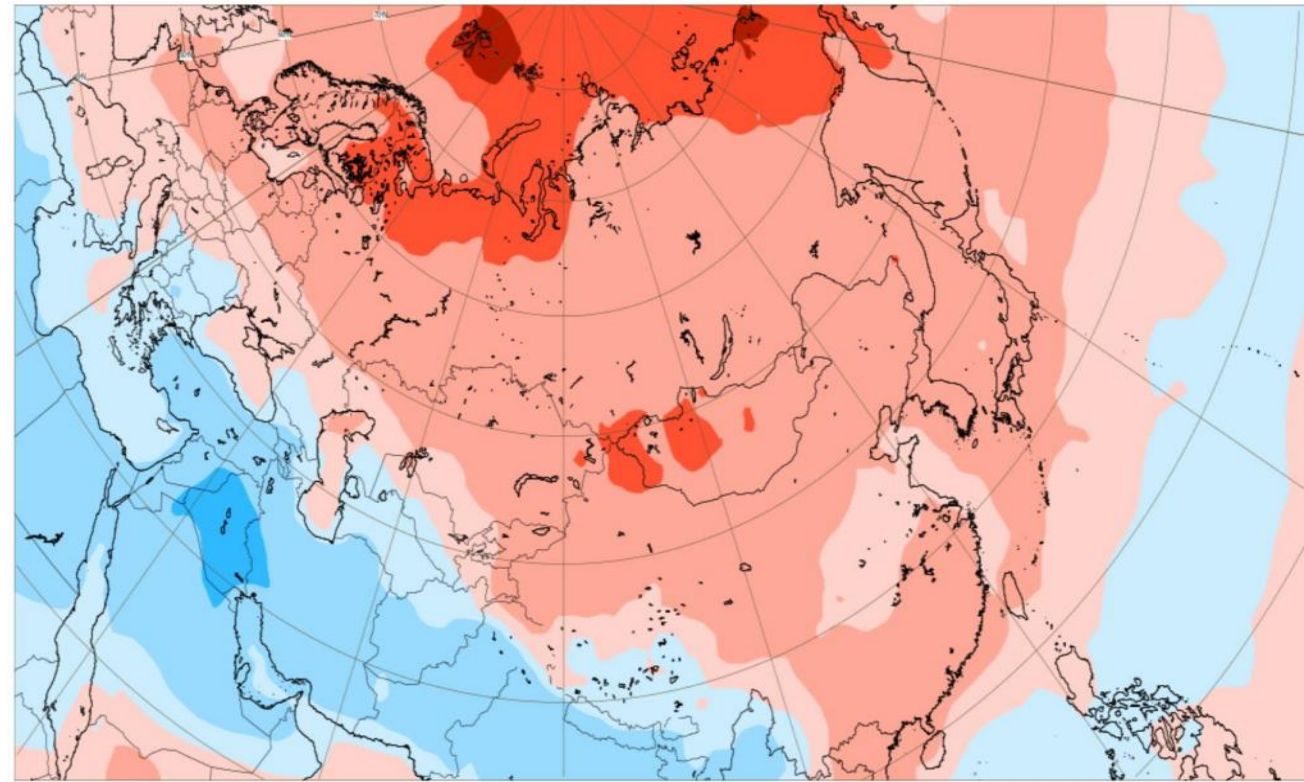
Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 26 Mar 2026 Valid time: Mon 06 Apr 2026 - Mon 13 Apr 2026 (+432h) Area : Eurasia



Customized Multi-Model: 2m temperature weekly mean anomalies

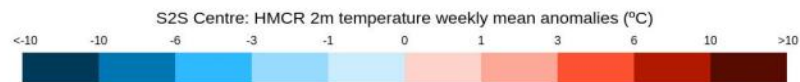
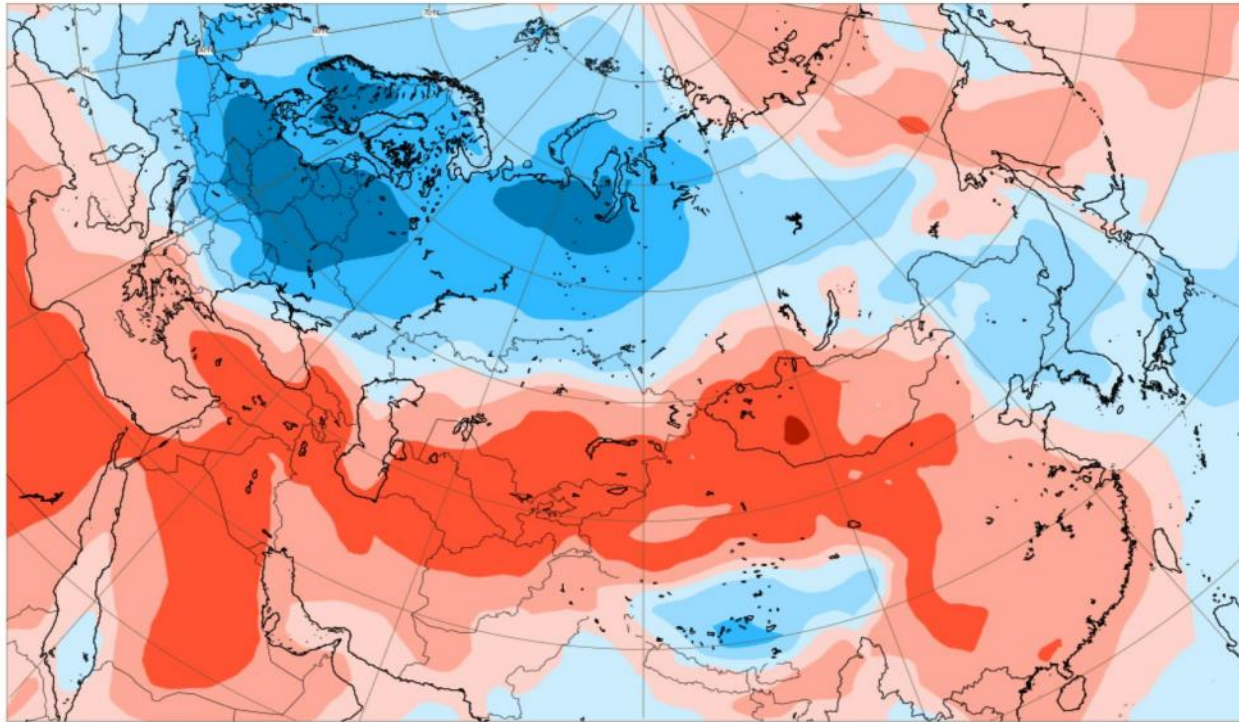
Base time: Thu 26 Mar 2026 Valid time: Mon 06 Apr 2026 - Mon 13 Apr 2026 (+432h) Models combination : cptec, eccc, ecmwf, hmcr, jma, kma, ncep, ukmo Area : Eurasia



Прогноз аномалий приземной температуры на неделю 9-16.02.2026 г от 29.01.2026

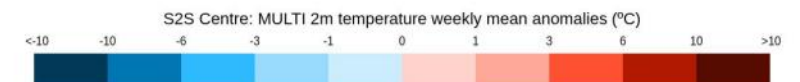
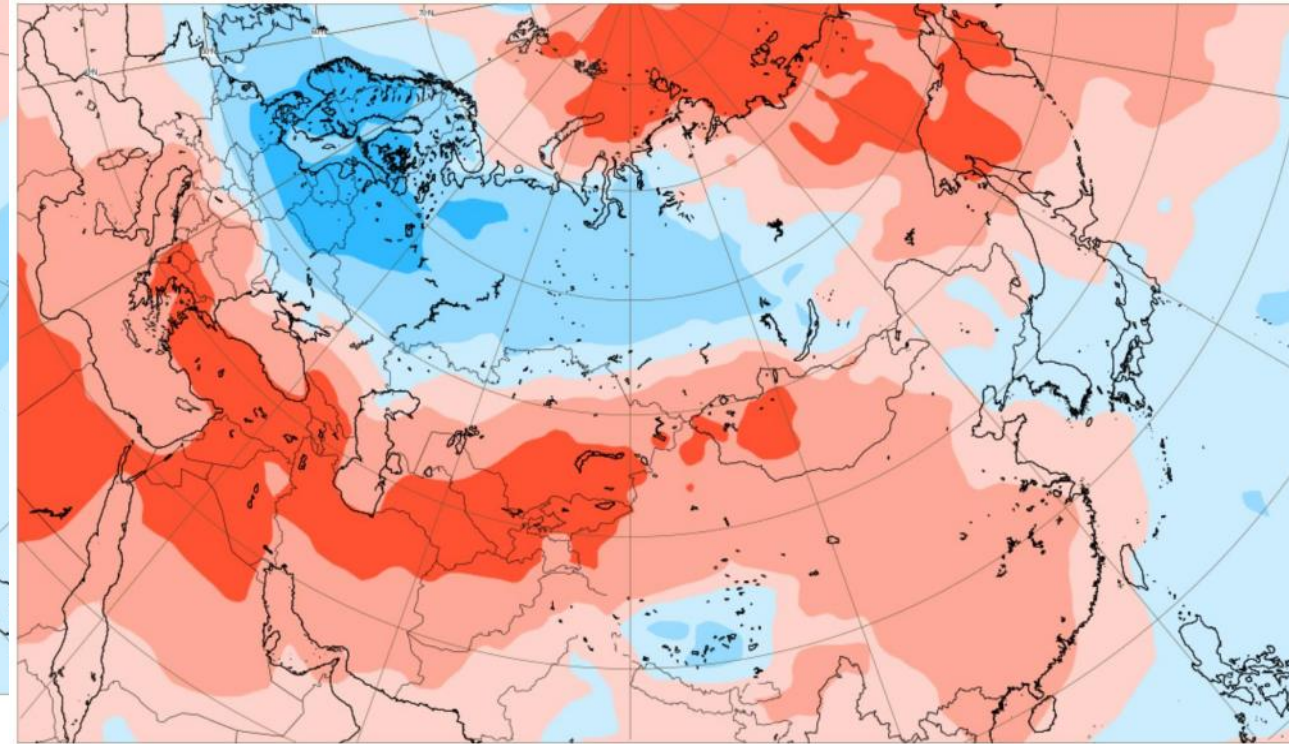
Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 29 Jan 2026 Valid time: Mon 09 Feb 2026 - Mon 16 Feb 2026 (+432h) Area : Eurasia



Customized Multi-Model: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 29 Jan 2026 Valid time: Mon 09 Feb 2026 - Mon 16 Feb 2026 (+432h) Models combination : cptec, eccc, ecmwf, hmc, jma, kma, ncep, ukmo A Eurasia

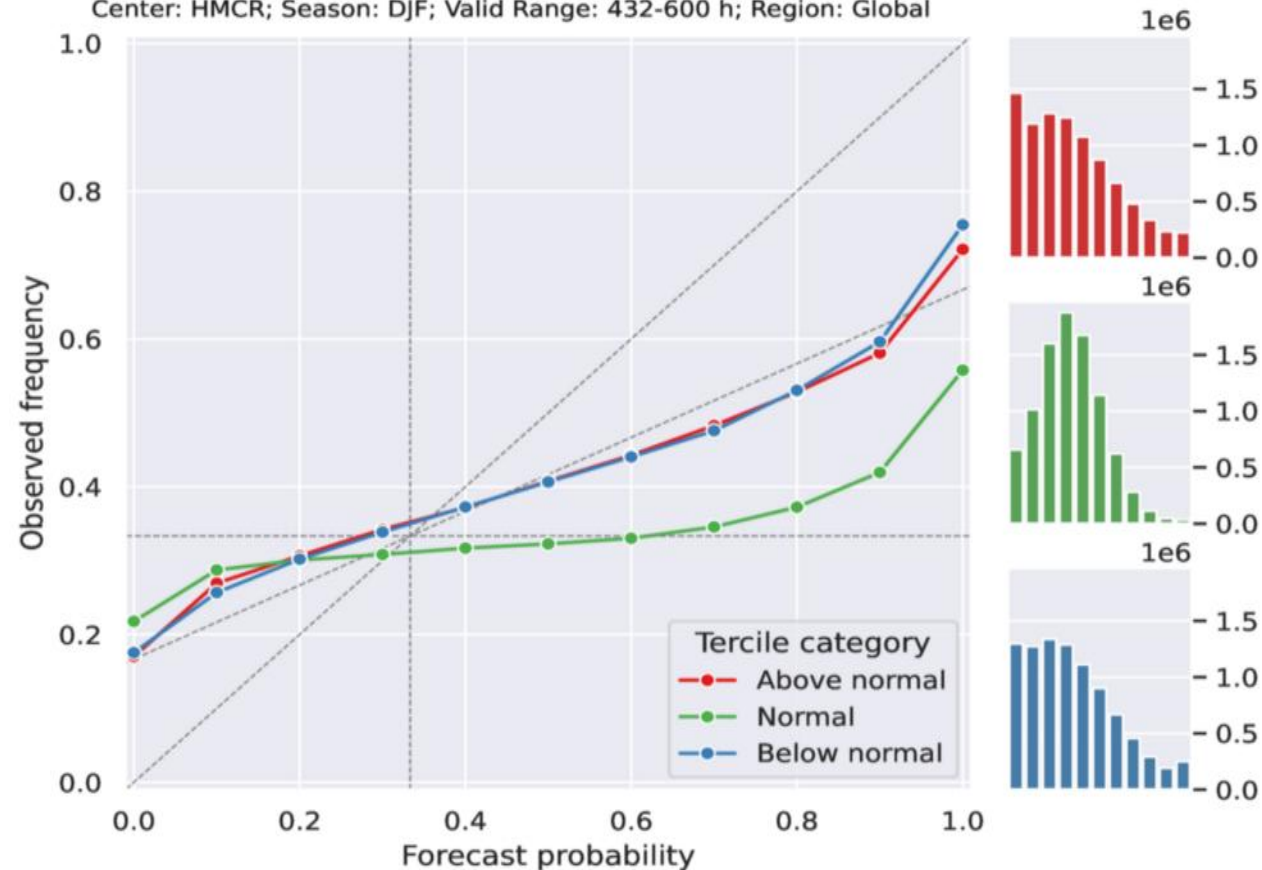


Надежность прогноза терцилей приземной температуры в модели ПЛАВ (слева) и в модели МетОфиса (справа)

Moscow - Reliability of tercile category forecasts

Reliability Diagram for 2-metre temperature

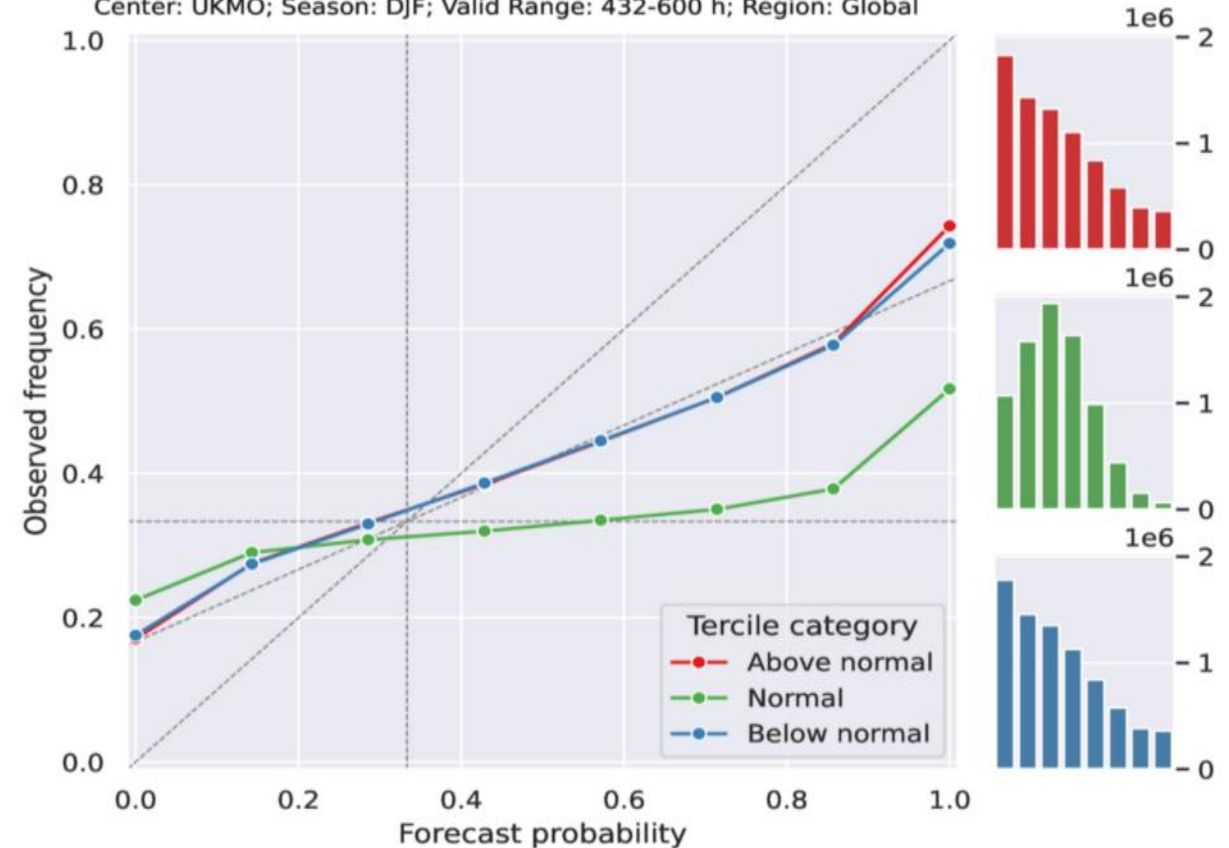
Center: HMCR; Season: DJF; Valid Range: 432-600 h; Region: Global



Exeter - Reliability of tercile category forecasts

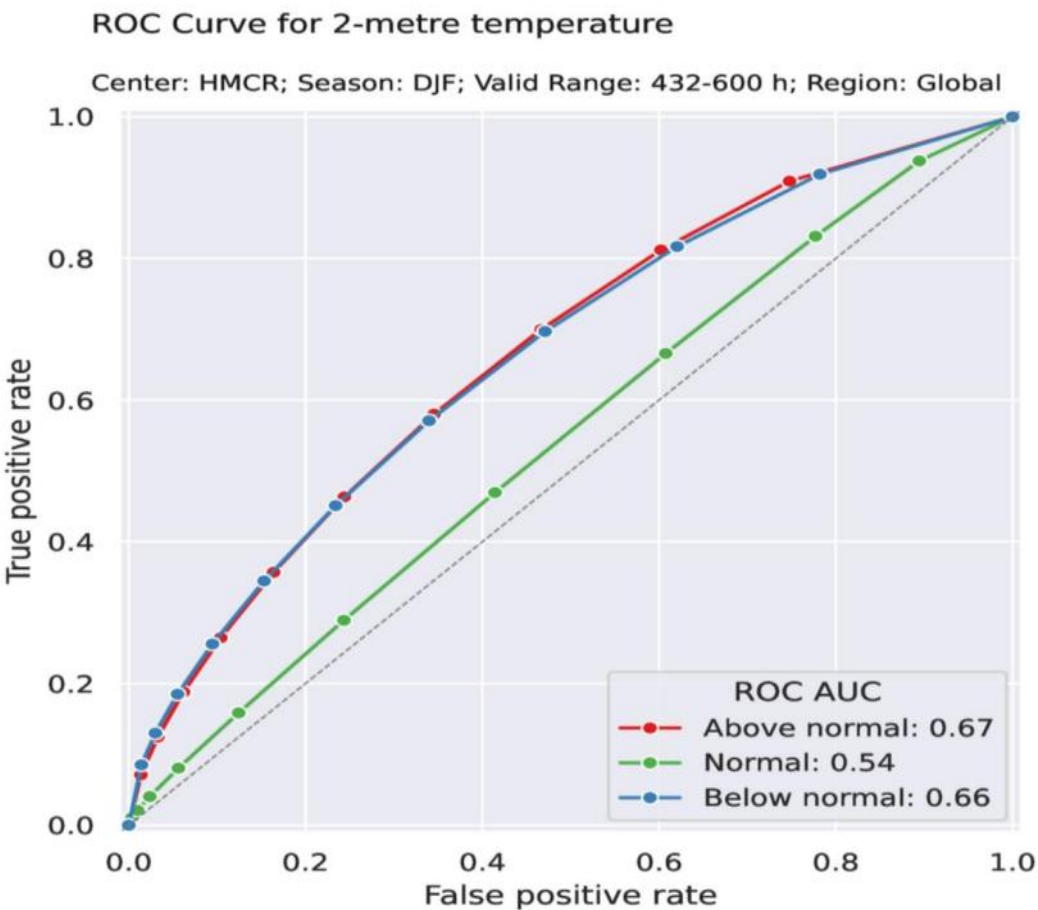
Reliability Diagram for 2-metre temperature

Center: UKMO; Season: DJF; Valid Range: 432-600 h; Region: Global

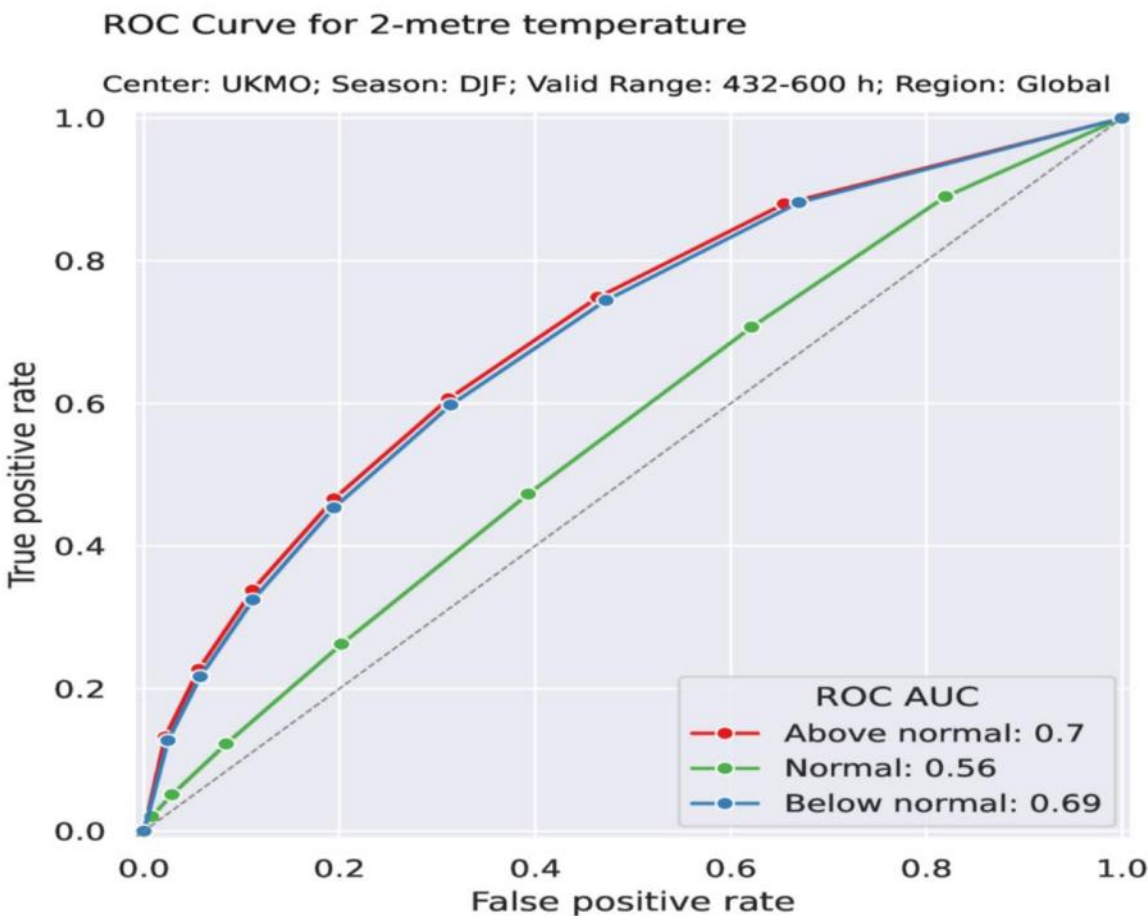


ROC кривые прогноза приземной температуры в модели ПЛАВ (слева) и в модели МетОфиса (справа)

Moscow - Discrimination of tercile category forecasts

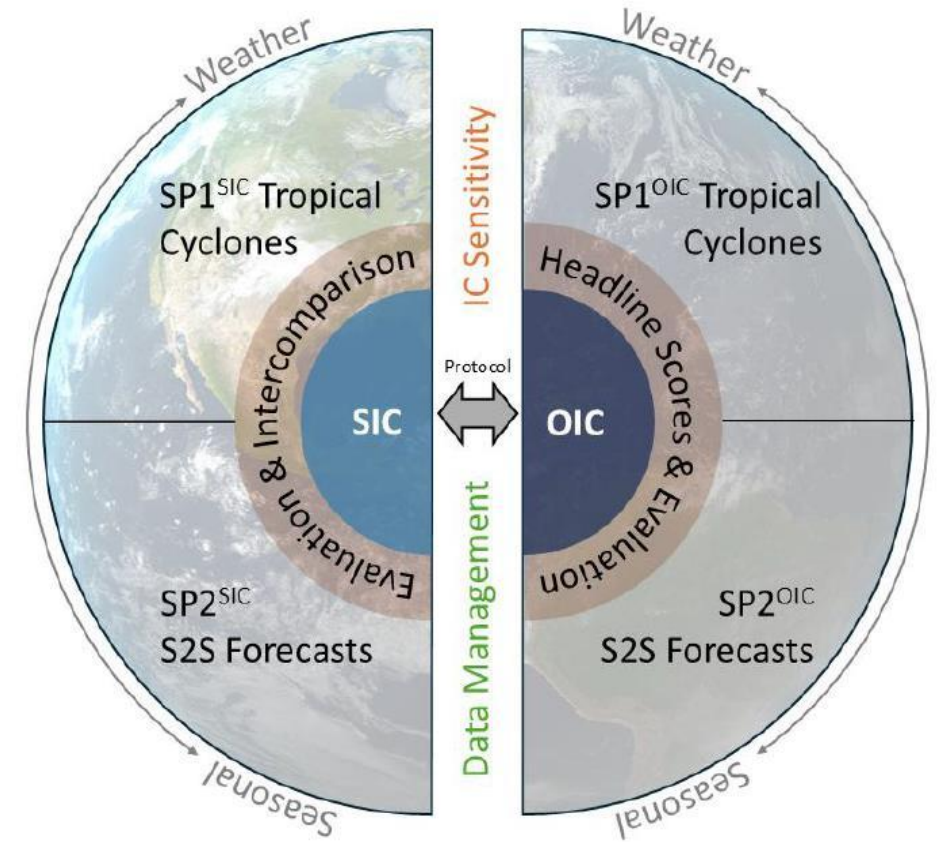


Exeter - Discrimination of tercile category forecasts



Weather prediction model intercomparison project (WP-MIP)

- Physical, AI and hybrid medium-range forecast models
- 122 10-day forecasts for 2024 initial data (every 3d day)
- - own initial conditions (OIC)
- - same initial conditions of ECMWF (SIC)
- Additionally: everyday 10-day forecasts for tropical cyclones fcst evaluation (SP1) ; weekly 2-4 weeks forecasts (SP2)



<https://www.wcrp-esmo.org/activities/wp-mip>

Modeling groups participating in WP-MIP

Center Acronym	Center Name	Country/Region
CPTEC/INPE	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos / National Institute for Space Research	Federative Republic of Brazil
CMA	China Meteorological Administration	People's Republic of China
ECCC	Environment and Climate Change Canada	Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	Europe
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	United States of America
DWD	Deutscher Wetterdienst	Federal Republic of Germany
JMA	Japan Meteorological Agency	Japan
KMA/KIAPS	Korean Meteorological Agency / Korean Institute of Atmospheric Prediction Systems	Republic of Korea
UKMO	Met Office	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration	United States of America
RAS	Russian Academy of Sciences	Russian Federation

WP-MIP paper

- McTaggart-Cowan, R., Magnusson, L., Polichtchouk, I., Ackerley, D., Köhler, M., Casati, B., Chen, J., Hudson, D., Ujiie, M., Aziz, N., Bonavita, M., Bouallègue, Z., de Burgh-Day, C., Chamberland, S., Cho, K., Coelho, C., Fadeev, R., Fuentes, M., Garcia-Franco, J., Gibert, C., Guimarães, B., Harris, C., Harrold, M., Husain, S., James, M., Kaltenbaugh, A., Koch, M., Kubota, P., Lee, E., Li, C., Li, W., Li, W., Lledó, L., Loveday, N., Lussana, C., Maalick, Z., Mateyisi, M., McGovern, A., van der Merwe, K., Miller, J., Mittermaier, M., Mladek, R., Newman, K., Neves, A., Pill, J., Potthast, R., Pradhan, M., Rath, S., Richardson, D., Separovic, L., Reboita, M., Skok, G., Srivastava, A., Tolstykh, M., Wang, Z., Woodhams, B., Yang, F., Zaripov, R., Zhang, G. and Zhu, H. (2026).

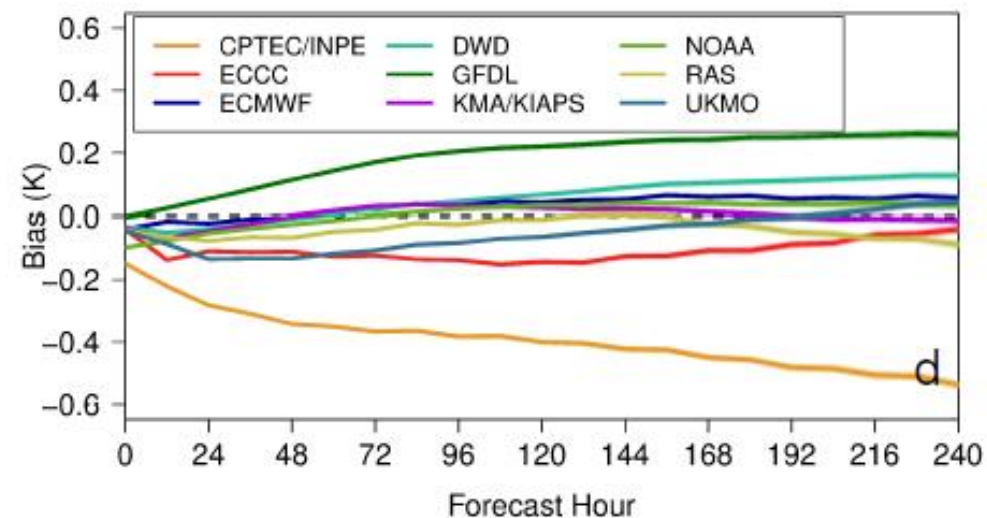
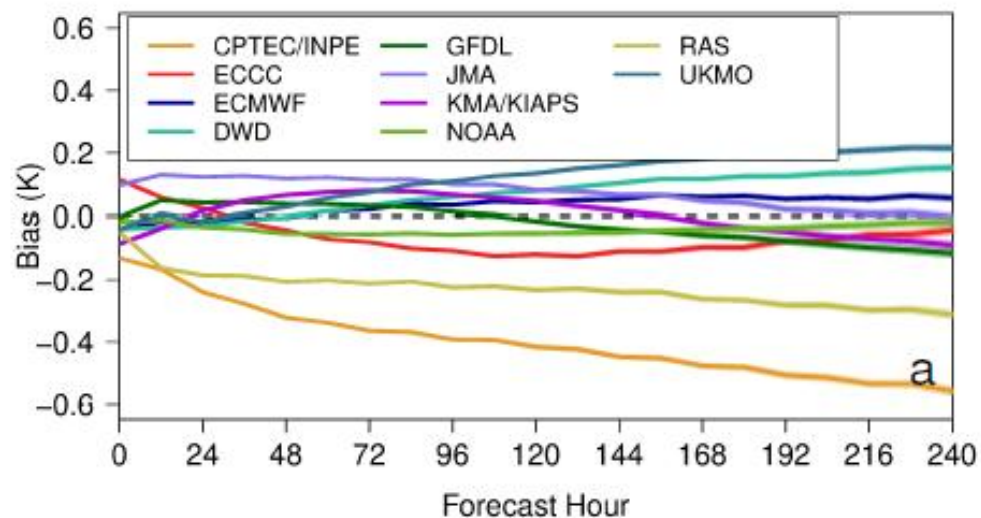
WP-MIP: An Artificial Intelligence, Hybrid, and Physically Based Model Intercomparison Project for Weather Prediction. To be published in Bulletin of the American Meteorological Society . Available at:
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/aop/BAMS-D-26-0012.1/BAMS-D-26-0012.1.xml> .

Mean T500 error

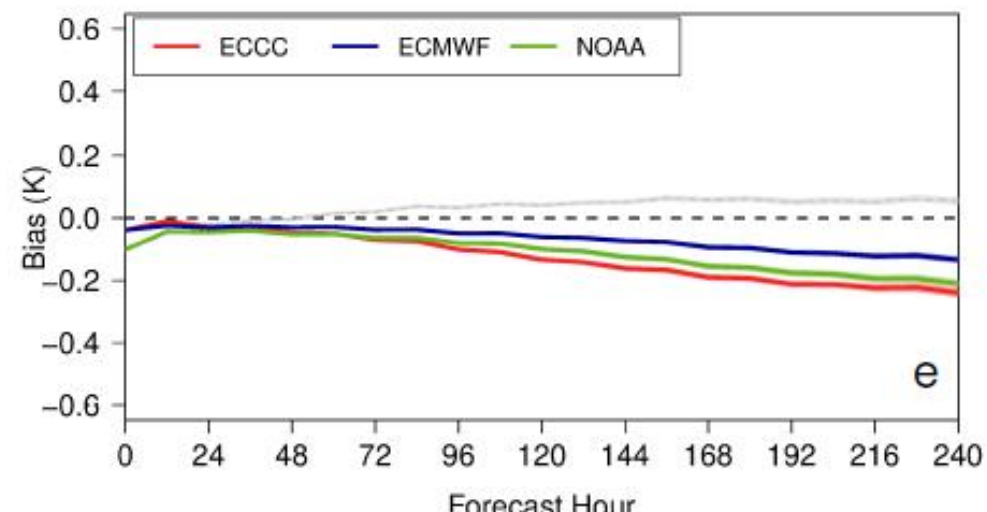
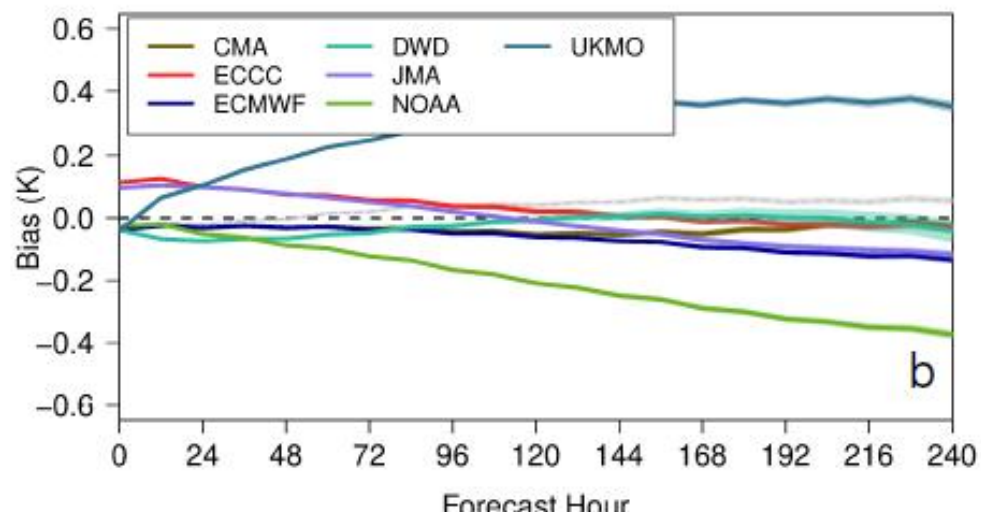
Own Initial Conditions (OIC)

Same Initial Conditions (SIC)

Physical Models



AIWP Models

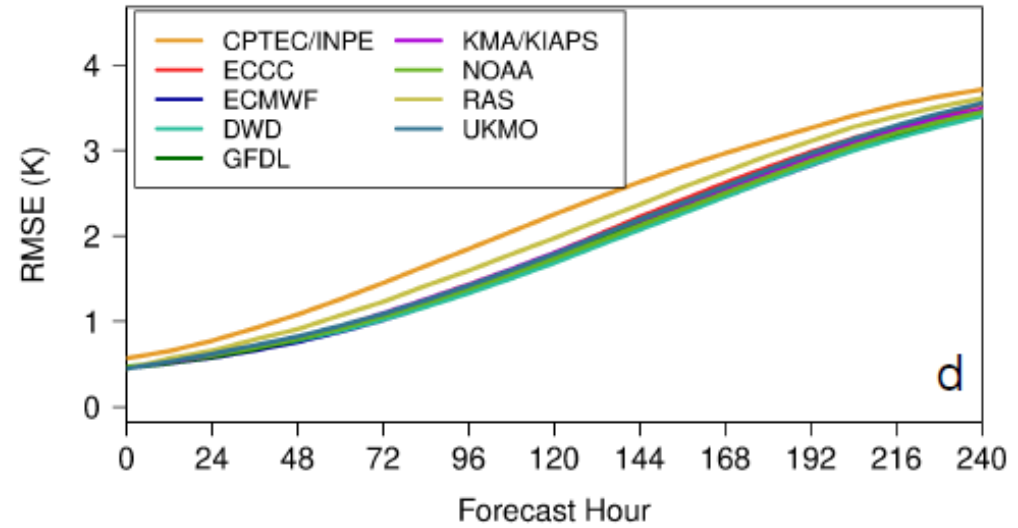
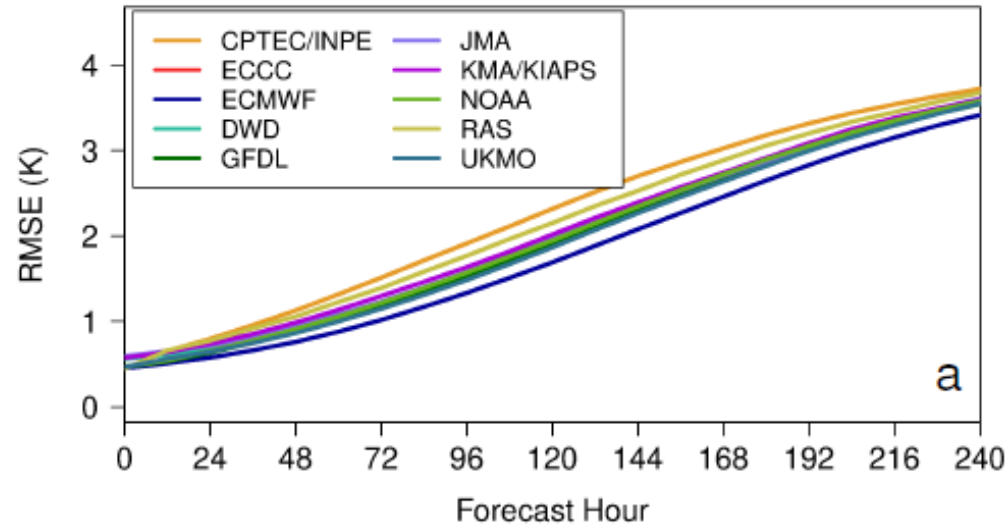


RMS error for 500 hPa temperature

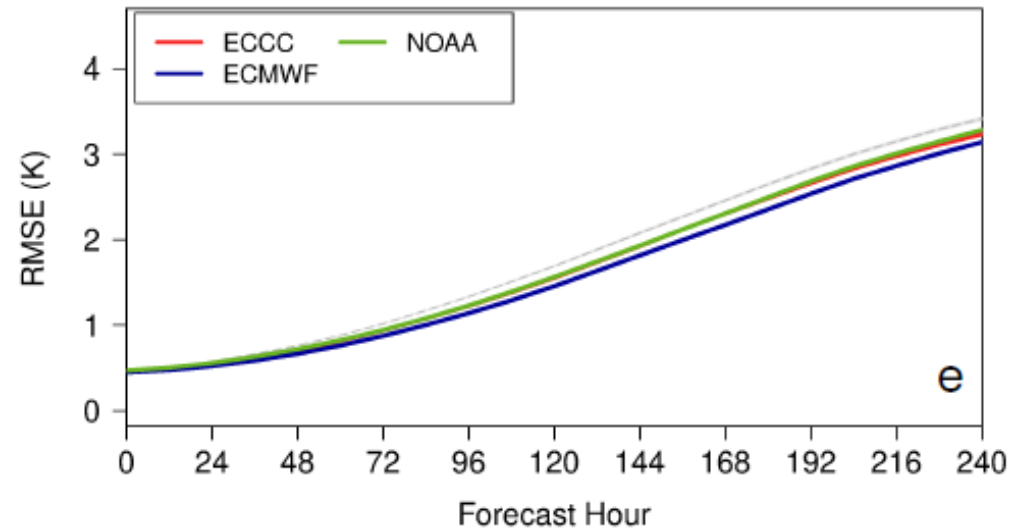
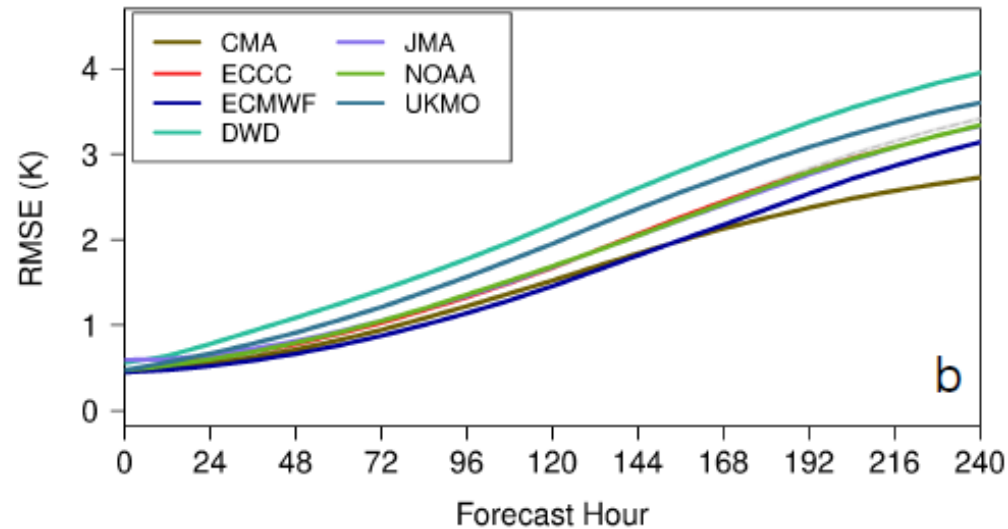
Own Initial Conditions (OIC)

Same Initial Conditions (SIC)

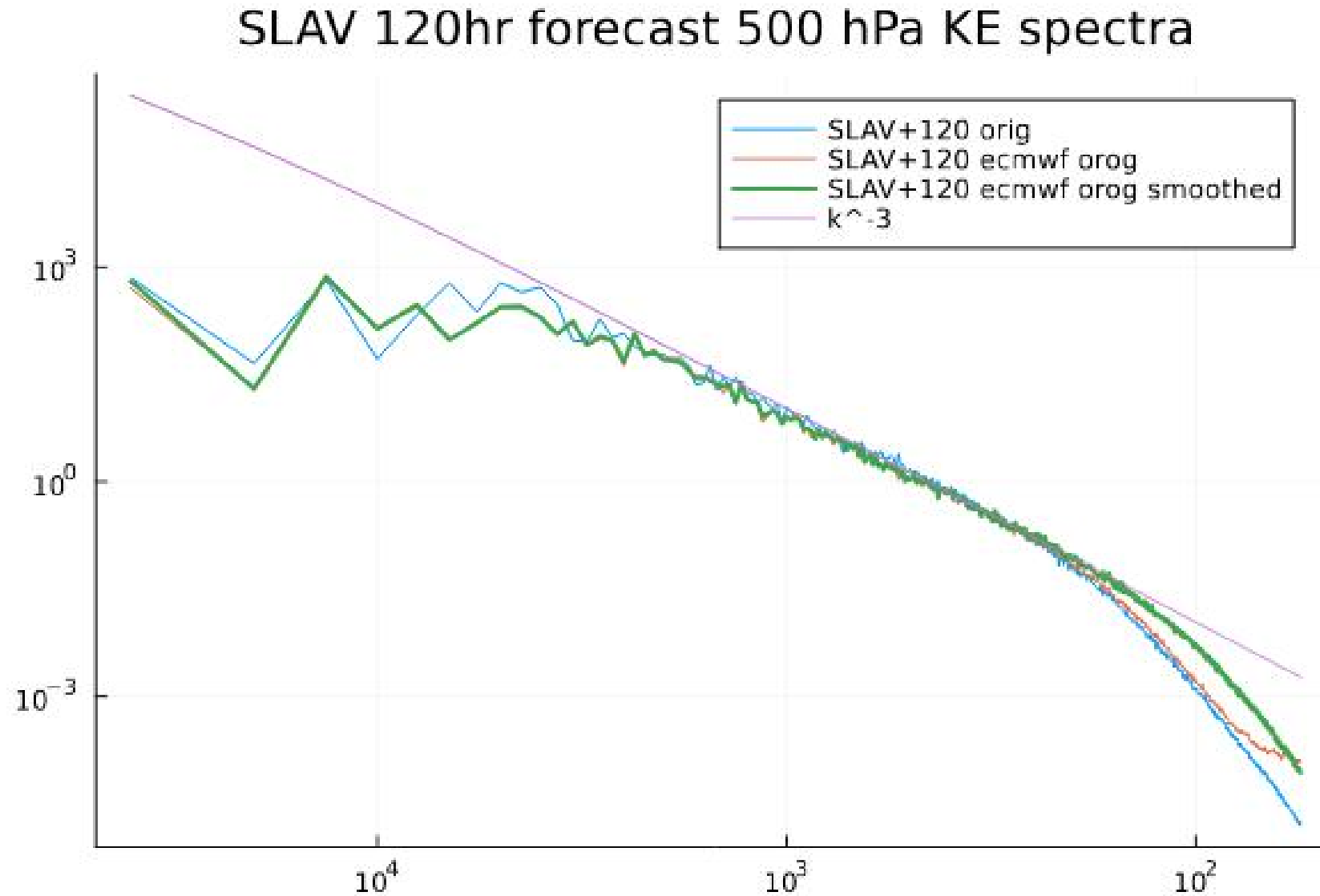
Physical Models



AIWP Models



SL-AV10 kinetic energy density with different orographies and horizontal diffusion setup



Recent and ongoing works on SL-AV

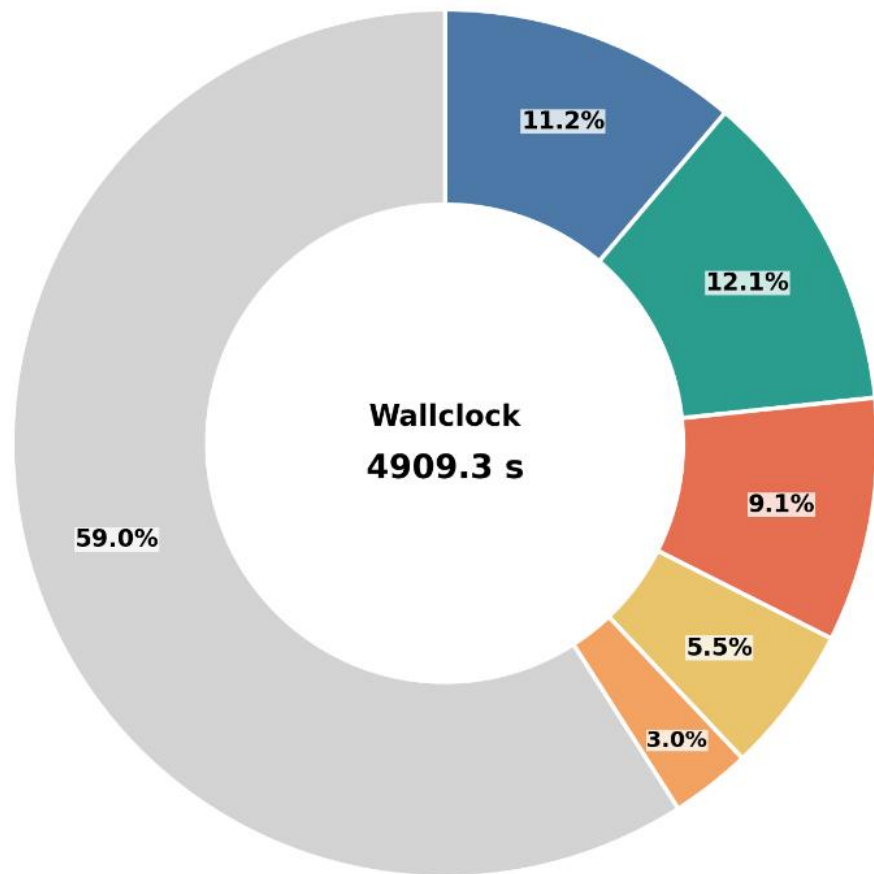
- Implementation of EcRad radiation parameterization: promising results for long-range forecast version, ongoing tuning for SLAV10 medium range version – especially visible in precipitation seasonal forecast
- Implementation of other deep convection parameterization
- New (less smooth) orography with horizontal diffusion and GWD retuning

Вычислительная платформа

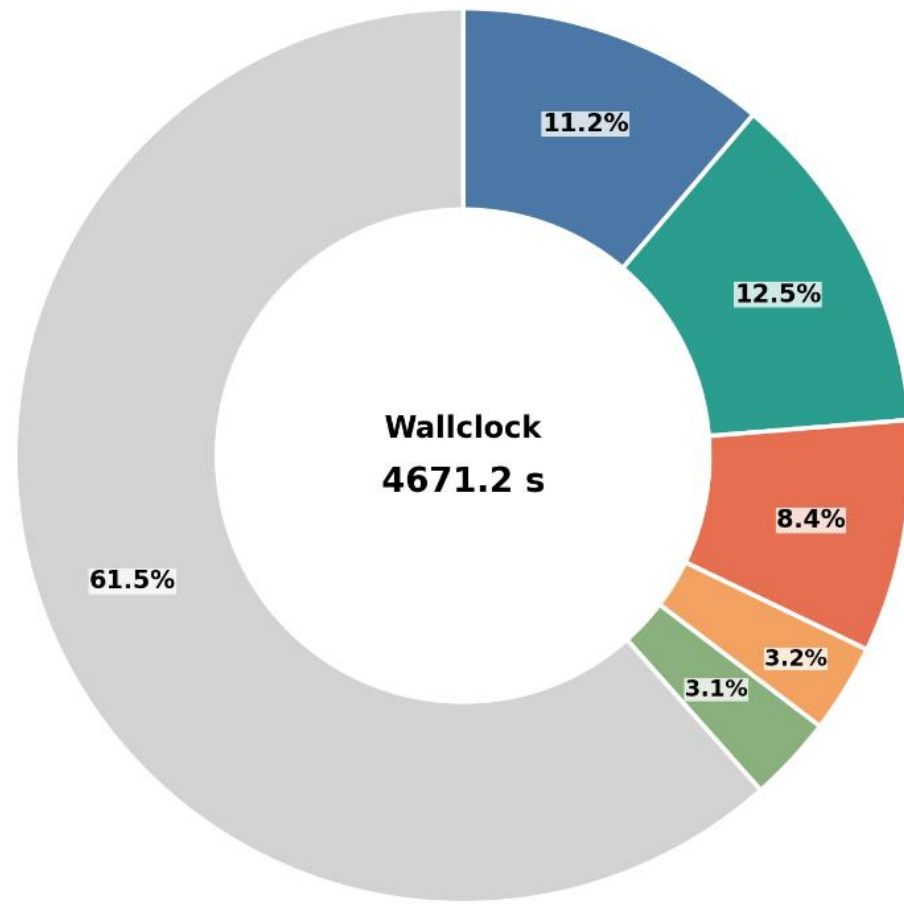
- Cray XC40 пиковой производительностью 1.293 Пфлопс в ГВЦ Росгидромета. 936 вычислительных узлов, интерконнект Aries.
- Каждый узел - 2 18-ядерных Intel Xeon E2697v4.
- Cray Fortran и оптимизированная под интерконнект Aries библиотека Cray MPI.

Доля наиболее вычислительно затратных подпрограмм версии ПЛАВ10. Слева – с блоком радиации CLIRAD_SW + RRTMG LW, справа – ecRad.

Указано полное время счета прогноза на 5 сут с учетом чтения начальных данных и записи результата прогноза.



MPI_RECV MPI_WAITANY sl_interp
MPI_WAITALL rtnmr all_others



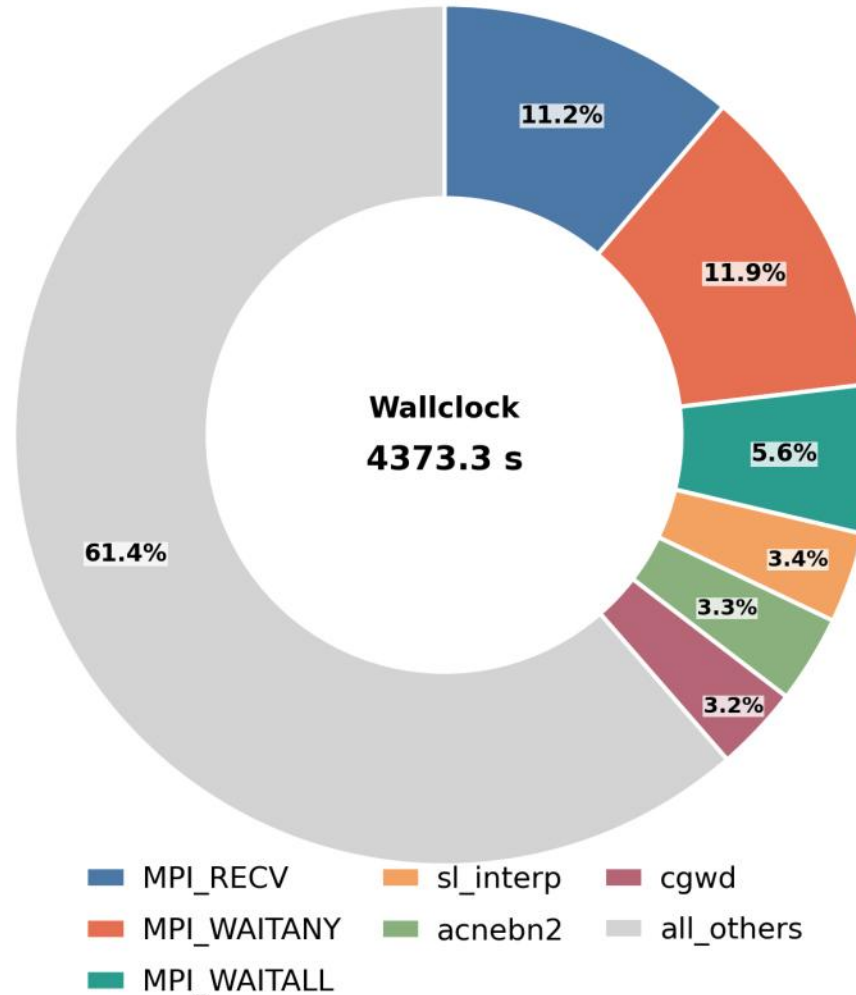
MPI_RECV MPI_WAITANY acnebn2
MPI_WAITALL sl_interp all_others

Работы по ускорению кода

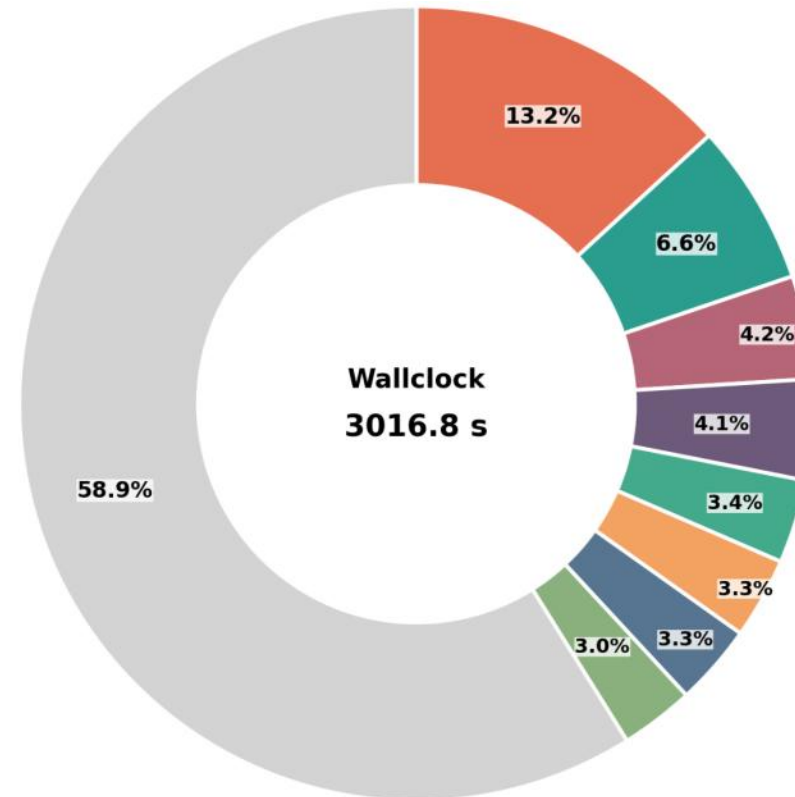
- 1) В блоке полулагранжевого переноса внедрены MPI обмены с объемом данных, определяемым актуальным полем ветра (обмены «по требованию»).
- 2) Уменьшен объем обменов данными за счет учета различной ширины шаблона интерполяции для разных интерполируемых в этом блоке слагаемых уравнений динамики.
- 3) Массивы прогностических переменных, ранее не переведенные в одинарную точность и участвующие в обменах данными между процессорами и соответствующие промежуточные величины (кроме влажности воздуха) переведены в одинарную точность. В итоге объем пересылаемых данных для этих переменных сократился вдвое.

Доля наиболее вычислительно затратных подпрограмм версии ПЛАВ10 с блоком радиации esRad после оптимизации MPI-обменов и перехода на одинарную точность остающейся части массивов в блоке динамики.

Cray XC40
2916 ядер



Доля наиболее вычислительно затратных подпрограмм версии модели ПЛАВ072L96 с блоком радиации esRad после оптимизации MPI-обменов и переходу на одинарную точность остающейся части массивов в блоке динамики.



Cray XC40 192 ядер

MPI_WAITANY	ecckd	sisl_driver
MPI_WAITALL	RTOR_W_00	acnebn2
cgwd	sl_interp	all_others

Выводы

- ПЛАВ10: экономия 10 мин из 140 на прогнозе на 10 сут (2916 ядер)
- Недавно – экономия еще 3 мин из 130 за счет замены эйлерова вычисления конвергенции влаги на полулагранжево (ликвидация нескольких MPI обменов).
- С 2022 года – время выполнения сократилось с ~20 до 13.5 мин на сутки прогноза. Основная часть блока динамики переведена в одинарную точность.
- Дальнейшая работа:
 - перевод параметризаций облачности и глубокой конвекции в одинарную точность
 - перенос вычислений параметризаций на GPU

Спасибо за внимание!