

Применение глобальной модели атмосферы ПЛАВ для воспроизведения атмосферной циркуляции на масштабах от дня до нескольких месяцев

Толстых М.А.^{1,2,3,4}, Фадеев Р.Ю.^{1,2,3}, Шашкин В.В.^{1,2,3}, Зарипов Р.Б.²,

Гойман Г.С.^{1,3,2}, Мизяк В.Г.², Алипова К.А.^{2,1}, Рогутов В.С.², Бирючева Е.О.²

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



ML/AI forging ahead

From 2022 - “First generation”: GraphCast, FourCastNet, Pangu-Weather, ClimaX...

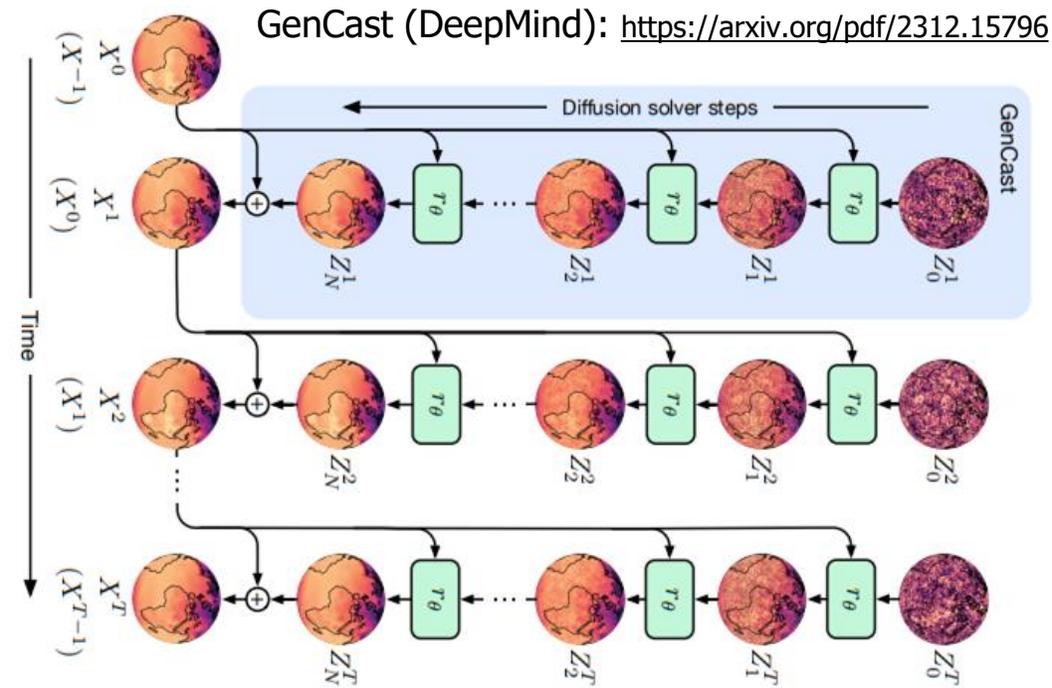
- By tech companies, single member, blurry, needs reanalysis to run

Last ~1 year - “Second generation”: AIFS-V2, NeuralGCM, Aurora, Aardvark, Gencast, FuXi variants, ...

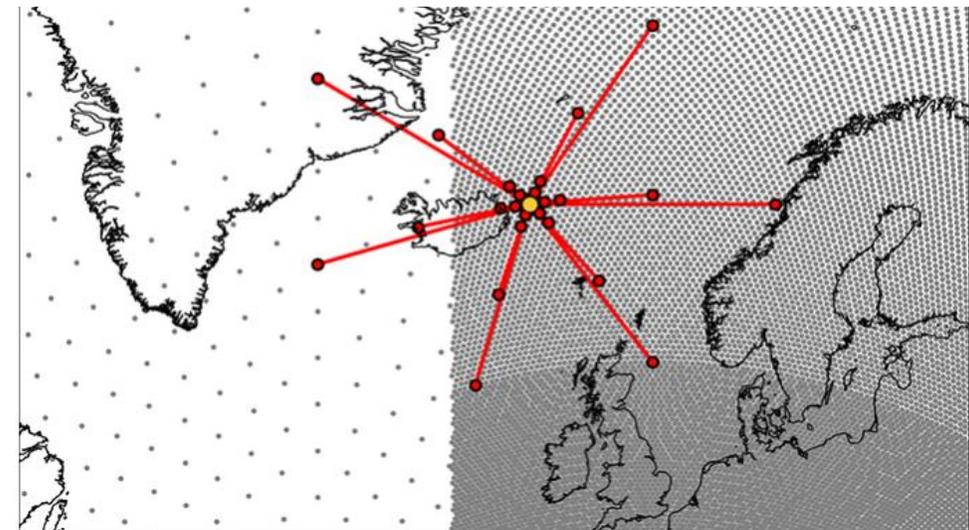
- More met agencies involved (ECMWF a clear leader), more physics-informed, more specialized, less blurry, ensembles, ...

What’s next?

- Coupled models (DLWP-HPX etc.), longer leads
- Nested regional modelling (ECMWF work on AIFS-V2)
- More physically-informed approaches?
- Combining longer lead approaches (transformer, GNN, SFNO...) with sharper approaches (diffusion, generative modelling, ...)
- More foundation models? Zero shot (AtmoRep) vs few-shot (Aurora)?



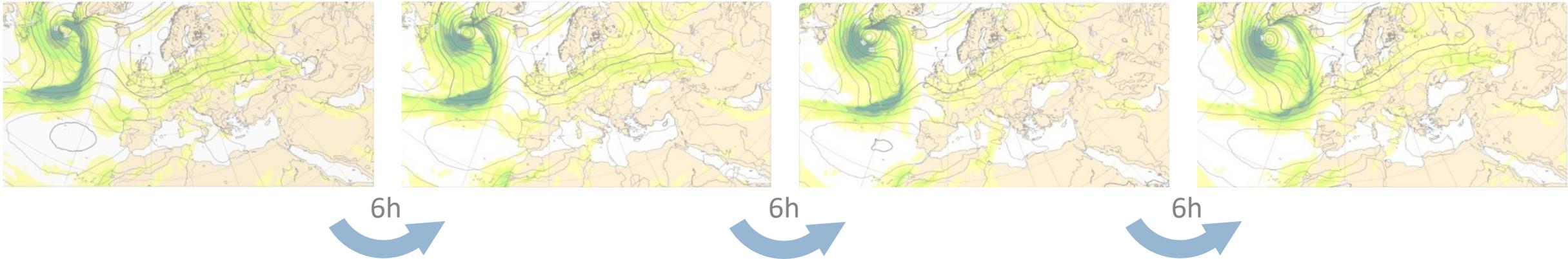
From the ECMWF AIFS Blog: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/aifs-blog/2024/data-driven-regional-modelling>



AIFS – The Artificial Intelligence Forecast System

ECMWF's data-driven forecast model

TRAINING: The AI model learns from approximately 40 years of ECMWF's ERA5 reanalysis data, stepping 6h from analysis to analysis



For forecasting, we autoregressively step the trained model 6h into the future $x_n = f(x_{n-1})$

Similar approach followed by many research groups and tech companies
(Google Deepmind, NVIDIA, Keisler, Huawei, ...)

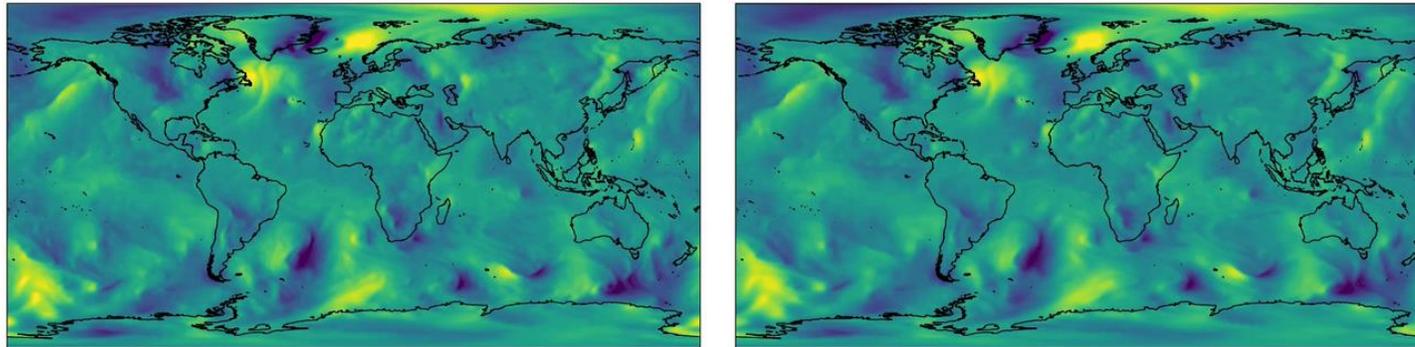
AIFS - Artificial Intelligence Forecasting System

First implementation (~ 1deg resolution) in 2023, following Keisler 2022 and Lam et. al 2022:

- GNN architecture: Interaction Networks (Battaglia et. al 2016)
- Graph representation, hidden multi-scale mesh, edge features
- Scales to > 1000s of GPUs ; tensor parallel implementation, split model across multiple GPUs

Update beginning of 2024, update to ~0.25 deg:

- Attention based GNN for encoder, decoder
- Transformer backbone in processor
- Trained on 64 GPUs ~ 1 Week

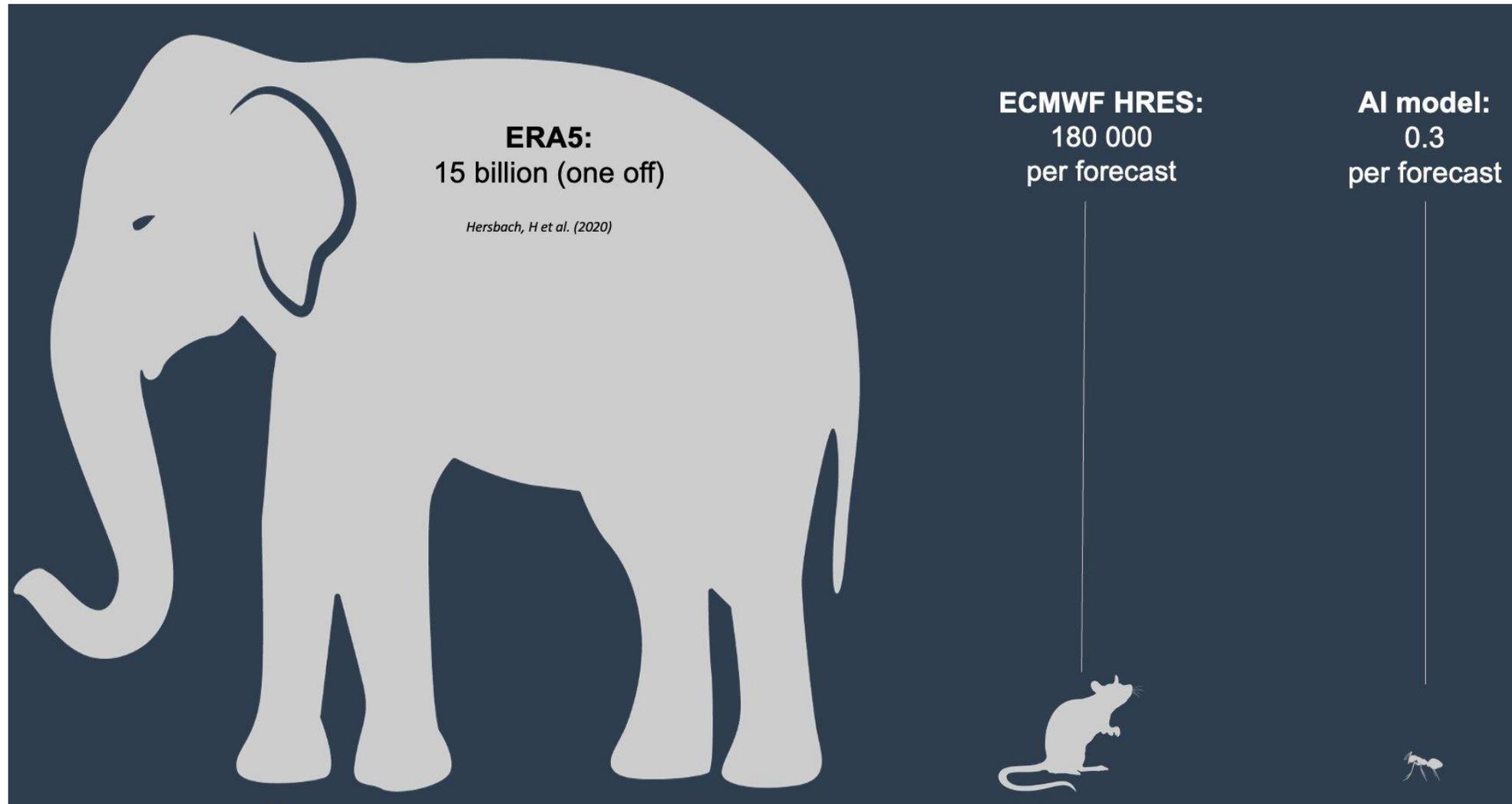


Why GNN Encoder / Decoder: can handle arbitrary input / output grids, local and ad hoc grid refinement, changing grids etc.

AIFS data available in Product Requirement Catalogue

Lang, S. et al. 2024. AIFS-ECMWF's data-driven forecasting system. *arXiv preprint arXiv:2406.01465*.

How costly is AIFS?



The challenges



Lots of unanswered questions

- Physicality/realism
- Trustworthiness
- Accessibility
- Unsolved application needs (ensembles, longer leads, more variables etc.)
- ...

Lots of uncertainty, confusion

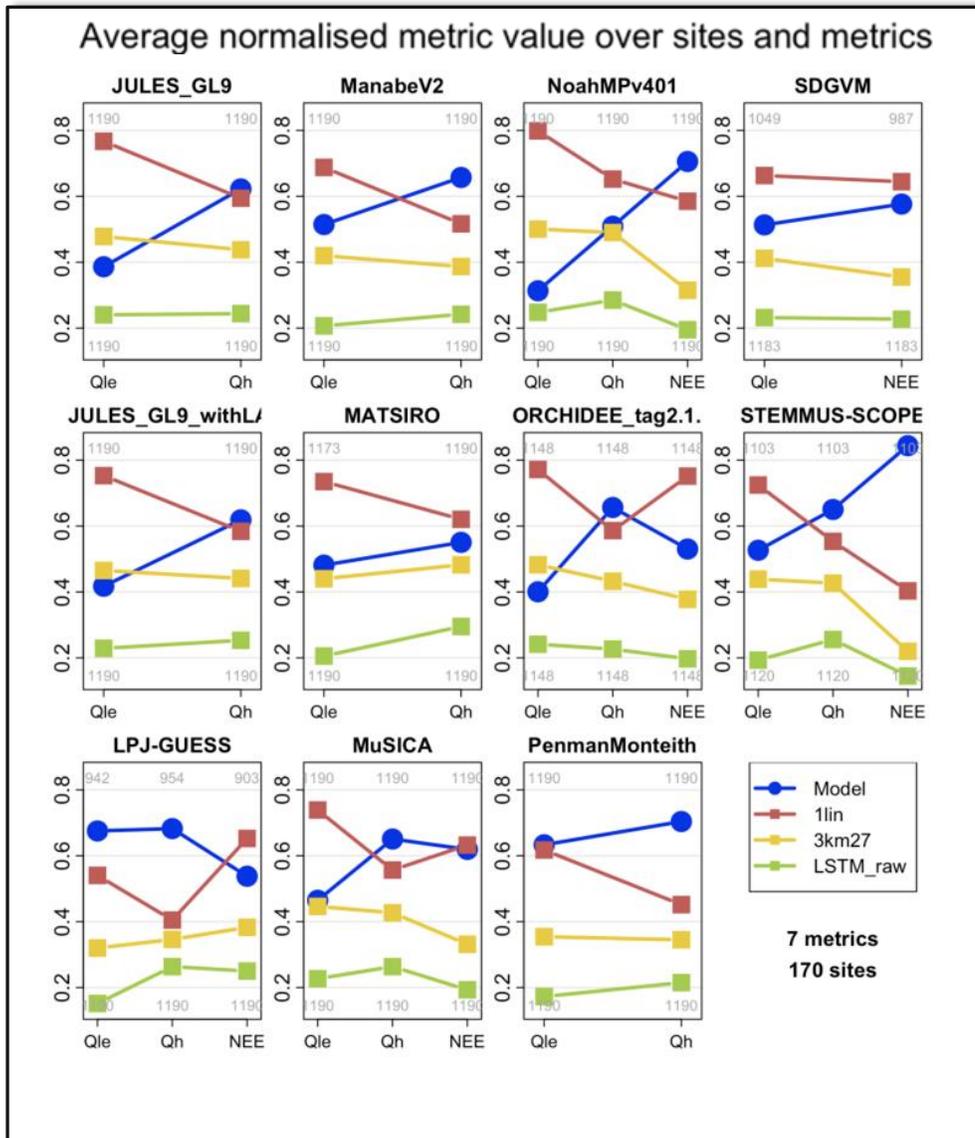
- Keeping up with new developments is a full time job
- Still a lot of churn - where does one start?
- Shortage of AI/ML expertise
- Lack of tooling/infrastructure
- ...

Changing paradigms

- Fasttrack to experimental mode: Timeline between R&D on a given ML system and its potential operational/experimental deployment happens in a matter of months rather than years
- Cost of running inference is drastically smaller than current physical systems
 - Implications for smaller centres
 - Lower bar computationally
 - Where's the bar at technically?
 - Major consideration for the TT
- Increased emphasis on observations (not just reanalyses), and aspects related to completeness, such as consistent coverage in space and time
- A constant: Open data (and systems) remain critical

PLUMBER2: Benchmarking Surface Fluxes in Land Surface Models

8



- Land surface models are run at 170 eddy covariance towers and the simulated fluxes are then compared to the observations.
- Q_e = Evaporation; Q_h = Sensible heat flux; NEE = Net ecosystem exchange
- Empirical approach (long-short term memory neural network; LSTM) provides the current “best case model” (i.e., benchmark). Uses same input data as land surface models.
- **Take home message:** Out-of-sample empirical approaches still appreciably outperform state-of-the-art land surface models

Credit: Gab Abramowitz

AI/ML модели атмосферы - выводы

- Стремительно прогрессируют
- Уже могут ансамблевый прогноз
- Скоро не будут заглаживать прогностические поля
- Пока зависят от реанализа и анализа – в которых используется «обычная» гидродинамическая модель
- Ведутся работы по усвоению данных без «обычных моделей»
- Пока видна перспектива замены «обычных» моделей прогноза на заблаговременностях до нескольких недель. Дальше – менее очевидно!
- Еще несколько лет как минимум «обычные» модели будут необходимы для всей номенклатуры выходной продукции.

Г.И.Марчук 08.06.1925-24.03.2013



- Отечественная школа моделирования атмосферы и океана
- Первая российская гидродинамическая совместная модель атмосферы и океана
- Спектральная модель атмосферы ГМЦ, исходная версия – модель ЕЦСПП 1981 года (привезена В.Н.Лыковым)
- Поддержка разработки и внедрения модели ПЛАВ

Люди, без которых модель не была бы создана

Первый научный
руководитель

Параметризации
процессов подсеточного
масштаба



В.Н.Лыкосов

14.01.1945-10.09.2021

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

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 РФ).
- С 2024 г Гидрометцентр – один из 5 глобальных продуцирующих центров ВМО по субсезонному прогнозу
- Поддержка грантов РФ 21-17-00254, 21-71-30023,



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

Met Office Exeter Government of Canada Montreal KMA Seoul

Toulouse Washington

Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ

Одна из 10 оригинальных глобальных моделей прогноза погоды в мире

Совместная разработка ИВМ им. Г.И.Марчука РАН и Гидрометцентра

Коллектив – 10 человек, 14 статей в журналах Q1 (2016-2024)

Грант РФФИ 21-17-00254; участие 21-71-30023, 14-37-00053, 14-27-00126

Применяется в ГМЦ для оперативного
среднесрочного и долгосрочного прогноза

Международное сотрудничество:
ECMWF, Meteo-France, Nansen Centre,
консорциум ALARO

Участие в международных проектах
ВМО: S2S, YOPP SiteMIP, APCC

Внутрироссийское сотрудничество:
НИВЦ МГУ, ЦАО, ...



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).
- **Набор параметризаций 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**

Собственные параметризации и усовершенствования параметризаций процессов подсеточного масштаба

- Модификация переноса импульса в параметризации глубокой конвекции
- Уточнение эффекта осадков на приземную турбулентность
- Реализован учет угла наклона подсеточной орографии в параметризации ОГВС (аналогично параметризации ЕЦСПП)
- Параметризация подынверсионной облачности
- Параметризация морского льда
- Параметризация ледников (Антарктида и Гренландия) – пока в опытном режиме

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

Применение модели ПЛАВ в Гидрометцентре в 2019 г



Среднесрочный прогноз погоды

0.225° долг., 0.16°-0.24° шир. 51 уровень -
20-25 км, уступала примерно в 2 раза среднему
мировому уровню

Система ансамблевого среднесрочного прогноза на основе ПЛАВ

- не существовала

Субсезонный и сезонный долгосрочный ансамблевый прогноз

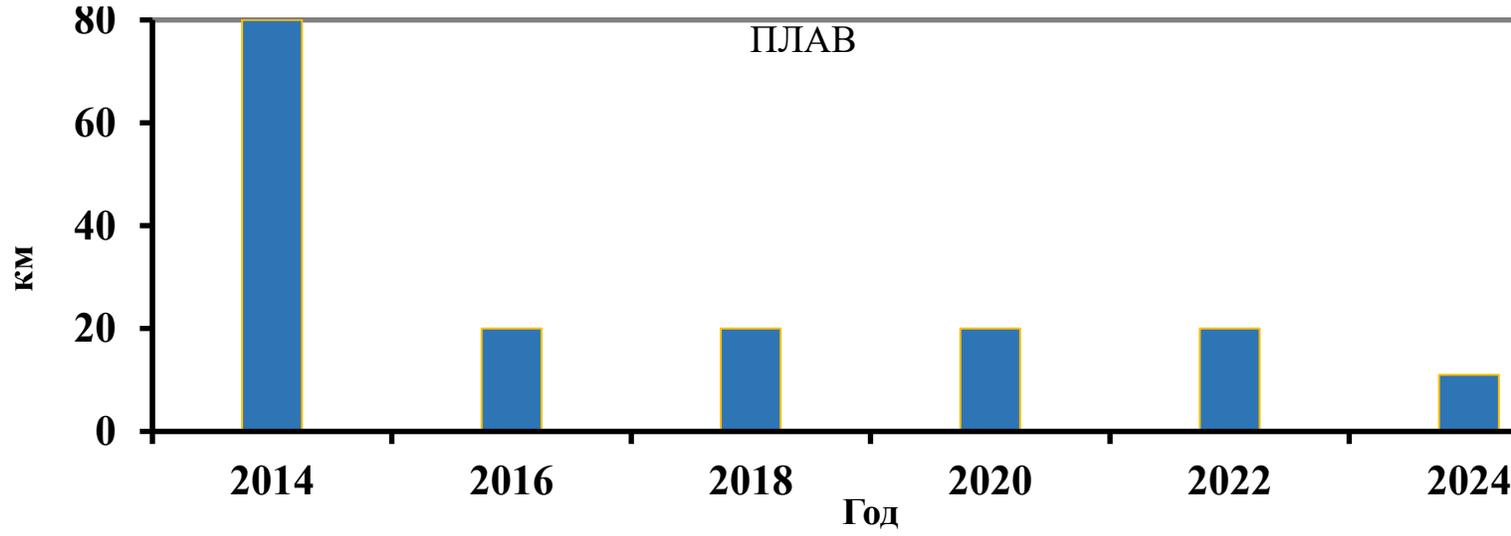
1.4°x1.1 L28

Верхний расчетный уровень на 5 гПа



Горизонтальное разрешение модели ПЛАВ (внизу) и среднекв. ошибка прогноза H500 на 72 ч по области 20°-90° с.ш. (вверху)

Скользящее среднее за прошедшие 12 мес.



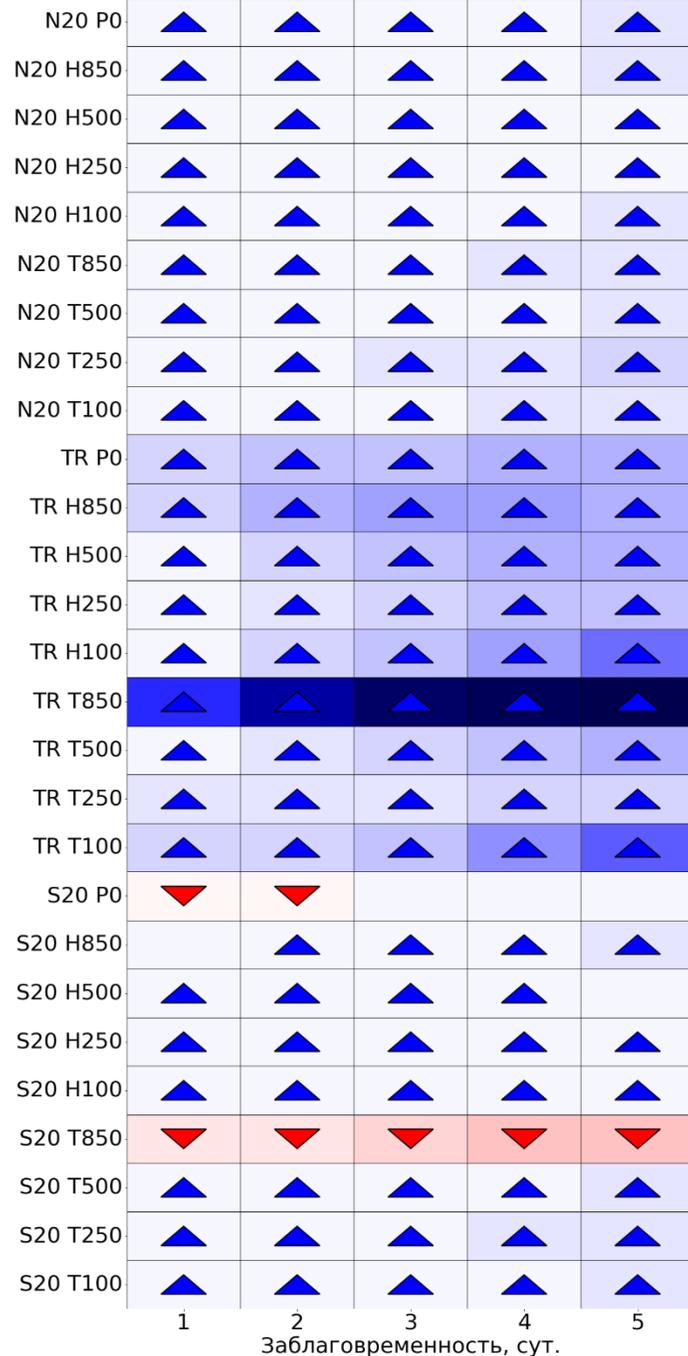
Модель среднесрочного прогноза ПЛАВ10

- 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)

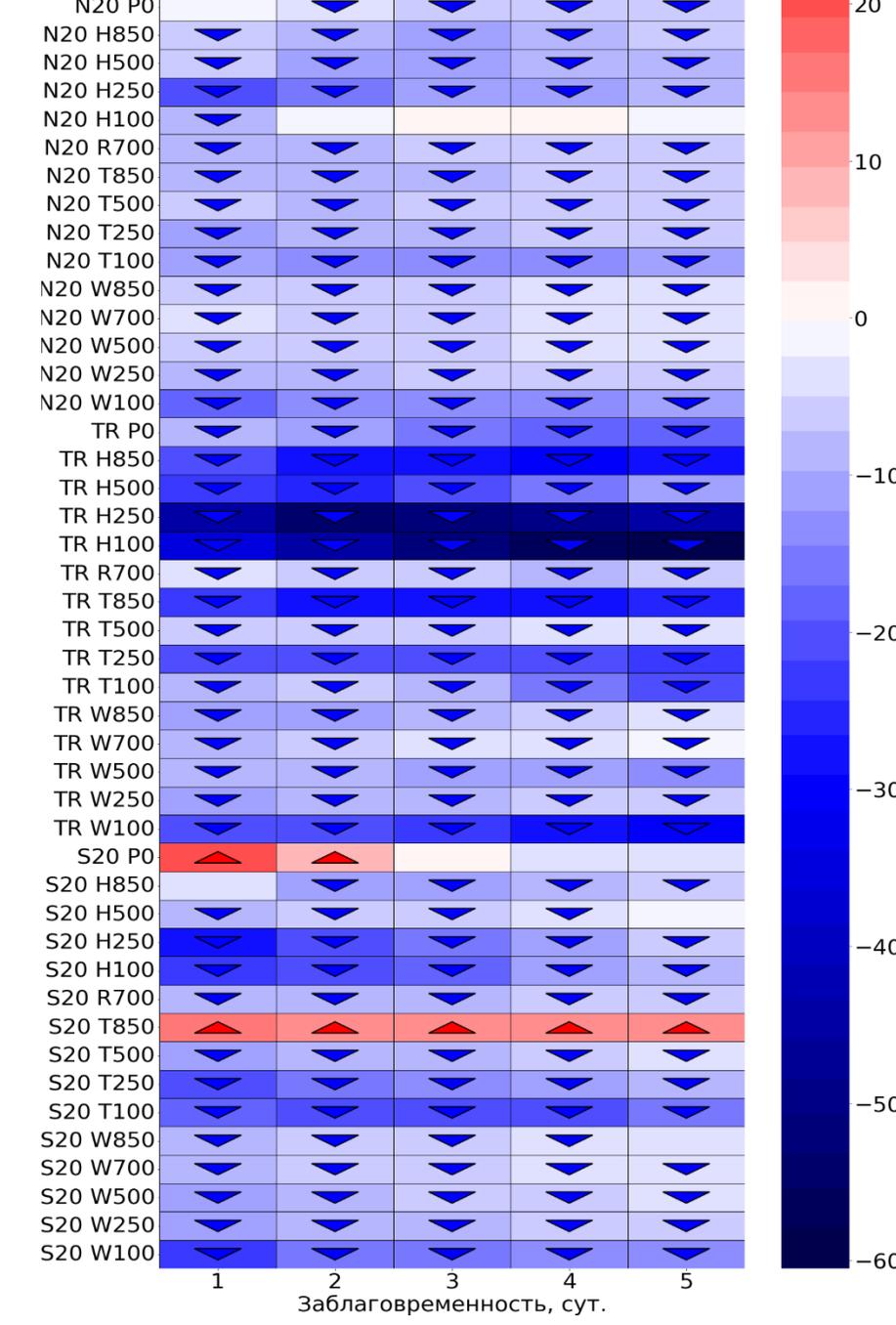
Слева – ACC, справа RMSE

S20 – 90-20° ю.ш.,
 TR – 20° ю.ш. – 20° с.ш.,
 N20 – 20-90° с.ш.

Изменение ссаф в ПЛАВ10 по отношению к ПЛАВ20
 в среднем за октябрь-декабрь 2024



Изменение СКО в ПЛАВ10 по отношению к ПЛАВ20
 в среднем за октябрь-декабрь 2024



Отключение России от источников информации:

- Начальные и граничные условия для модели регионального прогноза ICON; уменьшение кол-ва данных для COSMO
- Данные по ТПО и морскому льду OSTIA
- Европейские спутники с шагом в 15 мин
- **Всемирный центр зональных прогнозов (гражданская авиация)**

Статья в газете и на сайте РБК

<https://www.rbc.ru/newspaper/2023/10/09/651297239a79476fb5ad3fb3>

Как Россия адаптировалась к отключению

В России сейчас используется отечественная продукция в области авиационных прогнозов, разработанная структурными подразделениями Росгидромета, сообщили РБК в пресс-службе Минприроды (в его ведении находится Росгидромет). «Качество прогнозов находится на самом высоком уровне и не уступает зарубежным аналогам», — заверили в ведомстве.

В пресс-службе Росгидромета уточнили, что автономная российская система зональных прогнозов была введена в эксплуатацию «в течение нескольких дней» после отключения SADIS. «Продолжился выпуск карт особых явлений и формирование необходимых для авиации полей метеорологических параметров на различных эшелонах полета», — отметили в пресс-службе.

В Минприроды сообщили, что в Гидрометцентре России (учреждение Росгидромета) совместно с Институтом вычислительной математики РАН была разработана глобальная полулагранжевая конечно-разностная модель прогноза полей метеорологических элементов в версии с постоянным разрешением (модель ПЛАВ). По данным института, модель была внедрена в оперативную технологию Гидрометцентра в 2010 году, улучшенная ее версия — в 2016-м. Глобальная система прогнозов ПЛАВ используется для среднесрочных прогнозов погоды (до десяти суток) и долгосрочных прогнозов (до сезона) по всему земному шару, указали в министерстве. «В связи с приостановкой доступа для России к продукции Всемирного центра зональных прогнозов (Лондон), необходимой для выполнения полетов воздушных судов, создана Российская система зональных прогнозов, в которой используется продукция глобальной модели ПЛАВ», — прокомментировали в Минприроды.

Специализированные прогнозы для гражданской авиации

- Ветер и температура на эшелонах полета (гораздо больше уровней, чем в прогнозах общего назначения; шаг по вертикали 300м)
- Поле максимального ветра
- Высота максимального ветра
- Высота тропопаузы
- Верхняя граница облачности
- Ряд характеристик на основе вышеуказанных

Заблаговременность 24-72 часа (с 2028 – до 120 час)

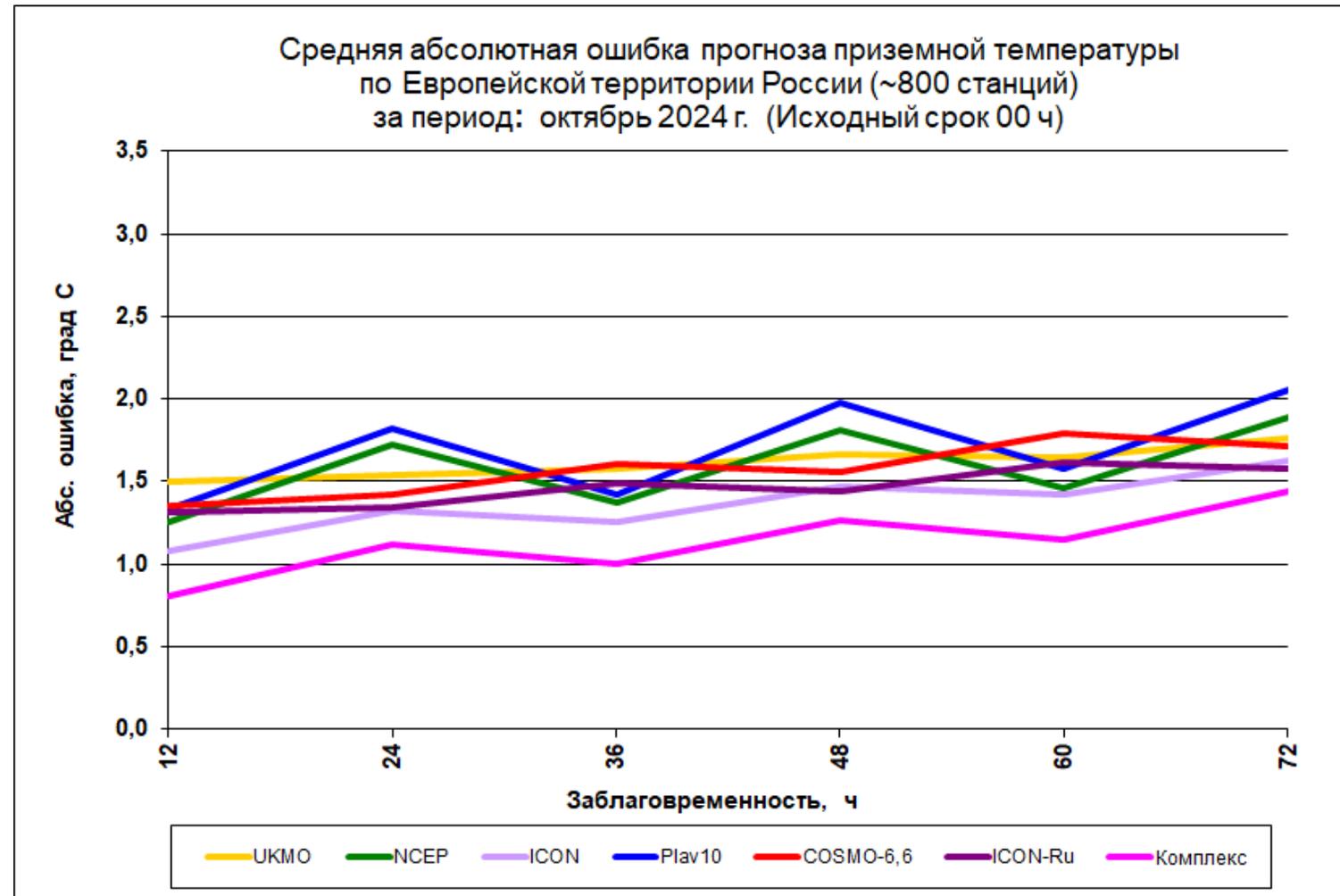
Метрики ошибок: как правило, не менее 80/90% узлов сетки, в которых отклонение от факта не превышает порога ошибки

ПЛАВ10 в конце 2024-2025 году достигла порога ИКАО 90% по прогнозу модуля скорости макс. ветра

Коррекция настроек пограничного слоя модели ПЛАВ10

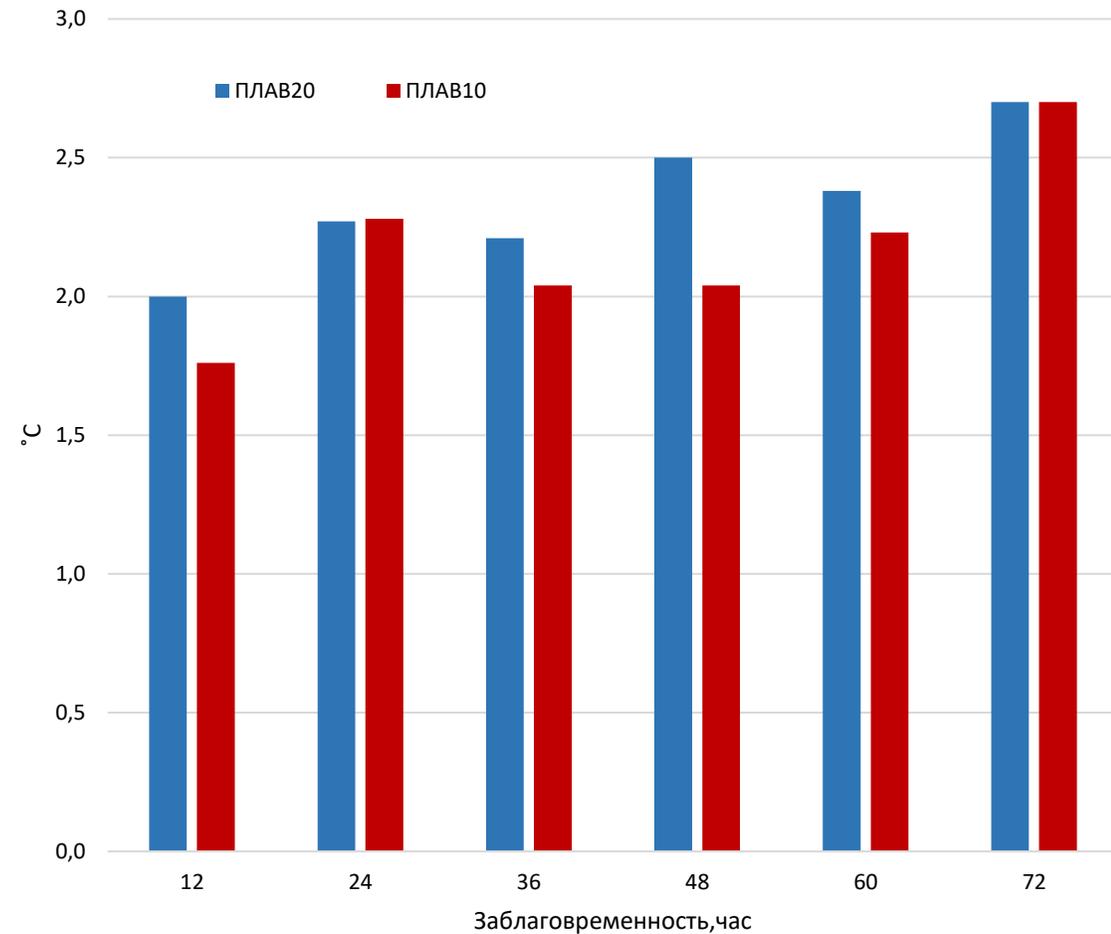
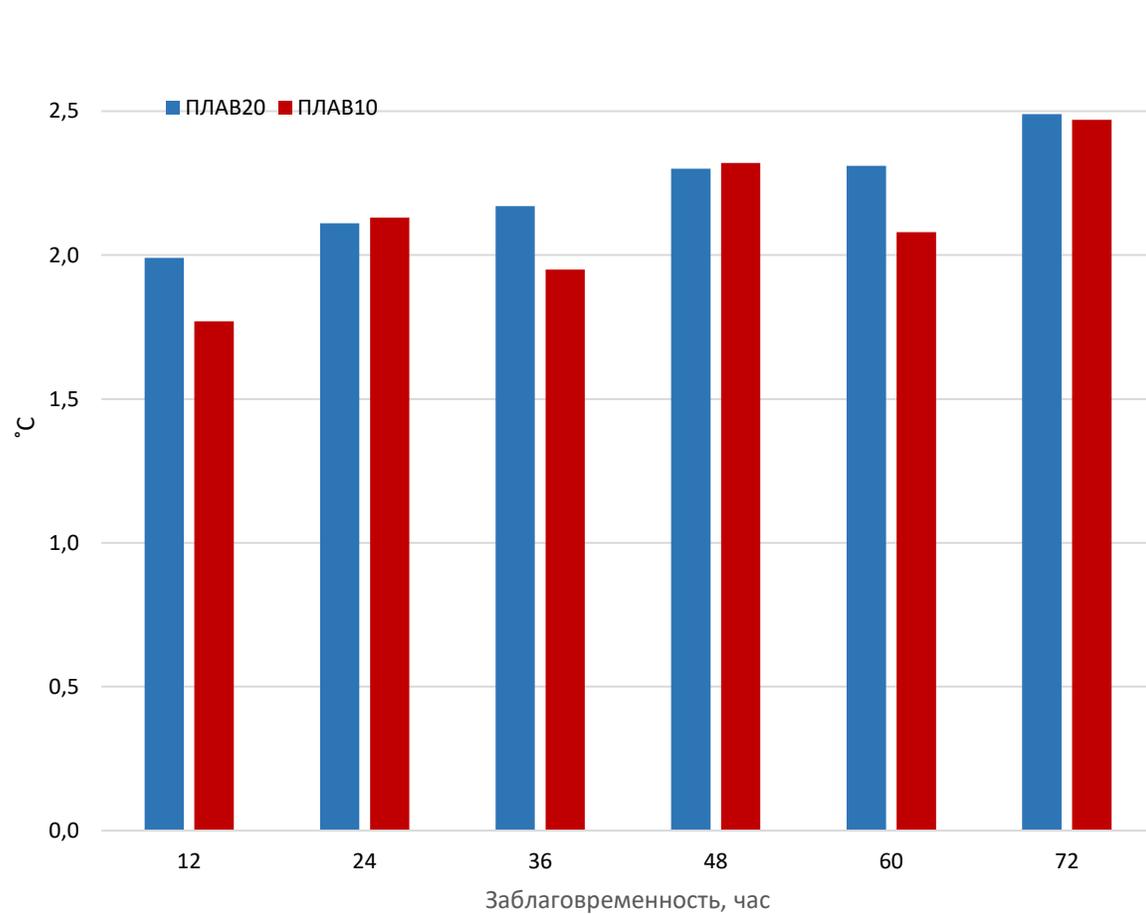
- Оценки оперативных прогнозов за июнь и июль 2024г по ETR были заметно хуже, чем по азиатской части России и заметно хуже остальных моделей
- Эксперименты Д.Г.Чечина (ИФА РАН) 2024г с одноколоночной версией ПЛАВ показывали на недостаточное перемешивание в пограничном слое.

Ревизия и диагностика параметризации пограничного слоя (Р.Ю.Фадеев) => настройки профилей коэфф. обмена => ошибки прогноза T2м уменьшились.



Абсолютная ошибка прогноза T2м за октябрь-декабрь 2024 года по модели ПЛАВ20 и ПЛАВ10, старт 00 часов ВСВ

Слева – 35-70° с.ш., 1-50° в.д., справа – 48-75° с.ш., 20-170° в.д.



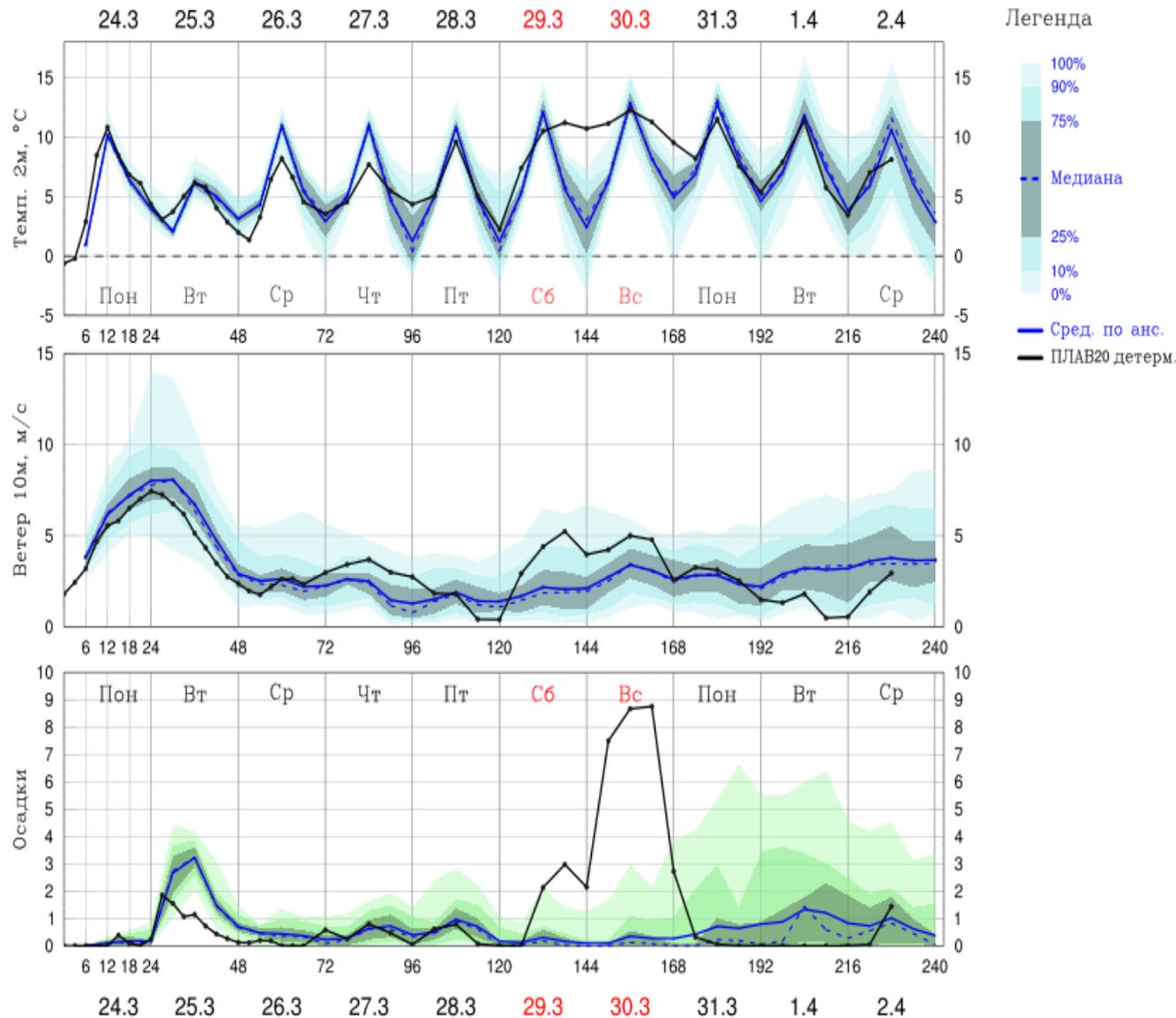
Метеостанция МОСКВА, ВДНХ (27612)

Прогноз от 0 ВСВ 24.3.2025 на 240 час.

Высота 147 м.
55.83° с.ш., 37.62° в.д.
Москва

модель
ПЛАН072L96
Размер ансамбля 40

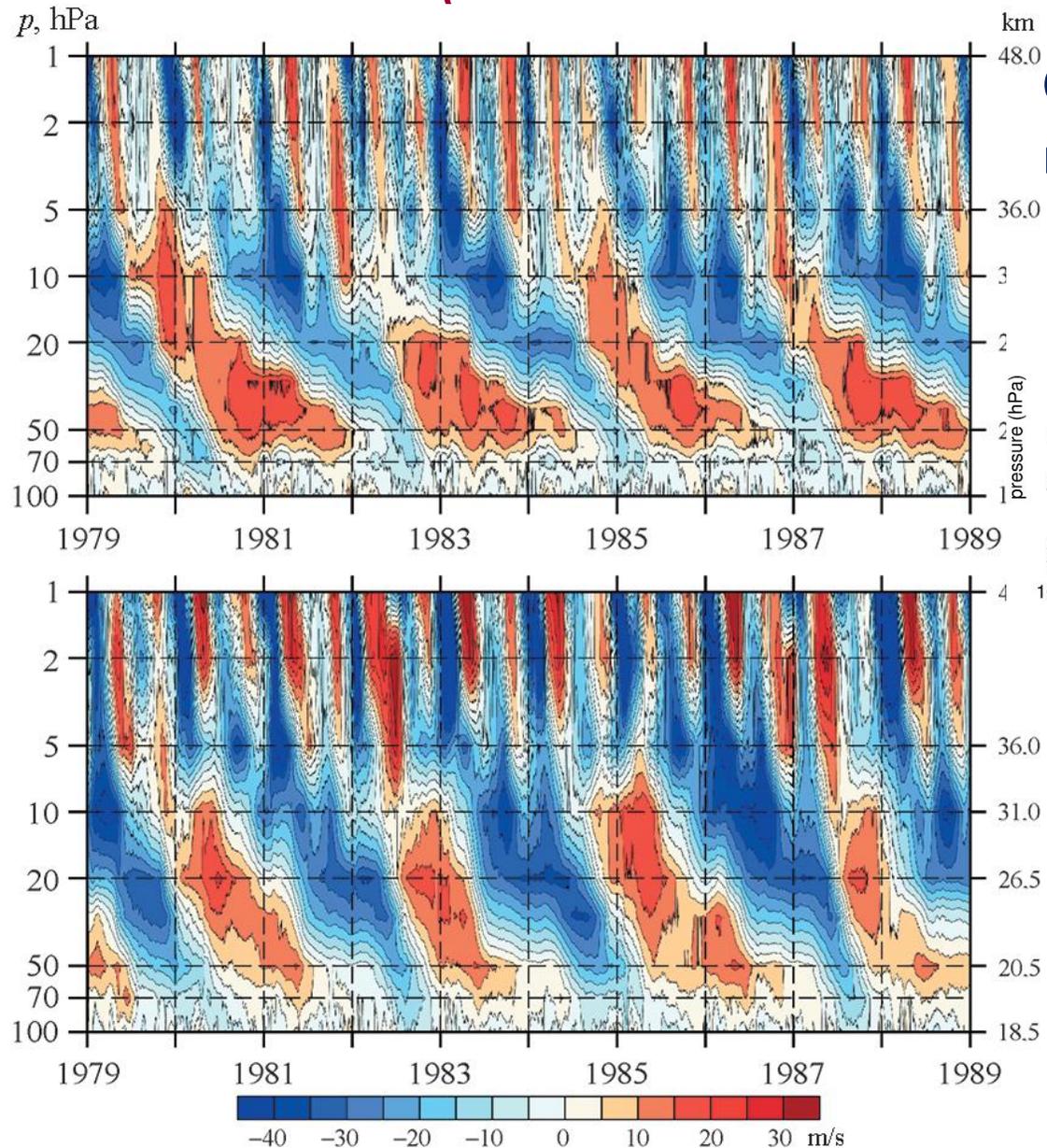
Пример метеограммы ансамблевого прогноза ПЛАН



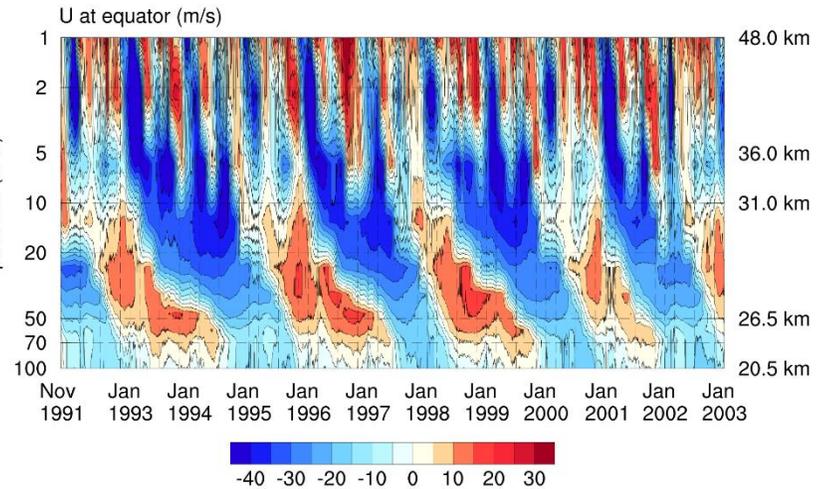
Версия для долгосрочного прогноза ПЛАВ072L96

- Принята решением ЦМКП 22.11.2023 г.
- Метеорология и гидрология №7 2024 г.

Улучшение воспроизведения КДК (В.В.Шашкин с соавт., МиГ 2023)



Слева – результат 2018 г,
внизу -2023



SL-AV – top,
ERA I - bottom

Сравнение взаимодействия стратосферы и тропосферы в моделях субсезонного прогноза S2S

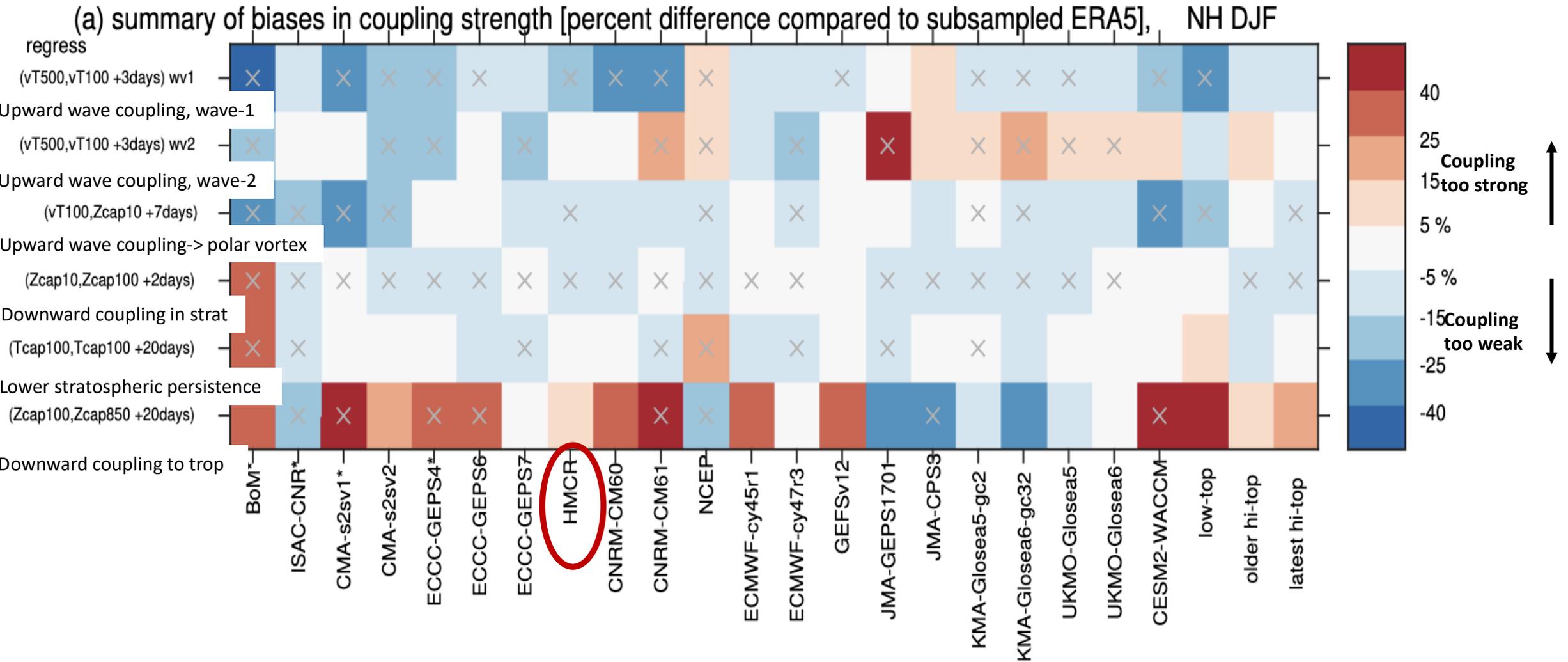
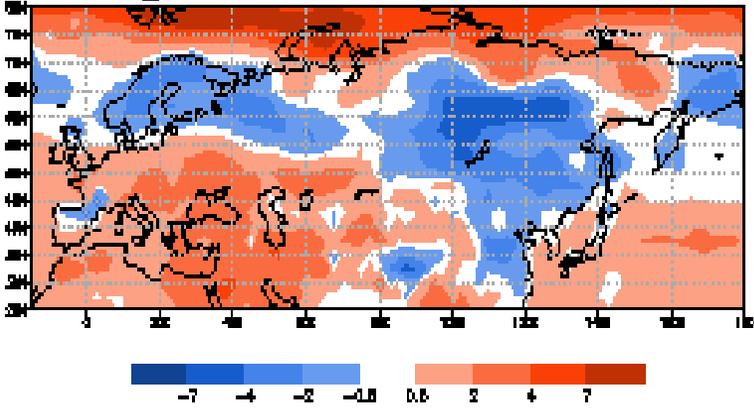


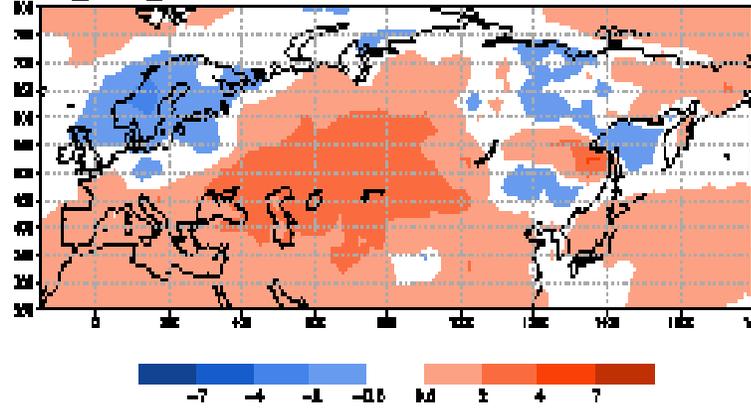
Рисунок из препринта Garfinkel C. I., Lawrence Z. D., Butler A. H. et al. A process-based evaluation of biases in extratropical stratosphere-troposphere coupling in subseasonal forecast systems, EGU sphere [preprint], 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1762>

Прогноз на месяц Т2м по Евразии с 30.11.2023г. с 0 (вверху) и 2-недельной заблаговременностью (справа), факт (слева)

WEEK_1-4, FACT ANOMALY, trsf 30november 2023

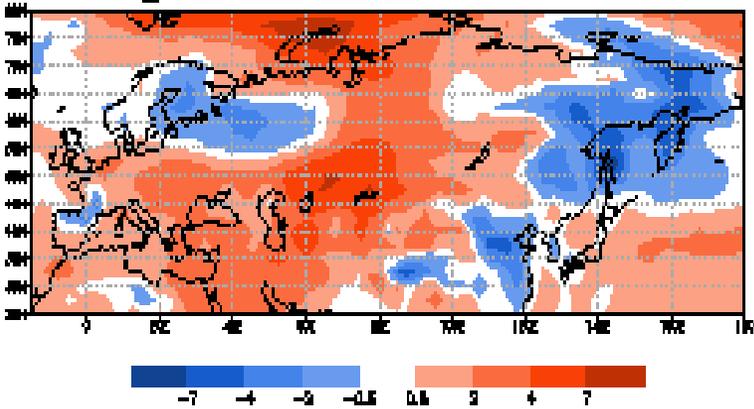


HMC_WEEK_1-4, FORECAST ANOMALY, trsf 30november 2023

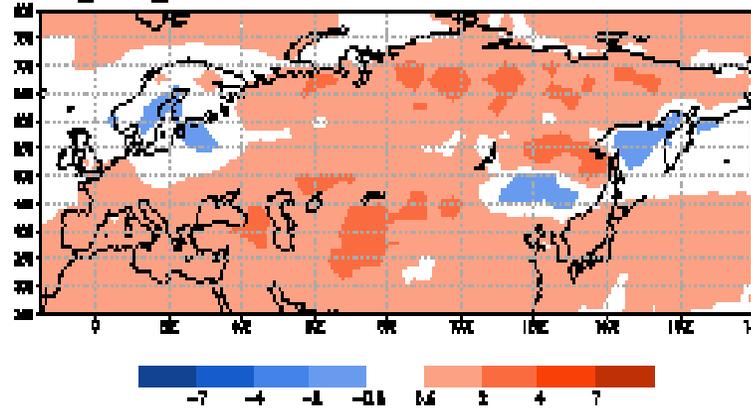


(<https://seakc.meteoinfo.ru/en/forecast-verifications/subseasonal-forecast-verification>
авторы: Е.Н.Круглова, Е.Набокова)

WEEK_3-6, FACT ANOMALY, trsf 30november 2023



HMC_WEEK_3-6, FORECAST ANOMALY, trsf 30november 2023



Прогнозы модели ПЛАВ от 05.09.2024г на 16-23.09 (слева) и на 23-30.09 (справа) на сайте ведущего центра ВМО по субсезонным прогнозам <https://charts.ecmwf.int/wmo>

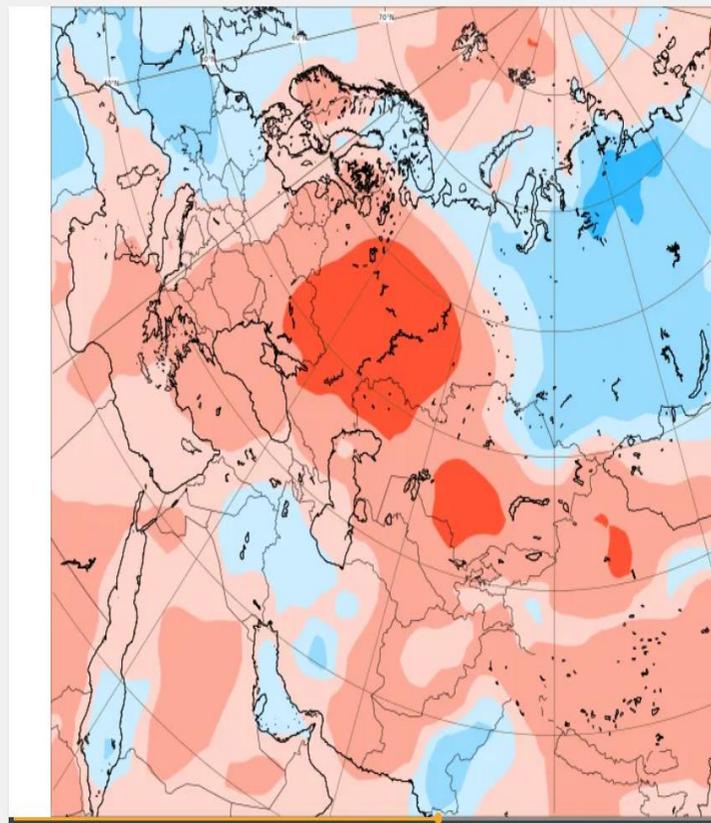


Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time
Thu 05 Sep 2024

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

Area
Eurasia

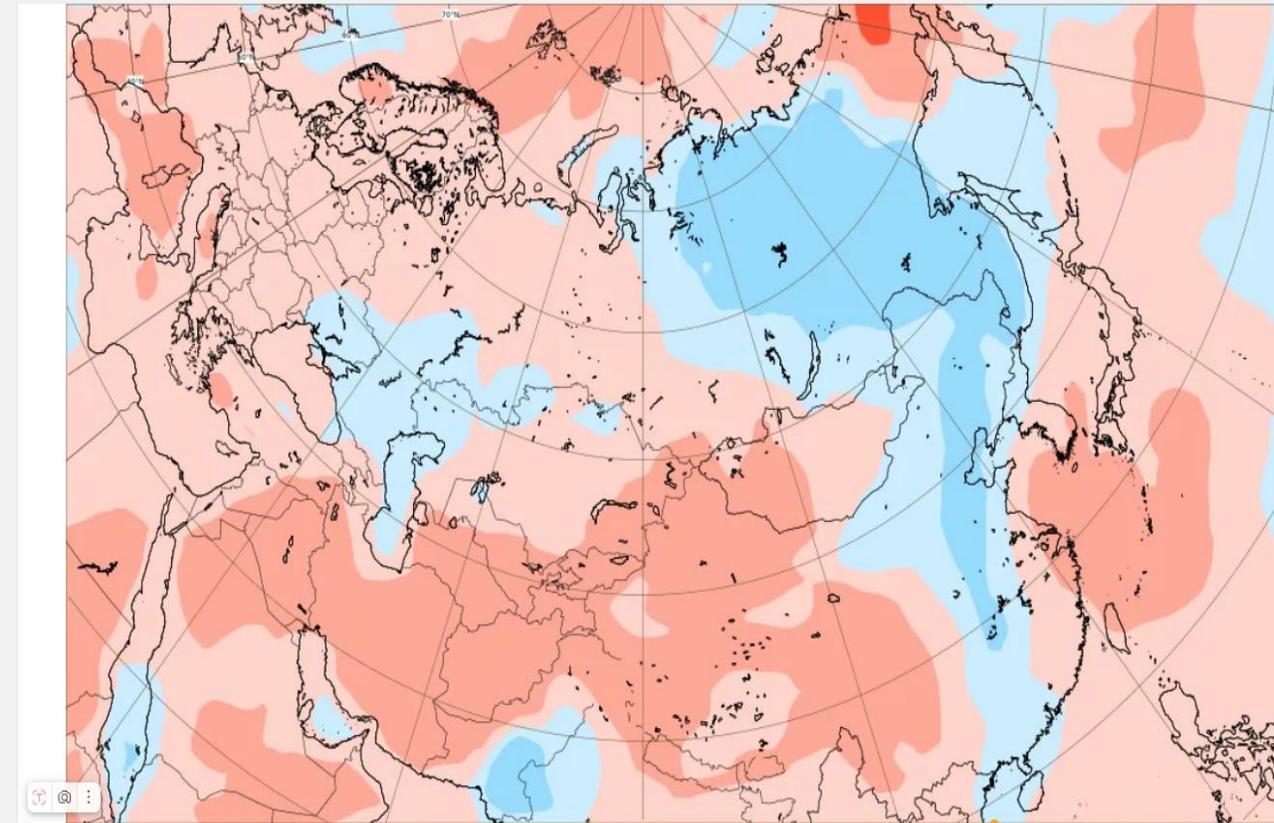


Moscow: 2m temperature weekly mean anomalies

Base time
Thu 05 Sep 2024

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

Area
Eurasia



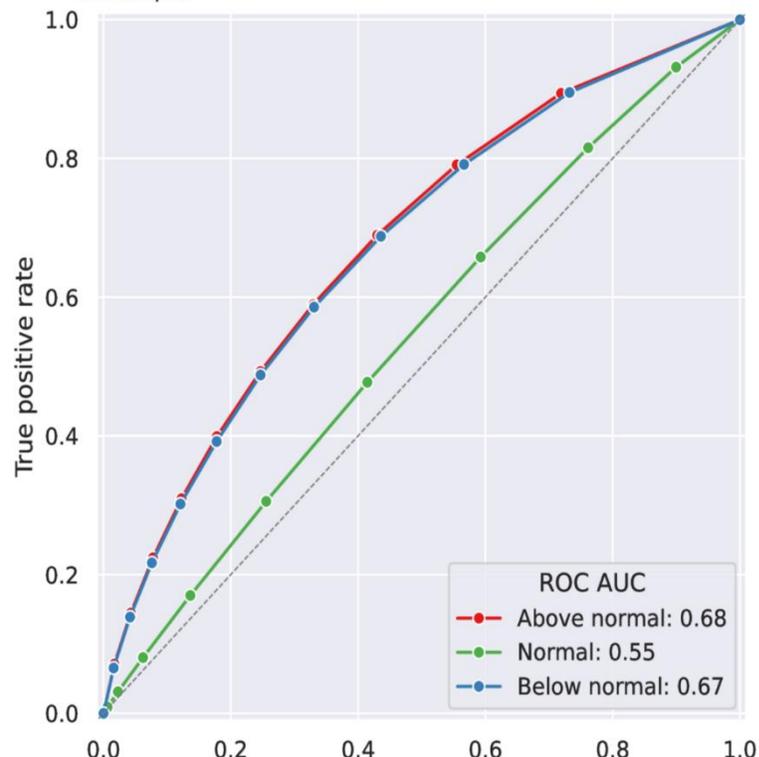
Вторая неделя, зима, ROC T2м

<https://charts-test.ecmwf.int/wmo/charts>

Moscow - Discrimination of tercile category forecasts

ROC Curve for 2-metre temperature

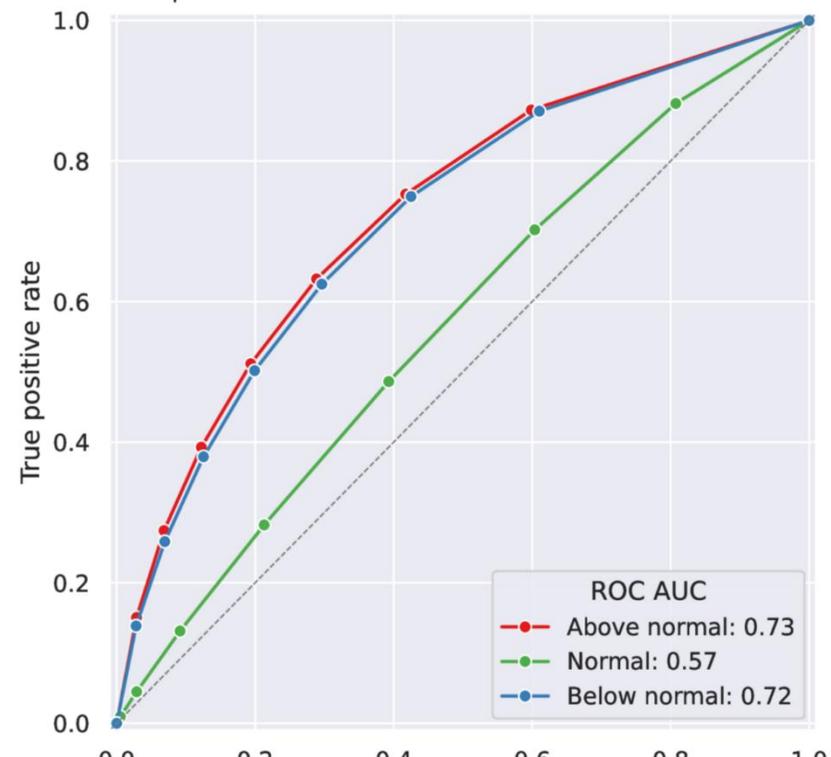
Center: HMCR; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h; Region: Northern Extratropics



Exeter - Discrimination of tercile category forecasts

ROC Curve for 2-metre temperature

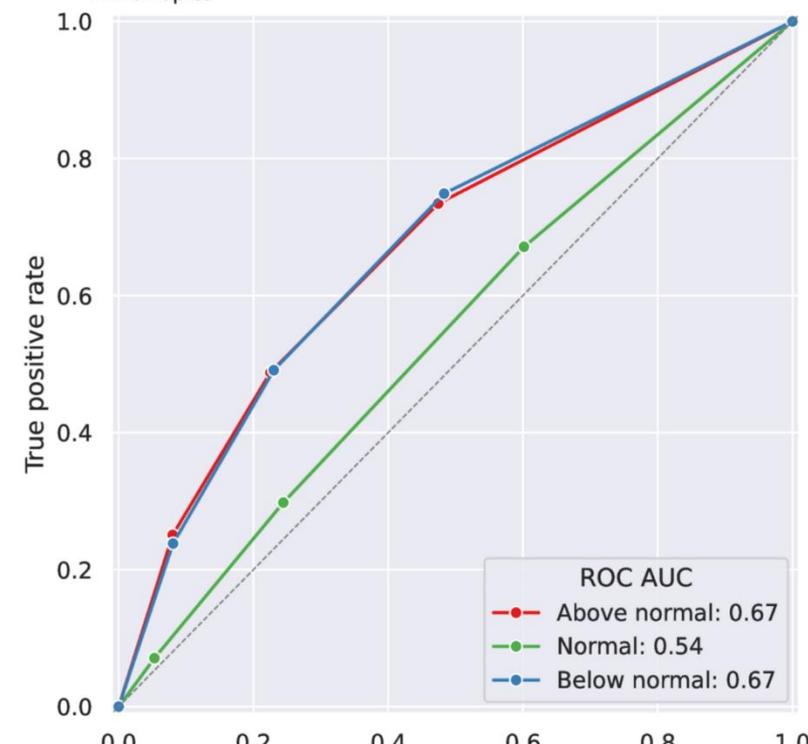
Center: UKMO; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h; Region: Northern Extratropics



Washington - Discrimination of tercile category forecasts

ROC Curve for 2-metre temperature

Center: NCEP; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h; Region: Northern Extratropics



Третья неделя, зима, ROC T2m

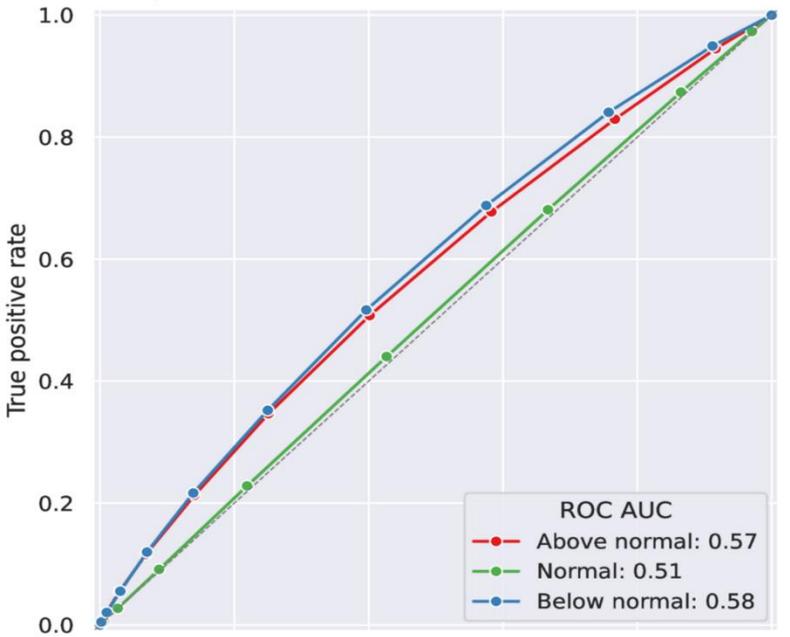
<https://charts-test.ecmwf.int/wmo/charts>

Moscow - Discrimination of tercile category forecasts Exeter - Discrimination of tercile category forecasts

Washington - Discrimination of tercile category forecasts

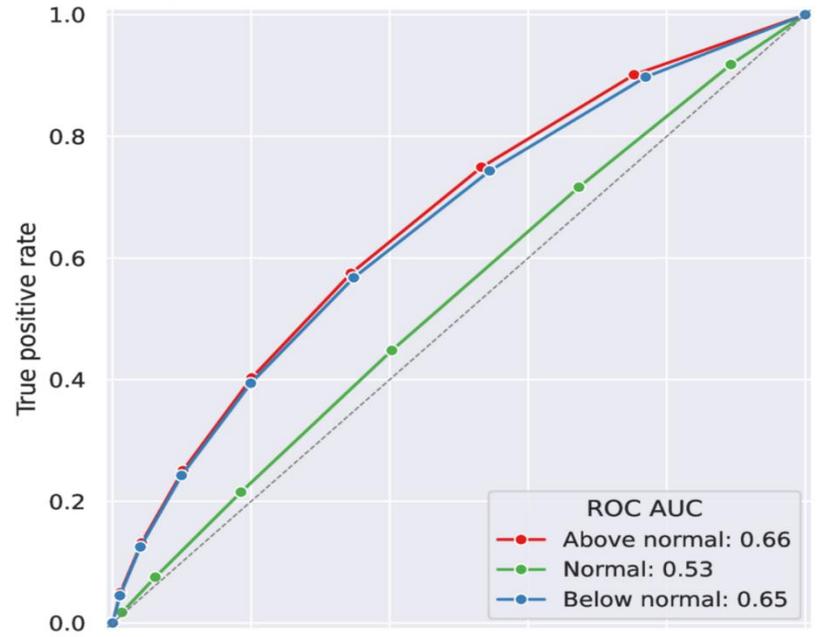
ROC Curve for Mean sea level pressure

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



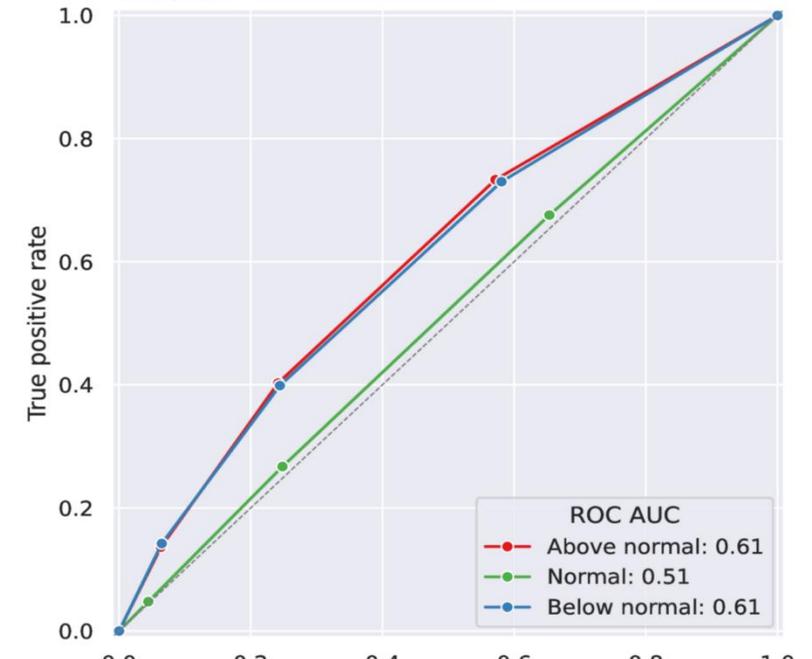
ROC Curve for 2-metre temperature

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



ROC Curve for 2-metre temperature

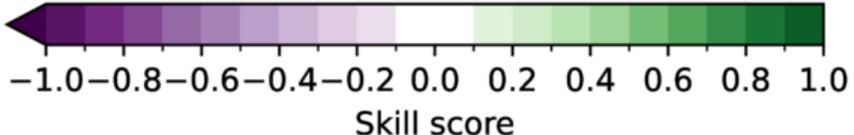
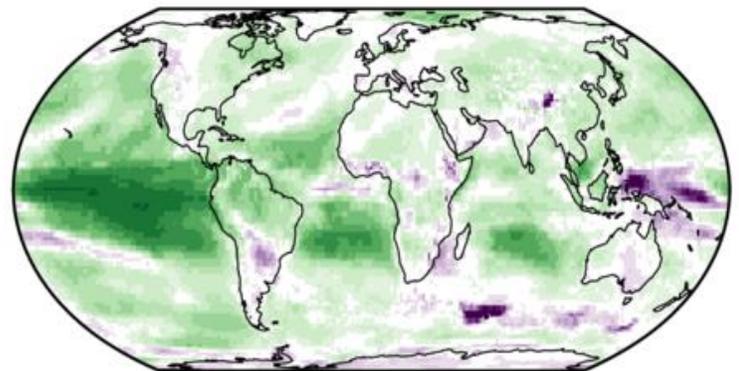
Center: NCEP; Season: DJF; Valid Range: 432-600 h; Region: Northern Extratropics



MSSS (Mean squared skill score)

Mean Squared Skill Score for 2-metre temperature
Center: UKMO; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h

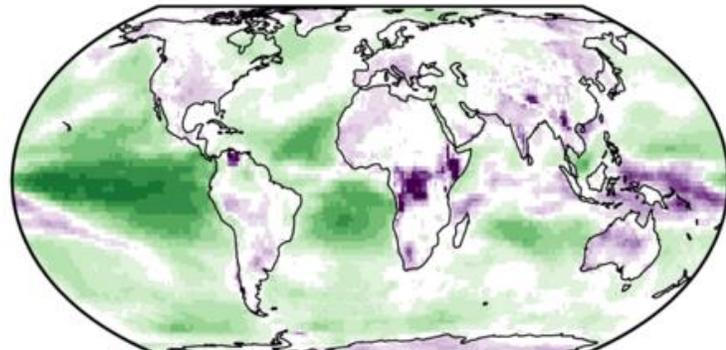
MSSS



Washington - Accuracy of the ensemble mean

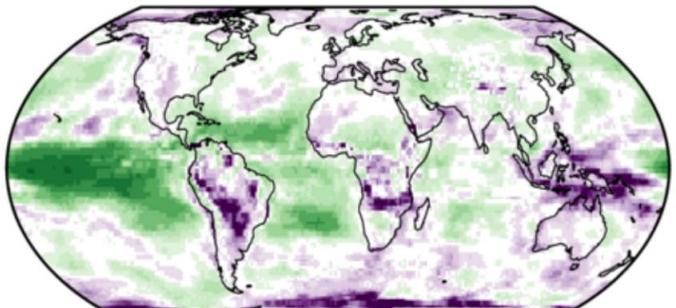
Mean Squared Skill Score for 2-metre temperature
Center: HMCR; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h

MSSS



Mean Squared Skill Score for 2-metre temperature
Center: NCEP; Season: DJF; Valid Range: 264-432 h

MSSS



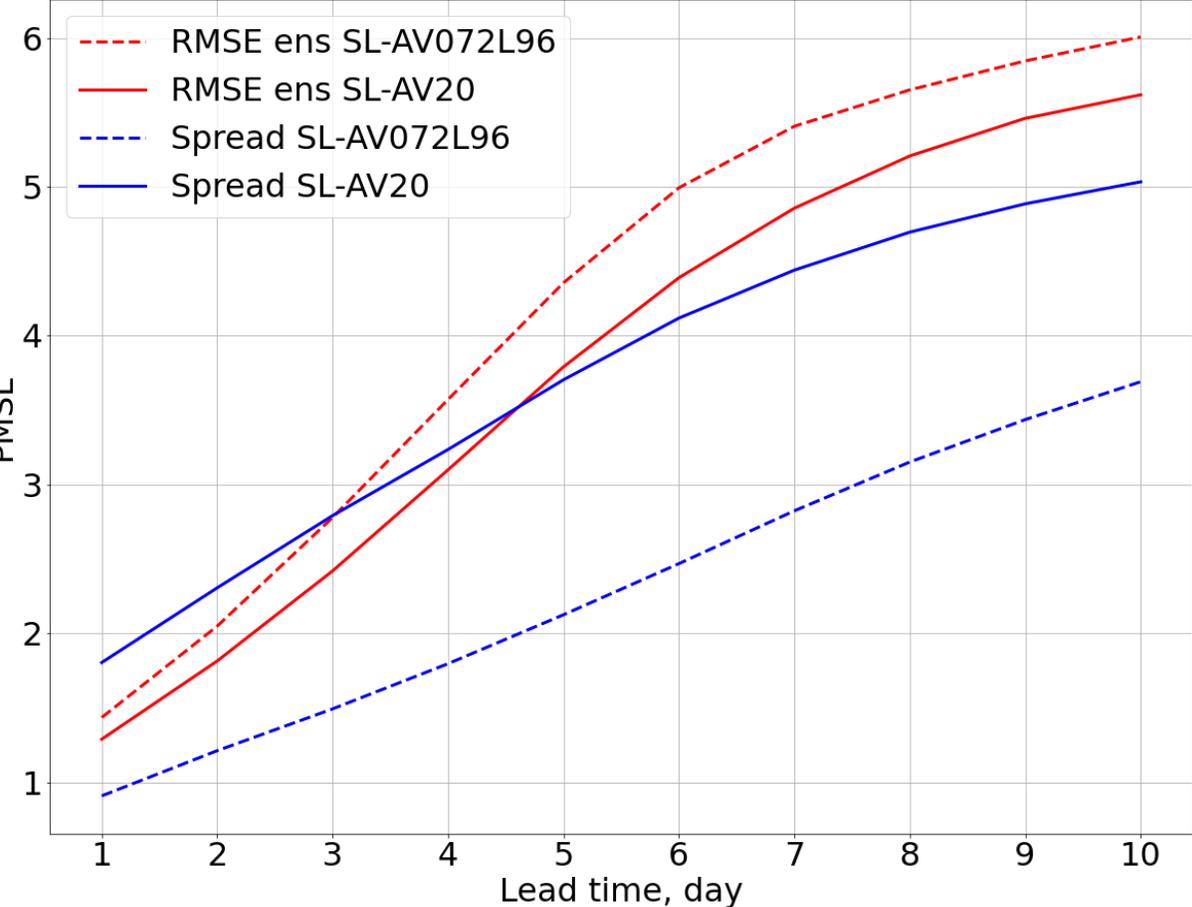
Ансамблевый среднесрочный прогноз

- Опер версия $0.9^\circ \times 0.72^\circ$, 96 уровней.
- Версия 0.225° по долготe, 0.16° - 0.24° по широте, 51 уровней – на оперативных испытаниях.
- Основное различие – новая версия использует возмущения не только в параметризациях модели, но и в динамике (исходные точки полулагранжевых траекторий. Оригинальный алгоритм!

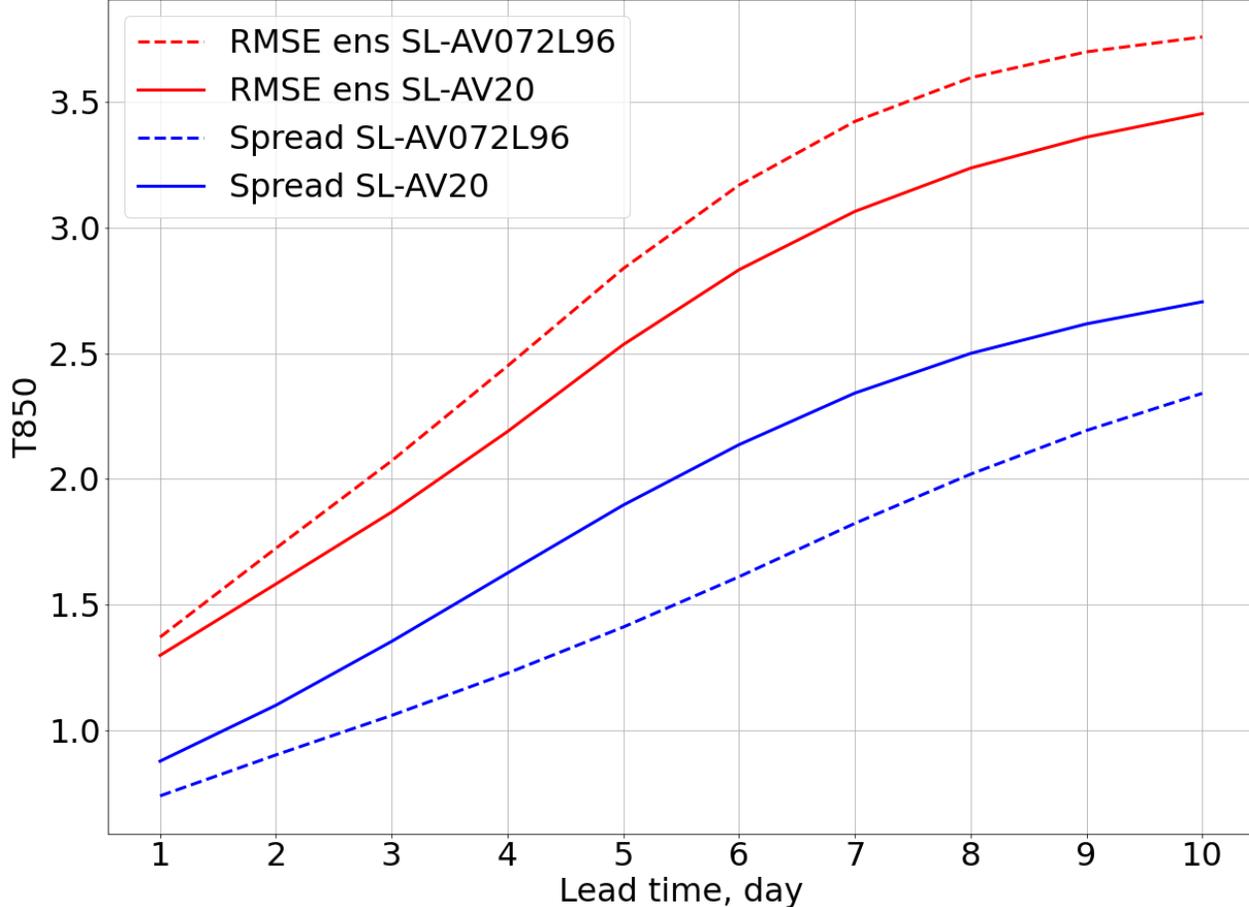
(Alipova, Mizyak, Tolstykh, Gouman, RJNAMM 2024)

Сравнение разброса и среднекв. ошибки (RMSE) систем ансам. прогноза для MSLP (слева) и T850 (справа), 20-90° с.ш.

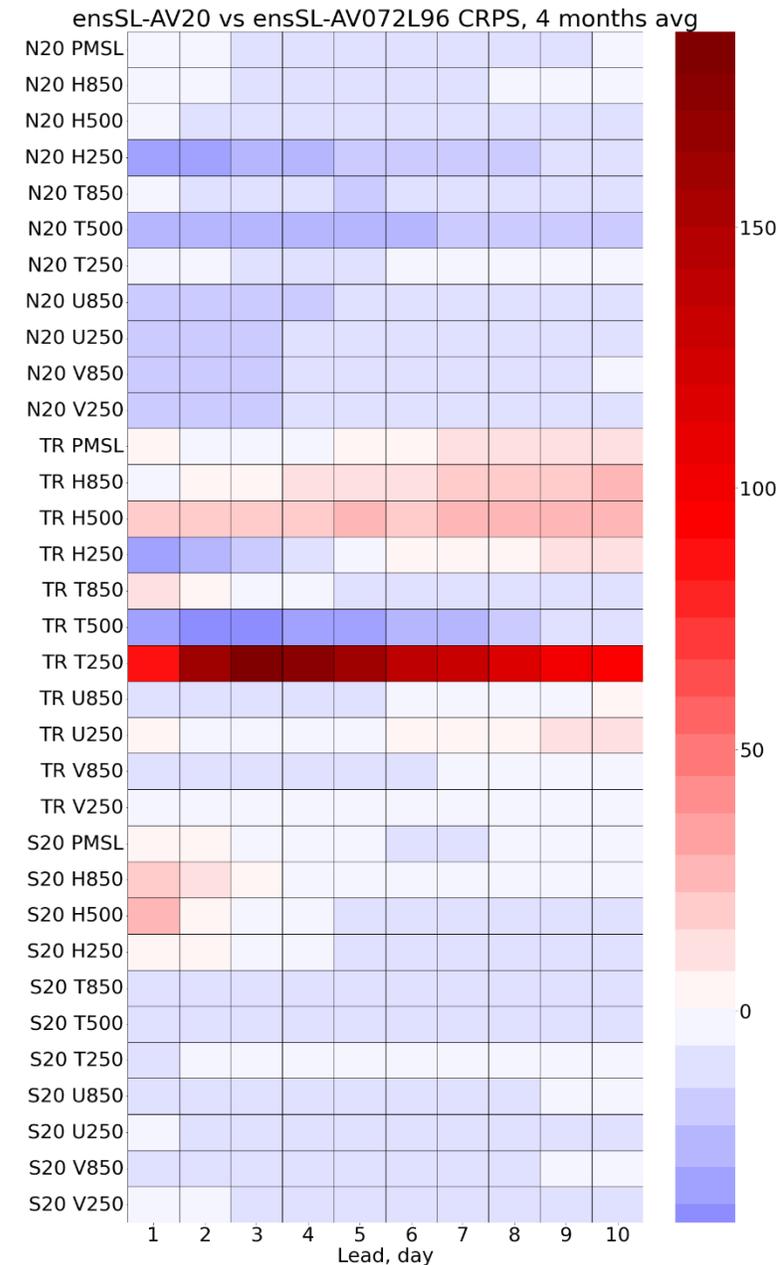
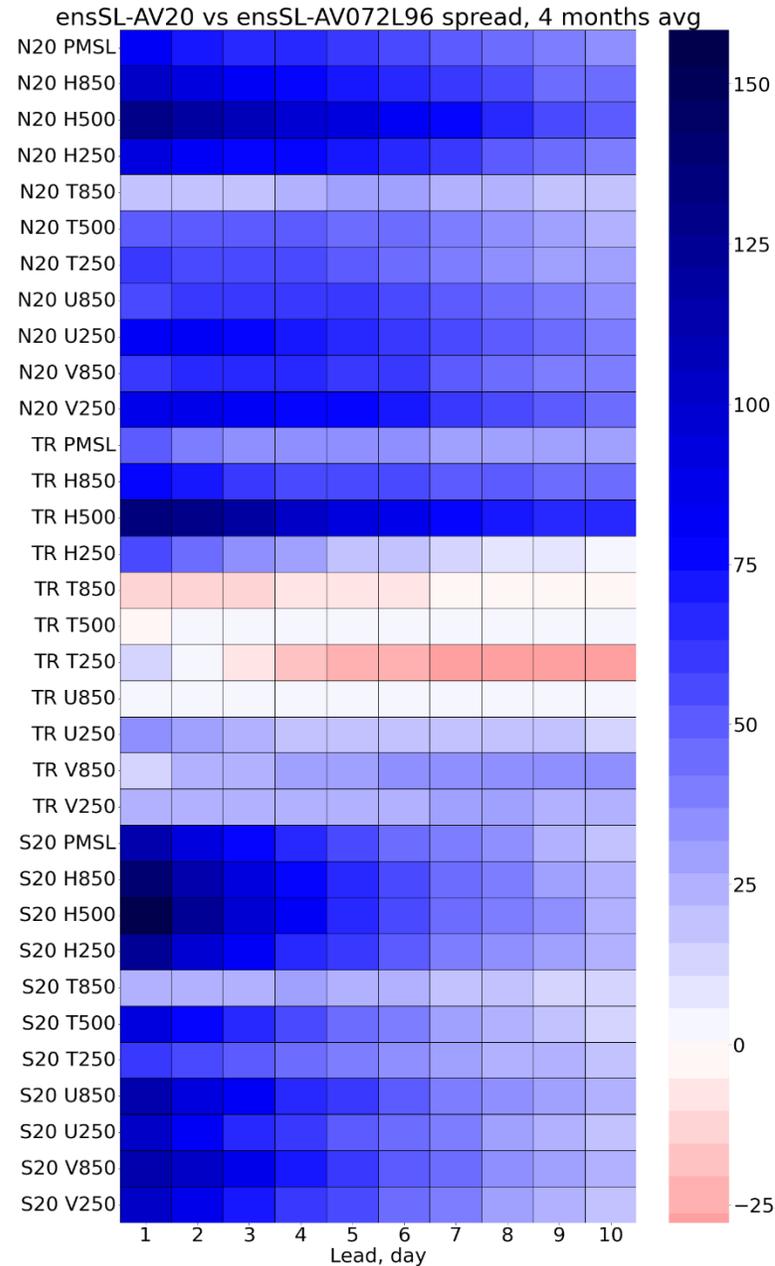
RMSE vs spread 01.05-15.06.2024 Northern PMSL



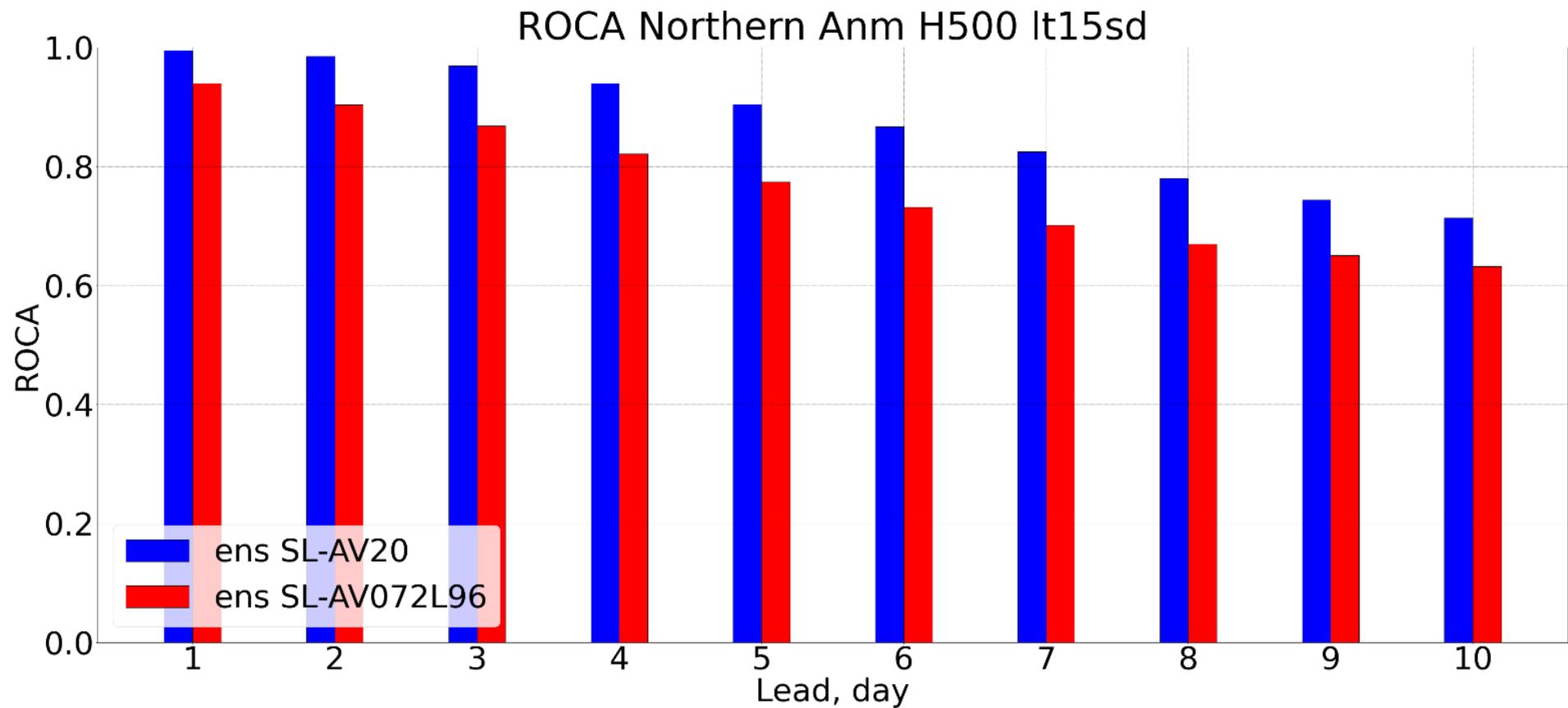
RMSE vs spread 01.05-15.06.2024 Northern T850



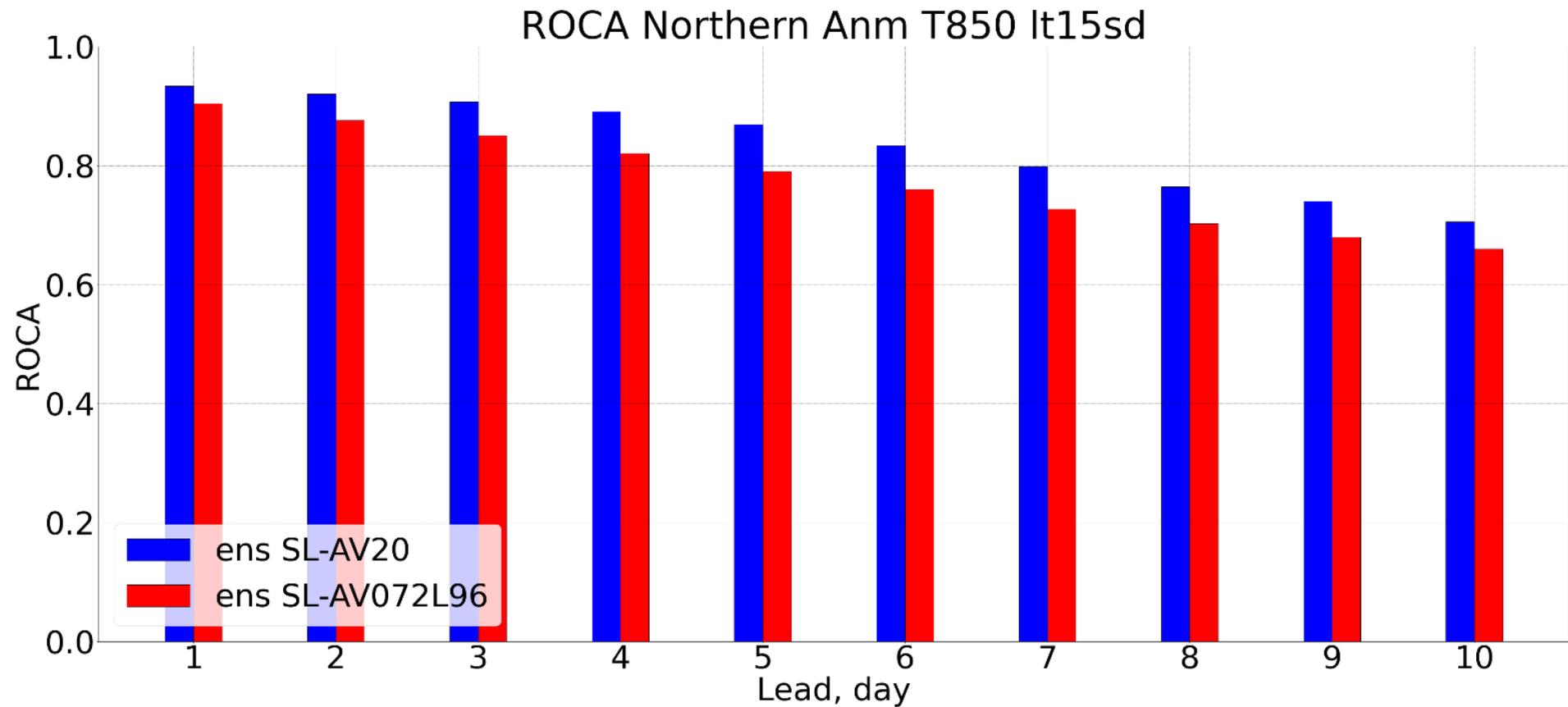
Ансамбль ПЛАВ20 vs ПЛАВ072L96 за 4 мес – разброс и CRPS



ROCA ансамбль ПЛАВ20 vs ПЛАВ072L96 за 4 месяца



ROCA ансамбль ПЛАВ20 vs ПЛАВ072L96 за 4 месяца



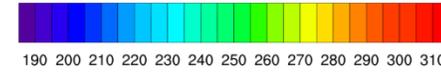
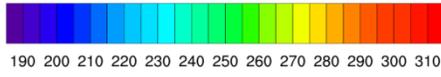
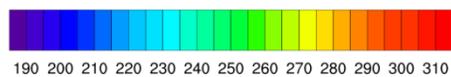
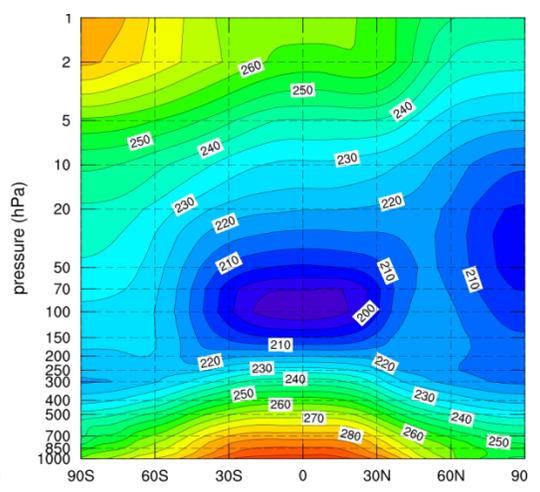
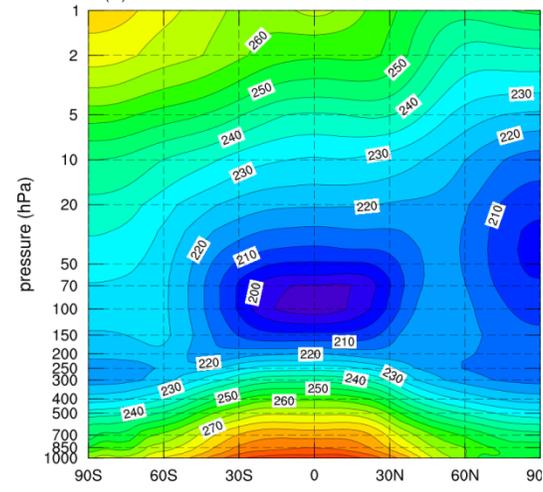
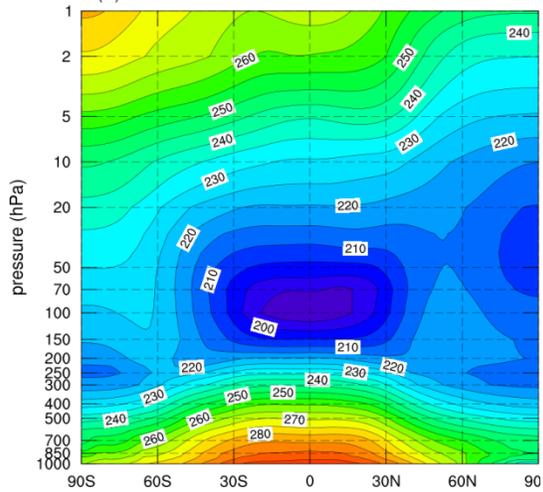
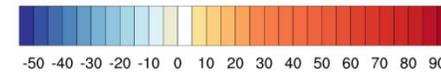
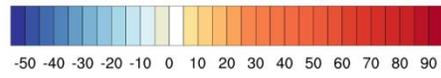
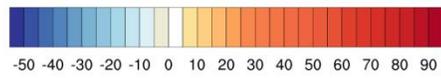
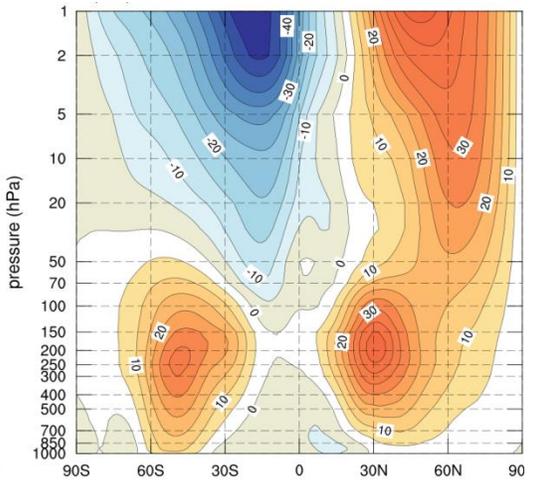
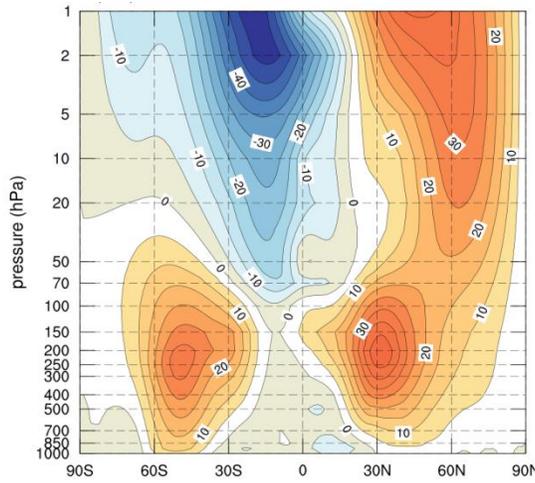
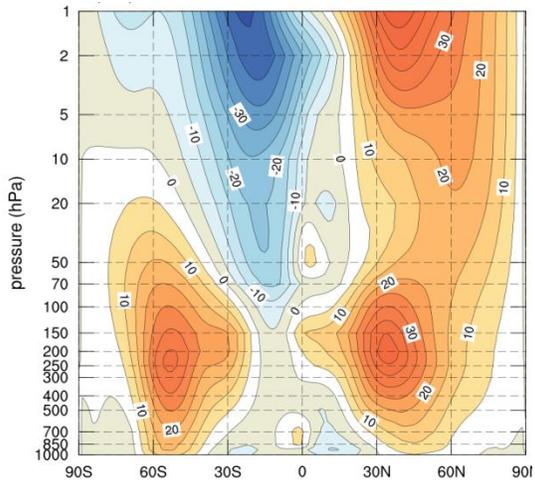
Климатические расчеты

- Без которых не были бы получены все результаты выше!

SLAV 2018 – 100 lev

SLAV 2022 – 96 yp.

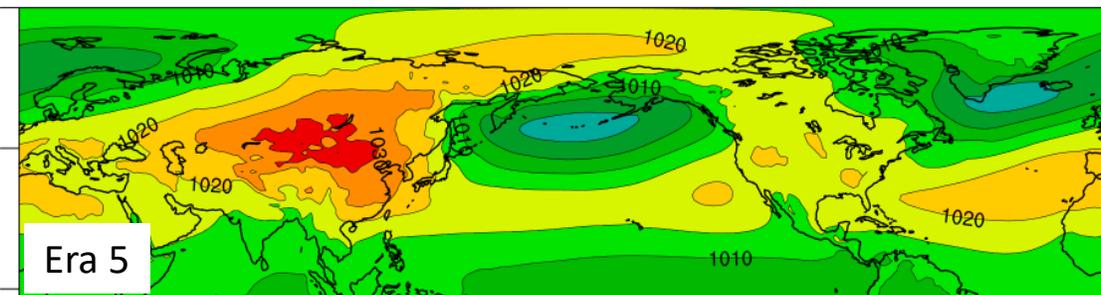
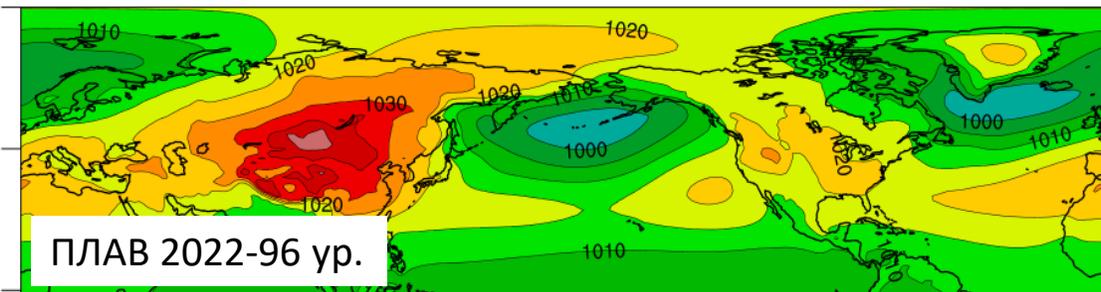
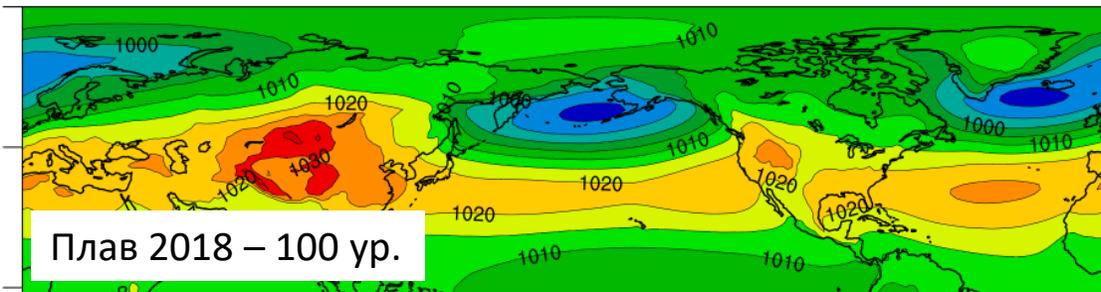
ERA5



Zonal mean wind (above) and temperature (below). DJF 1991-2020

Причины улучшений:

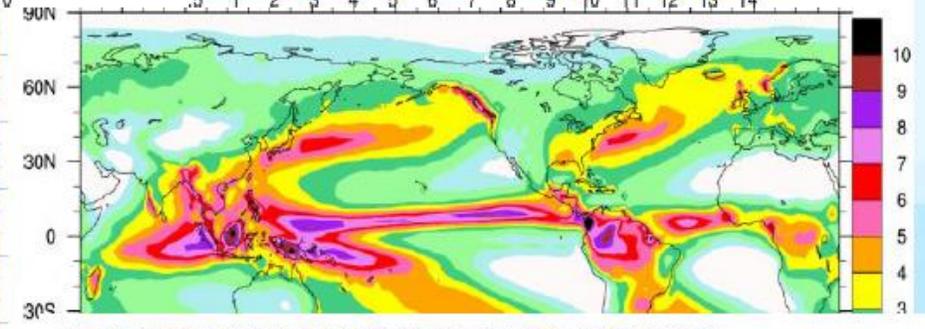
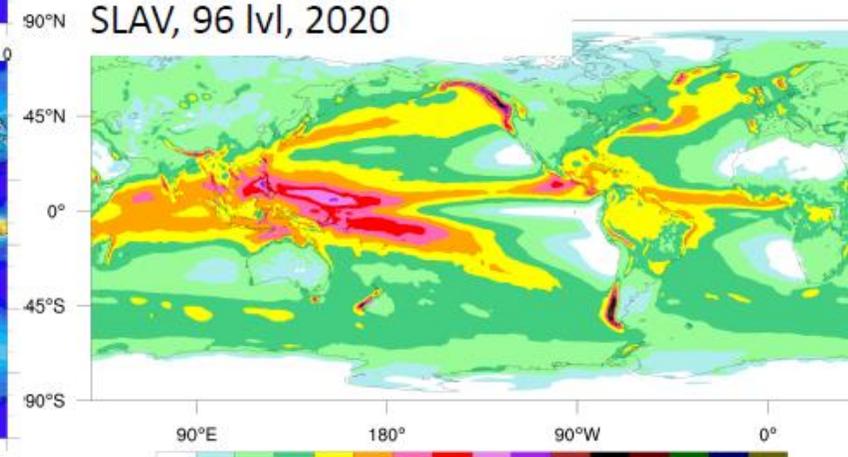
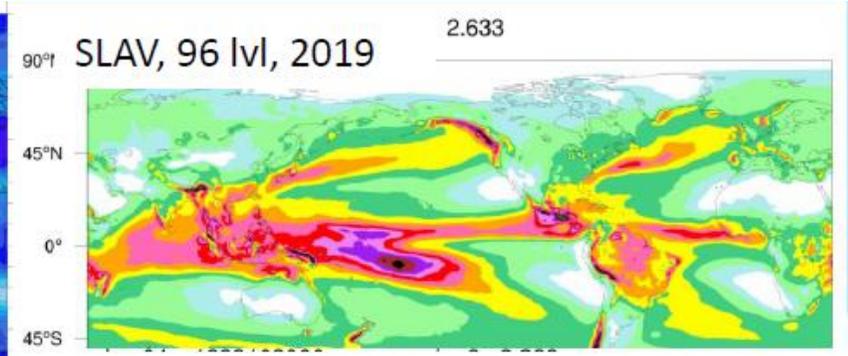
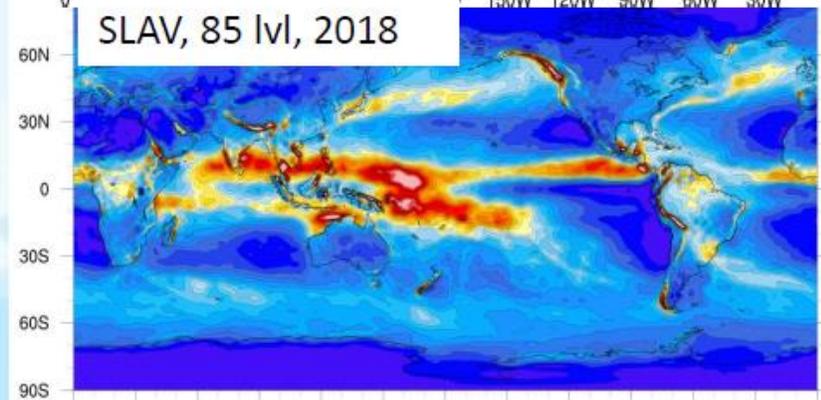
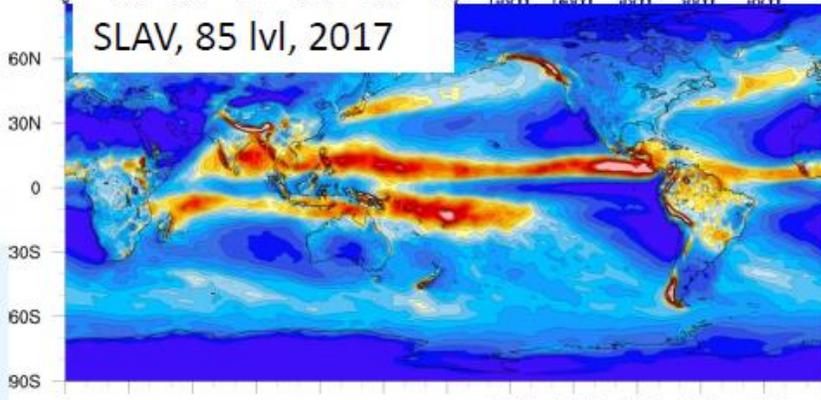
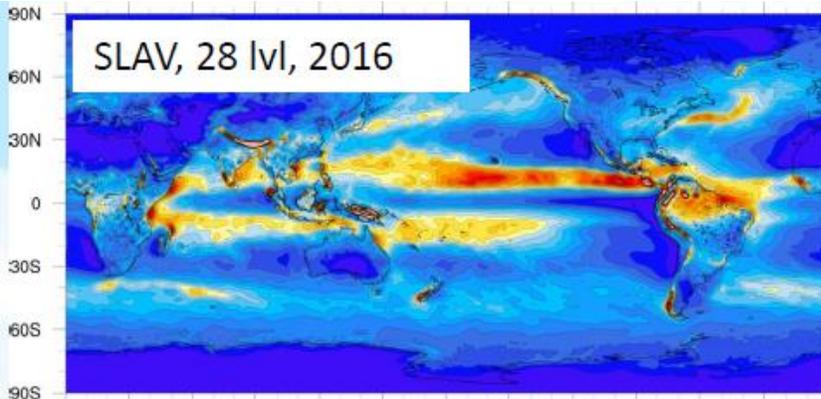
- Модификации модели, повысившие устойчивость (формулировка диффузии, исправление ошибок и др.)
- Исправление систематических ошибок поля давления на уровне моря (меньше Россби-волнового торможения в Северном полушарии),



Поле давления на уровне моря в Северном полушарии Декабрь – Февраль 1991-2017. Обратите внимание на Алеутский и Гренландский минимумы.

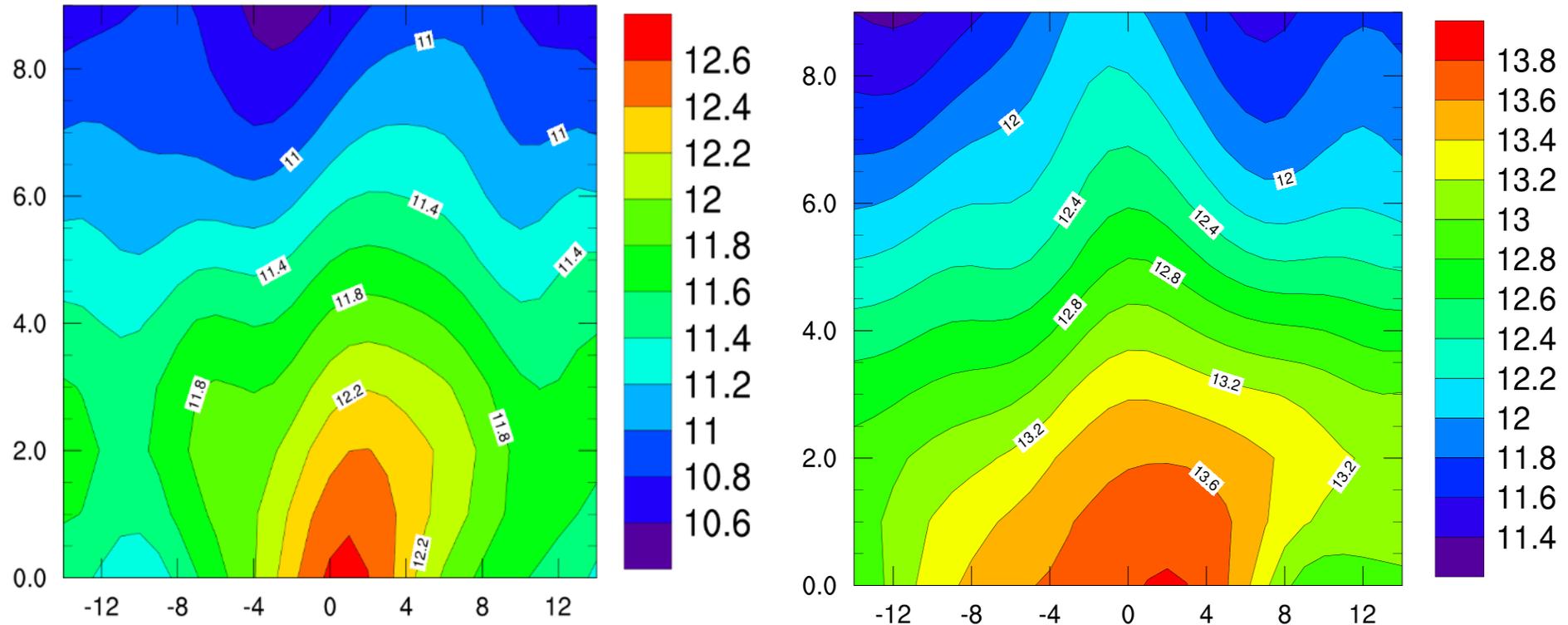
Это особенно важно для сезонного климата, так как минимизирует тренд стратосферы на торможение с ноября по февраль. В климате это позволяет сделать одинаковые настройки ГВС в Южном и Северном полушарии

Mean annual precipitation, mm/day



TRMM: TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION.
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission>

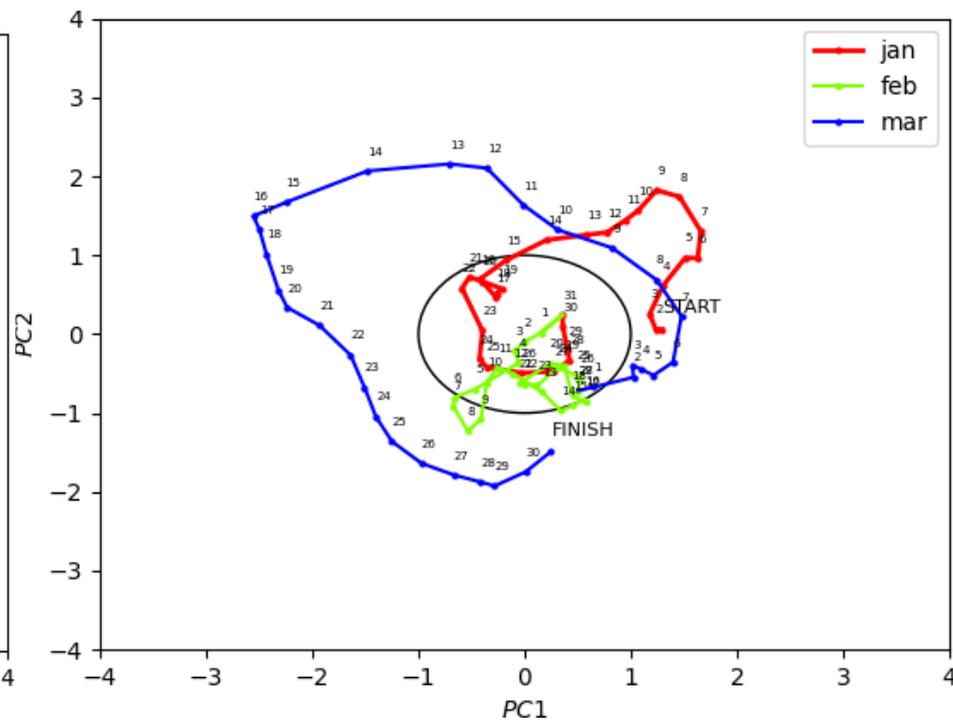
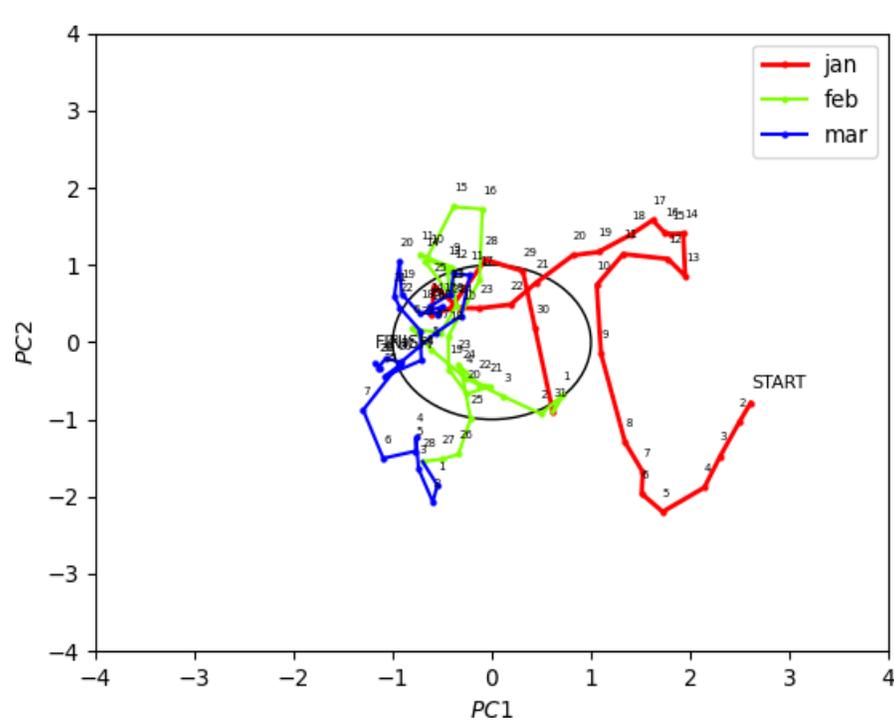
Воспроизведение колебания Мэддена-Джулиана



Frequency vs zonal wavenumber. SL-AV model (left), ERA5 reanalysis (right). K=+1 – MJO

КМД: индекс Уилера-Хендона. (Р.Ю.Фадеев, Л.Б.Костин)

JFM2015. Слева- модель, справа реанализ ERA5. Красная кривая – первый месяц прогноза



Применение модели ПЛАВ в Гидрометцентре в 2025г



Среднесрочный прогноз погоды
0.1° по долготе , 0.08-0.13° по широте, 104
уровня

Система ансамблевого среднесрочного
прогноза

0.9°x0.72° , 96 уровней.

Версия 0.225° по долготе, 0.16°-0.24° по широте, 51 уровней – на
оперативных испытаниях.

Субсезонный и сезонный долгосрочный
ансамблевый прогноз

0.9°x0.72°L96



Результаты

- На основе бесшовного подхода создана единая модель для трех приложений: детерминистического и ансамблевого среднесрочного прогноза, долгосрочного прогноза
- Впервые ликвидировано отставание в разрешении модели среднесрочного прогноза
- Неплохие результаты в субсезонном прогнозе. Нужна совместная модель

Работы по развитию модели ПЛАВ

- Совместная модель с NEMO – технология инициализации оперативных прогнозов
- Реализация блока радиации esRad, переход с RRTMG на esKD (следствие – улучшение описания облачно-радиационных связей)
- Активация параметризации глубокой конвекции 3MT в ПЛАВ10 и ее настройка
- Задание начальных данных температуры поверхности внутренних водоемов СНГ по данным гидрологических постов наблюдений (ПЛАВ10)
- Оптимизация программного комплекса
- Усовершенствование блока деятельного слоя суши

Спасибо за внимание!