



ЧПП - Численный Прогноз Погоды
Оперативный прогноз погоды ОСНОВАН на ЧПП.
ТИХАЯ РЕВОЛЮЦИЯ в ЧПП

X Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2025), посвященная памяти академика Юрия Ивановича Шокина

**СИСТЕМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ
И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

**Г.С. Ривин (Gdaly.Rivin@mail.ru) и сотрудники ОЧКП Гидрометцентра России
Гидрометцентр России (с 1994 г. Государственный научный центр Российской Федерации);
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова**

СОДЕРЖАНИЕ

- 1. Численный прогноз погоды (ЧПП) как междисциплинарная задача.**
- 2. Современные системы оперативного ЧПП и используемые данные наблюдений.**
- 3. Отечественная оперативная система ЧПП COSMO-Ru Гидрометцентра России:**
 - ✓ современное состояние,**
 - ✓ дальнейшее развитие.**



Заседание семинара ВЦ СО АН СССР.
1-м ряд: Г.И. Марчук, А.С. Алексеев;
2-й ряд: Ю.И. Шокин, Г.А. Михайлов;
3-й ряд: Г.С. Ривин, С.Б. Медведев.

ИВТ СО АН СССР.
Юрий Иванович Шокин.

<https://www.sbras.ru/ru/ppls/shokin>



“ПРОГНОЗ ПОГОДЫ ЯВЛЯЕТСЯ ОДНОЙ ИЗ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НАУКИ” (Г.И. Марчук).

8 июня 2025 г. 100 лет со дня рождения Гурия Ивановича Марчука !
Великий Ученый,
потрясающий Организатор науки,
прекрасный Человек и
замечательный Учитель!

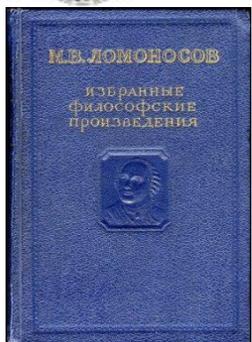
Директор
ВЦ СО АН СССР
член-корреспондент
АН СССР (1962)
Г.И. Марчук
в машинном зале М-20,
1964 г.

Академик АН СССР
Г.И. Марчук (1968)
читает лекцию в НГУ
по вычислительной
математике
(≈ 1971 г.)

Академик Г.И. Марчук, книги и награды,
2013 г.

Прогноз погоды является одной из центральных проблем науки активно влияющей на многие отрасли народного хозяйства, такие как сельское хозяйство, коммунальное хозяйство, авиация и др. Повышение качества прогноза погоды практически немедленно приводит к повышению эффективности народного хозяйства. Резервы экономики, реализуемые за счет даже небольшого повышения качества прогноза погоды, приводят к эффекту, исчисляемому в сотнях миллионов рублей.»

Марчук Г.И. Физика атмосферы и океана и проблема прогноза погоды // Метеорология и гидрология, 1976, № 10, с. 3-14.



М. В. Ломоносов.

Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих // Избранные философские произведения. М.: Госполитиздат, 1950.– С.216-233.

Что больше от всевышнего божества смертному дано и позволено быть может, как чтобы он перемены погод мог предвидеть?

Что подлинно претрудно и едва постижимо быть кажется (1753 г.)



The quiet revolution of numerical weather prediction

doi:10.1038/nature14956



Peter Bauer¹, Alan Thorpe¹ & Gilbert Brunet²

Bauer, P., Thorpe, A. & Brunet, G.

The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, v.525, 47–55 (2015).

Advances in numerical weather prediction represent a quiet revolution because they have resulted from a steady accumulation of scientific knowledge and technological advances over many years that, with only a few exceptions, have not been associated with the aura of fundamental physics breakthroughs. Nonetheless, the impact of numerical weather prediction is among the greatest of any area of physical science. As a computational problem, global weather prediction is comparable to the simulation of the human brain and of the evolution of the early Universe, and it is performed every day at major operational centres across the world.

**Первый номер,
4 ноября 1869 г.**

**2023 Journal
Impact Factor:
50.5**



1. ЧПП как междисциплинарная задача физики атмосферы, математики, химии и биологии



1. Физика

законы сохранения вещества, энергии и состояния: система дифференциальных уравнения гидродинамики и термодинамики.

2. Математика

- чистая (исследование свойств дифференциальных уравнений);
- вычислительная (методы решения алгебраич. и дифференц. уравнений);
- программирование (языки программирования (Fortran 2008, C++, Python, ...), пакеты (MPI, MatLab, для различных форматов данных, визуализация, ...)
- суперкомпьютерное моделирование процессов в окружающей среде

3. Химия:

блок ART (**A**erosol and **R**eactive **T**race gases interactions: 63 вещества, 172 реакции) - выбросы парниковых газов, взаимодействие аэрозолей и облаков, химия атмосферы.

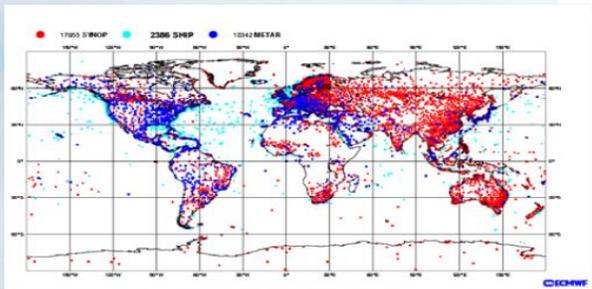
3. Биология:

учет испарения (глубина залегания корней, транспирация, период вегетации, ...).

4. Большие данные: глобальная 3D-сетка ICON-Ru6 имеет **1 440 000 000 узлов.**

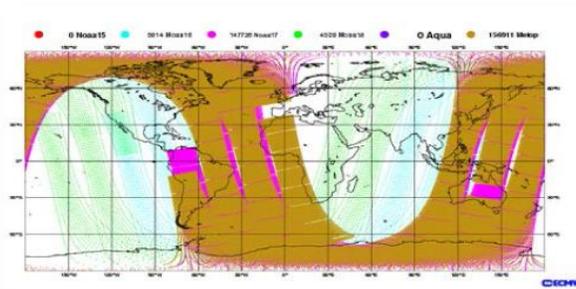
Major assimilated datasets

Surface stations

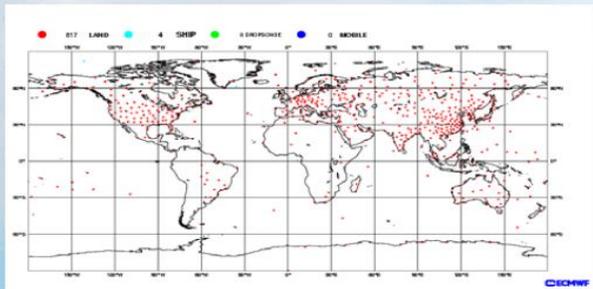


Receive **300 million** observations from **130 sources** daily.

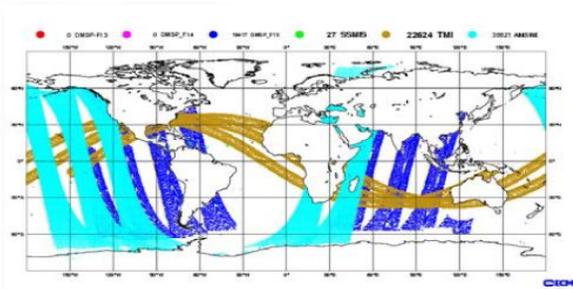
Polar, infrared



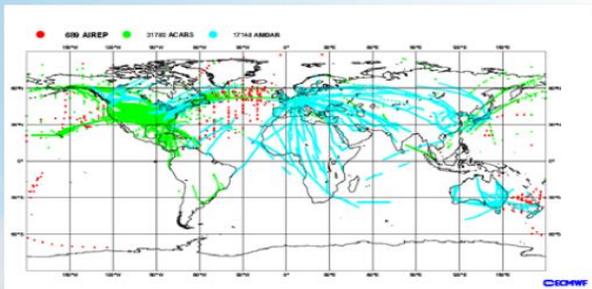
Radiosonde balloons



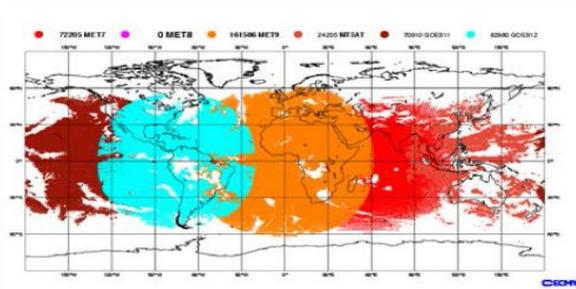
Polar, microwave



Aircraft



Geostationary, IR



Сутки – 86 400 с.
Год – 31 536 000 с

Если синоптик отведет на просмотр одного наблюдения **1 с**, то на просмотр 300 млн наблюдений потребуется **более 9 лет!**

ECMWF's Future challenges in Handling and Manipulating Model and Observational Data

Questions in "Big Data"

Tiago Quintino
Data Handling

B. Raoult, M. Fuentes, S. Siemen
ECMWF



Скалярный вид системы дифференциальных уравнений модели COSMO



1. U

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial E_h}{\partial \lambda} - v V_a \right\} - \zeta \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u, \quad (1)$$

2. V

(1)-(3) – Закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a} \frac{\partial E_h}{\partial \varphi} + u V_a \right\} - \zeta \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v, \quad (2)$$

3. W

(1)-(3) – Закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} u \frac{\partial w}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right\} - \zeta \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + M_w +$$

(4) - Закон сохранения массы

массы

$$+ g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{(T - T_0)}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} \right\} + g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\},$$

4. P

(5) - Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial p'}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial p'}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + g \rho_0 w - \frac{c_{pd}}{c_{vd}} p D, \quad (4)$$

5. T

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho c_{vd}} p D + Q_T, \quad (5)$$

6. Q^v

(6)-(8) – уравнения фазовых переходов влаги

$$\frac{\partial q^v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^v}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^v}{\partial \zeta} - (S^l + S^f) + M_{q^v}, \quad (6)$$

7. Q^l

$$\frac{\partial q^l}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^l}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^l}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^l}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial P^l}{\partial \zeta} + S^l + M_{q^l}, \quad (7)$$

8. Q^f

$$\frac{\partial q^f}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^f}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^f}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^f}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial P^f}{\partial \zeta} + S^f + M_{q^f}, \quad (8)$$

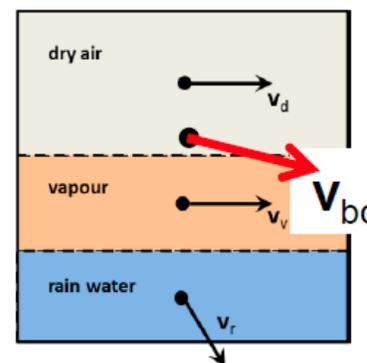
9. ρ

(9) - Уравнение состояния

$$\rho = p \left\{ R_d \left(1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right) T \right\}^{-1}. \quad (9)$$

- 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

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



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

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

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

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

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

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

momentum

energy

mass

partial mass

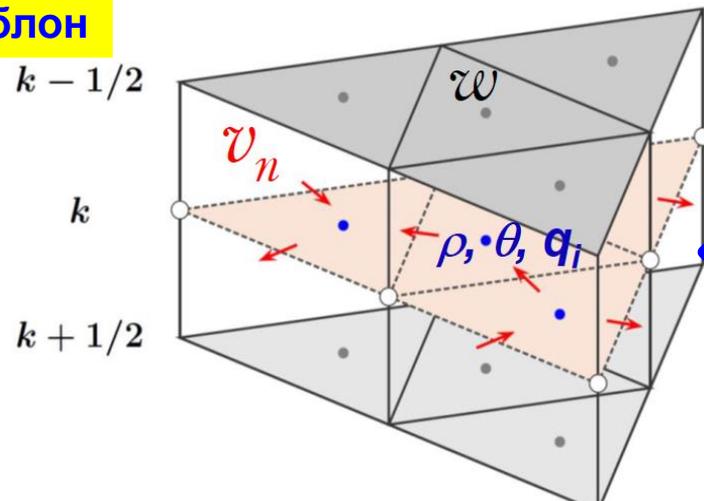
based on Gassmann and Herzog (2008)



Система дифференциальных уравнений модели ICON-3



Шаблон



Модель ICON: МЕТОД РЕШЕНИЯ

Directional splitting II

Two options are available in ICON

Istrang=.FALSE.

Namelist
transport_nml

Istrang=.TRUE.

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

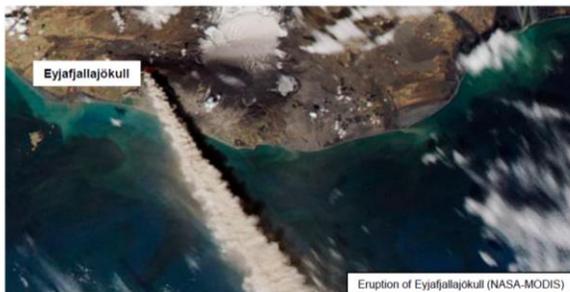


Max-Planck-Institut
für Meteorologie

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



Daniel Reinert – 09.04.2019

11



Классификация атмосферных процессов



ПРОЦЕССЫ (МОДЕЛИ : глобальные, региональные)	МАСШТАБ км	ШАГ СЕТКИ для разрешения моделью процесса / ВРЕМЯ ЖИЗНИ процесса	
планетарные волны	> 10000	МАКРО	1000 км / 1 месяц
антициклоны, циклоны,	10 000 – 2000		200 км / 1 мес.- 1 нед.
фронты, мезоциклоны (полярные и тропические)	2 000 – 200	МЕЗО	α 20 км / 1 нед. – 1 сут.
горные ветры и волны, кластеры кучево-дождевых облаков, морской бриз, низкоуровневые струйные течения	200 – 20		β 2 км / 1 сут. – 1 час
городская циркуляция, гравитационные волны, кучево-дождевые облака, турбулентность ясного неба	20 – 2		γ 200 м / 1 час
кучевые облака, торнадо ¹	2 – 0,2	МИКРО	20 м / 1 – 0,5 час
термики, смерчи	0,2 – 0,002		0,2 м / 30 – 1 мин
турбулентность	< 0,002		1мин. – 1 с.



Сроки прогнозов погоды по терминологии ВМО



Текущая погода	Описание текущих и прогностических параметров погоды в интервале 0-2 часа с момента наблюдения.
Сверхкраткосрочный	Описание параметров погоды в интервале 0-12 часов
Краткосрочный	Описание параметров погоды в интервале 12-72 часа
Среднесрочный	Описание параметров погоды в интервале 72-240 часов
Расширенный	Описание параметров погоды в интервале 10-30 дней , обычно осредненных и выраженных как отклонение от значений климата за этот период
Долгосрочный: - месячный обзор, - трехмесячный или 90-дневный обзор, - сезонный обзор 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 изменчивости климата, - предсказание 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

2. Современные системы оперативного ЧПП и используемые данные наблюдений

Мониторинг данных наблюдательной системы и система оперативного ЧПП являются примером работающей современной цифровой технологии



Система наблюдений





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	0.5 ⁰ - 55 км -----
MetOffice Великобритания	UM: 10 км, 70 ур., + океан 0.25 ⁰ , конечно-разностная	0.5 ⁰ - 55 км UM: 1.5 км, 950×1025×70,
DWD Германия	ICON: 6.5 км над Европой, 13 км вне; 120 ур.	13 км 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 × 0.11 ⁰ , 104ур.(10.2023) ICON-Ru13/6N29: 13 км, 120 уровней (11.2024)	ICON-Ru6N29: 6.5 км, Севернее параллели 27,5 ⁰ 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 03.2023)	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



СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ для оперативных ЧПП (признак тихой революции в ЧПП) (пиковая / на Linpack'e)

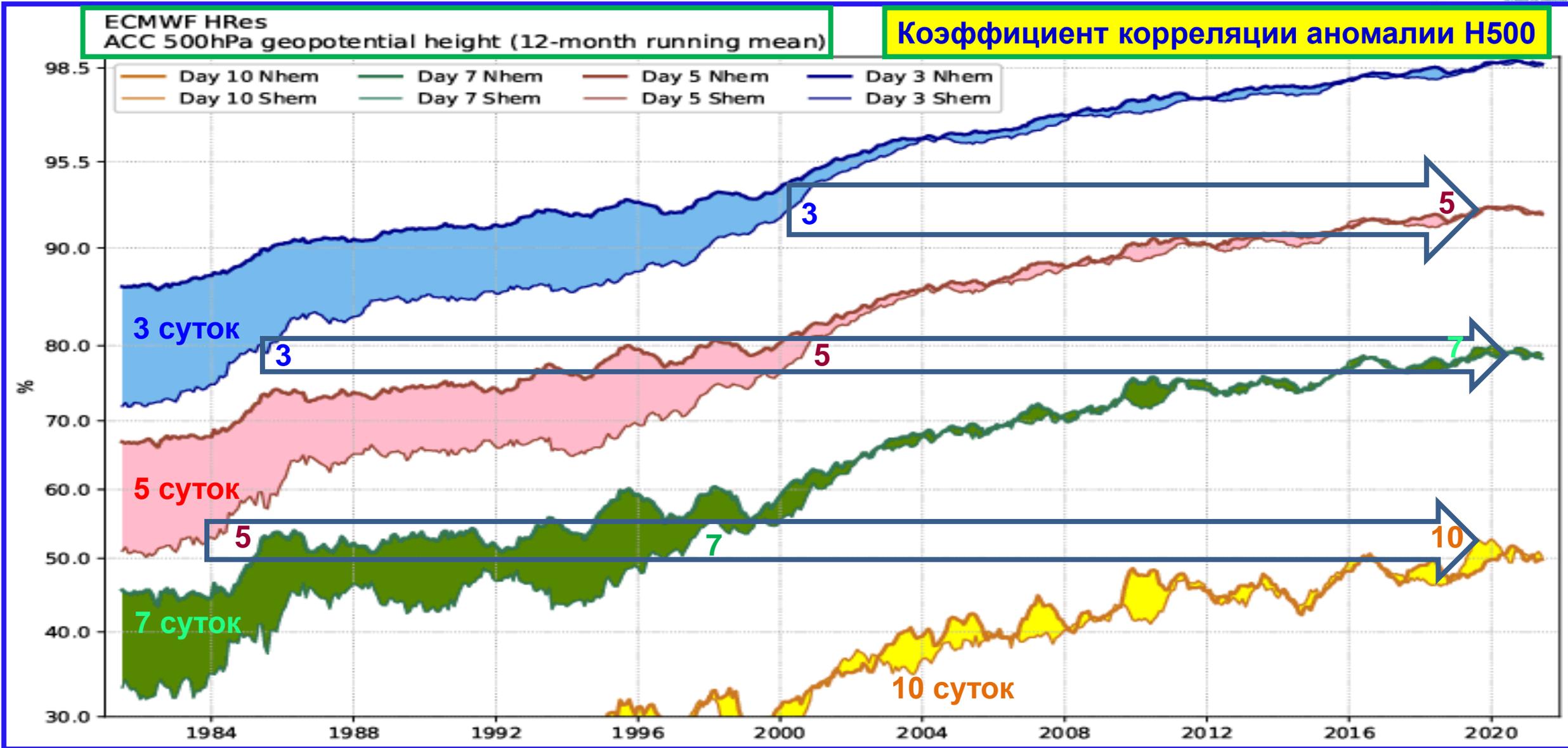


В июньском 2025 г. списке TOP500 самых быстрых в мире суперкомпьютеров для оперативных ЧПП из 200 первых суперкомпьютеров используются 21, т.е., каждый 10-й!

1. Корея (KMA: 90, 91; 25.50/18.00 Пфлопс), 2021
2. Германия (DWD: 113 (16.43/13.58 Пфлопс); 156 (12.22/9.20 Пфлопс), 2025
3. Япония (JMA: 115, 116 (15.57/13.57 Пфлопс), ~~136, 137 (9.13/5.73 Пфлопс)~~, 2022
4. Тайвань (CWA: 131 (12.98/11.16 Пфлопс), 224 (6.49/5.60 Пфлопс), 2024
5. США (NOAA/WCOSS: 143, 144; 11.80/10.01 Пфлопс), 2021
6. Франция (Meteo France: 168 (10.32/8.19 Пфлопс), 180 (10.47/7.68 Пфлопс)), 2020
7. Канада (CMC: 178/179 (10,92/7,76 Пфлопс), 2022
8. Великобритания (MetOffice: 190 (8.13/7.04 Пфлопс), 342, 343 (3.02/2.80 Пфлопс), 2016
9. ЕСMWF (197-200 (8.85/6.67 Пфлопс); 298, 299 (4.25/3.94 Пфлопс), 2023
10. Индия (InstTropMet/NatCMWF: 220/221 (5.94/7.40 Пфлопс)), 270, 402, 2024
11. Аргентина (Метеослужба, 232, 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. ?



ТИХАЯ РЕВОЛЮЦИЯ (КАЧЕСТВО ЧПШ)



Increasing NCEP Global Model Horizontal Resolution **Improves** Hurricane **Sandy** Track Guidance

Model Initialized at 00UTC 24 October 2012

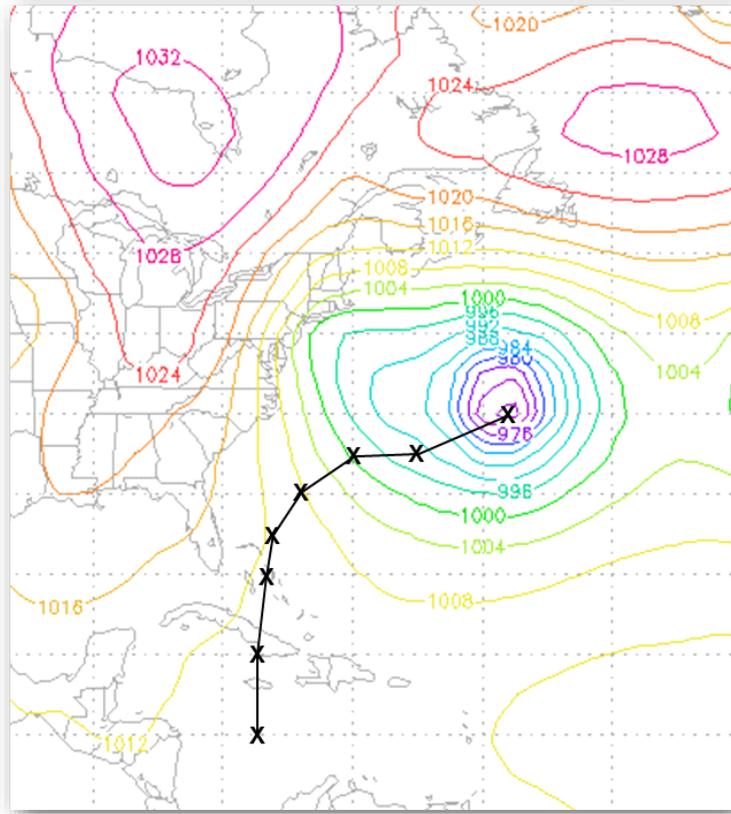
7-Day Sea level Pressure (mb) Forecast valid at 00 UTC 31 October 2012; *Hurricane Position Shown Every 24h*

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

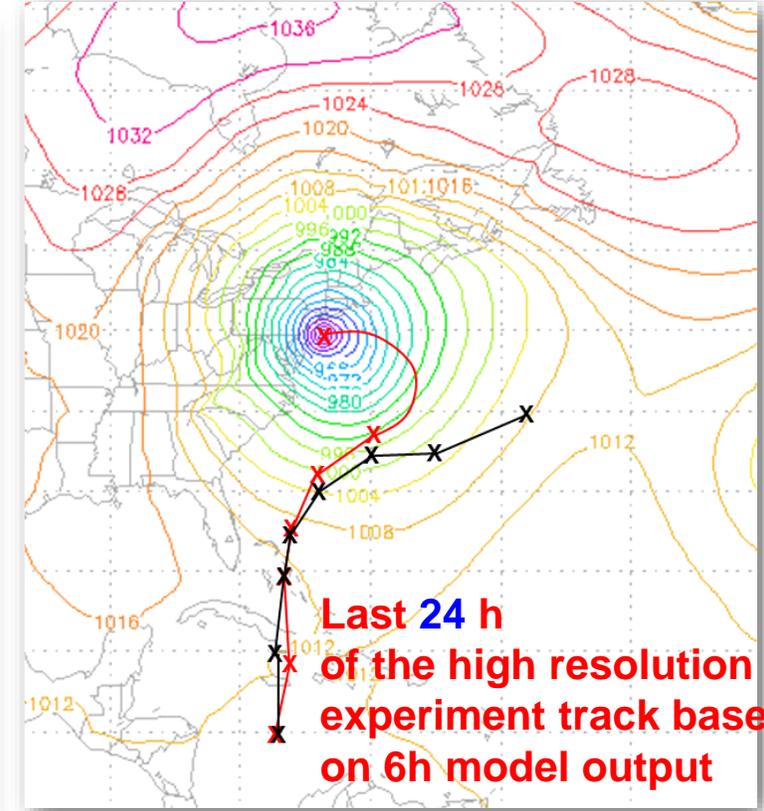
Hypothesis:
Increased horizontal resolution resolves complicated Atlantic blocking pattern, slows simulated hurricane, and allows it to curve toward the East Coast

Ривин: на самом деле шаг сетки примерно 11 км

Operational (T574~ 27km)



Experiment (T1500~ 13km)





Центр ВМО по верификации глобальных ЧПП

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

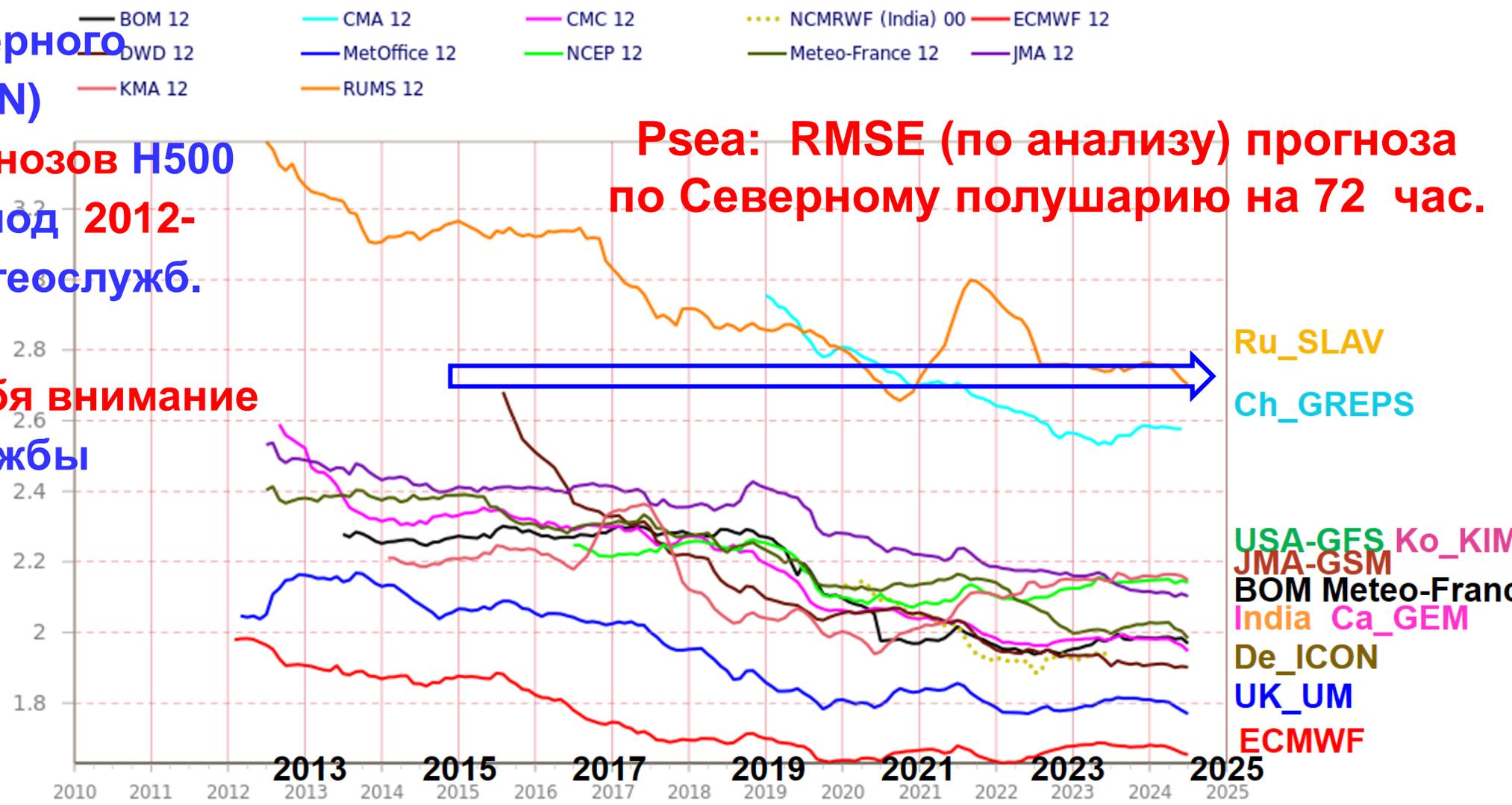


Step: 72 RMSEF/msl/n.hem/analysis

Оценка для северного полушария ($\geq 20N$) численных прогнозов H500 на 72 час. в период 2012-2024 гг. 12-ти метеослужб.

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

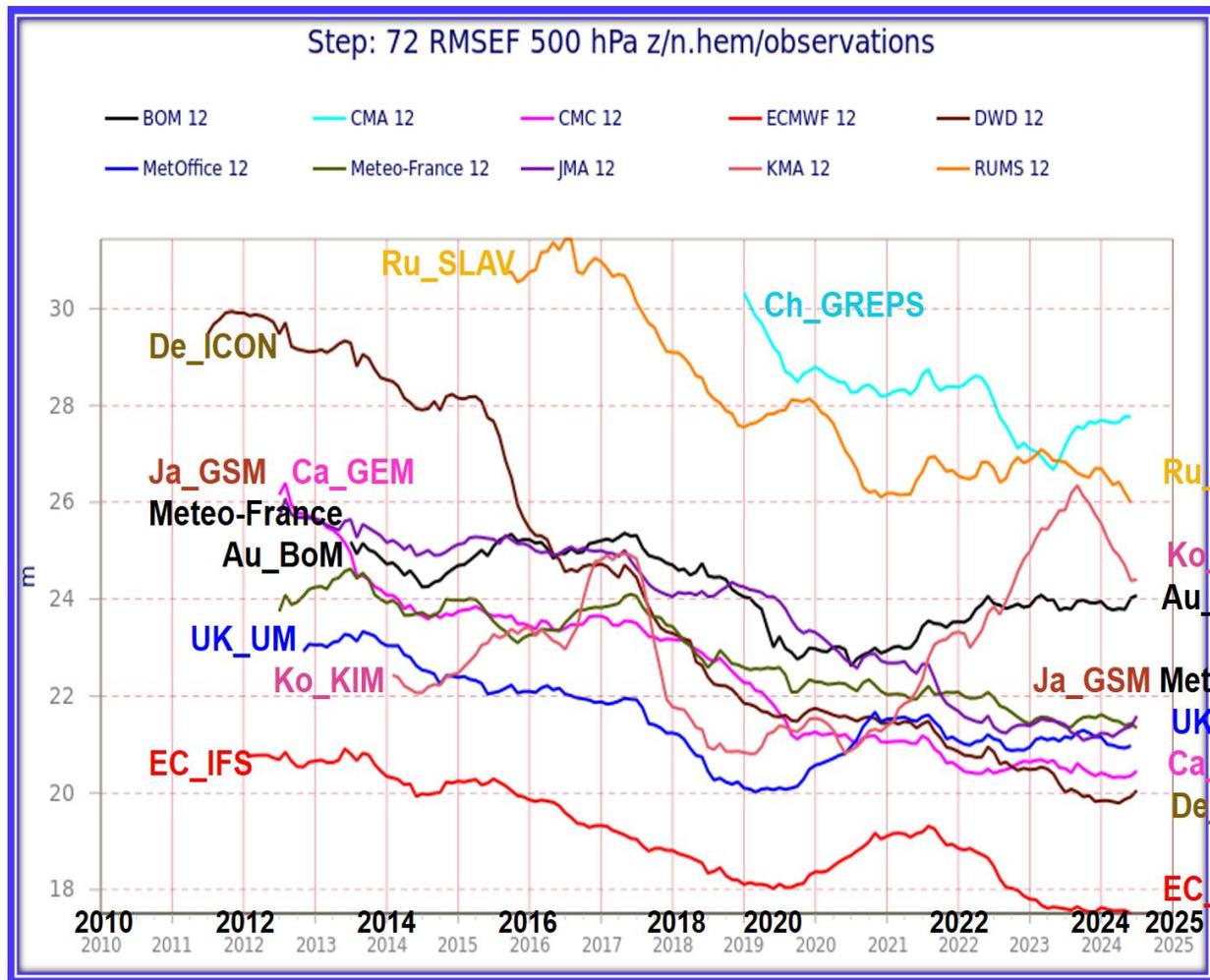
Обращает на себя внимание рынок метеослужбы Германии.





2012-2025 гг. Северное полушарие ($\geq 20N$)..

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



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



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





3. Отечественная оперативная система краткосрочного ЧП COSMO-Ru Гидрометцентра России



3.1. современное состояние;

3.2. дальнейшее развитие.

Вычислительный комплекс ФГБУ «ГВЦ Росгидромета»
<https://mcc.meteorf.ru/oborudovanie.html>

Пиковая производительность TFlops (10^{12})	Кол-во ядер / ядер в узле	ОЗУ Тбайт (10^{12}) / GB на ядро	Дисковая подсистема Тбайт(10^{12})
1293	35136 / 36	125 / 3,5	2800 Тб
800	5160 / 40	24 / 4,8	+ 360 Тб + 120 Тб



Все компоненты программно-аппаратного комплекса работают в режиме реального времени 24 часа в сутки.



Европейский метеорологический консорциум COSMO

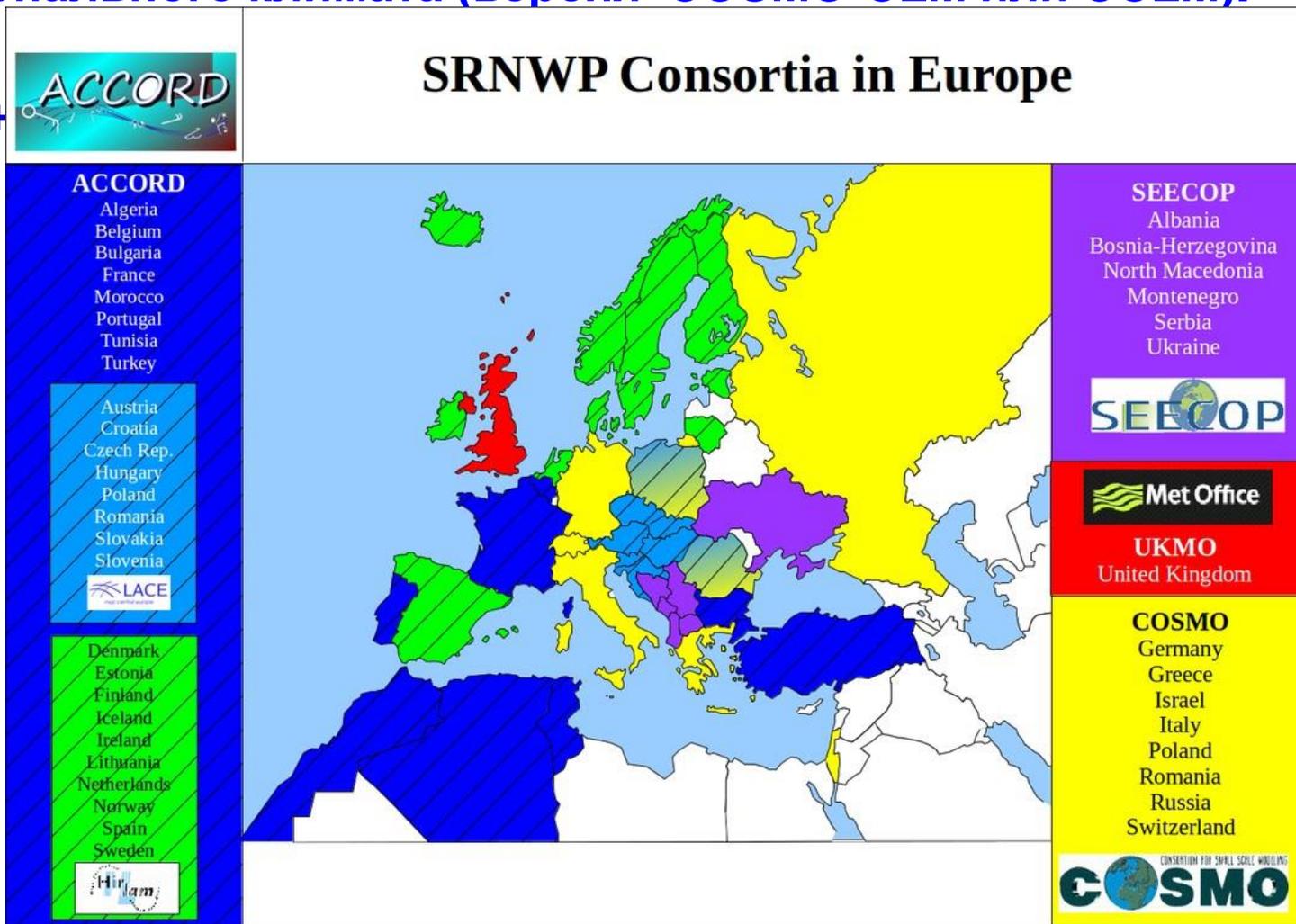


Консорциум COSMO (COnsortium for Small-scale MOdeling) использует модель COSMO / ICON для оперативных краткосрочных ЧПП для ограниченной территории. Сообщество CLM климатологов применяет модель регионального климата (версия COSMO-CLM или CCLM).

Встроенное расширение COSMO-ART позволяет включить с обратной связью учет химических преобразований 63 веществ (172 реакции).

Модель COSMO

- Основана на негидростатической системе уравнений гидротермодинамики. Теперь используется в ряде сообществ для специальных приложений и дальнейшего развития
- Первая версия модели COSMO (модель Local Model (LM)) была разработана в DWD (оперативная с 1999).





Оперативная система COSMO-Ru: решения ЦМКП



- 13 апреля 2011 г. **ВНЕДРИТЬ** систему ЧПП COSMO-Ru (COSMO-Ru7) в оперативную практику как базовую.
- 15 декабря 2016 г. **ВНЕДРИТЬ** по территории **Московской области и ЦФО** прогнозы осадков и скорости ветра по **COSMO-Ru2**, как дополняющие и детализирующие основной метод прогноза по COSMO-Ru7; **ИСПОЛЬЗОВАТЬ** прогнозы **COSMO-Ru2** (температуры, ветра, осадков) по территории **Северного Кавказа** в оперативной практике **в качестве ОСНОВНОГО**.
- 21 ноября 2018 г. **ВНЕДРИТЬ** по территории России модель **COSMO-RuENA13** в качестве **основной** наряду с уточняющими ее базовыми для Европ. части России и Северн. Кавказа COSMO-Ru7 и COSMO-Ru2;
- 11 марта 2021 г. **ВНЕДРИТЬ** по территории России модель **COSMO-Ru6ENA** в качестве основной, наряду с ранее внедренными базовыми для ЦФО и Северного Кавказа COSMO-2,2 (шаг сетки 2.2км) и взамен действующих COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru7;
- 29 ноября 2021 г. **ВНЕДРИТЬ** оперативную практику **сверхкраткосрочные и краткосрочные численные прогнозы, выпускаемые моделью COSMO-RuBy с шагом 2.2 км (COSMO-Ru2By)** до заблаговременности 48 часов: температуры, влажности и скорости ветра, наряду с основным методом COSMO-Ru6ENA, как дополняющие и детализирующие, прогнозы осадков – в качестве основного расчетного метода, порывов ветра свыше 12 и 18 м/с - в качестве вспомогательного.
- 1 октября 2024 г. **ВНЕДРИТЬ** в оперативную практику глобальную конфигурацию **ICON-Ru13/66.5N29.5** с шагом сетки 6,5 км, вложенной в сетку с шагом 13 км.

СПРАВКА. Ежедневно для **00, 06, 12 и 18 часов ВСВ** для всех прогностических центров Росгидромета через **3 часа 40 мин** после срока наблюдения система COSMO-Ru (шаги сетки **13 / 6.6 / 2.2 / 1.0 км** за сутки подготавливает **более 8 000 прогностических карт и 1000 метеограмм**, за месяц выкладывается **> 2 Тб** файлов в коде **GRIB** на ftp-серверы.



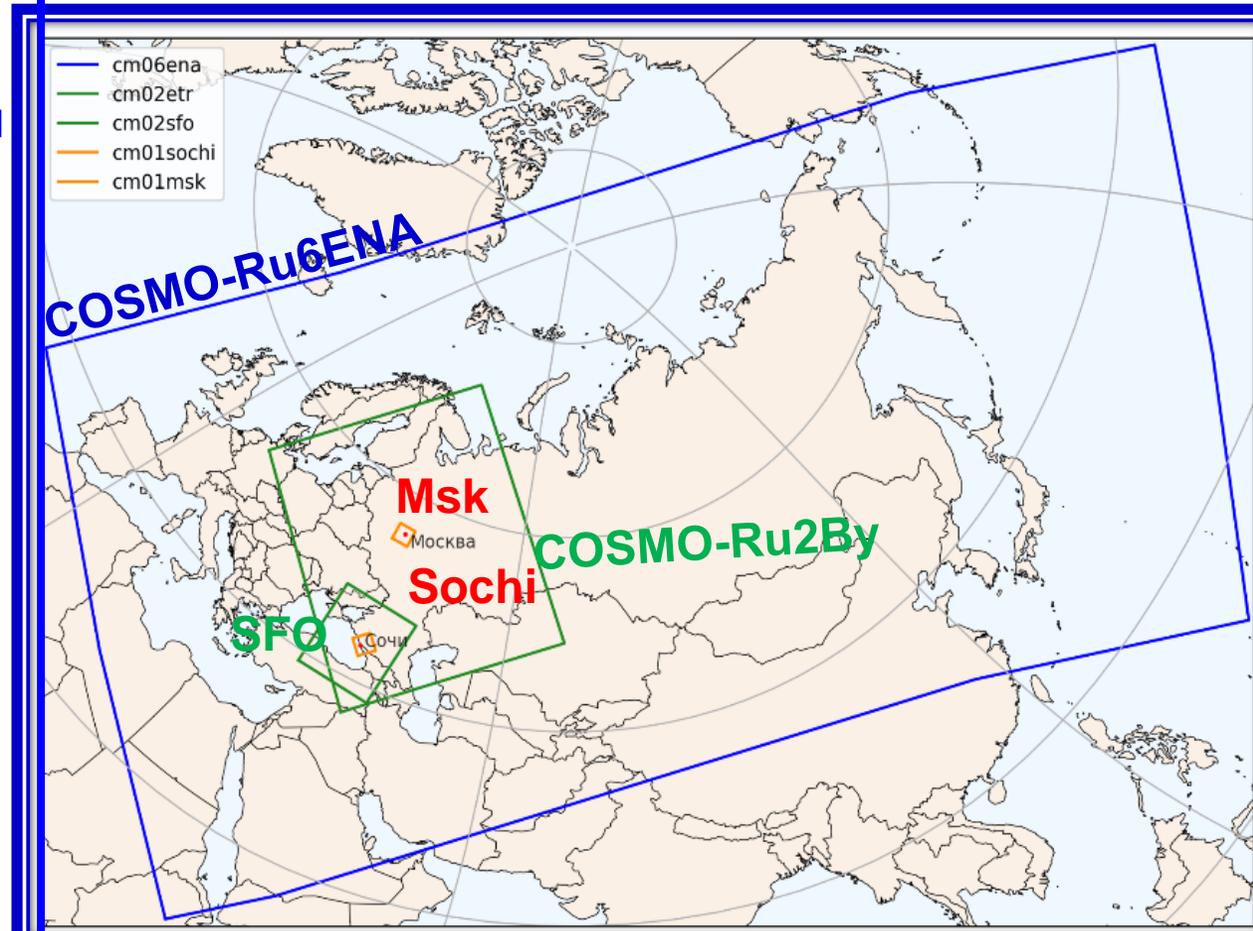
Области оперативных прогнозов российских конфигураций COSMO-Ru модели COSMO на 25.08.2025 на вычислительной системе Росгидромет»



Система оперативного краткосрочного ЧПП COSMO-Ru функционирует с начальными и граничными данными со свободным доступом и наборами данных, подготавливаемым в Гидрометцентре России. ЧПП проводятся 4 раза в сутки и выпускаются в цифровом и графических видах для всех Федеральных округов России и Республики Беларусь.

Российские конфигурации модели COSMO

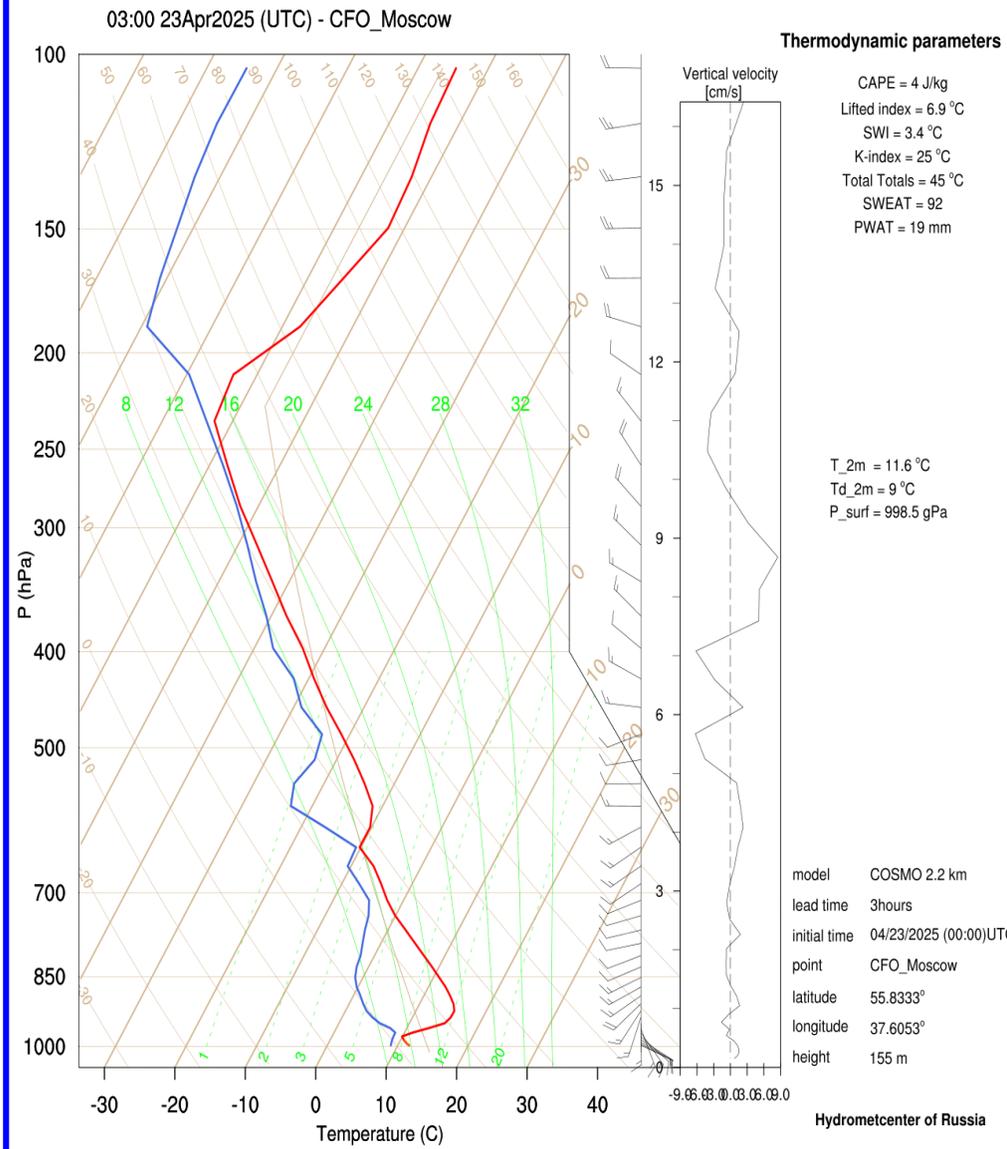
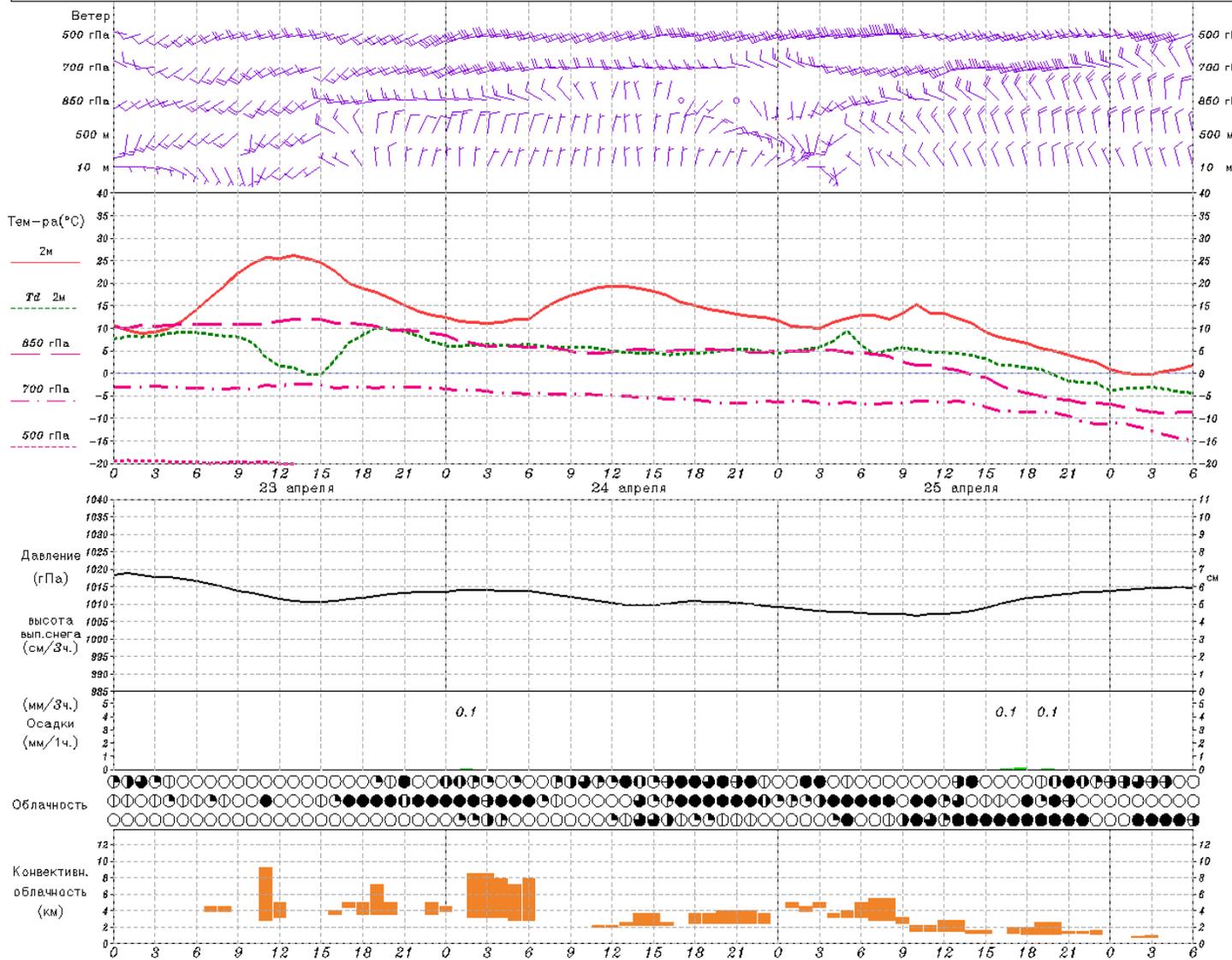
1. COSMO-Ru6ENA: 2000 × 1000 × 40; 6,6 км
2. COSMO-Ru2By: 1200 × 1400 × 50; 2,2 км
3. COSMO-Ru2ByRUC: сверхкраткосрочный ЧПП с усвоением радарных данных
4. COSMO-Ru2SFO: 420 × 470 × 50; 2,2 км
5. COSMO-Ru1Sochi: 190 × 190 × 50; 1,1 км
6. COSMO-Ru1Msk: 240 × 240 × 50; 1,0 км





Moscow – Предоставлено ФГБУ "Гидрометцентр РФ" | Долгота: 37.606 | Широта: 55.805 | Высота: 152м

Прогноз на 120 часа(ов) от 23.04.2025 00:00 UTC | Модель COSMO-Ru / 6.6км | Рассчитано: 23.04.2025 04:34 UTC





Усовершенствование моделей COSMO и ICON

1. Формирование и эволюция снежного покрова.
2. Перенос солнечной радиации и учета аэрозольных примесей.
3. Параметризации городских территорий.
4. ЧПП полярных мезоциклонов.
5. Создание и верификация ансамблевых прогнозов для ограниченной территории.
6. Формирование возмущений для ансамблевых систем.
7. Создание системы ЧПП с шагом сетки 1,1 км для метеобеспечения Сочи-2014 и шагом 1,0 км Москвы.
8. Развитие методов верификации и апробации конфигураций с шагом 1 км.
9. Поиск оптимальных решений при разработке систем усвоения данных, включая радарные.
10. Развитие схемы турбулентного перемешивания в приземном слое.
11. Применение нейронных сетей для постпроцессинга.
12. Разработка нового динамического блока модели ICON

Защищены диссертации

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

Подготавливают

1. Блинов Денис
2. Никитин Михаил
3. Шишов Андрей



3. ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА COSMO-Ru ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ:



- 3.1. современное состояние;
- 3.2. дальнейшее развитие.

Глобальная модель 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 консорциуме 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!**



3. ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА COSMO-Ru ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ:



- 3.1. современное состояние;
- 3.2. дальнейшее развитие.

МОДЕЛЬ ICON и ее российские конфигурации

Создание модели глобальной модели ICON и ее версии для ограниченной территории ICON-LAM проводилась примерно 40 активными разработчиками (специалистами в области метеорологии, математики и системного программирования).

Величина совокупности разработанных ими программ для модели ICON/ICON-LAM составляет примерно **670 тысяч строк на языке Фортран (F95/F2003/F2008) и 200 тысяч строк на языке Си** (эта информация была приведена в лекции D. Reinert, F. Prill, G. Zängl «Overview of the ICON model» на 3-й школе по модели ICON, 28 февраля 2017 г., Оффенбах на Майне, Германия (http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/forschung_lehre/seminare/2017/icon_training/icon_training_node.html)).



Глобальная модель ICON в ГМЦ России: **МОТИВАЦИЯ** проведения краткосрочного **ГЛОБАЛЬНОГО ЧПП**.



Модель ICON Центра ВМО по верификации глобальных численных прогнозов погоды (ЧПП) качества всех оперативных глобальных моделей и по сообщениям немецких коллег 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.

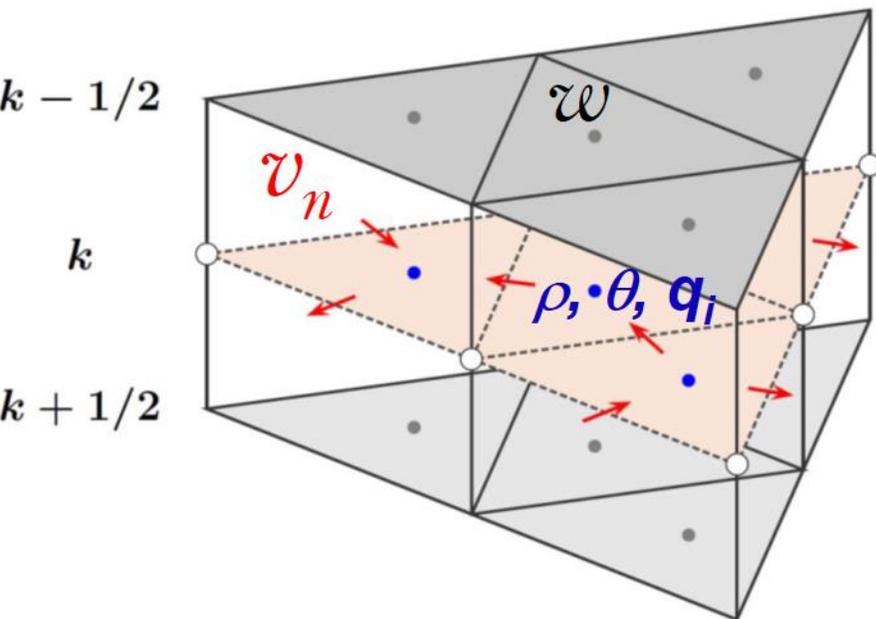
Время передачи в сутки необходимых начальных данных и боковых граничных условий через каждые 3 часа для COSMO-Ru6ENA равно 60 мин, а необходимых начальных данных для ICON-Ru13N29 равно 5 мин.

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

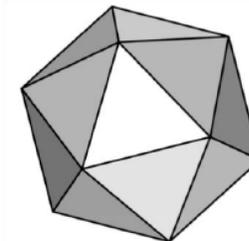
СЕТКА

prognostic fields:

- v_n edge-normal vel. component
- w vertical velocity
- ρ density of moist air
- θ_v virtual potential temperature
- q_i mass fractions



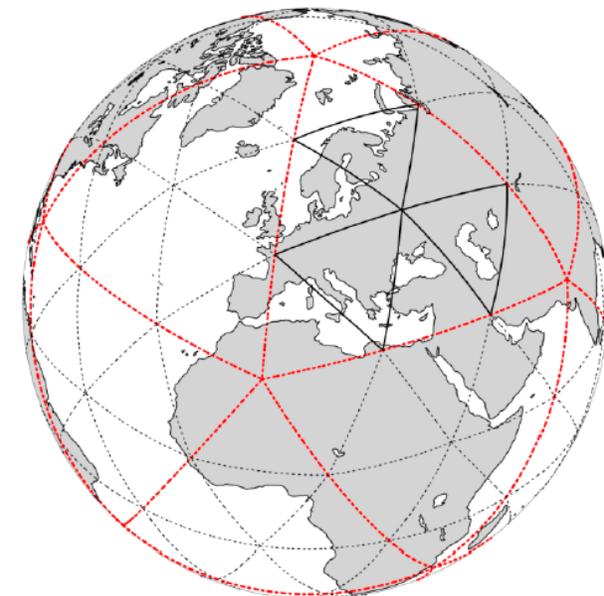
- grid generation is based on the Icosahedron
- By $RnBk$ we denote a grid that originates from an icosahedron whose
 - edges have been initially divided into n parts,
 - followed by k subsequent edge bisections.



- 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)



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.**



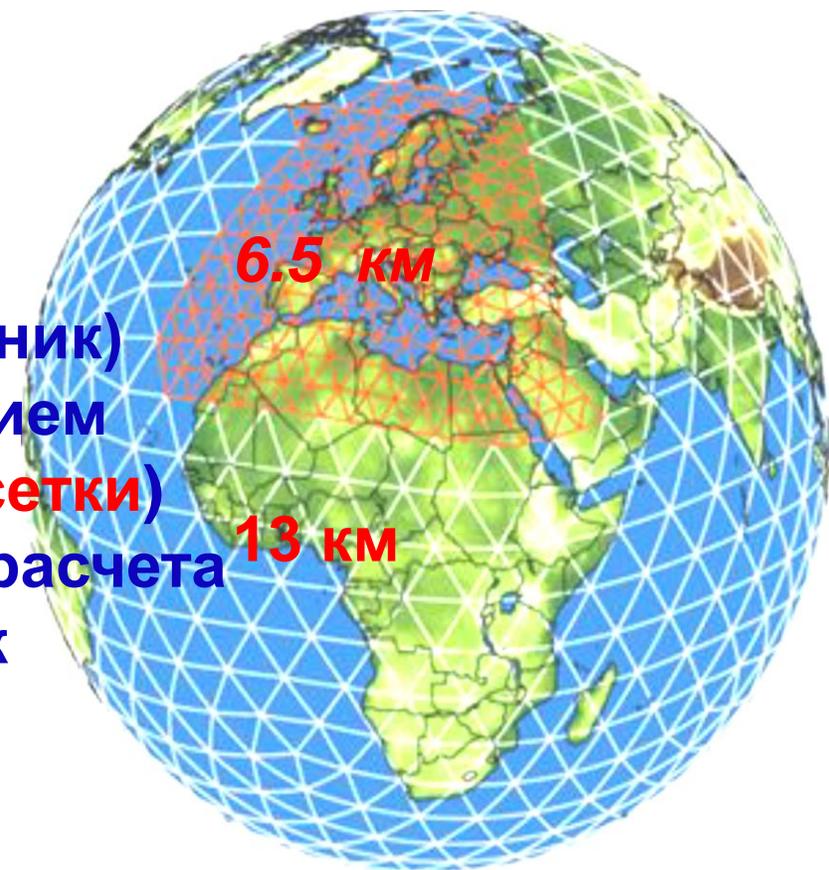
Свойства и возможности глобальной модели ICON.



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

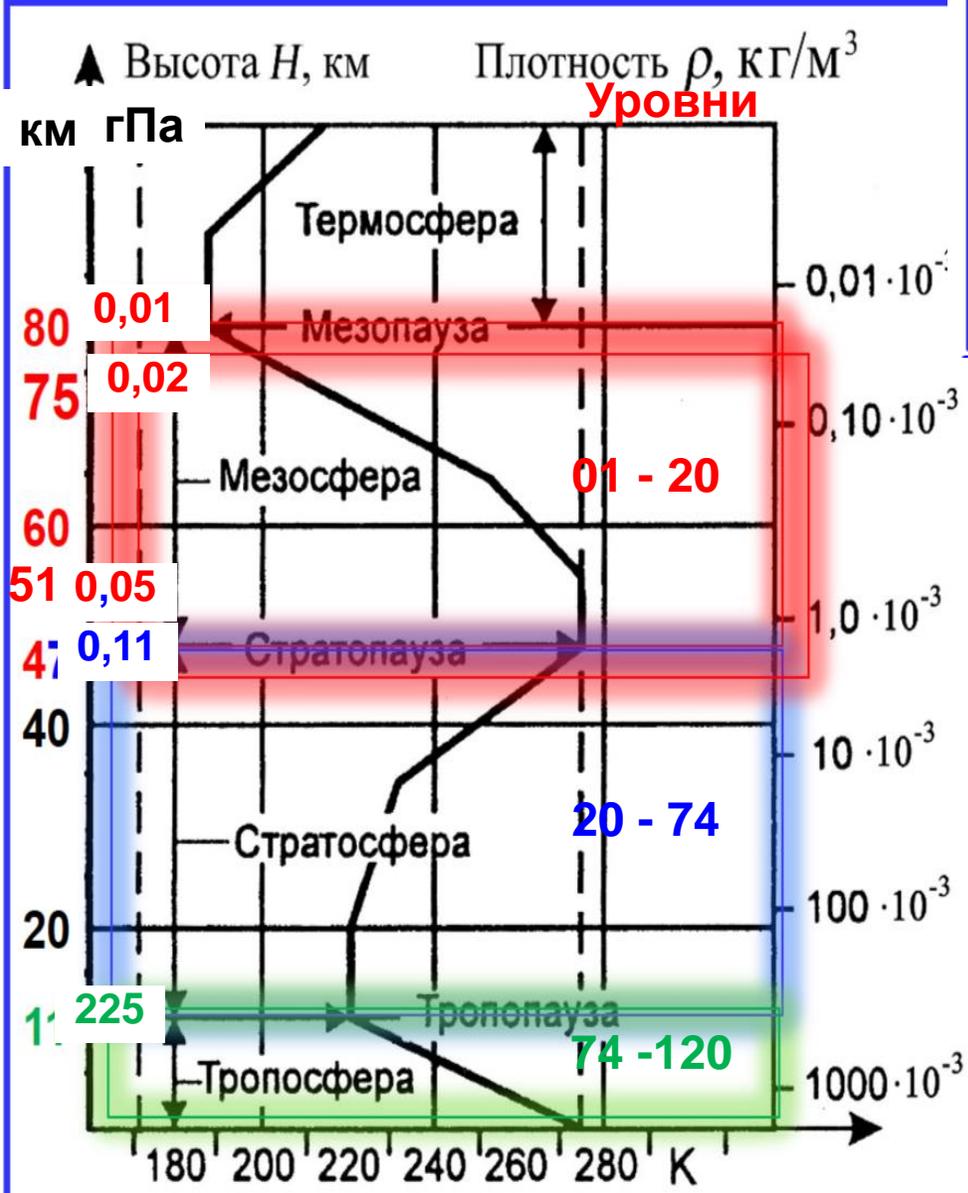
Сетка

- 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



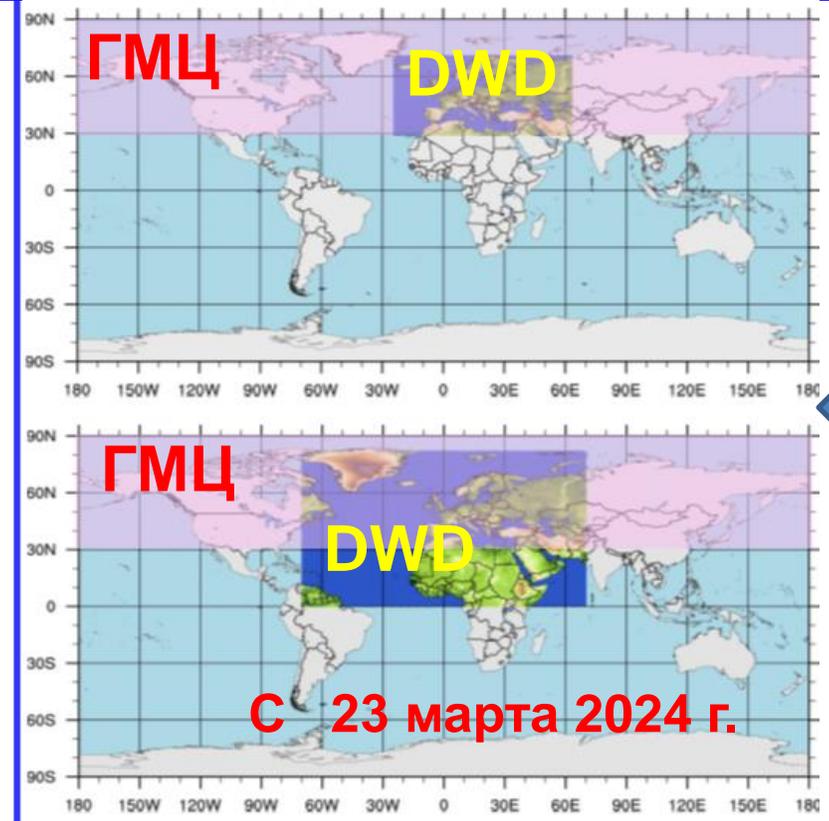


Российская ICON-Ru13/6N29 и немецкие конфигурации модели ICON



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

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.)

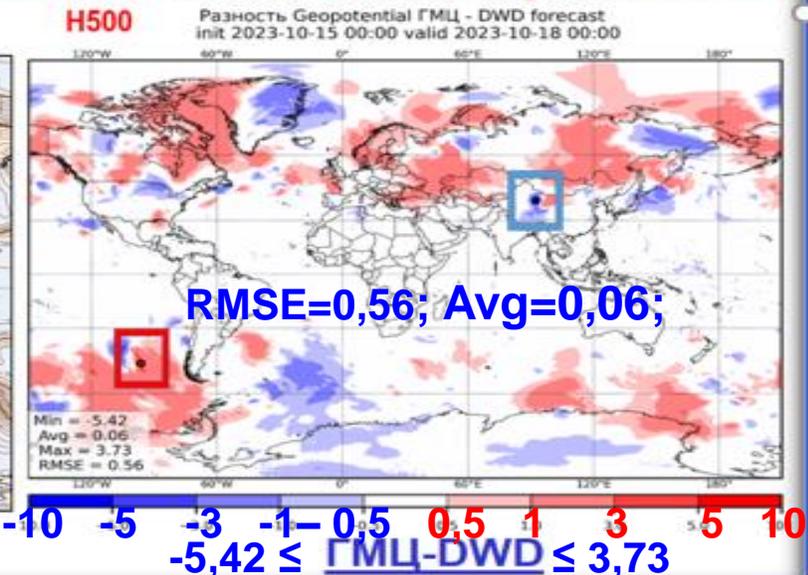
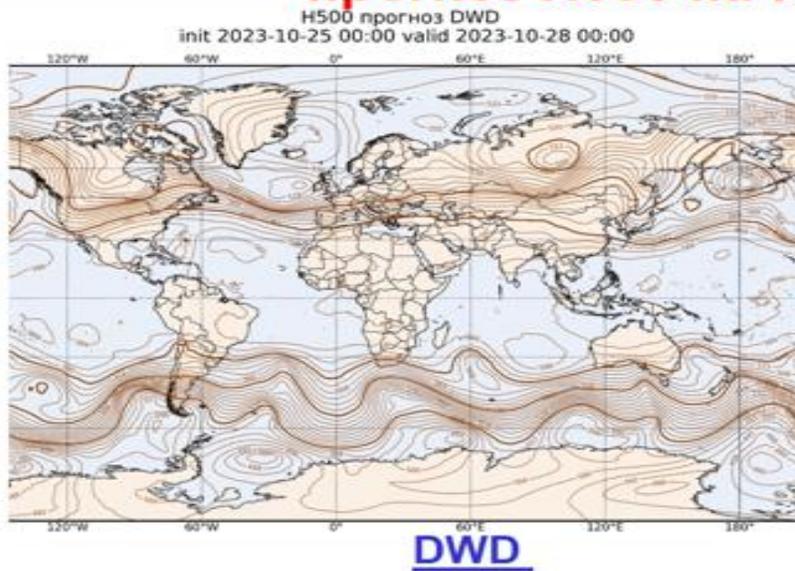
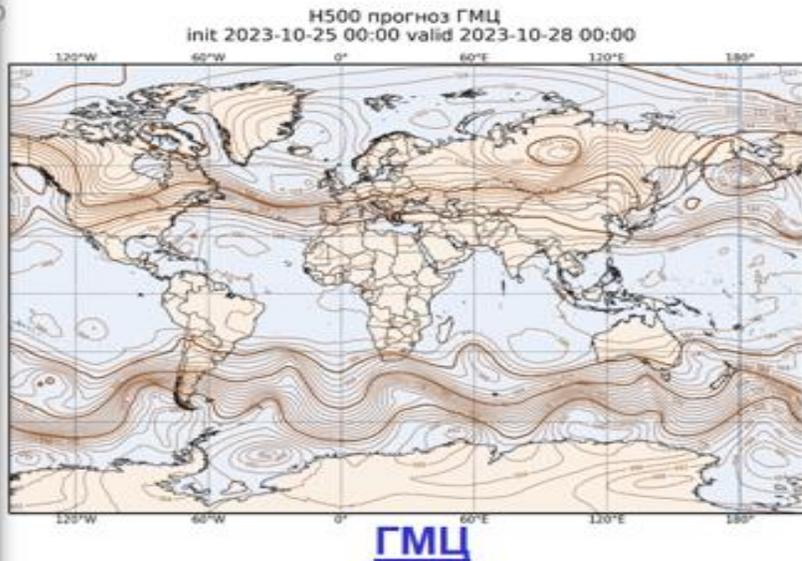
2880 ядер, прогноз на 72 ч за 64 мин.;
5760 ядер, прогноз на 120 ч за 55 мин.

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





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.



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

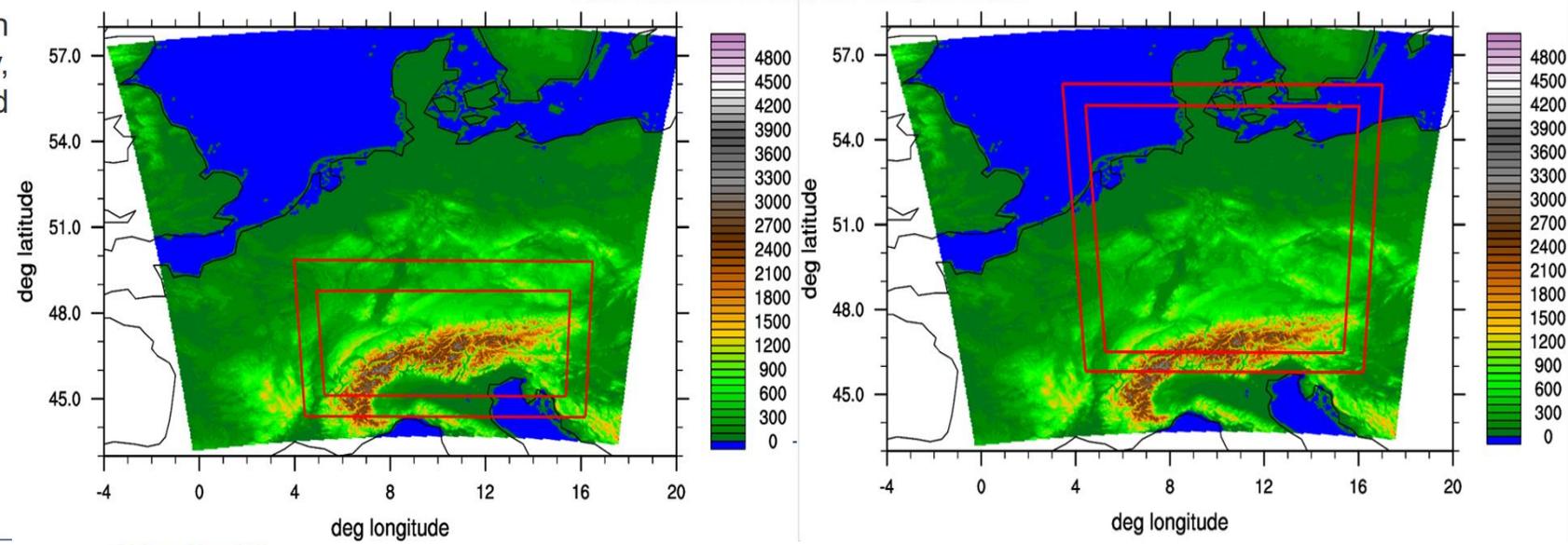
The GLORI Digital Twin

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

Tri-lateral Cooperation
Germany, Italy,
Switzerland

regional
km-scale
(down to 500 m)

approximate domain configurations



Chiara Marsigli





<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.

$h=156$ м

$h=312$ м

$h=624$ м

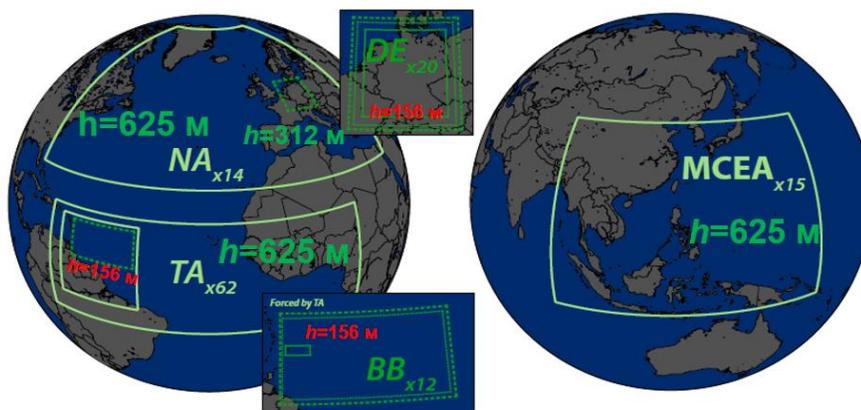


Fig. 3. Simulation domains as well as the number of simulated days for each domain, discussed in this paper. Storm-resolving simulation domains are depicted by a solid lime-green line (NA: Northern Atlantic, TA: Tropical Atlantic, MCEA: Maritime Continent East Asia), large-eddy simulation domains depicted 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.

2020, Stevens, ...,
G.Zaengle,
J. Met. Soc. Japan

Citation Stevens, B., C. Acquistapace, A. Hansen, R. Heinze, C. Klingner, 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. Jakob, 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.



Современный оперативный ЧПП

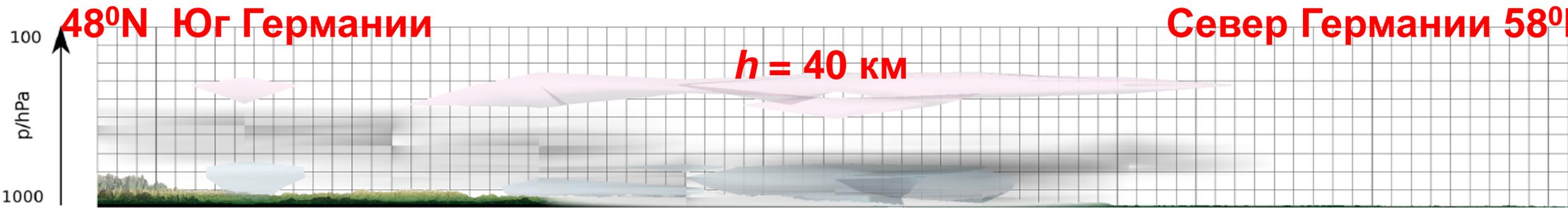
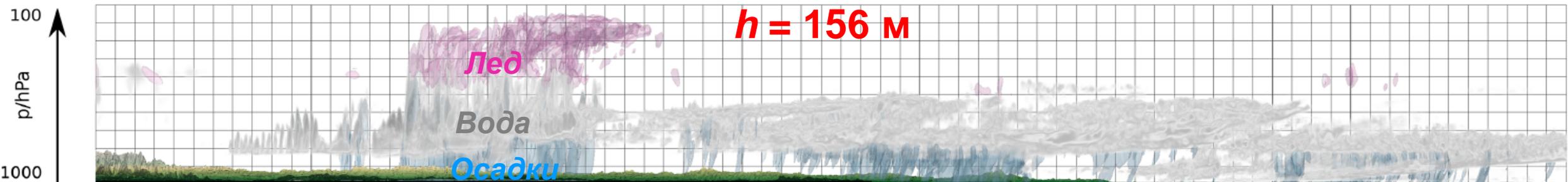
Характерный пример возможностей будущих ЧПП (вертикальный разрез:

(шаги сетки 156 м и 40 км): 2020, Stevens и др., J. Met. Soc. Japan)
B. STEVENS et al.



401

April 2020



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).



ЧПП - Численный Прогноз Погоды
Оперативный прогноз погоды ОСНОВАН на ЧПП.
ТИХАЯ РЕВОЛЮЦИЯ в ЧПП

**СИСТЕМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ
И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

**Г.С. Ривин (Gdaly.Rivin@mail.ru) и сотрудники ОЧКП Гидрометцентра России
Гидрометцентр России (с 1994 г. Государственный научный центр Российской Федерации);
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Численный прогноз погоды как междисциплинарная задача.
2. Обзор современных систем оперативного численного прогноза погоды и используемых данных наблюдений;
3. Оперативная система ЧПП ОС-РГ (Gdaly.Rivin@mail.ru) Гидрометцентра России.
 - ✓ современное состояние,
 - ✓ дальнейшее развитие.