



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Курс «Моделирование климата городов», лекция №4

# Численное моделирование погоды и климата

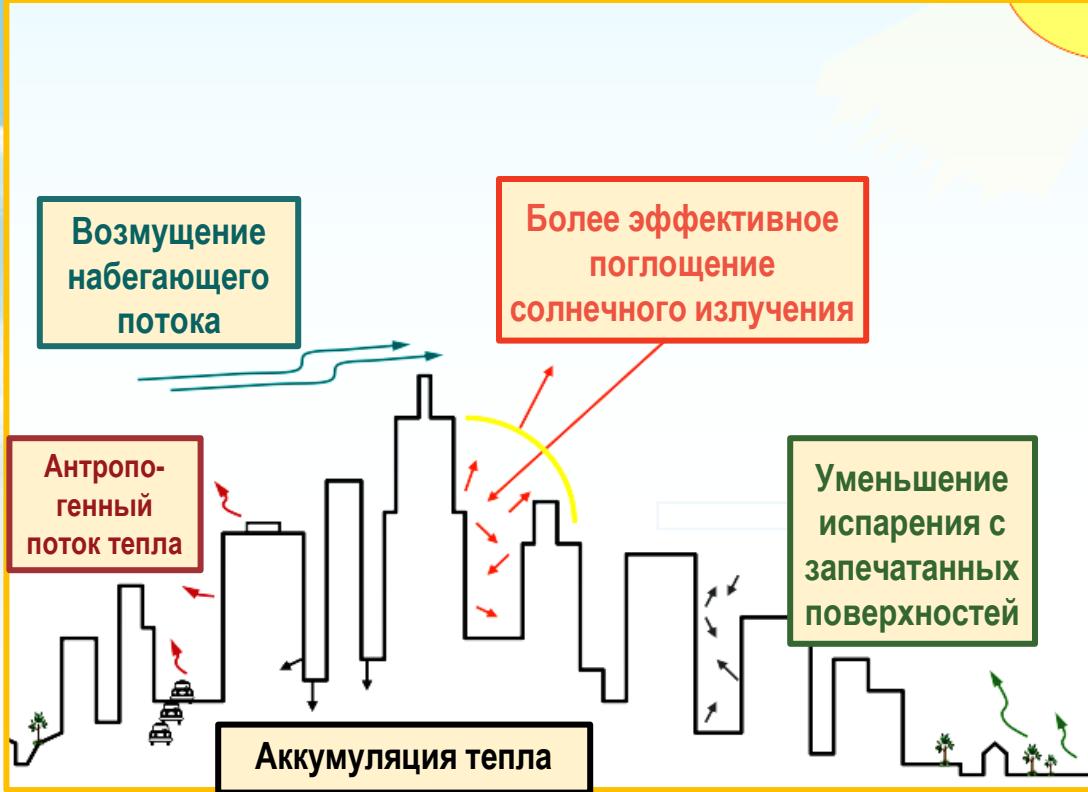
Михаил Иванович Варенцов

[mvarentsov@hse.ru](mailto:mvarentsov@hse.ru)

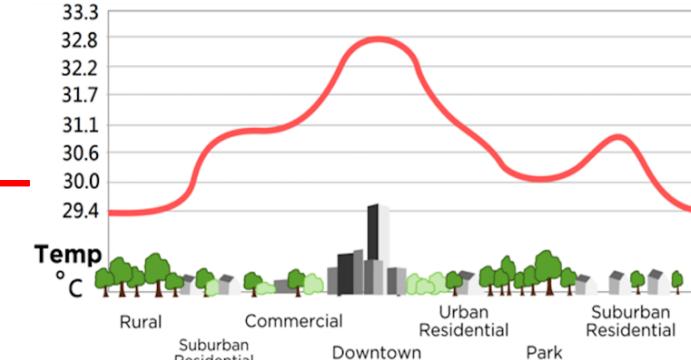


# В предыдущих сериях...

## Влияния городов на атмосферу



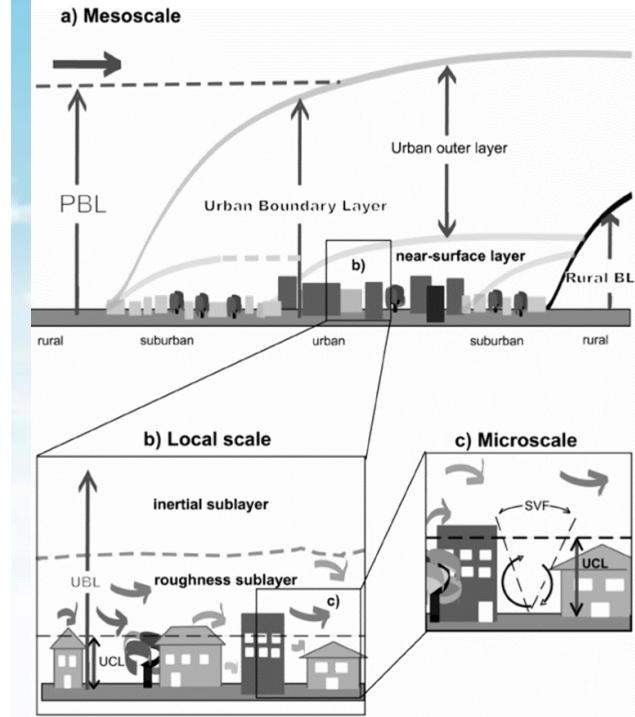
## Почему это актуально?



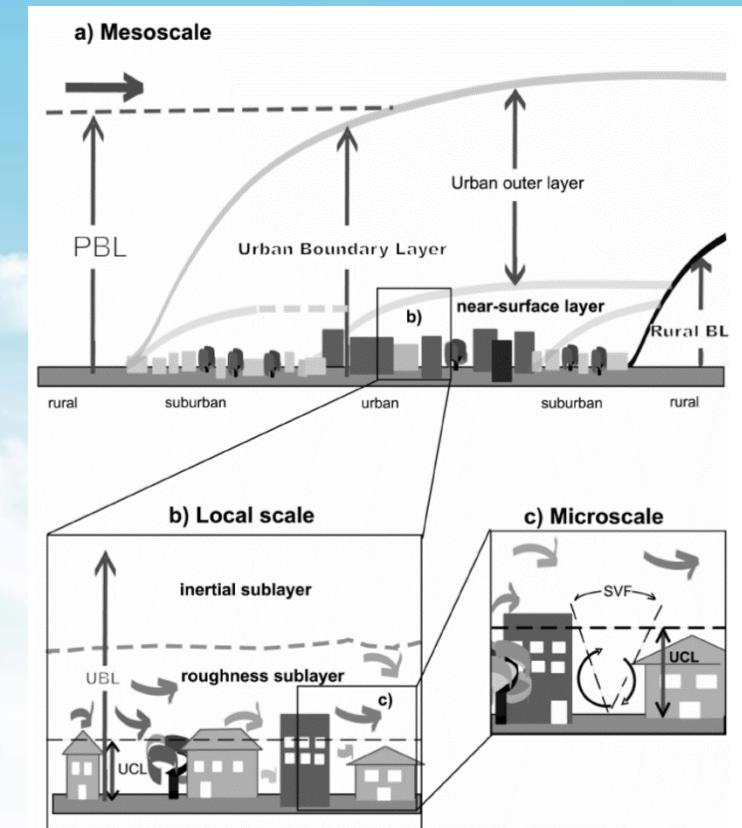
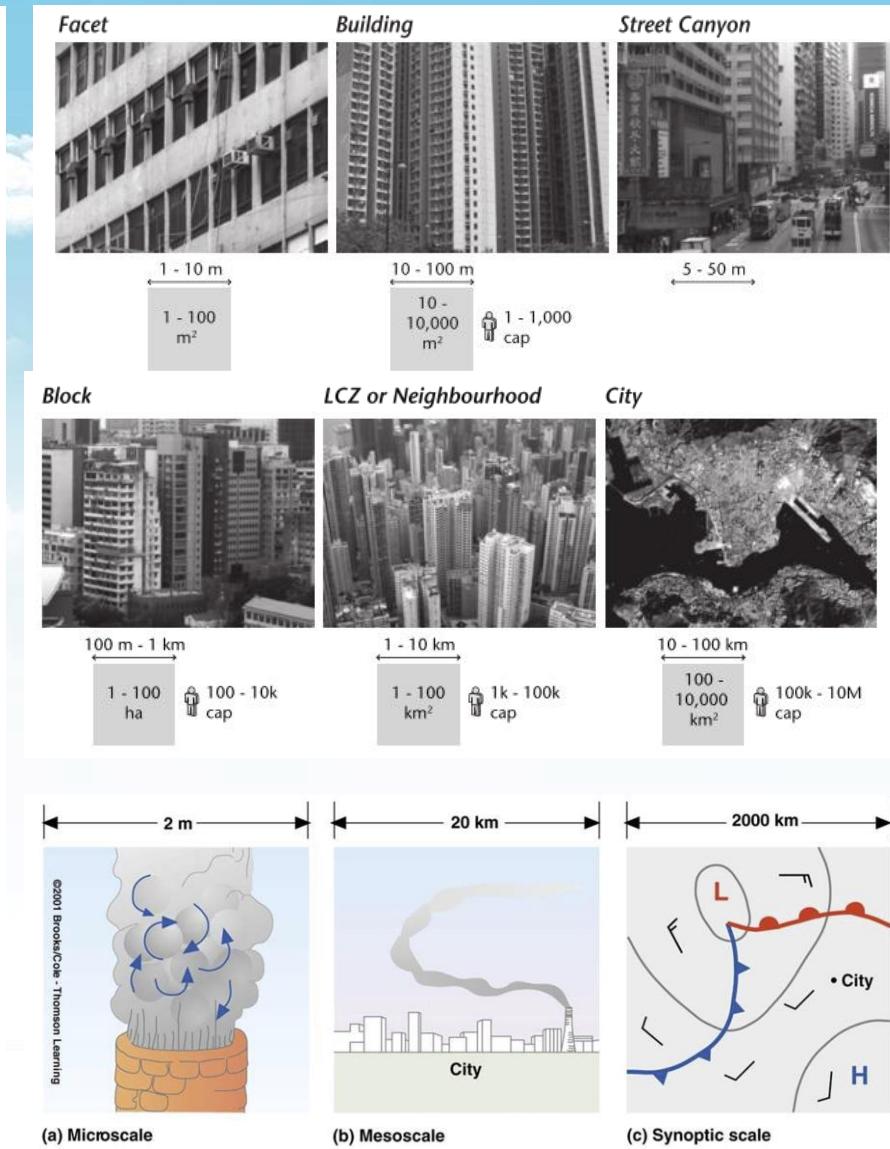
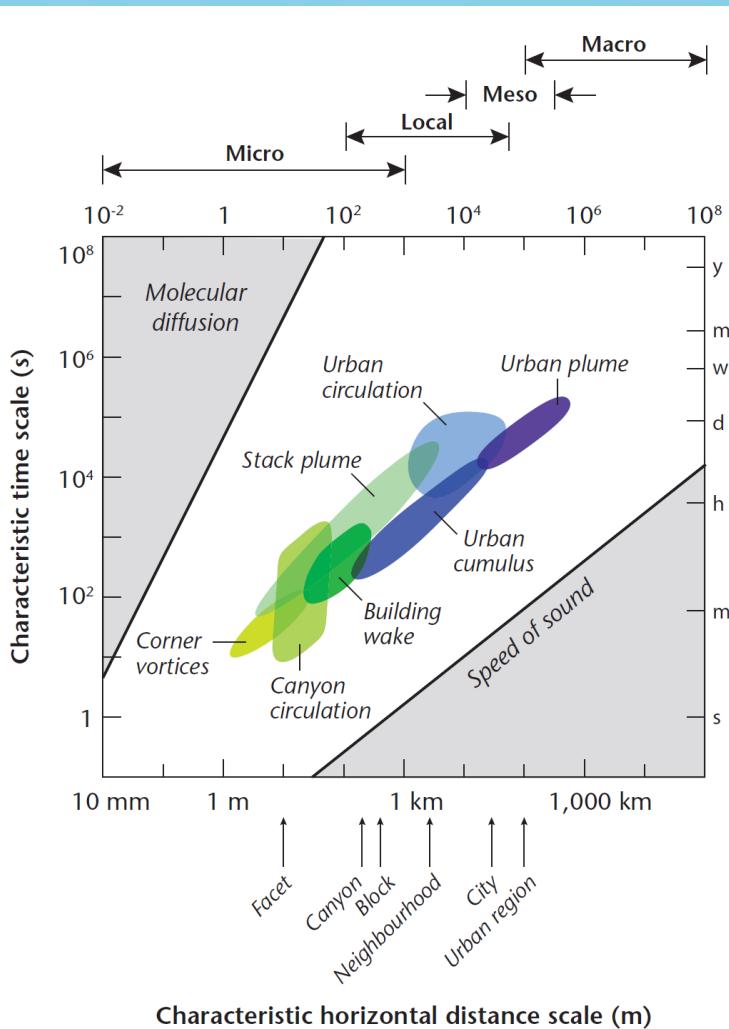
- Влияние на облачность, осадки и ОЯ
- Влияние на термический комфорт
- ...



## Проблемы и вызовы?

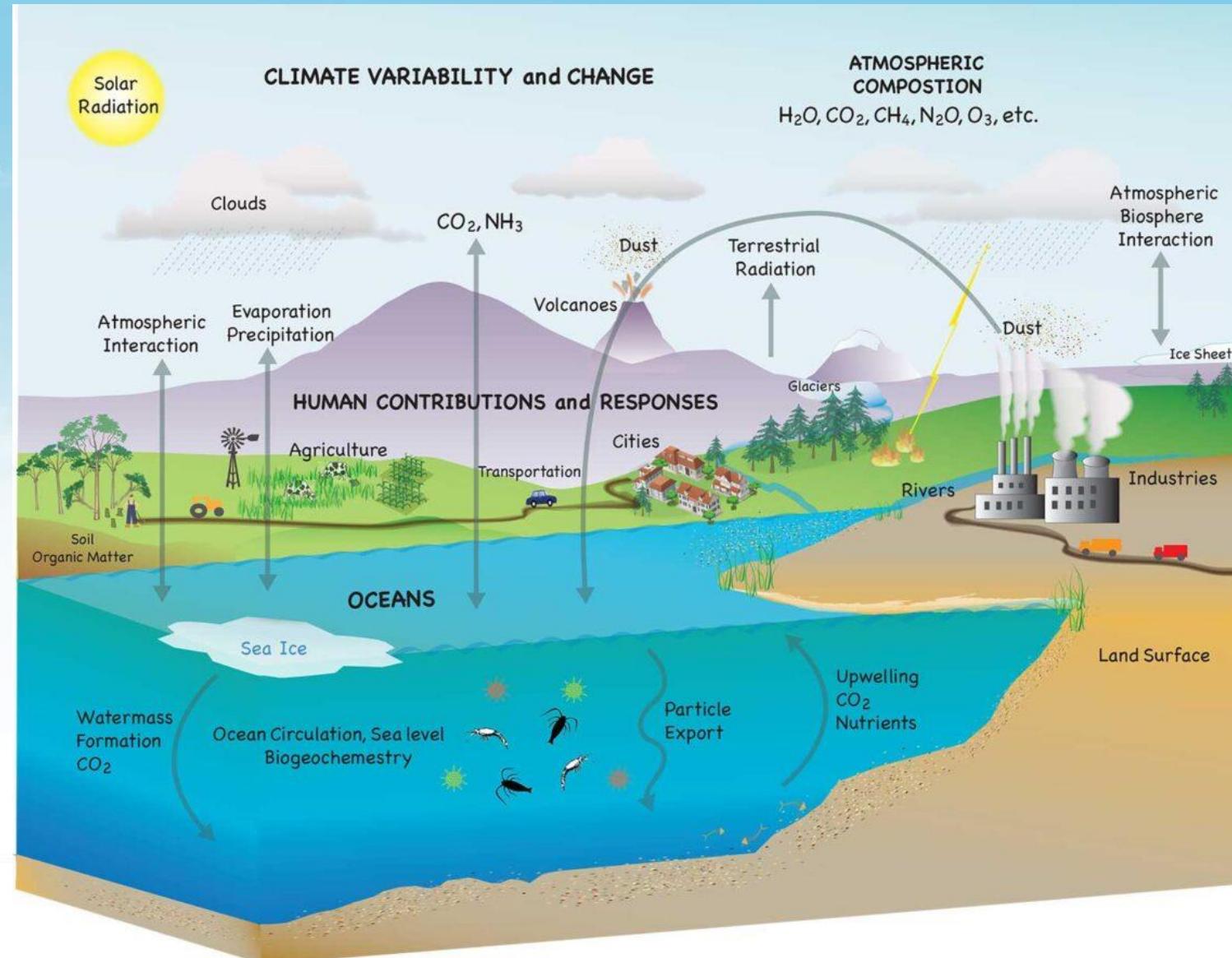


# Масштабы атмосферных процессов



# **Модели погоды и климата**

# Какие процессы нужно учитывать?



# Уравнения динамики атмосферы

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_w \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

Conservation of energy:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_v \nabla T) + C + S$$

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

Conservation of H<sub>2</sub>O (vapor, liquid, solid):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E$$

Equation of state:

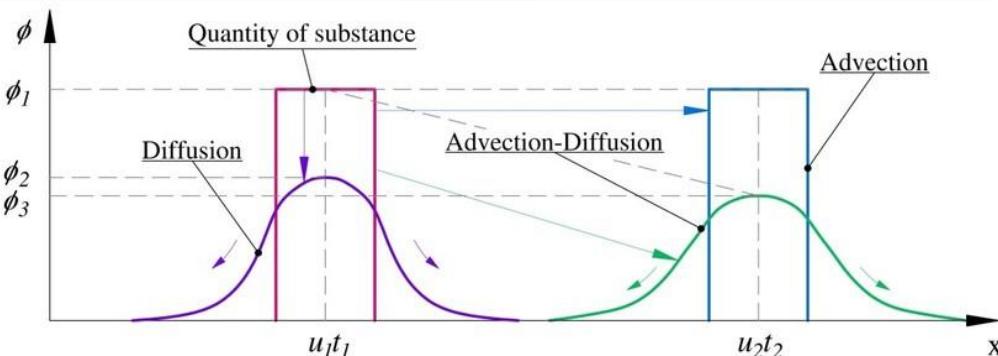
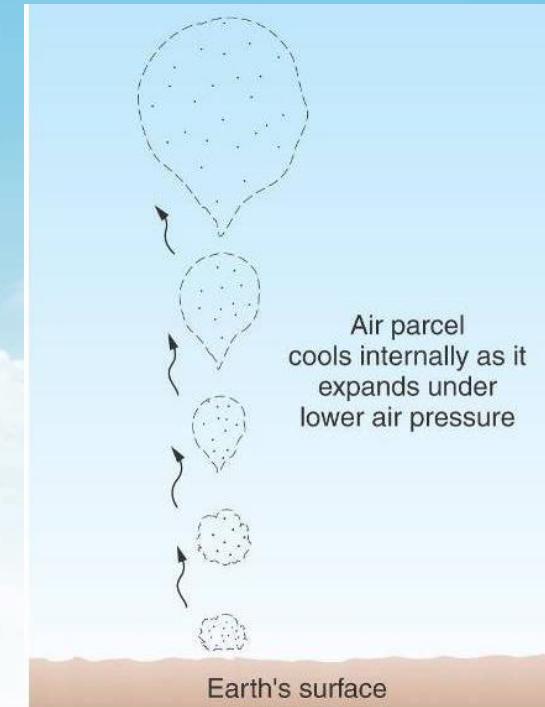
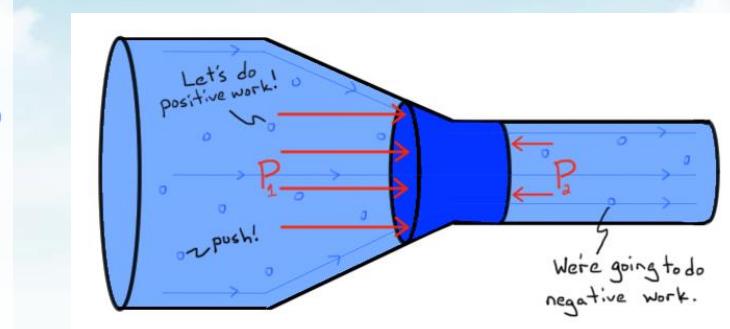
$$p = \rho R_d T$$

Уравнения Навье — Стокса — система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости.

V = velocity  
T = temperature  
p = pressure  
ρ = density  
q = specific humidity  
g = gravity  
Ω = rotation of earth  
F<sub>d</sub> = drag force of earth  
R = radiation vector  
C = conductive heating  
c<sub>p</sub> = heat capacity, const. p  
E = evaporation  
S = latent heating  
S<sub>q</sub> = phase-change source  
k = diffusion coefficients  
R<sub>d</sub> = dry air gas constant

Что описывают эти уравнения?

- Движения сжимаемой жидкости в поле давления
- Адиабатические процессы
- Адvection и диффузию

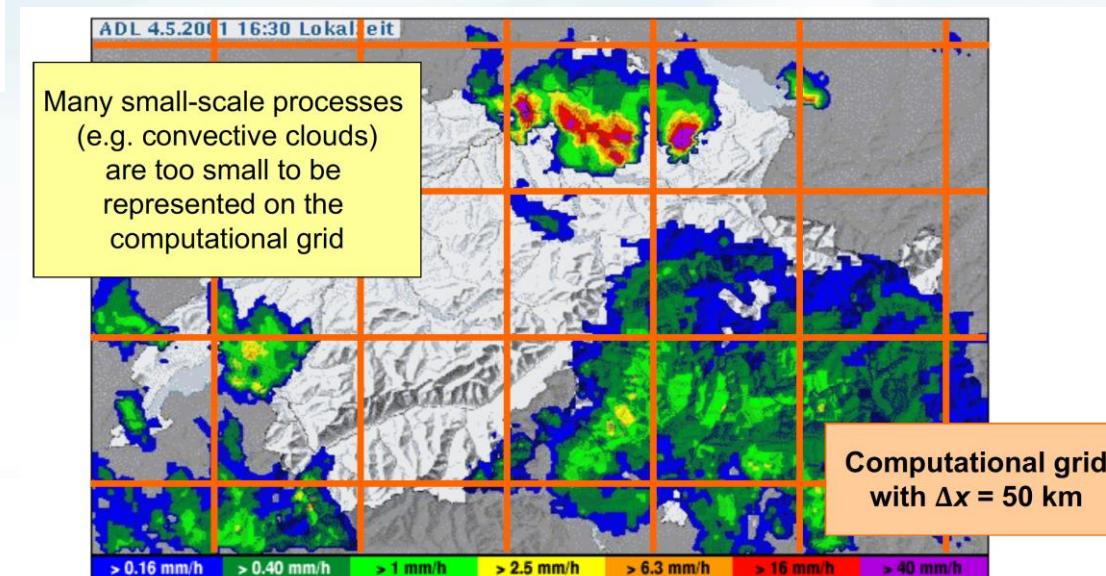
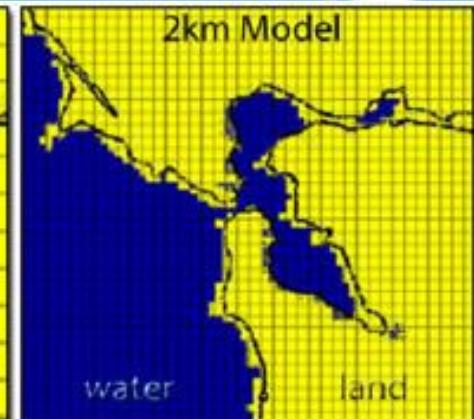
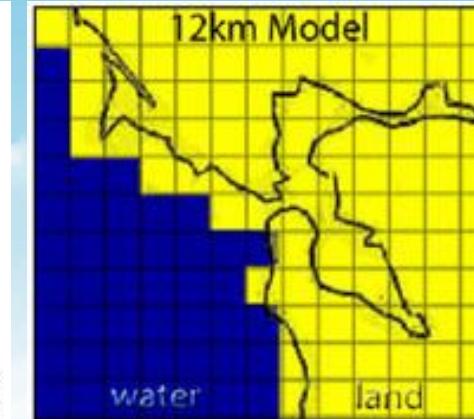
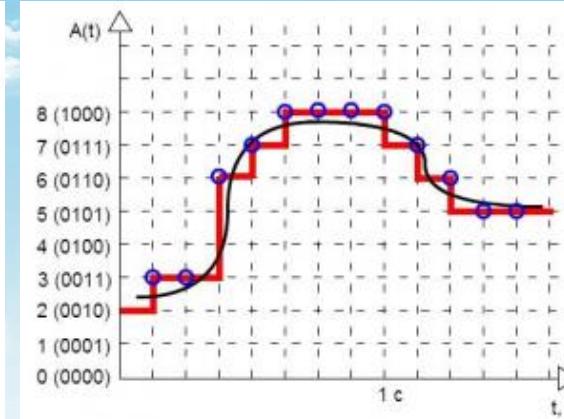
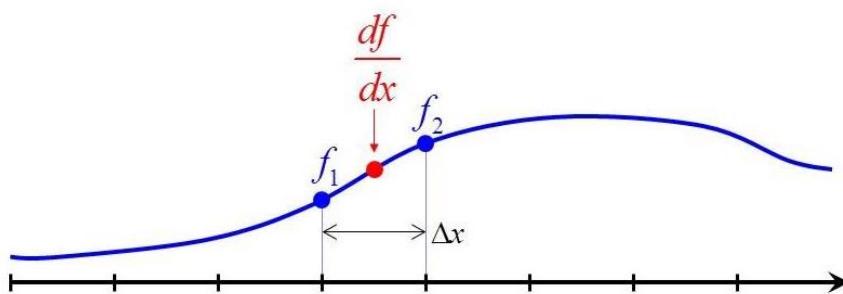


# Численные методы

Конечно-разностная  
аппроксимация производных

$$\frac{df_{1.5}}{dx} \approx \frac{f_2 - f_1}{\Delta x}$$

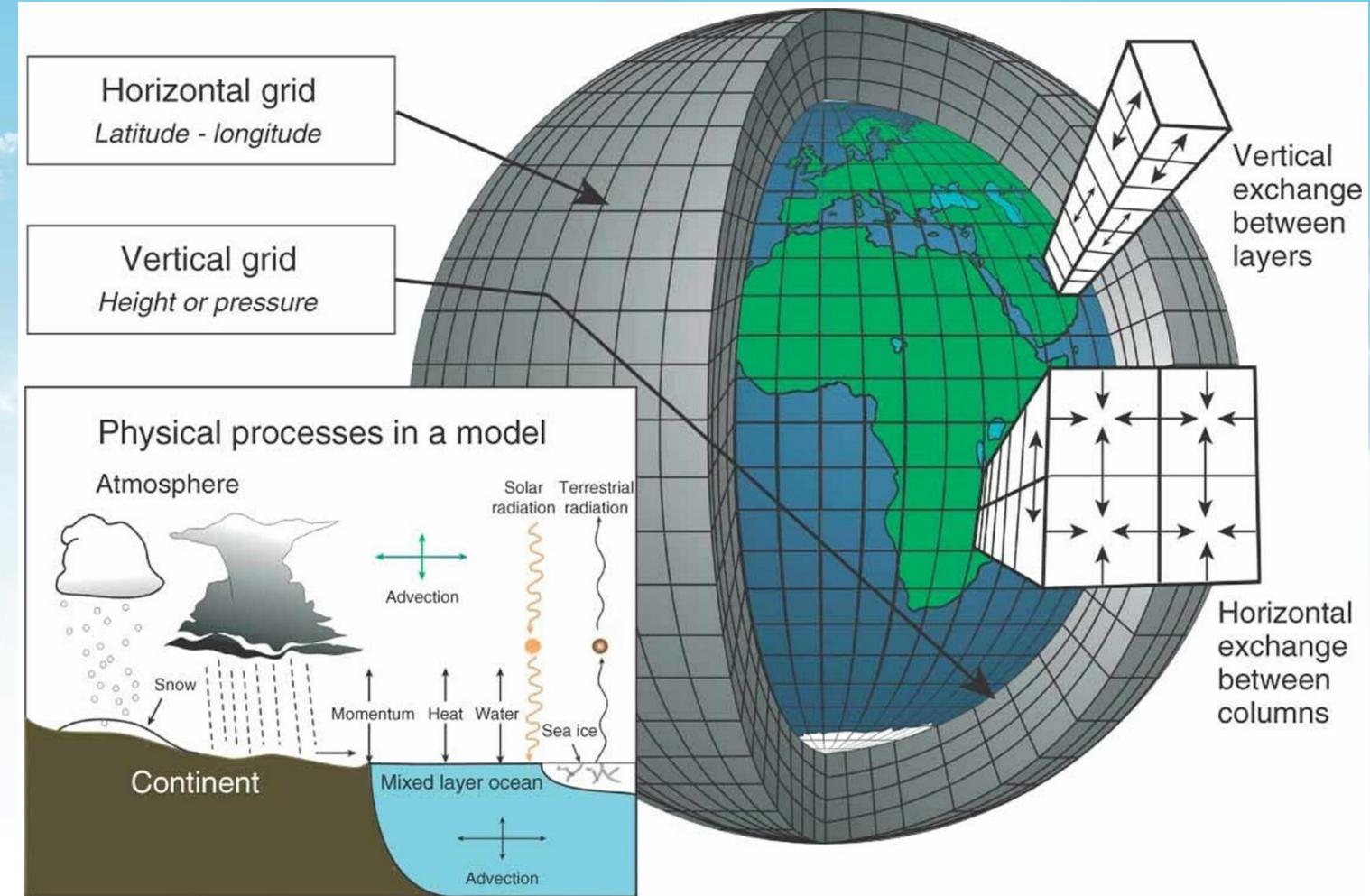
second-order accurate  
first-order derivative



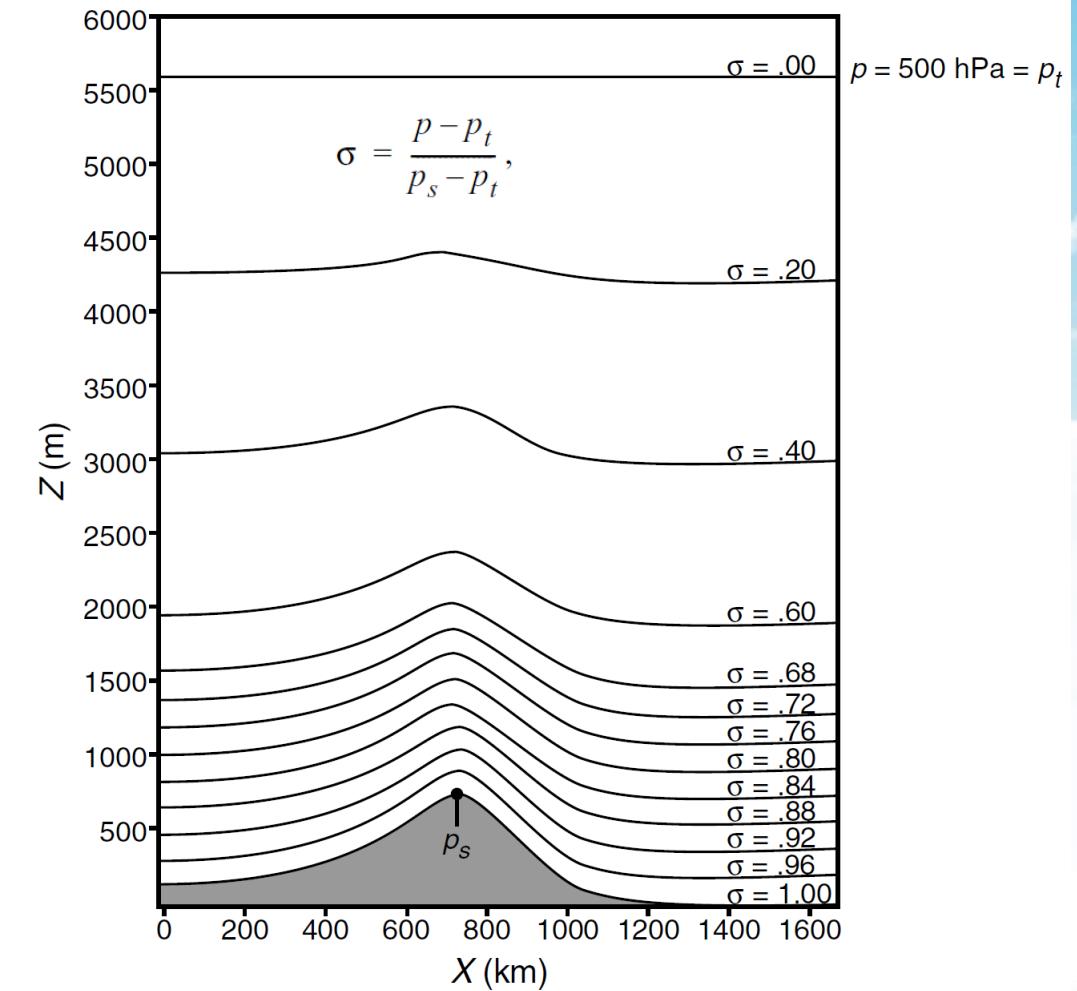
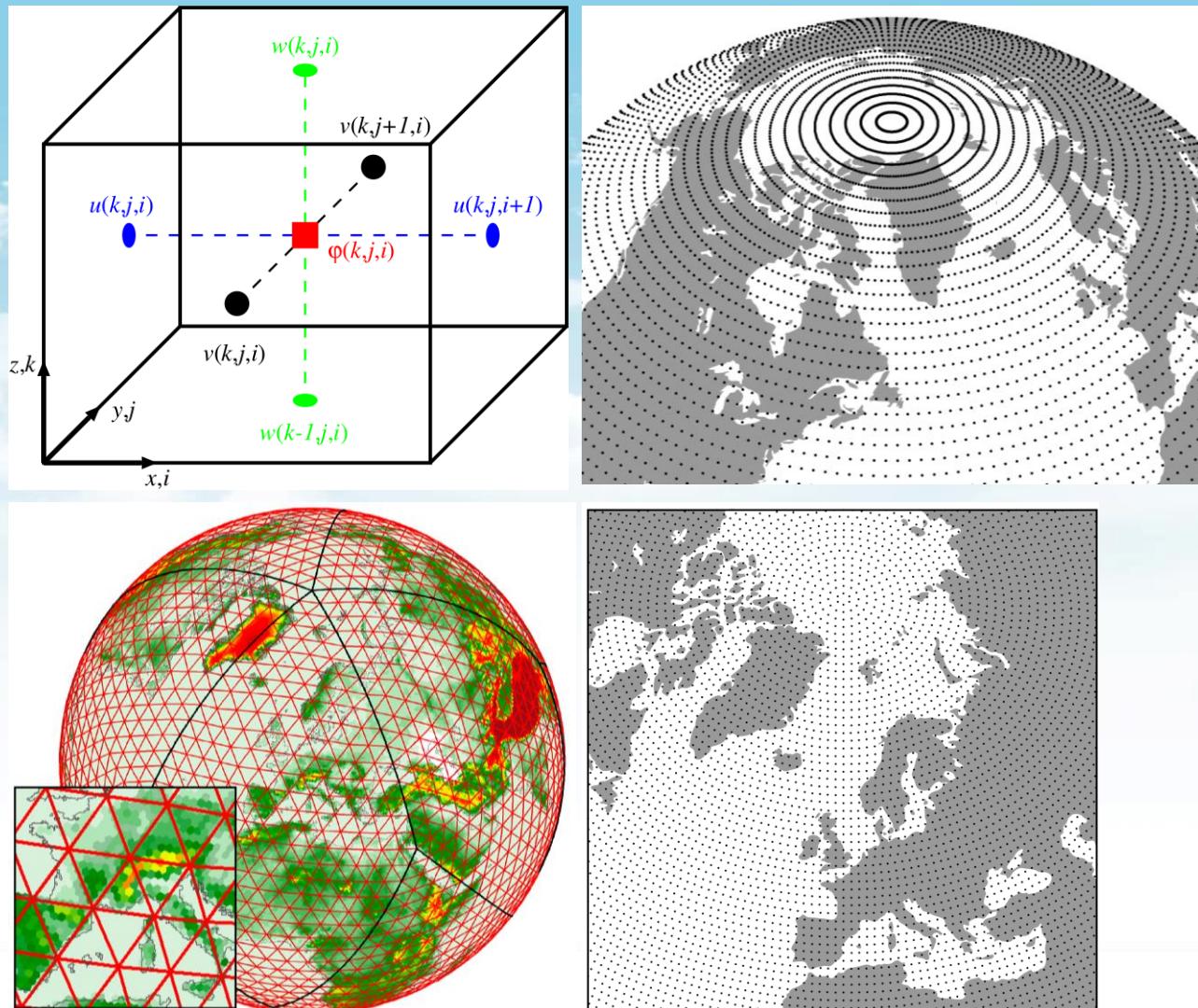
# Численные модели погоды и климата

## Ключевые характеристики моделей

- **Разрешение модели**
  - Горизонтальный шаг сетки  $\Delta x$
  - Масштаб воспроизводимых процессов  $\approx 8 \Delta x$ , макро-, -мезо и микромасштабные модели
- **Допущение гидростатики (да/нет):**  
$$\cancel{\frac{dw}{dt}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \cancel{F_z}$$
- **Описание турбулентности:**
  - Осреднение по Рейнольдсу (RANS)
  - Large Eddy Simulations (LES)
  - Direct Numerical Simulations (DNS)
- **Охват по пространству:**  
глобальные/региональные
- **Система координат**
- **Тип горизонтальной сетки**
- **Тип вертикальной сетки**
- **Набор описываемых процессов**
  - Модели атмосферы,
  - Модели климата
  - Модели Земной системы



# Сетки моделей

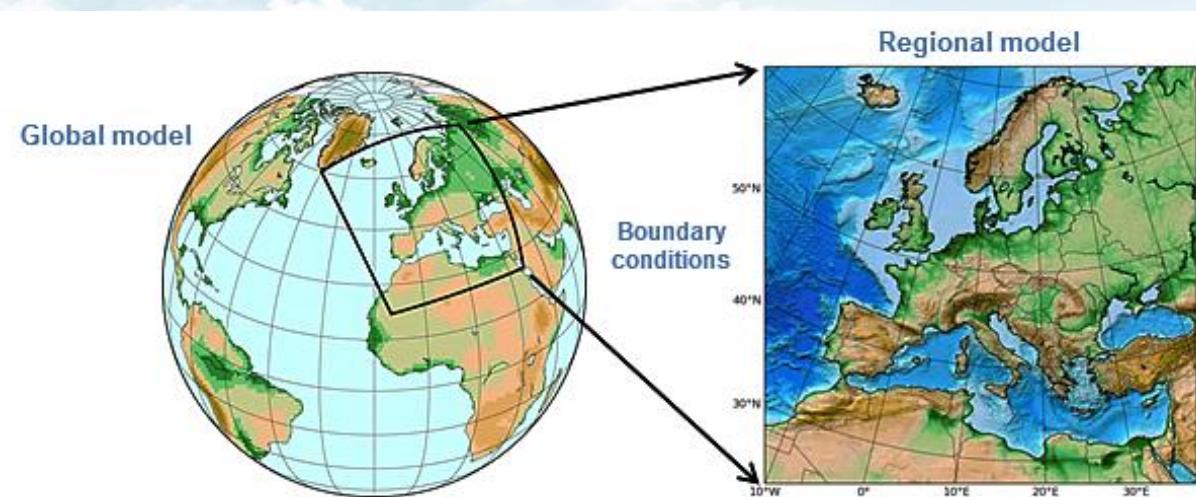


# Иерархия моделей атмосферы

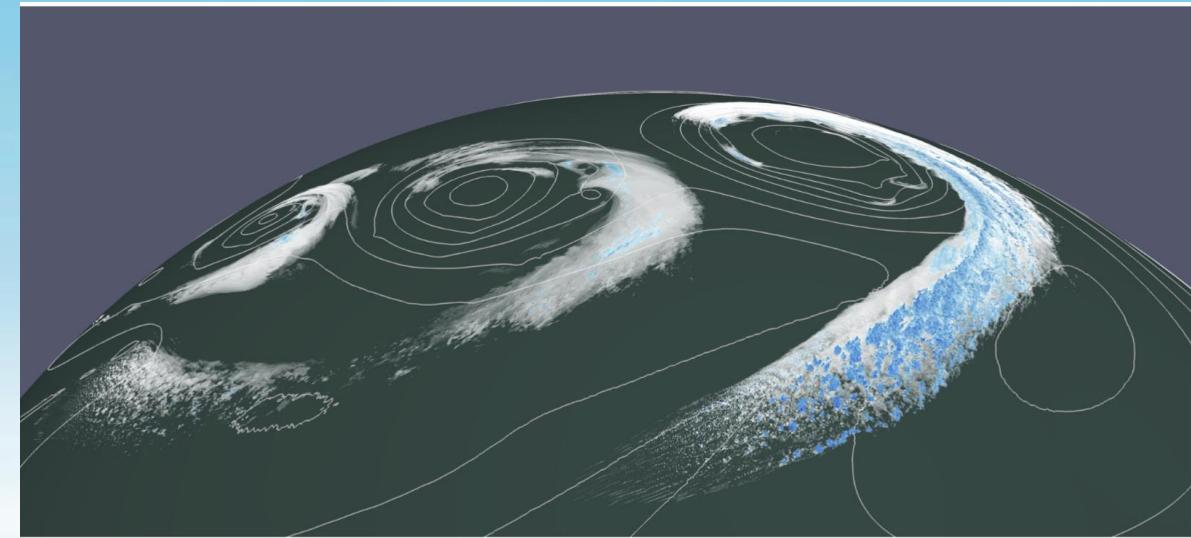
Глобальные модели

Региональные\* мезомасштабные модели

Микромасштабные модели (LES/DNS/RANS)



Концепция динамического даунскейлинга

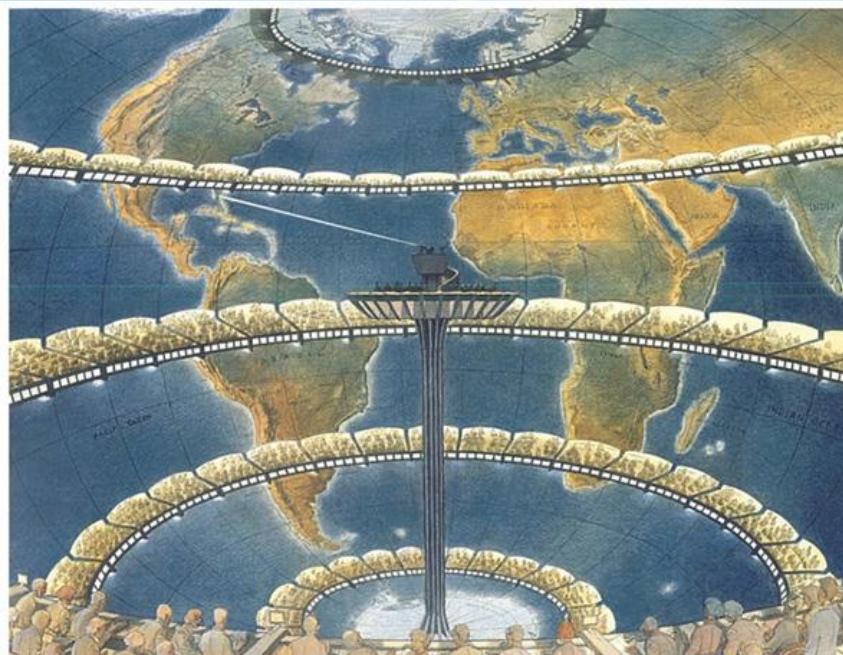


Führer, O. et al. (2018). Near-global climate simulation at 1km resolution: establishing a performance baseline on 4888 GPUs with COSMO 5.0. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1665–1681.

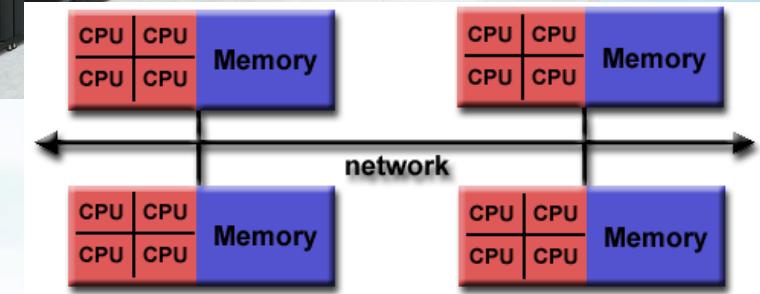
# Вопрос вычислительных ресурсов

Пример:

- Шаг сетки по горизонтали  $\approx 0.5^\circ$  (55 км), т.е. 720x360 узлов
- 40 вертикальных уровней
- Шаг по времени 120 секунд
- Для каждого узла нужно 100 элементарных операций, чтобы перейти на следующий шаг по времени
- Прогноз на 1 день: 740 миллиарда операций!



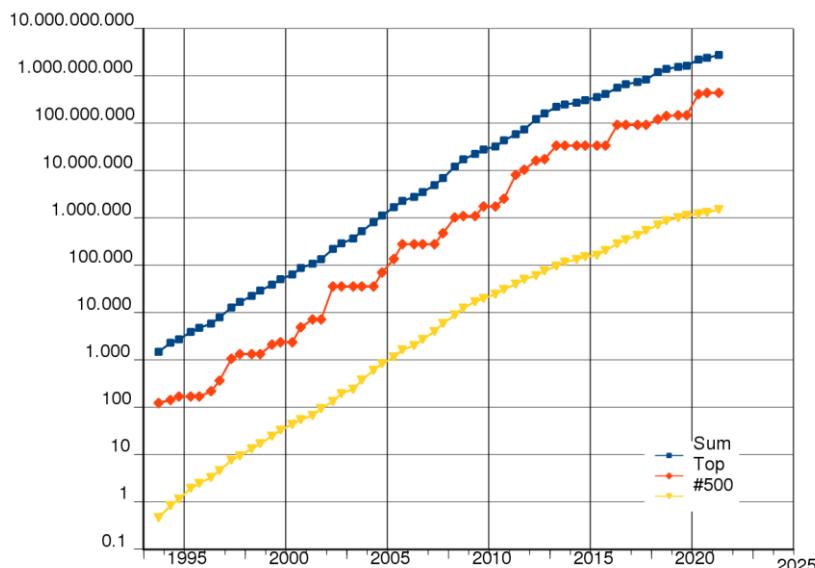
Льюис Фрай Ричардсон и его «фабрика прогнозов»



Распаралеливание MPI  
в современных суперкомпьютерах

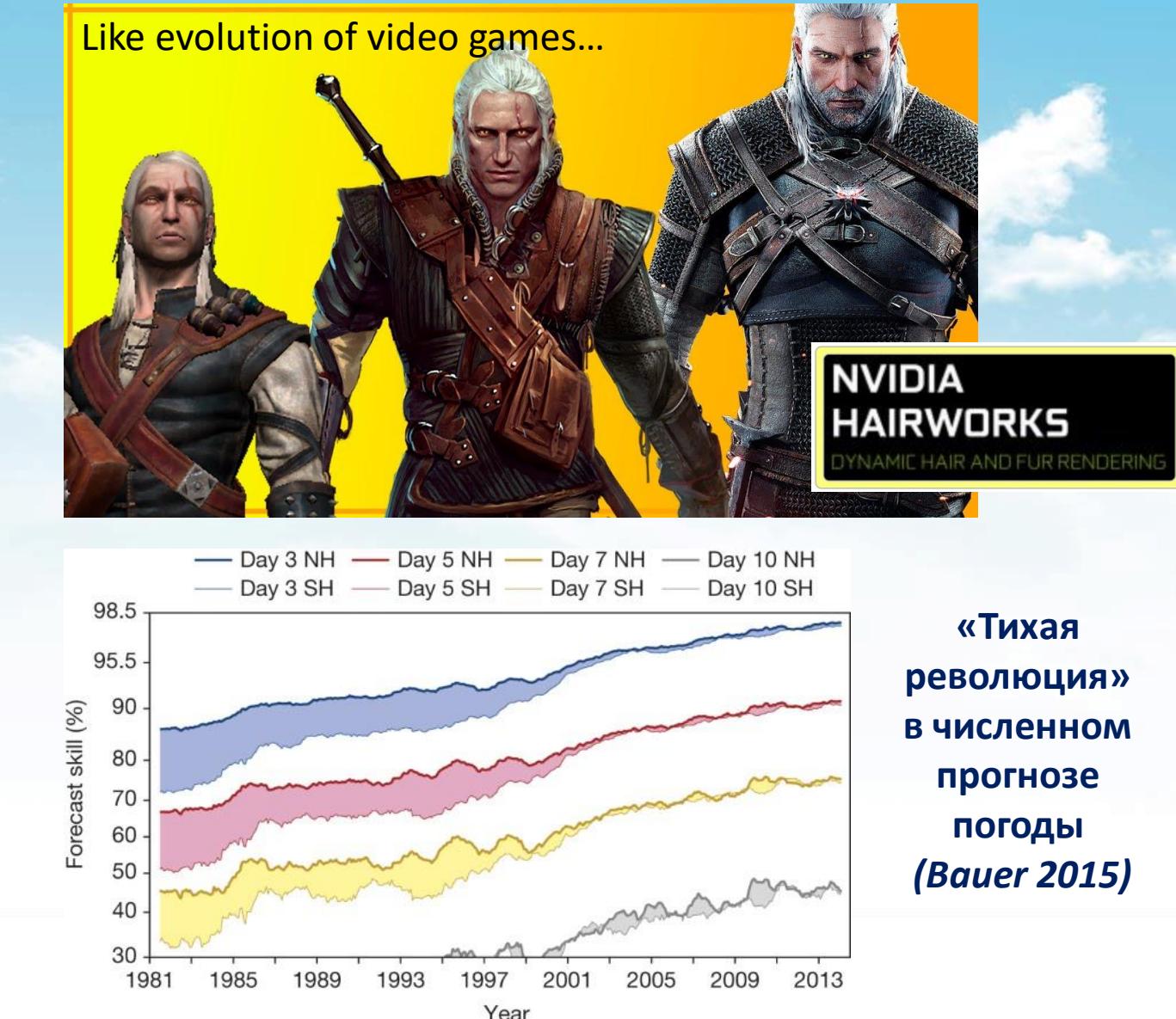
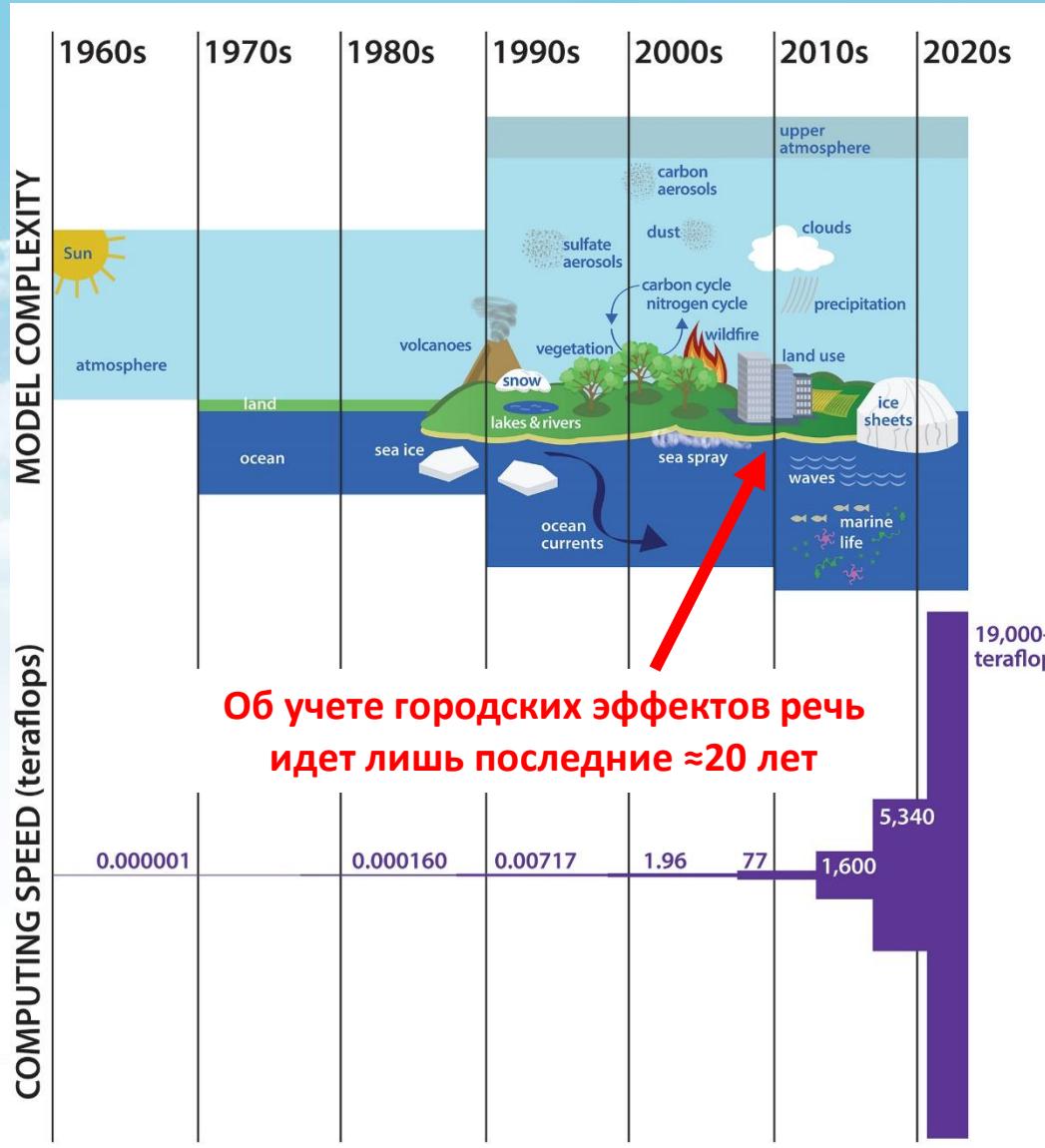
# Суперкомпьютеры для суперпрогнозов

- ❑ Рейтинг Top-500 суперкомпьютеров (<https://www.top500.org/>)
- ❑ Производительность измеряется в флопсах (флоп/с)
- ❑ Рекорд – 442 петафлопса
- ❑ Персоналка с Core i7: ≈250 гигафлопс
- ❑ Значительную долю в рейтинге занимают суперкомпьютеры метеослужб

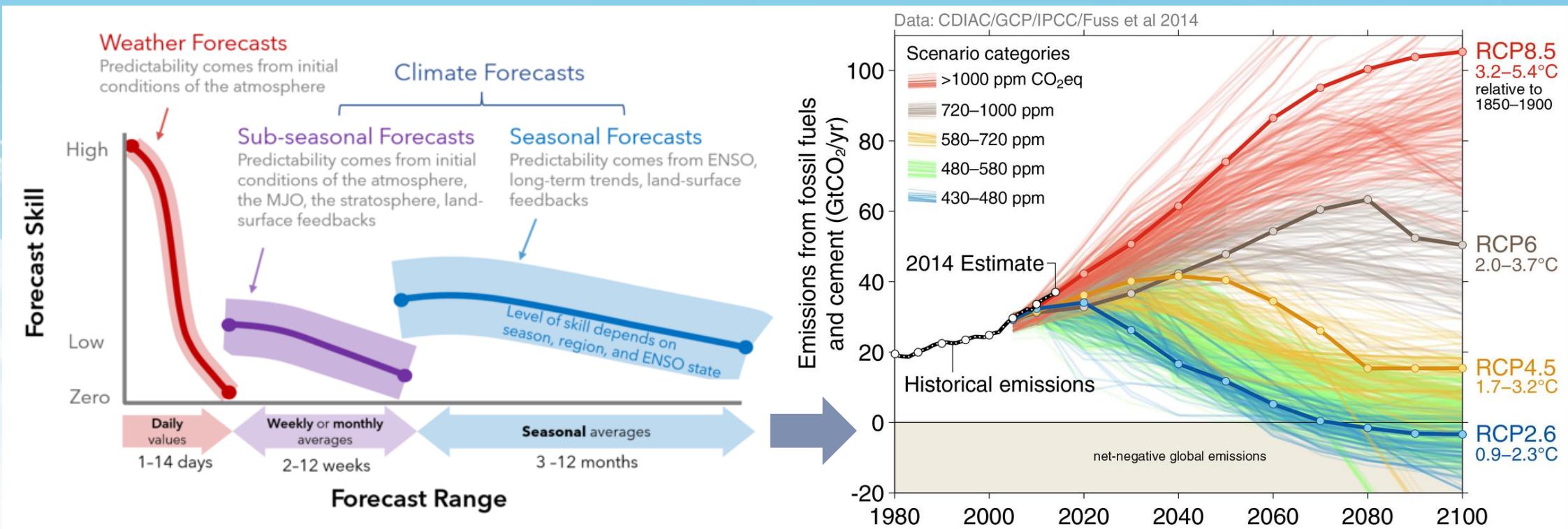


Rank	System	Cores	Rmax [TFlop/s]	Rpeak [TFlop/s]	Power (kW)
1	<b>Supercomputer Fugaku</b> - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	<b>Summit</b> - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	<b>Sierra</b> - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
23	<b>Maru</b> - ThinkSystem SD650 V2, Xeon Platinum 8368Q 38C 2.6GHz, Infiniband HDR, Lenovo Korean Meteorological Administration South Korea	306,432	16,753.0	25,495.1	15,414
49	<b>Taranis</b> - Bull Sequana XH2000 , AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, Mellanox InfiniBand HDR100, Atos Meteo France France	294,912	8,191.0	10,321.9	1,672
58	<b>Cray XC40</b> , Xeon E5-2695v4 18C 2.1GHz, Aries interconnect , Cray/HPE United Kingdom Meteorological Office United Kingdom	241,920	7,038.9	8,128.5	
61	<b>Christofari</b> - NVIDIA DGX-2, Xeon Platinum 8168 24C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand EDR, NVIDIA Tesla V100, Nvidia SberCloud Russia	99,600	6,669.0	8,789.8	
199	<b>Lomonosov 2</b> - T-Platform A-Class Cluster, Xeon E5-2697v3 14C 2.6GHz, Intel Xeon Gold 6126, Infiniband FDR, Nvidia K40m/P-100, T-Platforms Moscow State University - Research Computing Center Russia	64,384	2,478.0	4,946.8	

# Эволюция моделей атмосферы



# Применение моделей атмосферы



## Numerical Models

Hindcasting Nowcasting Forecasting

Past Present Future

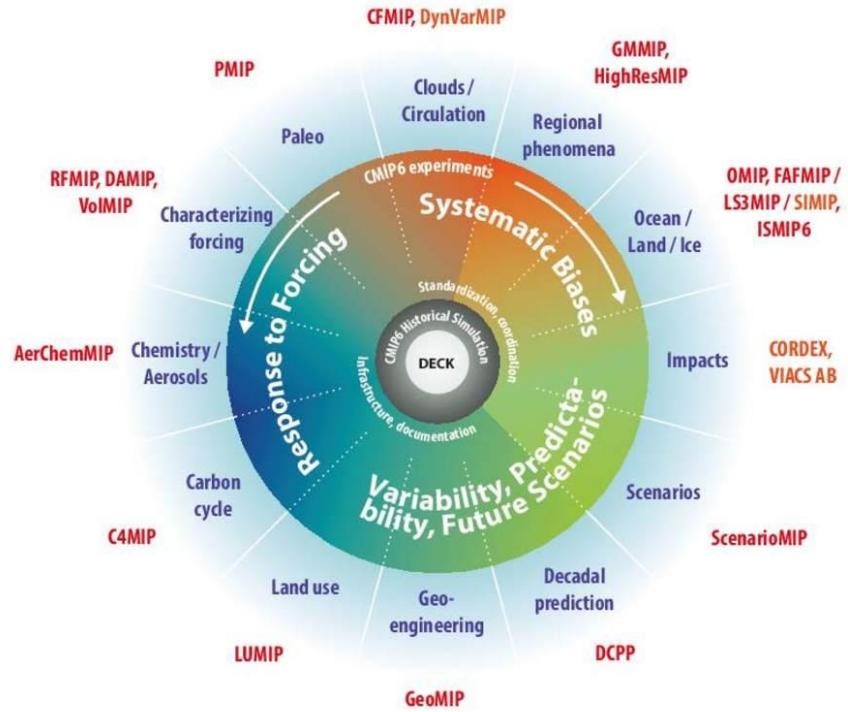
Data Assimilation = Model + Observations

Re-Analysis Analysis

Past Present

# Моделирование климата

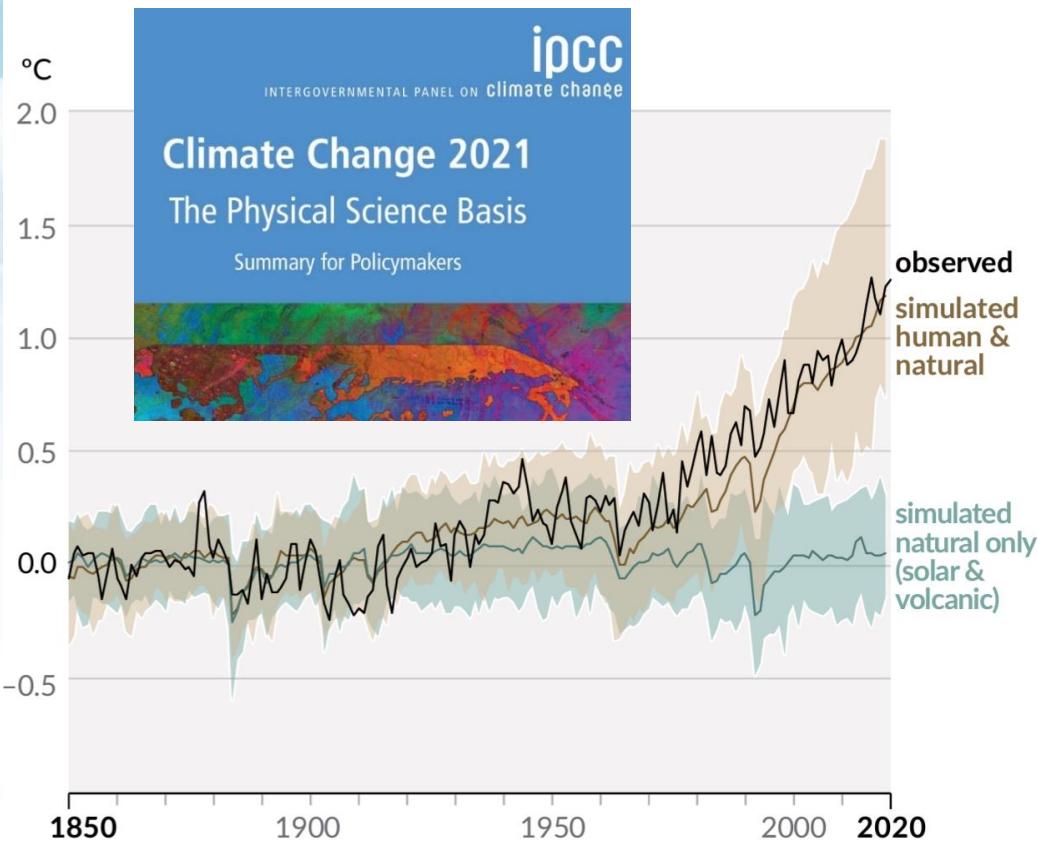
Международный проекта сравнения  
объединенных моделей (Coupled Model  
Intercomparison Project, CMIP6)  
<https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/>



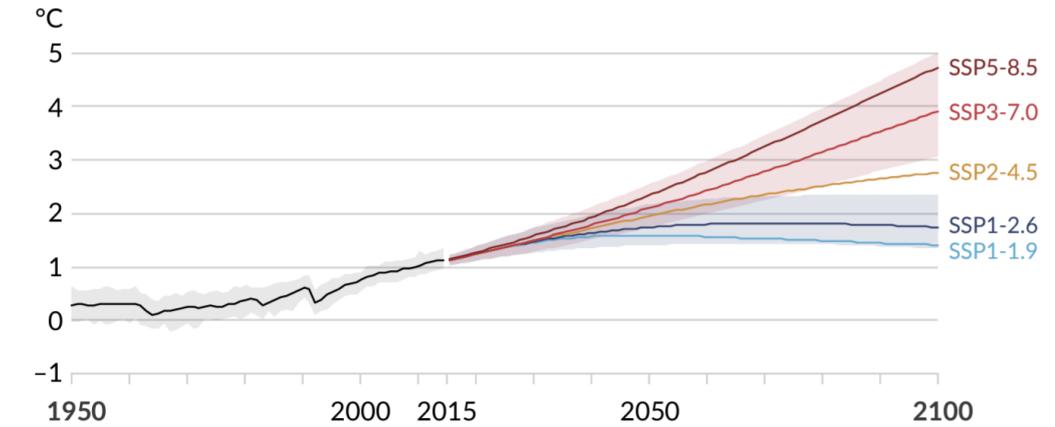
No	CMIP6 model name	Country	Horizontal resolution (lon. by lat. in degree)	Variant label	Key references
1	ACCESS-CM2	Australia	$1.9^\circ \times 1.3^\circ$	r1i1p1f1	Bi et al. (2012)
2	ACCESS-ESM1-5	Australia	$1.9^\circ \times 1.2^\circ$	r1i1p1f1	Law et al. (2017)
3	AWI-CM-1-1-MR	Germany	$0.9^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Semmler et al. (2020, in review)
4	BCC-CSM2-MR	China	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$	r1i1p1f1	Wu et al. (2019)
5	CAMS-CSM1-0	China	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$	r1i1p1f1	Rong et al (2019)
6	CanESM5	Canada	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	r1i1p1f1	Swart et al (2019)
7	CESM2	USA	$1.3^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Lauritzen et al (2018)
8	CESM2-WACCM	USA	$1.3^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Liu et al (2019)
8	CIESM	China	$0.9^\circ \times 1.3^\circ$	r1i1p1f1	Lin et al. (2020)
10	CNRM-CM6-1	France	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	r1i1p1f2	Volodire et al (2019)
11	CNRM-CM6-1-HR	France	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	r1i1p1f2	Volodire et al (2019)
12	CNRM-ESM2-1	France	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	r1i1p1f2	Séférian et al (2019)
13	EC-Earth3	Europe	$0.7^\circ \times 0.7^\circ$	r1i1p1f1	Massonnet et al. (2020)
14	EC-Earth3-Veg	Europe	$0.7^\circ \times 0.7^\circ$	r1i1p1f1	Not available
15	FGOALS-f3-L	China	$1.3^\circ \times 1^\circ$	r1i1p1f1	He et al (2019)
16	FGOALS-g3	China	$2^\circ \times 2.3^\circ$	r1i1p1f1	Not available
17	FIO-ESM-2-0	China	$1.3^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Song et al. (2020)
18	GFDD-ESM4	USA	$1.3^\circ \times 1^\circ$	r1i1p1f1	Held et al (2019)
19	INM-CM4-8	Russia	$2^\circ \times 1.5^\circ$	r1i1p1f1	Volodin et al. (2018)
20	INM-CM5-0	Russia	$2^\circ \times 1.5^\circ$	r1i1p1f1	Volodin et al. (2018)
21	IPSL-CM6A-LR	France	$2.5^\circ \times 1.3^\circ$	r1i1p1f1	Not available
22	KACE-1-0-G	South Korea	$1.3^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Not available
23	MIROC6	Japan	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	r1i1p1f1	Tatebe et al (2019)
24	MIROC-ES2L	Japan	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	r1i1p1f2	Hajima et al (2019)
25	MPI-ESM1-2-HR	Germany	$0.9^\circ \times 0.9^\circ$	r1i1p1f1	Gutjahr et al (2019)
26	MPI-ESM1-2-LR	Germany	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$	r1i1p1f1	Mauritsen et al. (2019)
27	MRI-ESM2-0	Japan	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$	r1i1p1f1	Yukimoto et al (2019)
28	NESM3	China	$1.9^\circ \times 1.9^\circ$	r1i1p1f1	Cao et al (2018)
29	NorESM2-LM	Norway	$2.5^\circ \times 1.9^\circ$	r1i1p1f1	Seland et al. (2020, in review)
30	NorESM2-MM	Norway	$0.9^\circ \times 1.3^\circ$	r1i1p1f1	Seland et al. (2020, in review)
31	UKESM1-0-LL	UK	$1.9^\circ \times 1.3^\circ$	r1i1p1f2	Sellar et al (2019)

# Моделирование климата

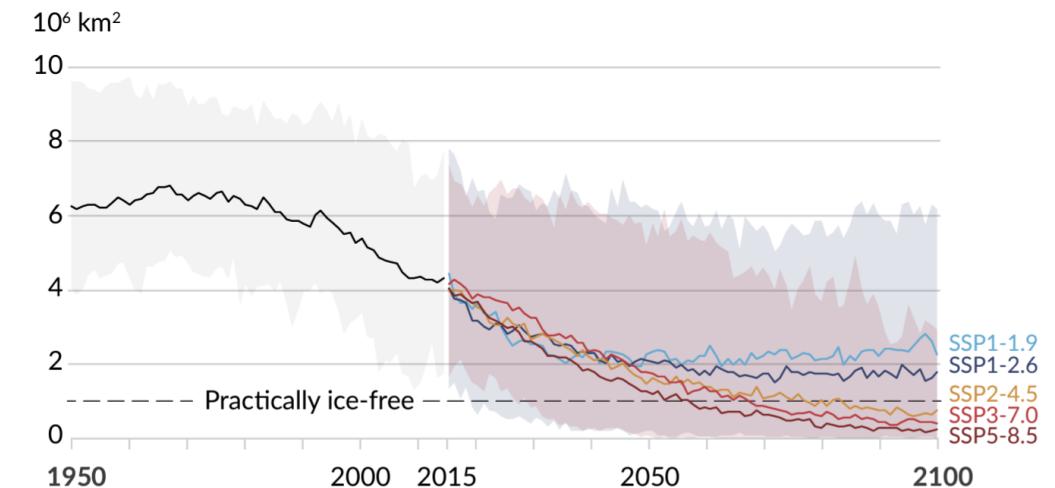
Межправительственная группа экспертов  
по изменению климата (МГЭИК),  
<https://www.ipcc.ch/>



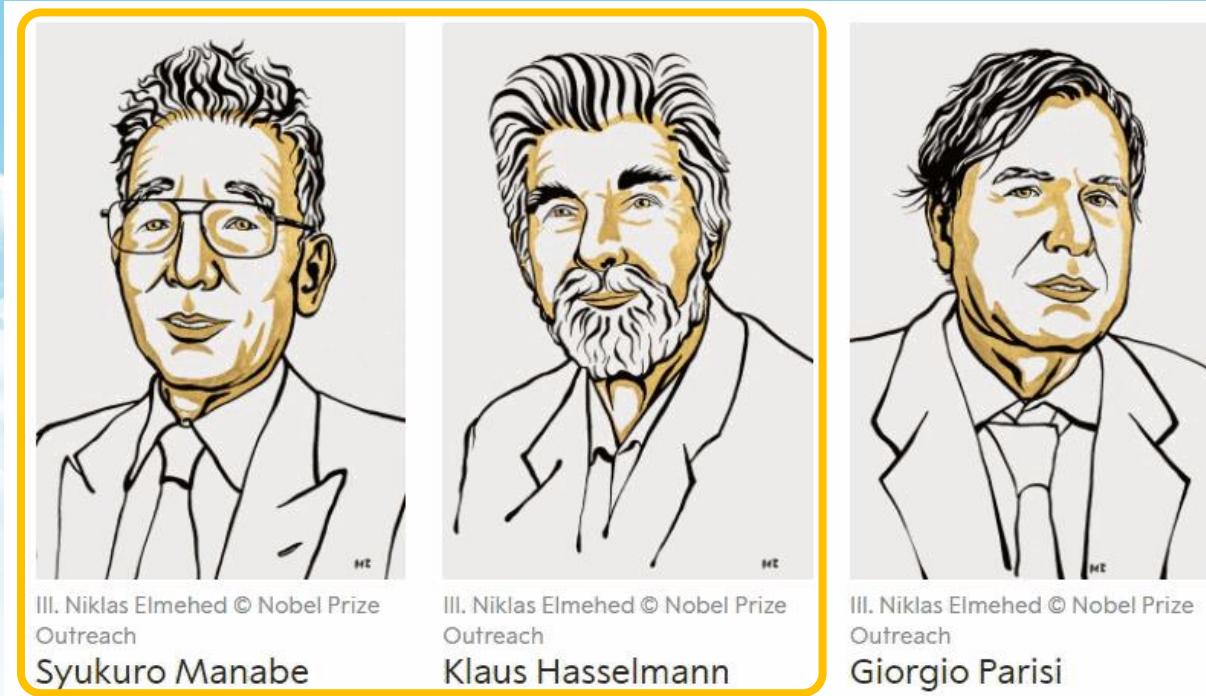
(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



(b) September Arctic sea ice area

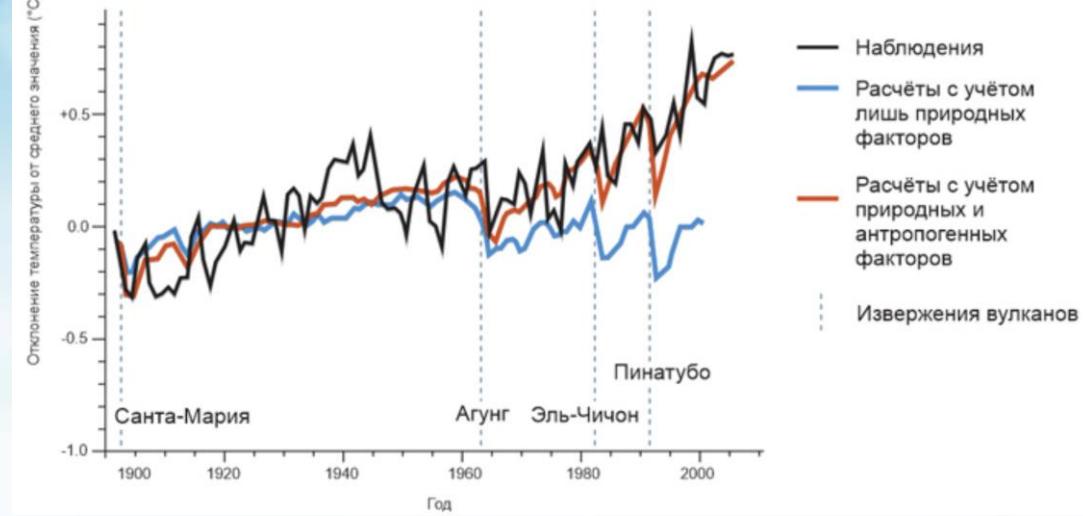


# Моделирование климата



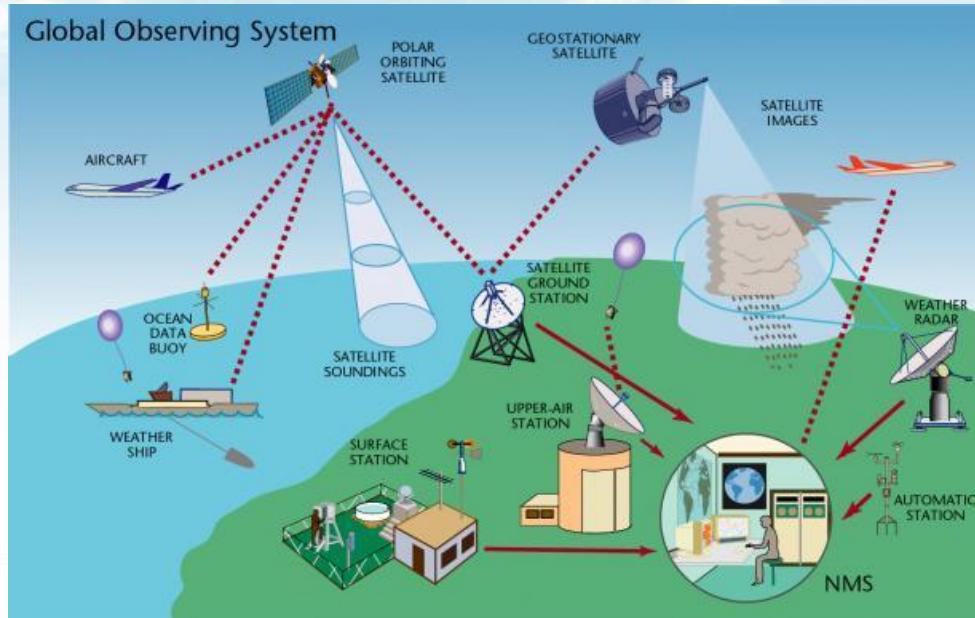
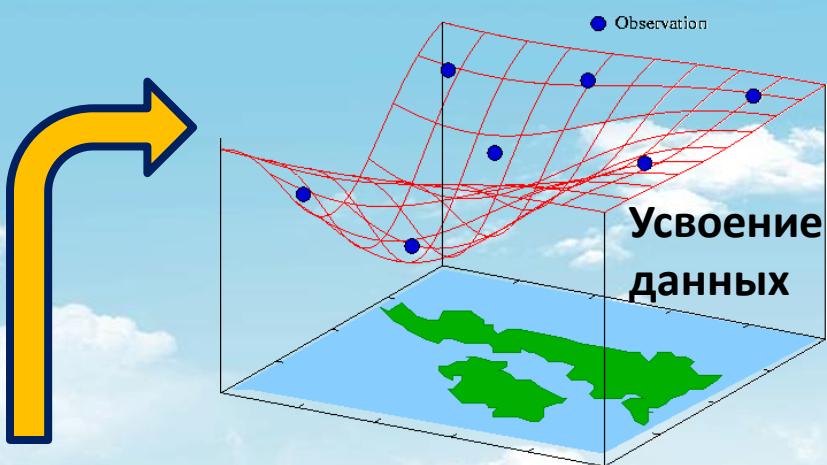
## Климатические отпечатки пальцев

Клаус Хассельман разработал метод, позволяющий различать вклады различных источников в температуру атмосферы. На графике показаны отличия от среднегодовой температуры относительно среднего значения за период 1901 - 1950 ( $^{\circ}\text{C}$ )



Нобелевская премия по физике 2021 «за моделирование физики климата Земли, математическое описание изменчивых систем и точное предсказание глобального потепления».

# Прогноз погоды



Глобальная система наблюдений

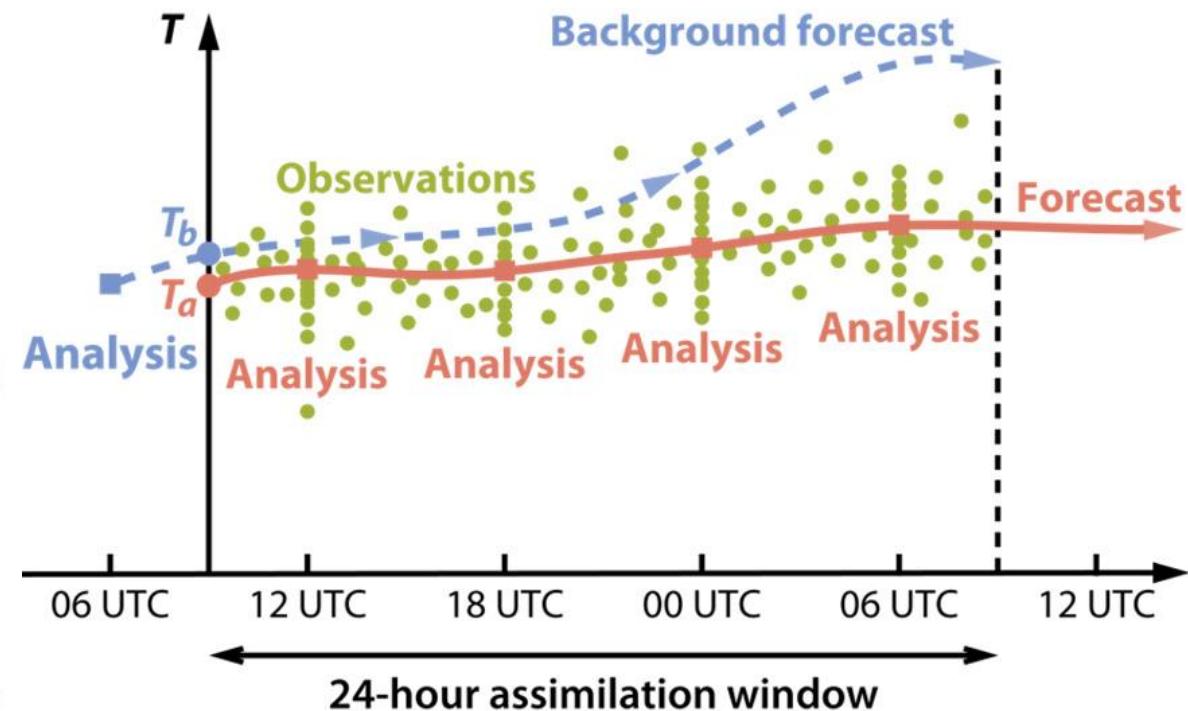
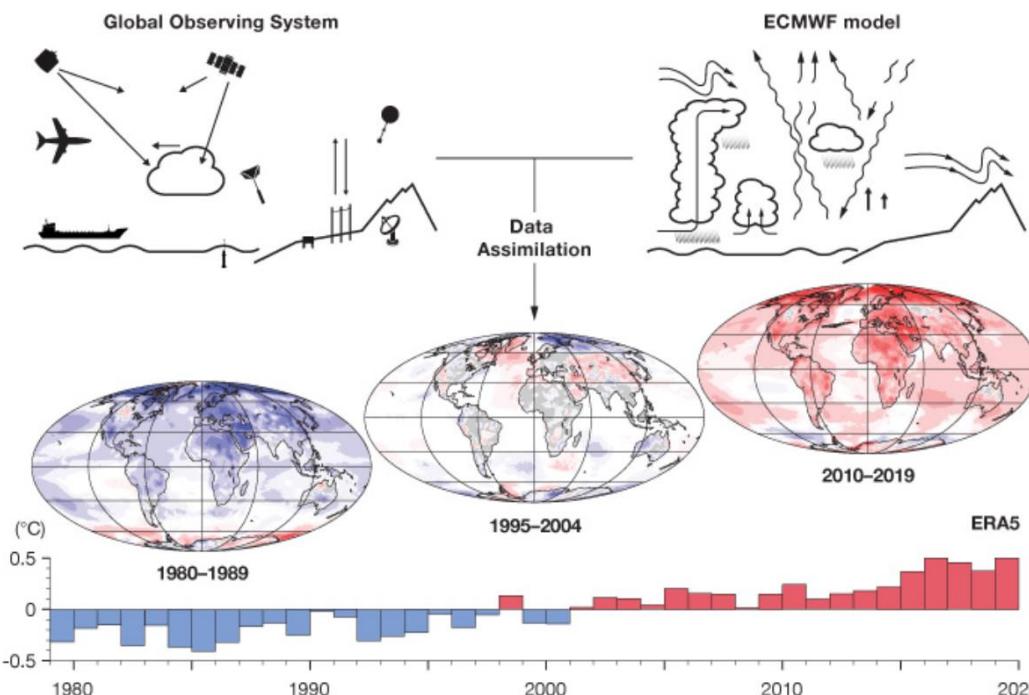
\* на самом деле нет (пока)

Прогноз-полуфабрикат

# Атмосферные реанализы

Реанализы – это динамически разглаженные и согласованные данные определенного набора архивных наблюдений, при помощи гидродинамической модели с фиксированной конфигурацией.

Реанализы это НЕ данные наблюдений, но и НЕ данные моделирования в чистом виде.



# Атмосферные реанализы

## Система усвоения данных на примере Гидрометцентра

Оперативный анализ.



# Атмосферные реанализы

## Система усвоения данных для создания реанализа



Используется самая современная (на момент создания реанализа) система усвоения данных, определяется набор усваиваемых данных наблюдений (без необходимости торопиться). «Замораживаем» полученную конфигурацию и ретроспективно восстанавливаем состояние атмосферы – поэтому **реанализ**.



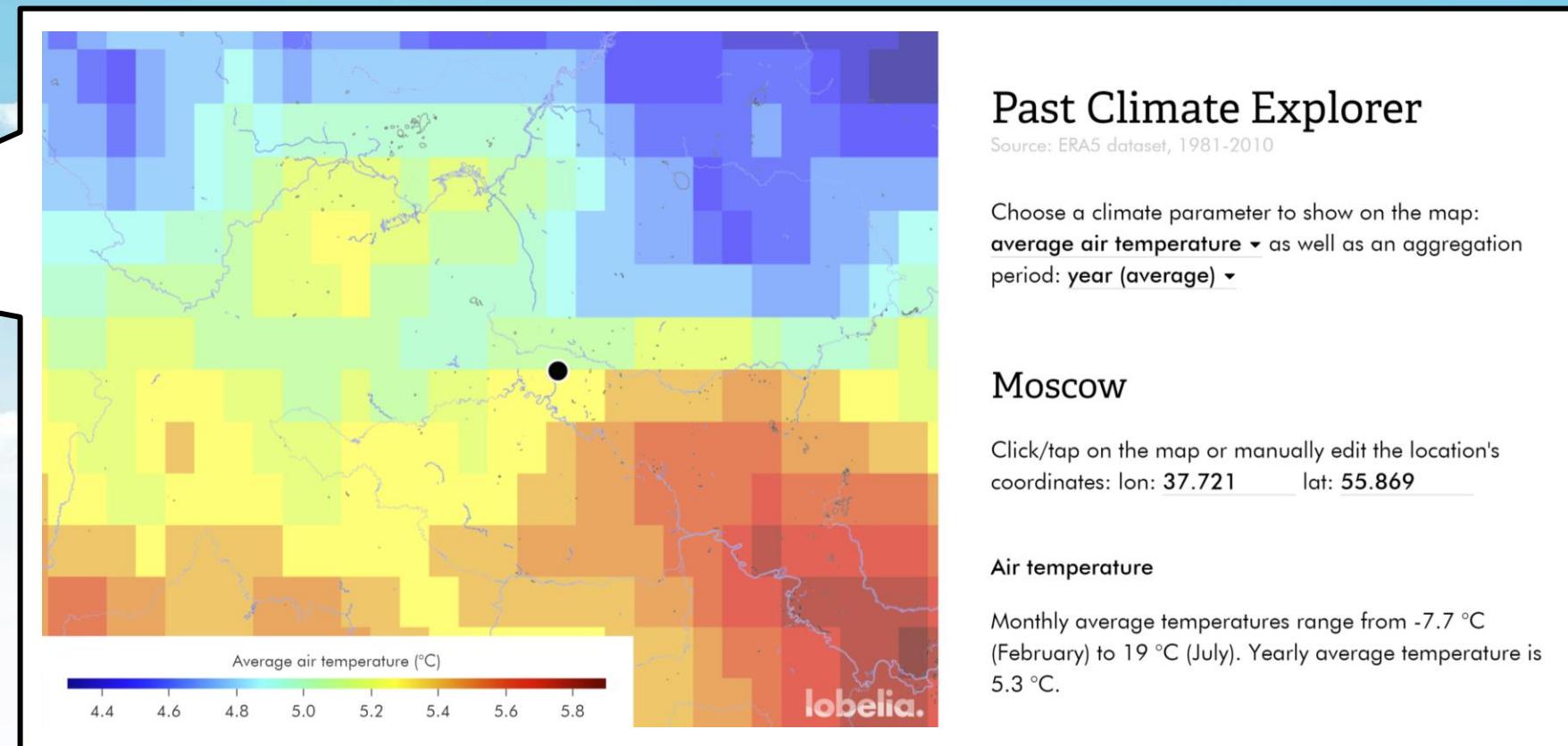
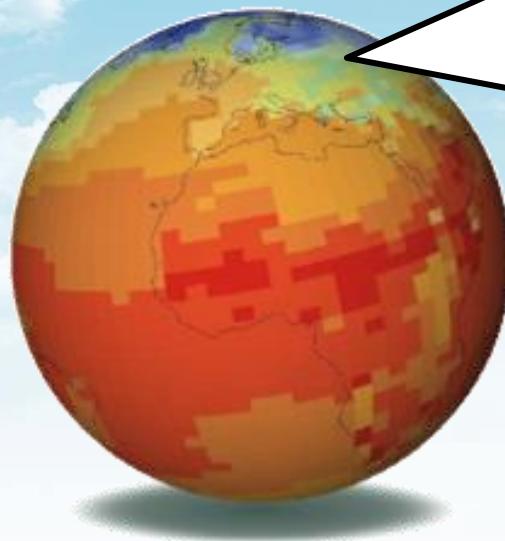
# Атмосферные реанализы



# Города в моделях погоды и климата

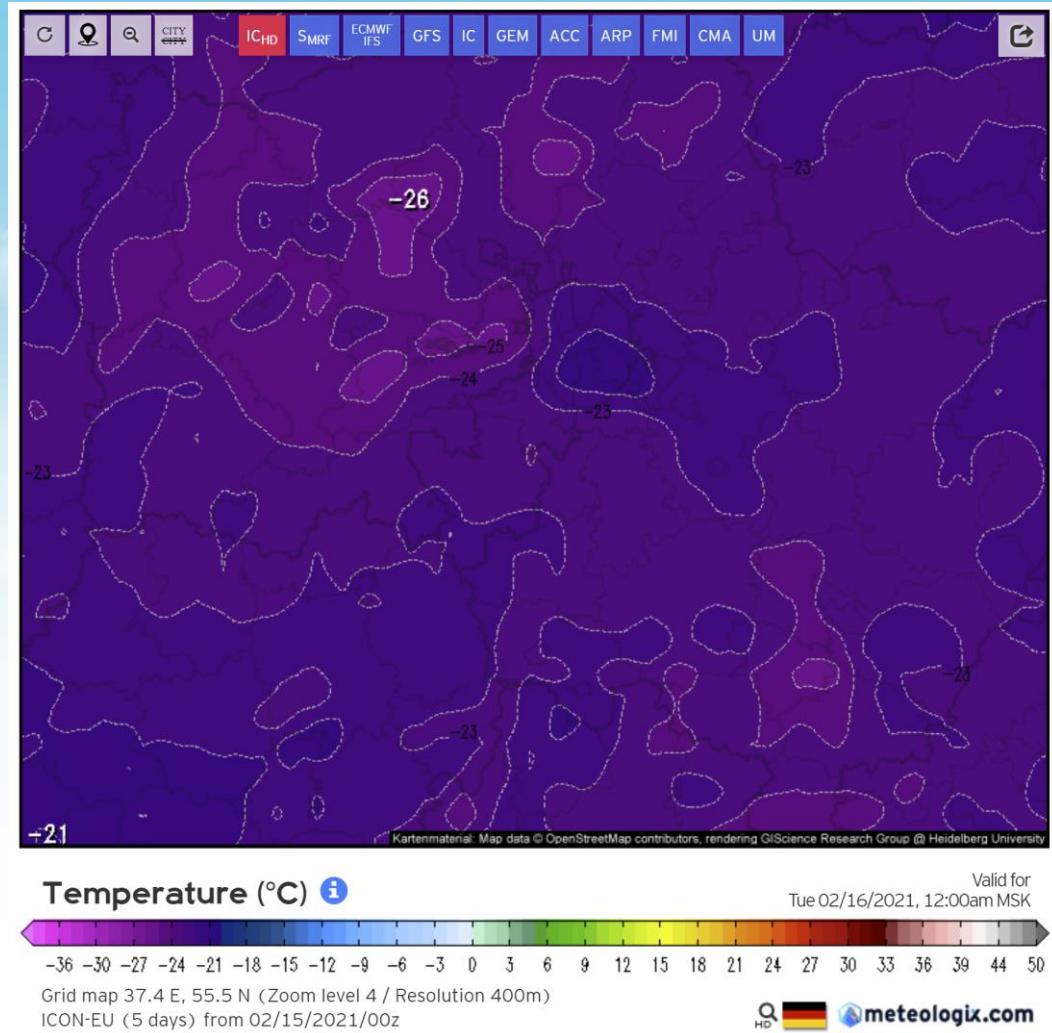
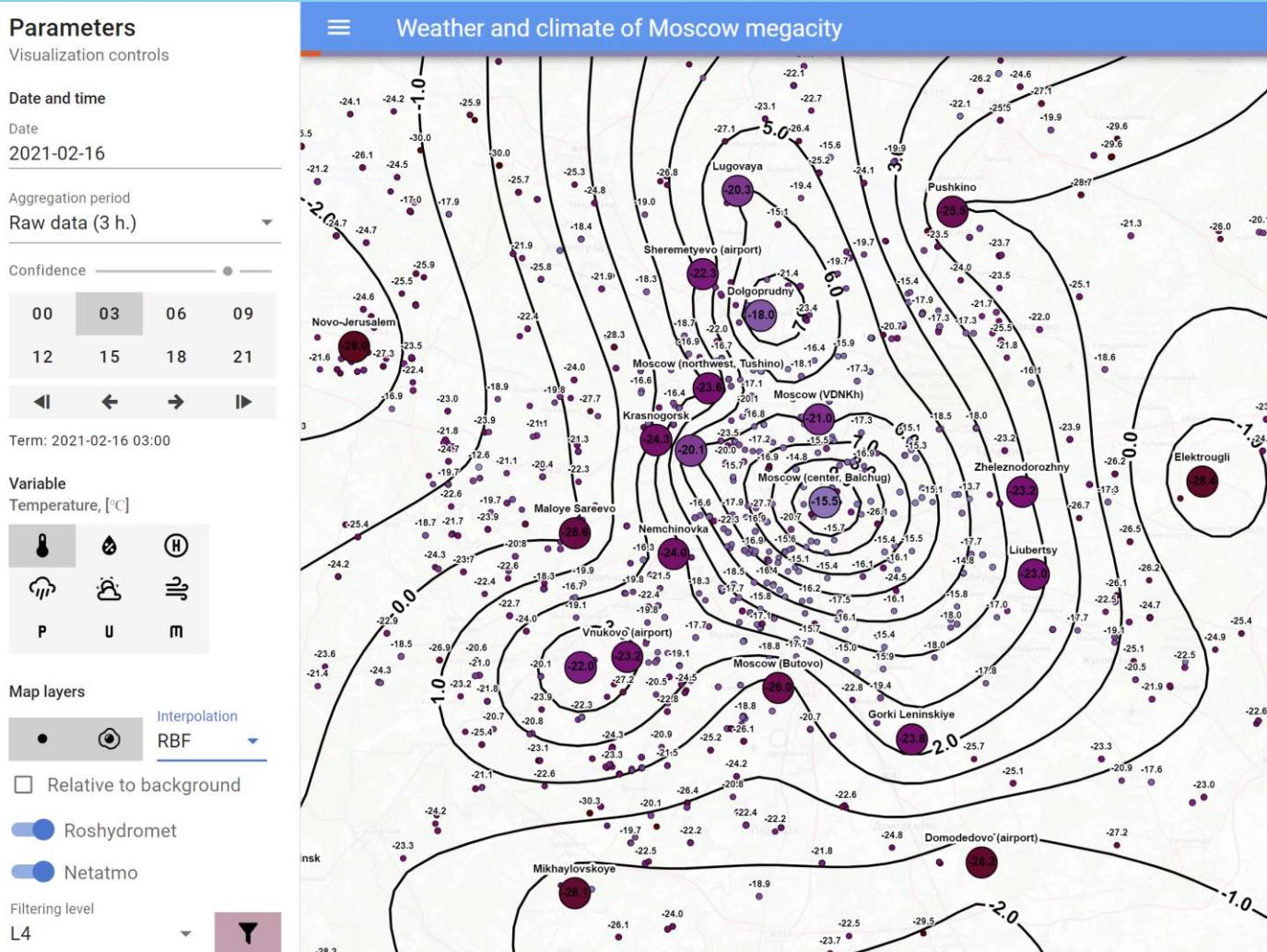


# Проблема учета городов в моделях



Несмотря на стремительное развитие технологий моделирования атмосферных процессов, в задачах моделирования погоды и климата города по-прежнему редко учитываются

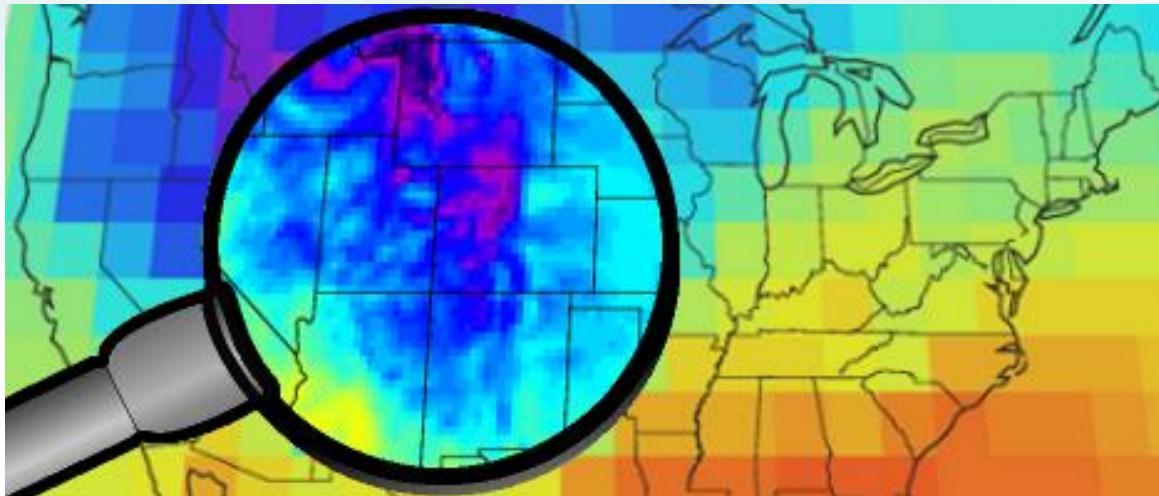
# Проблема учета городов в моделях



# Задача даунскейлинга

Даунскейлинг – процедура, позволяющая получить информацию с высоким разрешением из данных с низким разрешением.

- Динамический даунскейлинг с использованием численных моделей
- Статистический даунскейлинг (в т.ч. с использованием технологий ИИ)



## High Resolution Downscaling

Hyperlocal Models

10m Resolution

Elevation Downscaling

90m Resolution

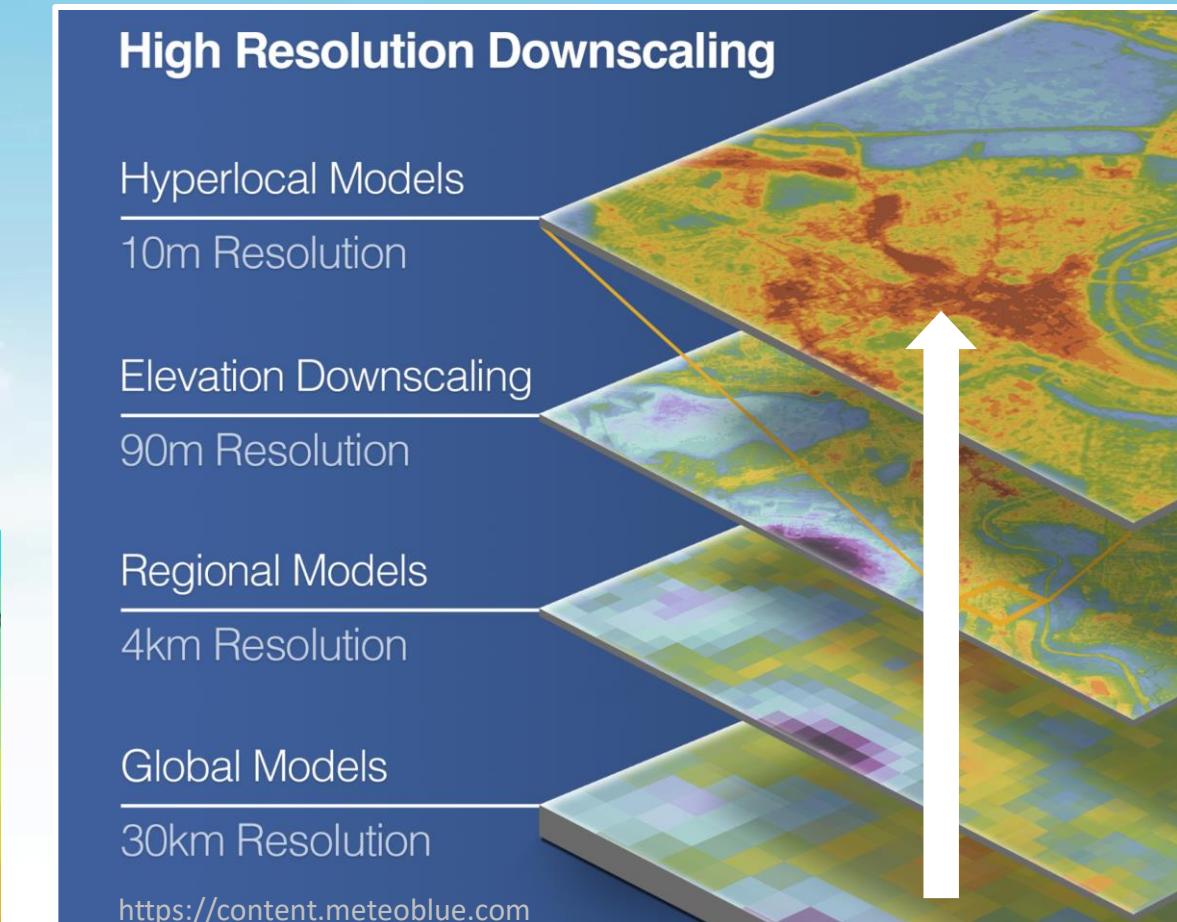
Regional Models

4km Resolution

Global Models

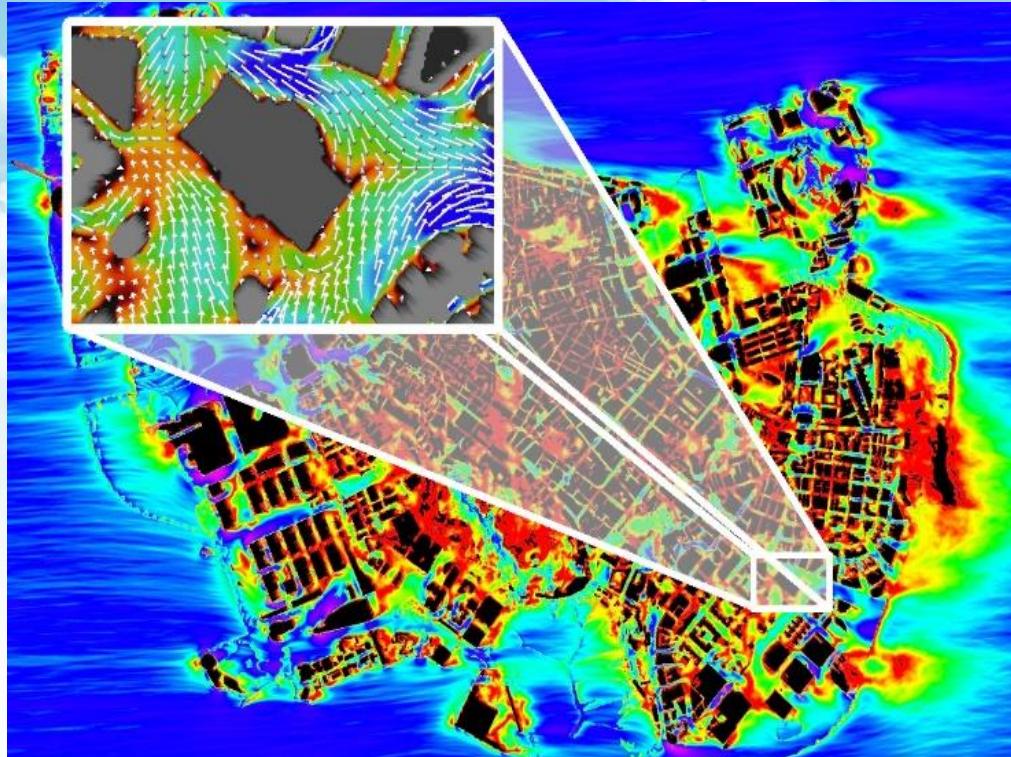
30km Resolution

<https://content.meteoblue.com>



# Описание города в микро- и мезомоделях

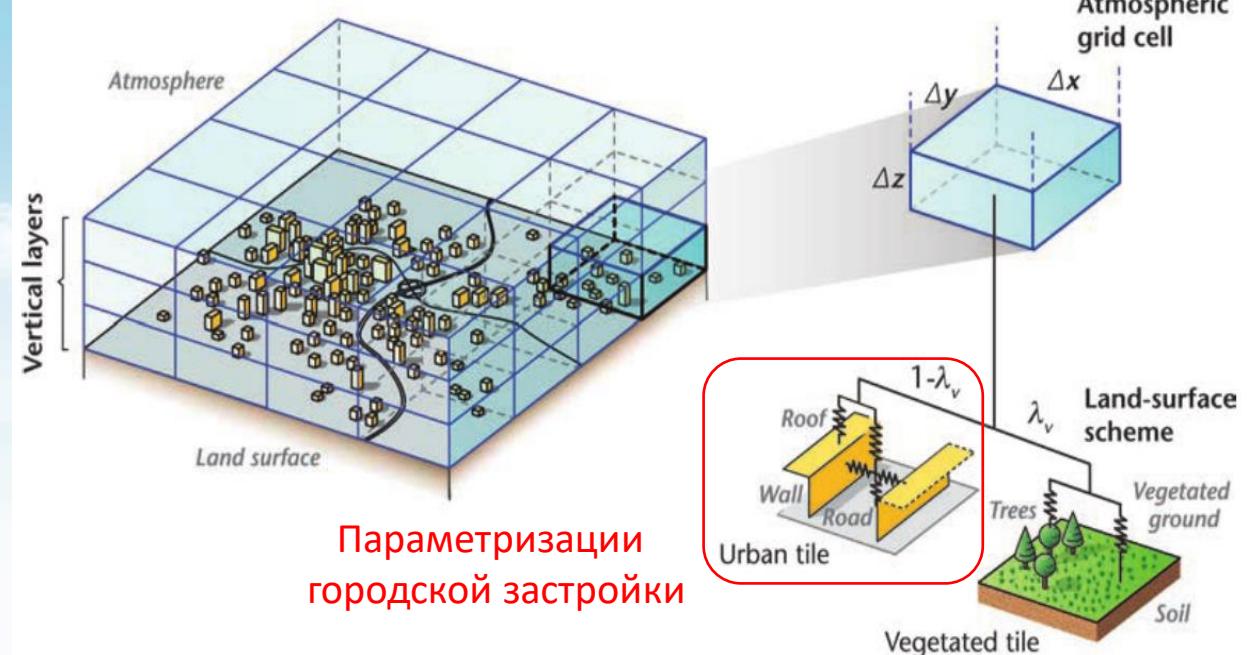
## Микромасштабные модели (шаг сетки: первые метры)



ENVI-MET

## Мезомасштабные модели

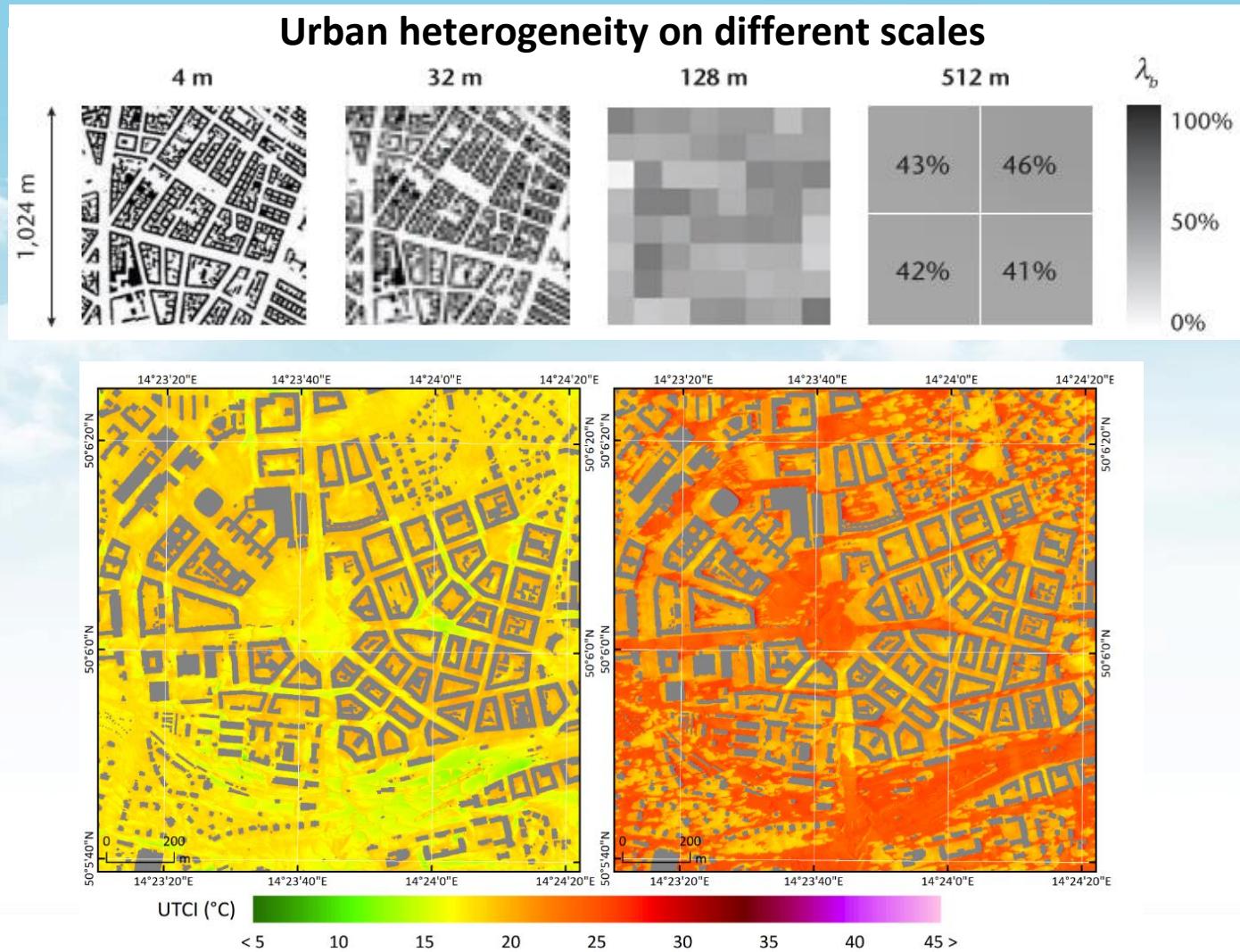
(шаг сетки: первые сотни метров – километры)



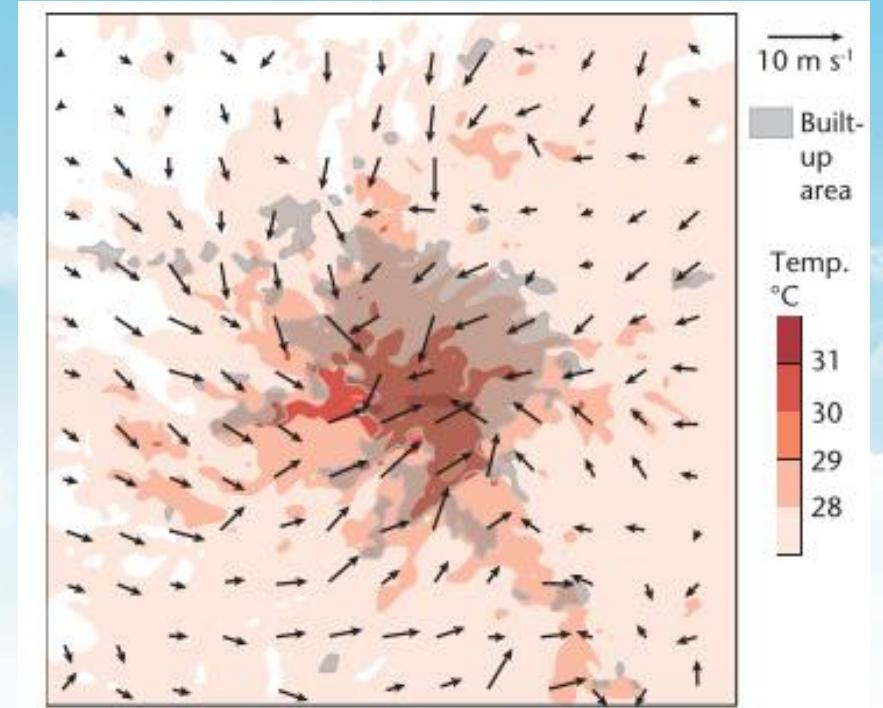
Параметризации  
городской застройки



# Описание города в микро- и мезомоделях



Моделирование термического комфорта на микро-масштабе ([Geletič et al., 2021](#))

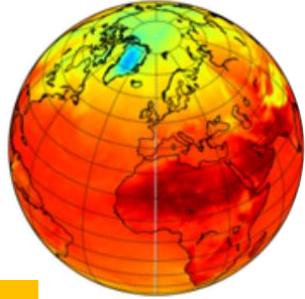


Моделирование острова тепла и  
«городского бриза» на масштабе крупного  
города, Парижа  
([Lemonsu et al., 2002](#))

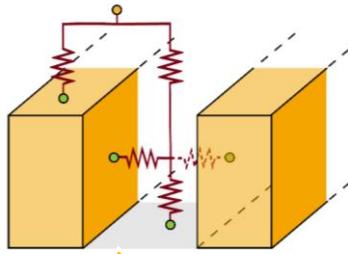
# Постановка экспериментов

## Крупномасштабный форсинг

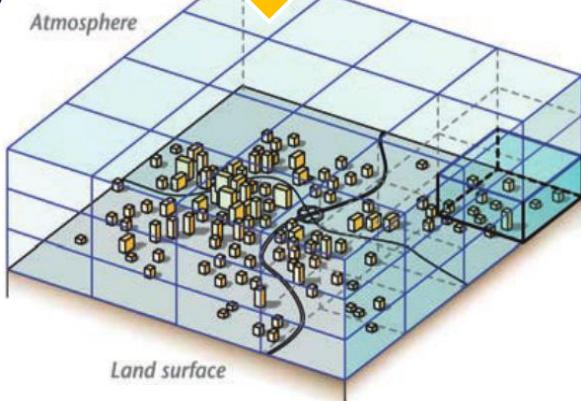
- Реанализ
- Прогноз
- Сценарии изменений климат



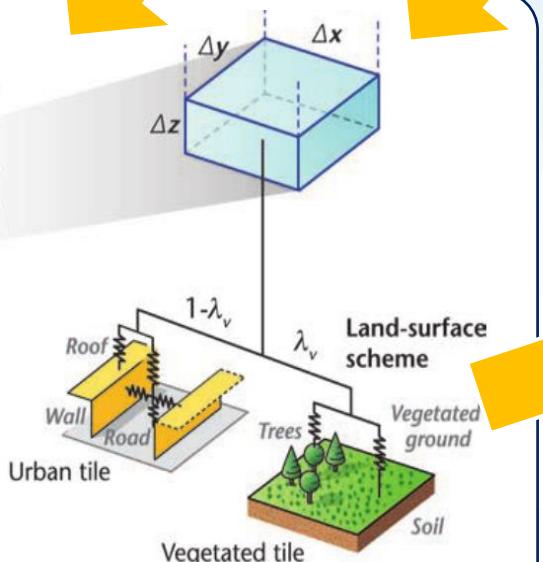
## Городская параметризация



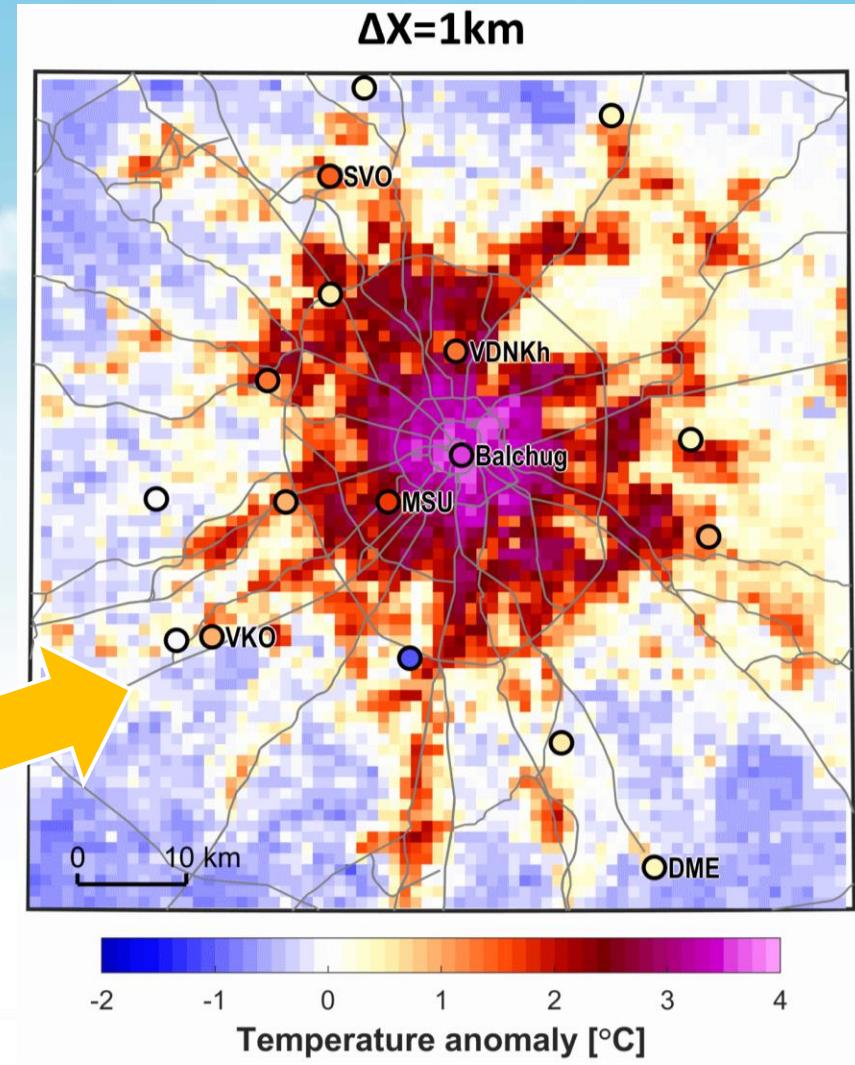
## Параметры поверхности и городской среды



## Региональная модель атмосферы



## Вычислительные ресурсы

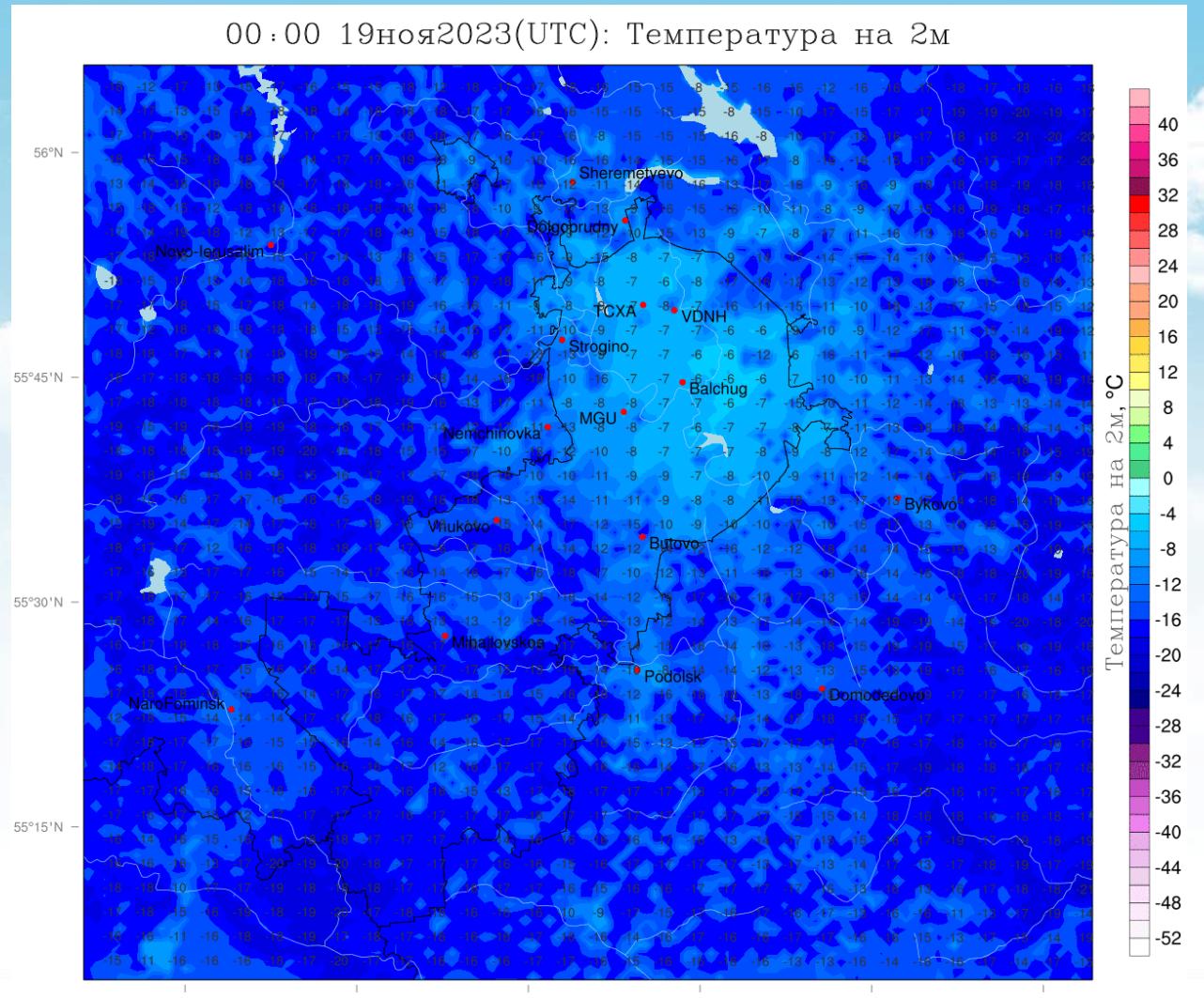


# Прогноз погоды с учетом города



Оперативные области счета системы численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра РФ

С 2018 г. для Москвы считается оперативный прогноз с шагом сетки 1 км и учетом влияния городской поверхности (Ривин и др., 2019; 2020)



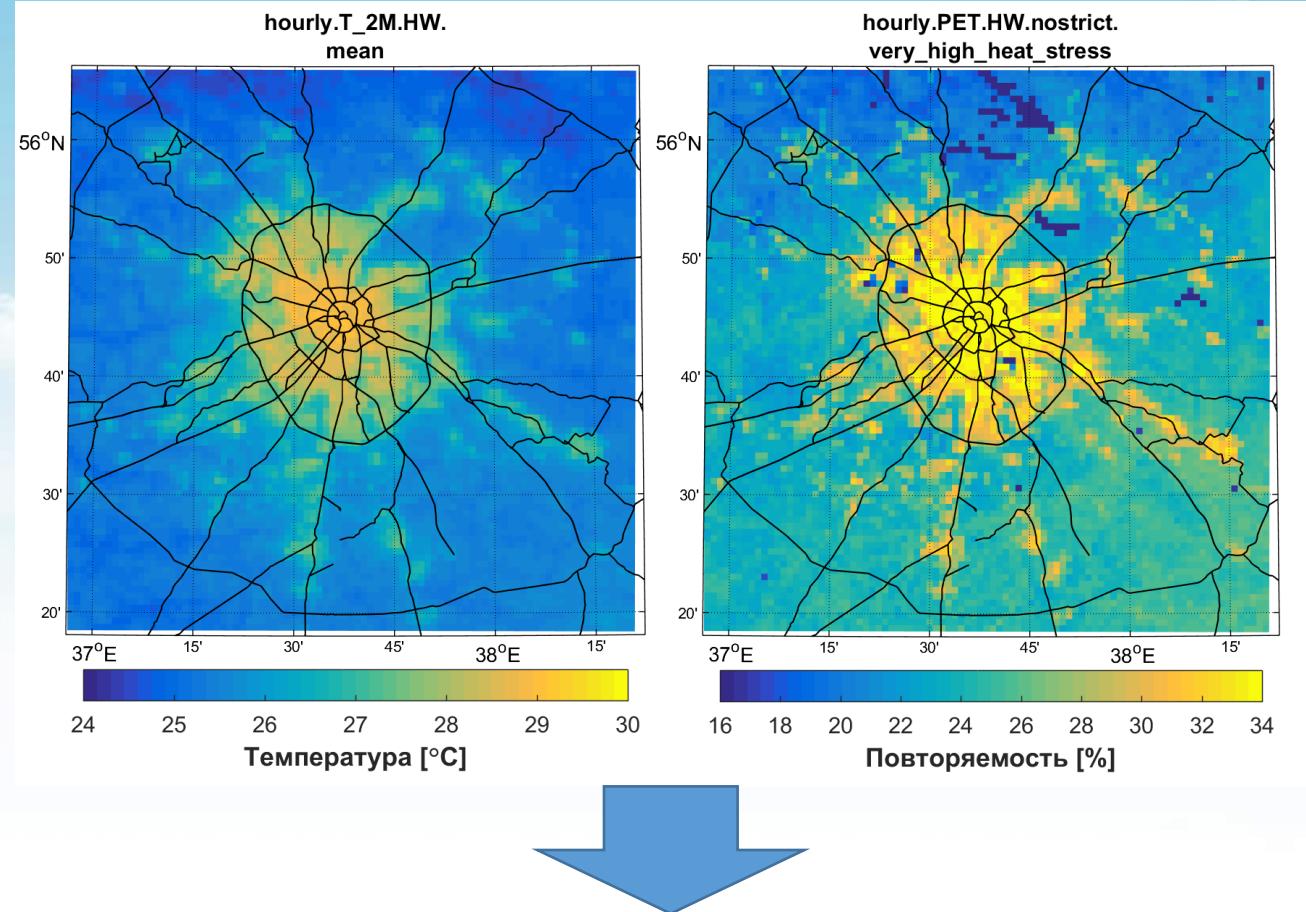
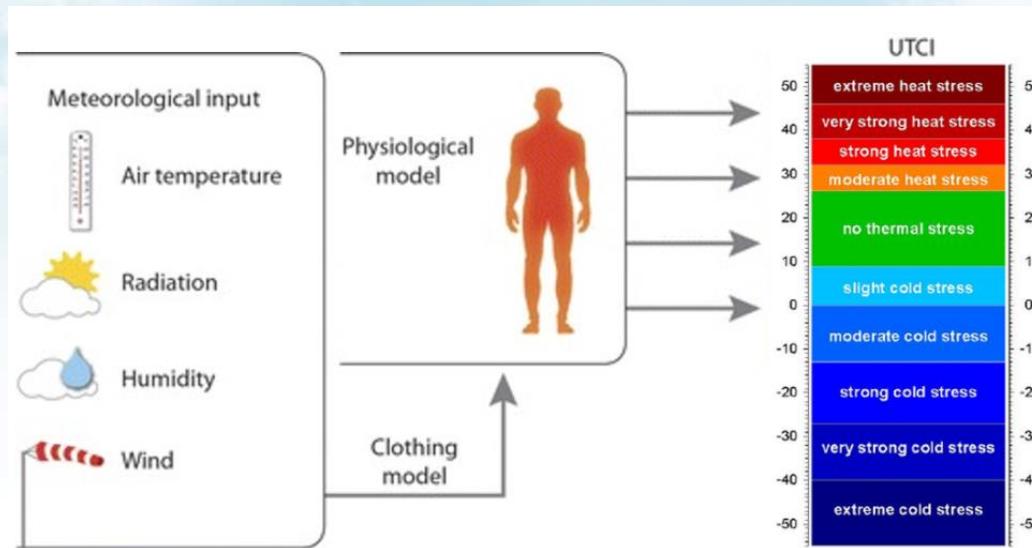
COSMO-Ru 1км: Прогноз на 12 часов  
от 2023-11-18 12:00(UTC)

# Исследовательские задачи



# Применение модели: биометеорология

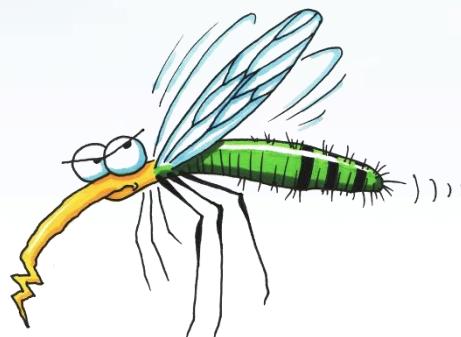
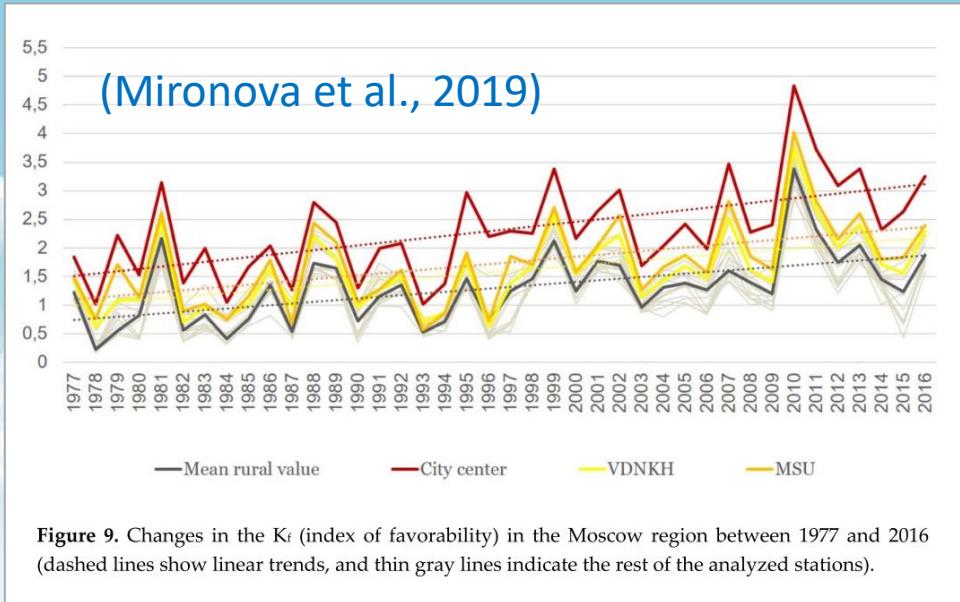
Оценка теплового стресса в Москве во время экстремальной жары 2010 г.



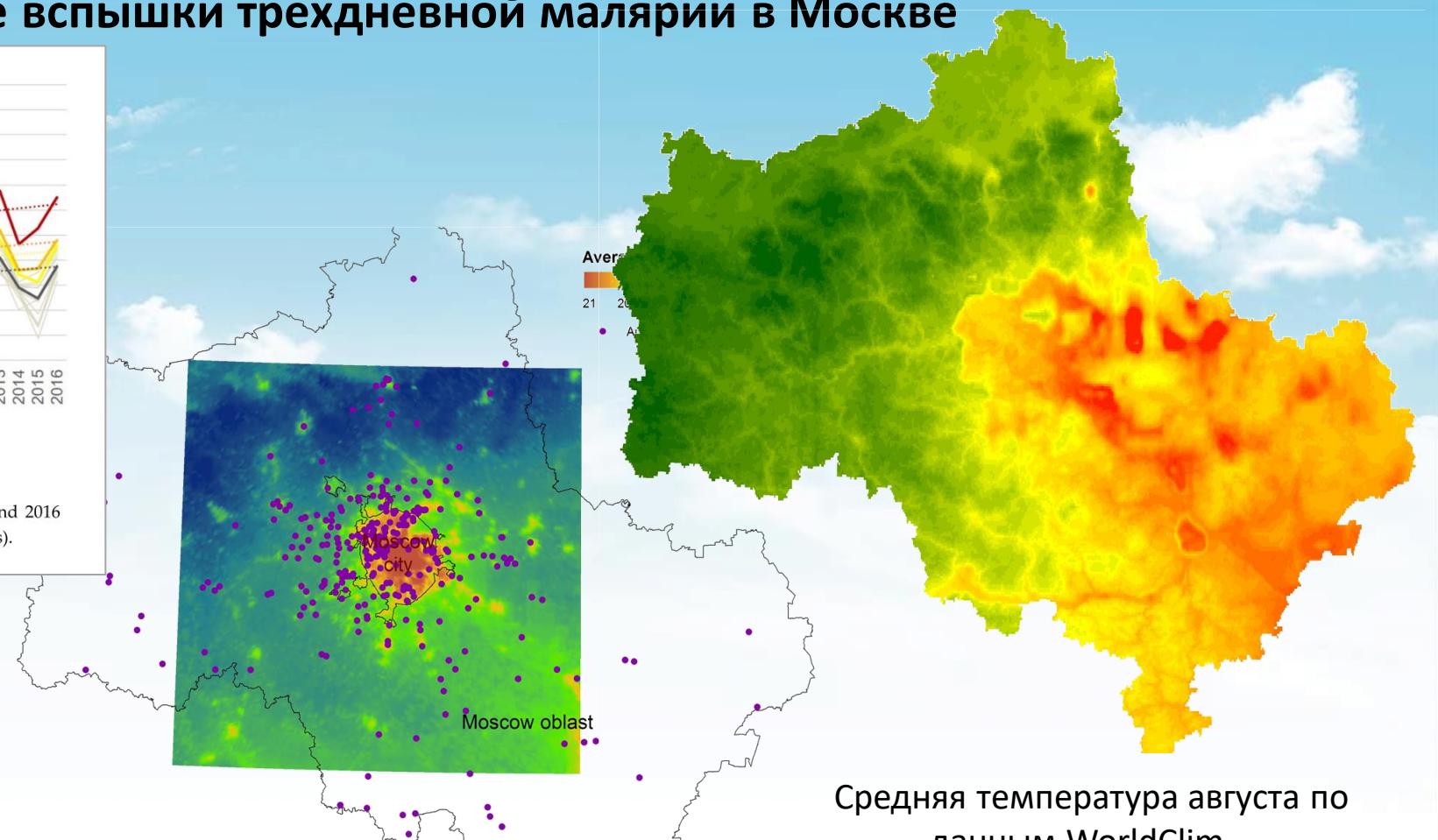
Сравнение с данными по смертности  
(Zemtsov et al, 2020)

# Применение модели: эпидемиология

## Исследование вспышки трехдневной малярии в Москве



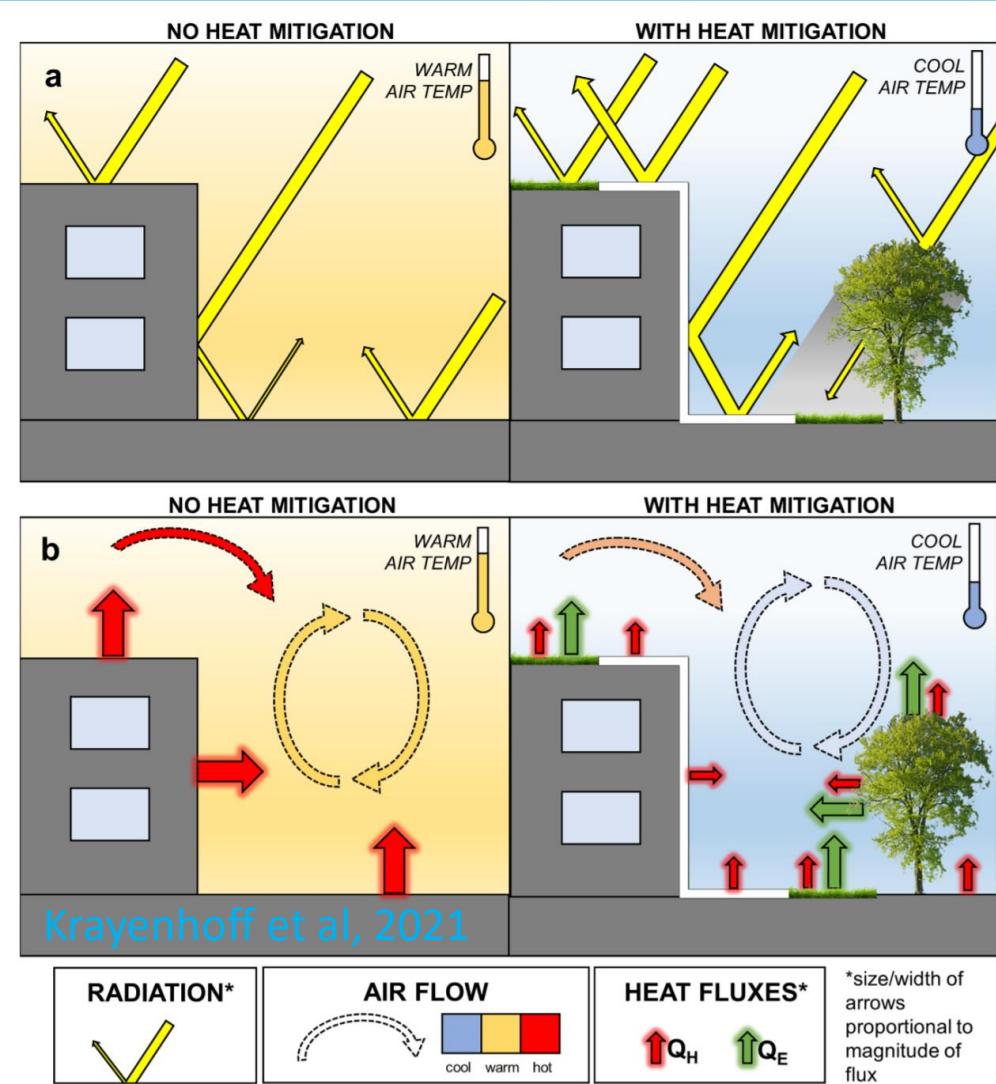
Средняя температура летнего сезона за 2007-2016 гг.  
по данным расчетов COSMO-CLM и TERRA\_URB с  
шагом 1 км + данные по вспышке малярии в Москве  
в 1999-2003 гг. (Mironova et al., 2020)



Средняя температура августа по  
данным WorldClim –  
популярного глобальной базы  
данных с шагом сетки 1 км

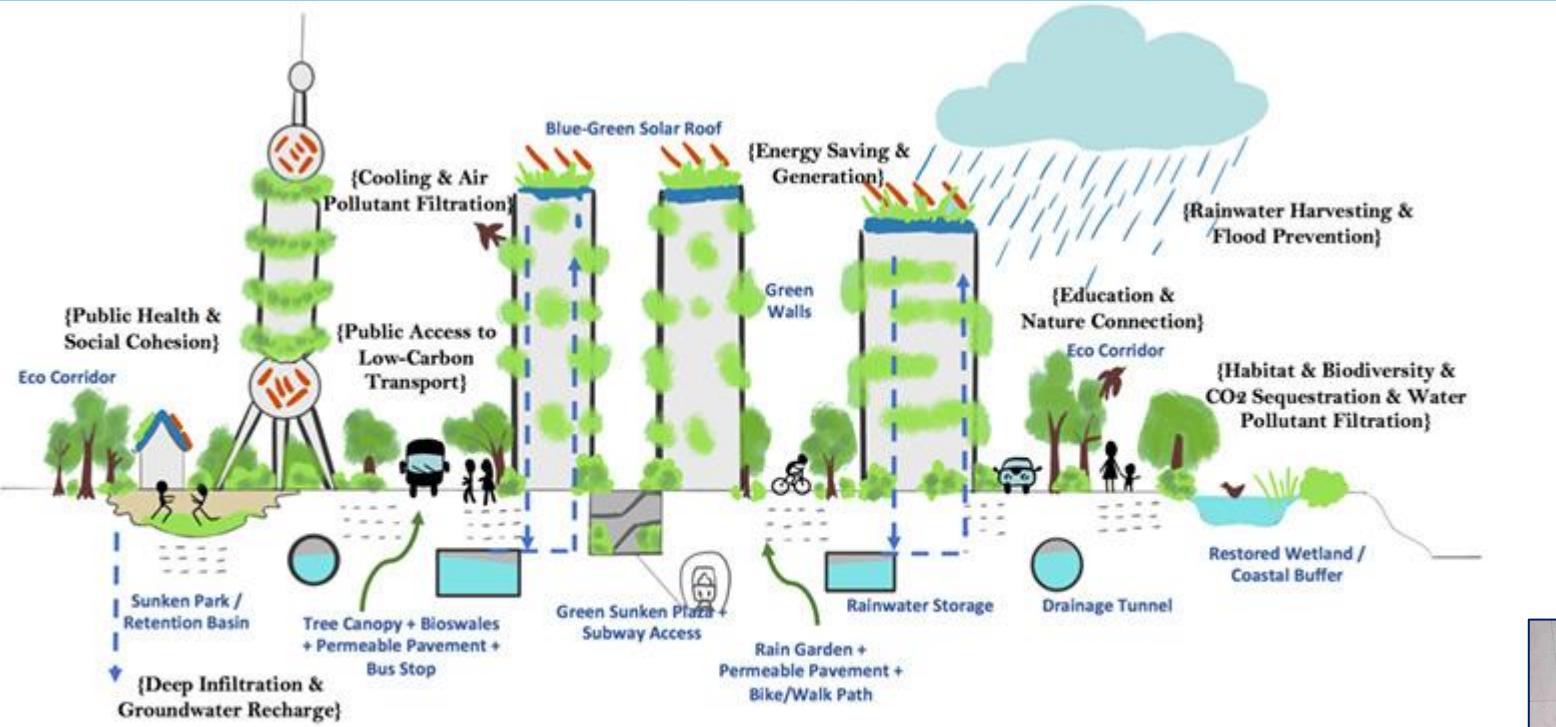
# Градостроительное планирование

## Как адаптировать города к изменению климата?



# Градостроительное планирование

## Как адаптировать города к изменению климата?

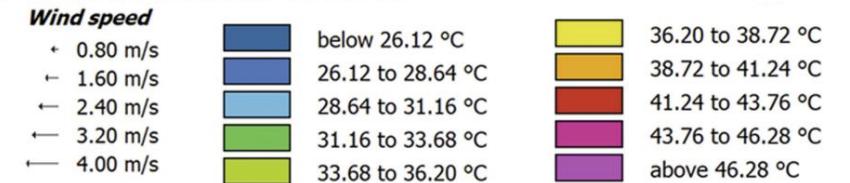
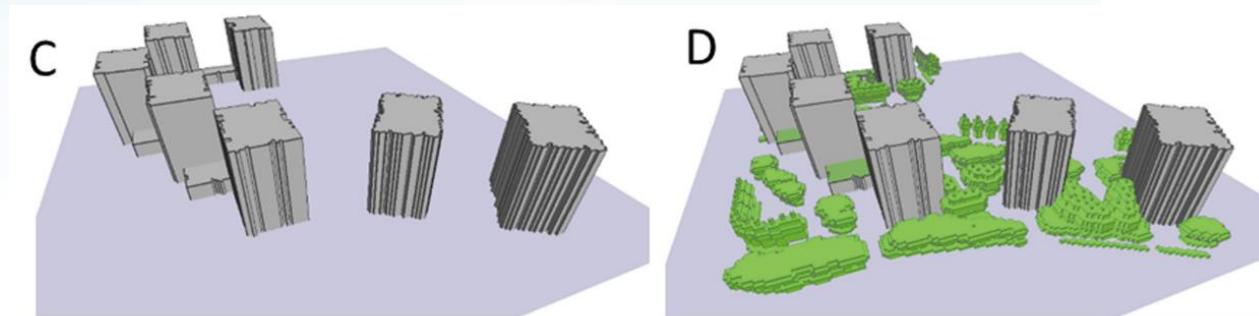
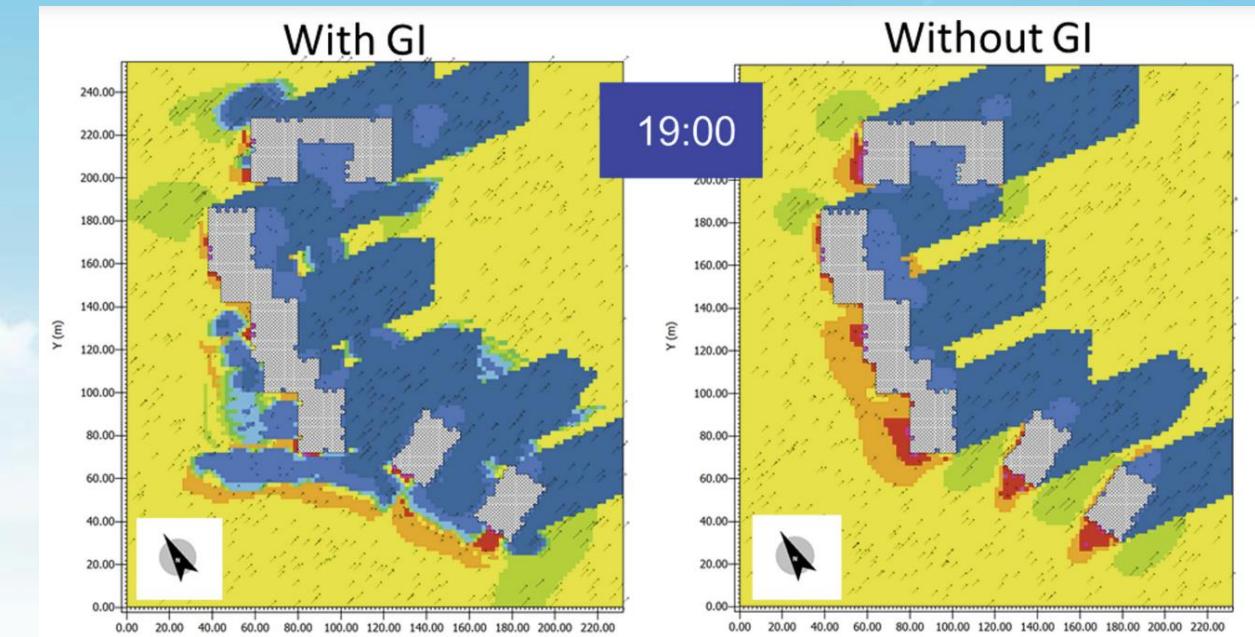


Blue-Green Infrastructure for Climate Resilience and Urban Multifunctionality in Chinese Cities



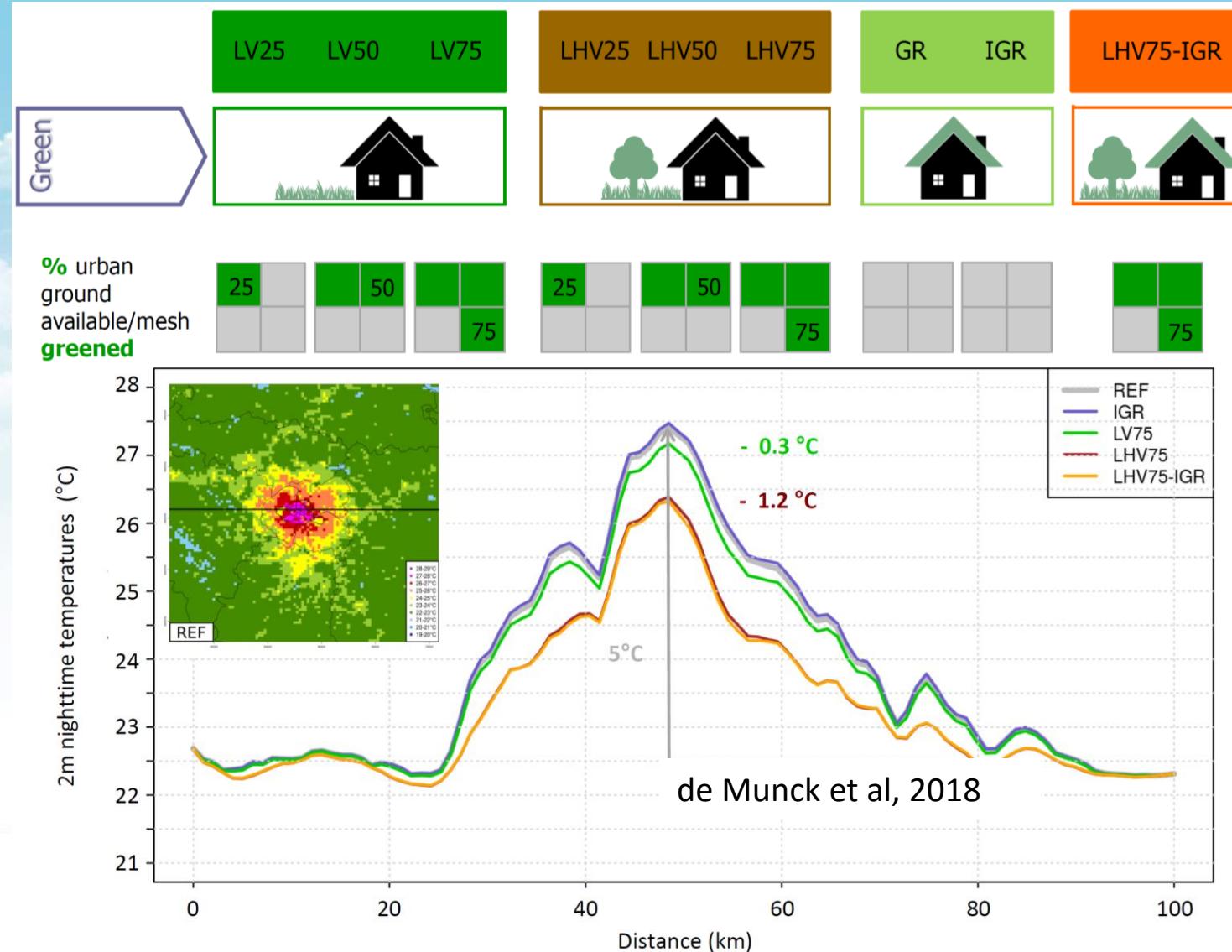
# Градостроительное планирование

## Микромасштабное моделирование



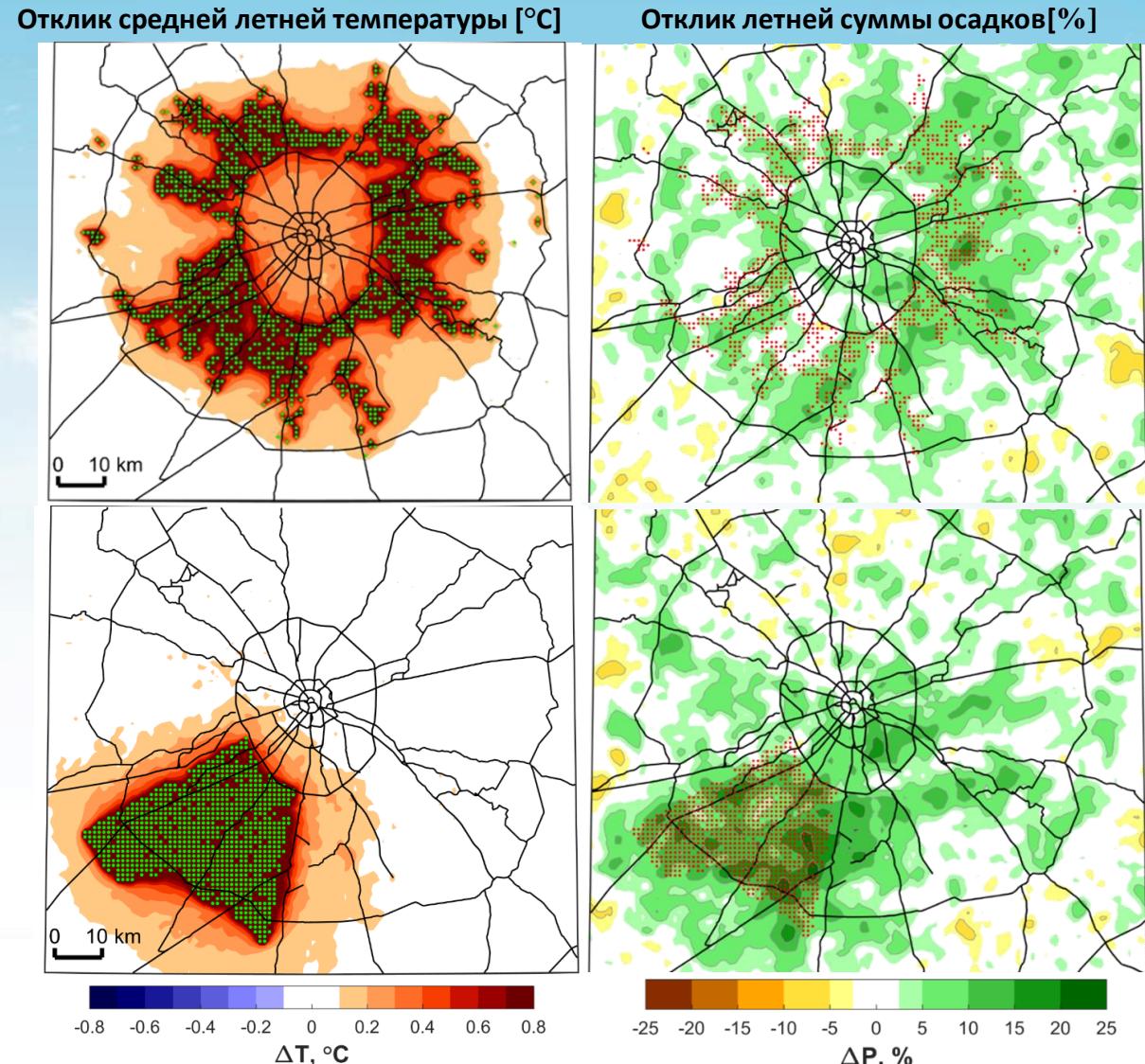
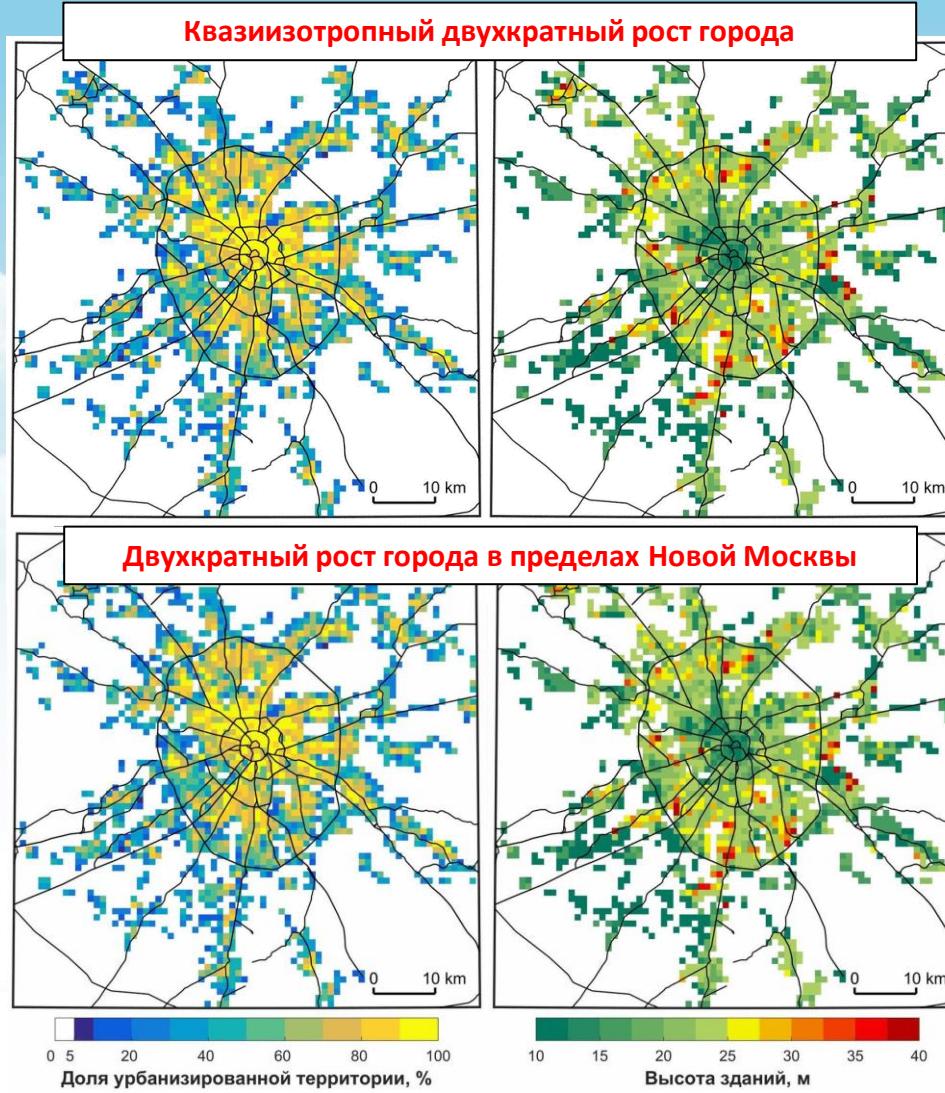
# Градостроительное планирование

## Мезомасштабное моделирование



# Градостроительное планирование

## Мезомасштабное моделирование



Отклик летней суммы осадков[%]

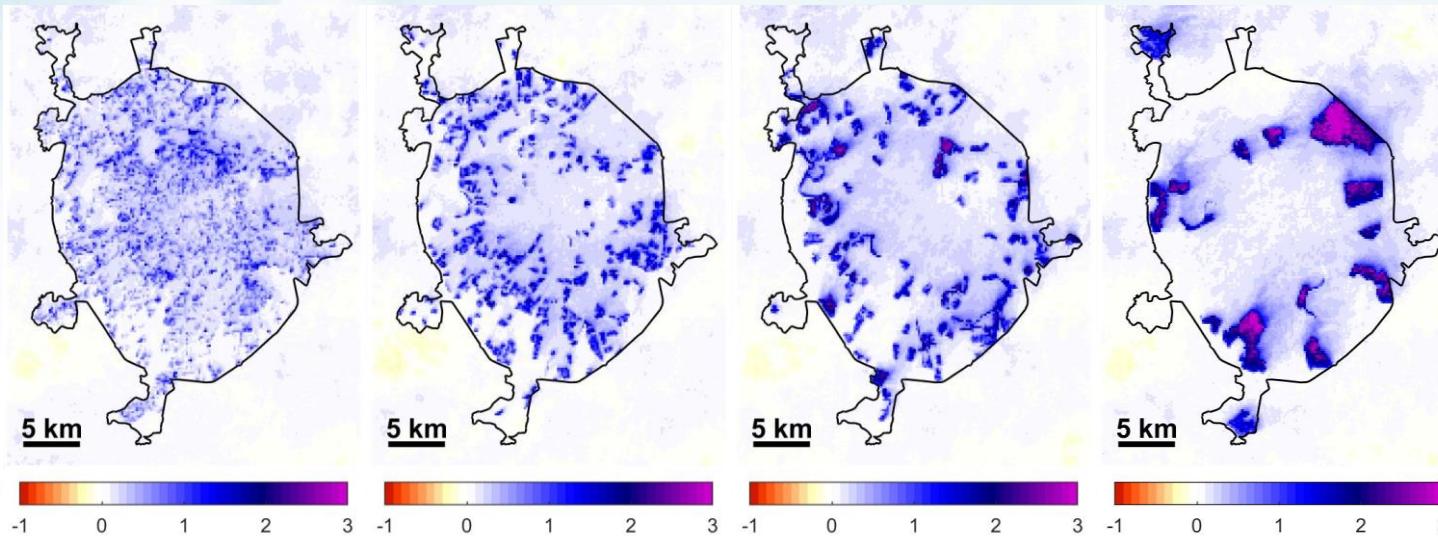
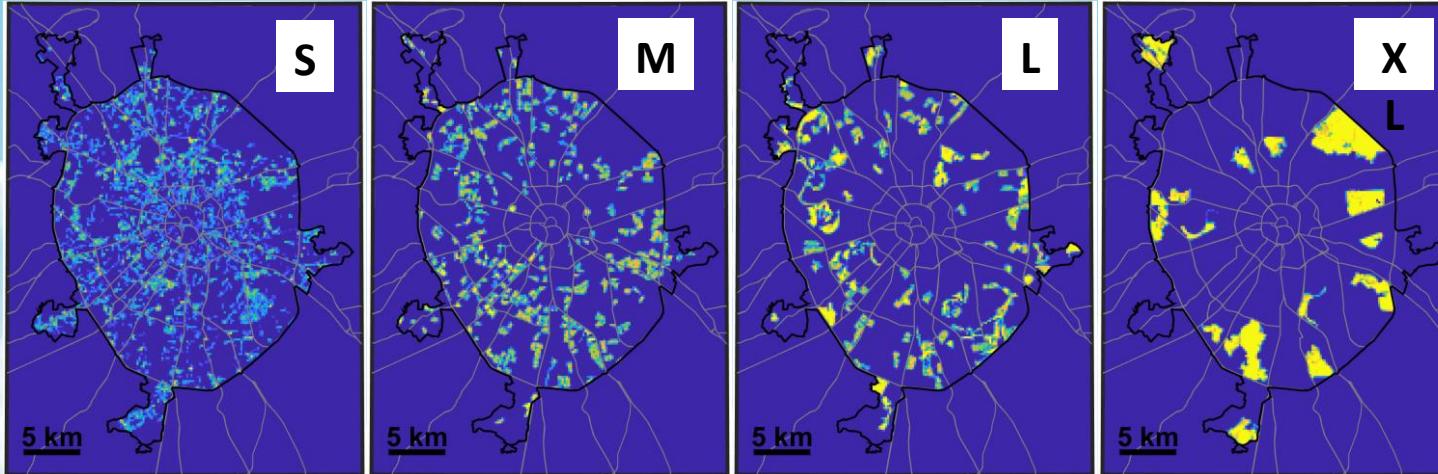
# Градостроительное планирование

Охлаждающий эффект городских парков

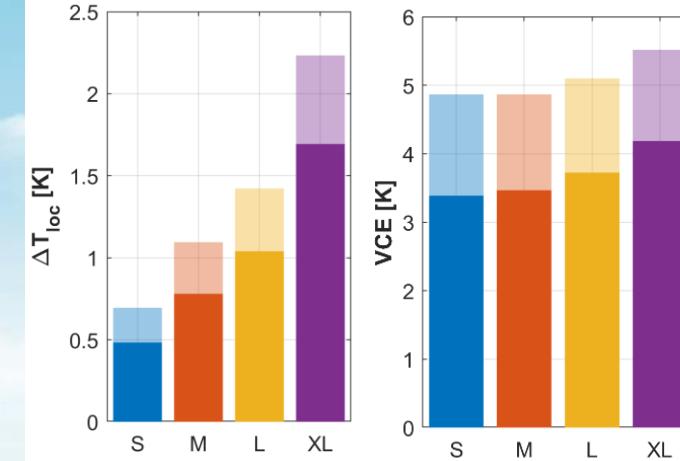


# Градостроительное планирование

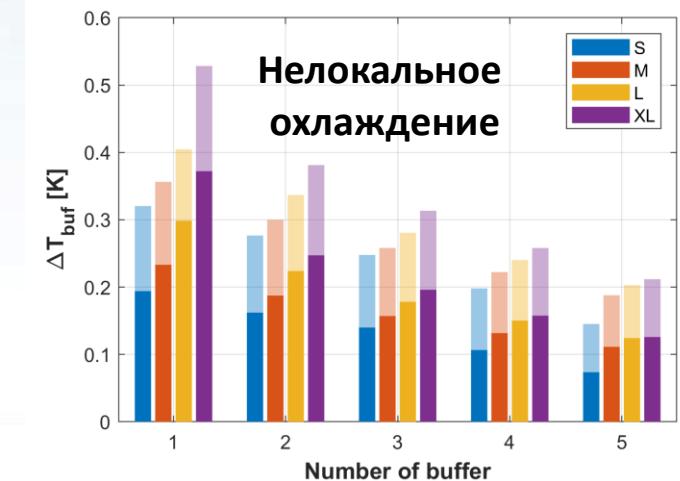
## Охлаждающий эффект городских парков



### Локальное охлаждение



### Нелокальное охлаждение



# Технические вопросы

# Анализ результатов моделирования

## Основные форматы выходных данных:

- Текстовые файлы – только для диагностики
- Netcdf для моделей климата
- GRIB/GRIB2 для моделей прогноза погоды

## ПО для работы с данными:

- **Panoply Data Viewer**

<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download/>

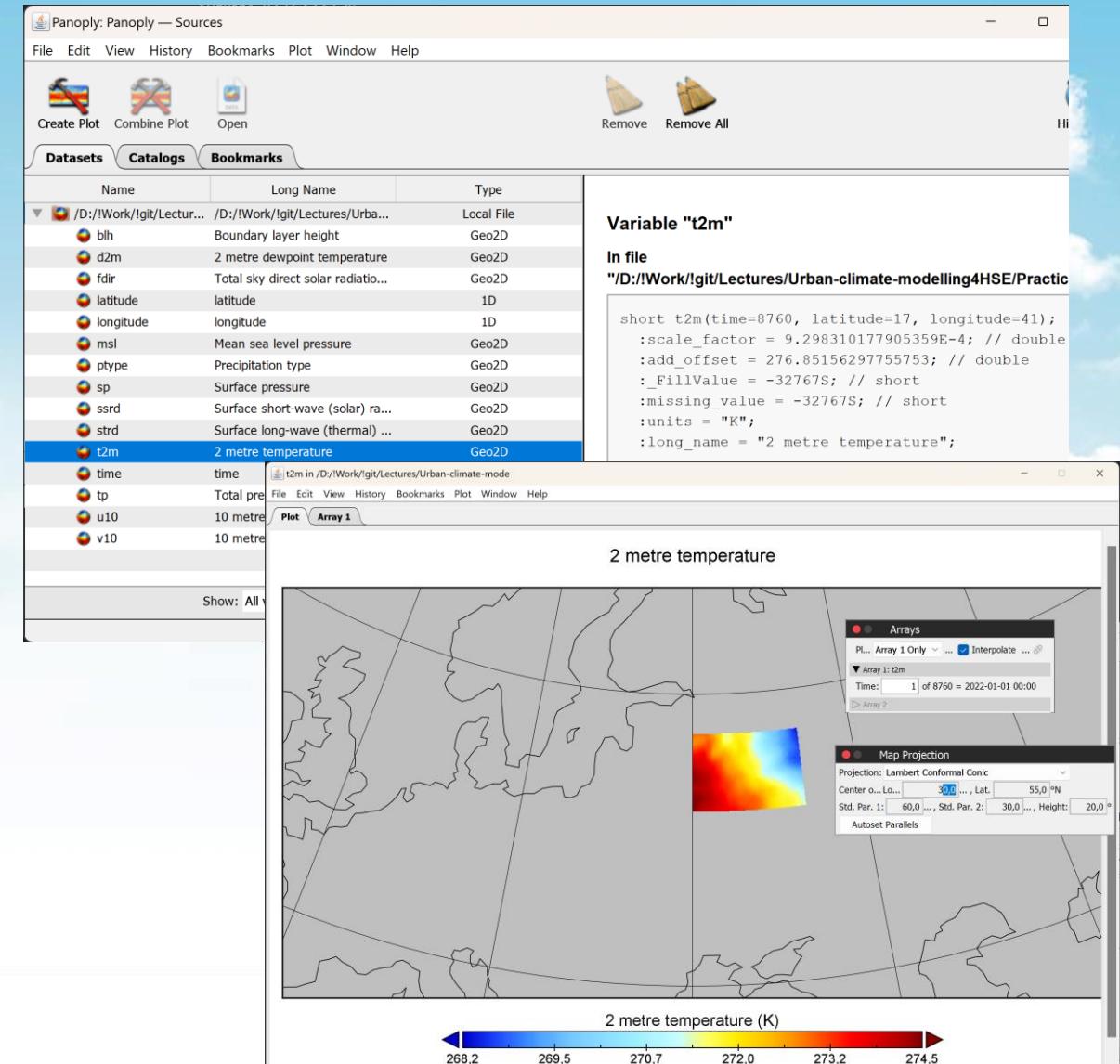
- **ncview**

- **Climate data operators (CDO)**

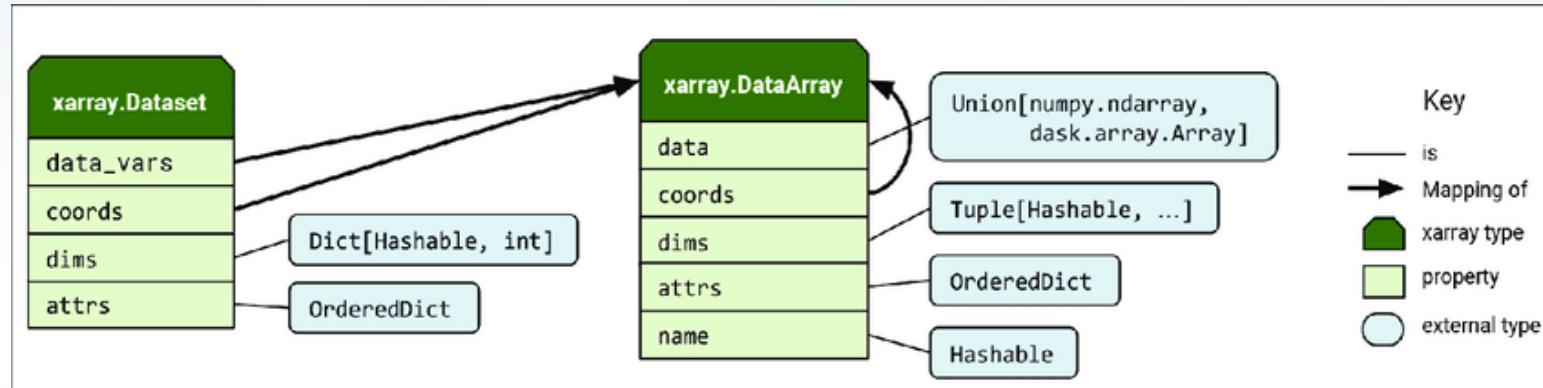
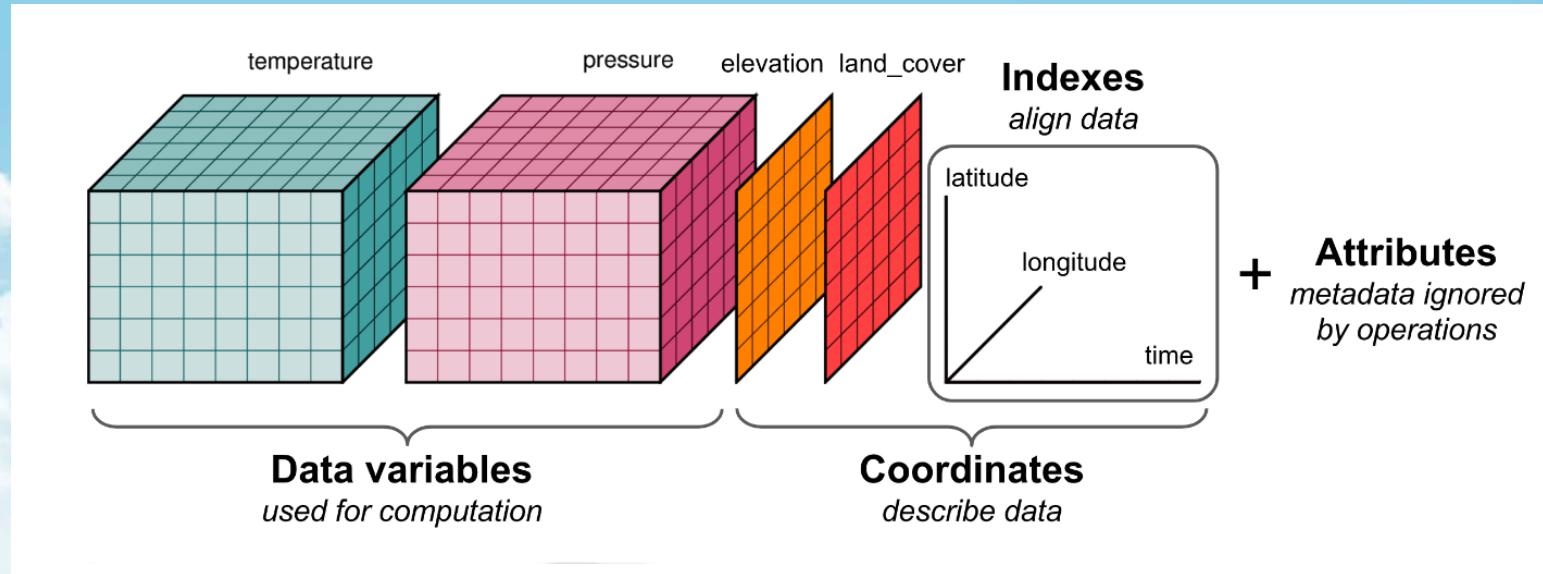
<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>

- **Python (netcdf, xarray)**

- **Matlab**



# Анализ результатов моделирования



Библиотека Xarray  
<https://docs.xarray.dev/en/stable/>





The end

Вопросы?

# Практическая работа №1

## Часть 1

- Исследовать доступность данных стационарных наблюдений для выбранного города и его окрестностей (метеостанции, аэропорты, специализированные сети)
- Выбрать репрезентативные городские и загородные станции
  - Если таких станций нет → выбрать другой город
- Определить точное местоположение этих станций
- Скачать данные за несколько лет
- Построить графики временной динамики основных метеовеличин (температуры, влажности, скорости ветра) ветра на городских и загородных станциях за месяцы с контрастными метеоусловиями, например, для лета/зимы
- Проанализировать городские аномалии температуры и влажности(разности «город-фон»):
  - Построить графики временной динамики за отдельные периоды ( $\approx 15\text{-}30$  дней)
  - Построить график осредненного суточного хода
  - Построить график осредненного сезонного хода

# Практическая работа №1

## Часть 2

- Добавить в список анализируемых метеостанций хотя бы еще одну фоновую или городскую станцию (чтобы хотя бы одна выборка включала не менее двух станций)
- При решении задачий из части 1 использовать средние значения по выборке городских/фоновых станций
- Рассчитать по данным наблюдений на загородных станциях эмпирический «фактор погоды» (см. лекцию №3)
- Исследовать статистическую связь между «фактором погоды» и разностью температуры «город-фон»

## Часть 3

- Скачать данные реанализа ERA5 для выбранного города и его окрестностей:
  - нужны приземные переменные, включая все те, что на скриншоте Panoply Data Viewer (они нам еще пригодятся)
  - за тот же период, что и анализируемые наблюдения
  - данные тут: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Построить карты средних значений температуры и скорости ветра для двух контрастных сезонов
- Интерполировать данные реанализа в точки расположения метеостанций
- Построить графики динамики температуры и скорости ветра по данным реанализа и наблюдений
- Построить графики суточного хода средних (ME) и среднеквадратичных (RMSE) ошибок реанализа для городской и фоновой станций

# Практическая работа №1

The screenshot shows the 'ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present' page. At the top, there are logos for European Commission, Copernicus, ECMWF, and Climate Change Service. A red navigation bar contains links for Home, Search, Datasets, Applications, Your requests, Toolbox, Support, and Live. Below the navigation bar, a message states: 'A new CDS soon to be launched - expect some disruptions and watch this page for latest. Thank you.' The main content area has tabs for Overview, Download data (which is selected), Quality assessment, and Documentation. Under 'Product type', 'Reanalysis' is checked. There are also options for Ensemble members, Ensemble mean, and Ensemble spread, each with a checkbox. Below this is a 'Variable' section with a 'Popular' tab. Under 'Popular', several checkboxes are checked, including: 10m u-component of wind, 2m dewpoint temperature, Mean sea level pressure, 10m v-component of wind, 2m temperature, Surface pressure, and Total precipitation. Other options like Mean wave period, Significant height of combined wind waves and swell, and Sea surface temperature are available but unchecked.

ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present

A new CDS soon to be launched - expect some disruptions and watch this page for latest. Thank you.

Overview Download data Quality assessment Documentation

Clear all

Product type

Reanalysis    Ensemble members    Ensemble mean    Ensemble spread

Select all Clear all

Variable ②

Popular

10m u-component of wind    10m v-component of wind  
 2m dewpoint temperature    2m temperature  
 Mean sea level pressure    Mean wave direction  
 Mean wave period    Sea surface temperature  
 Significant height of combined wind waves and swell    Surface pressure  
 Total precipitation

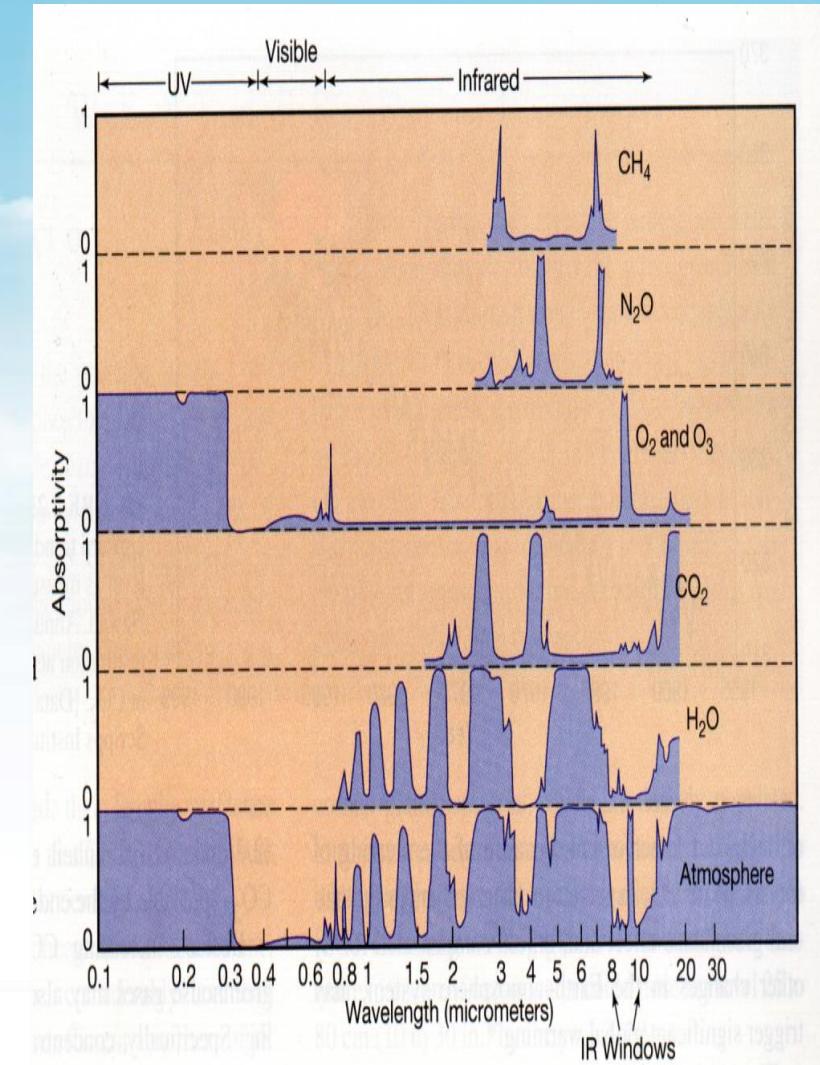
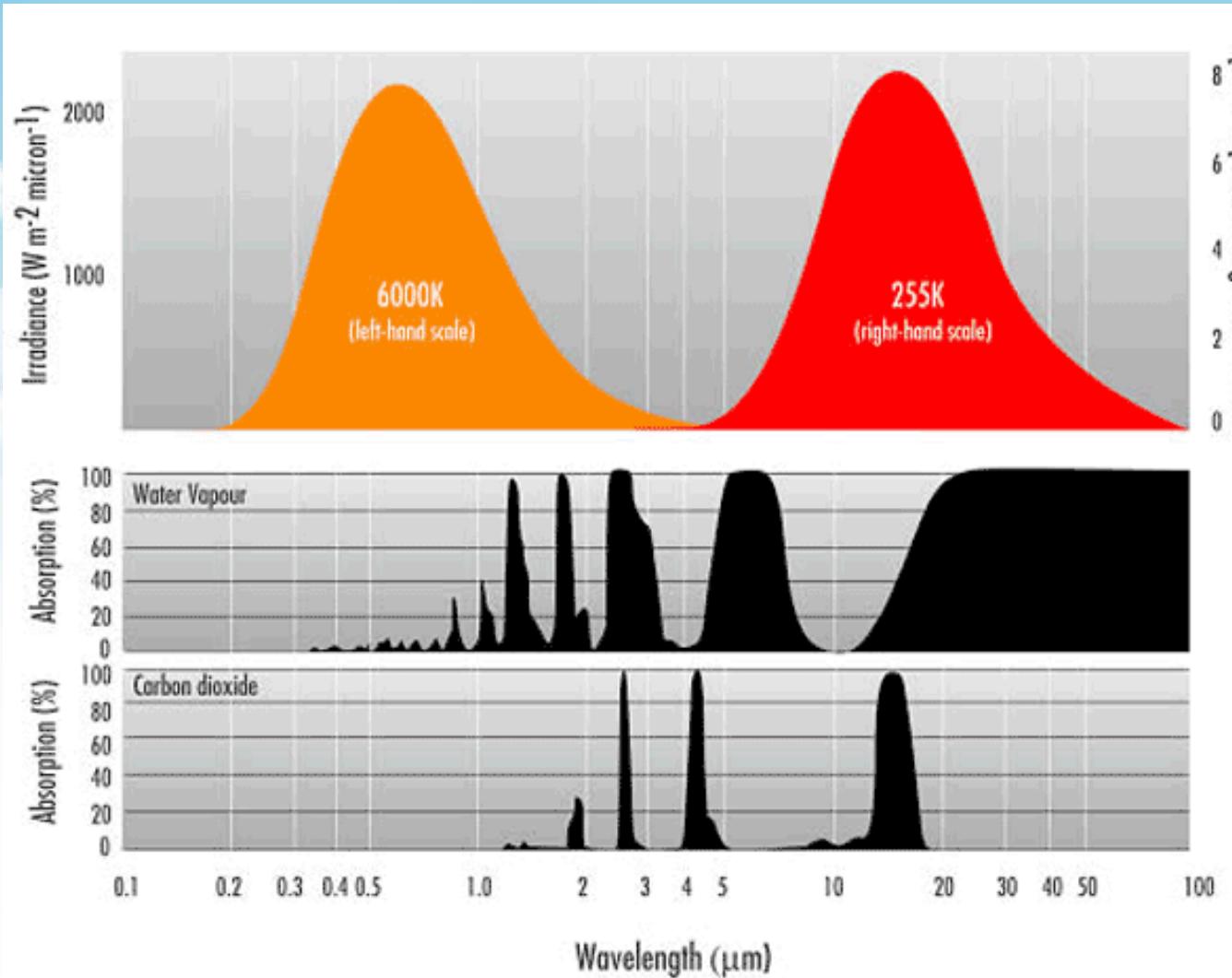
Select all Clear all

# Домашнее задание (эссе)

- С учетом опыта сегодняшнего мозгового штурма, необходимо написать эссе на эту же тему («Как знания о городском климате можно использовать для решения проблем населения и экономики?»)
- Отличия от сегодняшнего задания:
  - Необходимо использовать материалы из двух следующих лекций («Мониторинг городского климата», «Моделирование городского климата»).
  - Необходимо использовать ссылки на российскую и зарубежную литературу
- Ориентировочный объем эссе ≈5 стр.
- Использование генеративных нейросетей допускается, но должно быть явно указано
- Срок сдачи – через три недели (12 февраля)

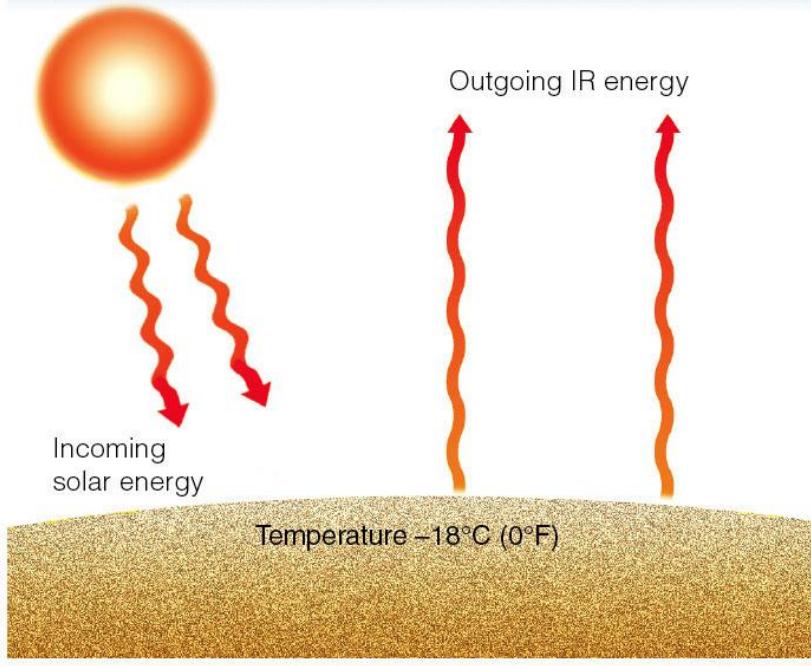
# Дополнительные слайды

# Как состав атмосферы влияет на климат?

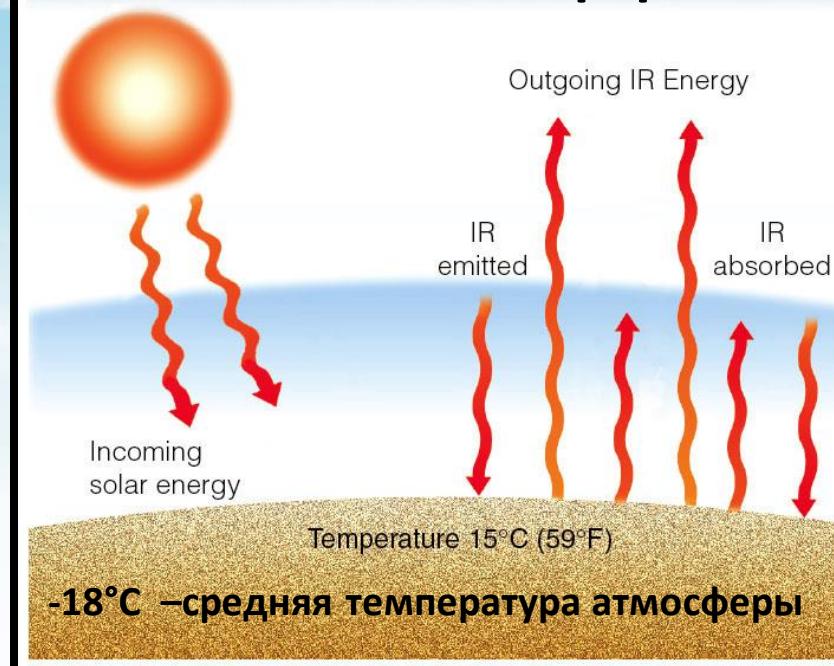


# Парниковый эффект

Планета без атмосферы



Планета с атмосферой



# Глобальное потепление

