Параллельная вычислительная технология многомасштабной модели атмосферы ПЛАВ и результаты ее применения

Толстых М.А.[1,2,3,4], Фадеев Р.Ю.[1,2,3] , Гойман Г.С.[1,3,2] , Зарипов Р.Б.[2] ,

Шашкин В.В.[1,2,3] , Мизяк В.Г.[2] ,

Рогутов В.С[2] , Алипова К.А.[2,1], Бирючева Е.О.[2]

1 - ИВМ РАН, 2 - Гидрометцентр России, 3 - МФТИ, 4 - МГУ имени М.В.Ломоносова

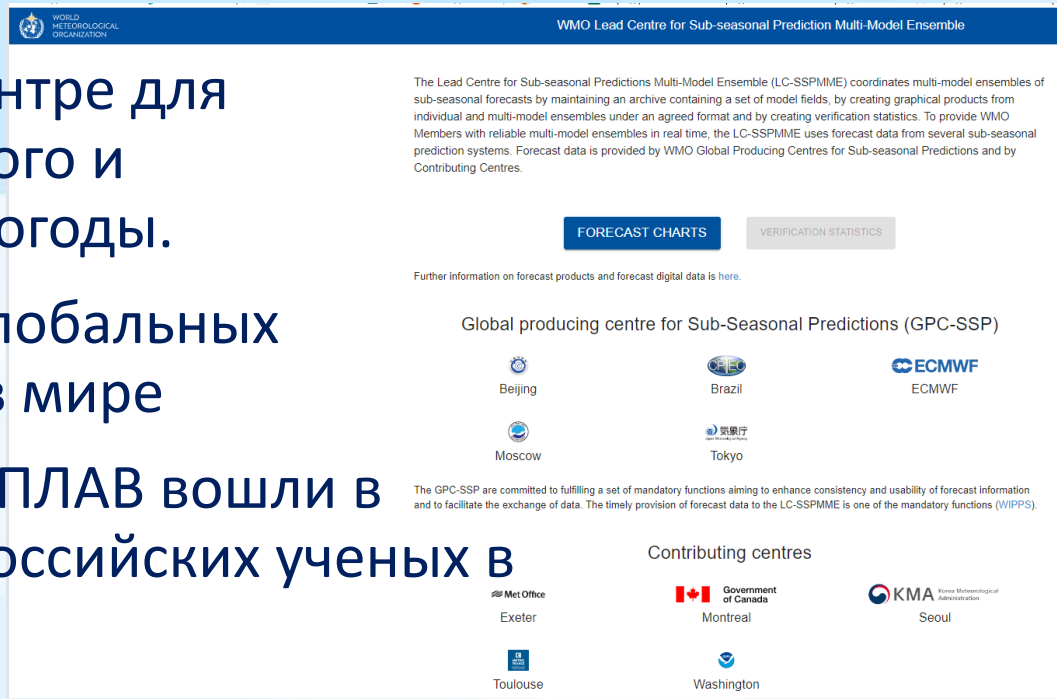
e-mail: rost.fadeev@gmail.com

29 сентября 2025

Суперкомпьютерные дни в России

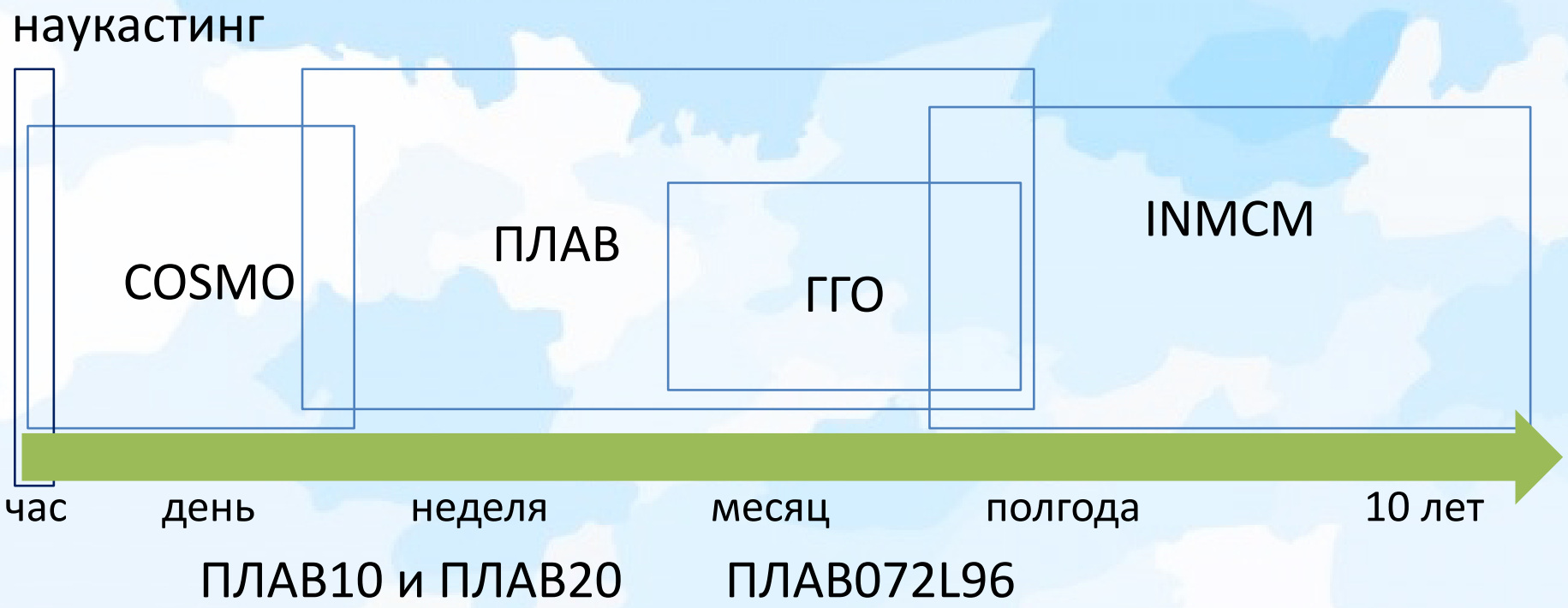
Глобальная модель атмосферы ПЛАВ

- Совместная разработка ИВМ РАН и Гидрометцентра России.
- Применяется в Гидрометцентре для оперативного среднесрочного и долгосрочного прогнозов погоды.
- Одна из 10 оригинальных глобальных моделей прогноза погоды в мире
- Результаты разработчиков ПЛАВ вошли в Топ-10 научных открытий российских ученых в 2022 году (по версии РНФ).
- С 2024 г Гидрометцентр – один из 5 глобальных продуцирующих центров ВМО по субсезонному прогнозу.



Исследования проводятся при поддержке грантов РНФ 25-17-00314, 21-17-00254, 21-71-30023.

Прогностические технологии Гидрометцентра России



Применение модели ПЛАВ в Гидрометцентре России в 2025г.

ПЛАВ10

Среднесрочный (от 3 до 14 суток).
0.1° по долготе, 0.08-0.13° по широте, 104 уровня (3600x1945x104). Детерминированный прогноз.
15 мин на 2916 ядрах — время расчета одного прогноза.
Принята ЦМКП 29.05.2023 г.

ПЛАВ20

Ансамблевый среднесрочный (до 14 суток).
0.225° по долготе, 0.16°-0.24° по широте, 51 уровень (1600x865x51). 36 участников ансамбля.
6 мин на 256 ядрах — время расчета 1 члена анс.
Принята ЦМКП 03.06.2025 г., идет внедрение

ПЛАВ072L96

Субсезонный (2-6 недель) и **сезонный** (1-4 мес.).
0.9° по долготе, 0.72° по широте, 96 уровней (400x250x96). 41 член ансамбля.
Расчет на 123 дня 1 члена анс. - 81 мин. на 128 ядрах.
Сезонный прогноз: принята ЦМКП 22.11.2023 г.

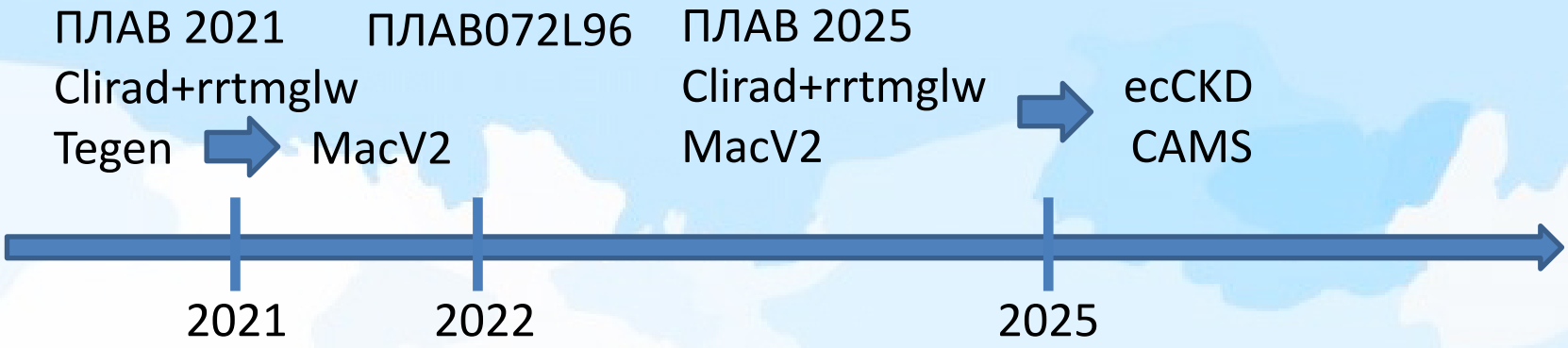
ПЛАВ

- Конечно-разностный полунеявный полулагранжев блок решения уравнений динамики атмосферы (Tolstykh, et al, 2017).
- Набор параметризаций процессов подсеточного масштаба ALADIN/ALARO с рядом модификаций.
- Блоки расчета коротко- и длинноволновой радиации CLIRAD SW + RRTMG LW.
- Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН –НИВЦ МГУ, параметризация неорографического ГВС: адаптированные и доработанные версии из модели климата ИВМ РАН.
- Модифицированные параметризации: глубокая конвекция, влияние осадков на турбулентные процессы и др.
- Новые параметризации: учет угла наклона подсеточной орографии в параметризации ОГВС, подынверсионная облачность, расчет температуры морского льда, ледники (опытный режим).

(Гидромет. иссл. и прогнозы 2022, 2023, Russ.J.Num.An.Math. Mod. 2022, Метеорология и гидрология, N7 2024)

Усовершенствование **ПЛАВ072L96**

Конфигурация модели: 0.9x0.72, 96 уровней, шаг по времени – 1440 с.



Описание распространения радиации в атмосфере:

Clirad – коротковолновая часть спектра.

Уравнение переноса радиации в двухпотоковом приближении дельта-Эддингтона; 11 спектральных диапазонов; перекрытие облаков: бинарное или предвычисленное (в предположении максимального перекрытия в пределах трех ярусов).

Rrtmglw – длинноволновая часть спектра.

Интерполяция табличных данных, рассчитанных для всех линий поглощения с учетом фактической температуры и давления; 16 спектральных интервалов; перекрытие облаков: максимальное, максимально-случайное, экспоненциальное максимально-случайное или бинарное.

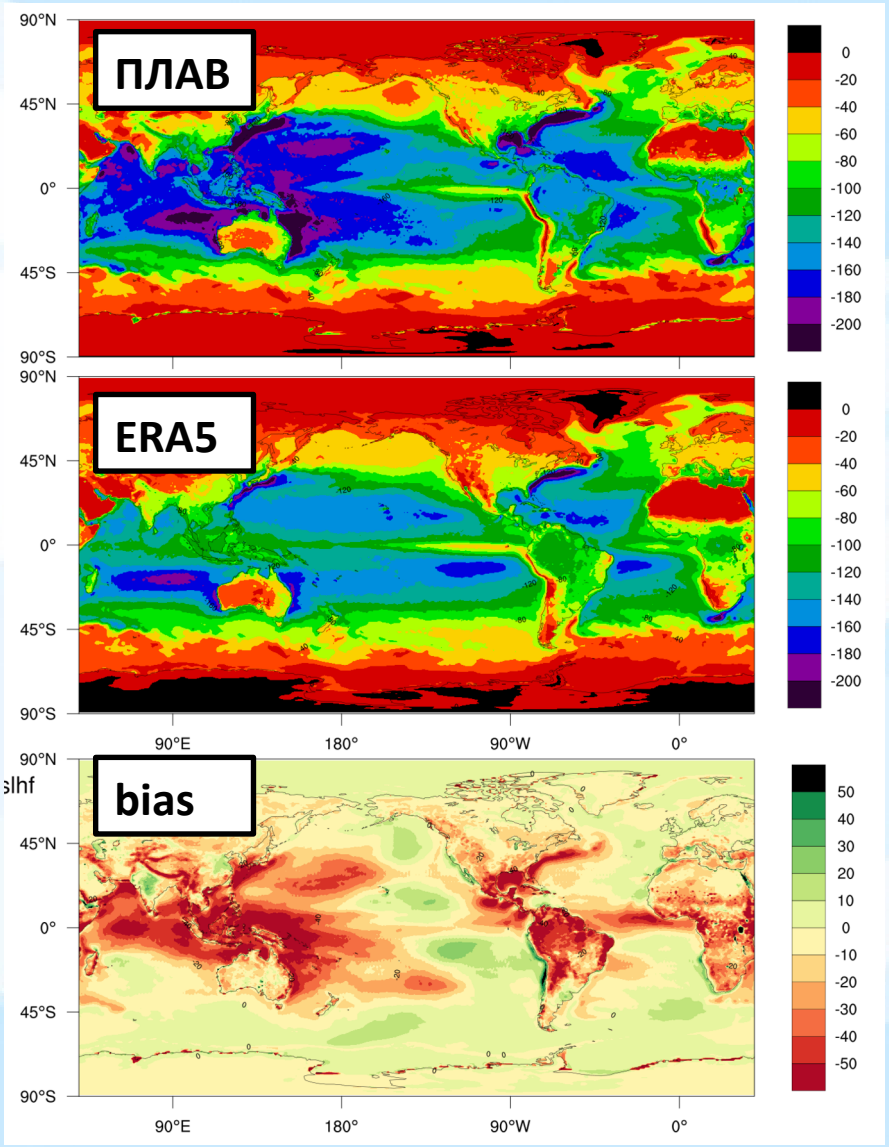
ecCKD - блок описания распространения радиации (оптимизированный rrtmg).

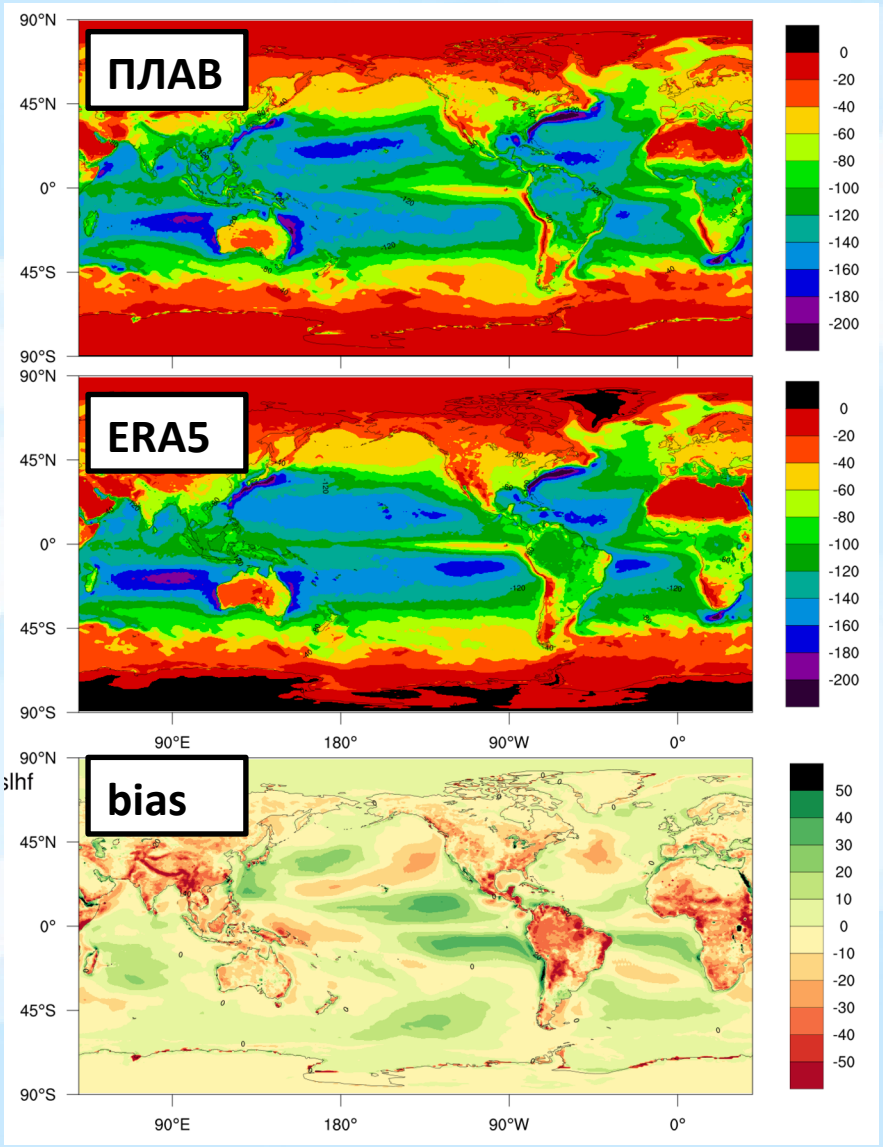
Tegen, MacV2, CAMS – климатология аэрозолей.

Поток скрытого тепла на поверхности.

ПЛАВ 2025
Clirad+rrtmglw
MacV2

ecCKD
CAMS



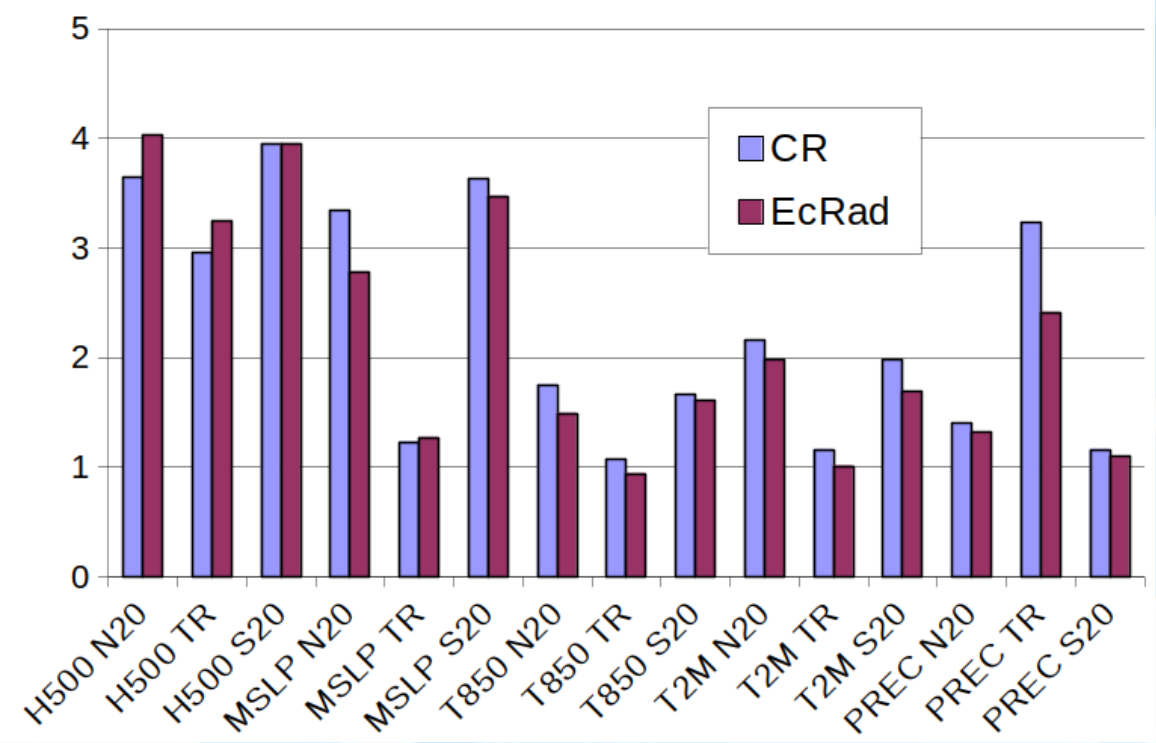


ПЛАВ 2025

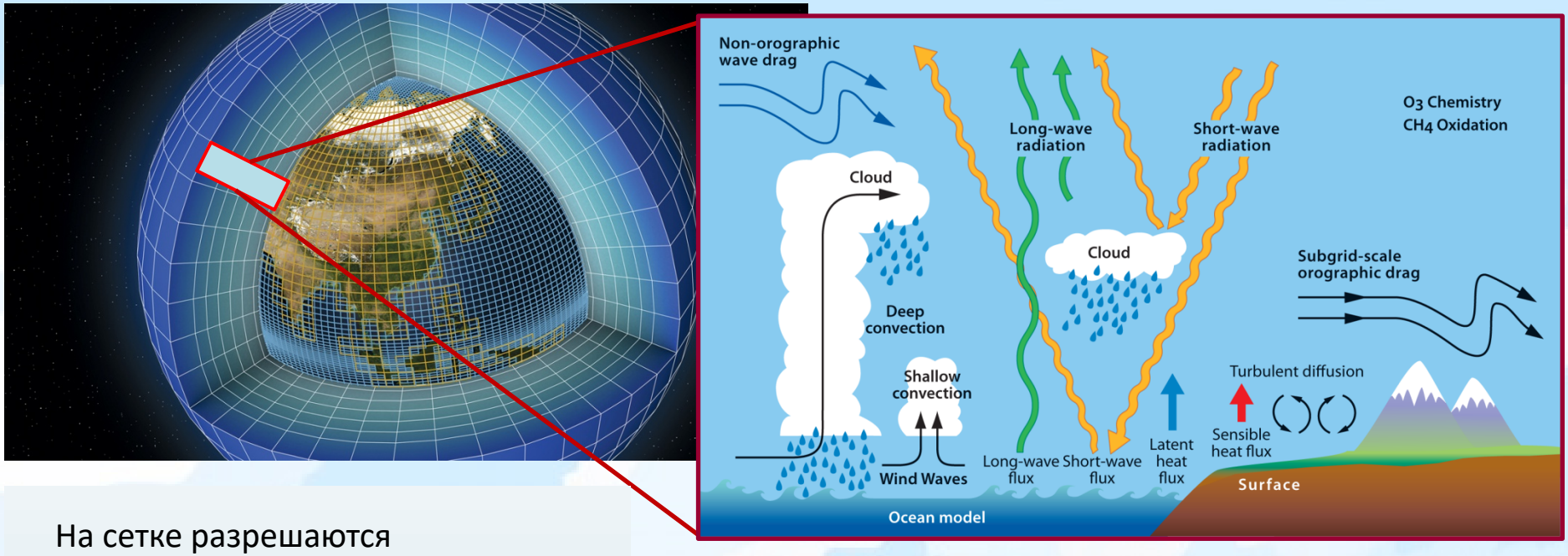
Clirad+rrtmglw → ecCKD

MacV2 → CAMS

Осредненная за 4 сезона ошибка (rmse) долгосрочного прогноза на 4 месяца.



Организация вычислений в ПЛАВ



На сетке разрешаются крупномасштабная циркуляция воздушных масс.
Вклад процессов подсеточного масштаба учитывается в правой части прогностических уравнений:

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial t} + \mathcal{A}\vec{\varphi} + \mathbf{B}\vec{\varphi} = \vec{\mathbf{F}},$$

В каждой ячейке с учетом типа поверхности моделируются остальные процессы. Цикл по узлам в модели устроен следующим образом:

```
Do i,j
    Do k
        Call deep_convection()
        Call radiative_transfer()
        Call PBL()
    End do
End do
```

ПЛАВ 2025

Clirad+rrtmglw → ecCKD

MacV2 → CAMS

Ускорение вычислений за счет перехода на ecckd:

ПЛАВ072L96,	0.9x0.72, 96lvl	– 21%
ПЛАВ20,	0.225x0.16-0.24, 51 lvl	– 23%
ПЛАВ10,	0.1x0.08-0.13, 104 lvl	– 21 %

ПЛАВ072L96

Субсезонный (2-6 недель) и **сезонный** (1-4 мес.).

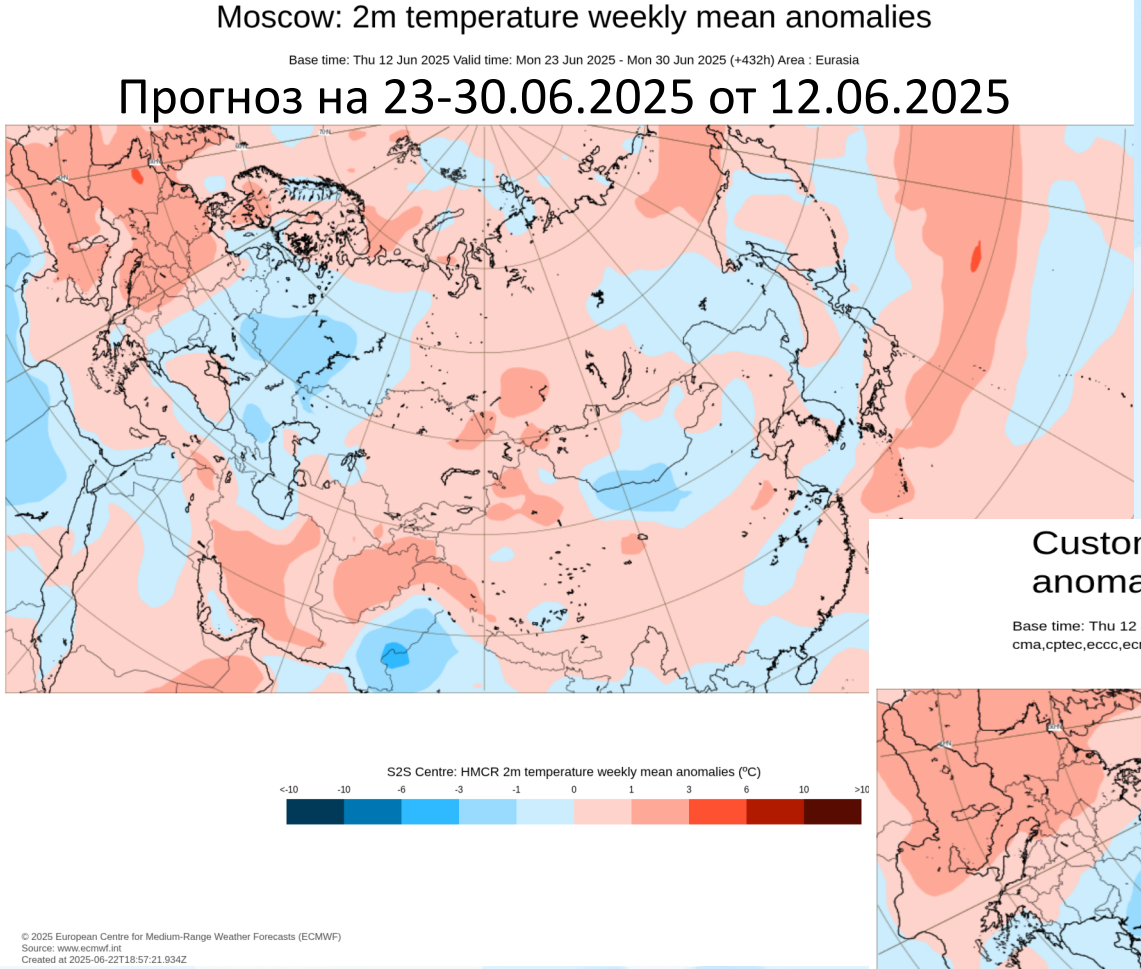
0.9°x0.72°, 96 уровней.

41 член ансамбля.

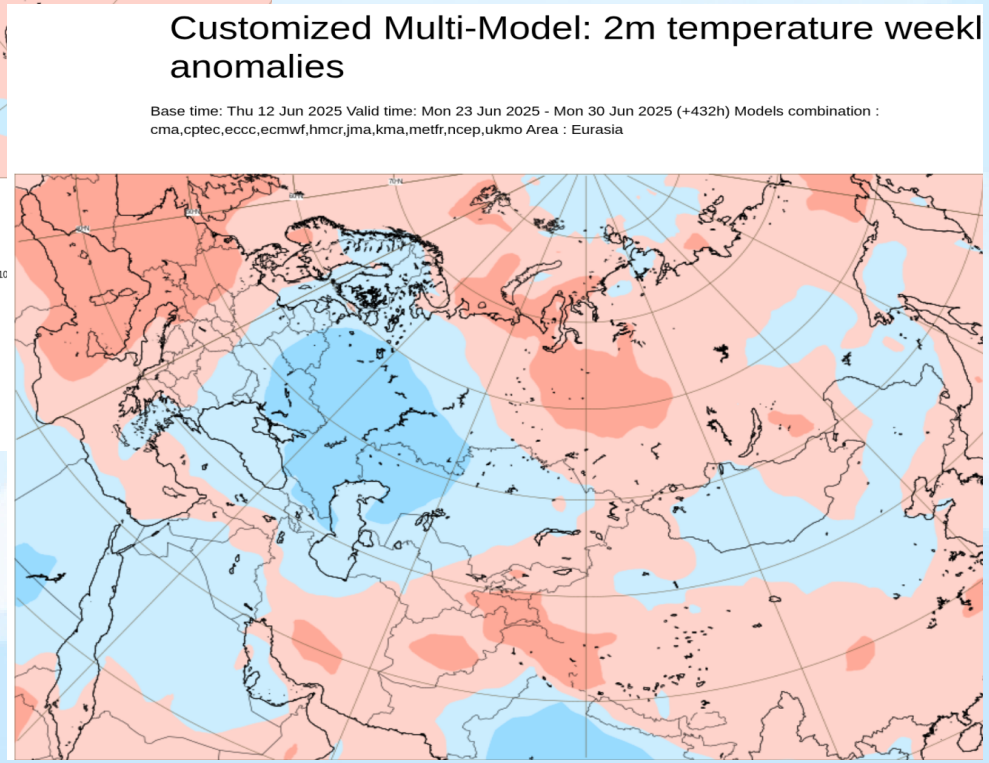
Расчет на 123 дня 1 члена ансамбля - 81 мин.

на 128 ядрах (67 мин. в эксп. версии).

Прогноз аномалии приземной температуры по ПЛАВ072L96



Мультимодельный прогноз аномалии приземной температуры



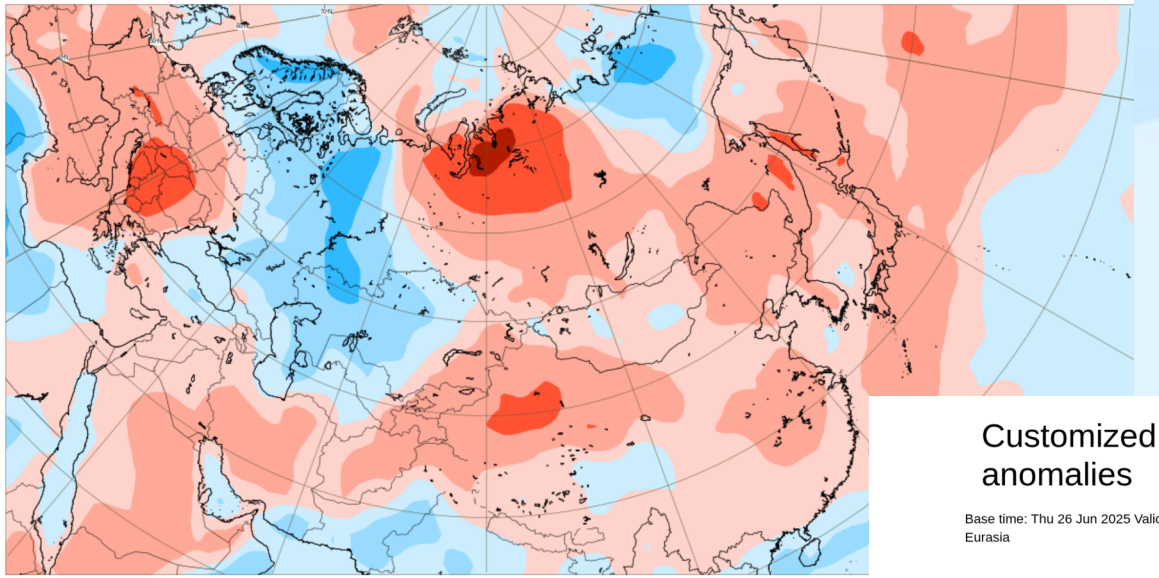
https://charts.ecmwf.int/wmo

Прогноз аномалии приземной температуры по ПЛАВ072L96

Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 26 Jun 2025 Valid time: Mon 30 Jun 2025 - Mon 07 Jul 2025 (+264h) Area : Eurasia

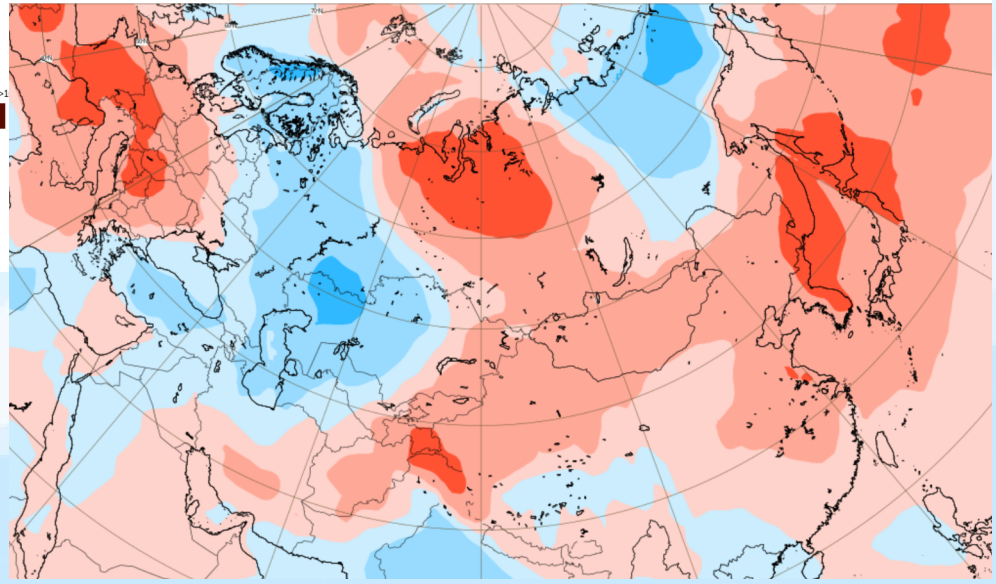
Прогноз на 30.06-07.07.2025 от 26.06.2025



Мультимодельный прогноз аномалии приземной температуры

Customized Multi-Model: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 26 Jun 2025 Valid time: Mon 30 Jun 2025 - Mon 07 Jul 2025 (+264h) Models combination : eccc,ecmwf,hmcr,jma,kma,metfr,ncep,ukmo
Eurasia



S2S Centre: HMCR 2m temperature weekly mean anomalies (ºC)

<-10 -10 -6 -3 -1 0 1 3 6 10 >1

© 2025 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Source: www.ecmwf.int
Created at 2025-07-02T14:59:55.521Z

https://charts.ecmwf.int/wmo

Прогноз аномалии приземной температуры по ПЛАВ072L96

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

Home / Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

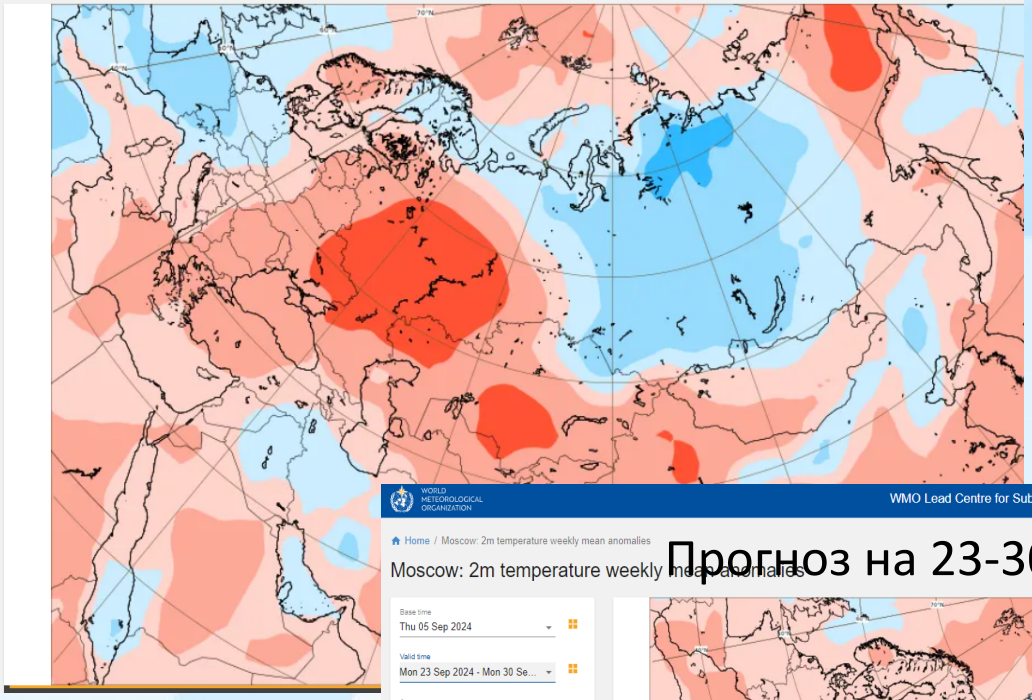
Прогноз на 16-23.09.2025 от 05.09.2025

Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 05 Sep 2024

Valid time: Mon 16 Sep 2024 - Mon 23 Se...

Area: Eurasia



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

Home / Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

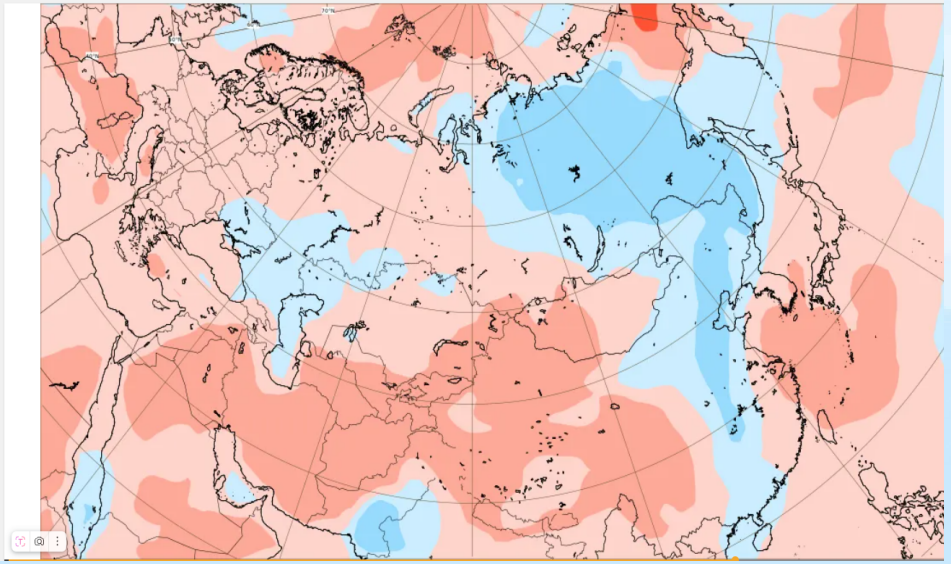
Прогноз на 23-30.09.2025 от 05.09.2025

Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time: Thu 05 Sep 2024

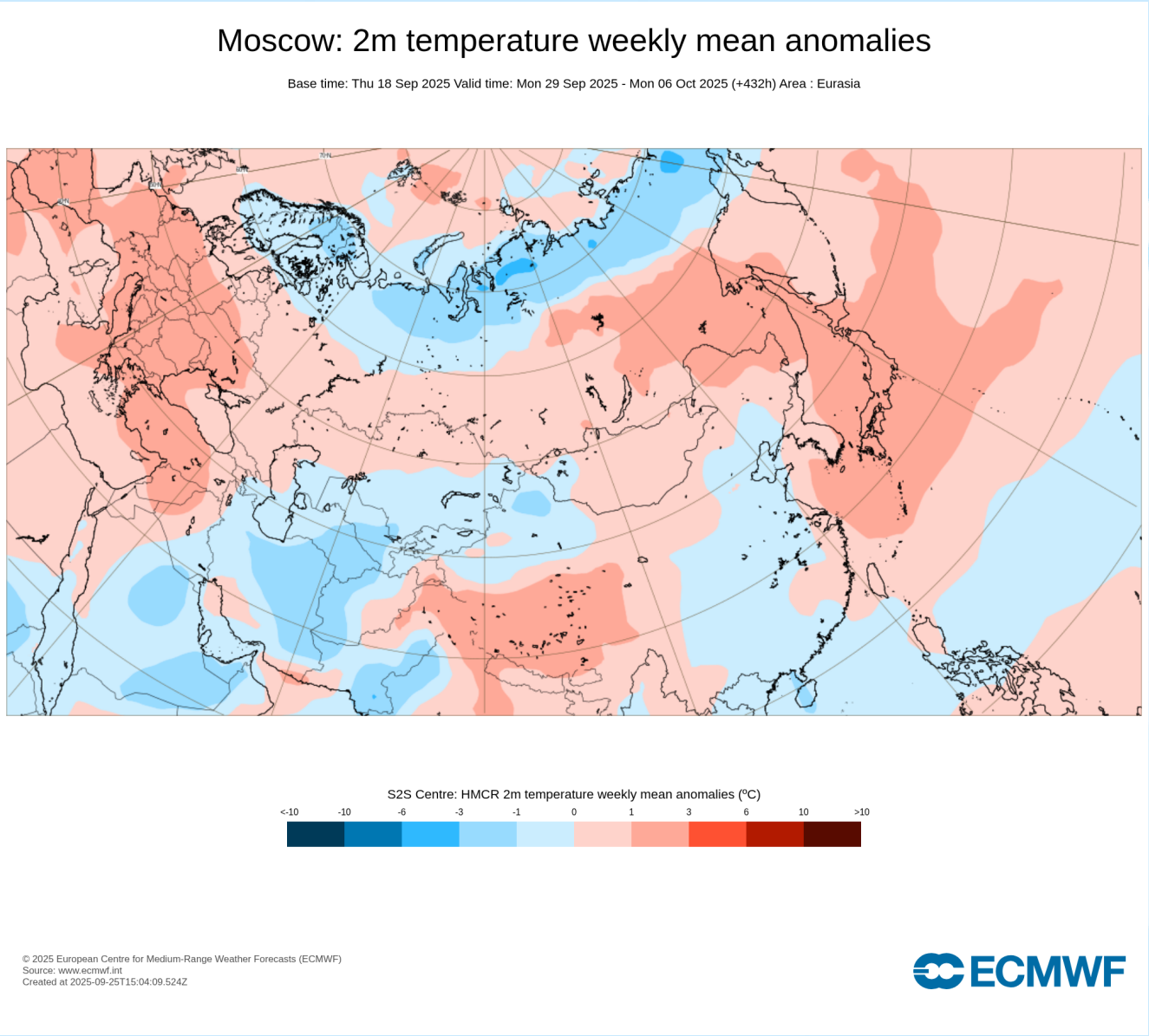
Valid time: Mon 23 Sep 2024 - Mon 30 Se...

Area: Eurasia



https://charts.ecmwf.int/wmo

Прогноз аномалии приземной температуры на первую неделю октября от 18.09.2025 по ПЛАВ072L96



Детерминированный среднесрочный прогноз ПЛАВ10

Конфигурация модели: 0.1° по долготе , 0.08-0.13° по широте, 104 уровня., шаг по времени – 170 с.

- Впервые достигнут среднемировой уровень по пространственному разрешению (около 10 км).
- Прошла опер. испытания, внедрена в 10.2023г.
- Существенные улучшения в тропиках по сравнению с ПЛАВ20, менее заметные в средних широтах.
- Выходная продукция:

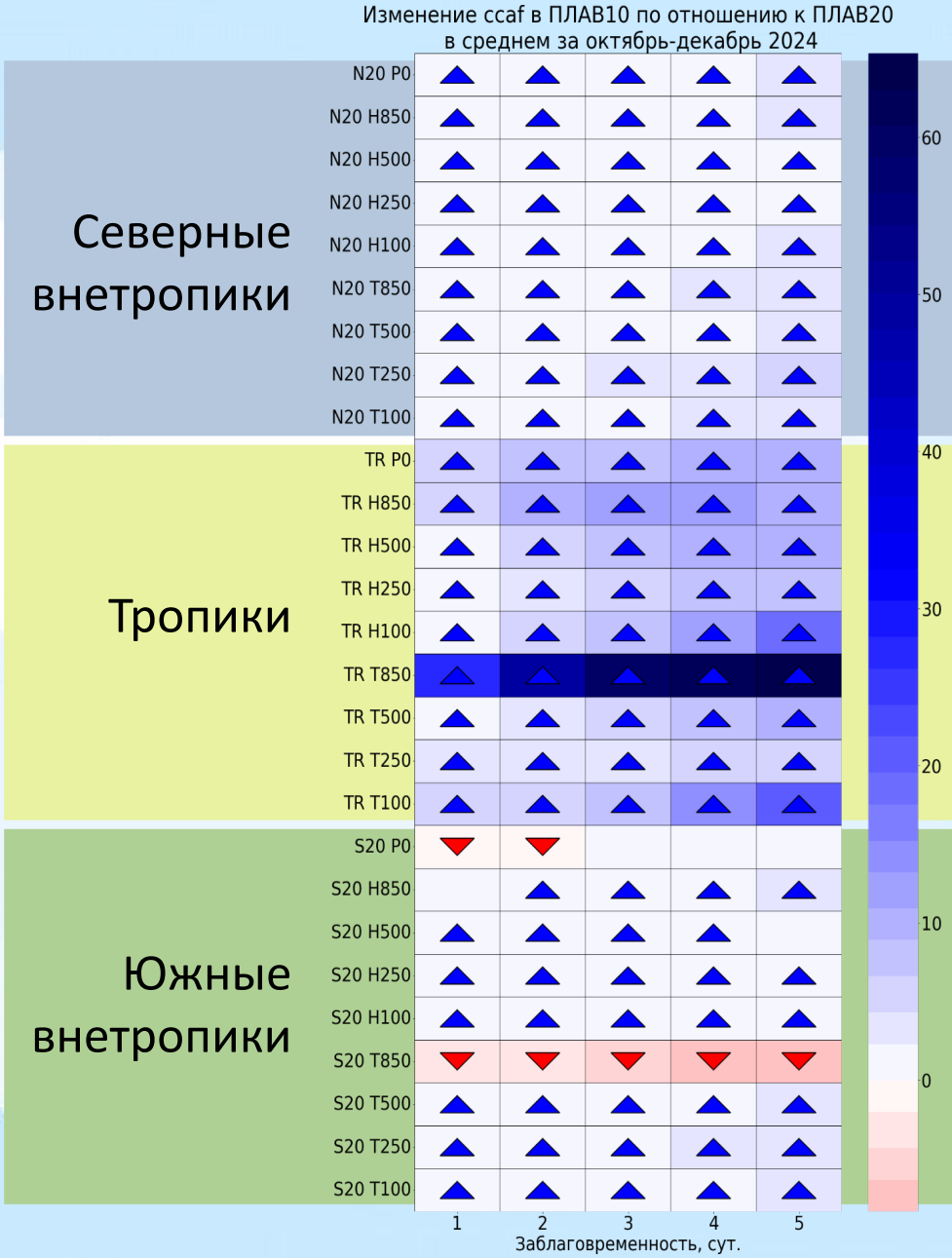
  - синоптики (special.meteoinfo.ru);

  – для авиационных прогнозов (после создания постпроцессинга);

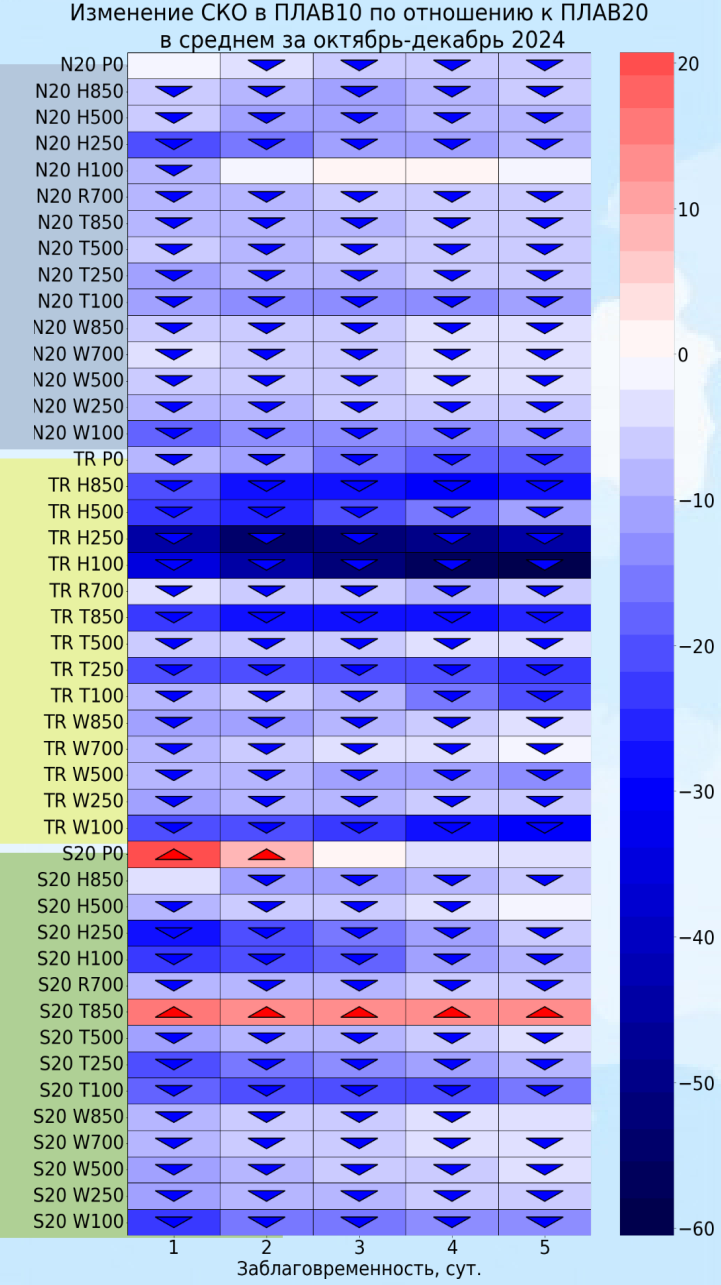
  - МЧС;

  - Росатом (Севморпуть).

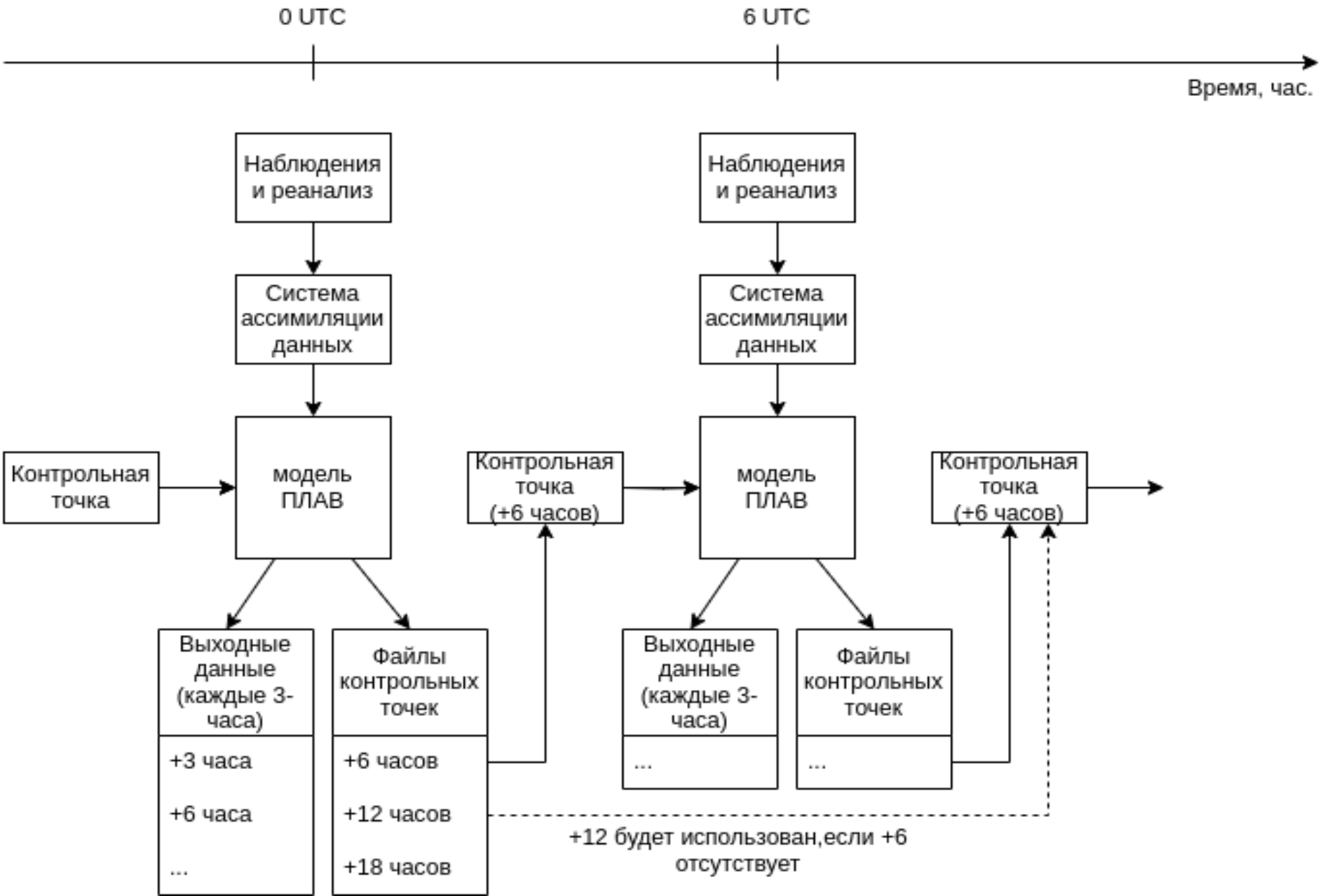
Корреляция аномалий (ACC)



RMSE

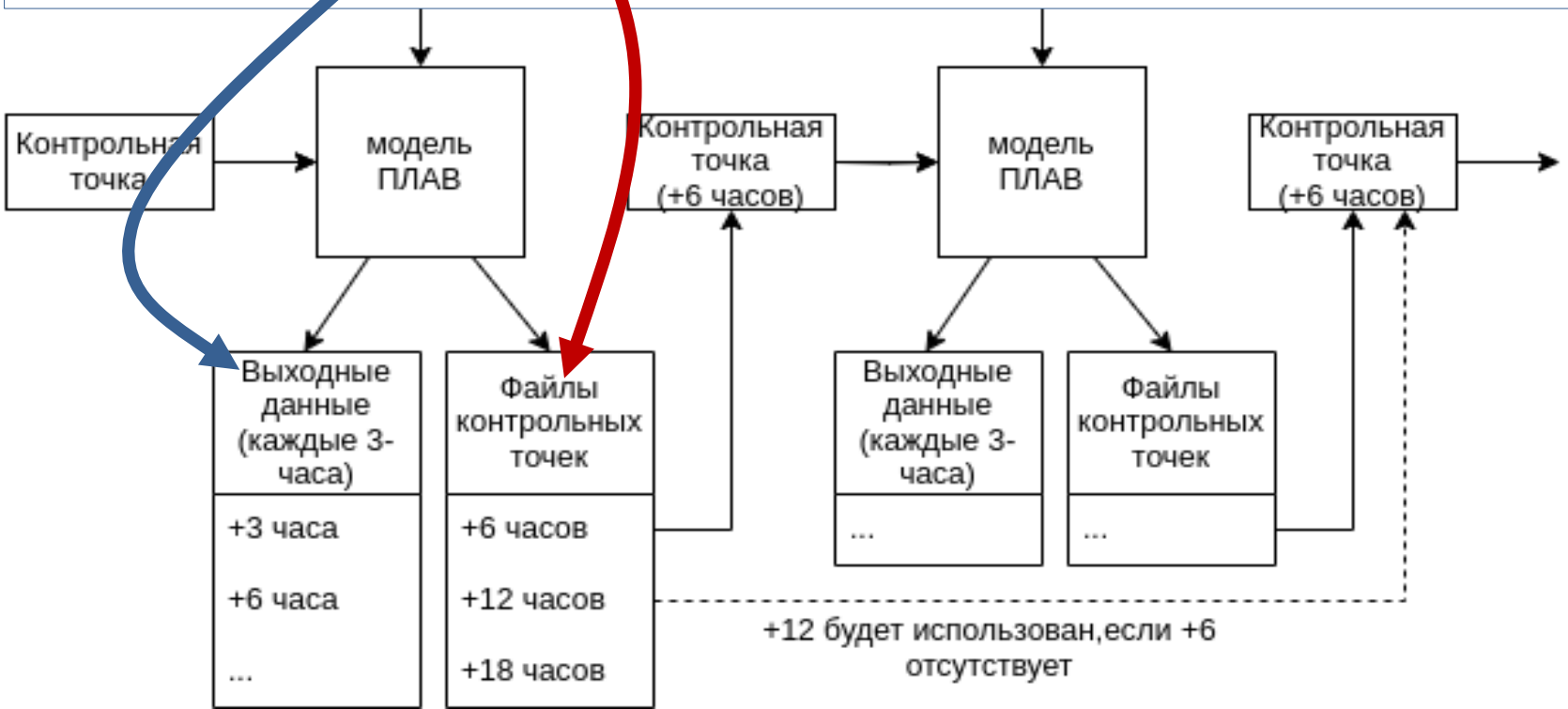


Технология прогноза на основе ПЛАВ



Технология прогноза на основе ПЛАВ

Идентификатор модели	ПЛАВ072L96	ПЛАВ20	ПЛАВ10
Число узлов по долготе	400 (0.9°)	1600 (0.225°)	3600 (0.1°)
Число узлов по широте	251 (0.72°)	865	1945
Число уровней по вертикали	96	51	104
Шаг по времени, с.	1440	450	270
Число шагов по времени в сутки	60	192	320
Размер файла с контрольной точкой, Гб.	0.3	**2.8**	**22.7**
Размер сжатого файла с контрольной точкой, Гб.	0.3	1.9	9.9
Размер файла с выходной продукцией, Гб,	-	0.7	3.3



Особенности работы с файловой системой

Асинхронная запись данных с использованием внешних делегатов:

aprun \
-n 4 -d 8 -N 4 **./pario post** : \
-n 4 -d 8 -N 4 **./pario ctrp** : \
-n 216 -d 4 -N 8 --mpmd-env OMP_NUM_THREADS=4 **./slm20L51v.exe** \
2024 01 30 00 > $cdir/slm$slmid.out

Существенное ускорение модели за счет сравнительно небольшого (2-3%) увеличения объема задействованных вычислительных ресурсов.

Уменьшение времени инициализации модели – оптимизация входных данных.

Fadeev et al, Lobachevski J. Math. 2024

Заключение

Создана единая модель для трех приложений: детерминистического и ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, а также долгосрочного прогноза аномалий погоды.

- В зависимости от конфигурации модель задействует от 128 до 2916 процессорных ядер Cray XC40 ГВЦ Росгидромета.
- Вычислительная эффективность модели повышена за счет внедрения нового блока описания радиационных потоков ecckd и оптимизации работы с файловой системой.
- Модель внедрена в Гидрометцентре России.
- Впервые ликвидировано отставание в разрешении модели среднесрочного прогноза.
- Хорошие результаты в субсезонном прогнозе.

Спасибо за внимание!

Ростислав Юрьевич Фадеев

ИВМ РАН, Гидрометцентр России, МФТИ

rost.fadeev@gmail.com

tg: **@rostfa**

Исследования проводятся при поддержке грантов РНФ 25-17-00314, 21-17-00254, 21-71-30023.