

Математика непогоды

Ростислав Юрьевич Фадеев

К.ф.-м.н., доцент

ИВМ РАН

Гидрометцентр России

МФТИ

e-mail: rost.fadeev@gmail.com

tg: @rostfa

24.07.2025, Дубна,

Летняя школа "Современная математика"



История развития ПП

1. Народные приметы, сохраняющиеся в народе и передаваемые из поколения в поколение сведения о различных признаках, указывающих на предстоящие явления погоды.

- «Если собаки много спят и мало едят — будет дождь».
- «Серёжки на клёнах — сей свеклу».
- «Зацвела фиалка — сей морковь и петрушку».



2. Метеорология как наука возникла после изобретения в XVII веке термометра Галилео Галилеем и ртутного барометра Э. Торричелли.

«Мы живём на дне воздушного океана, и опыты с несомненностью доказывают, что воздух имеет вес» - Э. Торричелли.



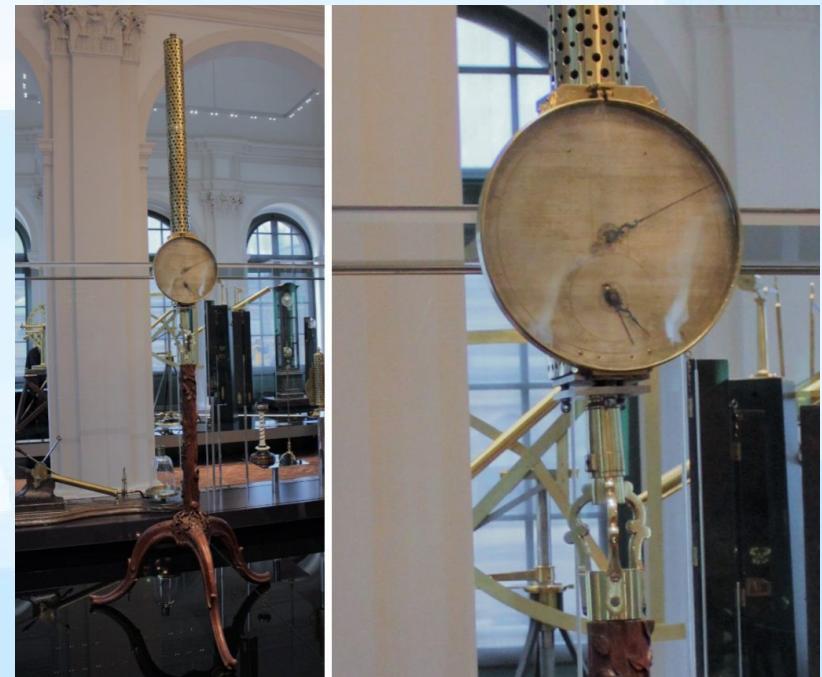
Термометр Галилея



В XVII веке были изобретены гигрометр, дождемер, флюгер и анемометр.

Первое подобие сети метеонаблюдений возникло в Европе в 1654 году. Сбор информации осуществлялся до 1667 года Академией дель Чименто во Флоренции.

В Российской империи регулярные наблюдения за погодой первым попытались установить царь Алексей Михайлович и Петр I.



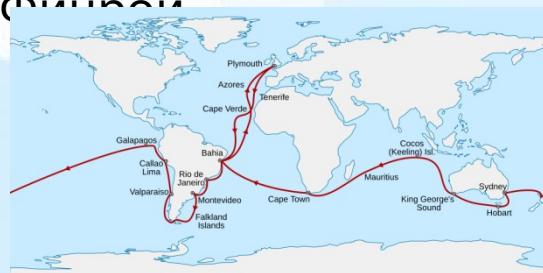
В 1781 году в Мангейме было основано первое в мире метеорологическое общество. Оно снабжало наблюдателей в разных странах мира одинаковыми приборами. По его программе действовало 39 метеостанций, расположенных от Кембриджа до Урала с одинаковыми моментами измерений (в 7, 11, 14 и 21 час).



3. Мореплавание и великие географические открытия: торговым советом Английского королевского общества в 1854 г. учрежден Метеорологический департамент с



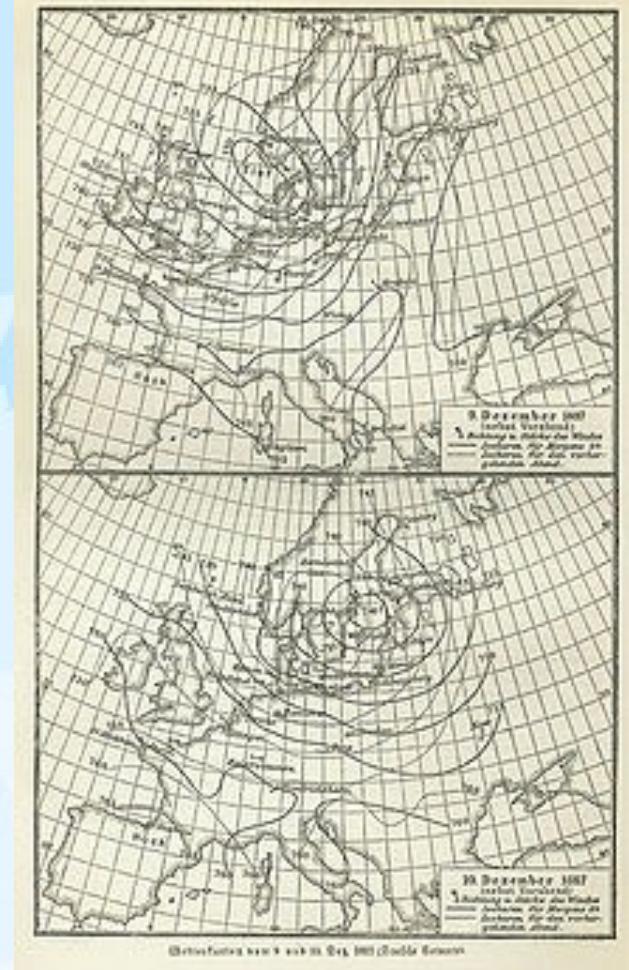
состояний морских
руководитель.
генерал-губернатор
Новой Зеландии Роберт
Фицрой



Первый в истории прогноз погоды
был опубликован 1 августа 1860 года

в «Times»

«Практическая метеорология контр-адмирала Фицроя»: «Мы живём в воздушном океане, все изменения погоды зависят от солнечного излучения. Нужно помнить, что состояние воздушного океана скорее говорит о будущей погоде, чем о погоде в настоящий момент».



Синоптическая карта
Европы 1887 г.

4. Математика в погоде: в XIX веке состоялось бурное развитие термодинамики и гидродинамики.

«Старик-Предсказатель» Cleveland Abbe: «The physical basis of long-range weather forecasting» (1901).

DECEMBER, 1901.

MONTHLY WEATHER REVIEW.

responding to the weight of a column of mercury 760 millimeters high, having a temperature 0° C. and pulled downward by the normal force of gravity at sea level and latitude 45° , where $g_0 = 980$ centimeters per second. For any other pressure, p , and temperature, t , on the centigrade scale (or T on the absolute scale, $T = 273^{\circ}$ C. + t) this volume will vary as is expressed by the formula—

$$pv = RT \text{ or } v = \frac{RT}{p}. \quad \text{Or } \frac{1}{v} = \text{density} = \frac{p}{RT} = \sigma.$$

The constant $R = 29.2713$ for ordinary pure dry air, and 47.060 for aqueous vapor. The kilogram, the meter, and the centigrade degree are the fundamental units.

This equation merely expresses the laws of Boyle and Mariotte, Charles, and Gay Lussac, to the effect that every perfect gas expands in proportion to its absolute temperature and in inverse proportion to its elastic pressure.

For the ordinary atmospheric mixture of air and vapor the barometric pressure is the sum of the elastic pressures of all the components, and the density is the sum of the densities of the components.

The more complex equation deduced by Van der Waals, and confirmed by laboratory experiment, may be substituted for the above if considered necessary.

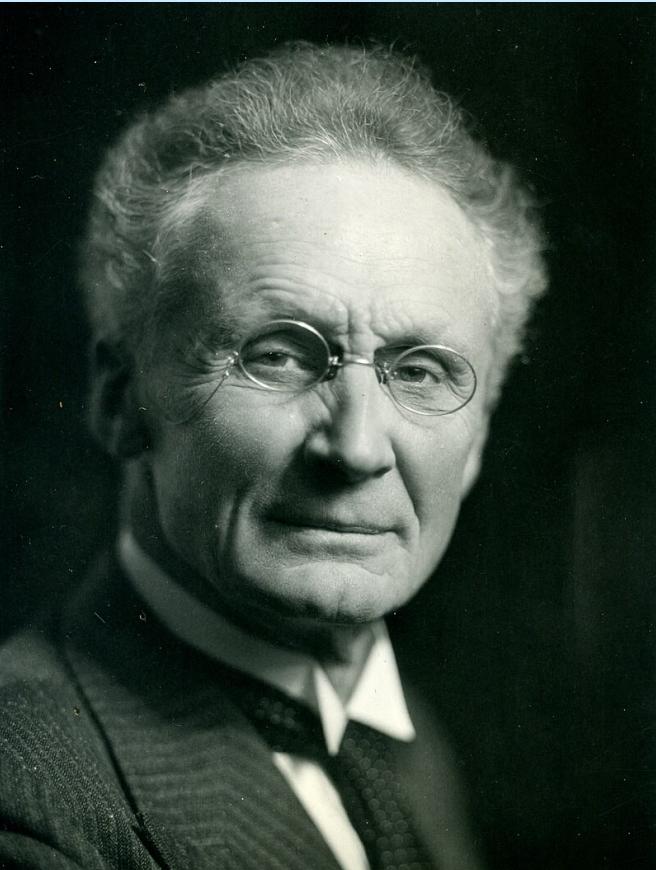
... is the principal force acting upon a local mass of air. These forces may produce either uniform or accelerated direct linear motions and they may also produce

on the part of the local masses of air. The general on that for every motion produced by a force there e an equal and opposite reaction is expressed by the n system of equations:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\sigma} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &\quad - \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ -\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{\sigma} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v}{\partial z} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &\quad - \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{\sigma} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial w}{\partial z} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ &\quad - \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

in which the left-hand terms present the action of the external forces, P , and the internal pressure, p , upon a unit volume of air whose variable density is σ . On the right-hand side, the first four terms express the fact that the change of force or pressure along a given axis of x or y or z , as expressed on the left hand, may produce changes in velocity along all three

have
stitut
solut
thought
other
sent
But t
monit
integ
equat
play
Oberk
but a
who,
earth
globe
the at
peratu
the or
eddy l
The
ued in
period
Herrn
Societ
tempe
initiat



Vilhelm Bjercknes: «The problem of weather forecasting as a problem in mechanics and physics» (1904):

- 2 этапа: диагностика и прогноз.
- 7 основных переменных, описывающих состояние атмосферы.

Базовый вид уравнений модели атмосферы

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \nabla p + \rho \nabla \Phi = \rho \mathbf{f},$$

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{v} = \rho Q,$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$p = \rho R T.$$

Закон сохранения импульса

Закон сохранения тепла

Закон сохранения массы

Уравнение состояния

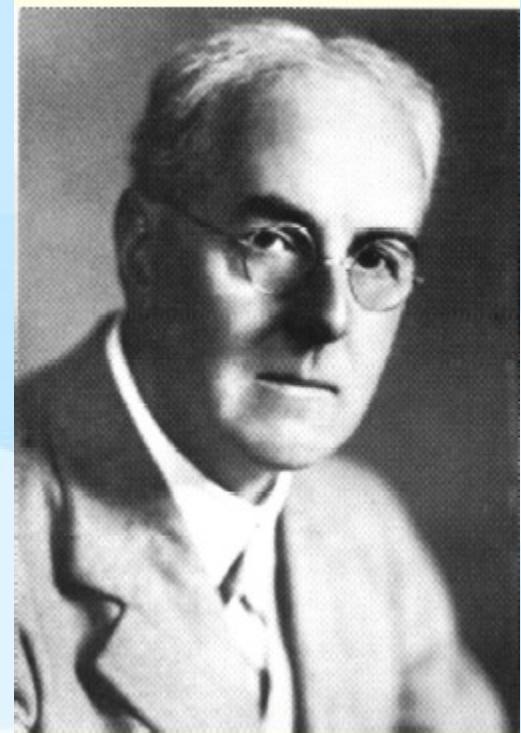
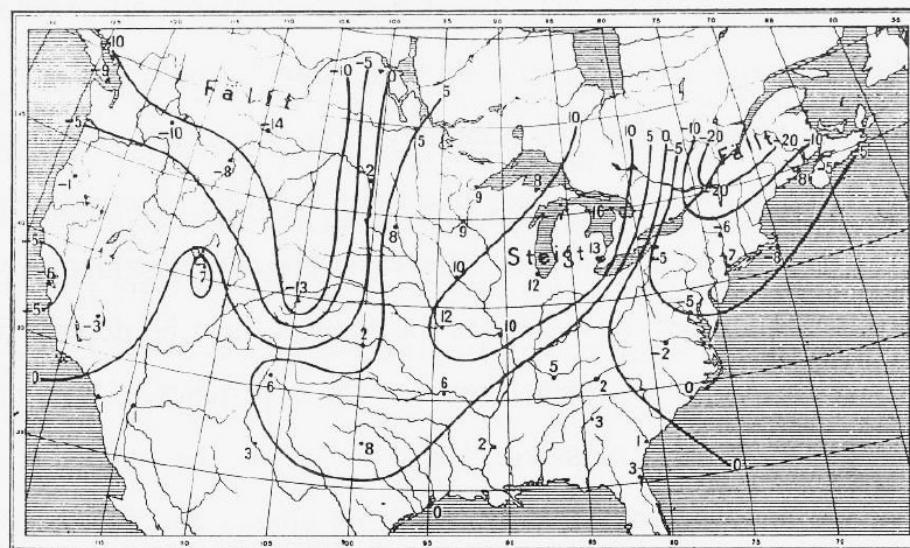
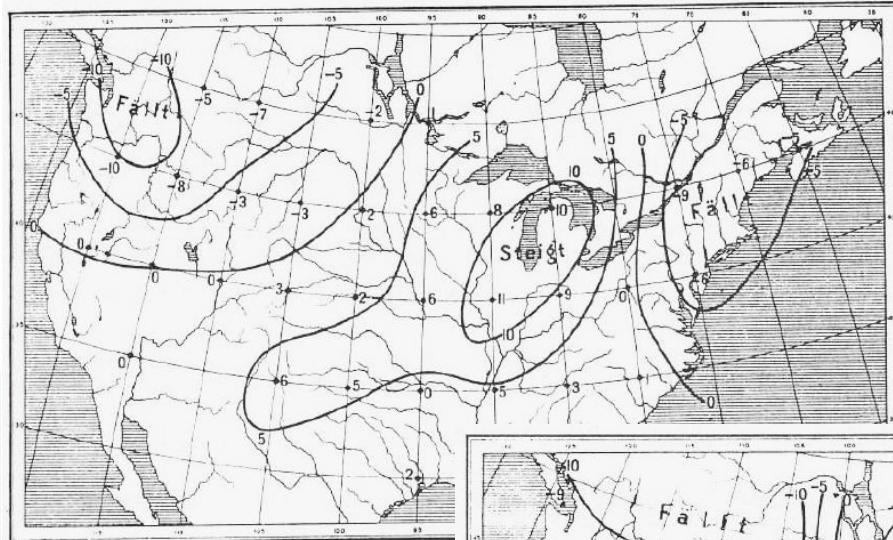
$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + S \left(U \frac{\partial}{\partial X} + V \frac{\partial}{\partial Y} \right) + w \frac{\partial}{\partial z}$$

Вид полной производной

Lewis Fry Richardson:

«Weather Prediction by Numerical Process» (1922).

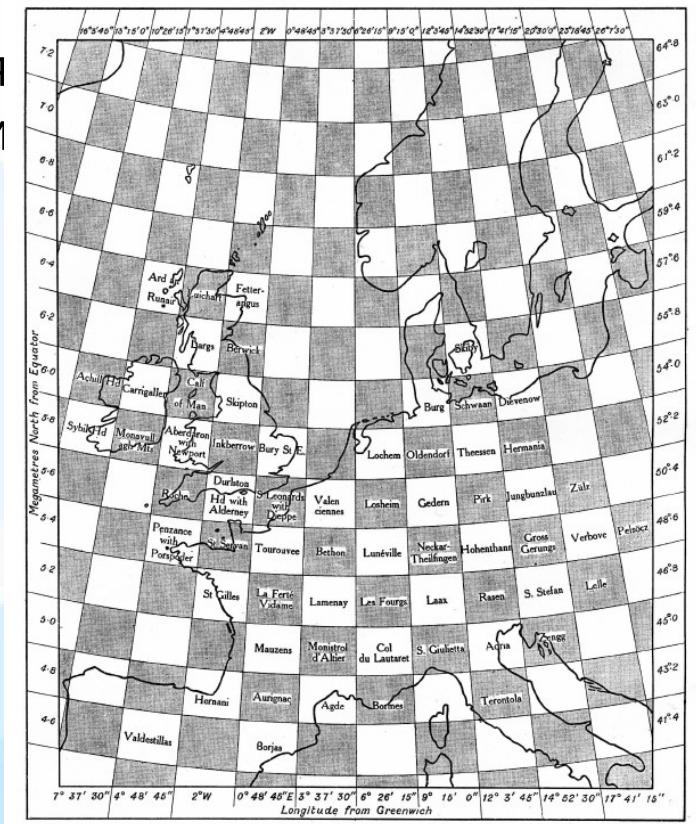
- Применение численных методов для решения уравнений сформулированных



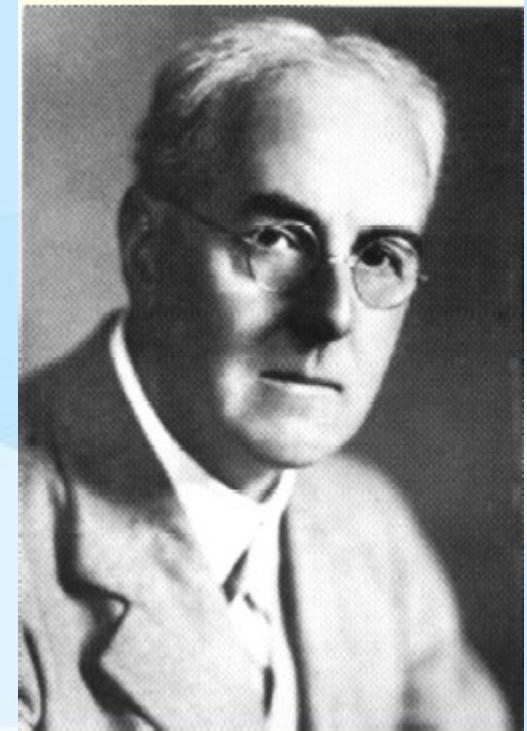
Lewis Fry Richardson:

«Weather Prediction by Numerical Process» (1922).

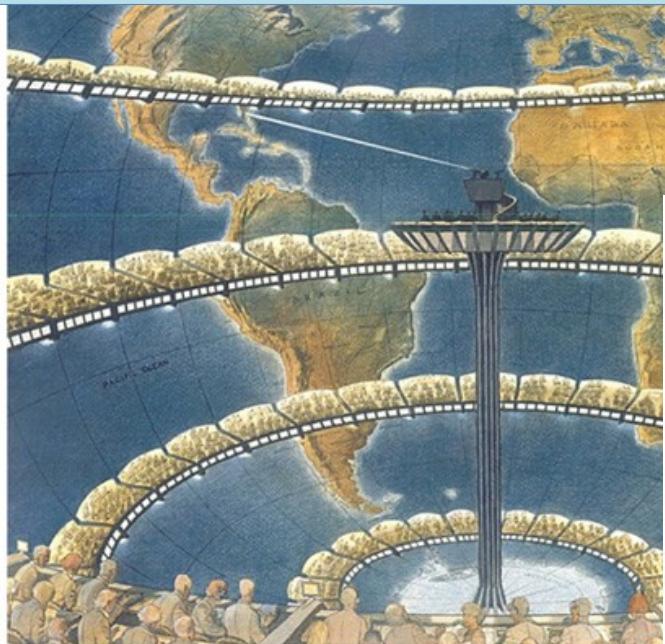
- Применение численных методов для решения уравнений, сформулированных Беркенсом.
- Идея режим



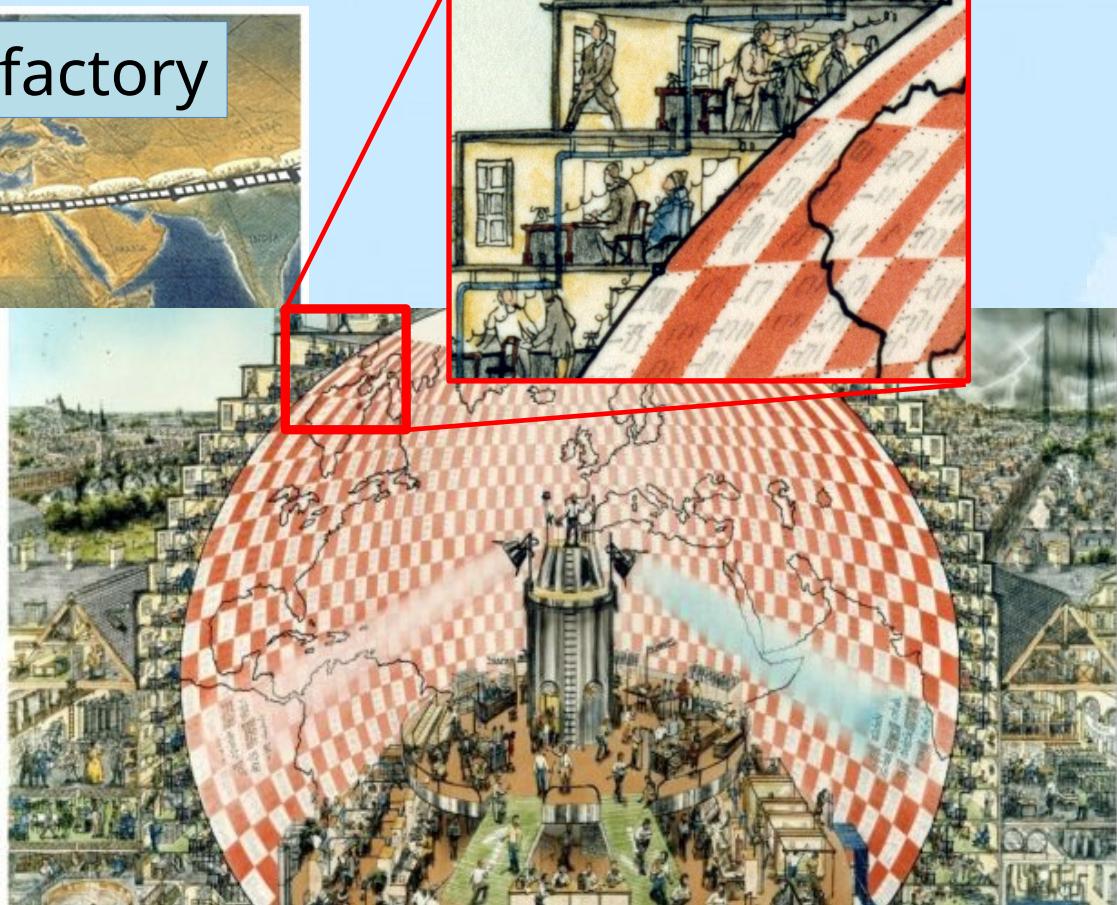
ом



Richardson's Forecast factory



An artist's impression of Richardson's Forecast Factor



«Над расчетом погоды на каждой точкой земли трудятся мириады вычислителей, однако каждый вычислитель решает только одно уравнение или даже часть уравнения. Работа целого региона координируется официальным лицом высокого ранга. Многочисленные индикаторы непрерывно отражают результаты вычислений таким образом, чтобы соседние вычислители могли использовать их. Так последовательно выполняется полный расчет от севера к югу. На полу стоит громадная колонна, по вышине в половину всего зала, на ее вершине расположена кафедра. На этой кафедре восседает человек, который руководит всем театром, он окружен многочисленными помощниками и посланниками. Главная его

Дискретизация производной

$$\frac{df(x, t)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f(x, t)}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} + e_1(x, \Delta x, t)$$

$$\frac{df(x, t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta f(x, t)}{\Delta t} = \frac{f(x, t + \Delta t) - f(x, t)}{\Delta t} + e_2(x, t, \Delta t)$$

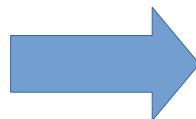
$$\frac{df(x, t)}{dt} + \frac{df(x, t)}{dx} = F(x, t)$$

$$\frac{f(x, t + \Delta t) - f(x, t)}{\Delta t} + \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} + E(x, t, \Delta x, \Delta t) = F(x, t)$$

$E(x, t)$ уменьшается с увеличением детализации сетки!

Дискретизация уравнения маятника

$$\begin{aligned}x''(t) + \omega^2 \sin x(t) &= 0, \\x(0) = x_0, x'(0) &= 0.\end{aligned}$$



$$\begin{cases} x'(t) = v(t), \\ v'(t) = -\omega^2 \sin x(t), \\ x(0) = x_0, \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

Приближенное вычисление $f'(t)$

- Идея:

$$f'(t) \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

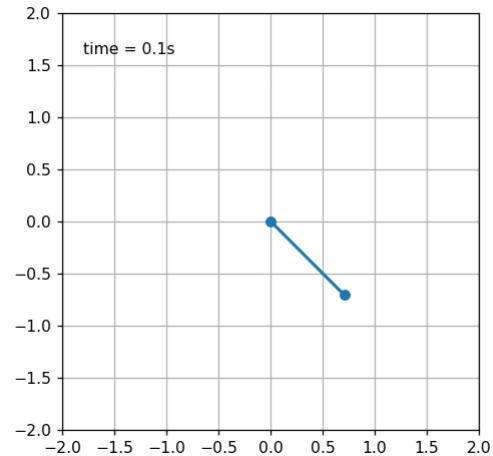
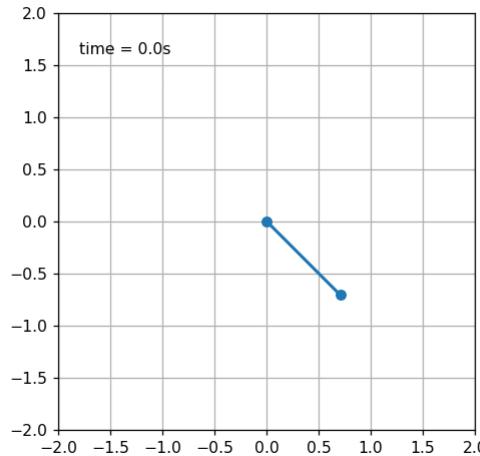


$$f'(t) \approx \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t v(t), \\ v(t + \Delta t) = v(t) - \Delta t \omega^2 \sin x(t) \\ x(0) = x_0, \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

Дискретизация уравнения маятника

$x''(t) + \omega^2 \sin x(t)$:
 $x(0) = x_0, x'(0) :$



Приближенное вычисление $f'(t)$

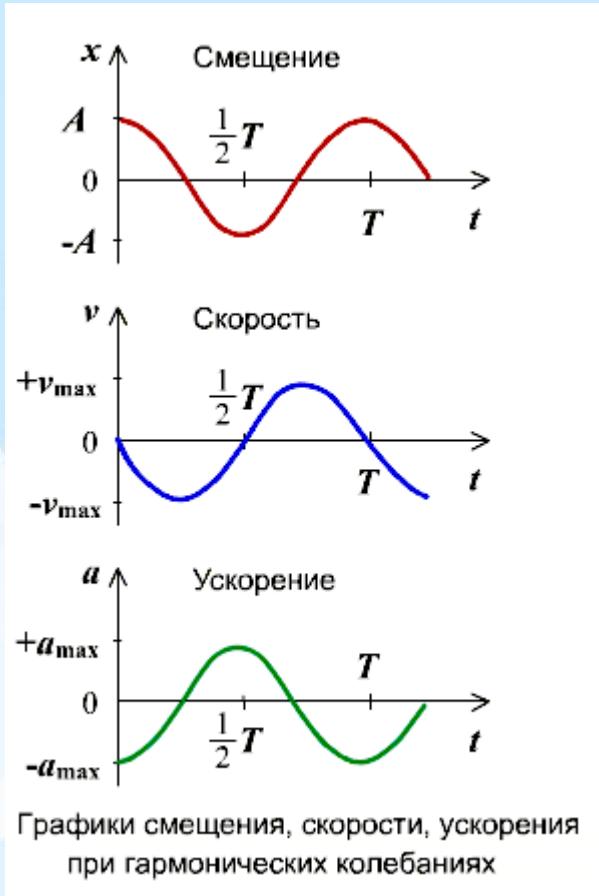
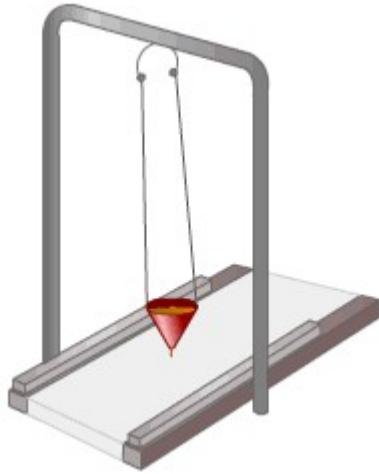
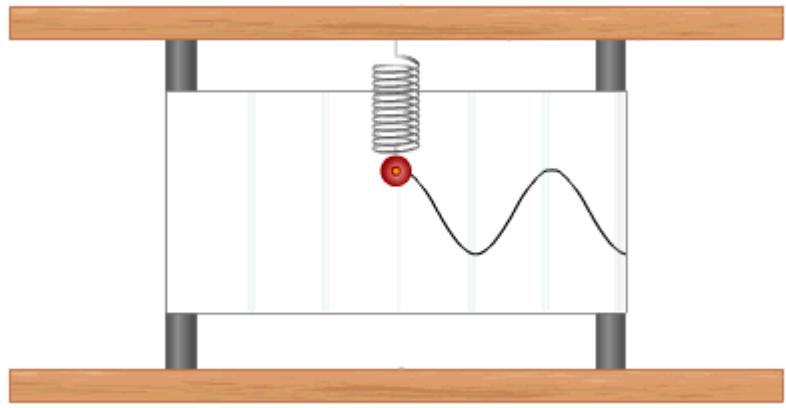
- Идея:

$$f'(t) \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

$$f'(t) \approx \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$



$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t v(t), \\ v(t + \Delta t) = v(t) - \Delta t \omega^2 \sin x(t) \\ x(0) = x_0, \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

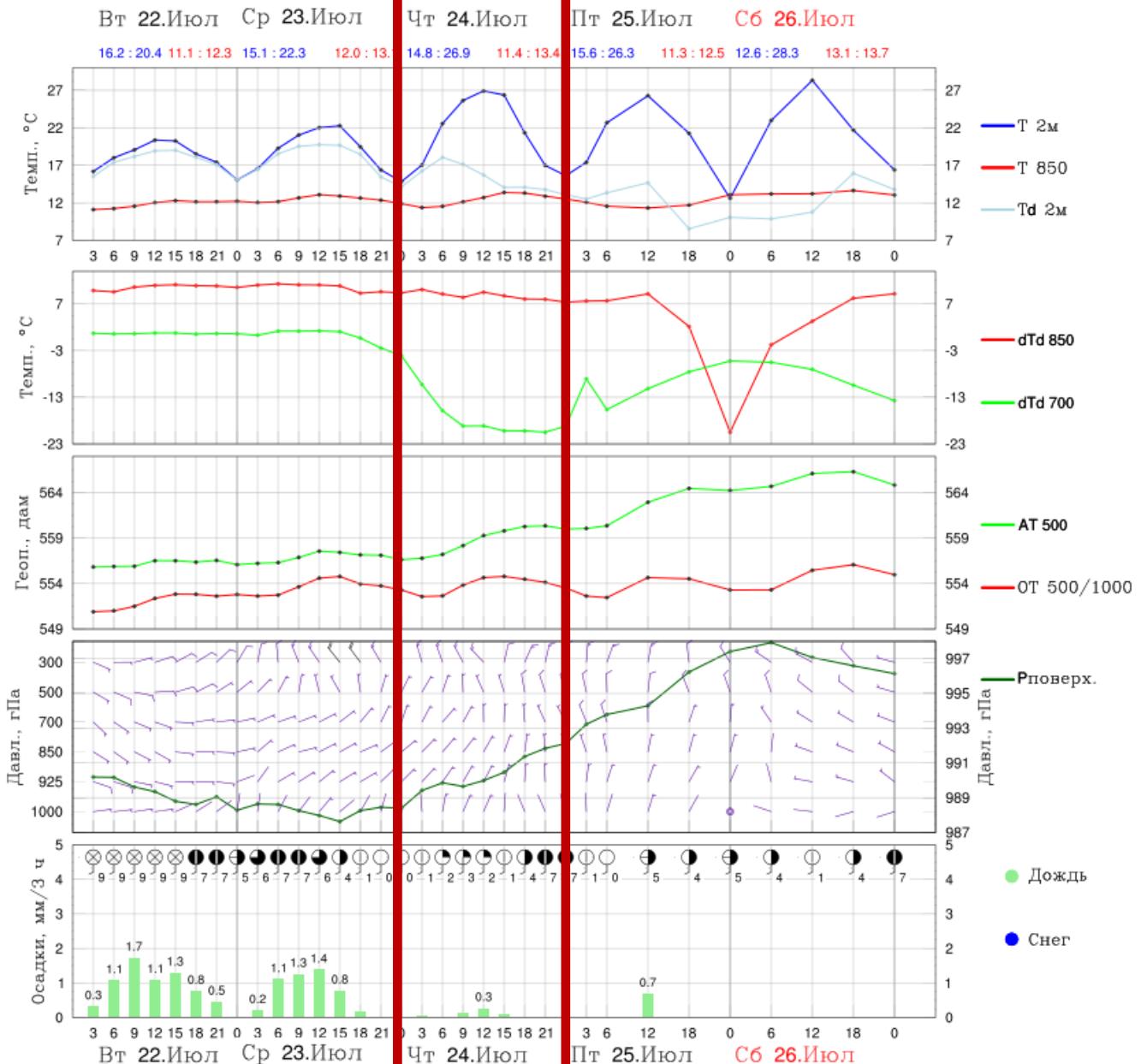


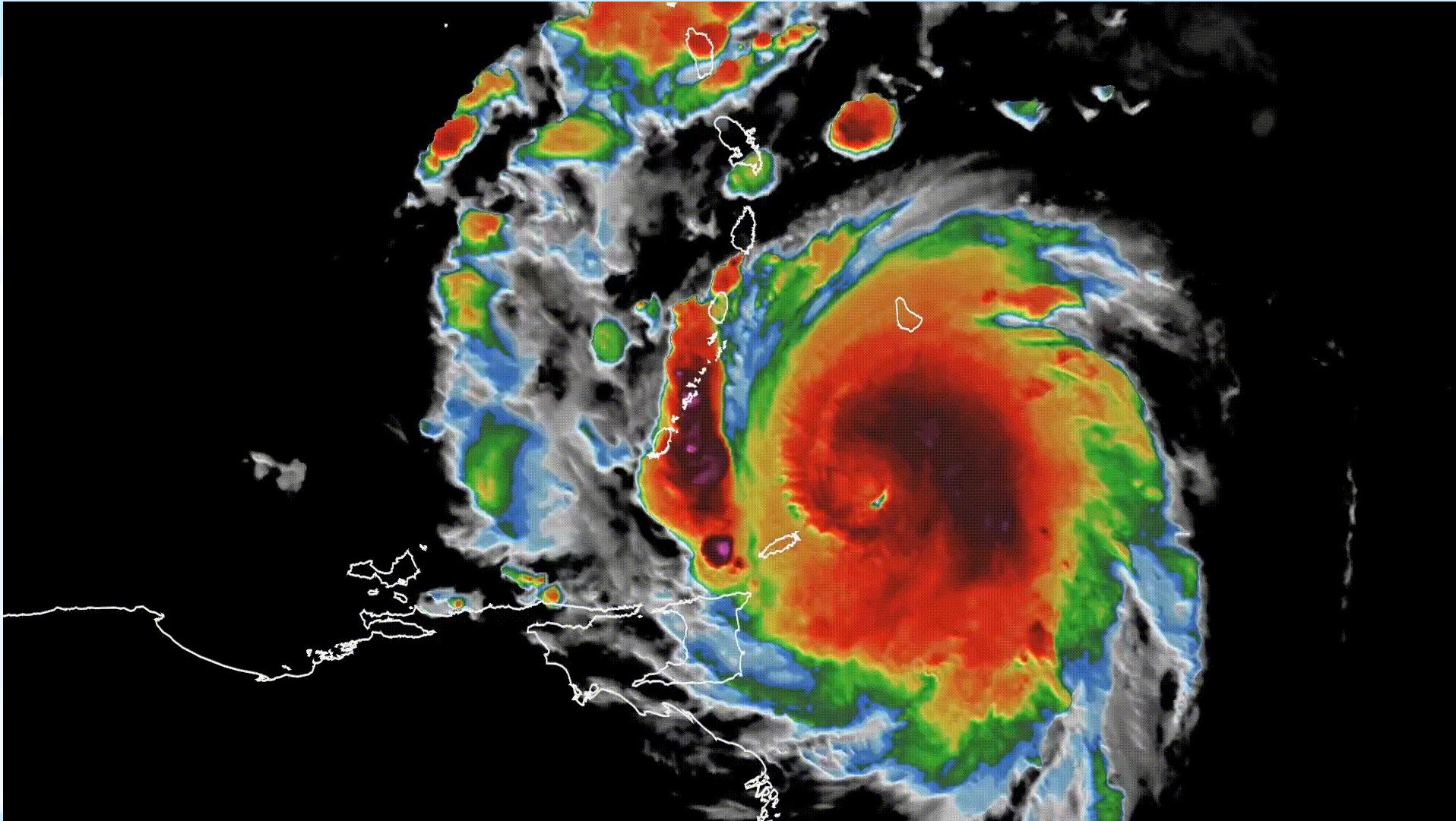
Графики смещения, скорости, ускорения
при гармонических колебаниях

Метеостанция Талдом (27411)
Прогноз от 0 ВСВ 22.7.2025 на 120.0 час.

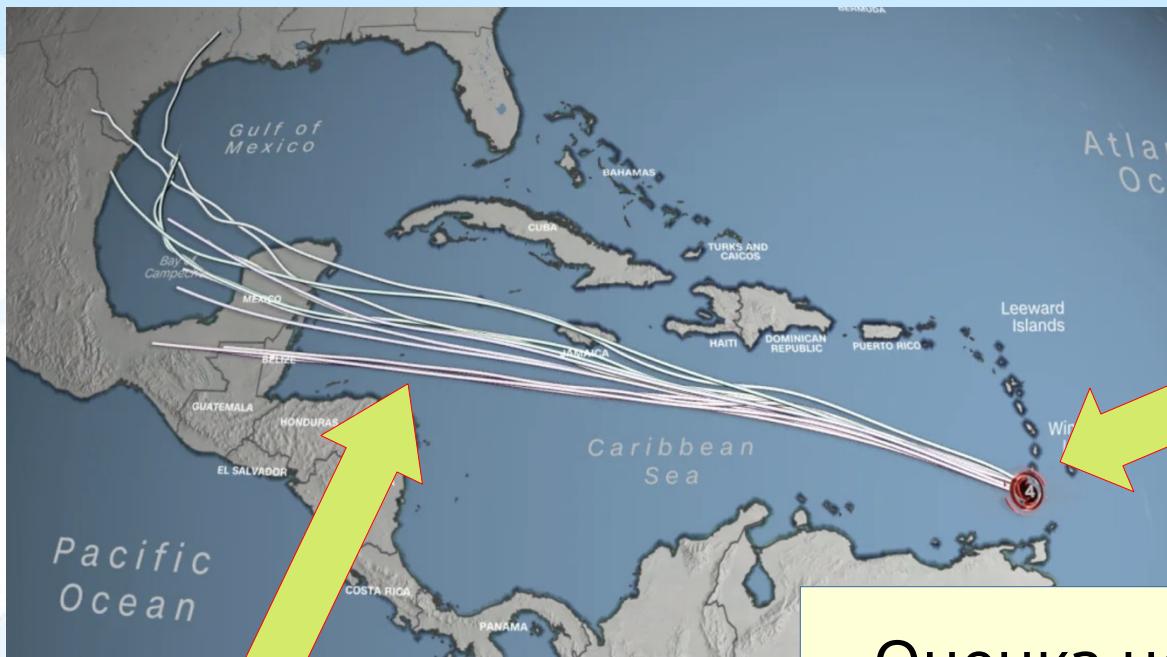
Высота м.
56.72° с.ш., 37.55° в.д.
Московская область

модель
ПЛАВ10





Предсказание траектории урагана



Неопределенность
будущего
состояния
атмосферы

Неопределенность
текущего
состояния
атмосферы

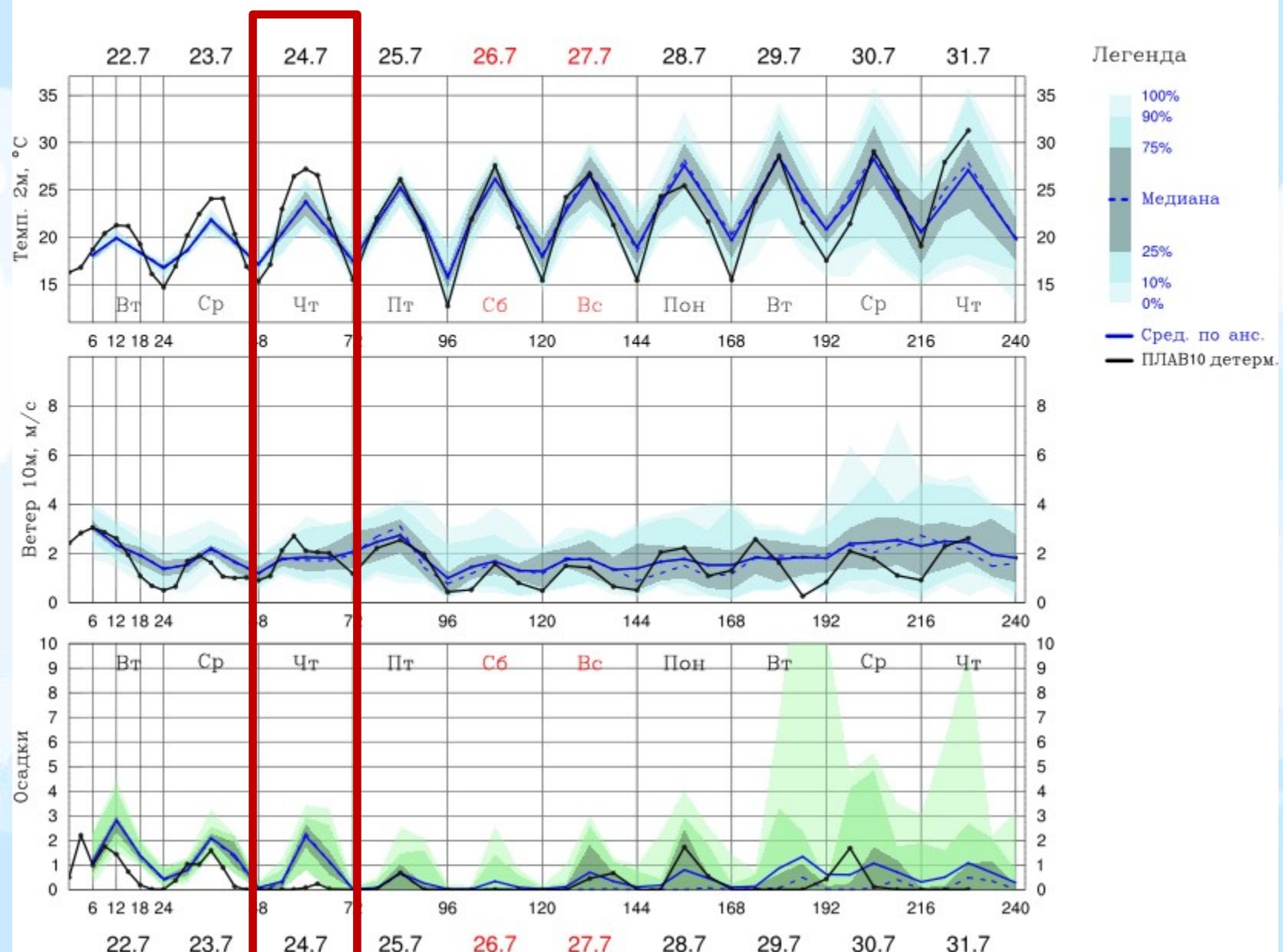
Оценка неопределенности
(дисперсии) — важная
составляющая прогноза!

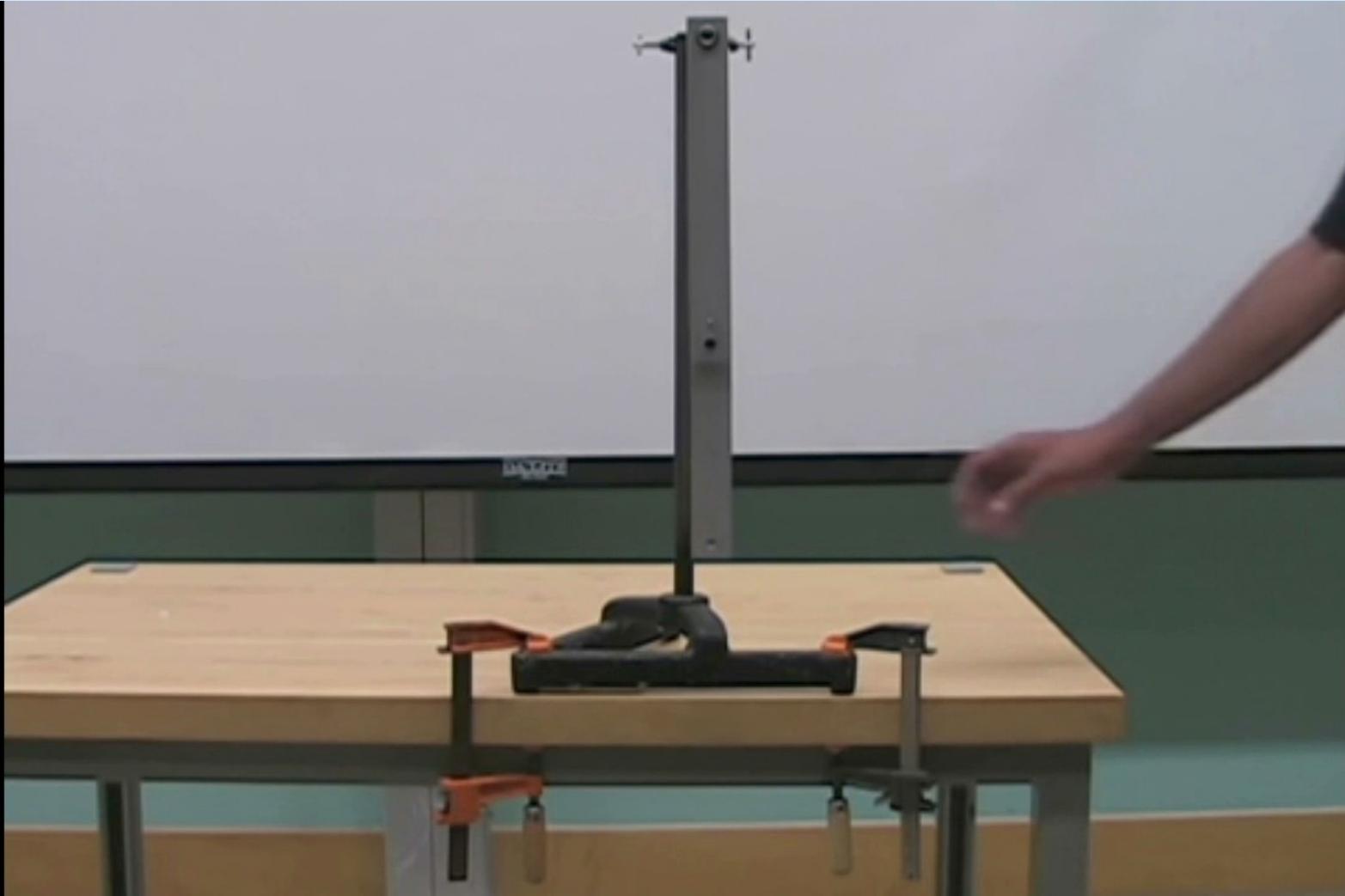
Метеостанция Талдом (27411)

Прогноз от 0 ВСВ 22.7.2025 на 240.0 час.

Высота м.
56.72° с.ш., 37.55° в.д.
Московская область

модель
ПЛАВ20
Размер ансамбля 19



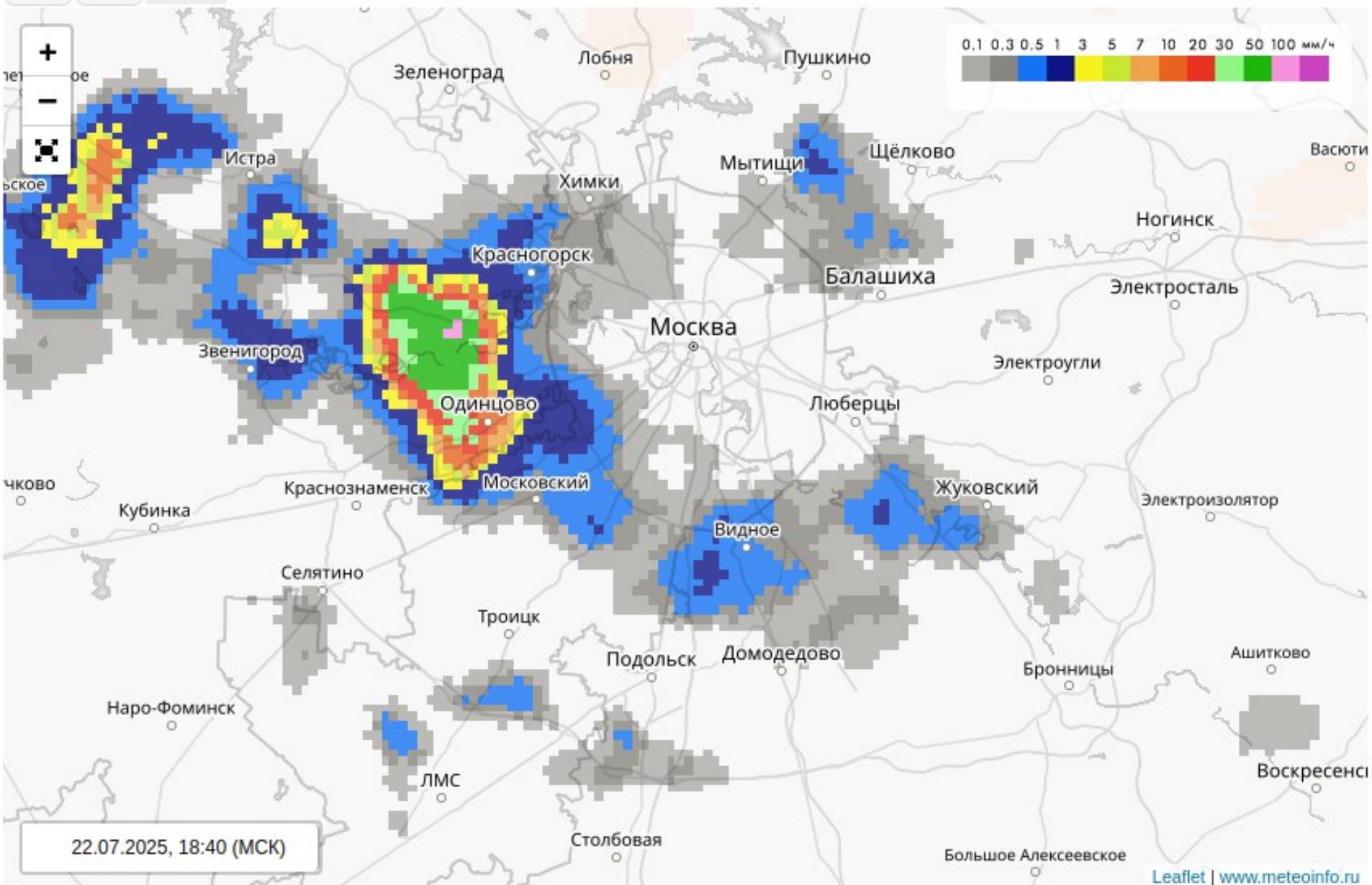


Расчетная сетки модели атмосферы

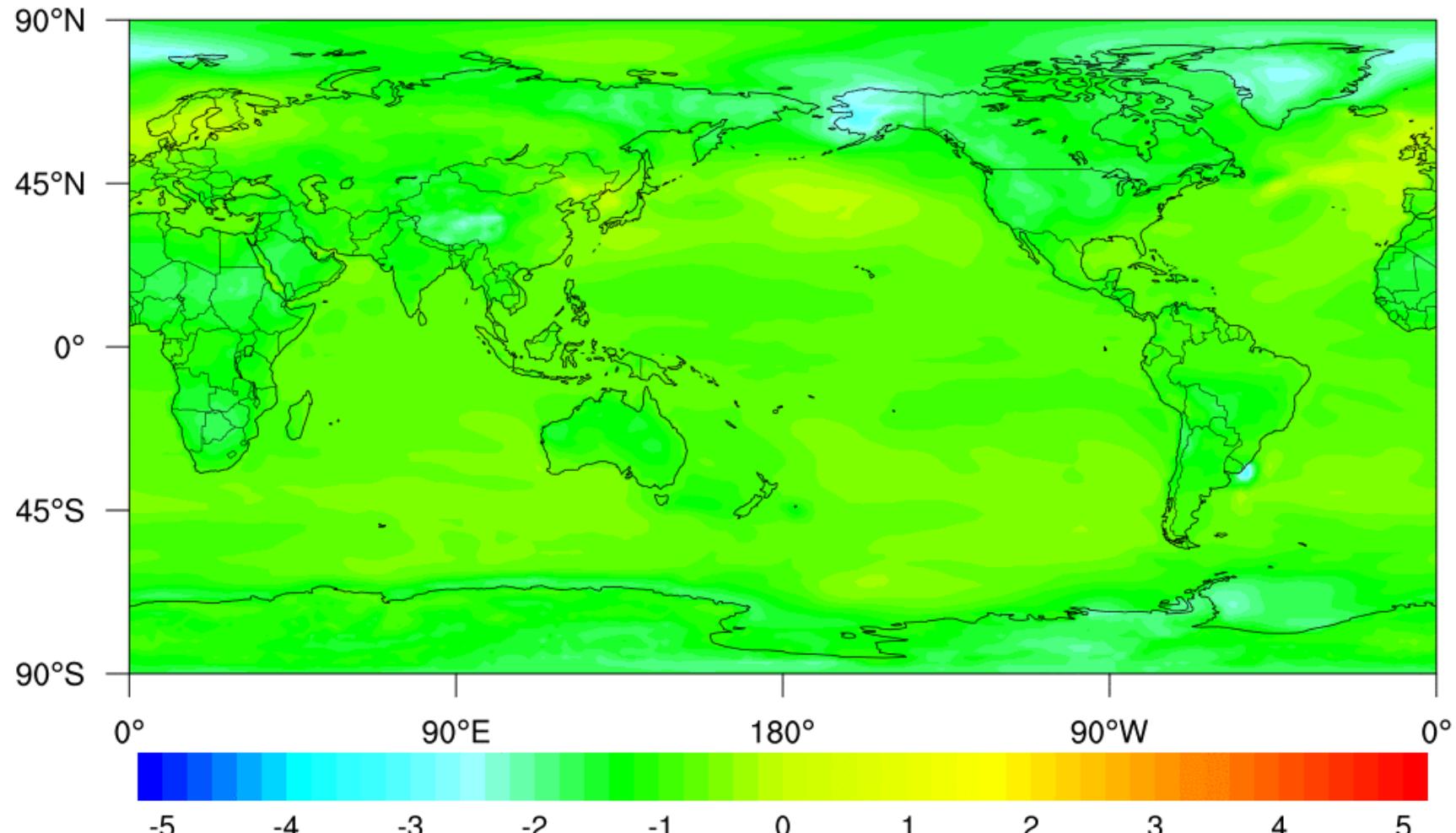


В математической модели всегда
присутствуют неразрешенные
шаги!

Карта интенсивности осадков



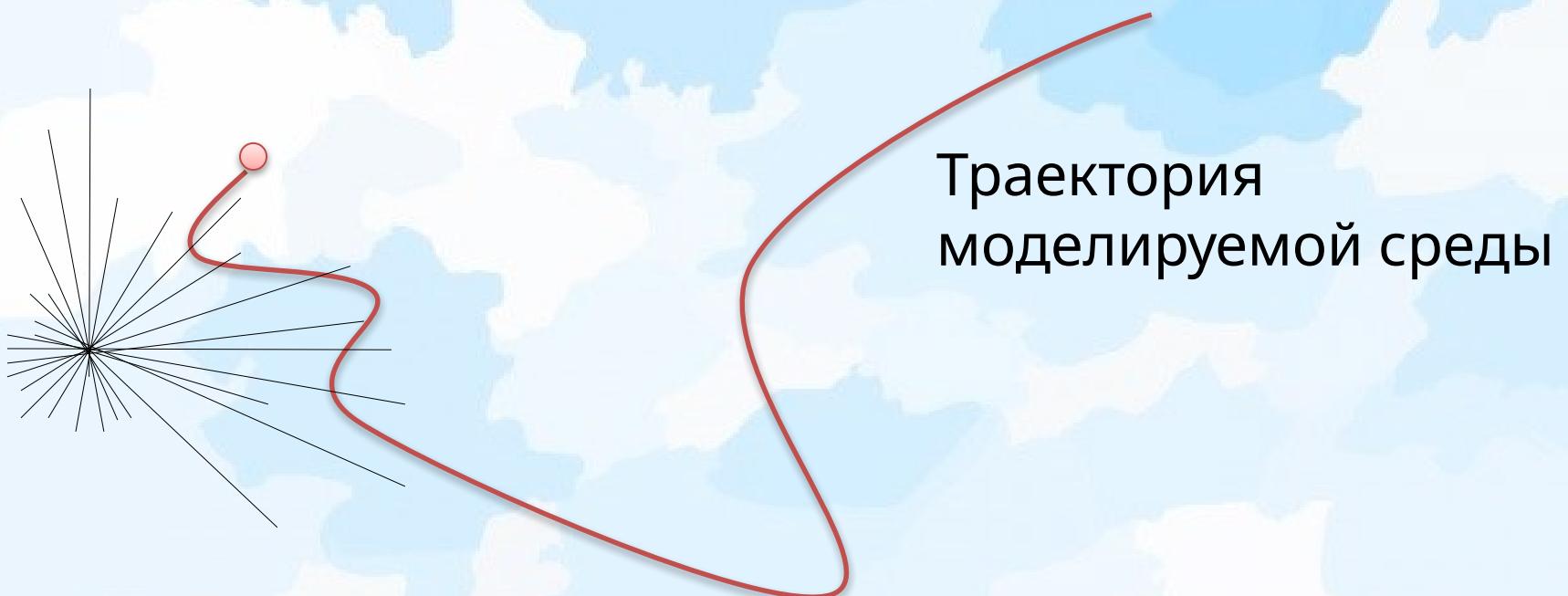
1860



Отклонение среднегодовой приземной температуры воздуха по
отношению к среднегодовой температуре 2014 года по результатам
моделирования по INMCM.

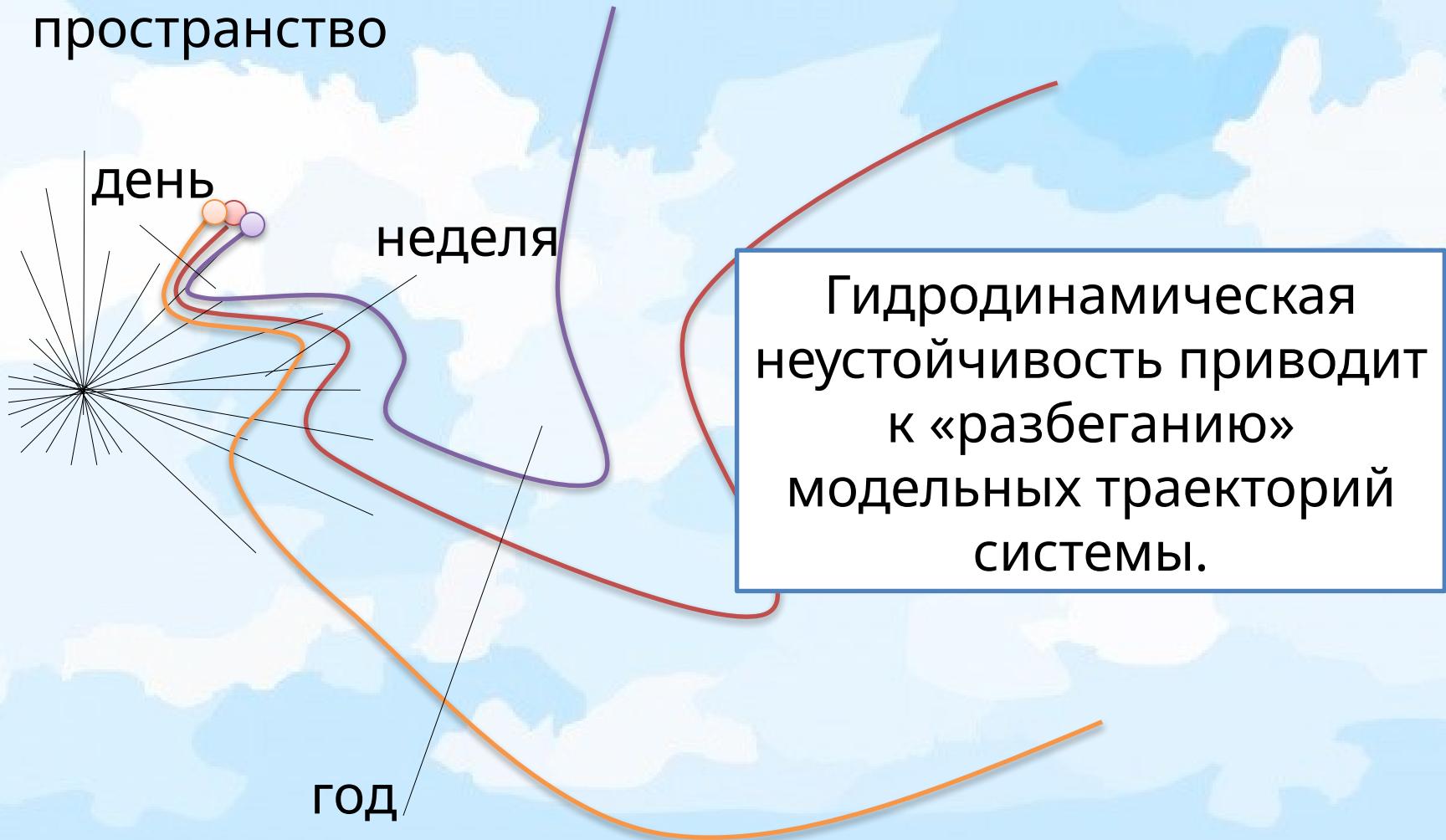
Что такое прогноз?

Многомерное фазовое
пространство



Что такое прогноз?

Многомерное фазовое
пространство



Что такое прогноз?



Почему траектория модельной системы не покинет аттрактор

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y$$

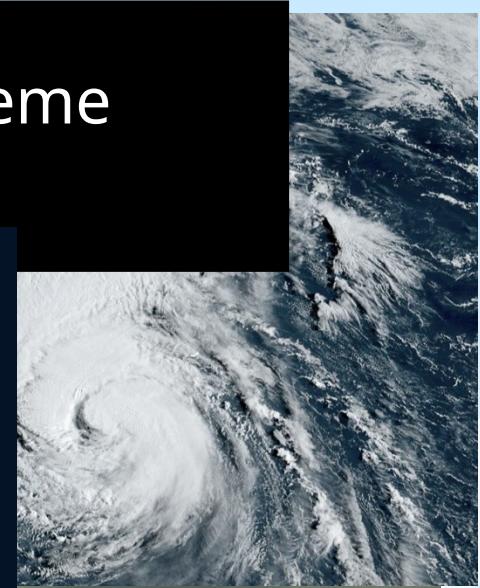
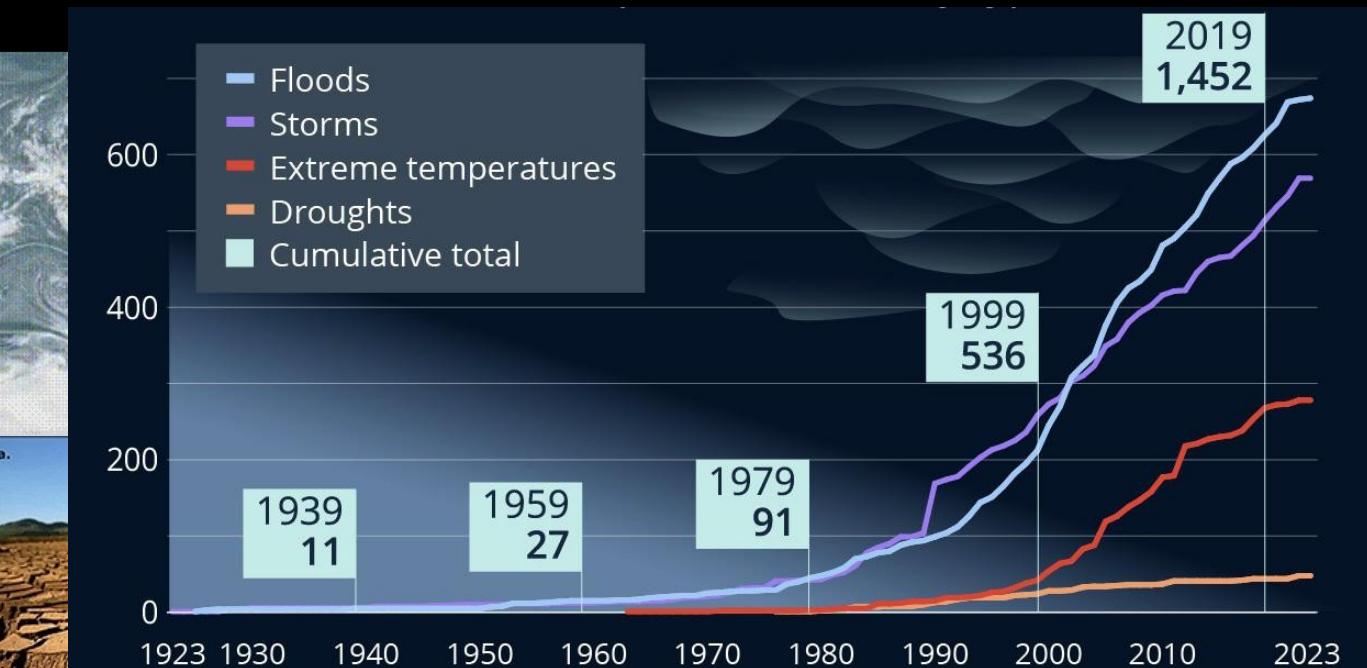
$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

.

Технология ПП сейчас



Cumulative number of natural disasters/extreme weather events in Europe since 1923, by type

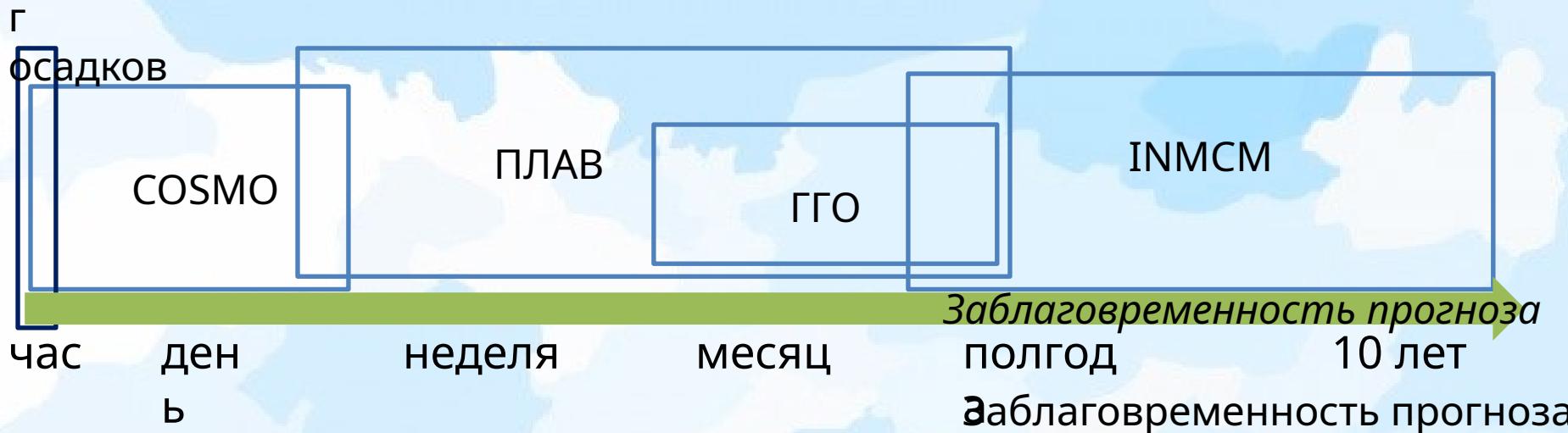


As of June 14, 2023. A disaster is classified here as at least one of the following:
10+ killed/ 100+ impacted/a state of emergency/a call for international assistance.
Source: The International Disasters Database (EM-DAT)



Прогностические технологии Гидрометцентра России

Несущая способность прогноза налагает ограничения на время счета.



Краткосрочный,
до 3х дней,
 10^9 и более
ячеек,
4000 ядер - 1
час.

Среднесрочный,
от 1 до 10 дней,
 10^8 ячеек,
2000 ядер - 2
часа.

Долгосрочный,
От 2х недель до 6 месяцев
 $10^7\text{-}10^8$ ячеек,
1000 ядер - 12 часов.

Климатический,
от 2х лет

Числа указаны для глобальных моделей, в том числе:
тип и заблаговременность прогноза,
характерная сложность модели, требуемая мощность вычислительной
системы и время расчета прогноза.

Прогностические технологии Гидрометцентра России

Оперативность прогноза налагает ограничения на время счета.

ПЛАВ

час ден неделя месяц

Заблаговременность прогноза
полгод 10 лет
заблаговременность прогноза

Коллектив разработчиков модели ПЛАВ



ПЛАВ – многомасштабное моделирование атмосферы



1. Одна программная реализация, разные конфигурации.

2. Принципиальные конфигурации ПЛАВ:

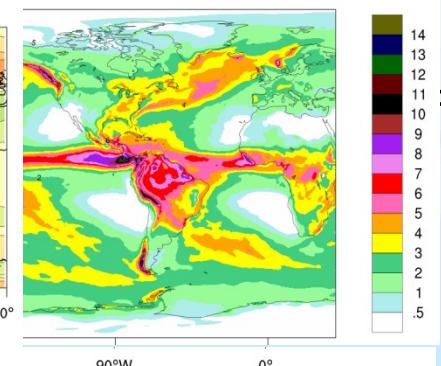
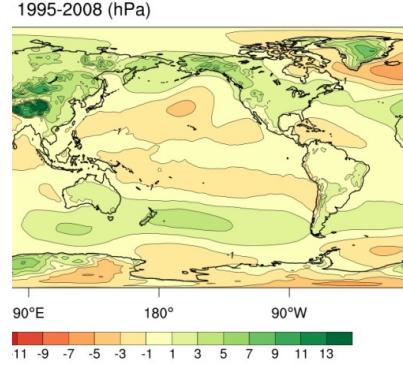
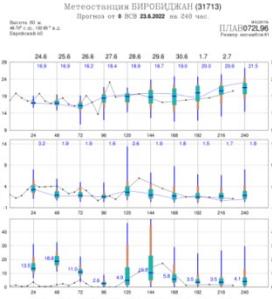
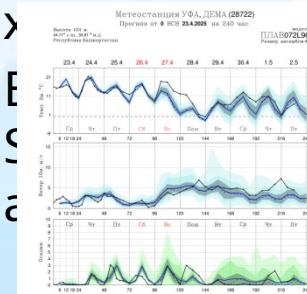
ПЛАВ072L96:

- долгосрочный прогноз (оперативно, 1-4 месяца);
- субсезонный прогноз (оперативно, 2-6 недель);
- ансамблевый среднесрочный (оперативно, 3-14 дней);

ПЛАВ20: - ансамблевый среднесрочный (оперативные испытания);

ПЛАВ10: - среднесрочный прогноз высокой детализации (оперативно);
- краткосрочный прогноз для гражданской авиации (оперативно, 1 день).

• Сопутствующие технологии: генерация ансамбля, усвоение почвенных



вода

ПЛАВ: качество среднесрочного прогноза

BOM - Bureau of Meteorology, Australia;

CMC - Canadian Meteorological Centre, Environment Canada

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecast

DWD - Deutscher Wetterdienst, Germany

KMA - Korea Meteorological Administration

MetOffice - Met Office, United Kingdom

NCEP - National Centers for Environmental Prediction, USA

Meteo-France - Meteo-France

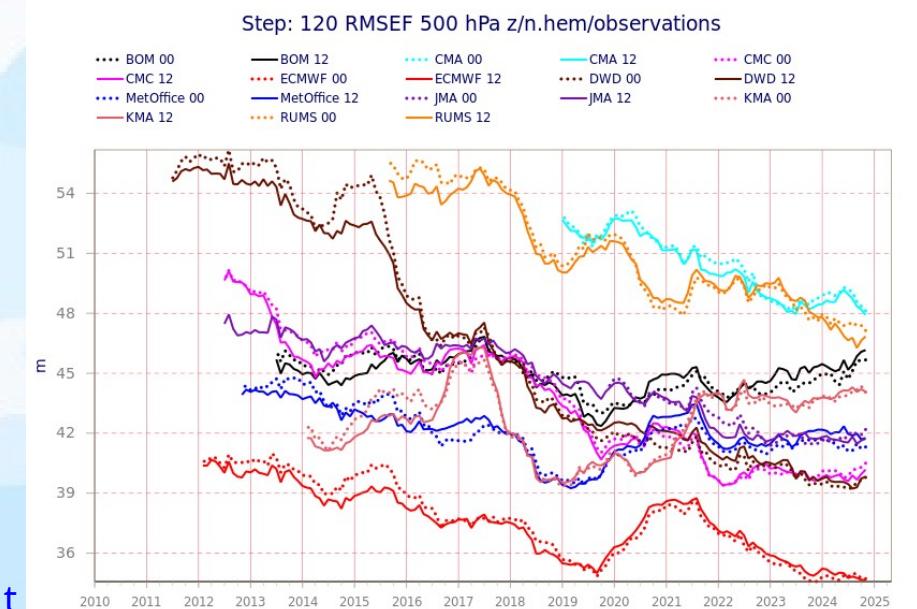
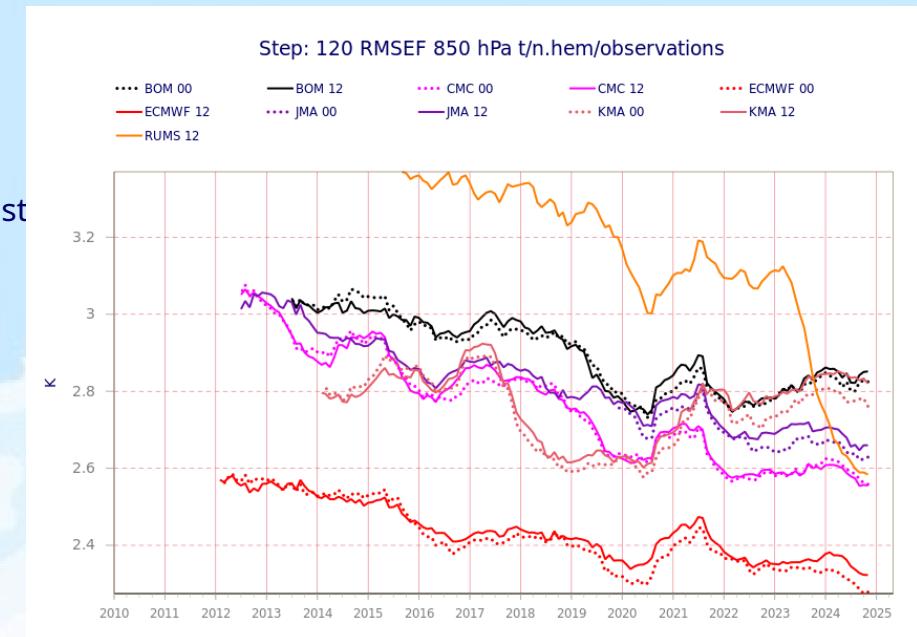
JMA - Japan Meteorological Agency

RUMS - Hydrometeorological Centre of Russia

ПЛАВ также участвует в

международных проектах по
сравнению моделей:

The YOPP site inter-comparison
project, WMO Lead Centre for
Deterministic Forecast Verification
(WMO-LCDNV), MOSAiC-NRV
Teleconnection MIP и др.



Картинки с сайта:

https://wmolcdnv.ecmwf.int/scores/time_series/850_t

О коллективе разработчиков модели ПЛАВ



Российская газета

Топ-10 научных открытий
российских ученых в 2022
году

«Почвы улучшили прогноз
аномальных температур»

<https://rg.ru/2022/12/22/top-10-nauchnyh-otkrytij-rossijskih-uchenyh-v-2022-godu.html>

О коллективе разработчиков модели ПЛАВ



РОССИЯ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "Авиакомпания "РОССИЯ"
ул. Пилотов, д.18, корп. 4, Санкт-Петербург, 196210;
Ленинский проспект, д.15А, Москва, 119071
Тел. +7 (812) 633 37 00, факс. +7 (812) 633 38 10
head_office@rossiya-airlines.com
ОГРН 01128564 ОГРН 1117847025284
ИНН 7810814522 КПП 997650001

05.05.2022 № 004 / 62
На исх. № от _____

Об анализе метеорологических
данных

Уважаемый Игорь Анатольевич!

По исполнение пункта 6 протокола совещания Росавиации 60/05-ПР от 04.04.2022 в АО «Авиакомпания «Россия» был проведен сравнительный анализ метеорологических данных, предоставляемых Росгидрометом, на картах ветра и температуры и картах особых явлений погоды с данными, наблюдавшимися в полете.
По докладам экипажем воздушных судов расхождения данных не отмечено.
Представляемая графическая метеорологическая информация может использоваться при планировании и выполнении полетов.

Летный директор

Г.В. Баринов

Российская газета

Топ-10 научных открытий
российских ученых в 2022
году

«Почвы улучшили прогноз
аномальных температур»

Полет на своем прогнозе (РБК)
**Россия перешла на собственную систему
метеопрогнозирования для авиации**

Росгидромету выделят 1,6 млрд руб. в 2024–
2026 годах на суперкомпьютер и российскую
систему зональных прогнозов для авиации
взамен отключенной глобальной системы.

<https://rg.ru/2022/12/22/top-10-nauchnyh-otkrytij-rossijskih-uchenyh-v-2022-godu.html>

<https://www.rbc.ru/newspaper/2023/10/09/651297239a79476fb5ad3fb3?ysclid=lqp21577202117>

Технология прогноза погоды

Сбор и анализ
данных
наблюдений



прогно
з

Технология прогноза погоды

Сбор и анализ
данных
наблюдений

Математическую модель можно
коротко записать в виде системы
уравнений с начальным условием:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = M(x, t), & t \in (0, T) \\ x|_{t=0} = x_0, \end{cases}$$

X – вектор прогностических
переменных,

M – оператор модели.

x_0 – вектор прогностических
переменных в начальный
момент времени.

прогно
з

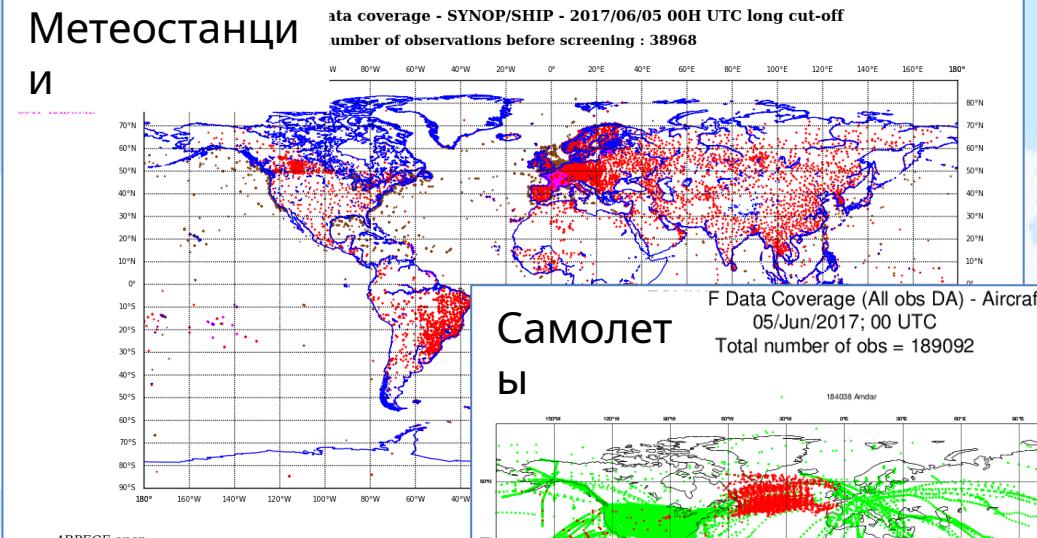
Технология прогноза погоды

Сбор и анализ
данных
наблюдений

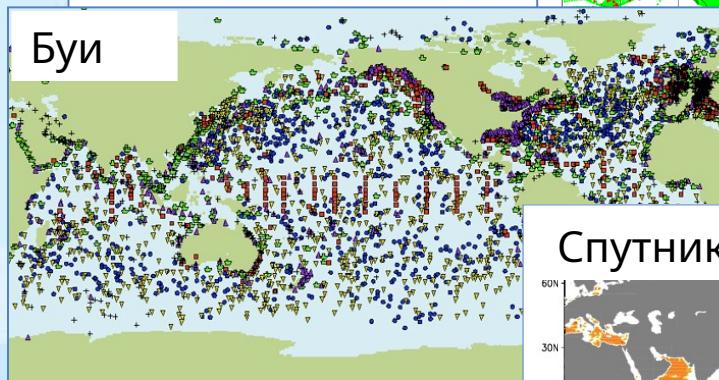
Усвоение
данных
наблюдений

прогно
з

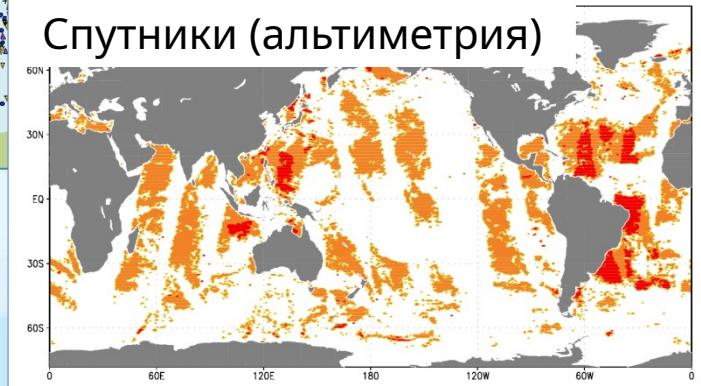
Метеостанци
и



Самолет
ы



Спутники (альтиметрия)



Технология прогноза погоды

Сбор и анализ
данных
наблюдений

Усвоение
данных
наблюдений

прогно
з

Математическую модель можно
коротко записать в виде системы
уравнений с начальным условием:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = M(x, t), & t \in (0, T) \\ x|_{t=0} = x_0, \\ J(x_0) = \inf_v J(v). \end{cases}$$

X – вектор прогностических
переменных,

M – оператор модели.

X_0 – вектор прогностических
переменных в начальный
момент времени.

J – некоторый функционал.

Среднеквадратическая ошибка прогноза оперативной версии ПЛАВ для различных начальных данных

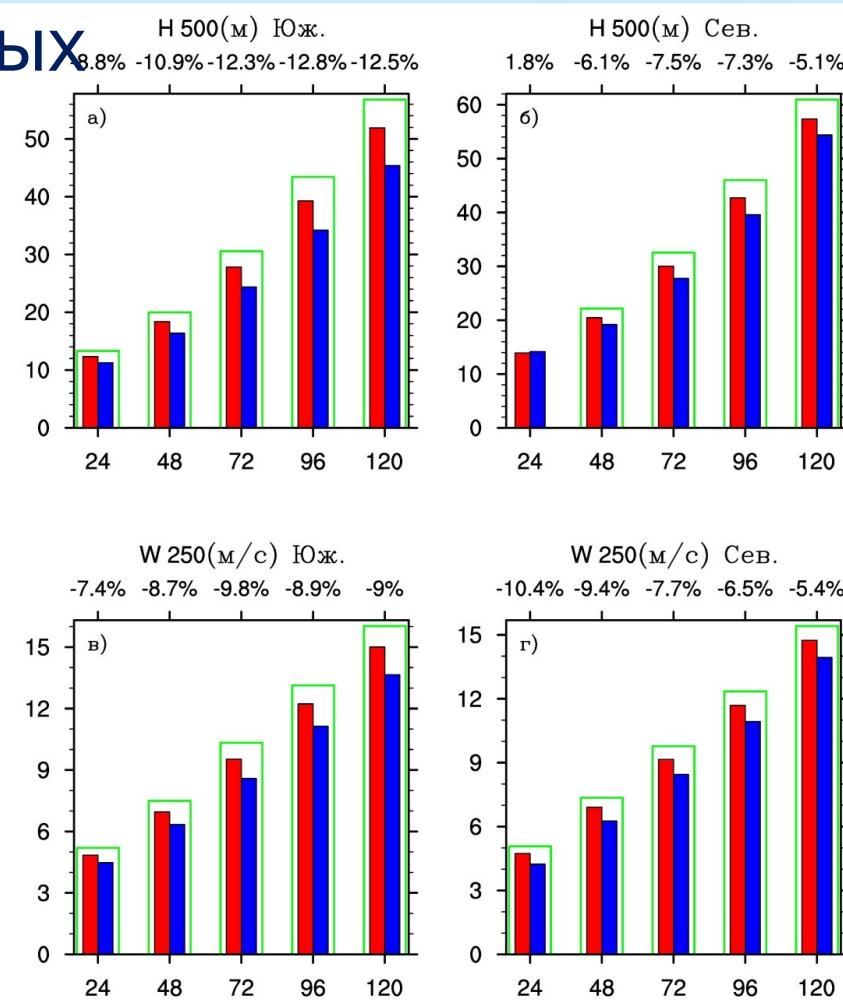
января 2018

Южное полушарие слева,
северное – справа.

Поле H500 – сверху,
поле ветра – снизу.

Уменьшение ошибки
прогноза ПЛАВ на 72
часа в поле H500 – 2-4
метра, поля ветра –
около 0.8 м/с

Уменьшение ошибки
прогноза за счет
применения начальных
данных Европейского
центра по среднесрочным
прогнозам погоды
сопоставимо с 2 годами
совершенствования модели
ПЛАВ.



Анализ
ГМЦ

Анализ
ECMWF

Технология прогноза погоды

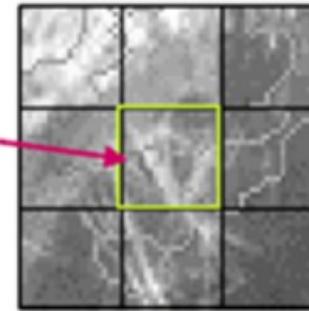
Сбор и анализ
данных
наблюдений

Усвоение
данных
наблюдений

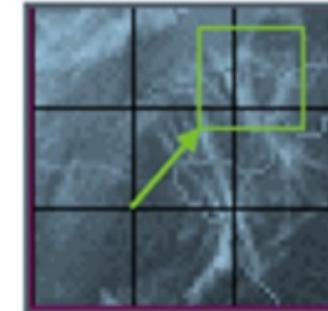
прогно
з

Forsythe, M., Saunders, R., 2008a. AMV errors: a new approach in NWP. Proceedings of the 9th International Wind Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 14-18 April 2008 EUMETSAT P.51

Целевая
ячейка
 24×24
пикселя
1 пиксель
– 1-3 км



T



T + 15 min

Область поиска
80x80 пикселей вокруг
целевой ячейки

Восстановление скорости ветра по фотографии облаков.

В чем подвох?

Технология прогноза погоды

Сбор и анализ
данных
наблюдений

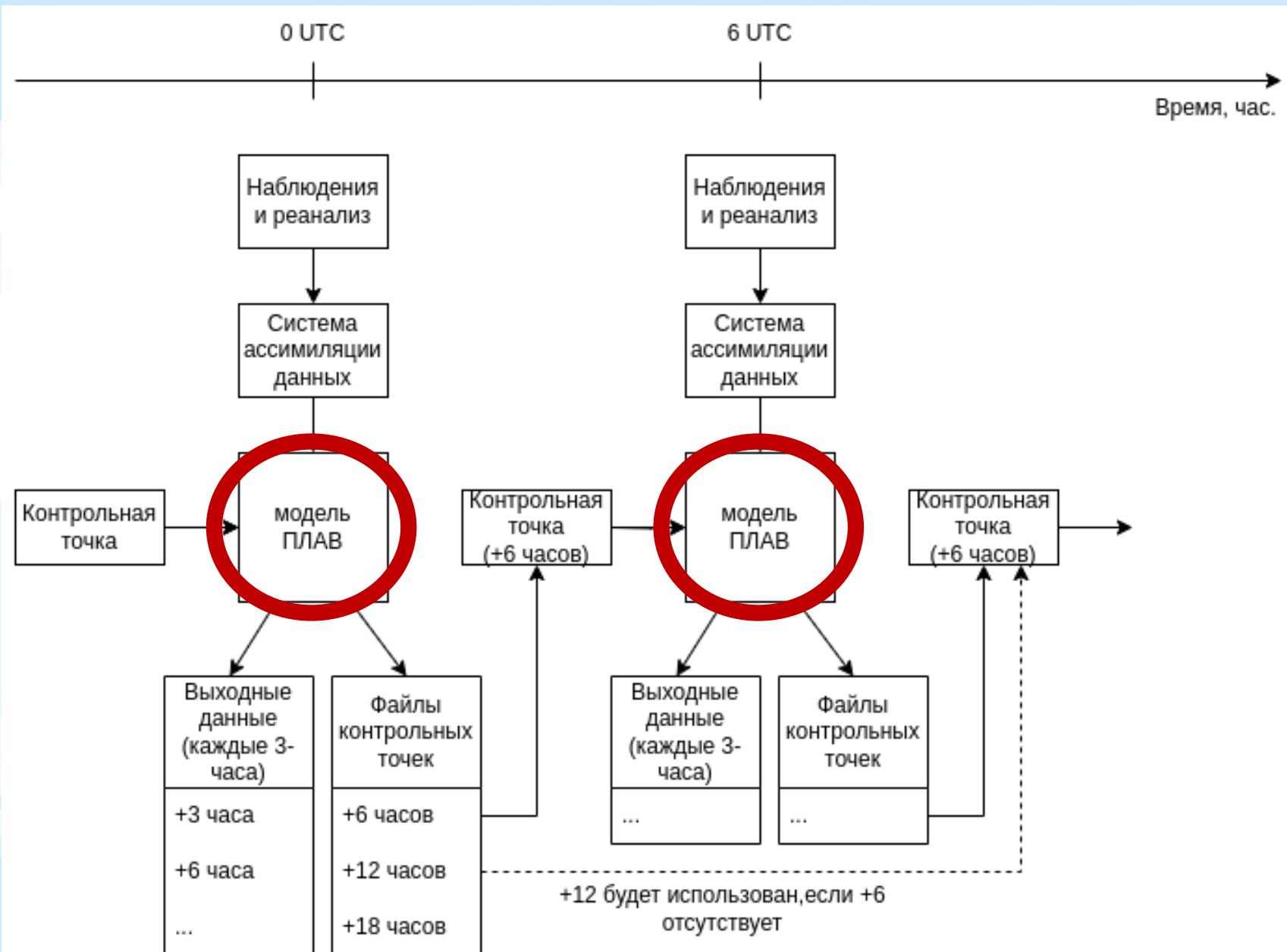
Усвоение
данных
наблюдений

Прогностическа
я модель

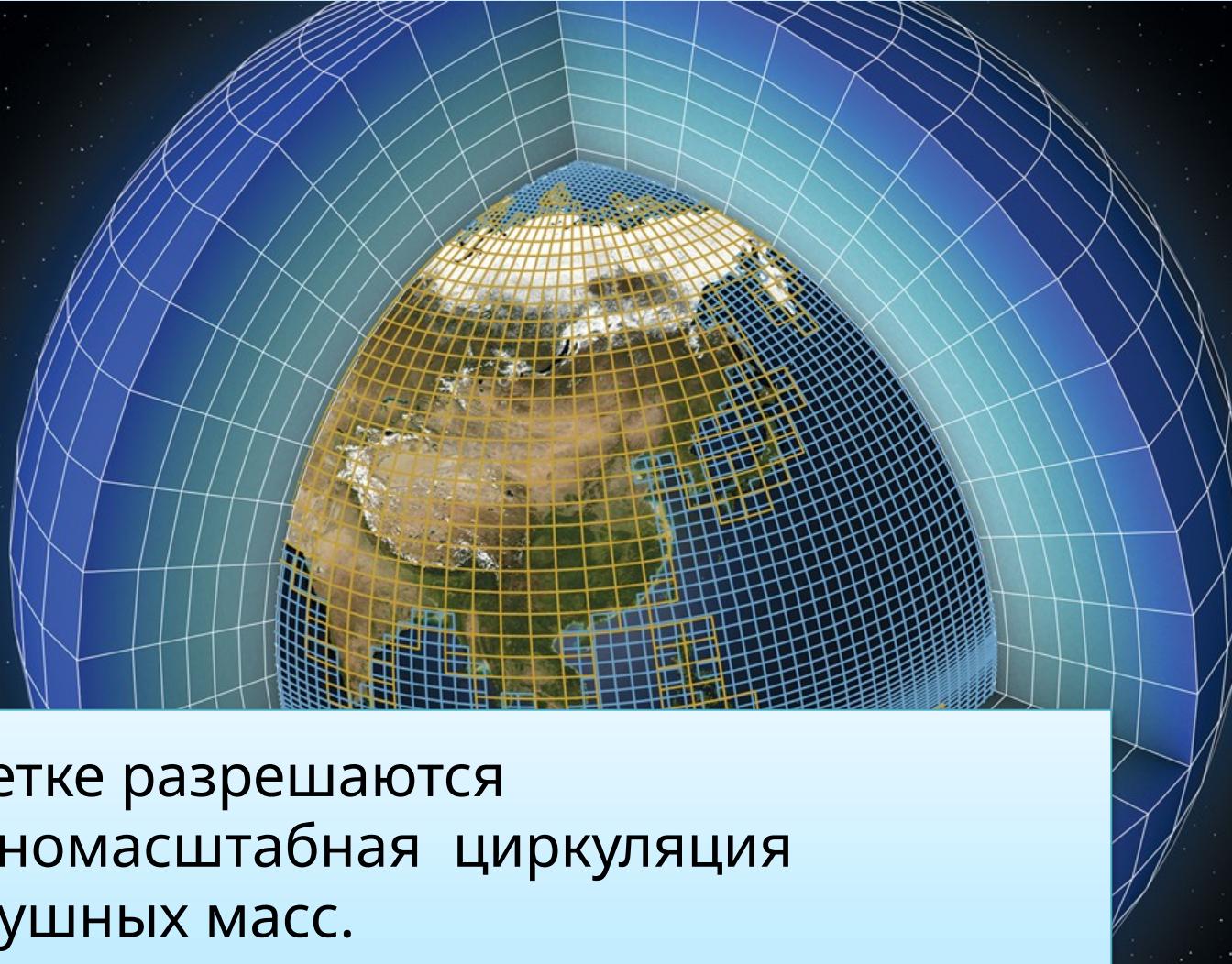
Синоптик

прогно
з

Технология прогноза погоды



Принципиальная схема модели атмосферы



На сетке разрешаются
крупномасштабная циркуляция
воздушных масс.

Основные прогностические переменные:
компоненты горизонтальной скорости ветра,
температура, приземное давление,
концентрация влаги в облаках и осадках (кг/кг)

Базовый вид уравнений модели атмосферы

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \nabla p + \rho \nabla \Phi = \rho \mathbf{f},$$

Закон сохранения импульса

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{v} = \rho Q,$$

Закон сохранения тепла

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

Закон сохранения массы

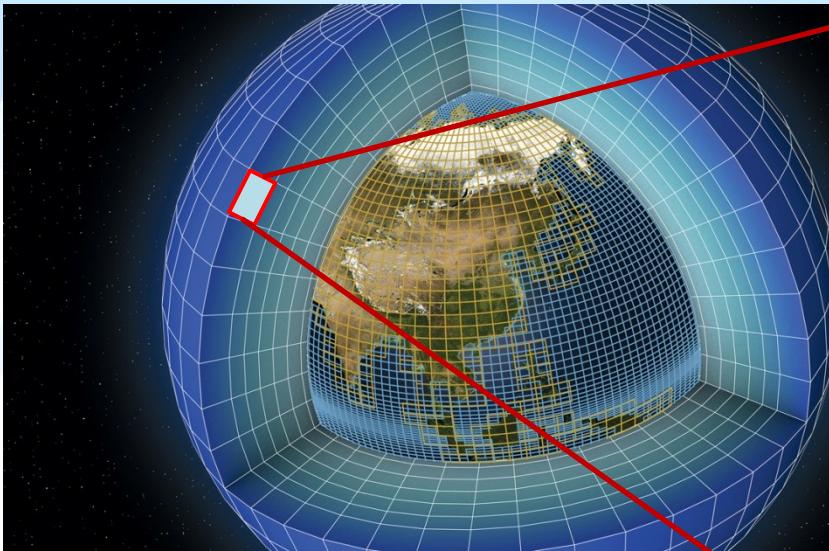
$$p = \rho R T.$$

Уравнение состояния

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + S \left(U \frac{\partial}{\partial X} + V \frac{\partial}{\partial Y} \right) + w \frac{\partial}{\partial z}$$

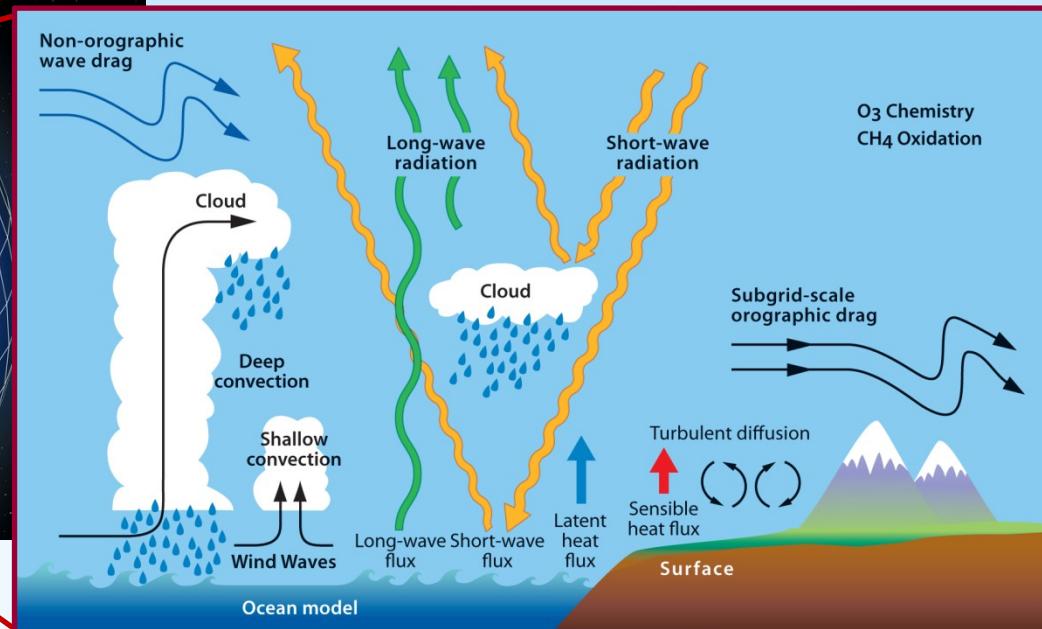
Вид полной производной

Принципиальная схема модели атмосферы



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

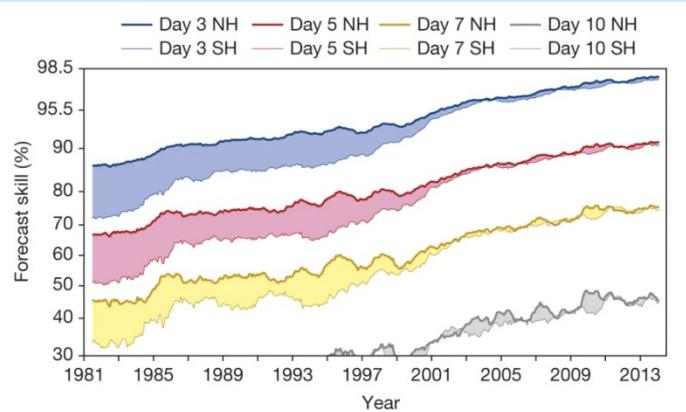
$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial t} + \mathcal{A}\vec{\varphi} + \mathbf{B}\vec{\varphi} = \vec{\mathbf{F}},$$



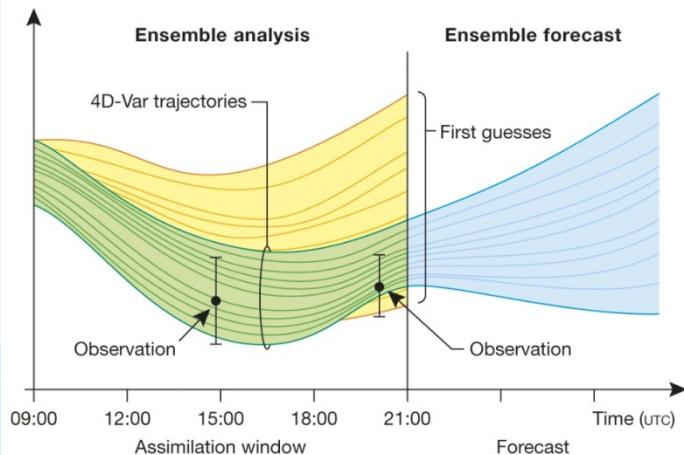
В каждой ячейке с учетом типа поверхности моделируются локальные процессы:

Облачность: крупномасштабная, мелко-конвективная и конвективная, водность облаков и балл облачности по ярусам; Микрофизические процессы: выпадение осадков, фазовые преобразования, осаждение, слипание, автоконверсия, процесс Вегенера-Бергерона-Финдейзена, учет геометрии облаков и испарение осадков; Распространение коротковолнового и длинноволнового излучения в атмосфере Земли: поглощение, рассеяние, переизлучение с учетом облачности, малых газовых составляющих, озона и аэрозолей; Глубокая конвекция: вовлечение окружающего воздуха, перераспределение момента движения и количества влаги с учетом восходящих и нисходящих потоков воздуха; Тройственные процессы в пограничном слое атмосферы; Процессы на поверхности Земли с учетом типа растительности и снежного покрова; Процессы в почве; Процесс гравитационно-волнового сопротивления и учет мелкомасштабной неоднородности рельефа; Мезосферное сопротивление; и многие другие.

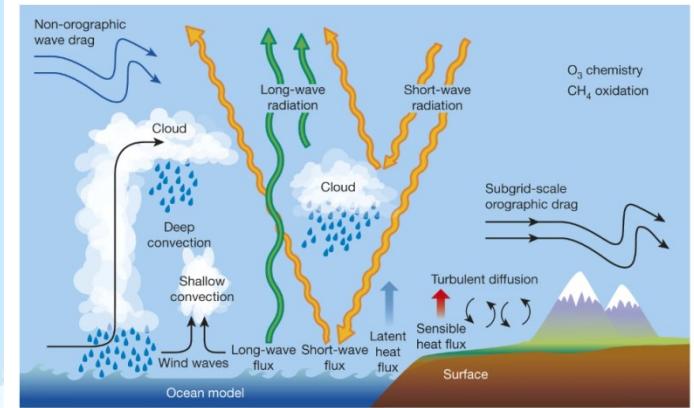
The quiet revolution of numerical weather prediction



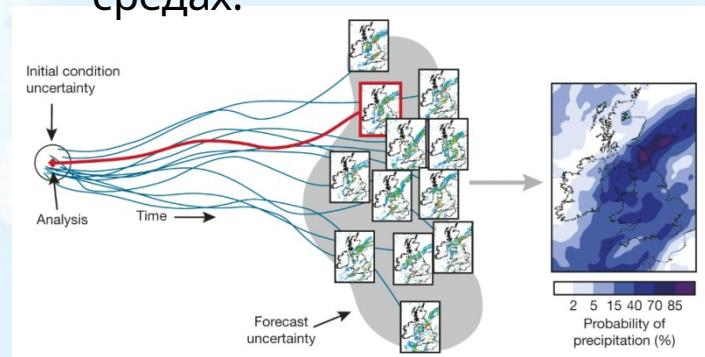
Точность прогноза с
заблаговременностью 3, 5, 7 и 10
дней.



Усвоение данных наблюдений



Повышение точности описания
процессов в атмосфере и смежных
средах.



Оценка неопределенности будущего
состояния атмосферы

ИИ в Технологии прогноза погоды?

Сбор и анализ
данных
наблюдений

Усвоение
данных
наблюдений

Прогностическа
я модель

Синоптик

прогно
з

Google AI Blog

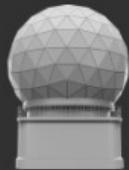
Using Machine Learning to “Nowcast”
Precipitation in High Resolution

Monday, January 13, 2020

Posted by Jason Hickey, Senior Software Engineer, Google
Research

*“We treat weather prediction as an image-to-image
translation problem, and leverage the current state-of-the-art
in image analysis: convolutional neural networks (CNNs).”*

<https://ai.googleblog.com/2020/01/using-machine-learning-to-nowcast.html>



Метеорадары

«Видят» осадки в радиусе 250 километров.
Данные обновляются раз в 10 минут.



Метеоспутники

Висят на геостационарной орбите и фотографируют определённый участок Земли каждые 10-15 минут.



Пользователи Яндекса

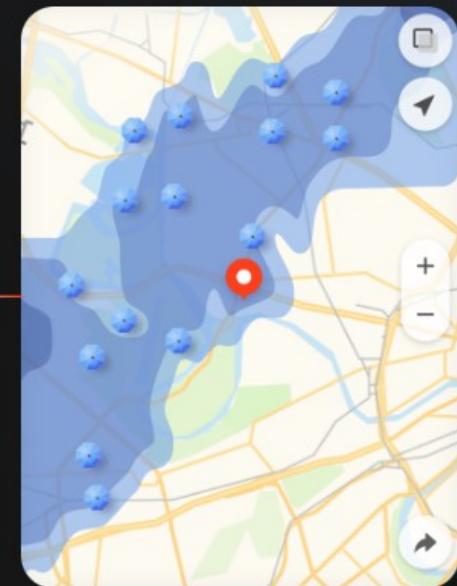
Передают точные данные об осадках, нажимая «Дождь идёт» или «Нет дождя».



Шесть моделей

Пять моделей ведущих мировых метеорологических институтов и собственная модель. Каждая хороша в своём регионе.

Метеум



Convolutional neural network

Recurrent neural network

Transformer-Based Neural Network

Earthformer, 2022;

Pangu-Weather, 2023; https://charts.ecmwf.int/?query=PANG_U

+subseasonal using teleconnection-informed transformer

FengWu, 2023; Fengwu-GHR, 2024 (0.09°);

FuXi, 2023;

AIFS, 2023;

ClimaX, 2023;

Aurora, 2024.

Graph Neural Network

Problems: over-smoothing, sensitive to noise and input data's graph structure.

GraphCast, 2023;

encoder transformed data from latitude and longitude grids into multi-grid graph nodes to extract relevant features.

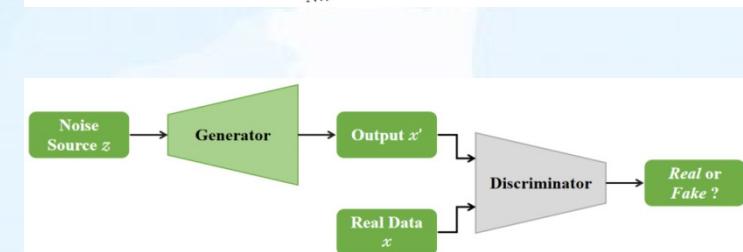
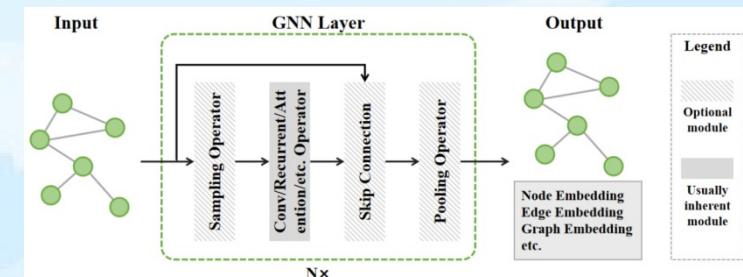
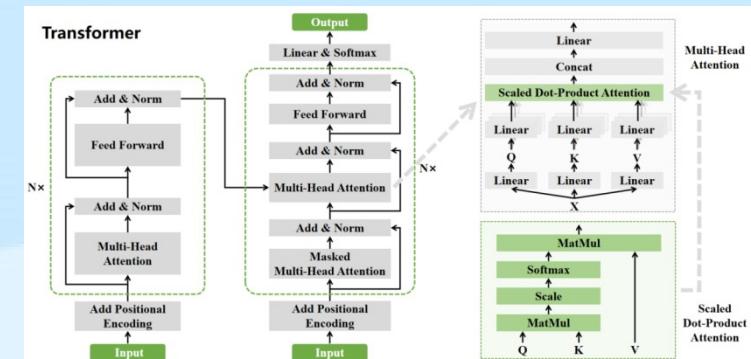
DGFormer, 2024; station-level weather forecasting

Deep Generative Methods

Ravuri et al, 2021 - predicting medium-to-heavy rain events;

NowcastNet, 2023;

FuXi-Extreme, FuXi-ENS, FuXi-S2S, 2024;



Task specific
models



Foundation model



A data-driven climate model

Fine-tuning

Emissions
trajectories

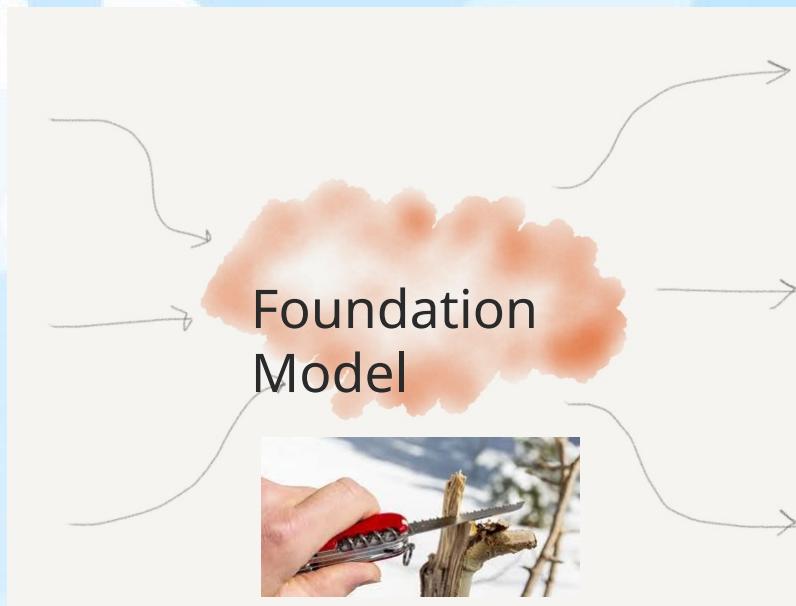
Selected High-
resolution
Observations

Bespoke
Simulations

Impacts
understanding

Emissions to
impacts
projections

Downscaling



AIFS - Artificial Intelligence Forecasting System

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

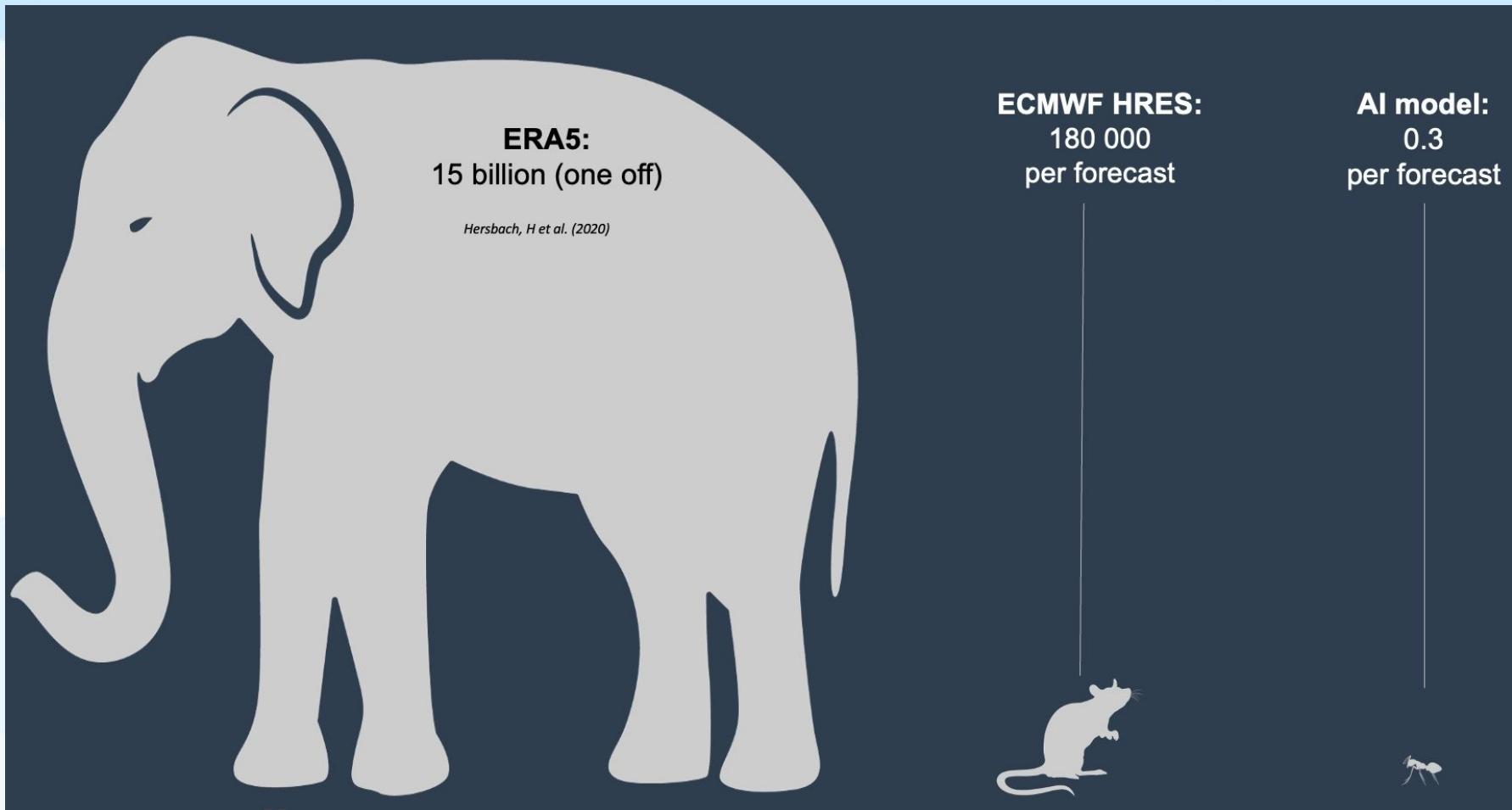
Update beginning of 2024, update to ~0.25 deg:

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

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

Lang, s. et. Al AIFS - ECMWF's data-driven forecasting system,
2024. <https://arxiv.org/abs/2406.01465>

How costly is AIFS?



Scorecard compared to IFS (2022)

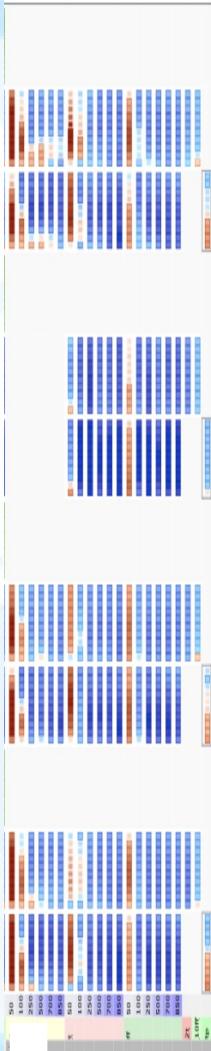


Figure 5: Scorecard comparing forecast scores of AIFS versus IFS (2022). Forecasts are initialised on 00 and 12 UTC. Shown are relative score changes as function of lead time (day 1 to 10) for northern extra-tropics (n.hem), southern extra-tropics (s.hem), tropics and Europe. Blue colours mark score improvements and red colours score degradations. Purple colours indicate an increased in standard deviation of forecast anomaly, while green colours indicate a reduction. Framed rectangles indicate 95% significance level. Variables are geopotential (z), temperature (O), wind speed (W), wind direction (WD), mean sea level pressure (msl), 2 m temperature (2t), 10 m wind speed (10ff), relative humidity (RH), precipitation (P), radiosonde (RS), NWP analysis (N), satellite (S), cloudiness (CA), cloud amount (C), and sea level pressure (SLP). Scores are anomalies correlation (ccaf), correlation (seeps), for precipitation (rmseps), RMSE (rmsse) and standard deviation of forecast anomaly (sdaf). See text for more explanation.

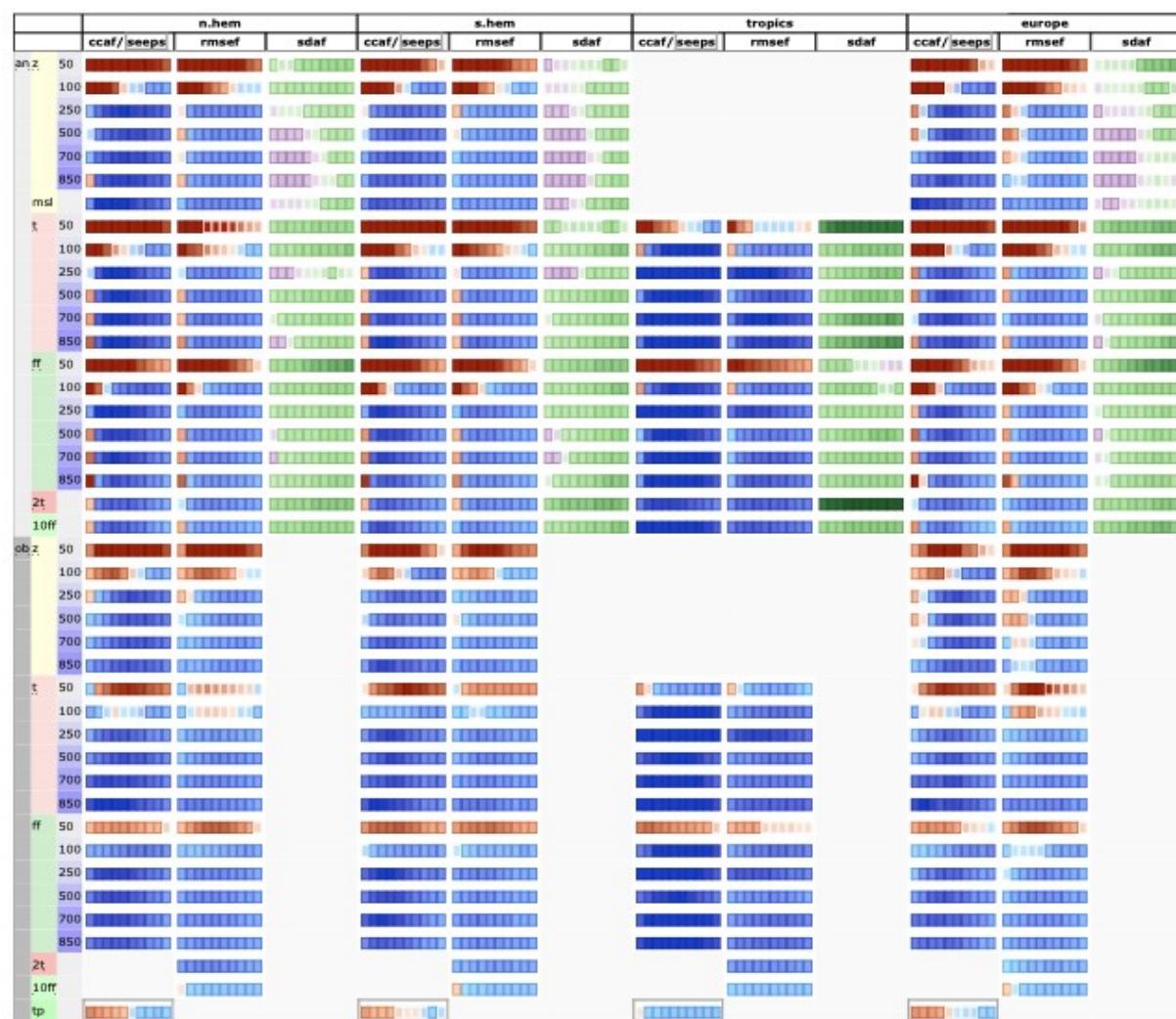
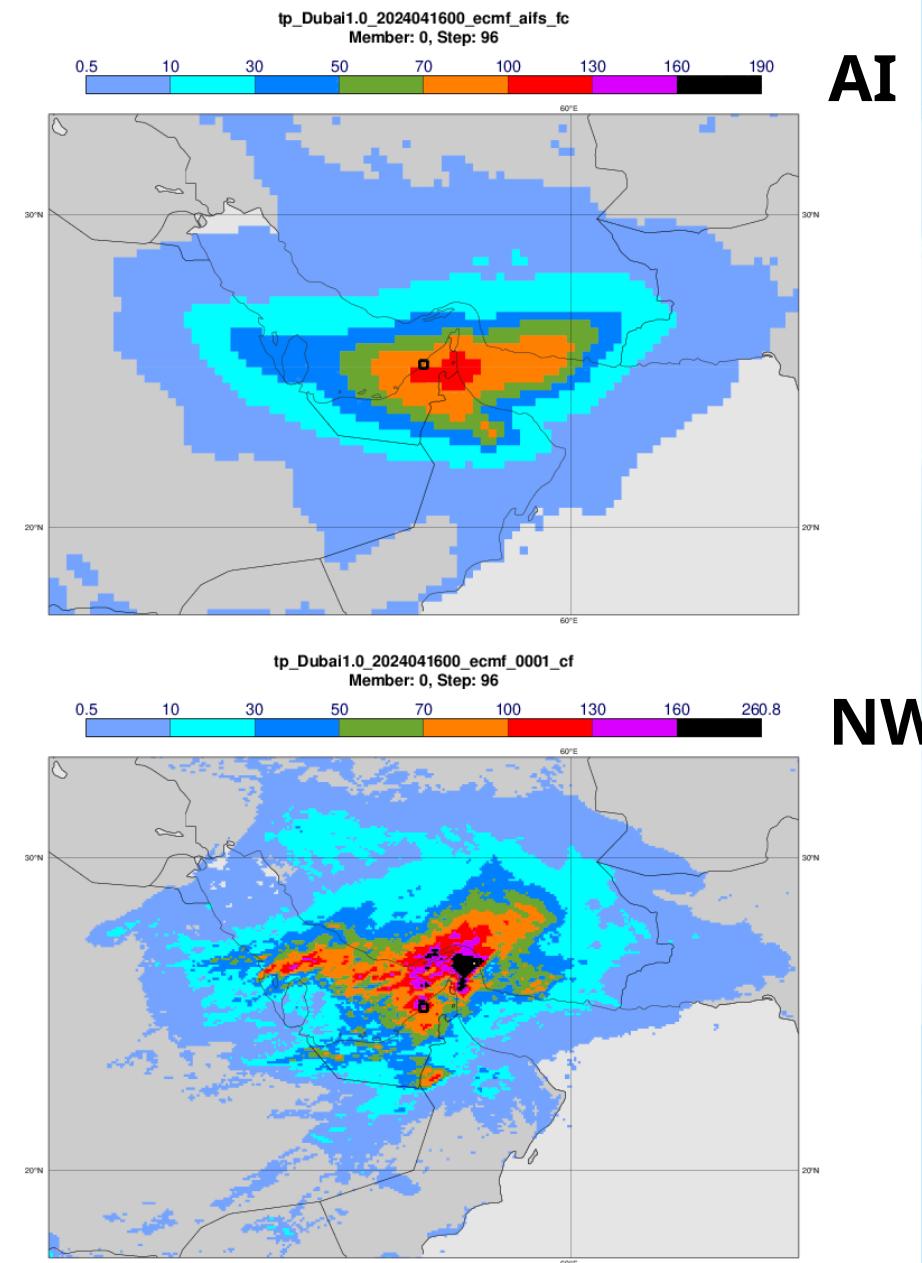


Figure 5: Scorecard comparing forecast scores of AIFS versus IFS (2022). Forecasts are initialised on 00 and 12 UTC. Shown are relative score changes as function of lead time (day 1 to 10) for northern extra-tropics (n.hem) southern extra-tropics (s.hem), tropics and Europe. Blue colours mark score improvements and red colours score degradations. Purple colours indicate an increased in standard deviation of forecast anomaly, while green colours indicate a reduction. Framed rectangles indicate 95% significance level. Variables are geopotential (z), temperature (O), wind speed (W), wind direction (WD), mean sea level pressure (msl), 2 m temperature (2t), 10 m wind speed (10ff), relative humidity (RH), precipitation (P), radiosonde (RS), NWP analysis (N), satellite (S), cloudiness (CA), cloud amount (C), and sea level pressure (SLP). Scores are anomalies correlation (ccaf), correlation (seeps), for precipitation (rmseps), RMSE (rmsse) and standard deviation of forecast anomaly (sdaf). See text for more explanation.

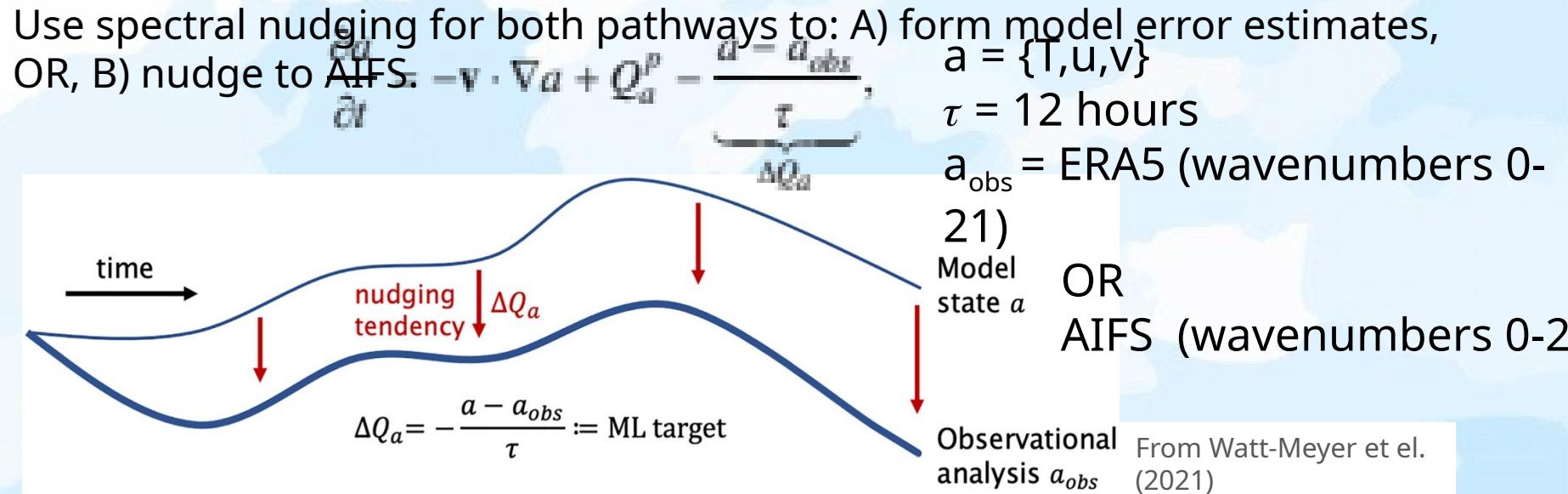
Case Study - Extreme precipitations in the UAE region (16 April 2024)

Day 3 forecast



Pathways to online bias correction

1. Train a column neural network to predict short time-scale **flow-dependent** systematic errors. Couple NN to NWP model.
2. Relax physical NWP to the outputs of AI/ML NWP for large scales.
Why? ML NWP model is known to perform better on the large-scales



Summary: what do we gain?

By applying flow-dependent online bias correction :

- Improve mean biases up to monthly time-scale.
- Improve anomalies by 2%, but only in week 1-2.
- Improve MJO and QBO.

BUT, online application and training is expensive. Need to generate 10-20 years of training data for every model cycle.

By nudging IFS to AIFS on large-scales:

- Improve medium-range scores by up to 15%.
- Improve tropical cyclone track error by 50 km at day 5.
- Retain amplitude in small scales, unlike ML AIFS that damps small scales.

Very cheap.

В чем отличие игрового движка от научной модели?



В чем отличие игрового движка от научной модели?

Воспроизведение
окружающего мира

В чем отличие игрового движка от научной модели?

Воспроизведение
окружающего мира



Игровой движок:
режим реального
времени.

Научная модель:
акцент на
точность.

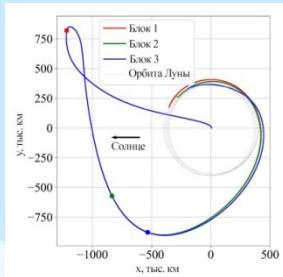
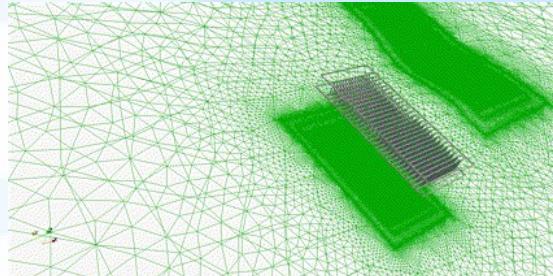


Инструмент

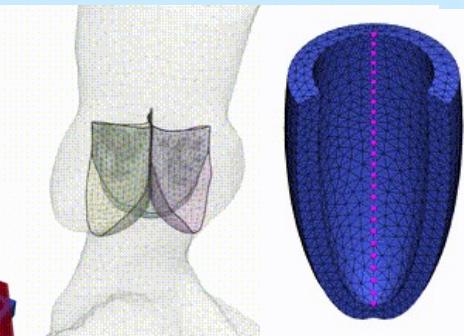


Актуальные прикладные задачи

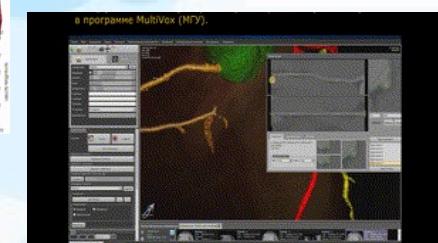
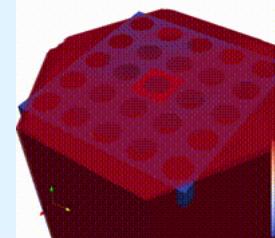
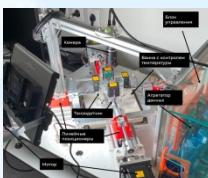
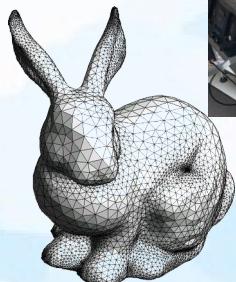
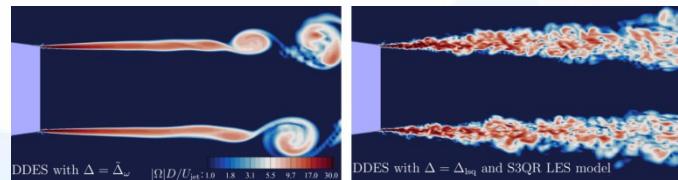
гидрогеология



задачи медицины



космическая навигация

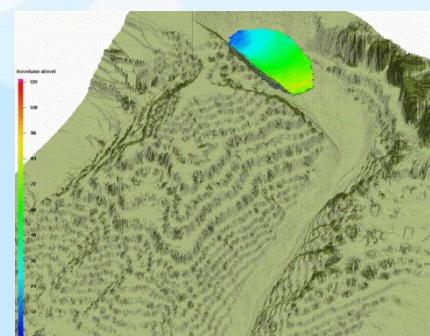


Вычислительная
аэродинамика и аэроакустика

опасные явления и
экология

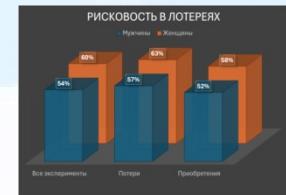


вычислительные методы

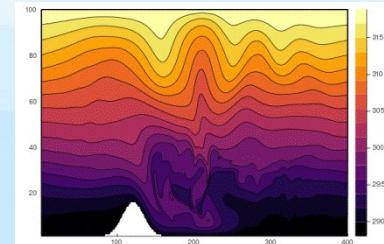


математика
искусственного
интеллекта

экономика



погода и
изменения климата



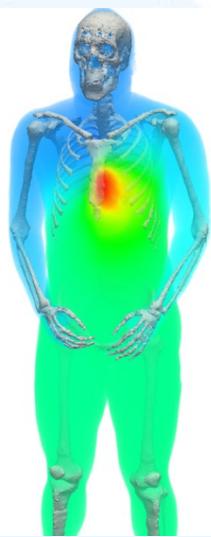


Математическое моделирование и теория управления

@ФПМИ МФТИ

Методическое руководство образовательной
программой ММТУ осуществляют *Отделение
математических наук РАН*.

Ростислав Юрьевич Фадеев
@rostfa



Данные



**Математическое представление
объекта и/или процесса**

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}^i}{\partial t^2} - \sum_{j=1}^3 \nabla_j \mathbb{P}^{ij}(\mathbb{F}, \mathbf{a}) = 0, \quad \mathbf{X} \in \Omega,$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_D, \quad \mathbf{X} \in \Omega_D$$



Программа