



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И СОСТОЯНИЕ численных прогнозов погоды и климата на примере бесшовной негидростатической модели ICON и её конфигураций

Ривин Г.С.^{1,2}, Розинкина И.А.^{1,2},

**Астахова Е.Д.¹, Блинов Д.В.¹, Бундель А.Ю.¹, Варенцов М.И.^{1,2}, Кирсанов А.А.¹,
Копейкин В.В.¹, Самсонов Т.Е.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Шатунова М.В.¹,
Алферов Д.Ю.¹, Алферов Ю.В.¹, Волкова В.А.¹, Гоморев И.А.¹, Гордин В.А.¹,
Горлач И.А.¹, Коспанов А.А.^{1,2}, Никитин А.Е.¹, Никитин М.А.¹, Перов В.Л.¹,
Пискунова Д.А.^{1,2}, Полюхов А.А.^{1,2}, Ревокатова А.П.¹, Тарасова М.А.^{1,2},
Татаринович Е.В.¹, Шишов А.Е.¹, Шувалова Ю.О.¹**

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Совместный семинар ИФА РАН и Гидрометцентра России. 18 февраля 2025 г. 14.00



Наукастинг (прогноз текущей погоды)	Описание текущих и прогностических параметров погоды в интервале 0-2 часа с момента наблюдения.
Сверхкраткосрочный прогноз погоды	Описание параметров погоды в интервале 0-12 часов
Краткосрочный прогноз погоды	Описание параметров погоды в интервале 12-72 часа
Среднесрочный прогноз погоды	Описание параметров погоды в интервале 72-240 часов
Прогноз погоды с расширенным сроком	Описание параметров погоды в интервале 10-30 дней , обычно осредненных и выраженных как отклонение от значений климата за этот период
Долгосрочный прогноз - Месячный ориентировочный прогноз , - трехмесячный или 90-дневный ориентировочный прогноз , - сезонный ориентировочный прогноз и S2S.	Интервал времени от 30 дней до 2 лет Описание осредненных параметров погоды, выраженных как отклонение от климатических значений этого месяца. Описание осредненных параметров погоды, выраженных как отклонение от климатических значений за эти 90 дней. Описание осредненных параметров погоды, выраженных как отклонение от климатических значений за этот сезон или S2S.
Прогноз климата: - прогноз климата на год-десятилетие - прогноз климата.	Прогноз на срок более, чем 2 года. Описание ожидаемых параметров климата, связанных с вариациями межгодовых, декадных и многодекадных аномалий климата. Описание ожидаемого будущего климата , включая эффекты как природного, так и антропогенного воздействия



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И СОСТОЯНИЕ численных прогнозов погоды и моделирования климата на примере бесшовной негидростатической модели ICON и её конфигураций

1. **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ** численных прогнозов погоды и климата
2. **СОСТОЯНИЕ** численных прогнозов погоды и климата на примере бесшовной негидростатической модели ICON и её конфигураций
 - 2.1. **МОДЕЛЬ ICON**
 - 2.2. **Возможности ICON**
 - 2.2.1. **ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ (ЧПП)**
 - 2.2.2. **LES**
 - 2.2.3. **ПРОГНОЗ КЛИМАТА**
3. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**



1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ (ЧПП) И КЛИМАТА



ТЕНДЕНЦИЯ развития современных систем окружающей среды

- ❑ **ТОЛЬКО суперкомпьютеры** используются для оперативных ЧПП: в **июньском 2024 г.** списке TOP500 самых быстрых суперкомпьютеров для ЧПП из **200** первых суперкомпьютеров используются **21 (каждый 10-й!)**.
- ❑ **Открытость кодов** моделей ЧПП (**ICON (с 30.01.2024)**, IFS, WRF и MPAS).
- ❑ **Проведение ЧПП с помощью совместных моделей окружающей среды:** атмосферы, деятельного слоя суши, морского льда и океана .
- ❑ **Бесшовность** и, как следствие, использование **одной модели** окружающей среды для всех заблаговременностей и областей прогноза погоды и климата.
- ❑ **Работа в ЧПП с большими данными (big data):** например, если просматривать 1 сек каждое значение поля прогноза температуры на всех 120 уровнях ICON-Ru13/6N29, то ему понадобится **более 10 лет!**
- ❑ **Создание больших коллективов** для разработки новых моделей окружающей среды на основе **многодисциплинарных** исследований.
- ❑ **Применение равномерных сеток** типа треугольных или квадратных на основе вписанных (описанных) в сферу правильных многогранников.



Признак тихой революции в ЧПП: производительность суперкомпьютеров для оперативных ЧПП (пиковая / на Linpack'e)



В **ноябрьском 2024 г.** списке TOP500 самых быстрых в мире суперкомпьютеров для оперативных ЧПП из **200** первых суперкомпьютеров используются **21, т.е., каждый 10-й!**

- 1. Корея** (КМА: **73, 74**; 25.50/18.00 Пфлопс), **2021**
- 2. Япония** (JMA: **95, 96** (15.57/13.57 Пфлопс), **2022**
- 3. Тайвань** (CWA: **109** (12.98/11.16 Пфлопс), **193** (6.49/5.60 Пфлопс), **2024**
- 4. США** (NOAA/WCOSS: **117, 118**; 11.80/10.01 Пфлопс,) **2021**
- 5. Германия** (DWD: **128** (11.20/9.36 Пфлопс); **166** (8.58/6.73 Пфлопс), **2024**
- 6. Франция** (Meteo France: **141** (10.32/8.18 Пфлопс), **152** (10.47/7.68 Пфлопс)), **2020**
- 7. Канада** (CMC: **150/151**, 10,92/7,76 Пфлопс) **2022**
- 8. Великобритания** (MetOffice: **161** (8.13/7.04 Пфлопс), **342, 343** (3.02/2.80 Пфлопс), **2016**
- 9. ESMWF** (**168-171** (8.85/6.67 Пфлопс); **260, 261** (4.25/3.94 Пфлопс), **2023**
- 10. Индия** (InstTropMet/NatCMWF: **188** (5.94/7.40 Пфлопс); **189** (5.94/7.40 Пфлопс)), **270, 402** **2024**
- 11. Аргентина** (Метеослужба, **200**, 12.58/5.39 Пфлопс) **2023**
- 12. Китай** (Метеослужба: **392** (4.23/2.55 Пфлопс); **411** (4.00/2.44 Пфлопс). **2018**
- 13. Россия:** Суперкомпьютер «Росгидромет», **1.3/1.2 Пфлопс производительность**, **2018**
в списке TOP500 занимал **172 место** (июнь 2018), **444 место** (ноябрь 2019)
- 14. Бразилия** CRAY XE 17472 cores (17,6) [256], T666 L64 (11) **?**
- 15. Австралия** Oracle Blade 6000, 576 nodes (12 cores per node), шаг 40 км, 74 ур. **?**



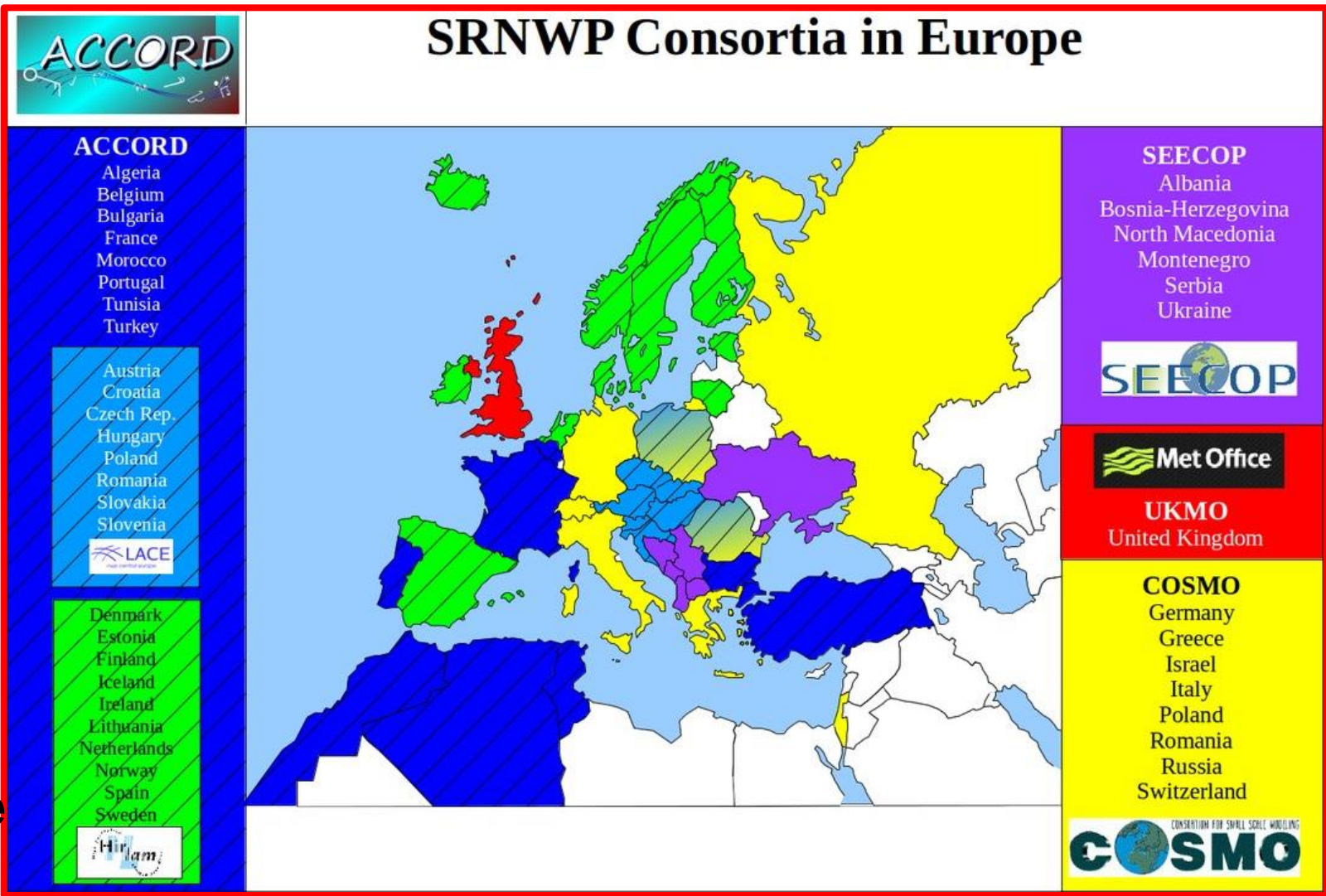
ЕВРОПЕЙСКИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ КОНСОРЦИУМЫ



✓ Сейчас в Европе 3 консорциума (**ACCORD**, **COSMO** и **SEECOP**) и **MetOffice**.

✓ Развитие модели **COSMO** прекращено на версии **6.6**, т.к. моделью консорциума **COSMO** стала **негидростатическая модель прогноза погоды и климата ICON**.

✓ В настоящее время Росгидромет временно приостановил свое участие в работе консорциума **COSMO** (COnsortium for Small-scale Modeling).





17.02.2025: <https://www.cosmo-model.org>



Participating national meteorological services

Today, the consortium, has as members these national meteorological services (presented in date-of-join order) :

Note: Roshydromet is suspended temporarily from COSMO activities.

The screenshot shows the COSMO website with a navigation menu on the left and a main content area. The main content area is titled "Participating national meteorological services" and contains the following text:

The Consortium for Small-scale Modeling (COSMO) was formed in October 1996. Its general goal is to develop, improve and maintain a non-hydrostatic limited-area atmospheric model for research applications by the members of the consortium (details). Moreover, within a licence, the COSMO model has been used for operational and research applications, universities and research institutes. The cosmo licence is not available anymore (as the model reached its end of life cycle), but ICON licencing is possible. The COSMO science plan called for a harmonization of development of the COSMO and ICON (ICOsahedra Nonhydrostatic) models in the time horizon of 2020-21. Further developments are now restricted to ICON.

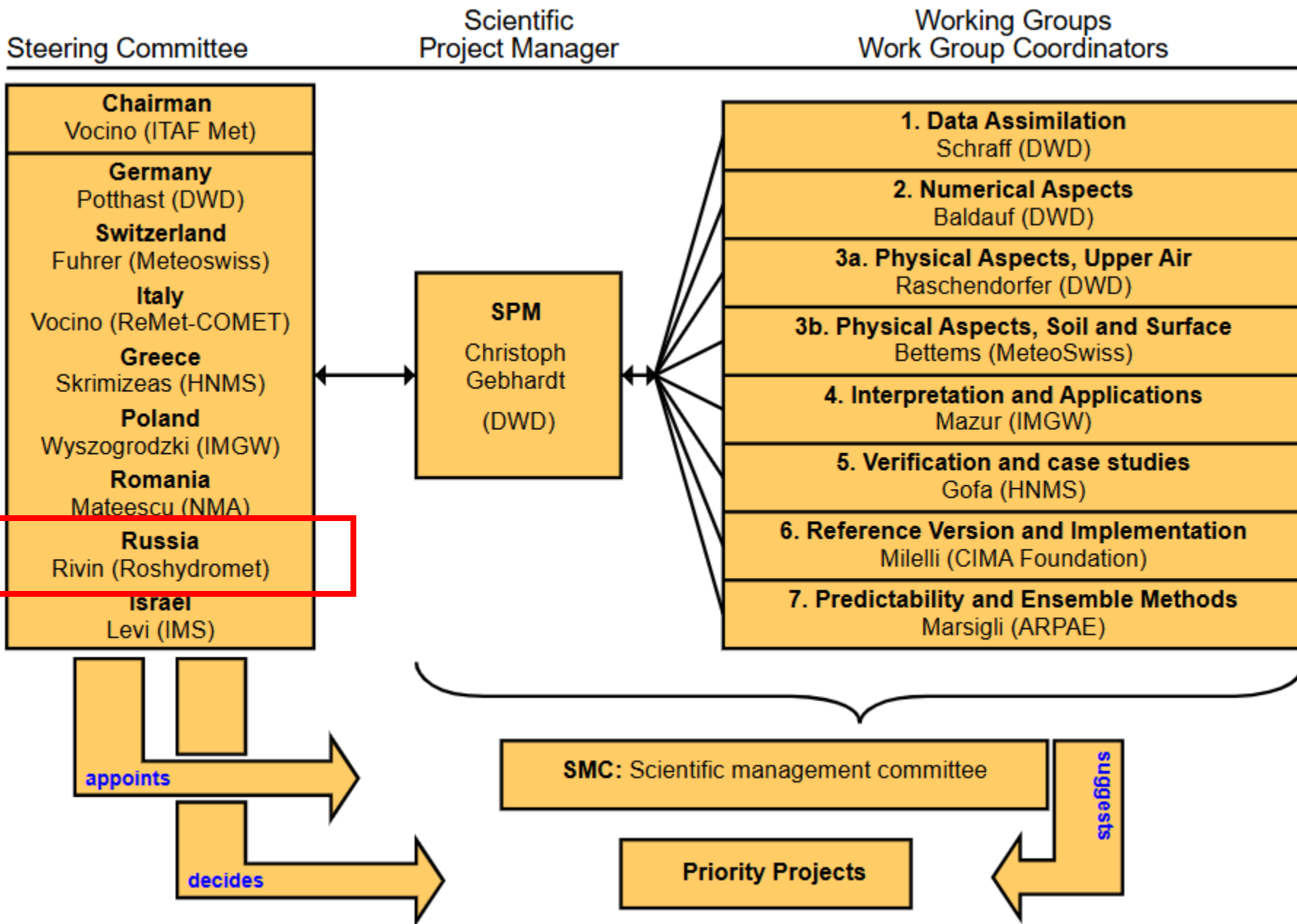
It is therefore recommended to migrate to ICON, as the future operational model. [see this page about the transition to ICON](#)

Participating national meteorological services
Today, the consortium, has as members these national meteorological services (presented in date-of-join order):
Note: Roshydromet is suspended temporarily from COSMO activities.

Below the text, there is a row of logos for the participating services: DWD, MCH, ITAF Met, HNMS, IMGW, NMA, RHM, and IMS.

	DWD	Deutscher Wetterdienst
	MCH	MeteoSchweiz
	ITAF Met	Italian Air Force Meteorological Service
	HNMS	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
	IMGW	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
	NMA	Administrația Națională de Meteorologie
	RHM	Федеральная Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
	IMS	שירות מטאורולוגי

	Germany	DWD	Deutscher Wetterdienst
	Switzerland	MCH	MeteoSchweiz
	Italy	ITAF Met	Italian Air Force Meteorological Service
	Greece	HNMS	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
	Poland	IMGW	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
	Romania	NMA	Administrația Națională de Meteorologie
	Russia	RHM	Федеральная Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
	Israel	IMS	שירות מטאורולוגי





Активное участие российских специалистов в работе консорциума COSMO в совместном с коллегами усовершенствовании блоков:



Формирование и эволюция снежного покрова

Перенос солнечной радиации и учет аэрозольных примесей

Параметризация городских территорий

Расчет оценок для верификации ансамблевых прогнозов

Формирование возмущений для ансамблевых систем

Защитили диссертации

1. Алферов Дмитрий
2. Быков Филипп
3. Казакова Екатерина
4. Кирсанов Александр
5. Полюхов Алексей
6. Ревокатова Анастасия
7. Шувалова Юлия
8. Чурюлин Евгений

Подготавливают

1. Блинов Денис
2. Борисов Данил
3. Шишов Андрей

Значительный вклад был внесен в развитие методов верификации и апробации конфигураций с шагом 1 км, включая создание системы численного прогнозирования для метеообеспечения Сочи-2014 и Москвы (2019), поиск оптимальных решений при разработке систем усвоения данных, развития схемы турбулентного перемешивания в приземном слое.



**Александр Александрович
Фридман**
16.06.1888 – 16.09.1925



**Николай Евграфович
Кочин**
19.05.1900 – 31.12.1944



**Илья Афанасьевич
Кибель**
16.10.1904 – 5.09.1970



**Екатерина Никитична
Блинова**
07.12.1906 – 15.12.1981



**Александр Михайлович Обухов,
5.05.1918 - 3.12.1989**
**Андрей Николаевич Колмогоров,
25.04.1903 - 20.10.1987**



**Андрей Сергеевич
Монин**
02.07.1921 - 22.09.2007



**Гурий Иванович
Марчук**
8.06.1925 – 24.03.2013

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ: ВКЛАД СОВЕТСКИХ И РОССИЙСКИХ УЧЕНЫХ В МИРОВУЮ НАУКУ





Академик Александр Михайлович Обухов и влияние его работ на современное развитие ЧПП



- 1. Обухов А.М.** Турбулентность и динамика атмосферы. Сборник статей. Л., Гидрометеиздат, 1988, 413 с.
- 2. Пограничный слой.** Монин А.С., **Обухов А.М.** Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды ГЕОФИАН. 1954. № 24 (151). С. 163-187.
- 3. Решение уравнения адвекции**
Обухов А.М. О точности предвычисления адвективных изменений полей при численном прогнозе погоды // Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957. № 9. С. 1133-1141.
- 4. Погода и турбулентность.**
Обухов А.М. Weather and turbulence. **Presidential address** // Publication **IAMAP**, №14, **1968**, p.102-107.
Обухов А.М. Погода и крупномасштабная турбулентность // Труды V Всесоюзного метеорологического съезда. Т. 2. Секция прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат. 1972. С. 3-7.
Обухов А.М., Чаплыгина А.С. Изменение барического поля в средней тропосфере // Труды Института физики атмосферы АН СССР. 1958 (**работа выполнена в 1951-1952 г**), N 2. С. 66-104.



Александр
Михайлович Обухов,
5.05.1918 - 3.12.1989
Андрей Николаевич
Колмогоров,
25.04.1903 - 20.10.1987



2. СОСТОЯНИЕ

численных прогнозов погоды и климата на примере
бесшовной негидростатической модели ICON
и её конфигураций

2.1. МОДЕЛЬ ICON



С 30 января 2024 г. код модели ICON является открытым и распространяется под лицензией BSD-C.



Лицензия BSD, также известная как лицензия Berkeley Software Distribution, — это тип лицензии (<https://opensource.org/license/BSD-3-clause>) с открытым исходным кодом, который позволяет **свободно использовать, изменять и распространять программное обеспечение.**

Описание лицензии BSD-C.

Повторное распространение и использование в исходном коде и двоичном формате, с изменениями или без изменений, разрешено при соблюдении **следующих условий:**

1. При повторном **распространении исходного кода** должно сохраняться уведомление об авторских правах, список условий и нижеследующий отказ от ответственности.

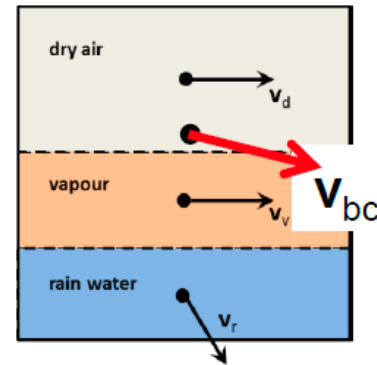
2. При **распространении в двоичной форме** в документации и/или других материалах, прилагаемых к дистрибутиву, должны быть воспроизведены вышеуказанное уведомление об авторских правах, этот список условий и нижеследующий отказ от ответственности.

3. **Ни имя владельца авторских прав, ни имена его авторов не могут быть использованы для рекламы или продвижения продуктов**, созданных на основе данного программного обеспечения, без специального предварительного письменного разрешения.

Система дифференциальных уравнений

- Equation set describes **mixture** of dry air and water (all 3 phases)
 - ρ is the total density (including water vapour and condensate)
 - velocity is defined as the barycentric velocity (Wacker et. al, 2003)

$$\mathbf{v}_{bc} = \frac{\sum_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\sum_k \rho_k}$$



- Current implementation contains approximations w.r.t. moisture effects
i.e. $w_{bc} = 0$ at the surface
- flux form for ρ and $q_k \rightarrow$ inherently **mass conserving**
- Prognostic equation for θ_v actually re-formulated into equation for Exner pressure π



Full set of governing equations

- describes two-component system (dry air + water)
- fully compressible nonhydrostatic, shallow atmosphere approx.
- vector invariant form ($\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla K + \zeta \times \mathbf{u}$) for horizontal wind component

$$\frac{\partial \hat{v}_n}{\partial t} + \frac{\partial \hat{K}_h}{\partial n} + (\hat{\zeta} + f)\hat{v}_t + \hat{w} \frac{\partial \hat{v}_n}{\partial z} = -c_{pd} \hat{\theta}_v \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial n} - F(v_n)$$

momentum

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial t} + \hat{\mathbf{v}}_h \cdot \nabla \hat{w} + \hat{w} \frac{\partial \hat{w}}{\partial z} = -c_{pd} \hat{\theta}_v \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial z} - g$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \hat{\theta}_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \hat{\mathbf{v}} \hat{\theta}_v) = \bar{Q}$$

energy

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \hat{\mathbf{v}}) = 0$$

mass

$$\frac{\partial \bar{\rho} \hat{q}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \hat{q}_k \hat{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot (\bar{\mathbf{J}}_k + \overline{\rho q_k'' \mathbf{v}''})$$

partial mass

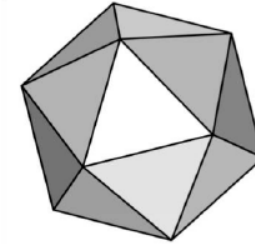
based on Gassmann and Herzog (2008)





Horizontal grid topology

- grid generation is based on the Icosahedron
- By $RnBk$ we denote a grid that originates from an icosahedron whose
 - edges have been initially divided into n parts,
 - followed by k subsequent edge bisections.

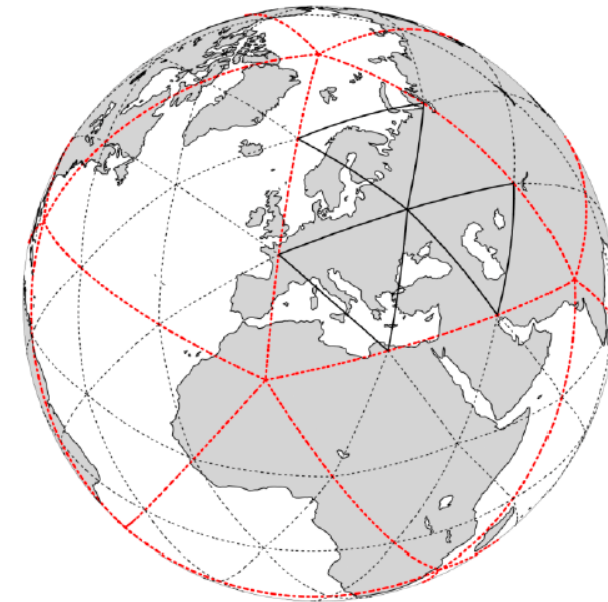


- The total number of grid cells in the ICON grid is given by

$$n_{\text{cells}} = 20 n^2 4^k$$

- Operationally used:

$R3B7 \approx 2.95$ million cells



R3B0 (black)



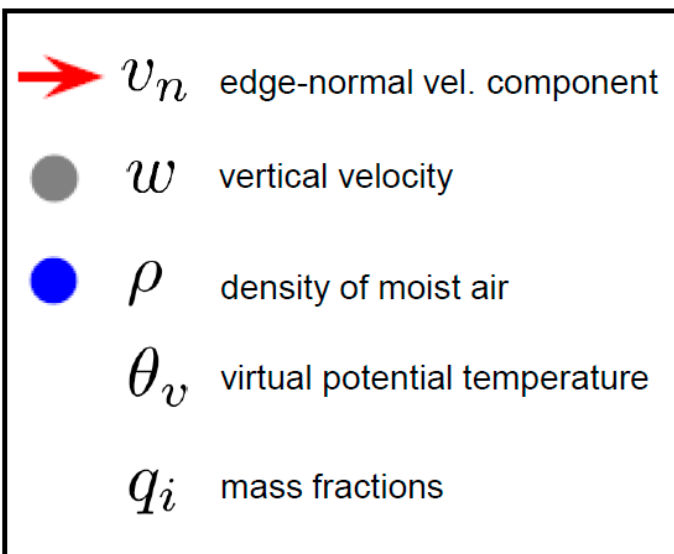


Prognostic variables and staggering

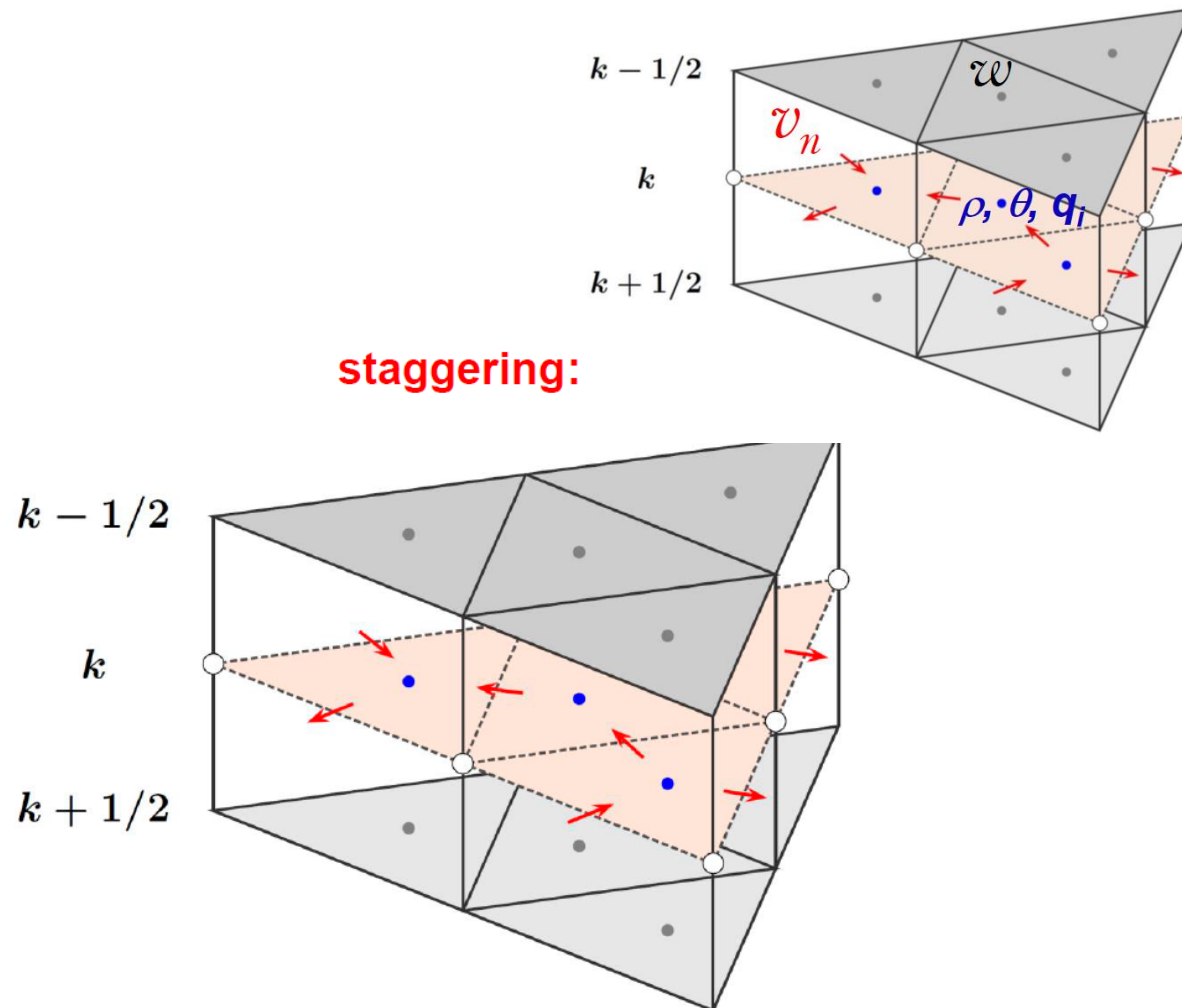


- C-staggering in the horizontal
- Lorenz-type staggering in the vertical
- Top-down numbering of model levels

prognostic fields:

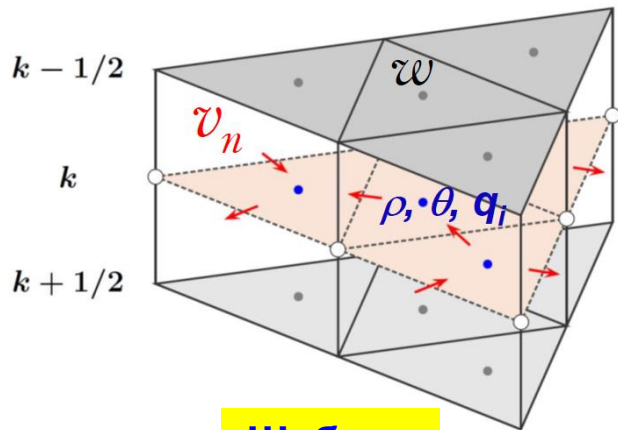


staggering:





Модель ICON: МЕТОД РЕШЕНИЯ



Шаблон



$\rho, \theta, q_i, v_n, w$

Directional splitting II



Two options are available in ICON

Istrang=.FALSE.	Namelist transport_nml	Istrang=.TRUE.
-----------------	---------------------------	----------------

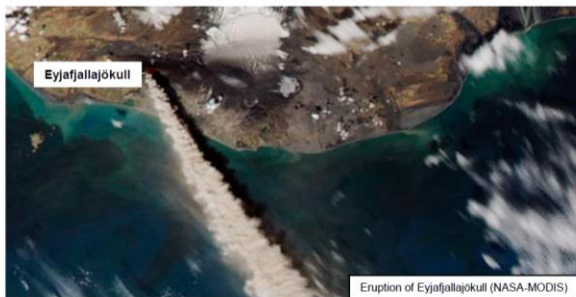


Max-Planck-Institut für Meteorologie



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

Tracer transport in ICON General design and performance



Daniel Reinert
Deutscher Wetterdienst

5th ICON Training Course
April 2019, Langen, Germany

Marchuk splitting $\mathcal{O}(\Delta t)$

Odd time steps

$$\begin{aligned}\Psi^* &= \Psi^n + \Delta t \mathcal{V}(\Psi^n) \\ \Psi^{n+1} &= \Psi^* + \Delta t \mathcal{H}(\Psi^*)\end{aligned}$$

Even time steps

$$\begin{aligned}\Psi^* &= \Psi^n + \Delta t \mathcal{H}(\Psi^n) \\ \Psi^{n+1} &= \Psi^* + \Delta t \mathcal{V}(\Psi^*)\end{aligned}$$

Strang splitting $\mathcal{O}(\Delta t^2)$

$$\begin{aligned}\Psi^* &= \Psi^n + \frac{1}{2} \Delta t \mathcal{V}(\Psi^n) \\ \Psi^{**} &= \Psi^* + \Delta t \mathcal{H}(\Psi^*) \\ \Psi^{n+1} &= \Psi^{**} + \frac{1}{2} \Delta t \mathcal{V}(\Psi^{**})\end{aligned}$$

Default

Formally more accurate
but more expensive



Daniel Reinert – 09.04.2019

11



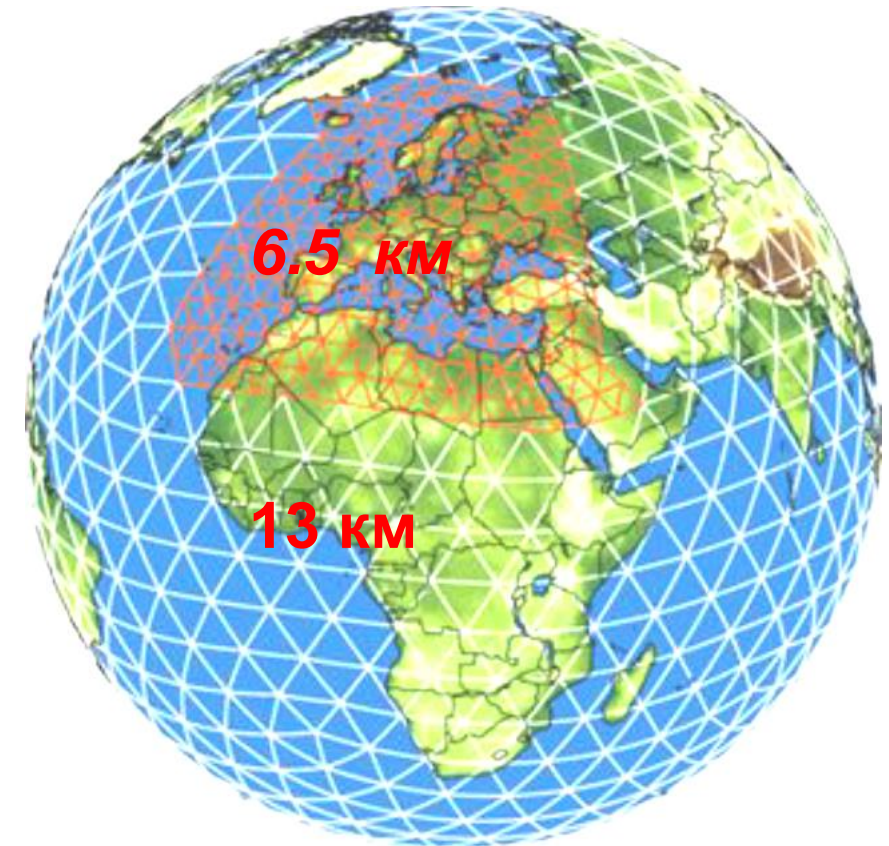
Свойства и возможности глобальной модели ICON.



- Выполнение законов сохранения, включая локальное сохранение массы
- Квазимонотонный перенос трассеров
- Применимость на широком диапазоне масштабов от ~ 100 км до ~ 100 м
- Масштабируемость и эффективность на массивно параллельных компьютерных архитектурах с ядрами $O(10^4)$
- Возможность двустороннего вложения сеток по горизонтали и вертикали

Сетка

- В основе Икосаэдр (выпуклый, правильный 20-гранник)
- Возможность счета по глобальной сетки с повышением разрешения в отдельной области (неравномерные сетки)
- Возможность вкл/выкл вложенных доменов в ходе расчета
- Возможность одно- и двустороннего вложения сеток
- Вложенные сетки по вертикали





2. СОСТОЯНИЕ

численных прогнозов погоды и климата на примере
бесшовной негидростатической модели ICON
и её конфигураций

2.2. ВОЗМОЖНОСТИ ICON

2.2.1. ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ (ЧПП)



Современный оперативный ЧПП. Характеристики на 1 января 2023г.



01.01.2023v3	Глобальный ЧПП, шаг сетки, уровни	Региональный ЧПП, шаг сетки, уровни
ECMWF	IFS: ~9 км; TCo1279 L137 + океан 0.25 ⁰	-----
MetOffice Великобритания	UM: 10 км, 70 ур., + океан 0.25 ⁰ , конечно-разностная	UM: 1.5 км, 950×1025×70,
DWD Германия	ICON: 6.5 км над Европой, 13 км вне; 120 ур.	ICON: 6.5 км Европа × 74, ICON-De: 2.1 км, Германия × 65,
СМС, Канада	GEM: 15 км; 84 уровня, сетка Yin-Yang	GEM: 10 км, 1108×1082×84 + океан 0.09 ⁰ GEM: 2.5 км, 2582×1332×84
СМА, Китай	GRAPES-GFS: 16 км, 90 уровней	GRAPES-MESO: 3 км, 2251×1501×70
Росгидромет Россия	SLAV: 10 км (0.08-0.12)⁰ × 0.11⁰), 104 ур. (10.2023) ICON-Ru13/6N29: 6.5 км Сев.п/ш, 13 вне(11.2024)	ICON-Ru: 6.5 км, Сев. Полушарие, 74 ур, COSMO-Ru: 2.2км, 1200×1400×50, Москва–1.0км COSMO-Ru: 1 км, 200×200×50 Сочи– 1.1км
NCER, США	GFS_fv3: 13 км, 127 уровней 0.25 - 27 км	12 км, 935× 835×60; 3 км, 1827×1467×60, 1189×1249×60, 373×561×60, 401×325×60 1.5 км, 333× 333×60.
Meteo France	TL1798c2.2: от 5 – до 24 км (ЗапЕвропа – вне), 105 ур.	ALARO: 1.3 км, 1536×1440×90;
JMA, Япония	GSM; 13 км, TG959, 128 уровней (до 0.01 гПа) (с марта 2023 г.)	MSM: 5 км, 817×661×76 до 22 км; LSM: 2 км, 1581×1301×76 до 20 км.
KIM, Ю. Корея	KIM (Korean Integrated Model) + UM: 10 км/70ур.	1.5 км, 1188×1148×70

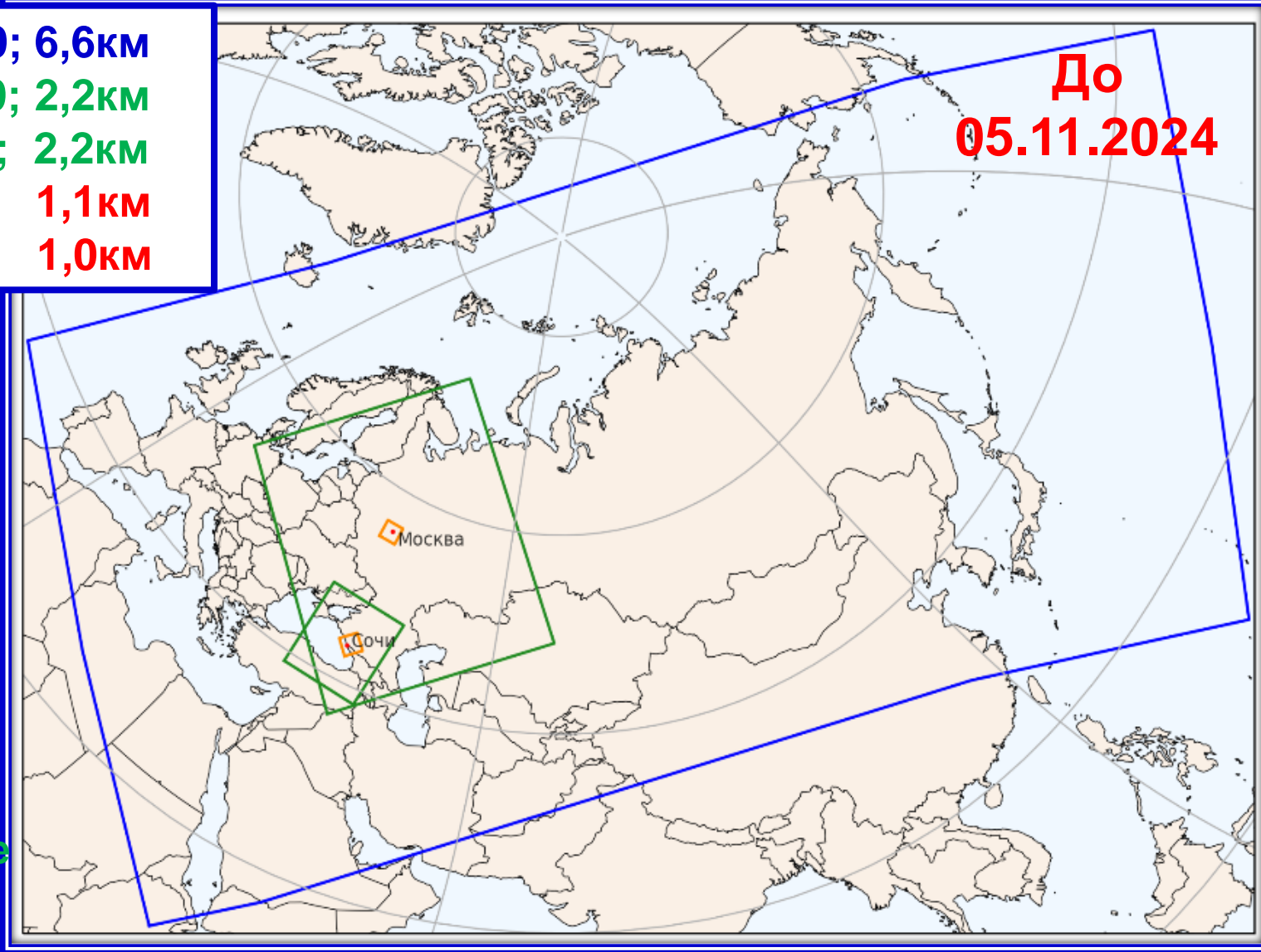


Области прогноза оперативных российских конфигураций COSMO-Ru модели COSMO



COSMO-Ru6ENA: 2000 × 1000 × 40; 6,6км
COSMO-Ru2By: 1200 × 1400 × 50; 2,2км
COSMO-Ru2SFO: 420 × 470 × 50; 2,2км
COSMO-Ru1Sochi: 190 × 190 × 50; 1,1км
COSMO-Ru1Msk: 200 × 200 × 50; 1,0км

До
05.11.2024



Прогнозы 4 раза в сутки выпускаются в цифровом и графических (карты, графики) видах для Федеральных округов России и Республики Беларусь: в сутки карты ≈ 5000 карт и 1000 метеограмм

COSMO-Ru2By:

1200 × 1400 × 50; 2,2 км до 48 ч

Ветвь сверхкраткосрочных (до 18 ч)

ЧПП каждые 3 часа. Включено усвоение радарных данных.



ОПЫТ использования глобальной модели ICON в ГМЦ России МОТИВАЦИЯ проведения краткосрочного ГЛОБАЛЬНОГО ЧПП.

В настоящее время модель ICON по сообщениям немецких коллег и оценок Центра ВМО по верификации глобальных численных прогнозов погоды (ЧПП) качества всех оперативных глобальных моделей прочно вошла в состав лучших оперативных атмосферных моделей мира, причем уже есть позиции, по которым она является лучшей в мире.

Модель ICON является ЕДИНСТВЕННОЙ в мире оперативной негидростатической моделью атмосферы, применяемой одновременно в климатических исследованиях и оперативной моделью ЧПП во всех метеослужбах-членах консорциума COSMO.

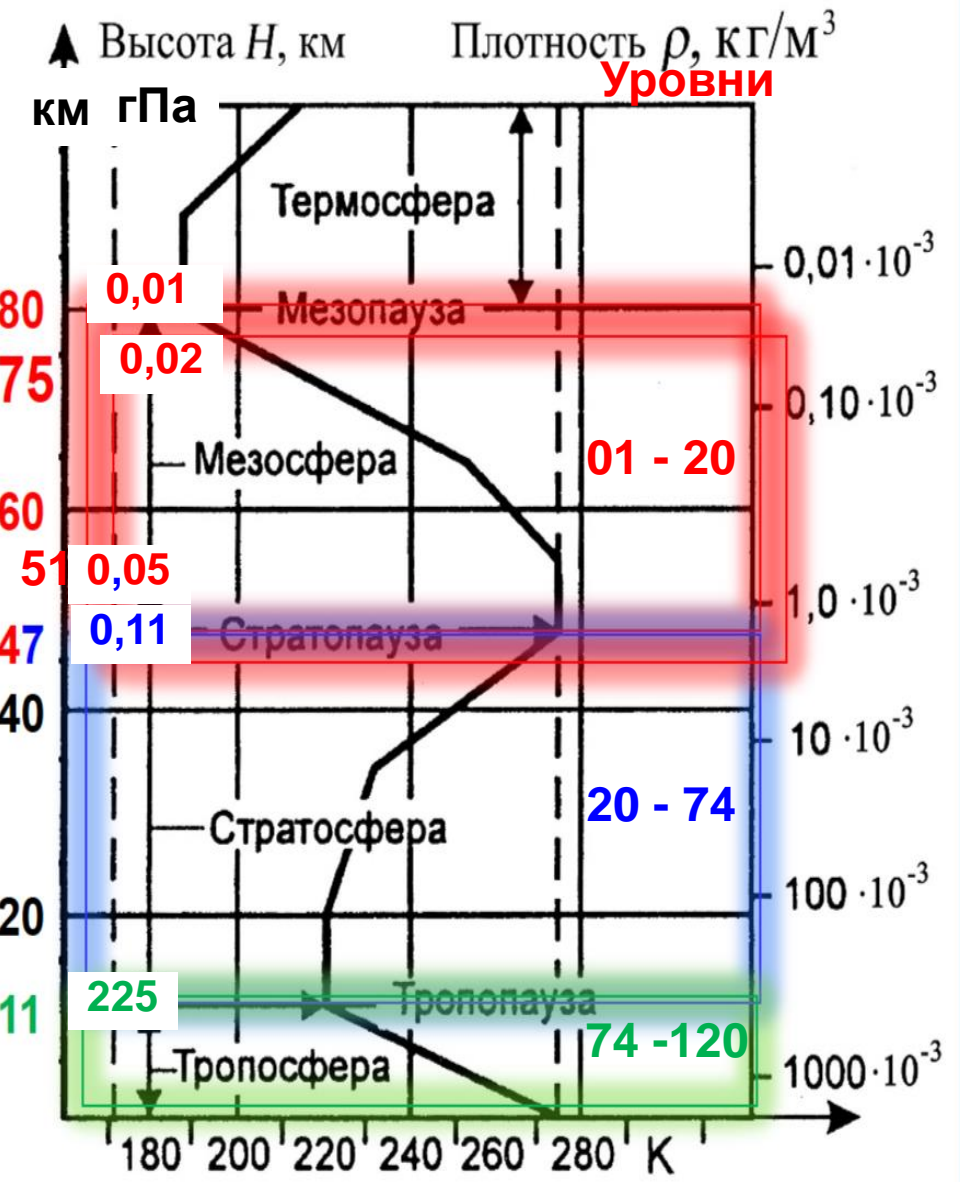
Оценка объемов передач в консорциусе COSMO в течении одних суток необходимых начальных данных и боковых граничных условий через каждые 3 часа для COSMO-Ru6ENA – 60 Гб, необходимых начальных данных для ICON-Ru13/6N29 – 20 Гб.

Время передачи в сутки необходимых начальных данных и боковых граничных условий через каждые 3 часа для COSMO-Ru6ENA равно 60 мин, а необходимых начальных данных для ICON-Ru13N29 равно 5 мин.

ВЫВОД. Проведение глобальных краткосрочных ЧПП по конфигурации ICON-Ru13/6N29 позволит значительно уменьшить нагрузку на каналы связи и использовать **ЕЖЕЧАСНЫЕ боковые условия!**

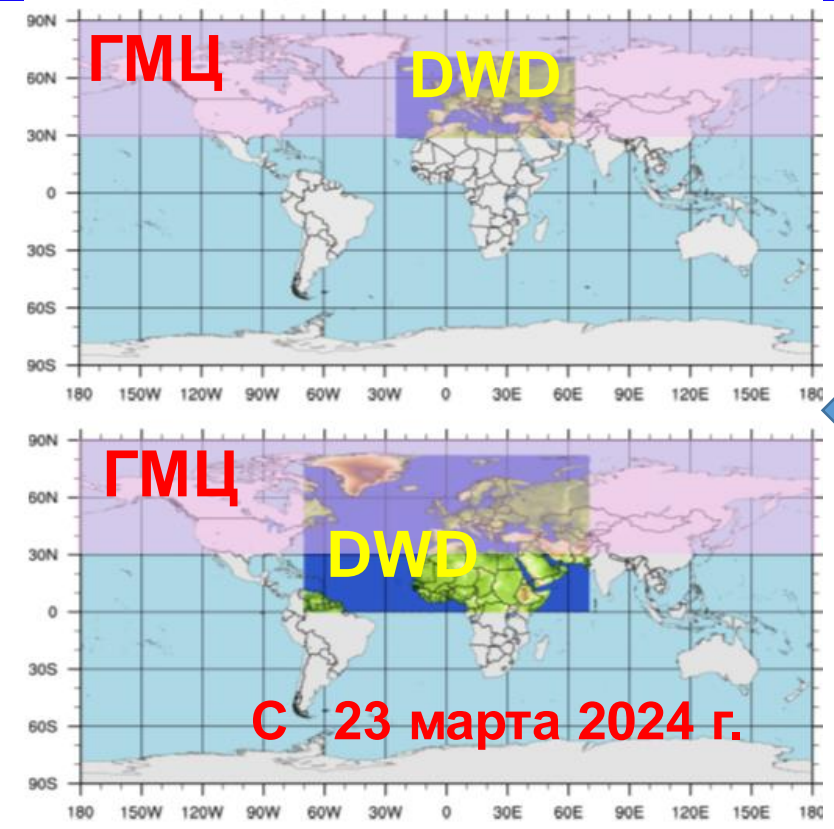


Российская ICON-Ru13/6N29 и немецкие конфигурации модели ICON



ICON-Ru13: глобальная, 120 уровней до 75 км, шаг сетки 13 км, 5760 ядер, ЧПП на 120 ч \approx 20 мин.

ICON-Ru13/6N29: глобальная, 120 уровней, шаг сетки 13 км с вложенной подсеткой с шагом 6,5 км на 74 нижних уровнях севернее параллели 29° с.ш., 5760 ядер, ЧПП на 120 ч за 55 мин.



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

Research and Development at DWD

DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System

Version 2.4.1
Версия 2.4.1. 2025

D. Reinert, F. Prill, H. Frank, M. Denhard, M. Baldauf, C. Schraff, C. Gebhardt, C. Marsigli, J. Förstner, G. Zängl, L. Schlemmer, U. Blahak and C. Welzbacher

Offenbach am Main, 2025



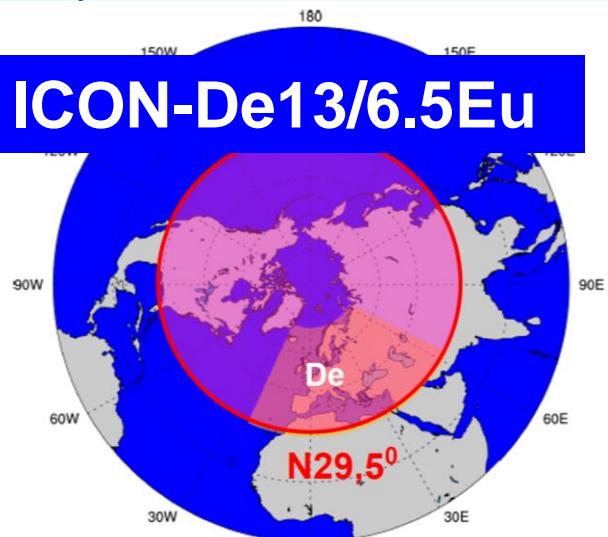
Вертикальные уровни модели ICON



June 2024

ICON Tutorial

ICON-De13/6.5Eu



ICON-Ru13/6.5N29,5°

Figure 3.6.: 3.6a: Horizontal extent of the ICON-EU nest (orange shaded area) in a cylindrical projection. 3.6b: Same as 3.6a but in a polar stereographic projection.

Working with the ICON Model

F. Prill, D. Reinert, D. Rieger, G. Zängl



half level 1

full level 1

half level 2

full level 2

half level 3

full level 3

half level 4

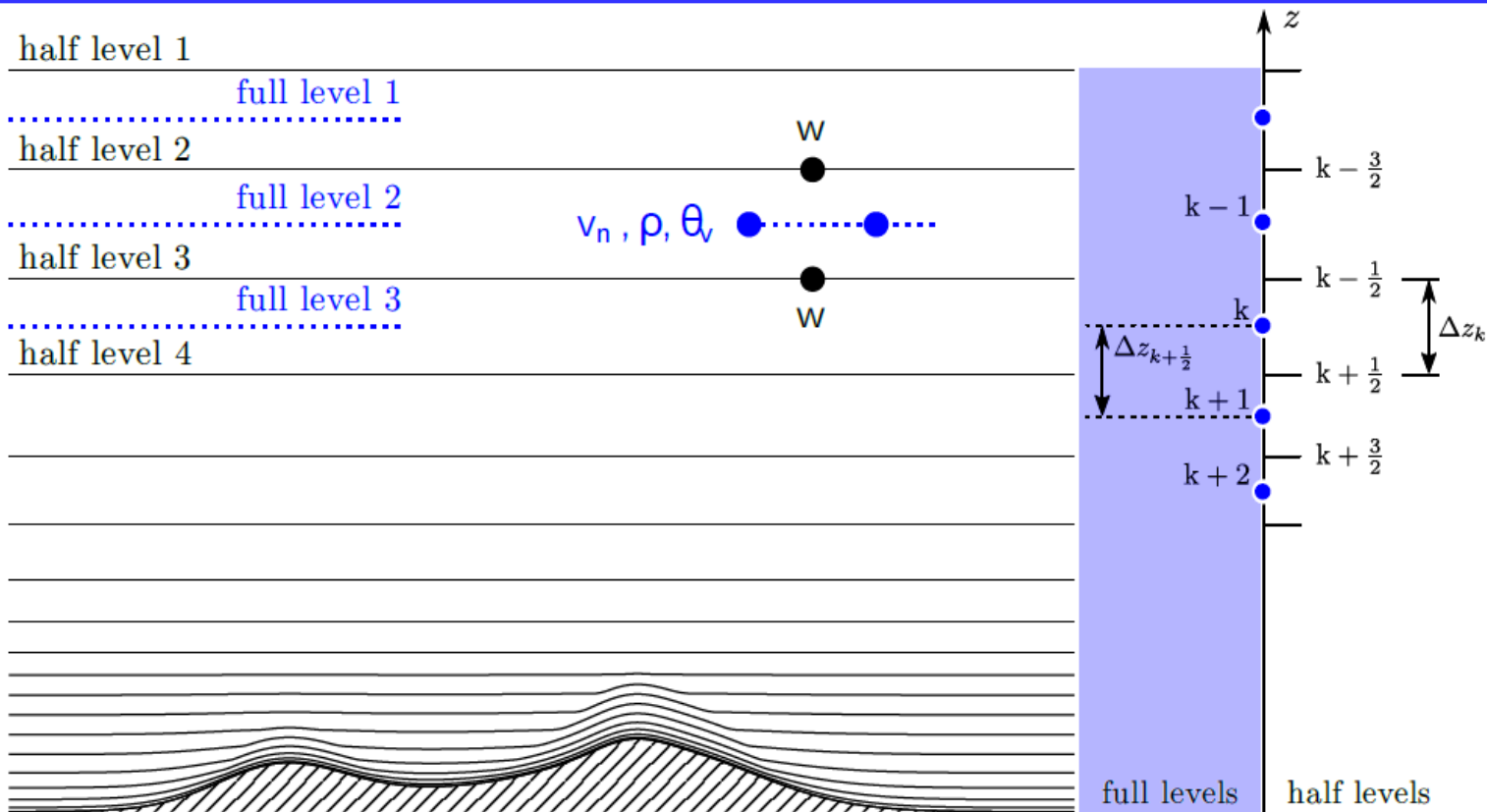


Figure 3.2.: Illustration of ICON's vertical levels. With `num_lev` layers, there are `num_lev + 1` so-called *half levels*. The half levels $k - 1/2$, $k + 1/2$ enclose layer k at the centers of which are the corresponding full levels k , for $k = 1, \dots, \text{num_lev}$. Layer 1 is at the top of the atmosphere and layer n at the bottom of the atmosphere. Half level `num_lev + 1` coincides with the Earth's surface.



Свойства и возможности глобальной модели ICON и план ее дальнейшего развития в DWD

Roland Potthast,
March 2022, DWD

ESM – Earth System Model

ICON Seamless ESM (0-7 Days)

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

```

graph TD
    YAC[YAC] <--> ICON_NWP[ICON-NWP]
    YAC <--> ICON_O[ICON-O]
    ICON_NWP <--> DACE_A[DACE-A  
Atmospheric Data Assimilation]
    ICON_O <--> DACE_O[DACE-O  
Ocean Data Assimilation]
    DACE_A <--> DACE_O
    DACE_O <--> PDAF[PDAF  
Climate Ocean Data Assimilation]
    
```

- (1) 2023 **Coupling A+O YAC** on NEC
*Experimental Data Assimilation, **ICON-O-LAM** technical*
- (2) 2024 Coupling A+O in BACY
*Verification available **Data Assimilation** in DACE technical
ICON-O-ZOOM technical*
- (3) 2025 **Near-Realtime Tests** with BACY,
*Data Bases, NUMEX Prep, **ICON-O-LAM Data Ass.** technical*
- (4) 2026 Implementation in NUMEX
Deterministic Cycle with Data Assimilation preoperational
- (5) 2027 **LETKF** implementation and testing
- (6) 2028 hybrid **EnVAR + LETKF** implementation and testing
- (7) 2029 **NUMEX** for hybrid system Testing
- (8) 2030 **Ensemble-Variational ESM** ready for operational forecasting

GeoinfoDienst Bw
and DWD

Project starting
Q3/2022

2022

Roland Potthast 23



ICON Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

ICON-NWP: Recent activities and advances

Günther Zängl, on behalf the ICON development team @ DWD
COSMO-GM 2024, Offenbach, September 3, 2024

ICON @ 500 m for the Alps / Germany



- ➔ First suite of experiments motivated by the plan to prepare dedicated high-resolution forecasts for the TEAMx observational campaign starting next week
- ➔ Envisaged configuration: start from operational D2 analysis and spawn two nested domains (1 km, 500 m) after the end of the latent-heat-nudging phase
- ➔ A few months later, the idea came up to investigate an analogous configuration for Germany

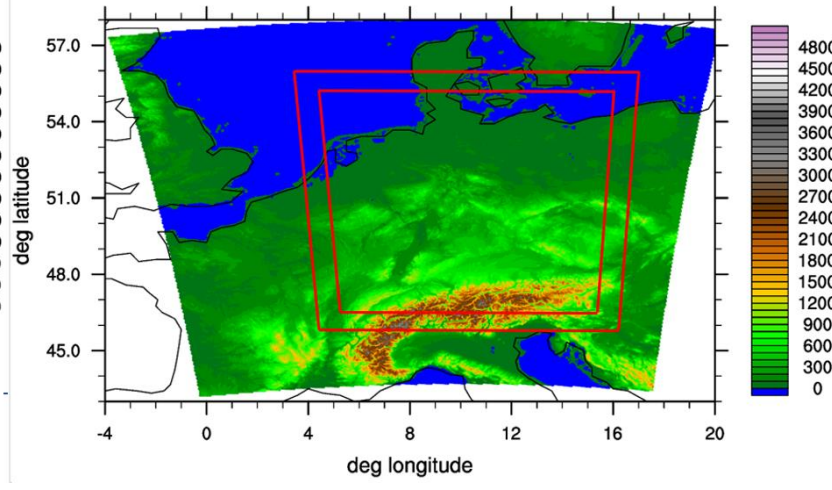
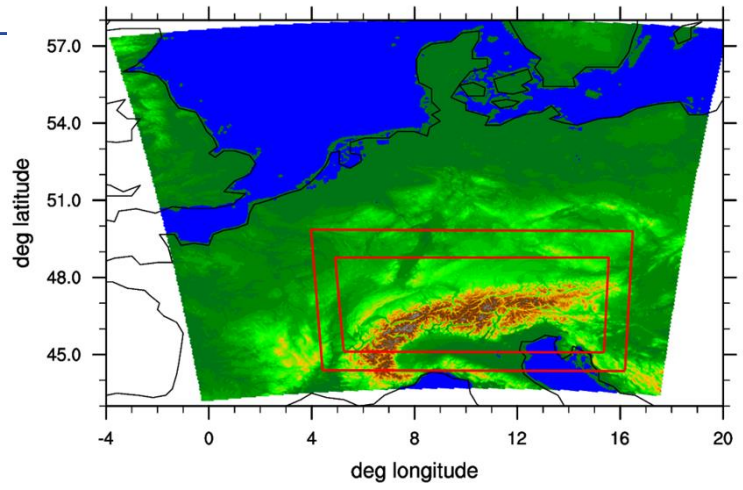
The GLORI Digital Twin

global **storm-resolving** (~3km)

Tri-lateral Cooperation
Germany, Italy,
Switzerland

regional
km-scale
(down to 500 m)

approximate domain configurations



Chiara Marsigli



Центр ВМО по верификации глобальных ЧПП

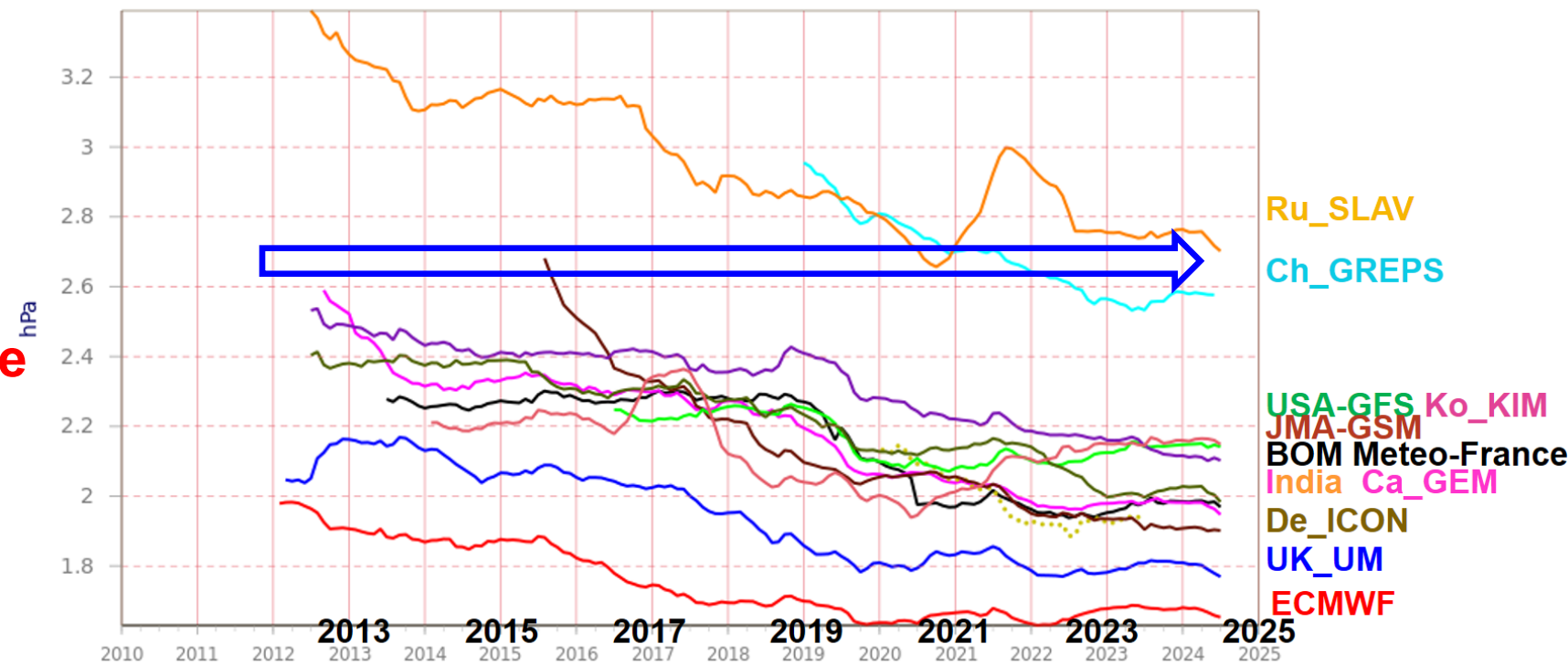
<https://wmoicdnv.ecmwf.int/>



Рsea: RMSE (по анализу) прогноза по Северному полушарию на 72 час.

Step: 72 RMSEF/msl/n.hem/analysis

- BOM 12
- CMA 12
- CMC 12
- NCMRWF (India) 00
- ECMWF 12
- DWD 12
- MetOffice 12
- NCEP 12
- Meteo-France 12
- JMA 12
- KMA 12
- RUMS 12



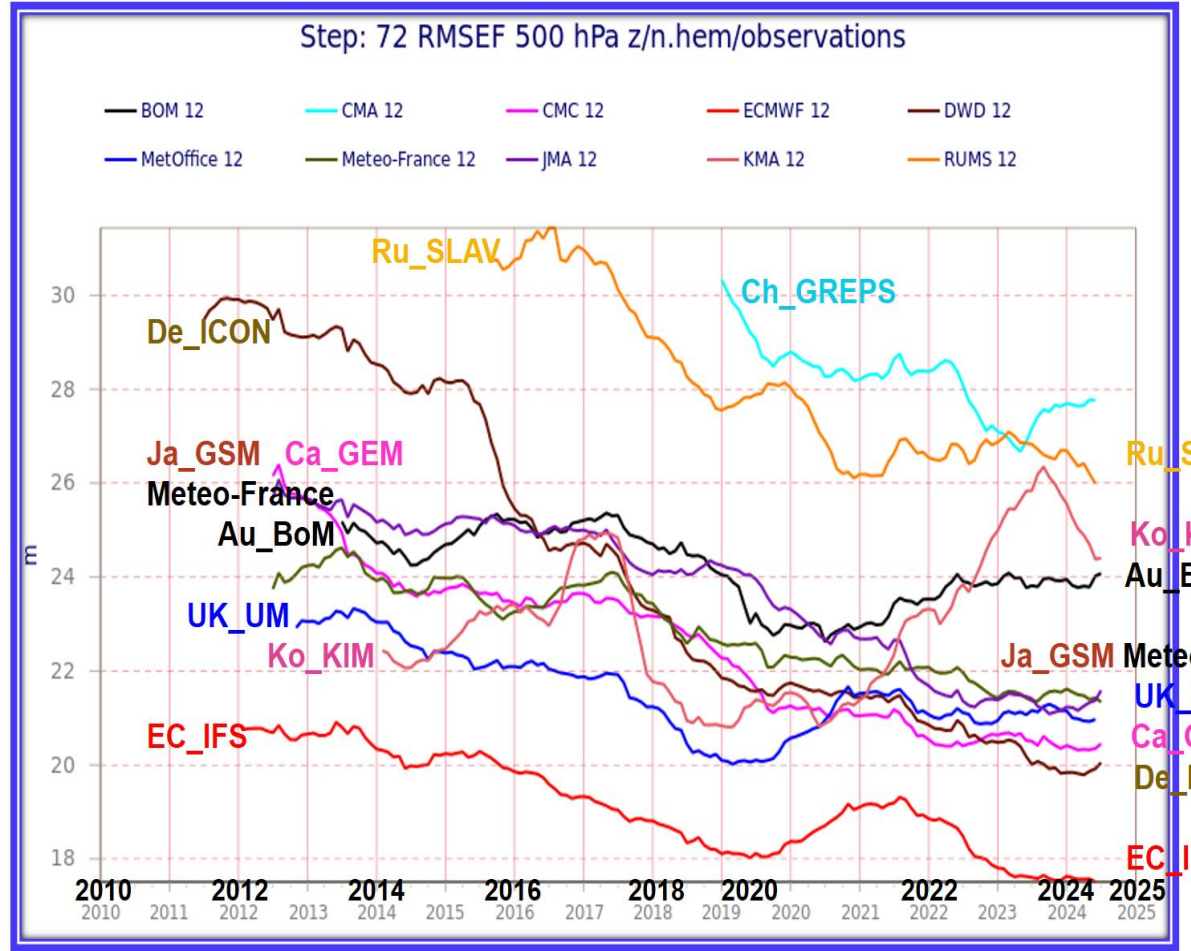
Оценка для северного полушария ($\geq 20N$) численных прогнозов H500 на 72 час. в период 2012-2024 гг. 10-ти метеослужб (нет NCEP США).

Обращает на себя внимание рынок метеослужбы Германии.



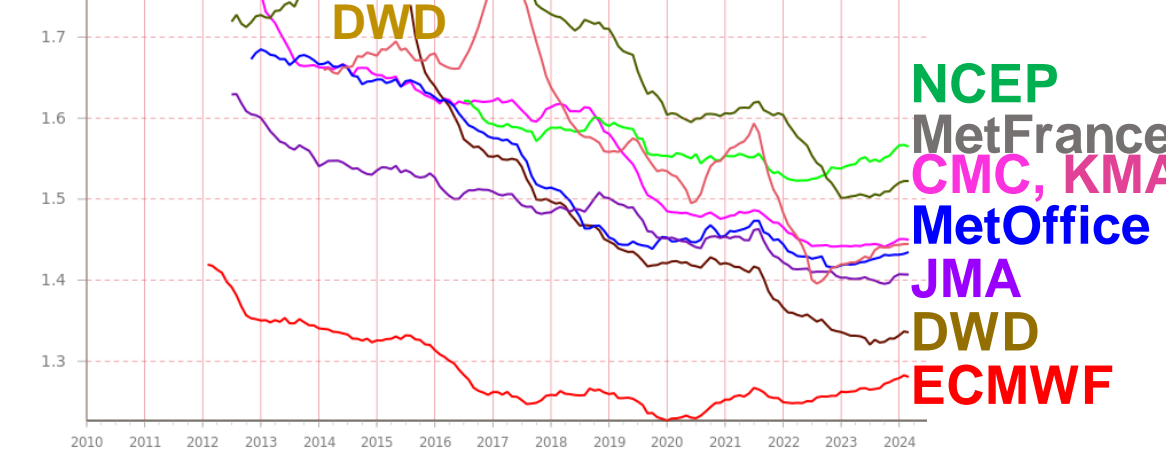
2012-2024 гг. Северное полушарие ($\geq 20N$)..

H500, RSME (м), Сев. п/ш, сравнение с наблюдениями

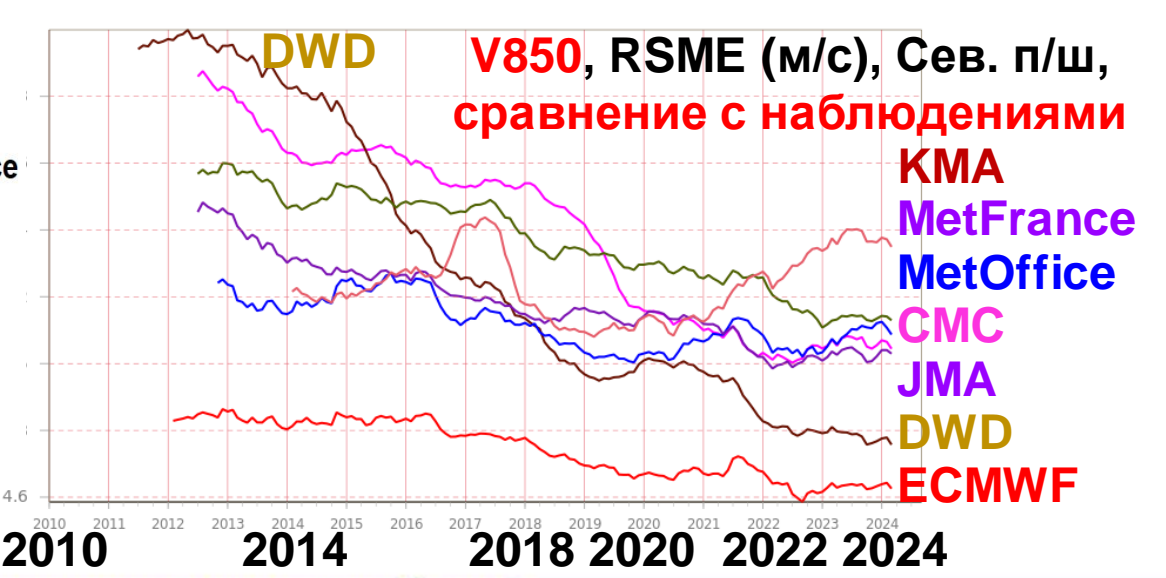


<https://wmo1cdnv.ecmwf.int/>

T850, RSME (K), Сев. п/ш, сравнение с анализом



V850, RSME (м/с), Сев. п/ш, сравнение с наблюдениями





Декабрь 2024 г. ЮЖНОЕ полушарие ($\geq 20S$) и ТРОПИКИ.

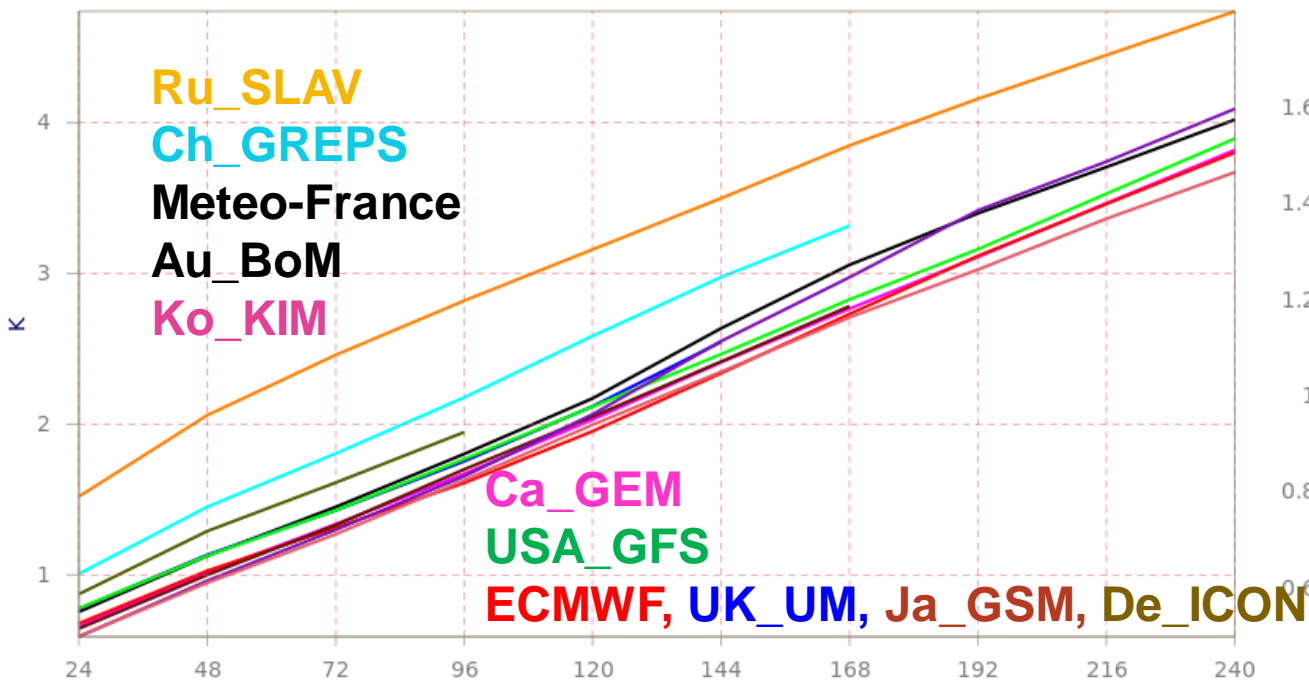


T850, RSME (K), ЮЖНОЕ п/ш, сравнение с анализом

T850, RSME (K), ТРОПИКИ, сравнение с анализом

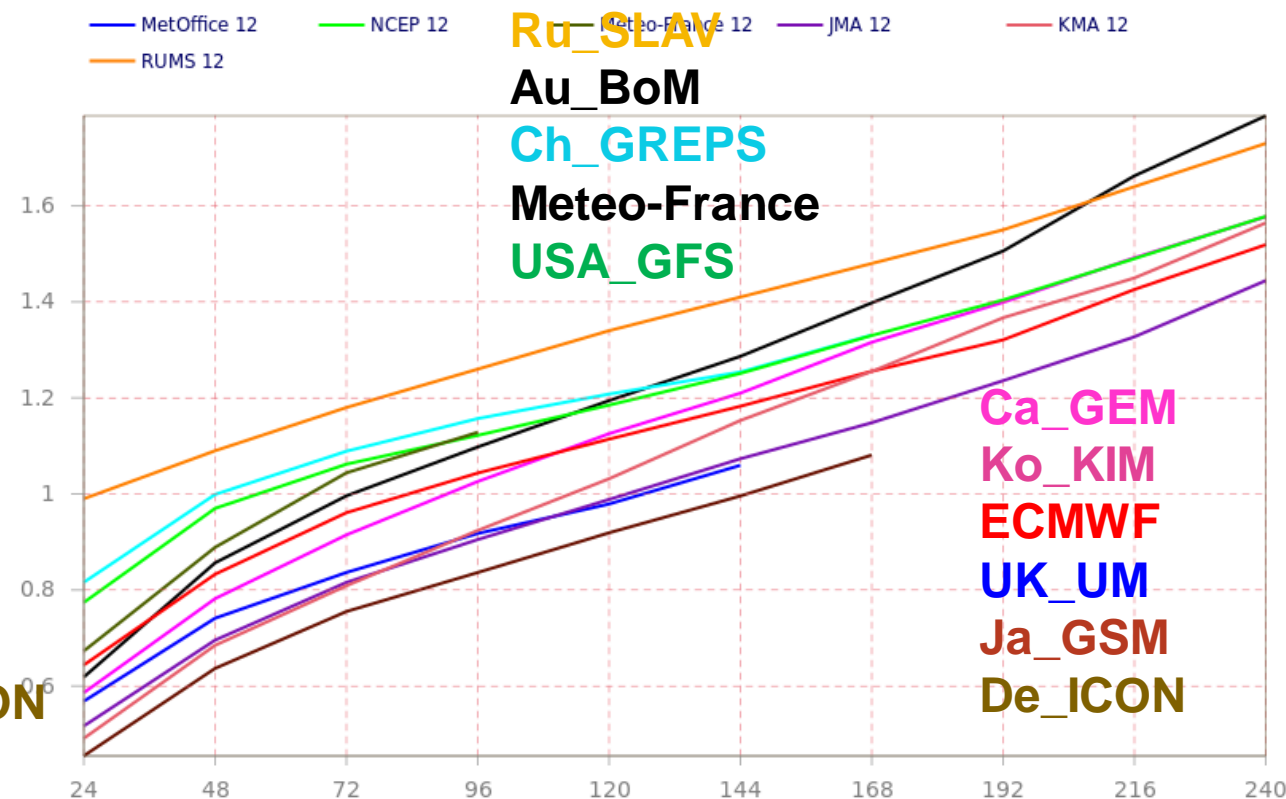
Date: 202412 RMSEF 850 hPa t/s.hem/analysis

- BOM 12
- MetOffice 12
- RUMS 12
- CMA 12
- NCEP 12
- CMC 12
- Meteo-France 12
- ECMWF 12
- JMA 12
- DWD 12
- KMA 12



Date: 202412 RMSEF 850 hPa t/tropics/analysis

- BOM 12
- MetOffice 12
- RUMS 12
- CMA 12
- NCEP 12
- CMC 12
- Meteo-France 12
- ECMWF 12
- JMA 12
- DWD 12
- KMA 12



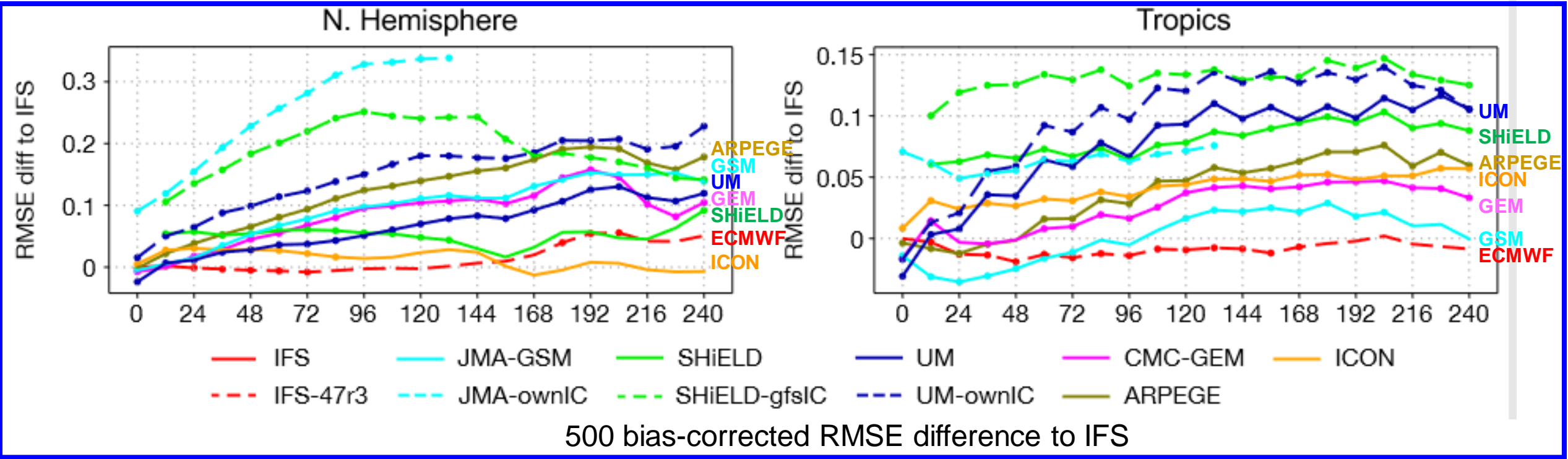
Обращают на себя внимание первое и второе места метеослужб Германии и Японии.



Сравнение оперативных моделей среднесрочного ЧПП при одинаковых начальных данных



L. Magnusson et al. Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions // BAMS, 2022. 31 p. DOI 10.1175/BAMS-D-21-0234.1

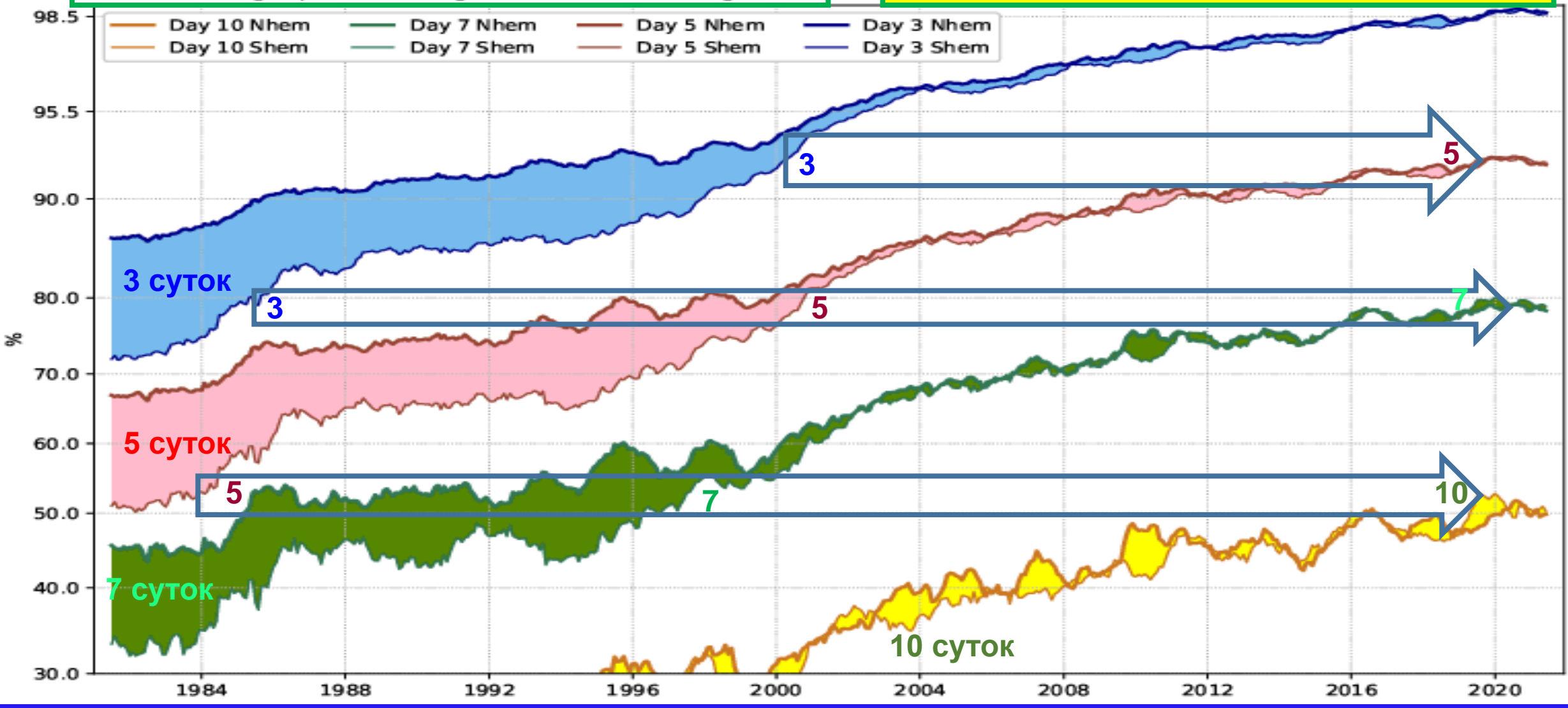


From article: "4. Discussion and conclusions. ... Among the models the IFS showed the lowest RMSE for most parameters and regions. The result could be partly because we expected the lowest initialization shock from IFS. The second best performing model was for most parameters ICON, and that model had the lowest RMSE for z500 in the medium-range over S. Hemisphere ..." (p. 23).



ECMWF HRes
ACC 500hPa geopotential height (12-month running mean)

Коэффициент корреляции аномалии N500





МОТИВАЦИЯ создания краткосрочного глобального ЧПП на базе российских конфигураций ICON-Ru модели ICON



В настоящее время модель ICON согласно оценкам ЕЦСПП по сравнению качества всех оперативных глобальных моделях, выполняемых по заданию ВМО, прочно вошла в состав лучших оперативных атмосферных моделей мира, причем по некоторым позициям является лучшей в мире. Кроме того, она является ЕДИНСТВЕННОЙ в мире оперативной негидростатической моделью атмосферы с двухсторонней телескопизацией, применяемой одновременно в климатических исследованиях и в оперативной практике как модель ЧПП практически во всех странах-членах консорциума COSMO.

Оценка объемов передач в течении одних суток необходимых начальных данных и боковых ТРЕХЧАСОВЫХ граничных условий для COSMO-Ru6ENA – 60 Гб, необходимых начальных данных для ICON-Ru13N29 – 20 Гб, т.е в 3 раза меньше! Время передачи данных для одного срока для COSMO-Ru6ENA равно 60 мин, а начальных ГЛОБАЛЬНЫХ данных для ICON-Ru13N29 5 мин, т.е в 12 раз меньше.

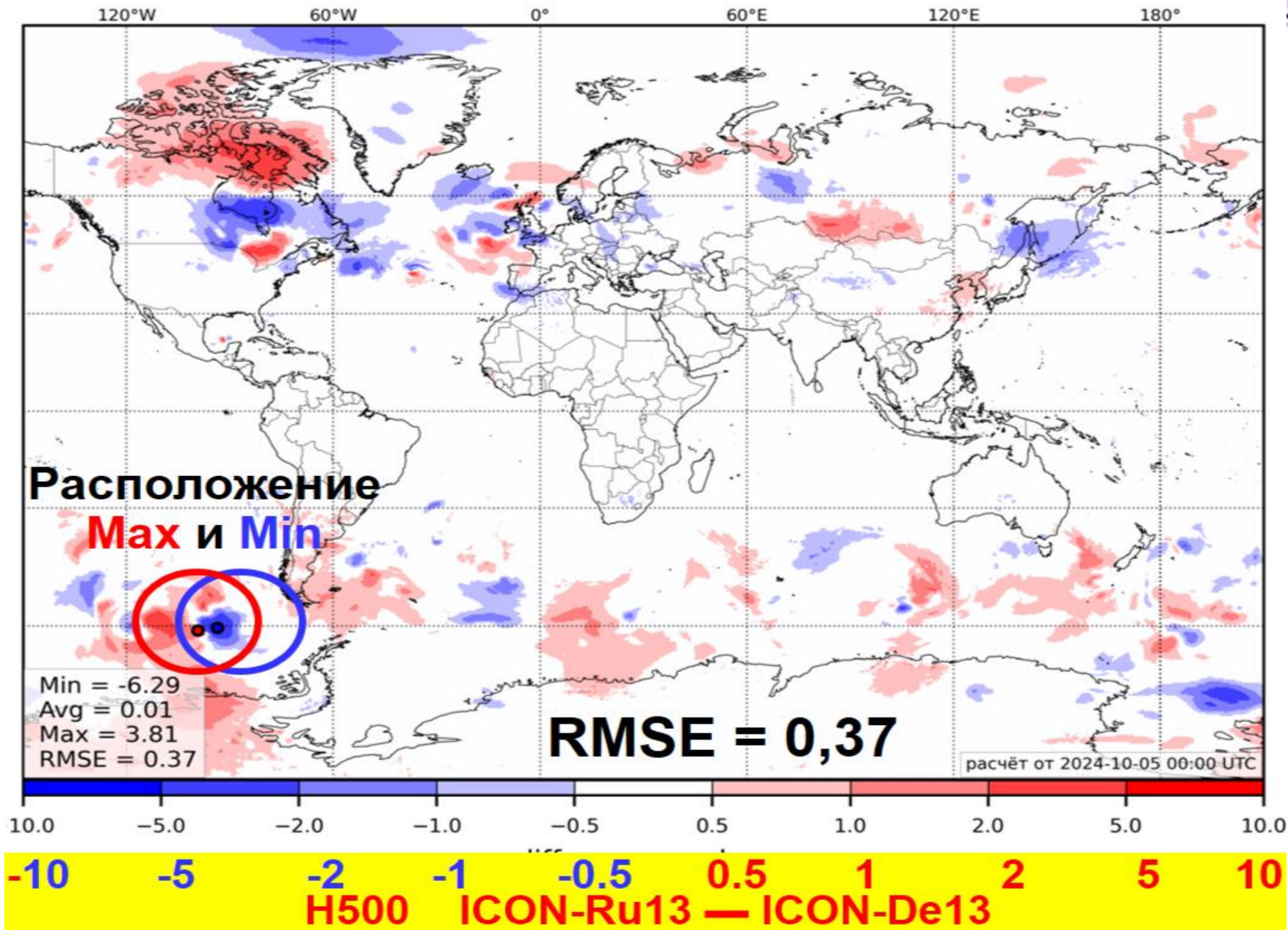
ВЫВОД. Проведение глобальных краткосрочных ЧПП по российской конфигурации ICON-Ru13/6N29 позволит значительно уменьшить нагрузку на каналы связи и использовать ЕЖЕЧАСНЫЕ боковые условия для любой территории!



H500 difference HMC - DWD 2024-10-07 18:00



Разность прогнозов H500 по российской ICON-Ru13 и немецкой ICON-De13 конфигурациям модели ICON по всем узлам сетки с шагом 13 км на 90 час по данным 05.10.2024.00





Оперативные оценки Гидрометцентра России. Январь 2025. <https://method.meteorf.ru/>



Оценки прогнозов метеорологических полей, рассчитанные для различных моделей по территории России за период: январь 2025 г. (исходный срок: 00 ч ВСВ)

МЕТОДИЧЕСКИЙ
КАБИНЕТ
Гидрометцентра России

Успешность оперативных п

2025 год:
январь

2024 год:
январь февраль март апрель

2023 год:
январь февраль март апрель

2022 год:
январь февраль март апрель

2021 год:
январь февраль март апрель

2020 год:
январь февраль март апрель

2019 год:
январь февраль март апрель

2018 год:
январь февраль март апрель

2017 год:
январь февраль март апрель

2016 год:
январь февраль март апрель

2015 год:
январь февраль март апрель

2014 год:
январь февраль март апрель

Модели
Методы, технологии
Опасные явления
Оценки прогнозов
Вопрос-ответ
Комплексный прогноз
Экономический эффект
Программные средства
Нормативы
Публикации
Решения ЦМКП
Региональные разработки
Мероприятия
Инспекции
Контакты
НОВОСТИ

Сайт
Гидрометцентра России

© 2003-2025

На графиках представлены следующие модели:

UKMO - Метеорологический центр Великобритании (сетка поступления $1^\circ \times 1^\circ$);

NCEP - Метеорологический центр США (сетка $0,5^\circ \times 0,5^\circ$);

ICON - Метеорологический центр ФРГ (сетка $0,25^\circ \times 0,25^\circ$);

ICON-Ru - модель ICON, которая рассчитывается в ФГБУ «Гидрометцентр России» (сетка $0,25^\circ \times 0,25^\circ$);

ECMWF - модель Европейского Центра среднесрочных прогнозов (сетка $0,4^\circ \times 0,4^\circ$);

PLAV10 - полулагранжева модель с разрешением ~ 10 км (ФГБУ «Гидрометцентр России», автор М.А. Толстых);

COSMO-6,6 - негидростатическая мезомасштабная модель с шагом сетки 6,6 км (Консорциум COSMO, ФГБУ «Гидрометцентр России»).

Заметим, что реальное разрешение в этих моделях 10-15 км.



Оценки по анализу Гидрометцентра России: территория России

Январь 2025, прогнозы до 240 час. <https://method.meteorf.ru/>



График изменения средней квадратической ошибки прогноза P₀ в зависимости от заблаговременности. Регион: Россия (Оценка по сетке 0,5° x 0,5°).

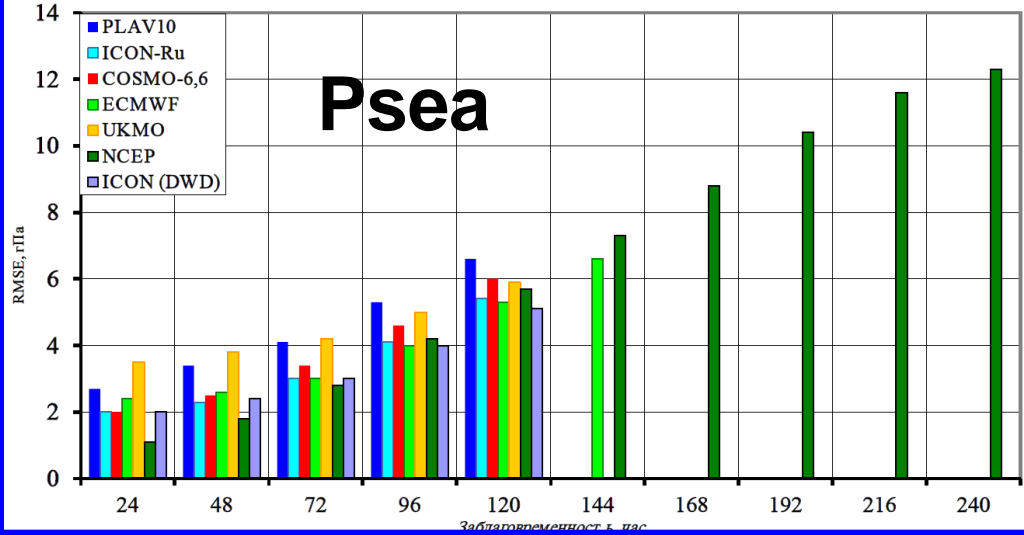
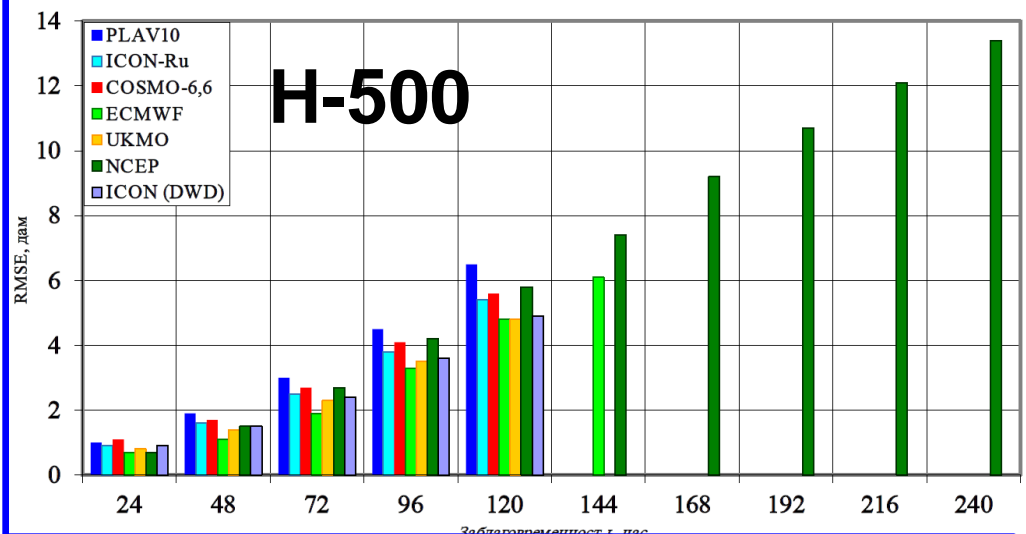


График изменения средней квадратической ошибки прогноза H-500 в зависимости от заблаговременности. Регион: Россия (Оценка по сетке 0,5° x 0,5°).



RMSE
конфигураций:
глобальных
и
COSMO-Ru6ETR

- PLAV10
- ICON-Ru
- COSMO-6,6
- ECMWF
- UKMO
- NCEP
- ICON (DWD)

График изменения средней квадратической ошибки прогноза T-850 в зависимости от заблаговременности. Регион: Россия (Оценка по сетке 0,5° x 0,5°).

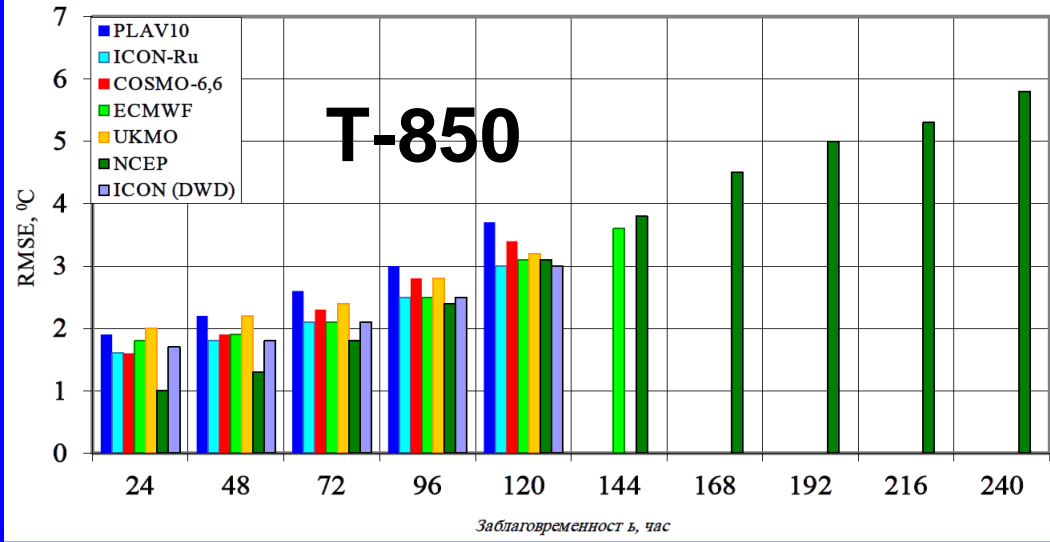
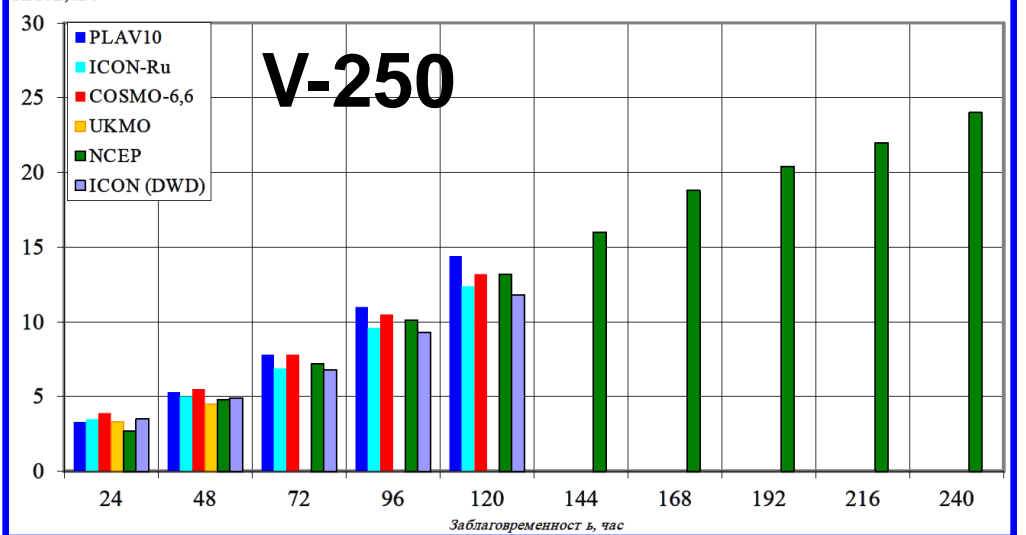


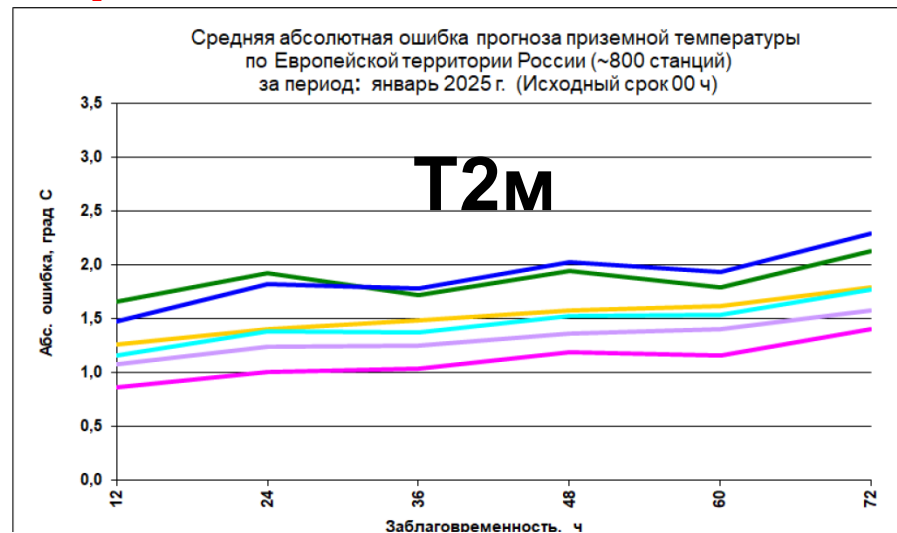
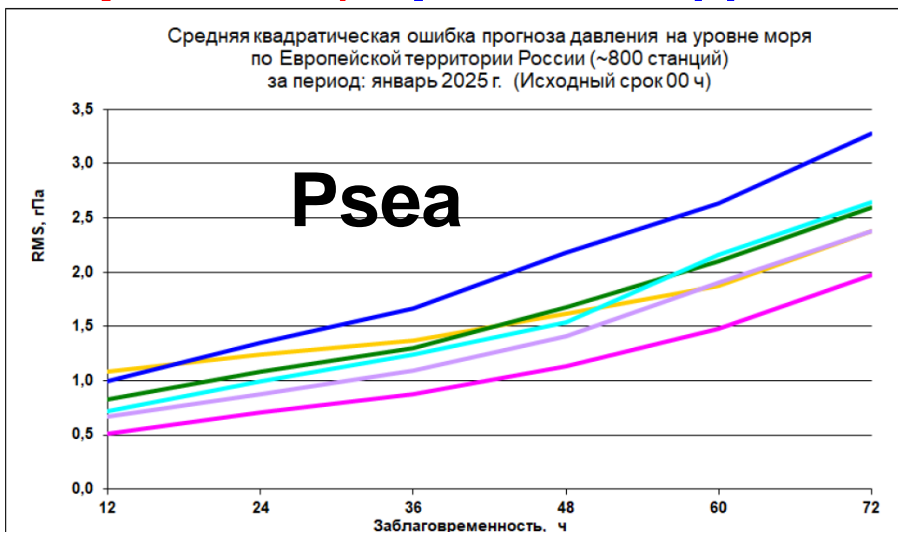
График изменения средней квадратической ошибки прогноза V-250 в зависимости от заблаговременности. Регион: Россия (Оценка по сетке 0,5° x 0,5°).





Оценки Гидрометцентра России по наблюдениям: ETR, 800 станций

Январь 2025, прогнозы до 72 час. <https://method.meteorf.ru/>



RMSE:

UKMO

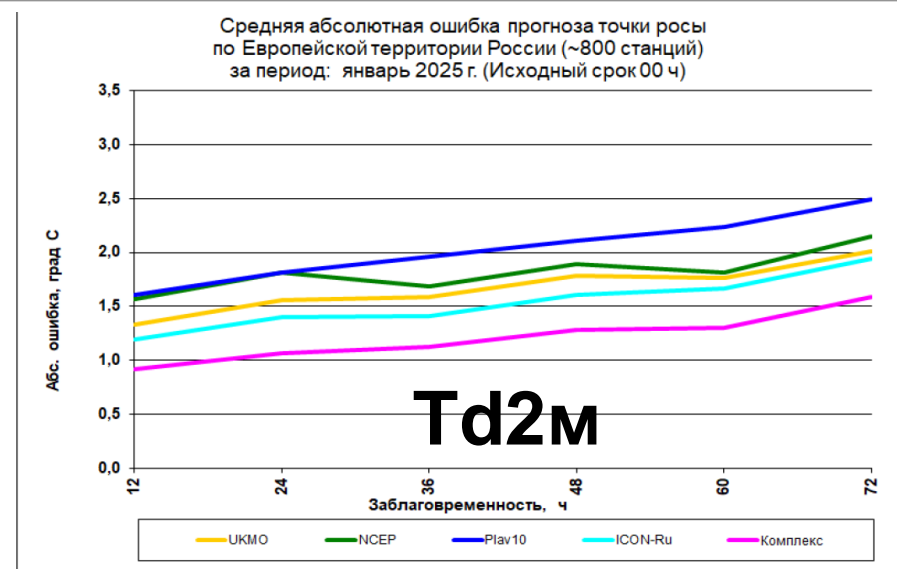
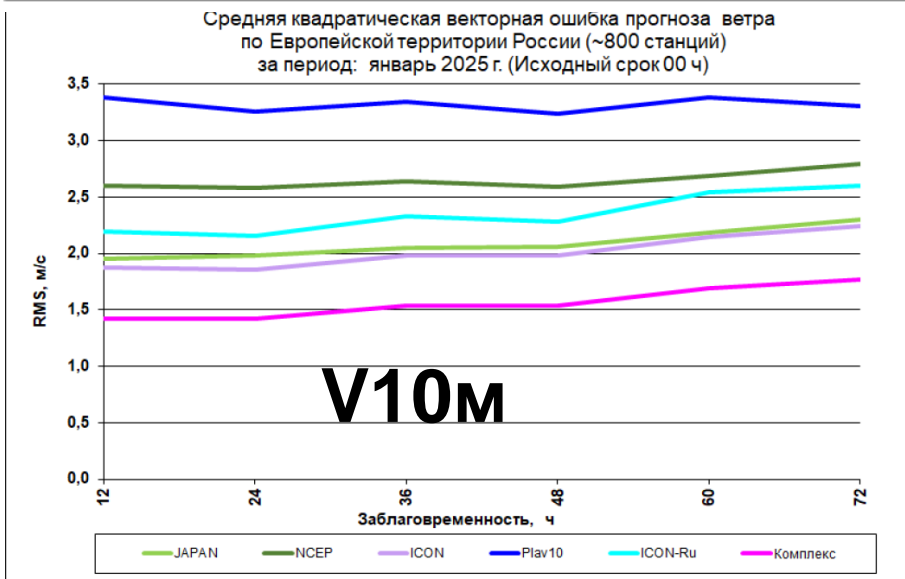
NCEP

ICON

Plav10

ICON-Ru

Комплекс



Оперативность системы COSMO-Ru/icon(120 уровней)

ICON-Ru13 (глобальная, шаг сетки 13км).
2880 ядер, прогноз на 120 ч за 37 мин.

ICON-Ru6/13N29 (глобальная, шаг сетки 6,5 км
для севернее параллели 29,5°
с.ш., и 13 км южнее 29,5° с.ш.)

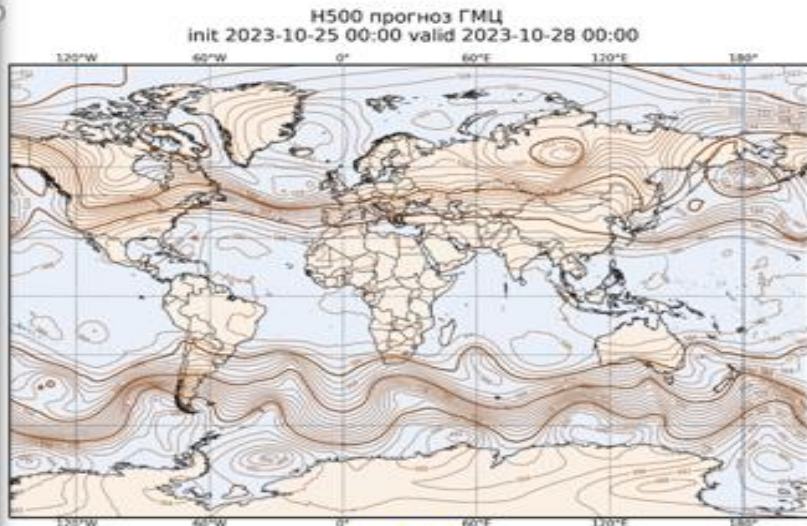
2880 ядер, прогноз на 72 ч за 64 мин.;
5760 ядер, прогноз на 120 ч за 55 мин.

ICON-Ru13
сентябрь 2023,
Европа: качество
72 час прогнозов
H500 системы
COSMO-Ru/icon

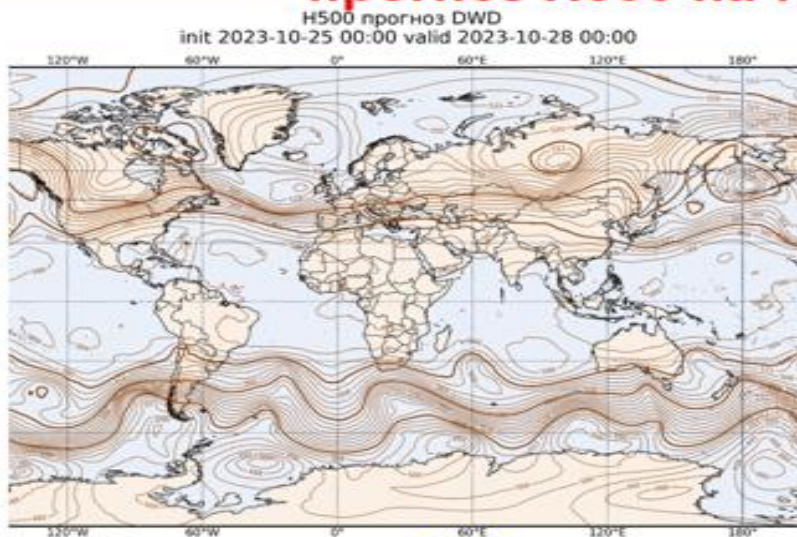
	H500	RMSE
zabl	DWD_12	RU_12
12	0,65	0,70
24	0,77	0,79
36	0,93	0,98
48	1,17	1,21
60	1,44	1,49
72	1,80	1,82

2023101500-20231018:

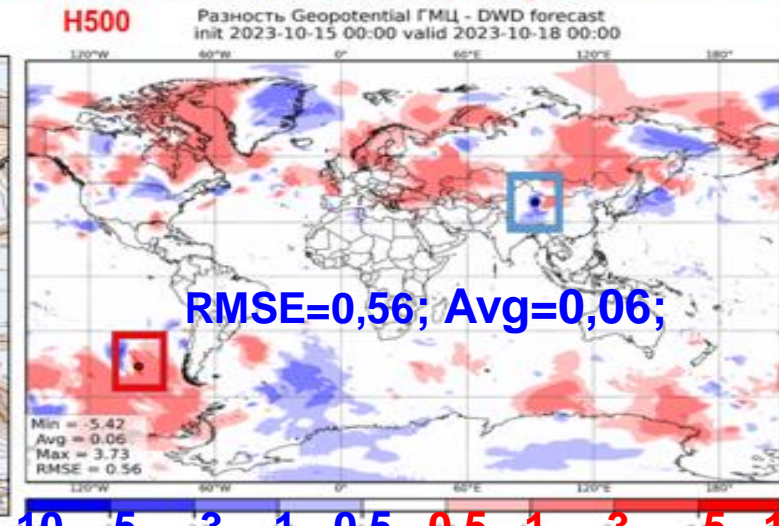
прогноз H500 на 72 час ГМЦ, DWD и разность



ГМЦ



DWD



-10 -5 -3 -1 -0,5 0,5 1 3 5 10
-5,42 ≤ ГМЦ-DWD ≤ 3,73



ПРЕИМУЩЕСТВО ICON-Ru13/6N29 над COSMO-Ru6ENA



(ЛУЧШЕЕ – ВРАГ ХОРОШЕГО)

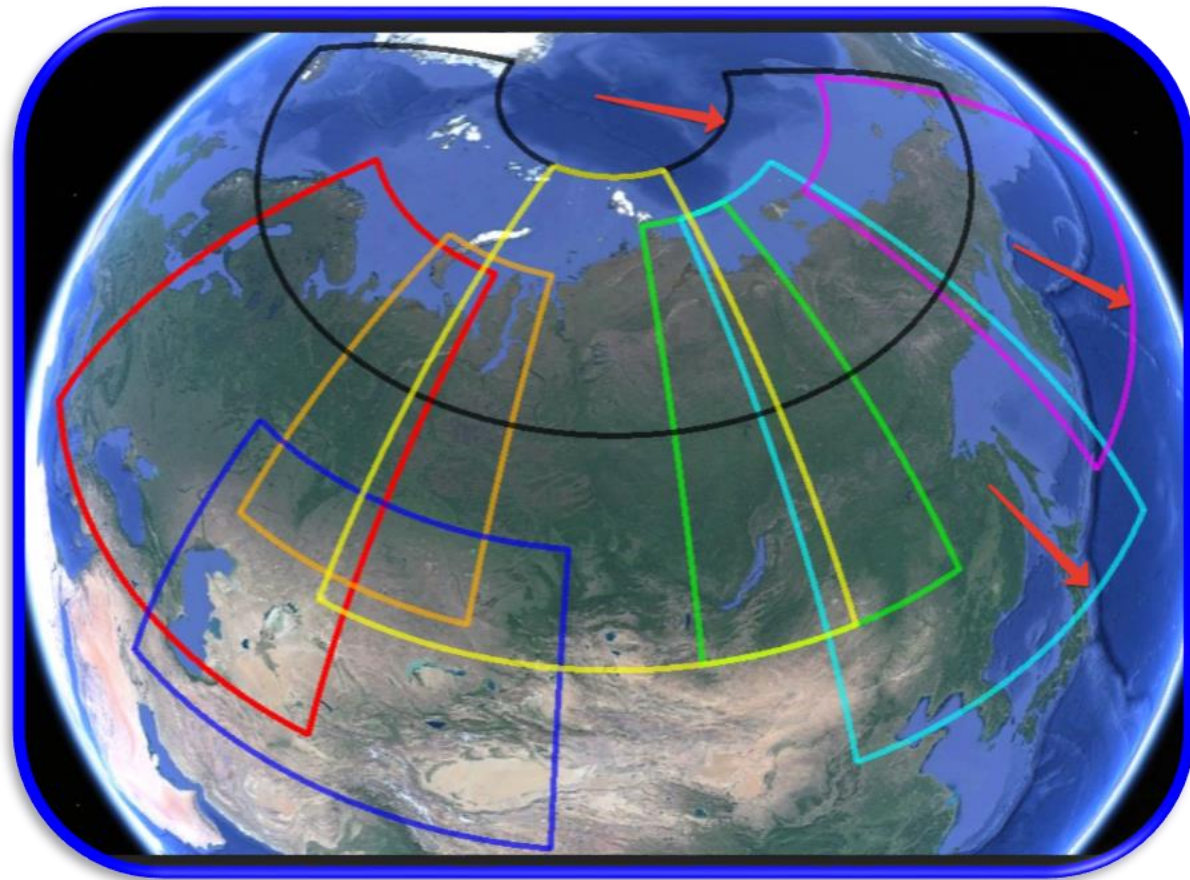
Глобальные краткосрочные ЧПП ICON-Ru13/6N29 на 5 суток на суперкомпьютере «Росгидромет»

1. удовлетворяют принятому в мировой практике ограничению 1 час (ЧПП на 5 суток с 6000 ядрами по ICON-Ru13/6N29 требует 55 мин);
2. для внетропической части Северного полушария ЧПП по ICON-Ru13/6N29 с шагом вложенной сетки с шагом 6,5 км проводится для почти в 2 раза как более крупной области вычислений, чем по COSMO-Ru6ENA, так и почти с 2 раза большим количестве уровней по вертикали (74 вместо 40);
3. вне вложенной сетки с шагом 6,5 км **дополнительно** вычисляются глобальные краткосрочные ЧПП с шагом сетки 13 км;
4. согласно авторским и производственным испытаниям **краткосрочные прогнозы ICON-Ru13/6N29 показали более высокое качество** по сравнению с прогнозами оперативной COSMO-Ru6/ENA. Например, для холодного периода:
 - ✓ для территории России среднеквадратические отклонения прогностических полей Psea и H500 от соответствующих полей анализа Гидрометцентра России уменьшились **на 11% - 27%**;
 - ✓ для Европейской территории России средние абсолютные отклонения краткосрочных прогнозов T2м от наблюдений **уменьшились на 7% - 12%**.



Модель ICON и развитие системы COSMO-Ru на основе конфигураций ICON-Ru и ILAM-Ru: детализированные конфигурации ILAM-Ru (эксперименты: 65 уровней, 48ч, 2880 ядер)

ILAM-Ru2 для территории России (для МЧС) + Арктика + СМП



Домены, шаг сетки 2 км	Время счета / узлов сетки
1. ETR	64 мин / 2 959 068
2. Урал	41 мин / 980 300
3. Сибирь	53 мин / 2 414 604
4. Восточная Сибирь	24 мин / 1 191 332
5. Дальний Восток	52 мин / 2 607 268
6. Камчатка	59 мин / 2 032 784
7. Арктика $h=3,25\text{км}$, $\Delta t=30\text{с}$	24 мин / 1 417 484
8. Центральная Азия	42 мин / 2 032 784

Конфигурации ILAM-Ru модели ICON для краткосрочного ЧПП с шагом сетки 2,0 км для территории России, стран Центральной Азии и с шагом сетки 3,25 км для Арктики - Сев.морского пути

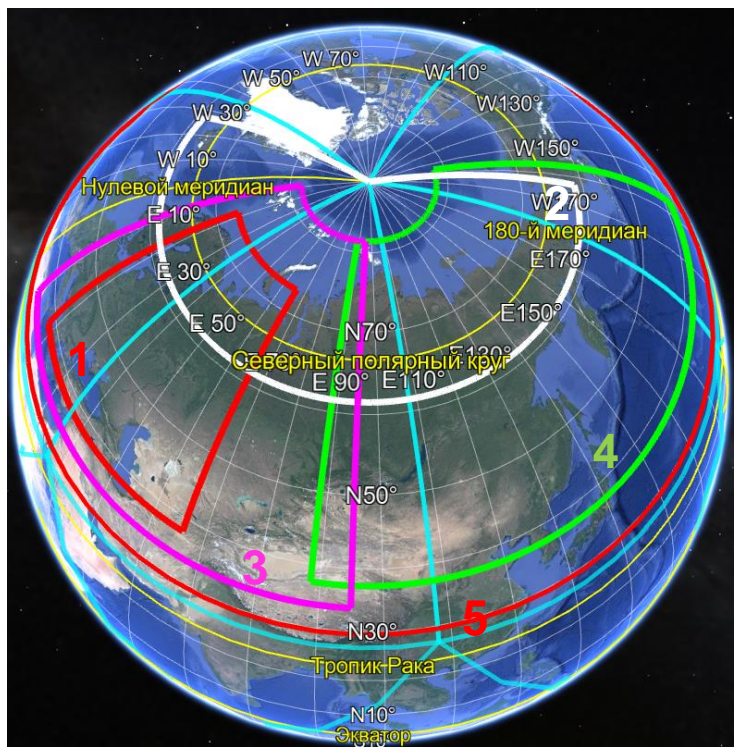
Для улучшения обеспечения МЧС детализированными краткосрочными ЧПП во время кризисных ситуаций режима (пожары, ураганы, наводнения, и т.д.) антропогенного или природного происхождения:

- для ЛЮБОЙ территории России подготовлены конфигурации с шагом сетки 2,0 км (для Арктики 3,25км);
- для ЛЮБОЙ территории мира с шагом сетки 6,5 км или менее **предстоит работа.**



Модель ICON и развитие системы COSMO-Ru на основе конфигураций ICON-Ru и ILAM-Ru: детализированные конфигурации ILAM-Ru3 (эксперименты: 74 уровня, 48ч, 2880 ядер)

Экспериментальные ILAM-Ru3 для территории России (для МЧС) + Арктика/3,25 (СМП)

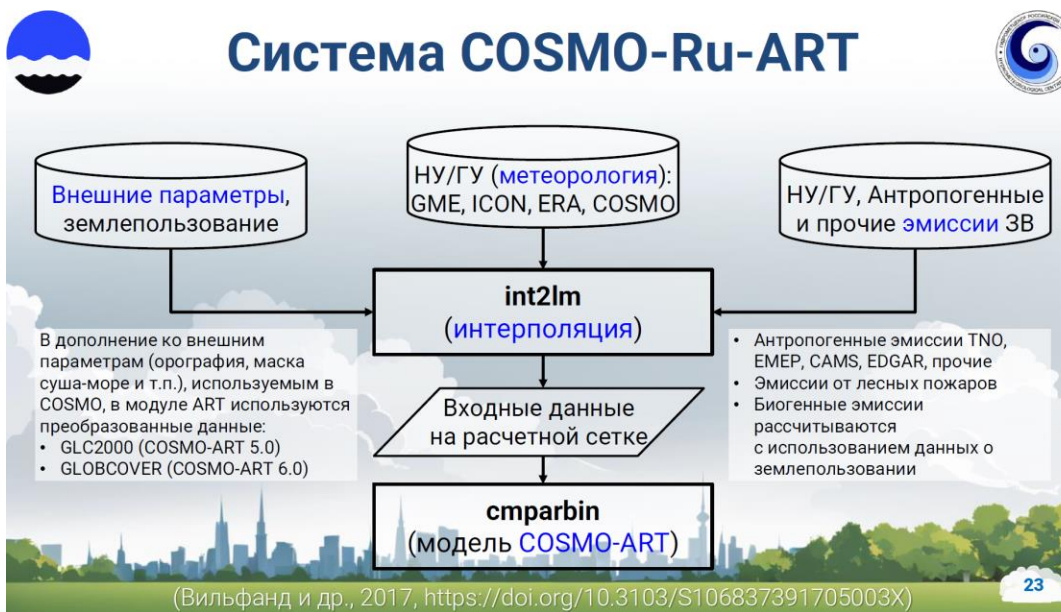
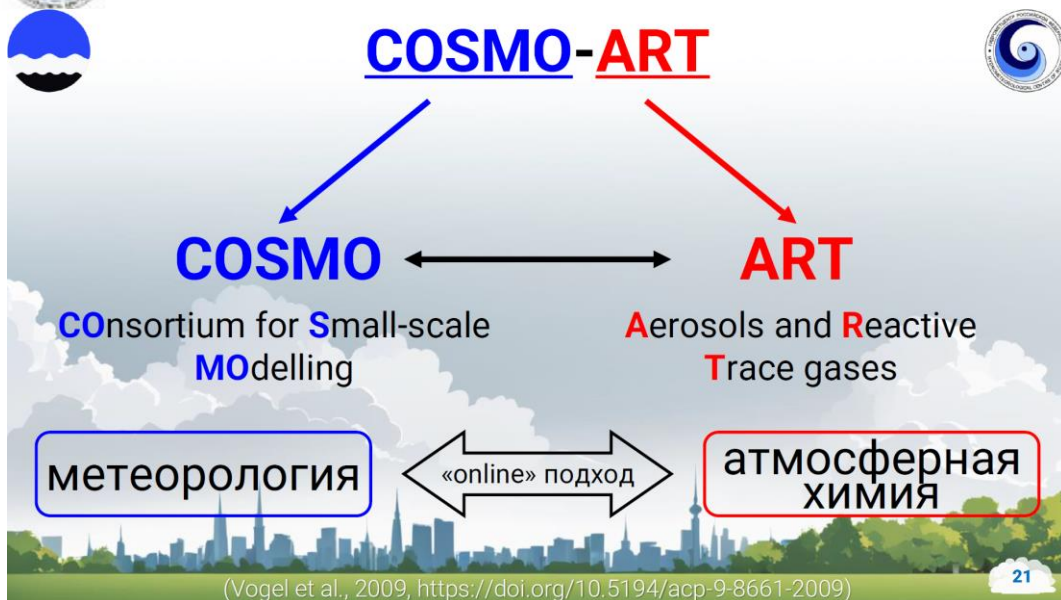


Домены: $h=3,25$ км и $\Delta t=30$ с	Кол-во узлов сетки
1. ETP $h=1,6$ км и $\Delta t=15$ с	2 960 000
2. Арктика $h=3,2$ км	1 810 000
3. WR (West Russia), $h=3,2$ км	2 500 000
4. ER (East Russia), $h=3,2$ км	2 830 000
5. N29 (North, 29,5N), $h=6,5$ км	2 900 000

Конфигурации ILAM-Ru модели ICON для краткосрочного ЧПП с шагом сетки 3,25 км для территории России, стран Центральной Азии и для Арктики – Северного морского пути

Для обеспечения МЧС детализированными краткосрочными ЧПП во время кризисных ситуаций антропогенного или природного происхождения:

- ❑ для ЛЮБОГО региона России подготавливаются конфигурации с шагом сетки 3,2 км (Арктика-3,2км);
- ❑ для ЛЮБОЙ территории мира с шагом сетки 6,5 км или менее **предстоит работа.**



Вычислительные ресурсы, используемые для расчетов COSMO-Ru-ART

- ЦФО (Центральный федеральный округ)
- Шаг по горизонтали 6.6 км
- 170×200 узлов
- 40 уровней по вертикали
- Δt 20 с
- Выбросы ЗВ от лесных пожаров
- Граничные условия (ЗВ) CAMS
- НУ и ГУ условия (метео) COSMO-RuENA
- Прогноз на 48 часов
- COSMO-ART 6.0
- Суперкомпьютер "CRAY XC40-LC" Главного вычислительного центра Росгидромета
- 36×32 = 1152 ядер

22.11.2023 18:00 (МСК): PM_{2.5} на высоте 0-10 м, мг/м³

- Москва
- Шаг 2.2 км
- 160×160 узлов
- 50 уровней
- Δt 20 с
- ЕМЕР+НИИАТ
- Прогноз на 48 часов
- COSMO-ART 5.0
- 36×20 = 720 ядер
- Время счета: 3690 с

Время расчета прогноза (ЦФО): COSMO: 215 с (~4 мин.), COSMO-ART: 2812 с (~46 мин.)

COSMO: 215 с, COSMO-ART (только аэрозоль): 1245 с, COSMO-ART (только газы): 1630 с

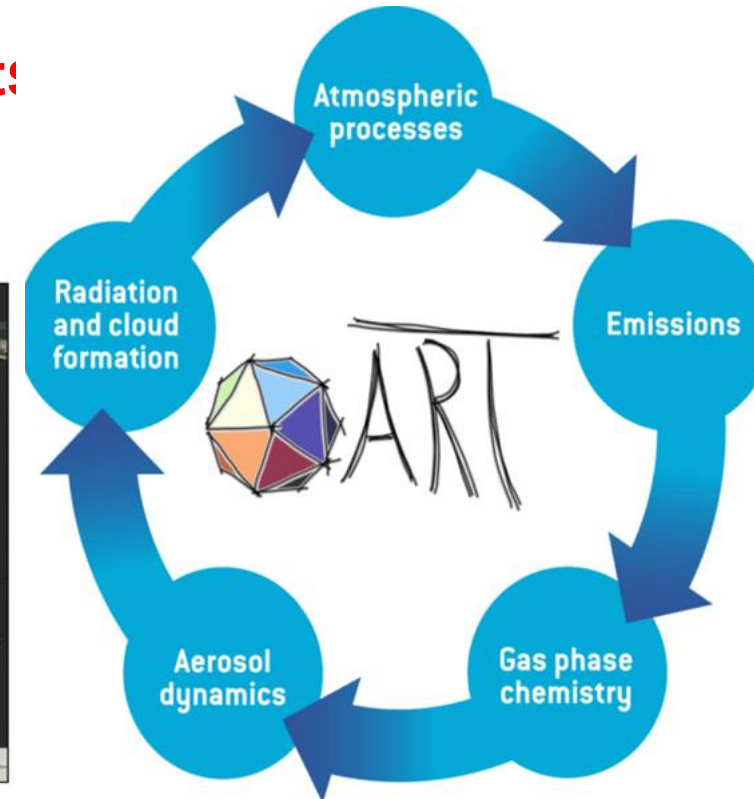
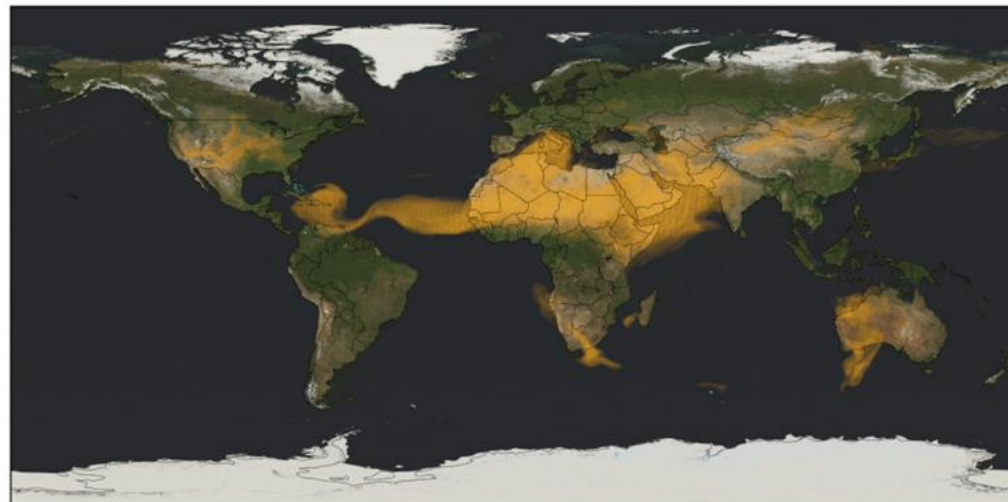
(int2lm, интерполяция на расчетную сетку, 18 ядер: ~600 с)

ICON-ART

Ali Hoshyaripour and the ARTists

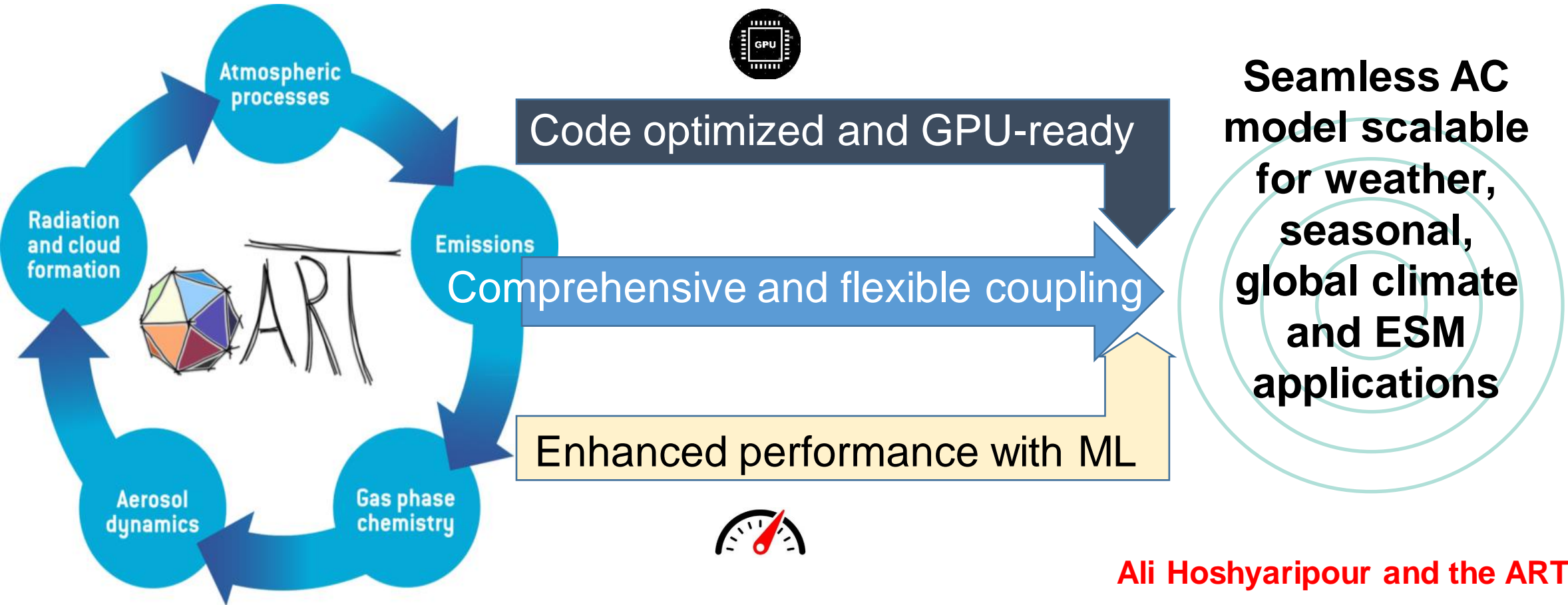


22-06-2019 00:00





ICON-ART



Ali Hoshyaripour and the ARTists

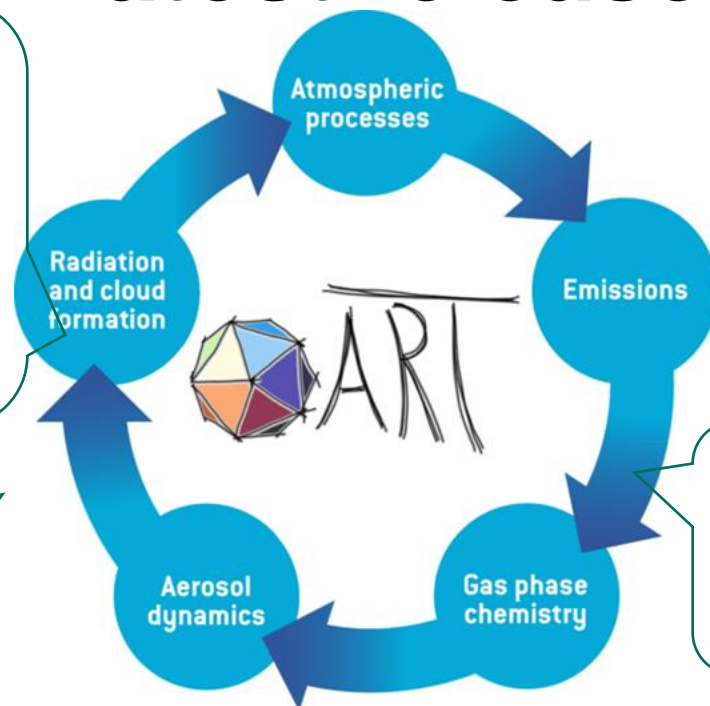


ICON-ART: latest release 2024.07

Ali Hoshyaripour
and the ARTists

- Optics of all natural aerosols
- Optics of internally mixed aerosols
- Coupling with radiation (full and reduced grid)
- Warm and cold activation
- Dusty-cirrus parameterization

- Modal treatment
- AERODYN
- ISORROPIA
- Water uptake by SS



- Point source
- All natural aerosols
- Biomass-burning plumes
- Volcanic plumes (FPLUME)
- Online emission module
- MEGAN

- Lifetime based
- Linearized schemes (LINOZ, N₂O-NO_y)
- Simplified OH chemistry
- **MECCA/KPP** (--enable-art-gpl)

На суперкомпьютере "РОСГИДРОМЕТ" Главного вычислительного центра Росгидромета в конце 2024 г. была установлена химико-транспортная конфигурация ICON-Ru2-ART модели ICON-ART версии 2.6.5 и проведены тестовые запуски с переносом пассивной примеси от точечного источника.



CITES '2023. 13 – 23 ИЮНЯ 2023. МОСКВА, РОССИЯ



Вертикальное распределение PM_{2.5} в предгорной городской зоне по данным измерений с помощью БПЛА и моделирования



Полюхов А.А., Кирсанов А.А., Сенник И.А., Гвоздева А.В., Глебов А.Ю., Петров Н.А., Гибадуллин Р.Р., Лаврентьева А.И., Леонова Д.С., Масляшова А.О., Нариманидзе А.А.



А.А. Полухов,

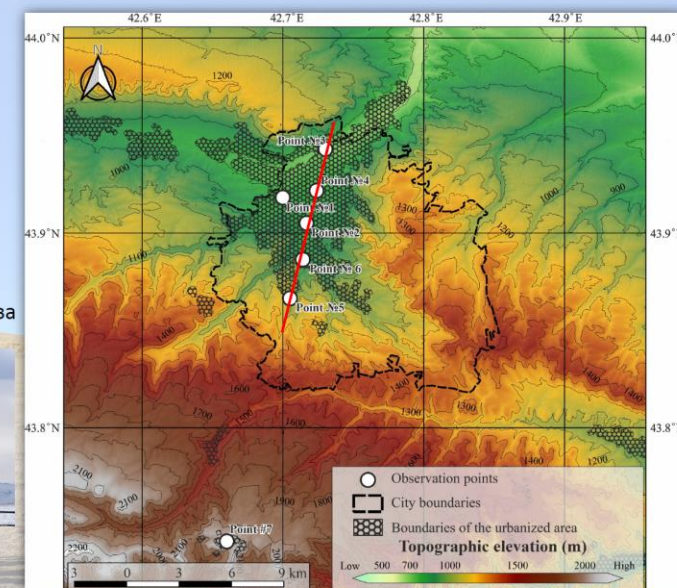
А.А. Кирсанов и др., 2023

Точки наблюдений:

- №1. Перекрёсток улиц Азербайджанская и 40 лет Октября
- №2. Центр города
- №3. У моста реки Подкумок
- №4. Ж/д станция «Минутка»
- №5. Фоновая
- №6. База ИФА
- №7. Кисловодская Высокогорная Научная Станция ИФА им. А.М.Обухова



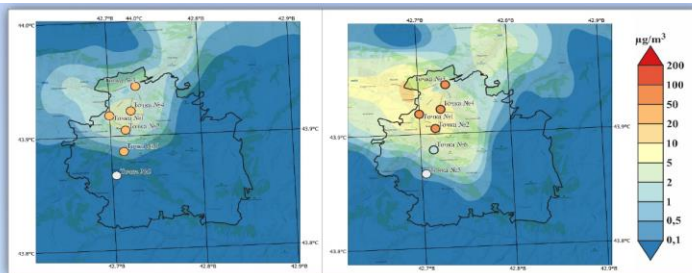
Воздушный газоанализатор Sniffer4D БПЛА DJI Matrice 300



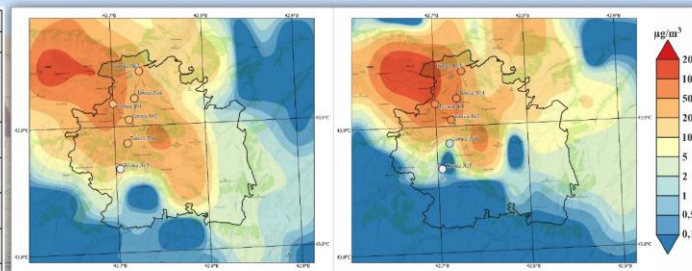
Адаптирование модели COSMO-Ru2-ART на территорию г. Кисловодска

Средние по точкам статистические показатели ошибок двух тестовых модельных прогнозов концентрации загрязняющих веществ за период 27.01.2023-03.02.2023

Пункт измерения	Вещество	Средняя ошибка (МЕ)	
		Test 1	Test 2
№1. Перекрёсток улиц Азербайджанская и 40 лет Октября	Pm _{2.5}	24,52	-0,74
№2. Центр города	Pm _{2.5}	32,00	15,46
№3. У моста реки Подкумок	Pm _{2.5}	26,81	11,69
№4. Ж/д станция «Минутка»	Pm _{2.5}	20,40	0,13
№5. Фоновая (кладбище)	Pm _{2.5}	27,04	20,43
№6. База ИФА	Pm _{2.5}	19,32	11,01

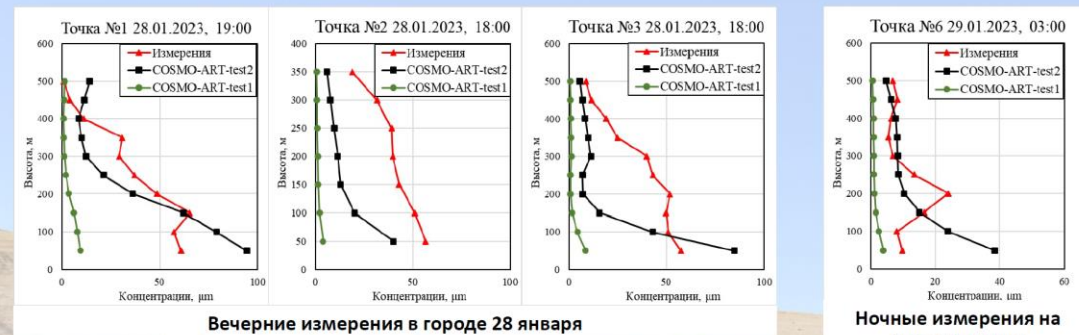


Прогноз концентрации PM_{2.5} 1-го запуска модели в утренние часы (09:00-11:00) (слева) и вечерние часы (17:00-19:00) (справа) 27 января 2023 на высоте 50 метров



Прогноз концентрации PM_{2.5} 2-го запуска модели в утренние часы (09:00-11:00) (слева) и вечерние часы (17:00-19:00) (справа) 27 января 2023 на высоте 50 метров

Сравнение вертикального распределения модельных и наблюдаемых концентраций PM_{2.5}



Вечерние измерения в городе 28 января

Ночные измерения на Базе 29 января

Несмотря на корректировку, модель COSMO-ART не воспроизводит накопление частиц PM_{2.5} под температурной инверсией



2. СОСТОЯНИЕ

**численных прогнозов погоды и климата на примере
бесшовной негидростатической модели ICON
и её конфигураций**

2.2. ВОЗМОЖНОСТИ ICON

2.2.2. LES



LES и шторм разрешающие конфигурации модели ICON как пример возможностей будущих ЧПП

B. Stevens, ..., G. Zaengle, The added value of large-eddy and storm-resolving models for simulating clouds and precipitation // *J. Met. Soc. Japan*, 2020, v. 98, p. 395-435. Doi: 10.2151/jmsj.2020-021

Journal of the Meteorological Society of Japan

Vol. 98, No. 2

$h=156\text{ м}, h=312\text{ м}, h=624\text{ м}$

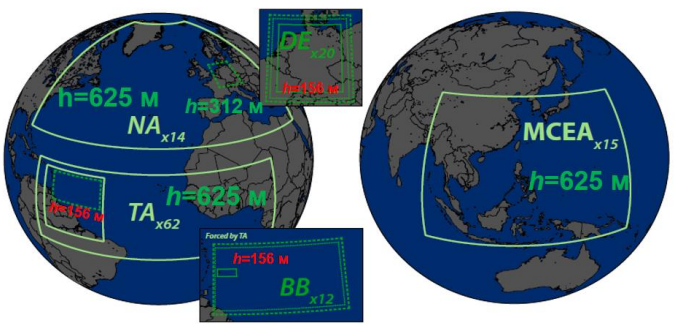


Fig. 3. Simulation domains as well as the number of simulated days for each domain, discussed in this paper. Storm-resolving simulation domains are depicted by a solid lime-green line (NA: Northern Atlantic, TA: Tropical Atlantic, MCEA: Maritime Continent East Asia), large-eddy simulation domains depicted by green lines (DE: Germany, BB: Barbados) solid for 156 m, fine-dashed for 312 m and coarse-dashed for 625 m grid spacings. Technical details for the model configuration for the simulations over each of these domains are provided in Table 1.

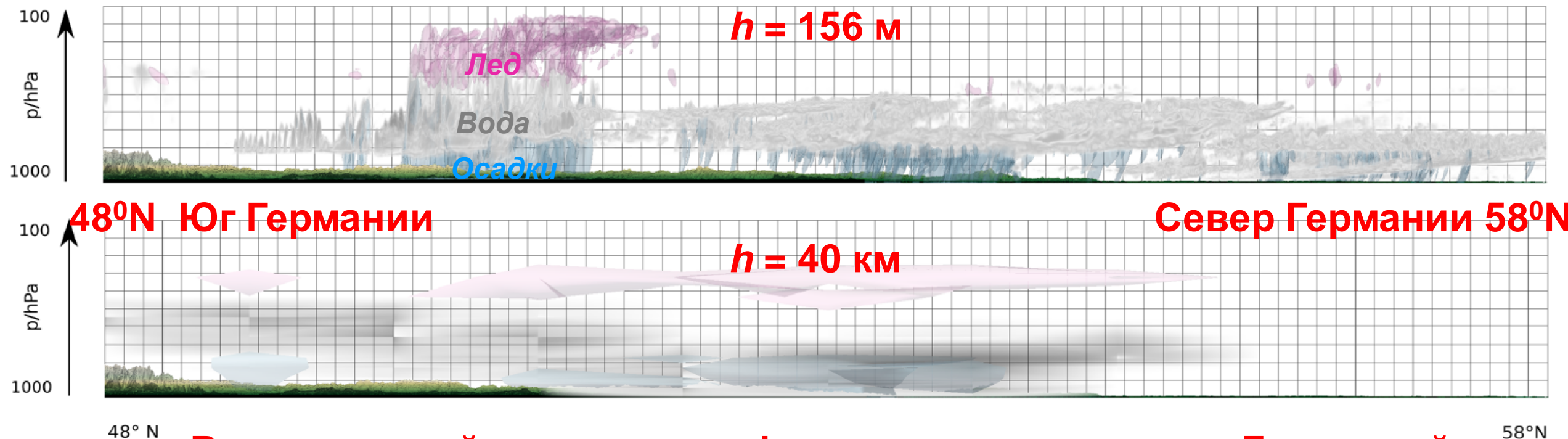
Citation Stevens, B., C. Acquistapace, A. Hansen, R. Heinze, C. Klinger, D. Klocke, H. Rybka, W. Schubotz, J. Windmiller, P. Adamidis, I. Arka, V. Barlakas, J. Biercamp, M. Brueck, S. Brune, S. A. Buehler, U. Burkhardt, G. Cioni, M. Costa-Surós, S. Crewell, T. Crüger, H. Deneke, P. Friederichs, C. C. Henken, C. Hohenegger, M. Jacob, F. Jakub, N. Kalthoff, M. Köhler, T. W. van Laar, P. Li, U. Löhnert, A. Macke, N. Madenach, B. Mayer, C. Nam, A. K. Naumann, K. Peters, S. Poll, J. Quaas, N. Röber, N. Rochetin, L. Scheck, V. Schemann, S. Schnitt, A. Seifert, F. Senf, M. Shapkalijevski, C. Simmer, S. Singh, O. Sourdeval, D. Spickermann, J. Strandgren, O. Tessiot, N. Vercauteren, J. Vial, A. Voigt, and G. Zängl, 2020: The added value of large-eddy and storm-resolving models for simulating clouds and precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 395–435, doi:10.2151/jmsj.2020-021.

April 2020

B. STEVENS et al.

401

(шаги сетки 156 м и 40 км): 2020, Stevents и др., J. Met. Soc. Japan)



Вертикальный разрез атмосферы по меридиану над Германией

Fig. 1. Visualization of convective processes associated with a frontal passage based on the output of the ICON-LEM model with 156 m grid spacing (top) and the ICON-NWP model run in the transpose AMIP mode with 40 km grid spacing (bottom) over Germany. Both simulations are for simulations of 24 April 2013. The colors denote ice (pink), liquid clouds (gray) and precipitation (blue).



Пример влияния значения шага сетки на точность 7-дневного прогноза траектории урагана Сэнди

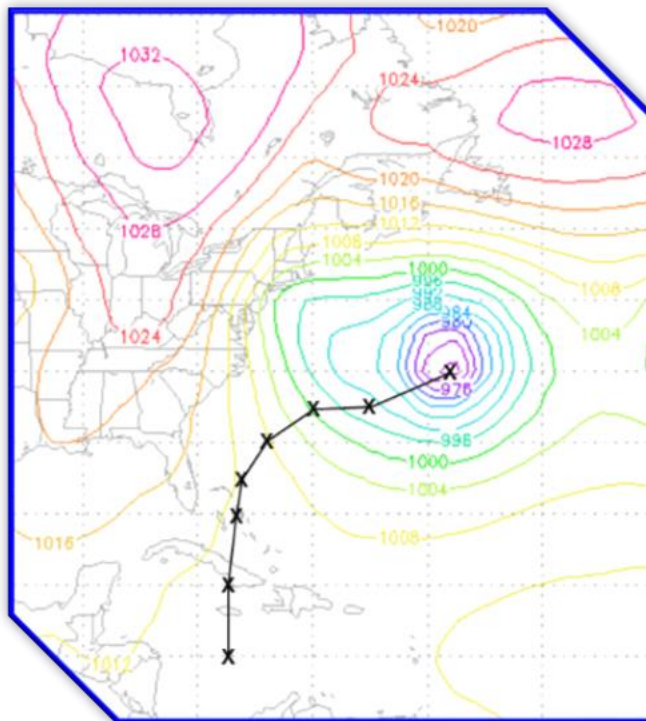


College Park, Maryland December 3, 2013
Dr. Louis W. Uccellini
Director, National Weather Service
NOAA Assistant Administrator for Weather Services

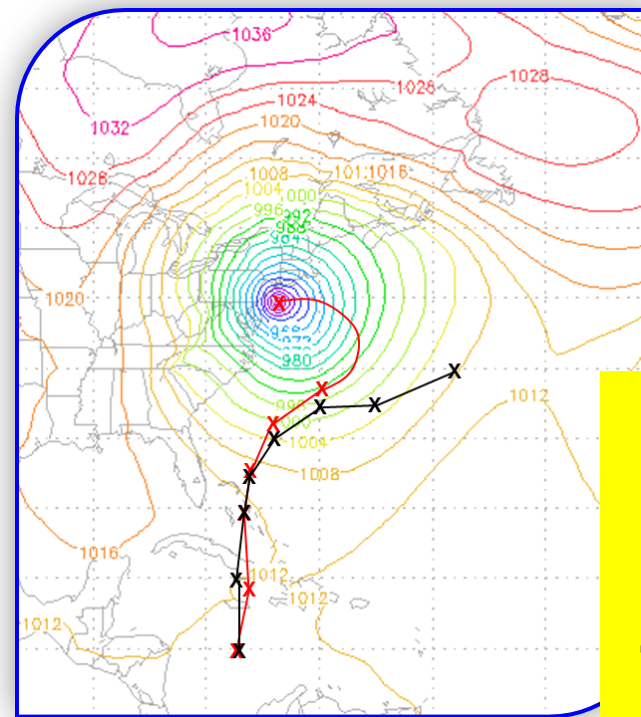
Model Initialized at 00UTC 24 October 2012
7-Day Sea level Pressure (mb) Forecast
valid at 00UTC 31 October 2012
Hurricane Position Shown Every 24h

Increasing NCEP Global Model Horizontal Resolution Improves Hurricane Sandy Track Guidance Hypothesis:

Increased horizontal resolution resolves complicated Atlantic blocking pattern, slows simulated hurricane, and allows it to curve toward the East Coast



Operational (T574~ 27km)



Experiment (T1500~ 13km)

Last 24h of the high resolution experiment Track based on 6h model output



2. СОСТОЯНИЕ

**численных прогнозов погоды и климата на примере
бесшовной негидростатической модели ICON
и её конфигураций**

2.2. ВОЗМОЖНОСТИ ICON

2.2.3. ПРОГНОЗ КЛИМАТА



ВОЗМОЖНОСТИ ICON



Сайт с открытым кодом модели атмосферы ICON-A и документацией:

<https://www.icon-model.org/>

https://www.dwd.de/DE/leistungen/nwv_icon_tutorial/pdf_einzelbaende/icon_tutorial2024.pdf

Статьи о модели океана ICON-O

Sealce: Danilov, S., Wang, Q., Timmermann, R., Iakovlev, N., Sidorenko, D., Kimmritz, M., Jung, T., and Schröter, J.: Finite-Element Sea Ice Model (FESIM), version 2, Geosci. Model Dev. 8, 1747–1761, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1747-2015>, 2015.

Sealce: Mehlmann and Korn, P. (2021): Sea-ice dynamics on **triangular grids**. J. Comput. Phys., 428, 110086. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.110086>

ICON-O: Logemann, L. Linardakis, P. Korn, C. Schrum (2021): **Global tide simulations with ICON-O**: testing the model performance on highly irregular meshes. Ocean Dynamics 71, 43-57. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01428-7>

ICON: МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ (Атмосфера-Суша-Океан-ЛёдМорской)

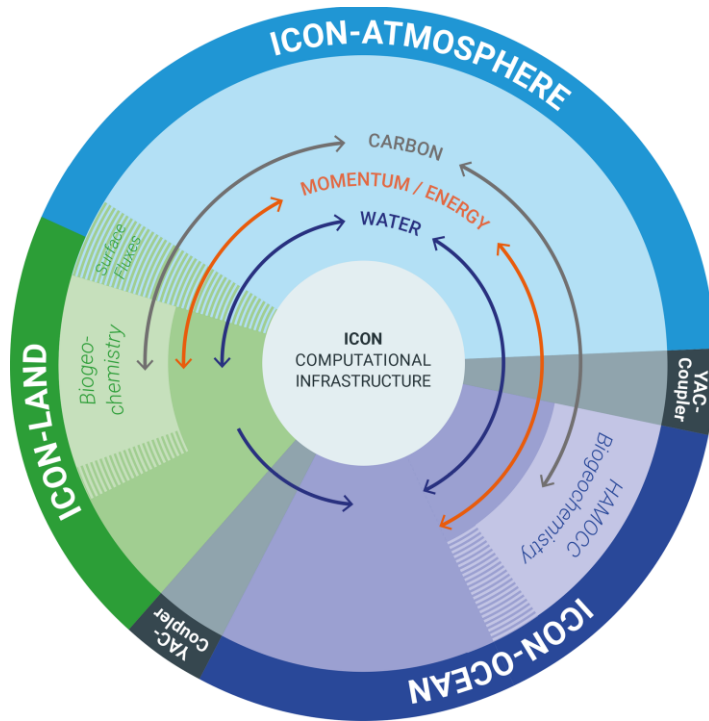
Jungclaus, J. et al. (2022). The **ICON Earth System Model Version 1.0**. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 14: 2021MS002813.

<https://doi.org/10.1029/2021MS002813>

Модель ICON: моделирование Земной системы (атмосфера + суша + океан) на ГОД шагом сетки 5 км, на более 2 месяцев - 2.5 км !

Jungclaus J. H., Lorenz S. J., Schmidt H., Brovkin V., Brüggemann N., Chegini F., et al. The ICON Earth System Model version 1.0. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, 14, <https://doi.org/10.1029/2021MS00281>

Hohenegger, C et al. **ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales** // // *Geosci. Model Dev.*, 16, 2023, 779–811, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-779-2023> .



ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales

Cathy Hohenegger¹, Peter Korn¹, Leonidas Linardakis¹, René Redler¹, Reiner Schnur¹, Panagiotis Adamidis², Jiawei Bao¹, Swantje Bastin¹, Milad Behravesh¹, Martin Bergemann^{1,2}, Joachim Biercamp², Hendryk Bockelmann², Renate Brokopf¹, Nils Brüggemann^{1,3}, Lucas Casaroli¹, Fatemeh Chegini¹, George Datseris¹, Monika Esch¹, Geet George¹, Marco Giorgetta¹, Oliver Gutjahr^{1,3}, Helmuth Haak¹, Moritz Hanke², Tatiana Ilyina¹, Thomas Jahns², Johann Jungclaus¹, Marcel Kern¹, Daniel Klocke¹, Lukas Klufft¹, Tobias Kölling¹, Luis Kornbluh¹, Sergey Kosukhin¹, Clarissa Kroll¹, Junhong Lee¹, Thorsten Mauritsen⁴, Carolin Mehlmann¹, Theresa Mieslinger¹, Ann Kristin Naumann^{1,5}, Laura Paccini¹, Angel Peinado¹, Divya Sri Praturi¹, Dian Putrasahan¹, Sebastian Rast¹, Thomas Riddick¹, Niklas Roeber², Hauke Schmidt¹, Uwe Schulzweida¹, Florian Schütte¹, Hans Segura¹, Radomyra Shevchenko¹, Vikram Singh¹, Mia Specht¹, Claudia Christine Stephan¹, Jin-Song von Storch^{1,5}, Raphaela Vogel⁶, Christian Wengel¹, Marius Winkler¹, Florian Ziemann², Jochem Marotzke^{1,5}, and Bjorn Stevens¹

Figure 1. Overview of the components of the ICON-Sapphire configuration with their interactions.



Модель ICON и развитие системы COSMO-Ru на основе конфигураций ICON-Ru и ILAM-Ru: численные эксперименты с Земной системой с шагами сетки до 1,25 км!

Использованы следующие суперкомпьютеры:

[Levante -DKRZ - Deutsches Klimarechenzentrum](#), с 2022, TOP500 (№60 в 202306), 352 000 ядер, 13.80/10,11 Пфлоп/с

[Mistral-DKRZ - Deutsches Klimarechenzentrum](#), с 2015, TOP500 (№240 в 202306), 99 072 ядер, 3.96/3,01 Пфлоп/с

5 км - 406 д.
2,5 км - 71 д.

Grid spacing	Machine	Nodes	SDPD
5 km	Mistral	420 (300 A, 120 O)	17
”	Levante	600, 24A:8O	126
”	Levante	420, 24A:8O	96
”	Levante	400, 24A:8O	90
”	Levante	200, 24A:8O	48
”	Levante	100, 24A:8O	24
2.5 km	Levante	600, 24A:8O	20
1.25 km	Levante	900, 24A:8O	2.5
1.25 km (A)	Levante	908	4
1.25 km (O)	Levante	1024	97
”	Levante	2048	179



Figure 2. Grid configurations supported by ICON-Sapphire:

- a) global coupled kilometer-scale simulations with a uniform grid in the **atmosphere and ocean**,
- b) global coupled kilometer-scale simulations with a uniform grid in the **atmosphere and refined ocean grid over a specific region (telescope)**, with white for the atmosphere grid and blue for the ocean grid,
- c) **atmosphere-only large eddy simulations over limited domains** with the possibility of using inside nests to consecutively refine the resolution.



Дальнейшее развитие: подготовка в ECMWF и DWD к переходу на экзафлопсные компьютеры и планы до 2030 гг

<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2022/global-numerical-modelling-heart-ecmwfs-forecasts>

2022 – глобальная модель атмосферы IFS (шаг сетки 9 км), совместная с океаном

2030 – цифровой двойник системы Земля (атмосфера, деятельный слой суши, океан, криосфера, биосфера) на основе моделей IFS и ICON с шагом сетки около 1 км, что позволит, хотя бы частично, напрямую считать глубокую конвекцию.

На первом этапе с помощью проекта NextGEMS (01.09.2021-31.08.2025, координаторы Bjorn Stevens at the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) and Dr. Irina Sandu, the team leader for physical processes within Earth System Modelling Section at ECMWF4) будет разработано моделирование системы Земли с шагом сетки 2-5 км.

На втором этапе на их основе будут разработаны два прототипа модели глобальной системы Земля в километровом масштабе (или с разрешением штормов и вихрей): одна на основе IFS ЕЦСПП (в сочетании с моделями океана NEMO и моделью FESOM2), другая на модели ICON Института метеорологии Макса Планка (MPI-M) и Немецкой метеорологической службы.

Моделирование в километровом масштабе будет лежать в основе оперативных прогнозов ЕЦСПП к концу десятилетия.



<https://mpimet.mpg.de/en/communication/news/mpi-m-is-one-of-the-first-users-of-europes-fastest-supercomputer-jupiter>



С мая 2025 года исследователи впервые будут моделировать климат Земли с шагом сетки 1 км в течение целого года, учитывая все важные компоненты климатической системы Земли.

Помимо атмосферы, океана, суши и морского льда, это также включает в себя моделирование всего углеродного цикла, включая перенос углекислого газа. «Это большой шаг для нас, и до сих пор это было невозможно», — говорит Дэниел Клоке.

С более чем одним квинтиллионом – т.е. 1 000 000 000 000 000 000 – операций с плавающей точкой в секунду (FLOPS), высокопроизводительный компьютер **JUPITER**, установленный в исследовательском центре Юлих, **станет первым так называемым exascale-компьютером на европейском континенте.**

... Даже финский **суперкомпьютер LUMI** – на котором **MPI-M и его партнеры** по проекту «Destination Earth» выполняют сложные вычисления с моделями высокого разрешения – достигает «всего» 380 квадриллионов FLOPS – добрая треть того, чего можно ожидать от JUPITER.



Возможность выполнять вычисления

на таких системах — это привилегия и вызов.

Самые быстрые компьютеры в мире используют графические процессоры (**GPU**) вместо обычных центральных процессоров (CPU). Чтобы компьютерная модель могла их использовать, алгоритмы должны быть адаптированы. Ученые из MPI-M, Швейцарского национального суперкомпьютерного центра CSCS и других партнеров разрабатывали модель системы ICON Earth соответствующим образом в течение многих лет. Команда продолжит работу над кодом для настройки и оптимизации моделирования до начала периода вычислений 1 мая.

К концу октября 2025 г. ученые рассчитывают завершить высокоразрешающее моделирование всего сезонного цикла. Оно будет использовано для изучения явлений, которые происходят в очень разных пространственных масштабах и при этом взаимодействуют. **Например,** исследователи хотят выяснить, **как штормы влияют на глобальные ветровые системы и глобальный углеродный цикл.** Ответы на такие вопросы должны помочь **лучше оценить региональные последствия изменения климата.**



3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ



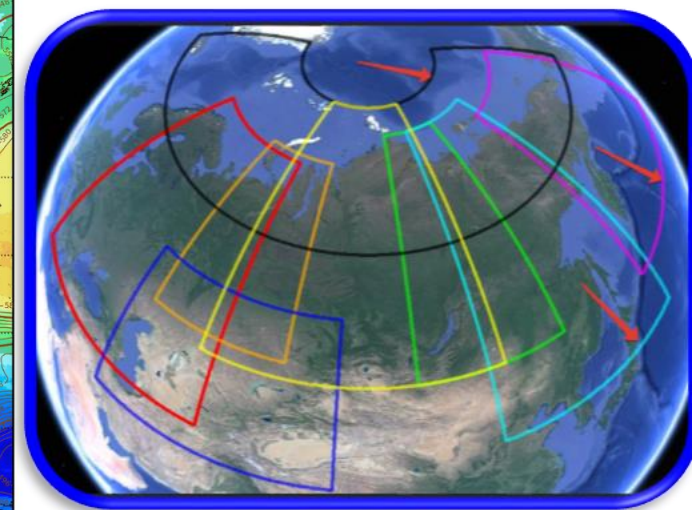
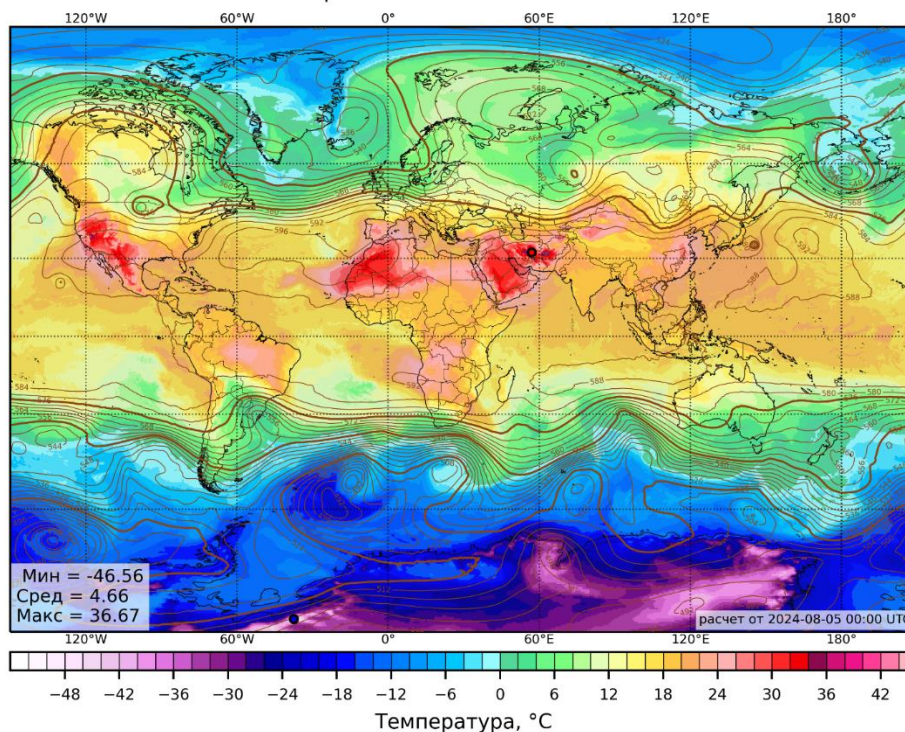
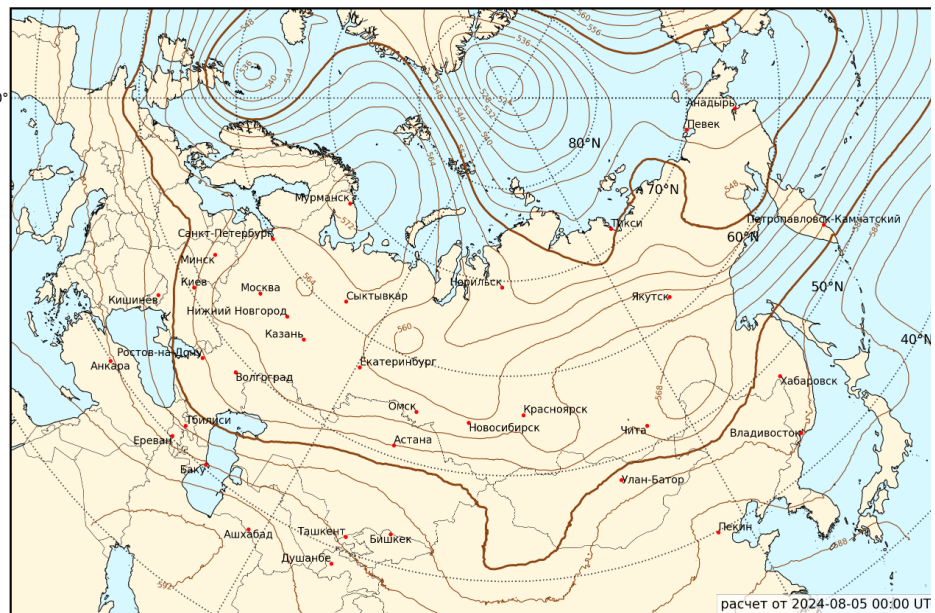
2024 г.



1. Созданы российские конфигурации ICON-Ru (Russia) модели ICON (с января 2024 г. код ICON открыт для общего пользования).
2. Проведены производственные испытания конфигурации ICON-Ru13/6N29, которая имеет шаг сетки 13 км (120 уровней по вертикали до 75 км) с вложенной в нее подсеткой с шагом 6,5 км (74 уровня по вертикали до 23 км) для внетропической территории Северного полушария, расположенной севернее параллели 29,5° с. ш.
3. ЦМКП 5 ноября 2024 г. рекомендовала внедрить российскую глобальную конфигурацию ICON-Ru13/6N29 в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России»

T850 H500 прогноз ICON-Ru13 на 2024-08-10 00:00

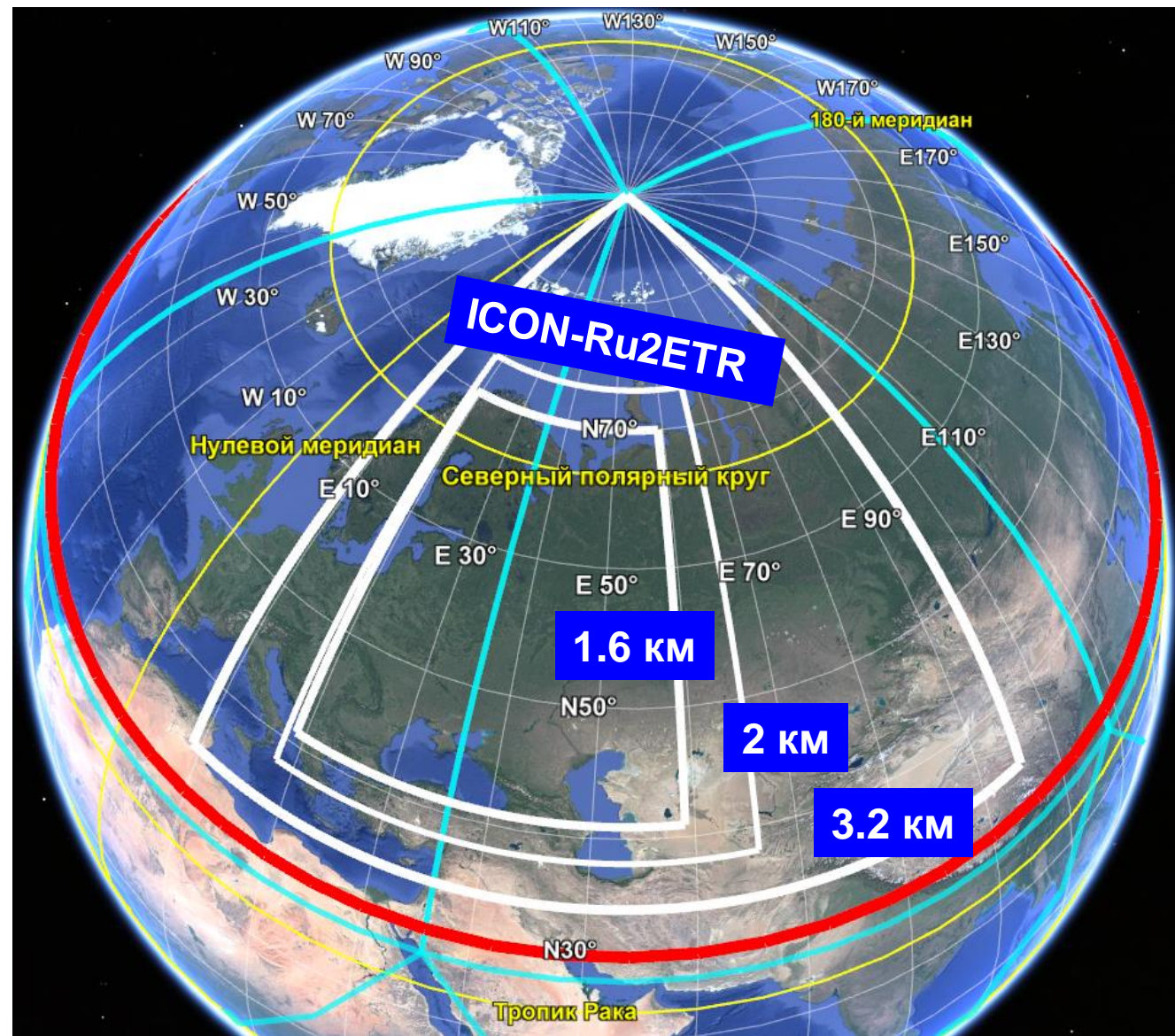
H500 прогноз ICON-Ru 6N29 на 2024-08-08 00:00



Усовершенствование системы детализированного численного прогноза погоды COSMO-Ru для Северной Евразии, включая территории России и стран СНГ, на основе бесшовной негидростатической модели ICON и технологии вложенных областей.

2025. Прототип системы каскадного детализированного прогноза погоды для территории России и стран СНГ с шагами сетки не более 5 км

2025. Предполагаются производственные испытания ICON-Ru2ETR (шаг сетки 2 км).





СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И СОСТОЯНИЕ

численных прогнозов погоды и климата на примере бесшовной негидростатической модели ICON и её конфигураций



Ривин Г.С.^{1,2}, Розинкина И.А.^{1,2},

Астахова Е.Д.¹, Блинов Д.В.¹, Бундель А.Ю.¹, Варенцов М.И.^{1,2}, Кирсанов А.А.¹,
Копейкин В.В.¹, Самсонов Т.Е.^{1,2}, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Шатунова М.В.¹,
Алферов Д.Ю.¹, Алферов Ю.В.¹, Волкова В.А.¹, Гоморев И.А.¹, Гордин В.А.¹,
Горлач И.А.¹, Коспанов А.А.^{1,2}, Никитин А.Е.¹, Никитин М.А.¹, Перов В.Л.¹,
Пискунова Д.А.^{1,2}, Полюхов А.А.^{1,2}, Ревокатова А.П.¹, Тарасова М.А.^{1,2},
Татаринovich Е.В.¹, Шишов А.Е.¹, Шувалова Ю.О.¹

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Москва. Семинар ИФА РАН. 18 февраля 2025 г. 14.00

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ФГБУ «Гидрометцентр России»