



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Курс «Моделирование климата городов» 2025, лекция №4

Современные подходы к моделированию погоды и климата

Михаил Иванович Варенцов

mvarentsov@hse.ru

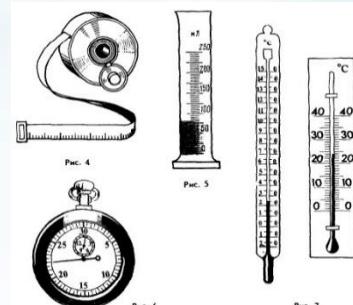
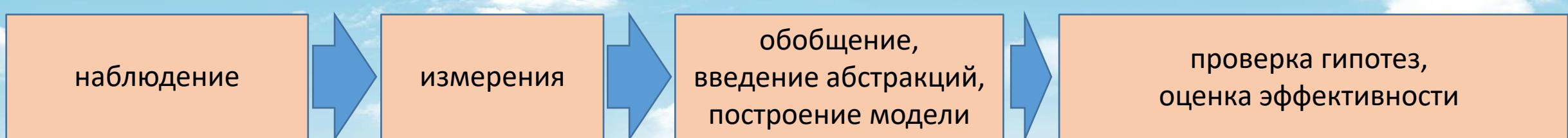




А что такое модели вообще?

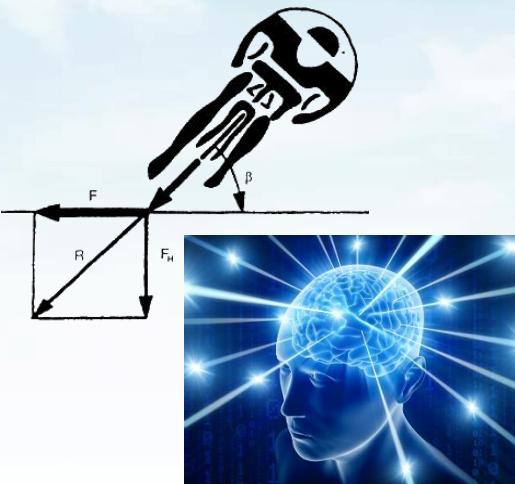
Способы построения моделей

Как проводятся физические (в максимально-широком смысле этого слова) исследования?



Настоящая наука начинается с тех
пор, как начинают измерять.
Точная наука немыслима без меры.

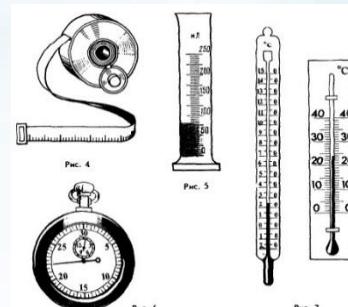
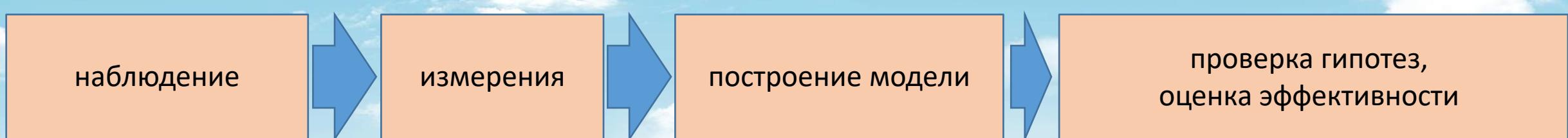
Д.И. Менделеев



Слайд М.А. Криницкого (МФТИ, ИО РАН)

Способы построения моделей

Что делать, если не понятно, что происходит, но делать-то что-то надо?

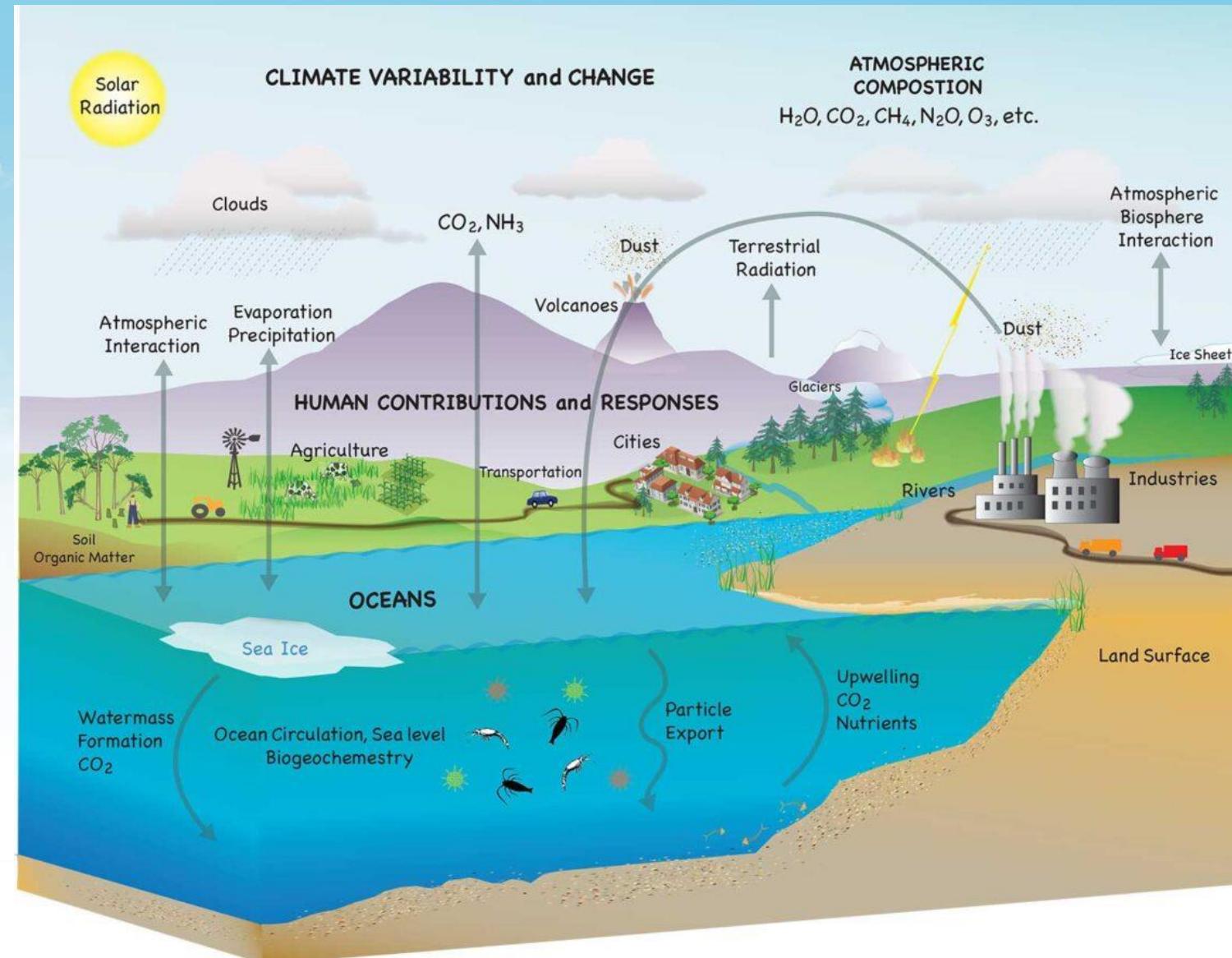


~~обобщение ?
введение абстракций ?~~



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:

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

Conservation of mass:

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

Conservation of H₂O (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:

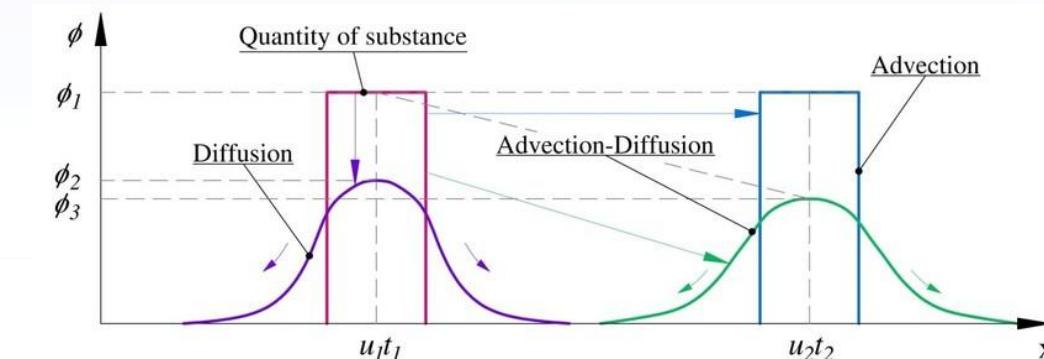
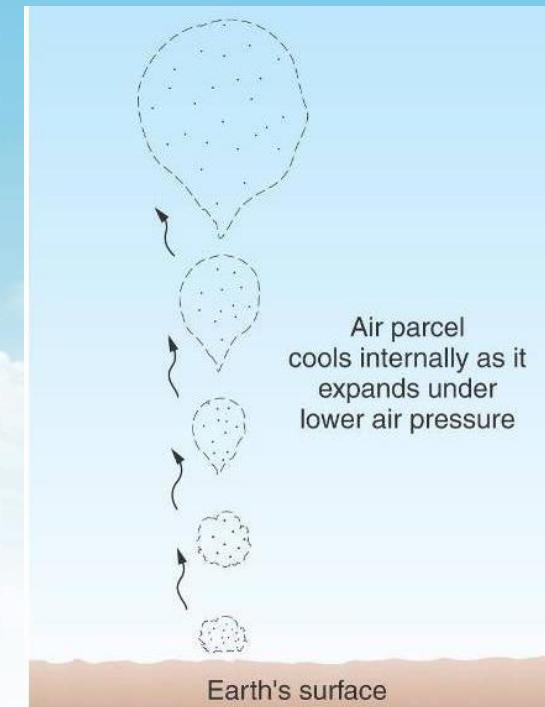
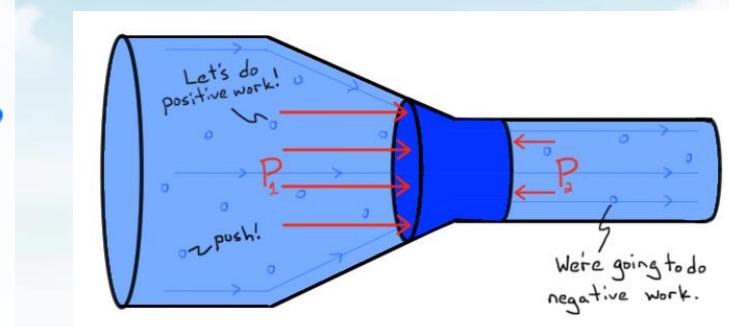
$$p = \rho R_d T$$

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_d = drag force of earth
R = radiation vector
C = conductive heating
c_p = heat capacity, const. p
E = evaporation
S = latent heating
S_q = phase-change source
k = diffusion coefficients
R_d = dry air gas constant

Что описывают эти уравнения?

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

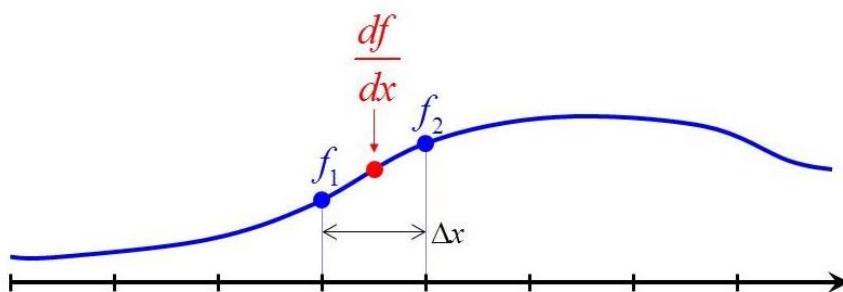


Численные методы

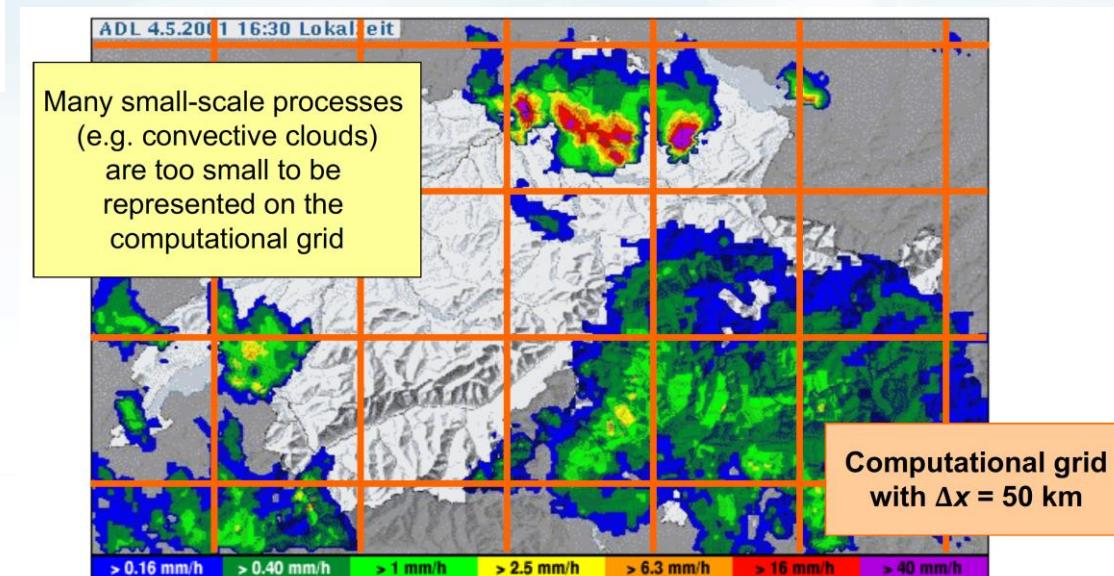
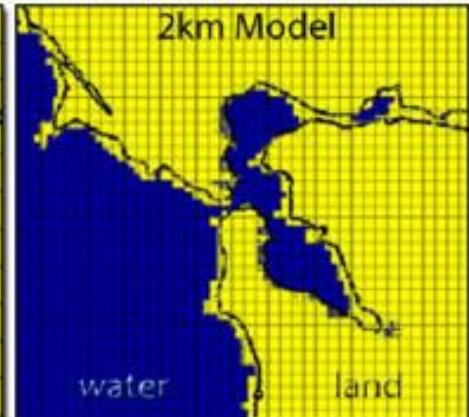
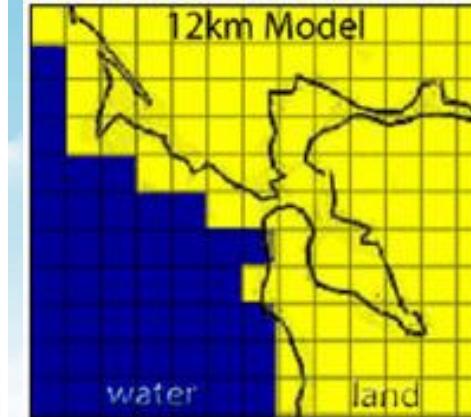
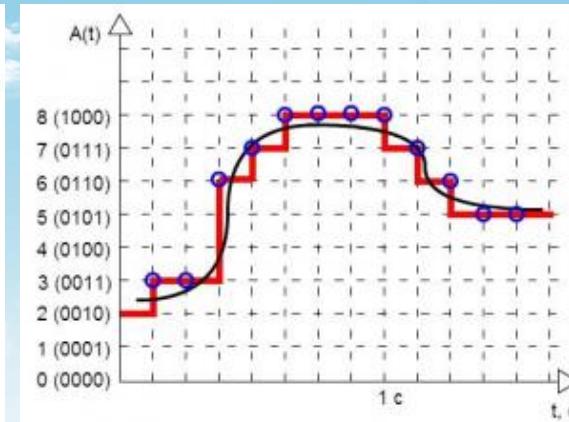
Конечно-разностная аппроксимация производных

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

second-order accurate
first-order derivative



Дискретизация на сетке, разрешение моделей



Численные модели погоды и климата

Ключевые характеристики моделей

- **Разрешение модели**
 - Горизонтальный шаг сетки Δx
 - 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

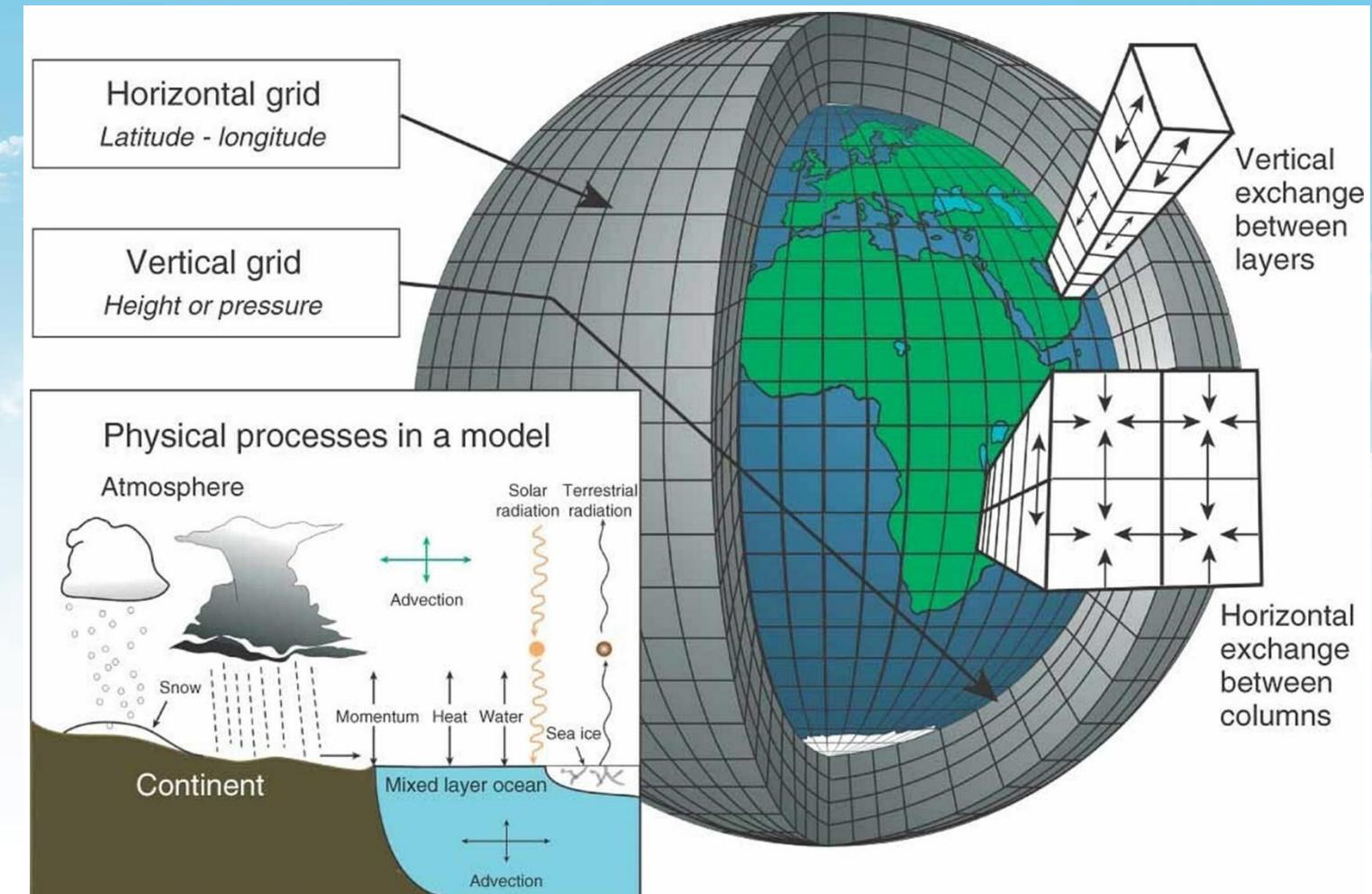
- **Система координат**

- **Тип горизонтальной сетки**

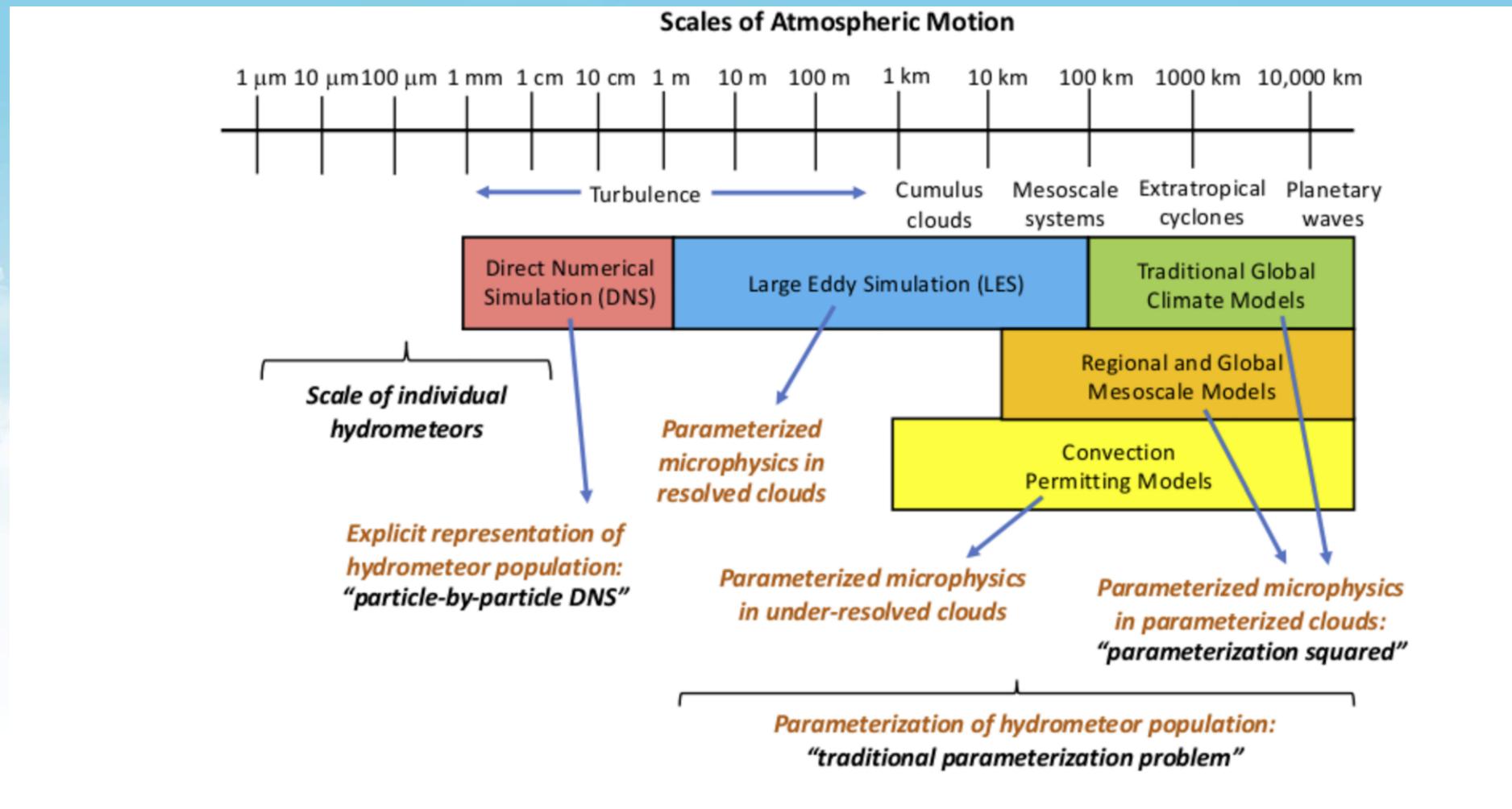
- **Тип вертикальной сетки**

- **Набор описываемых процессов**

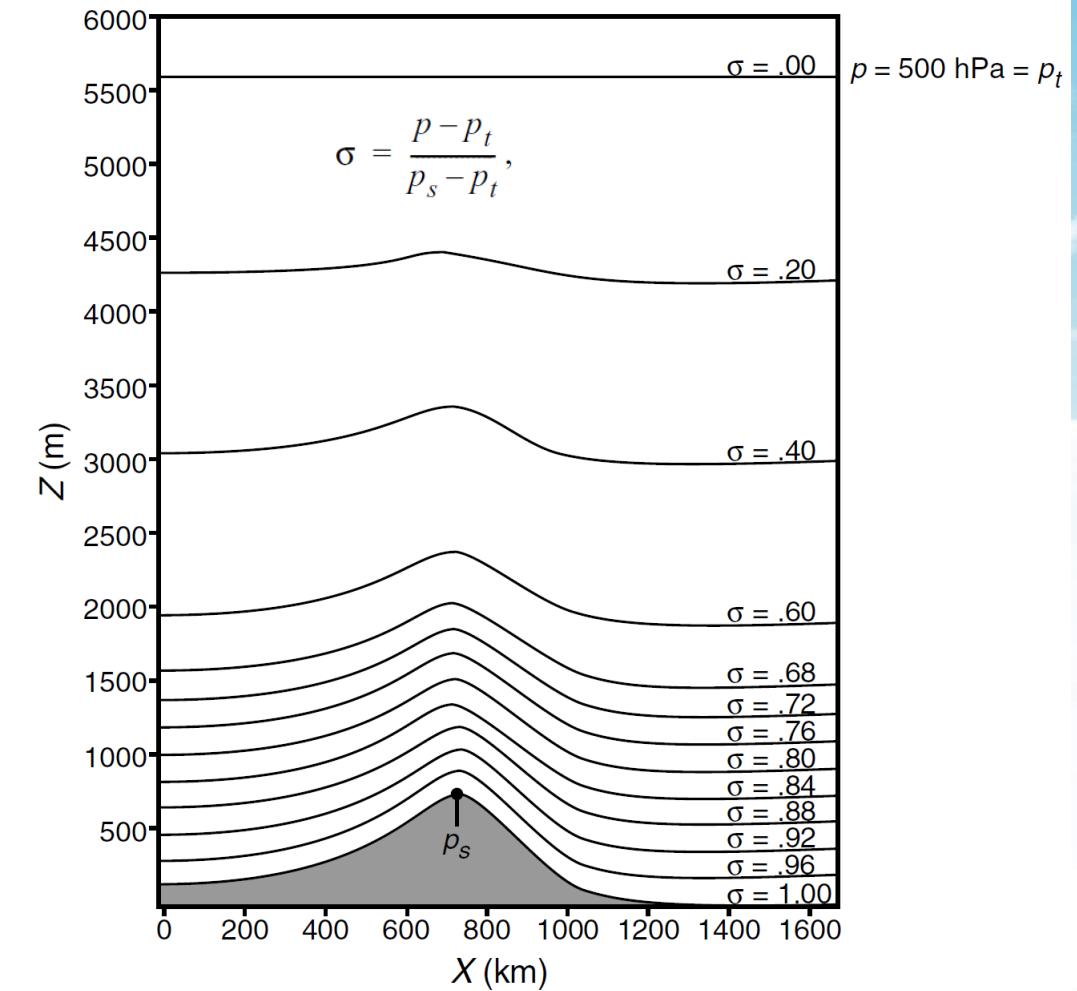
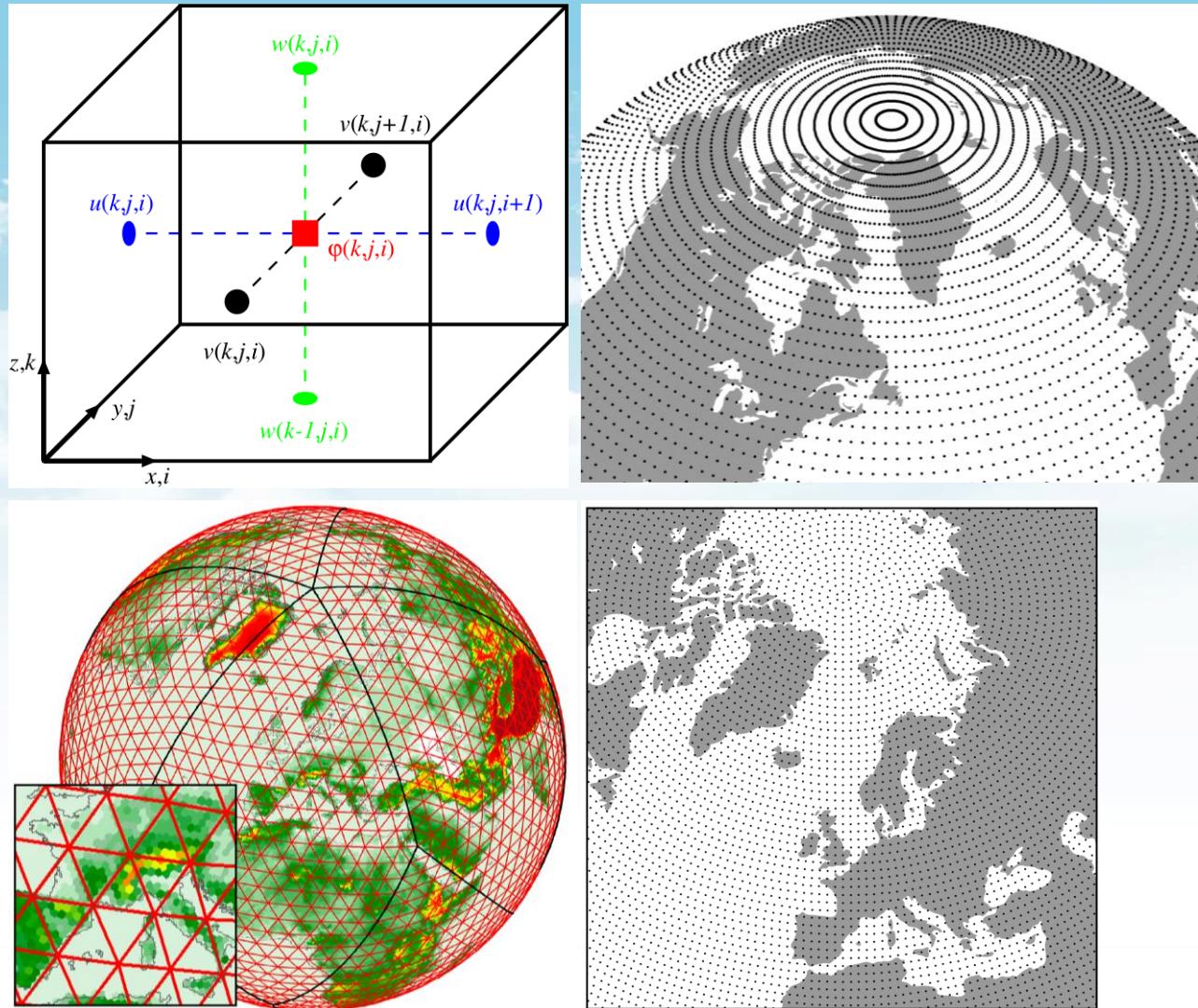
- Модели атмосферы,
- Модели климата
- Модели Земной системы



Численные модели погоды и климата



Сетки моделей

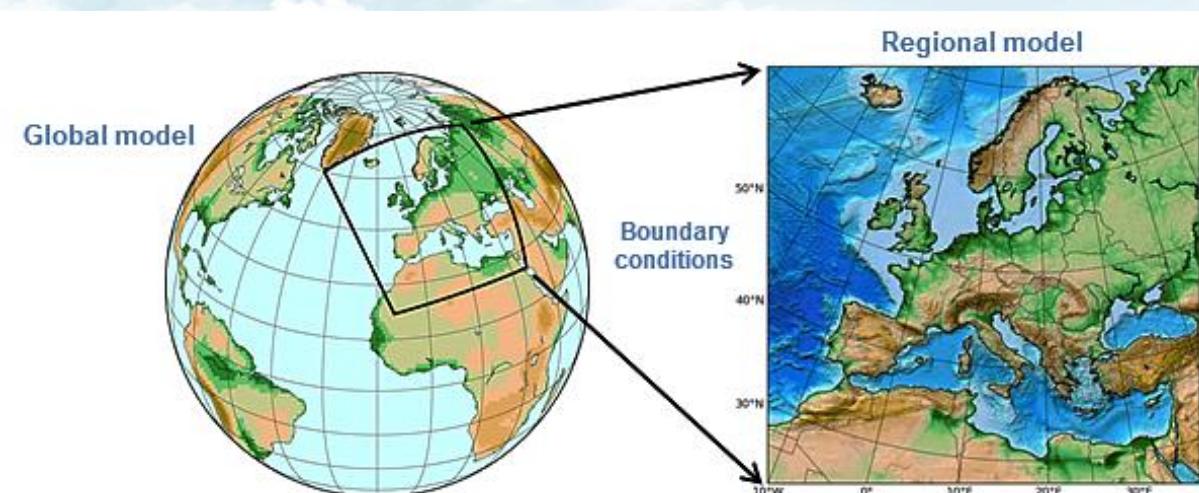


Иерархия моделей атмосферы

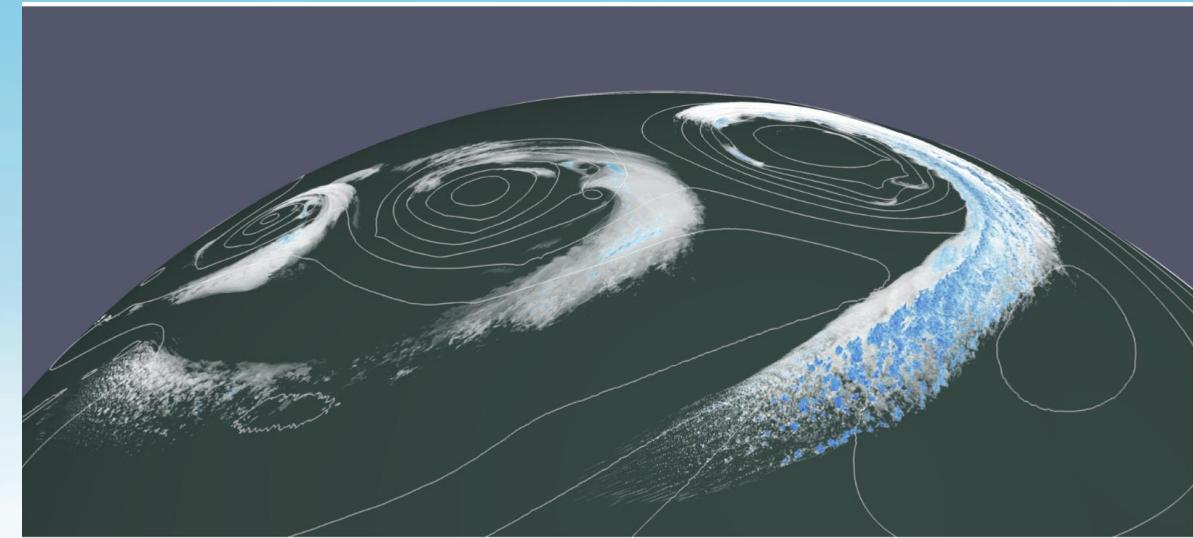
Глобальные модели

Региональные* мезомасштабные модели

Микромасштабные модели (LES/DNS/RANS)



Концепция динамического даунскейлинга

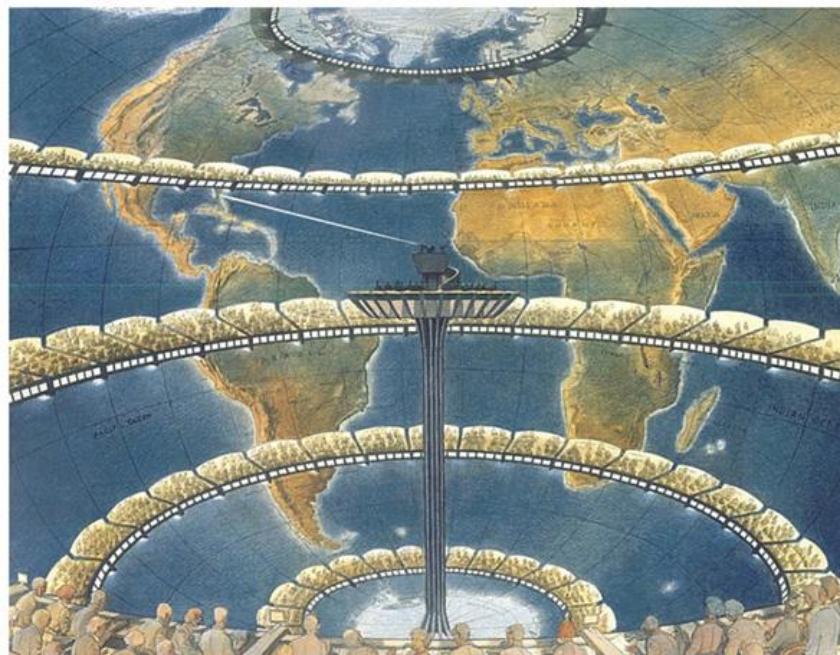


Führer, O. et al. (2018). Near-global climate simulation at 1km resolution: establishing a performance baseline on 4888 GPUs with COSMO 5.0. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1665–1681.

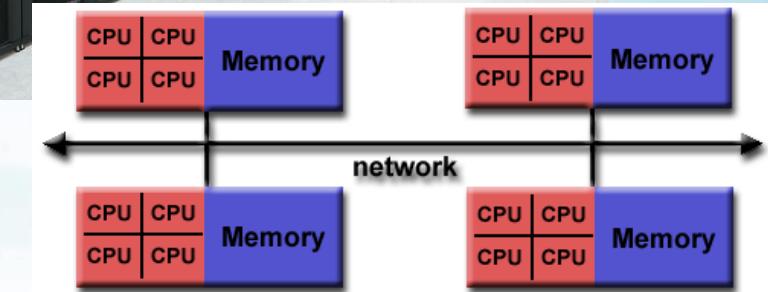
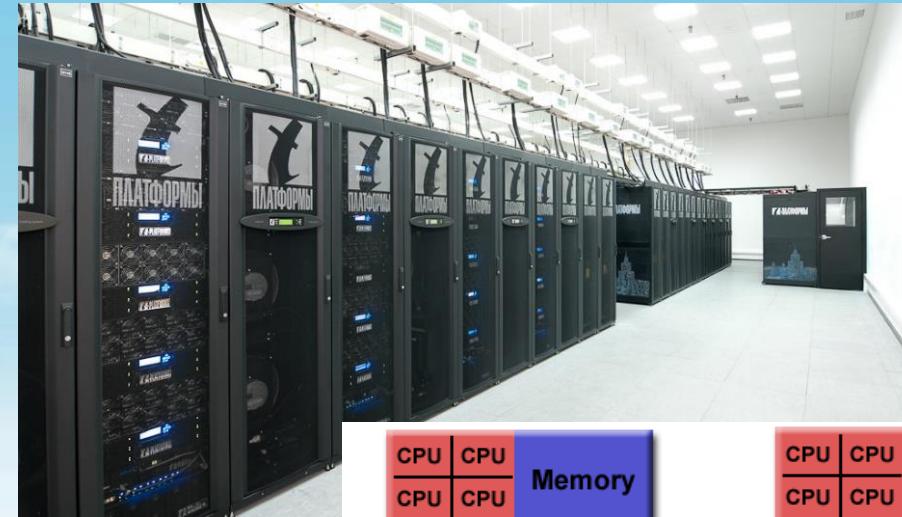
Вопрос вычислительных ресурсов

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!



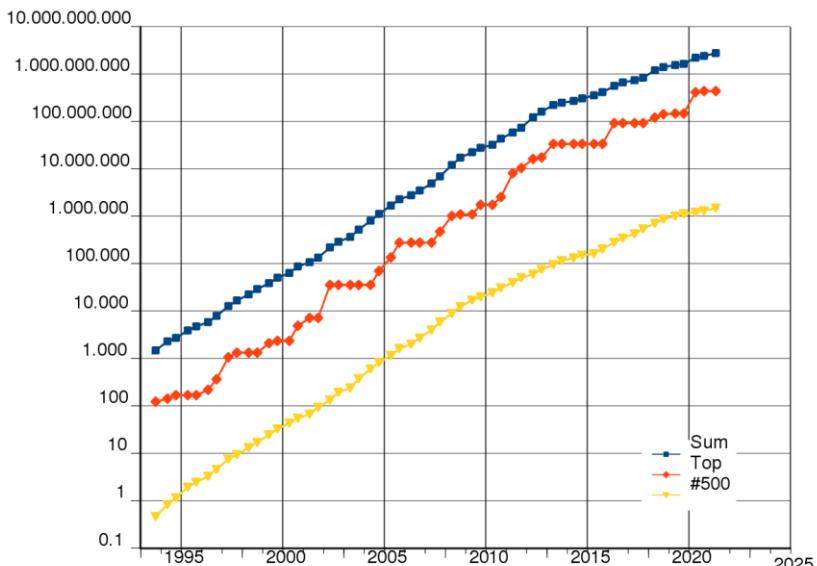
Льюис Фрай Ричардсон и его «фабрика прогнозов»



Распаралеливание MPI
в современных суперкомпьютерах

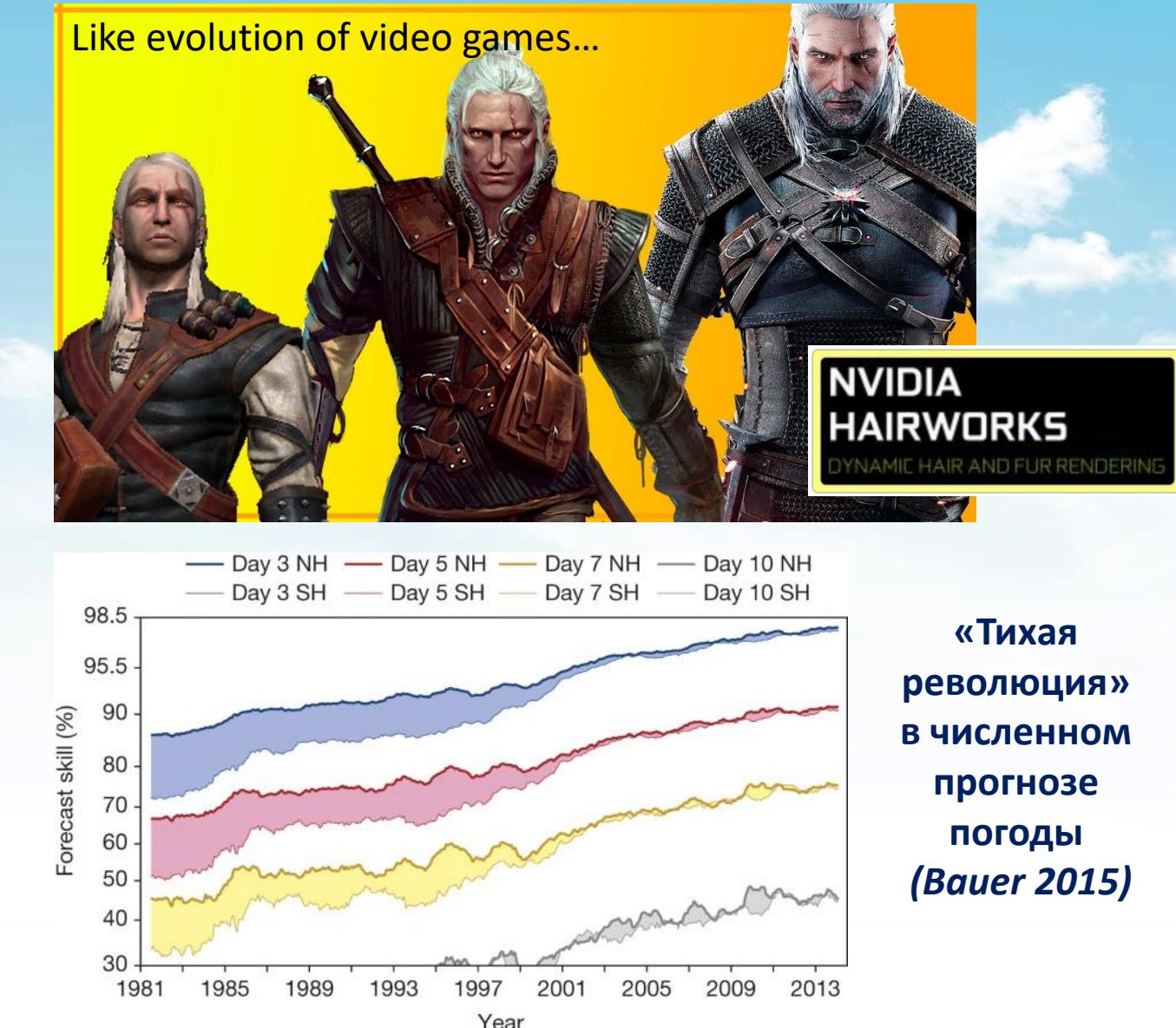
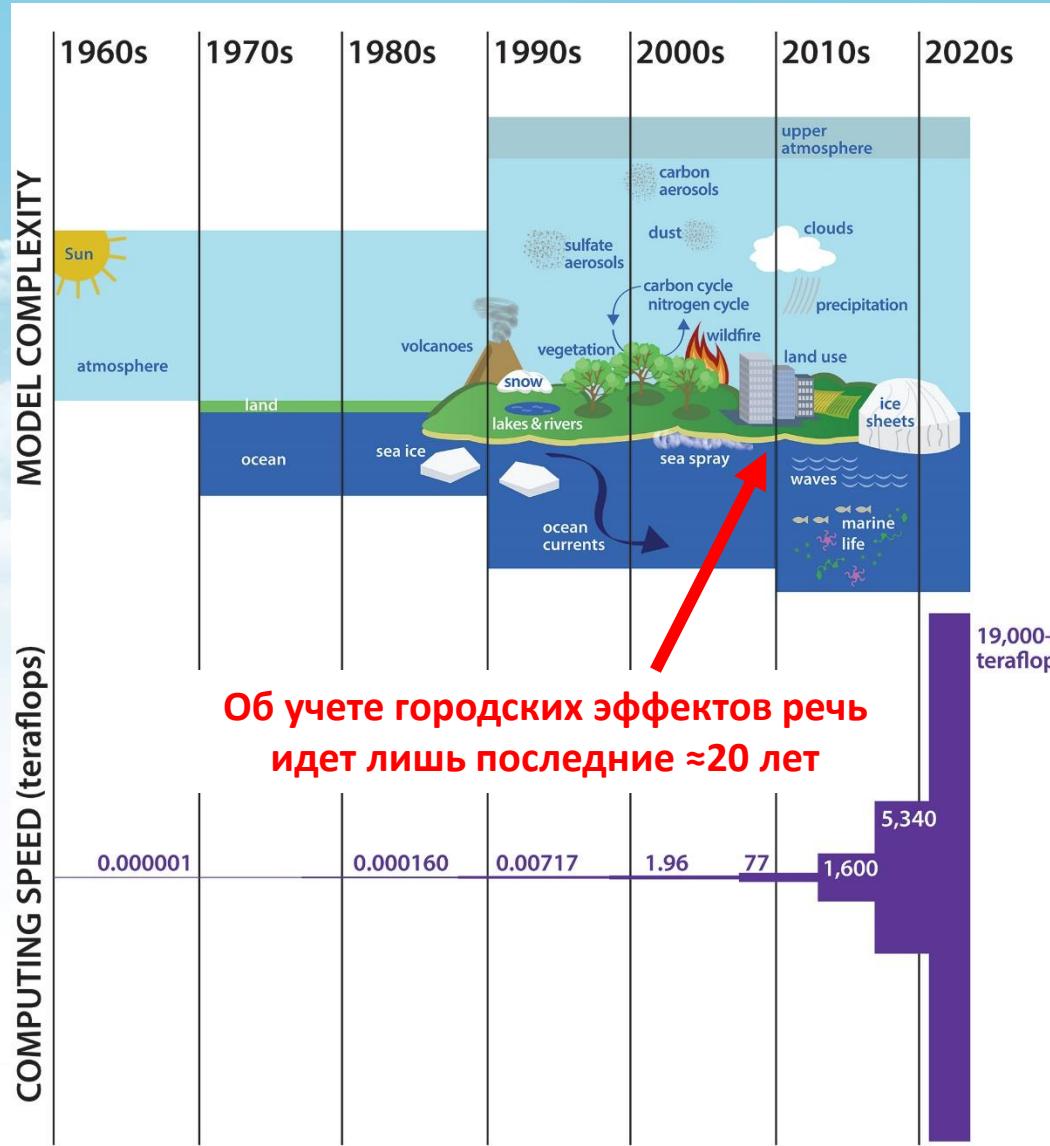
Суперкомпьютеры для суперпрогнозов

- ❑ 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

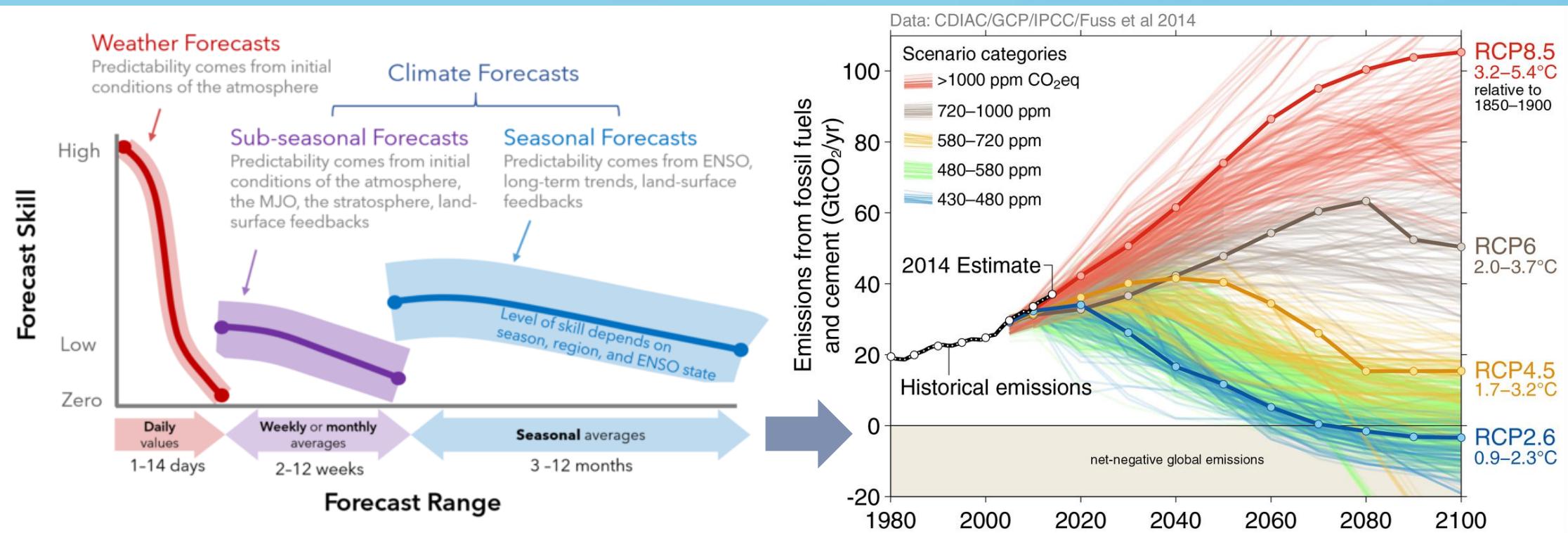


Rank	System	Cores	Rmax [TFlop/s]	Rpeak [TFlop/s]	Power (kW)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA 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	Sierra - 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	Maru - 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	Taranis - 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	Cray XC40 , 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	Christofari - 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	Lomonosov 2 - 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

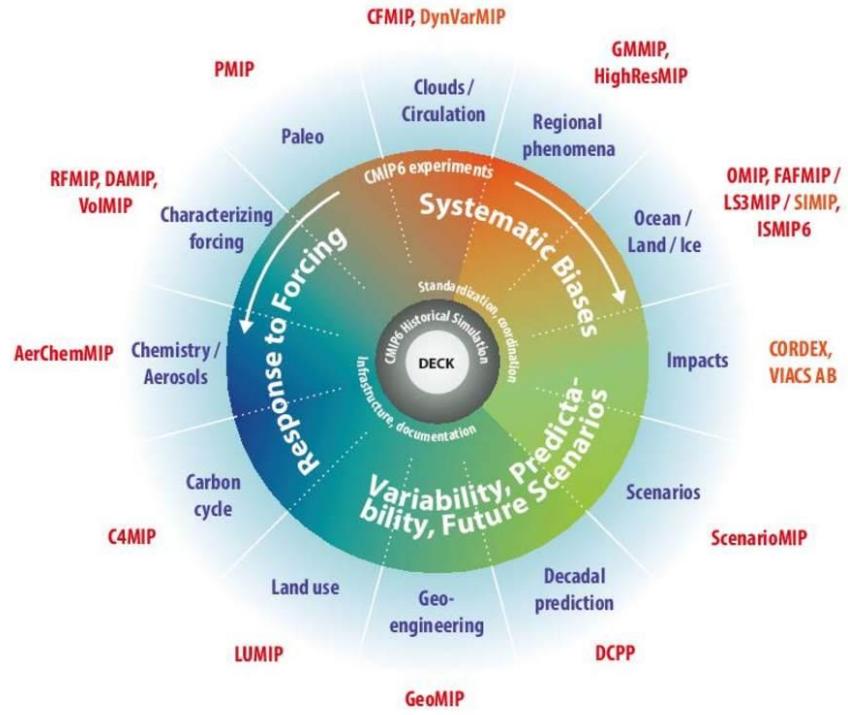
Data Assimilation= Model + Observations

Re-Analysis Analysis

Past Present

Моделирование климата

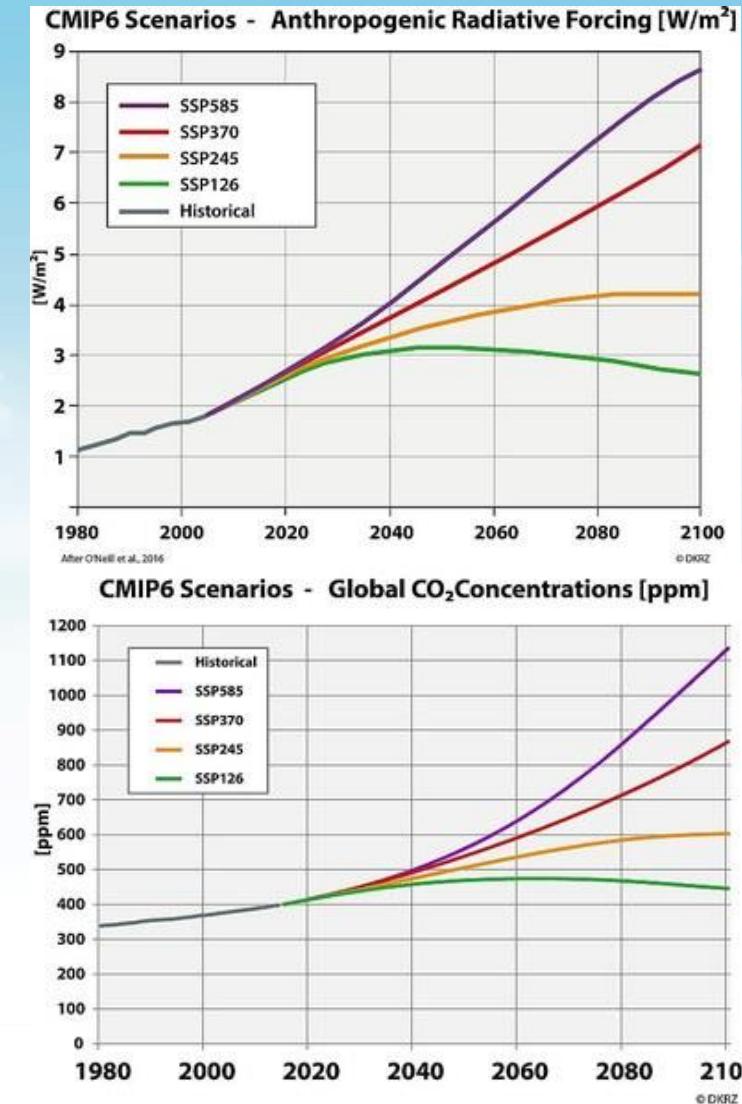
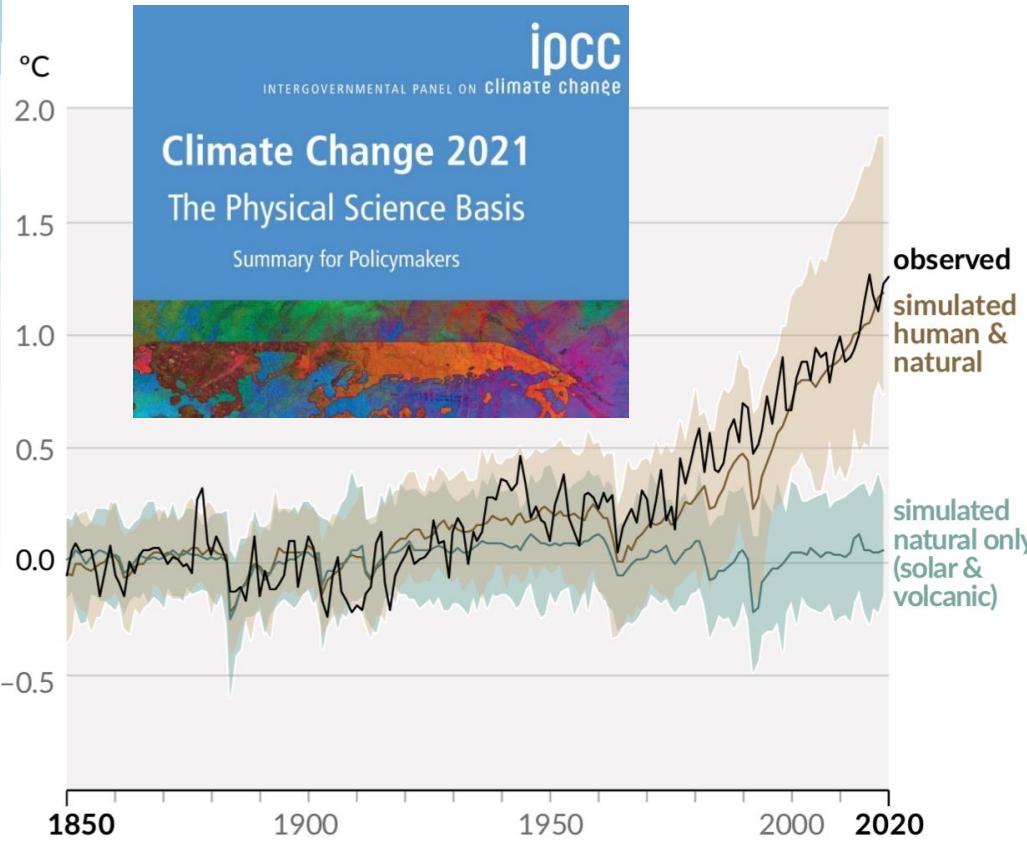
Международный проект сравнения
объединенных моделей (Coupled Model
Intercomparison Project, CMIP6)
<https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/>



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)

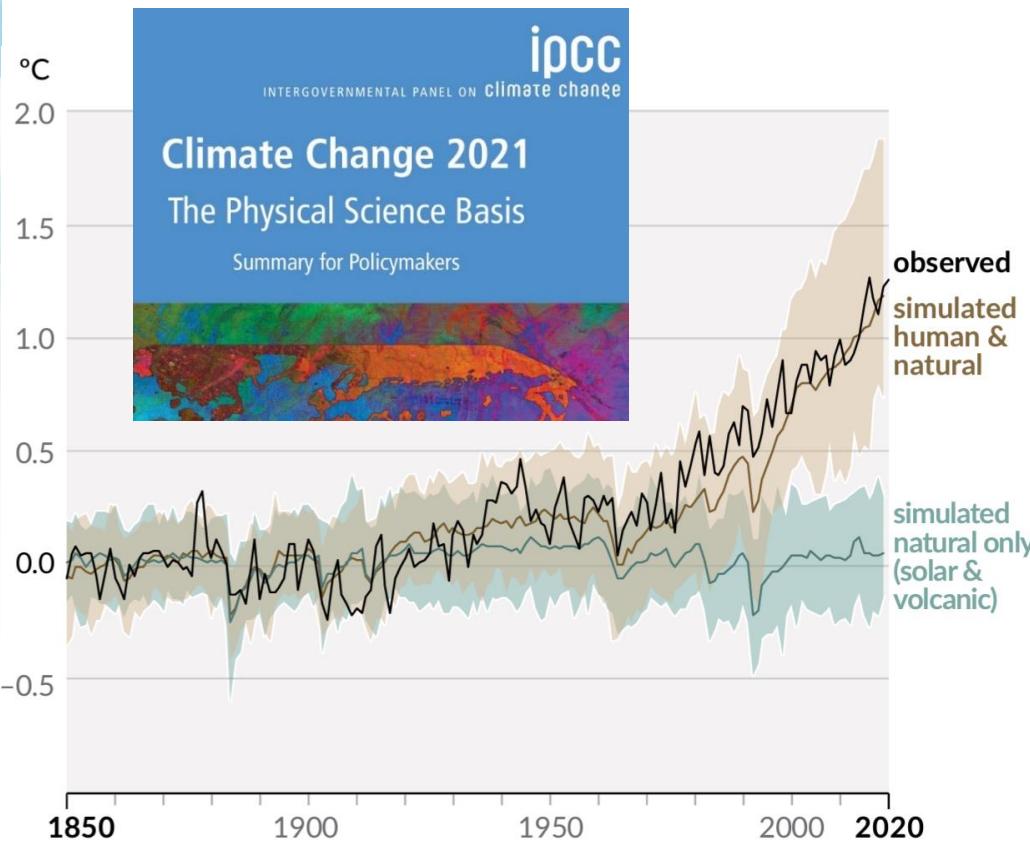
Моделирование климата

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

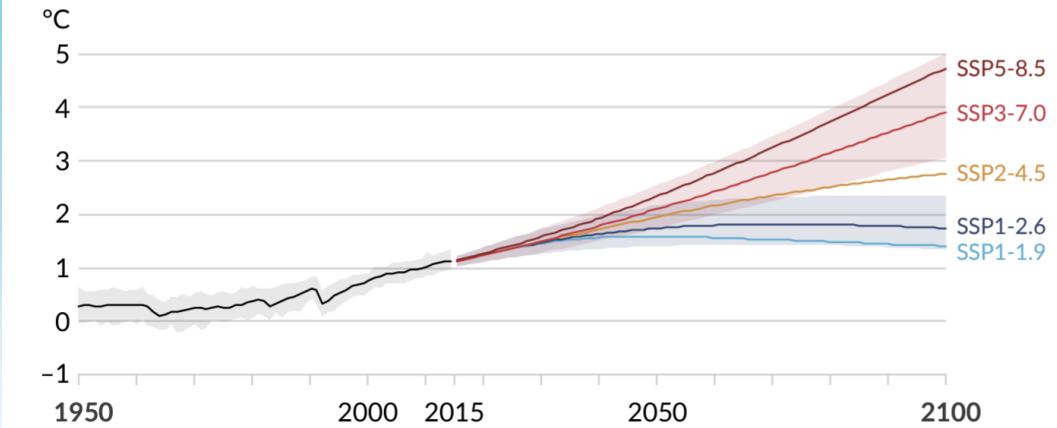


Моделирование климата

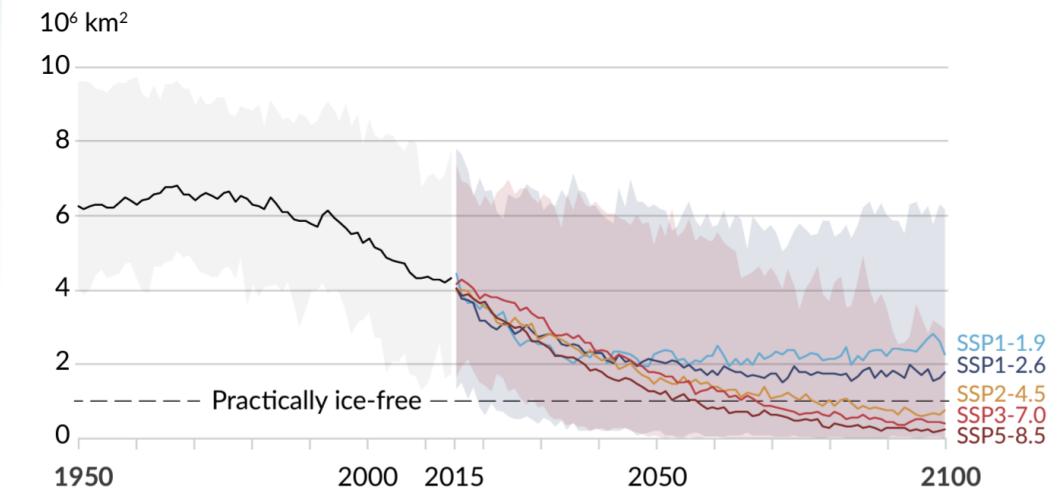
Межправительственная группа экспертов
по изменению климата (МГЭИК),
<https://www.ipcc.ch/>



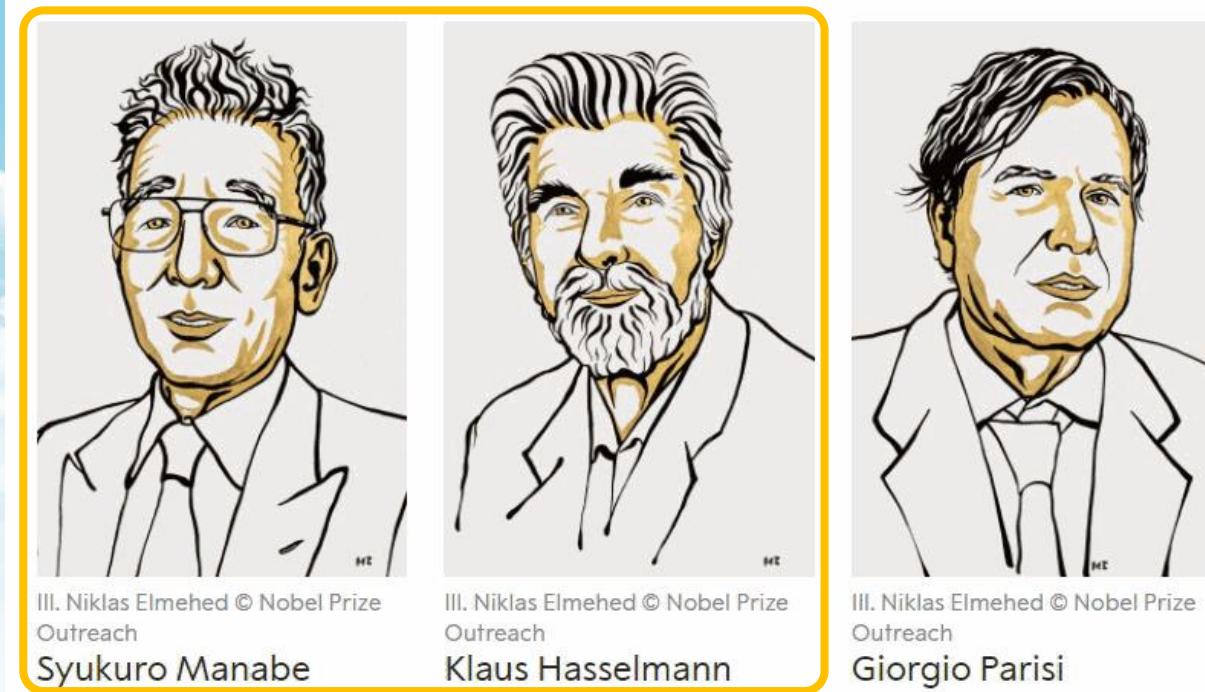
(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



(b) September Arctic sea ice area

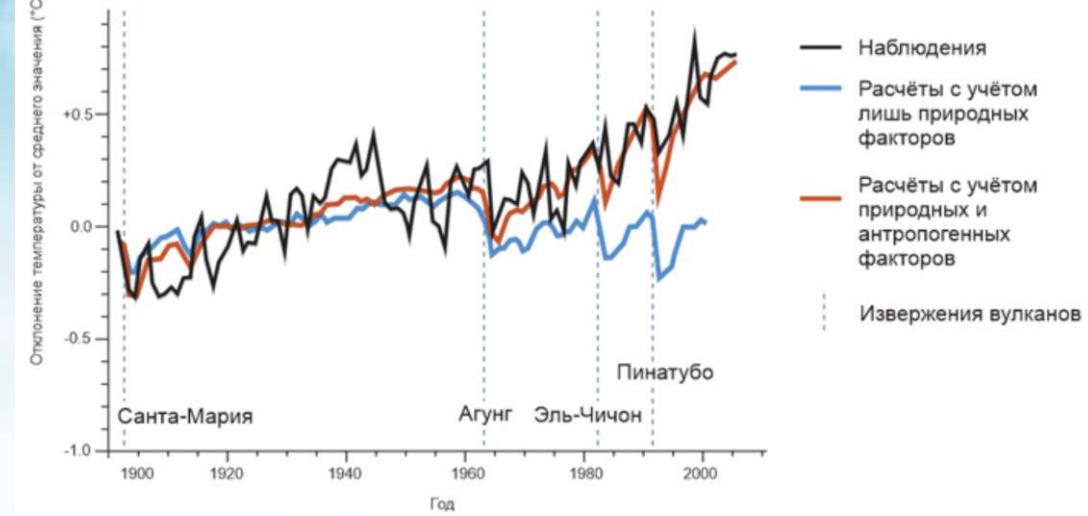


Моделирование климата



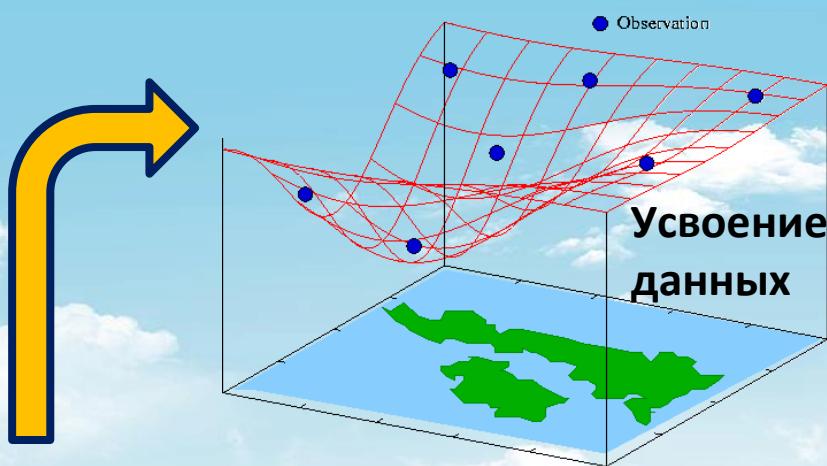
Климатические отпечатки пальцев

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 ($^{\circ}\text{C}$)

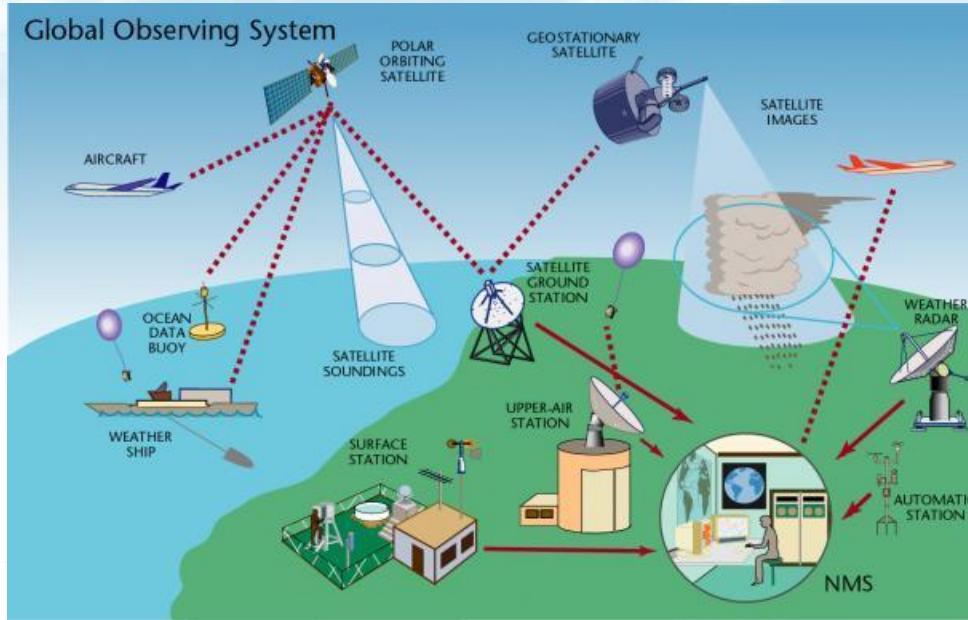


Нобелевская премия по физике 2021 «за моделирование физики климата Земли, математическое описание изменчивых систем и точное предсказание глобального потепления».

Прогноз погоды



Усвоение
данных



Глобальная система наблюдений



* на самом деле нет (пока)

Модель атмосферы



Суперкомпьютер

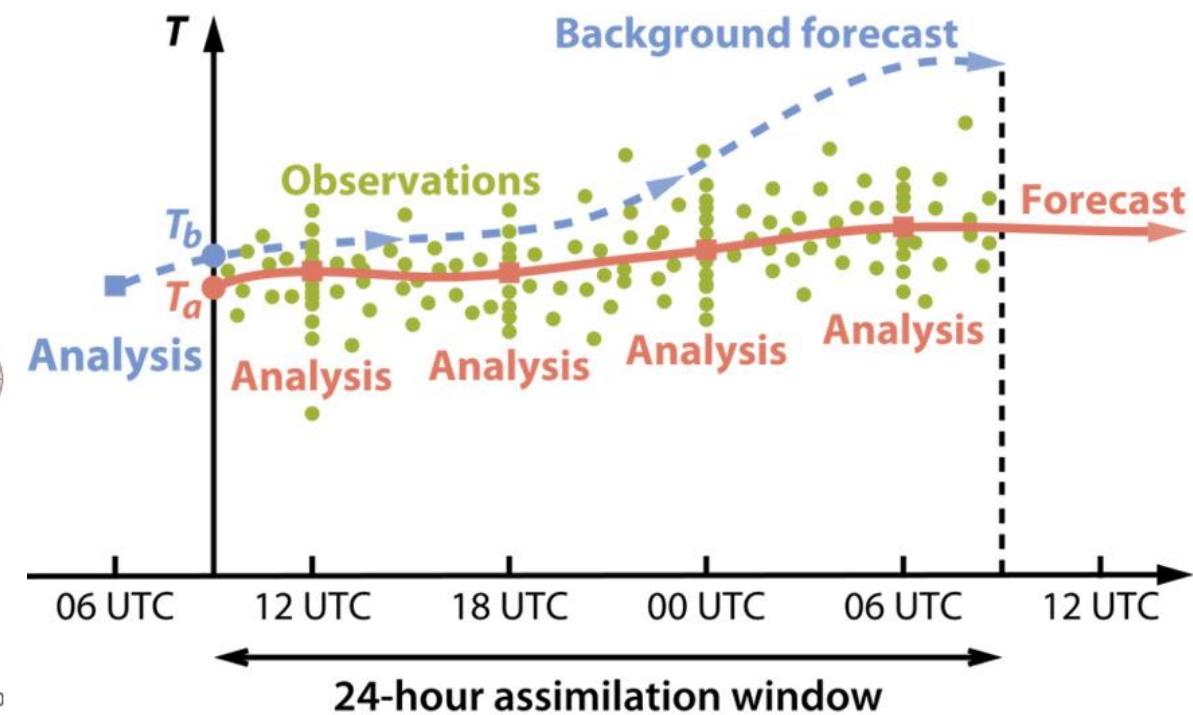
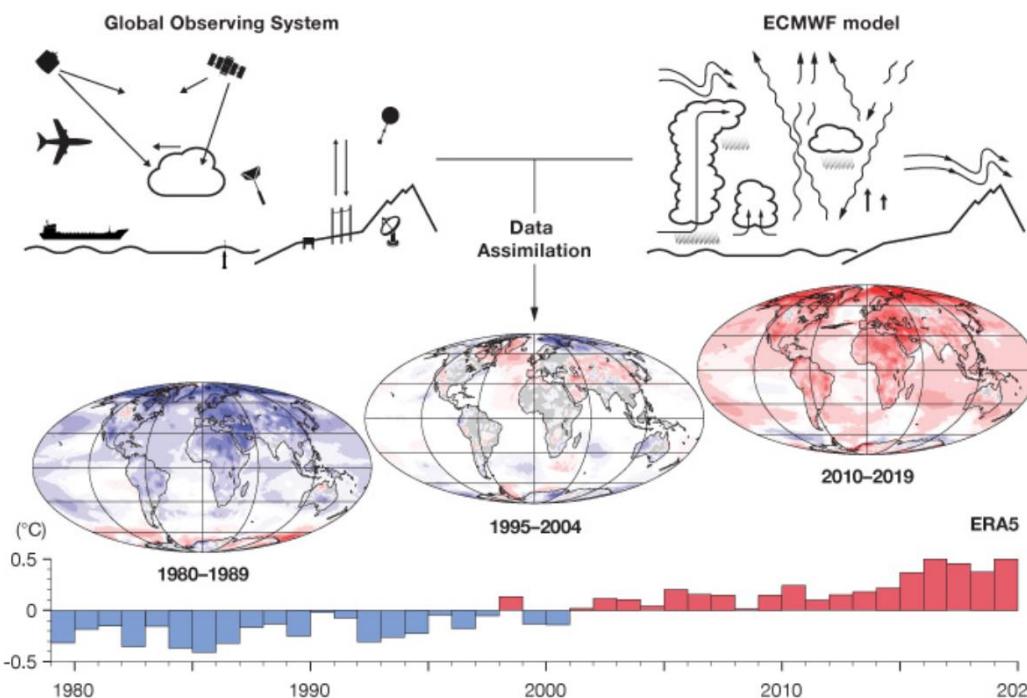


Прогноз-полуфабрикат

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

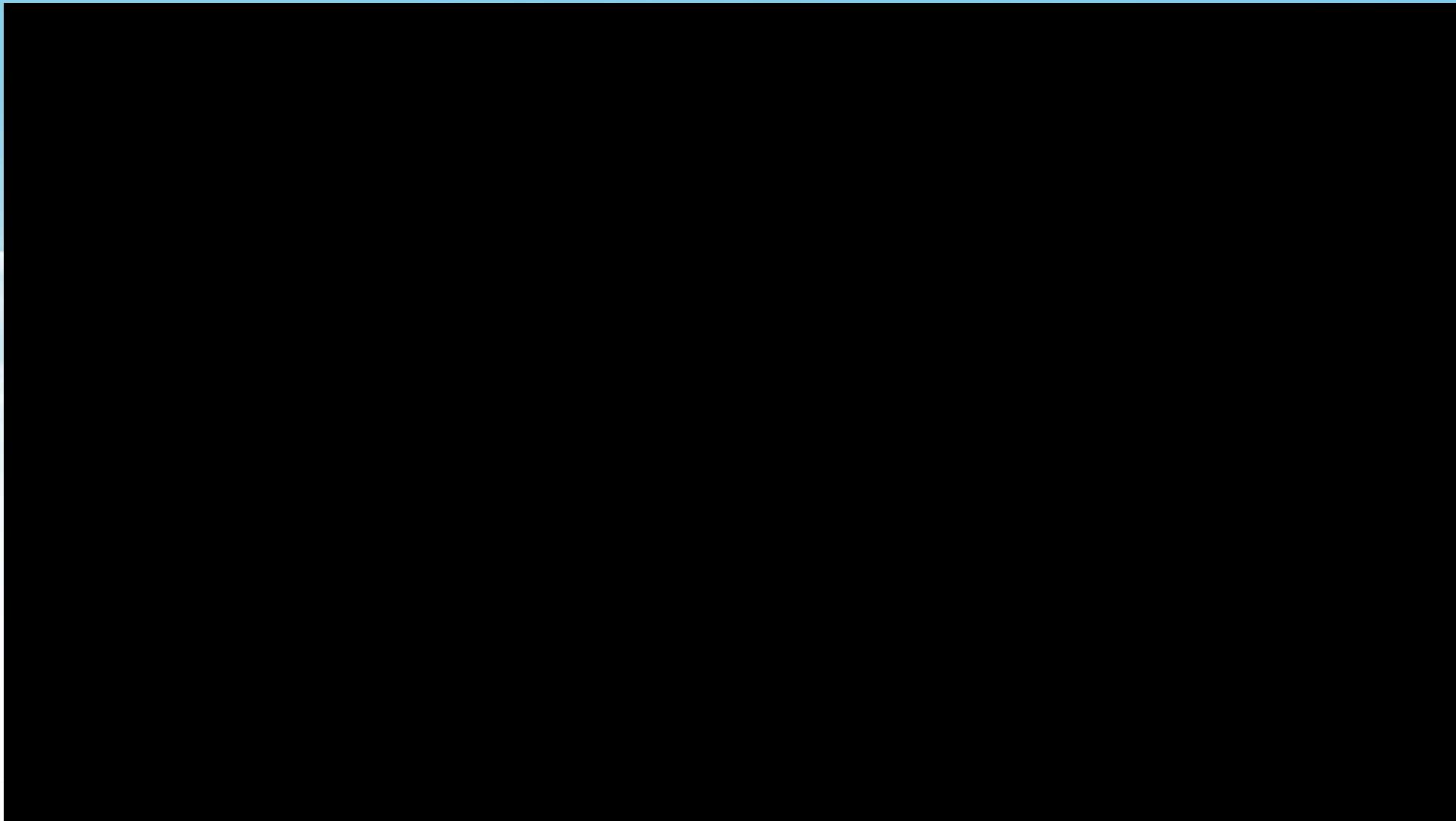
Система усвоения данных для создания реанализа



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**.

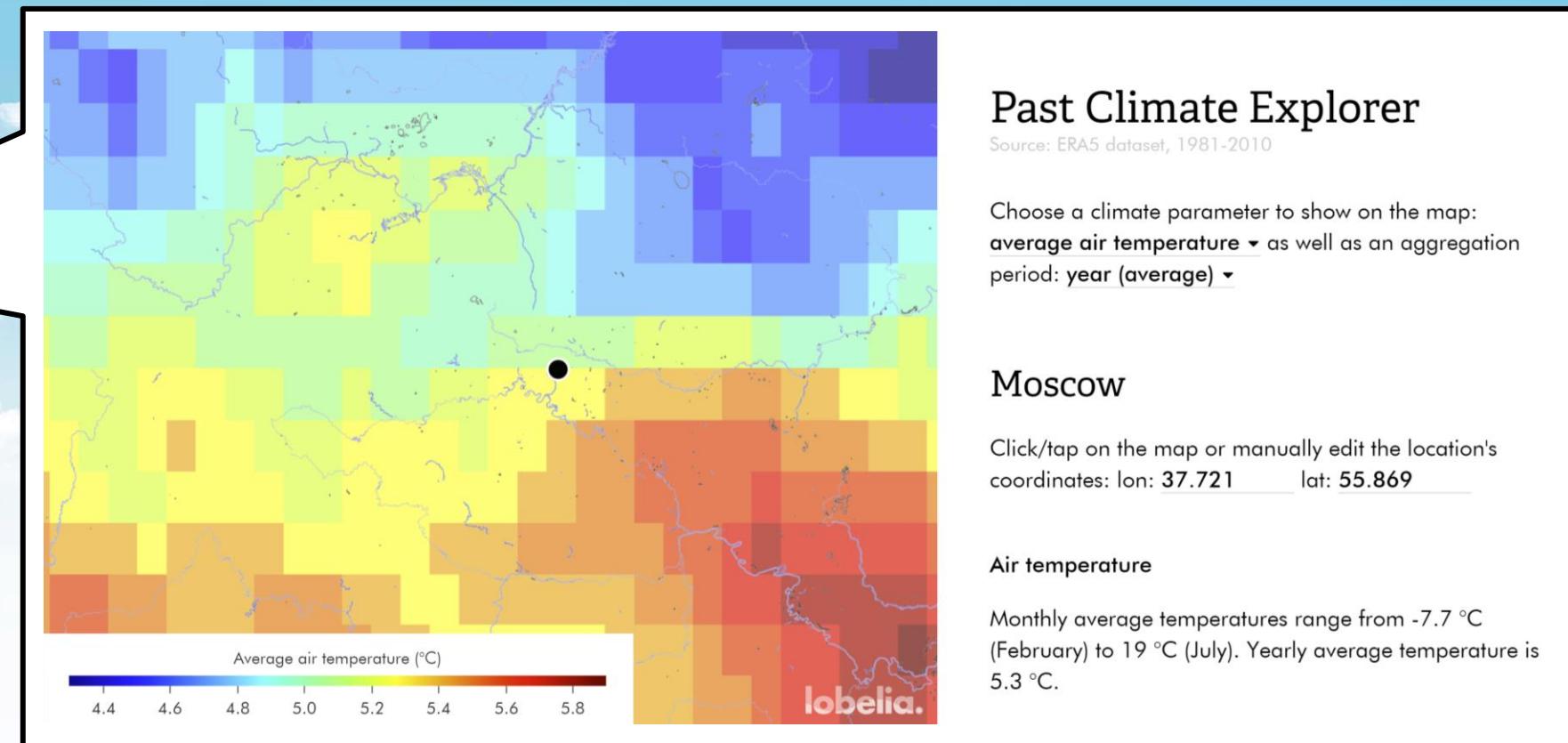
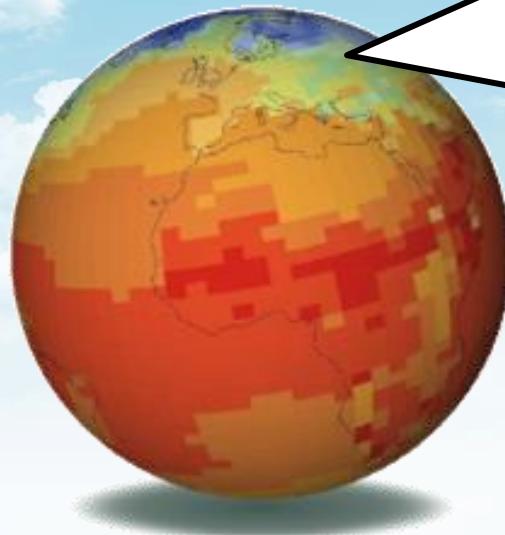


Атмосферные реанализы



Города в моделях погоды и климата

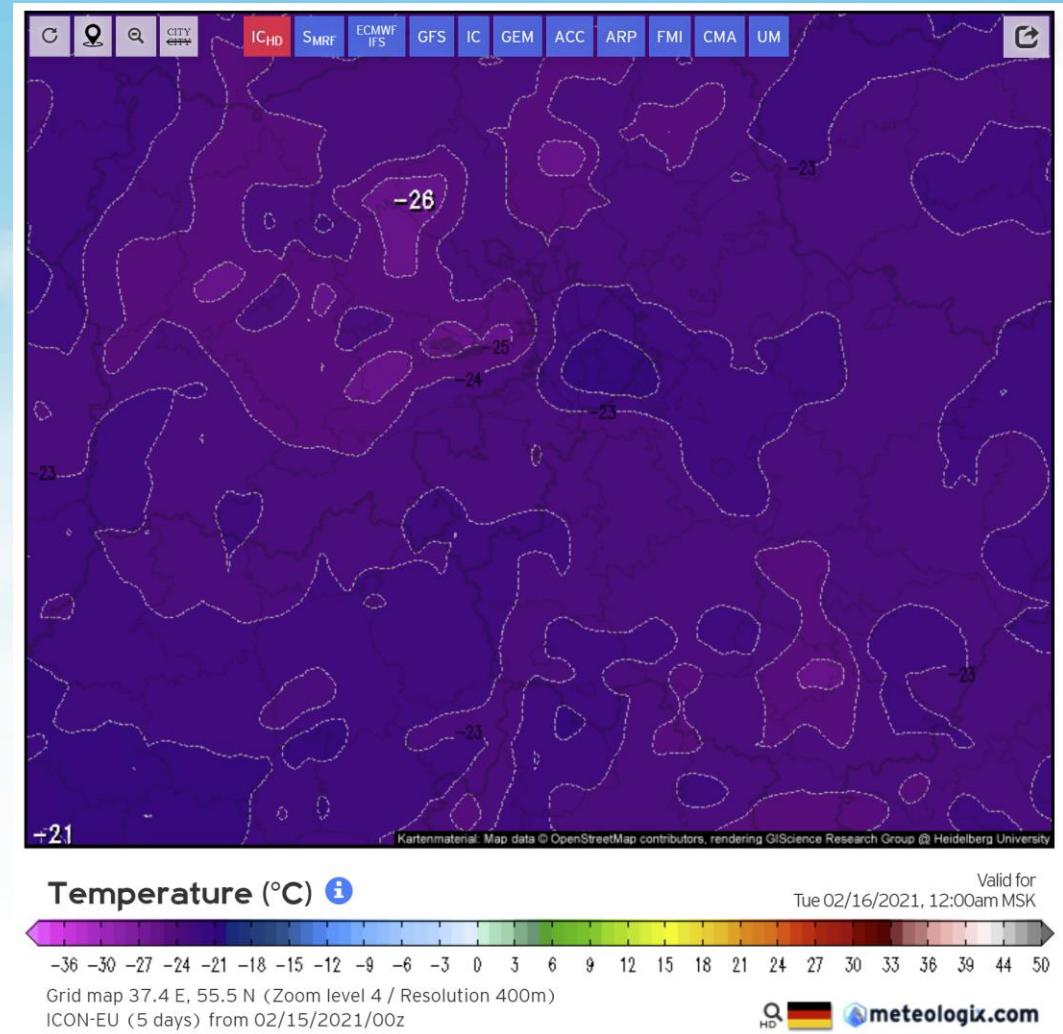
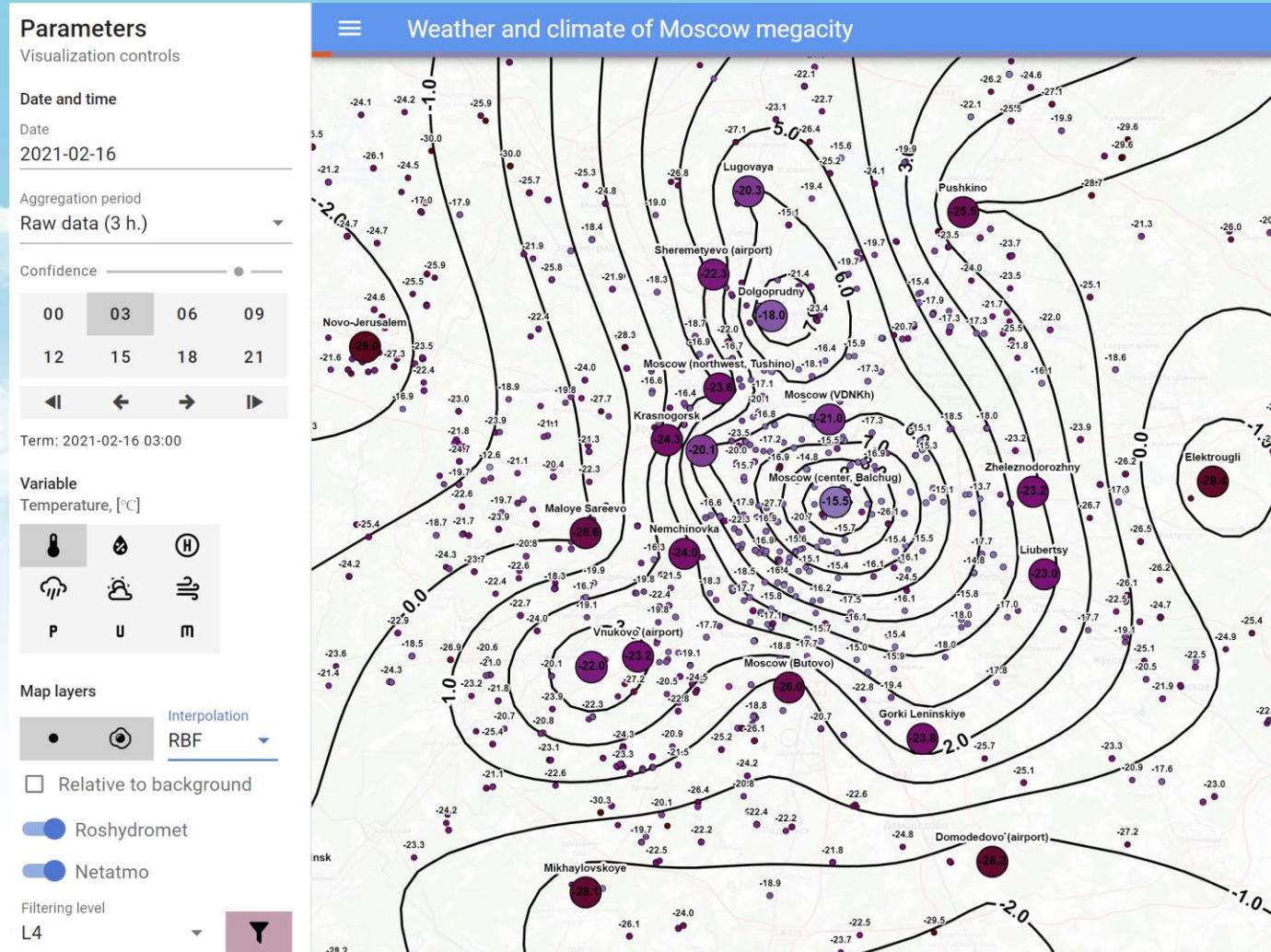
Проблема учета городов в моделях



<https://era5.lobelia.earth/>

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

Проблема учета городов в моделях



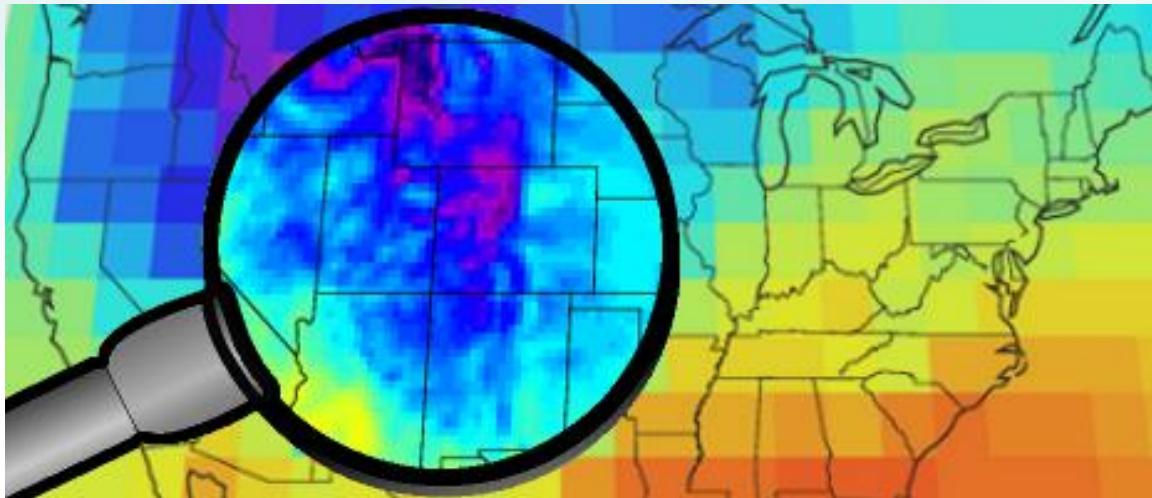
<http://93.180.9.222/uclim/#/>

<https://meteologix.com/>

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

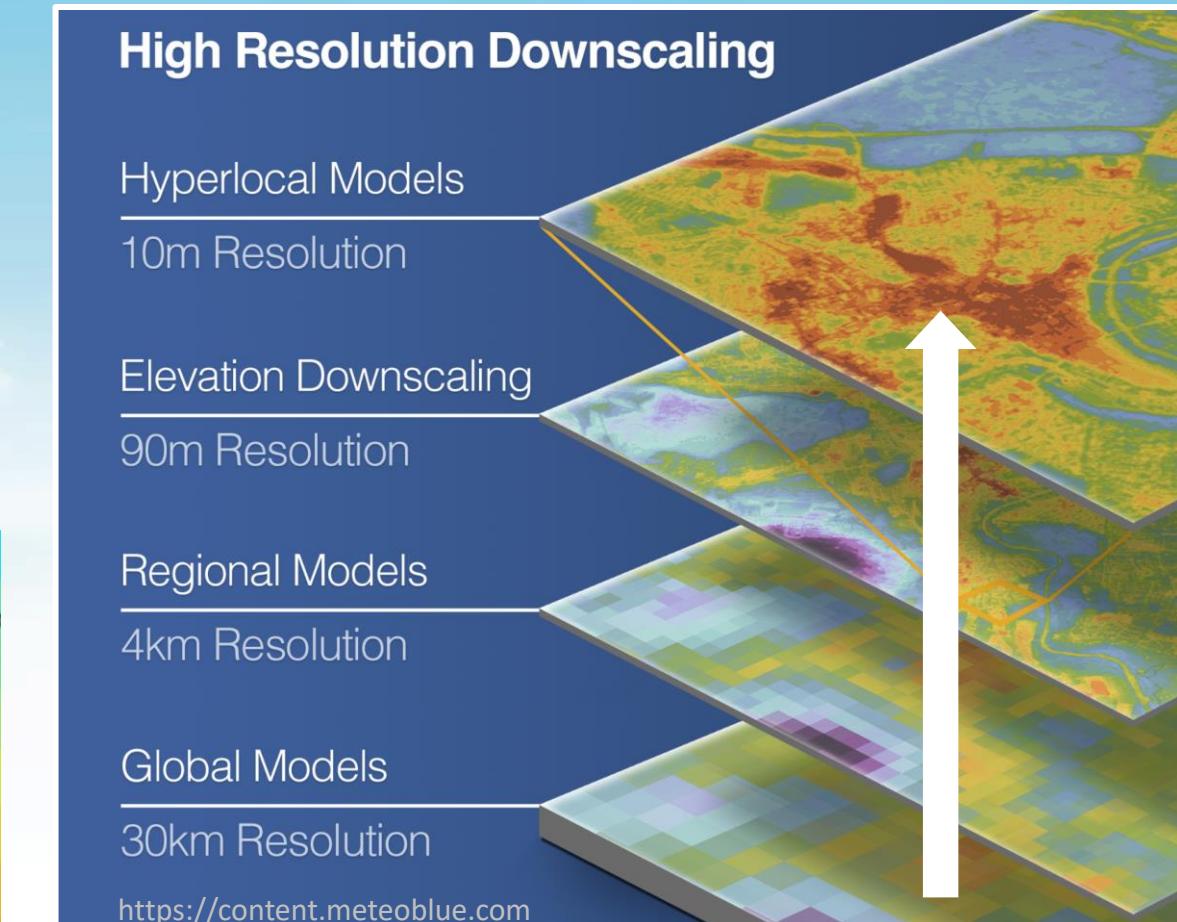
Regional Models

4km Resolution

Global Models

30km Resolution

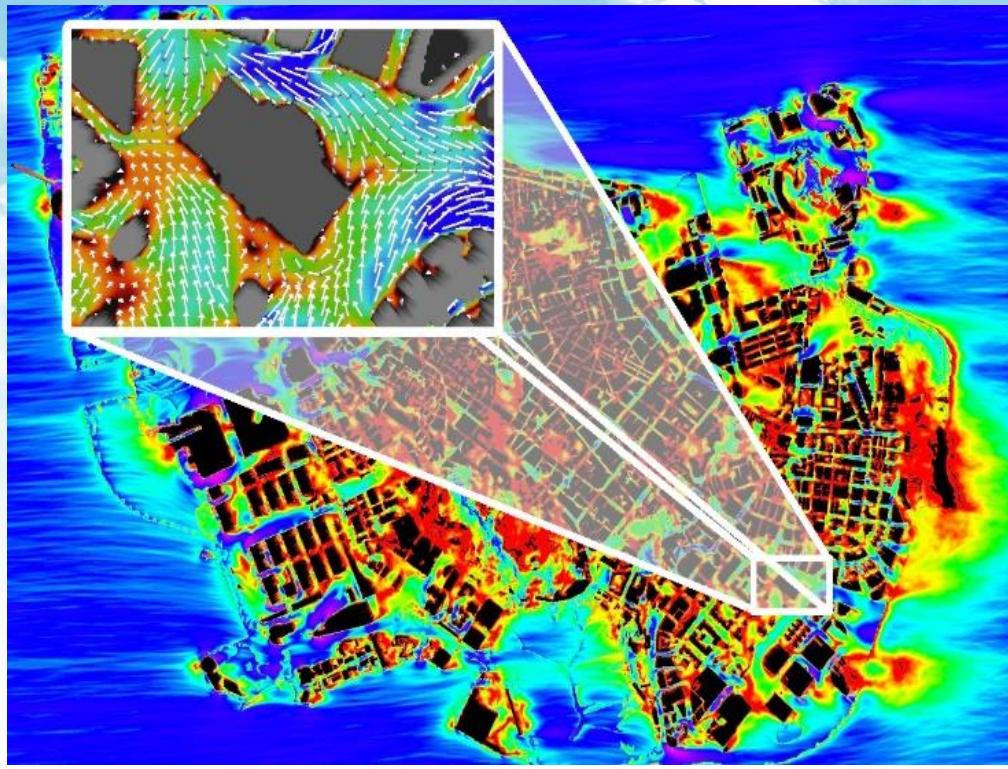
<https://content.meteoblue.com>



Описание города в микро- и мезомоделях

Микромасштабные модели

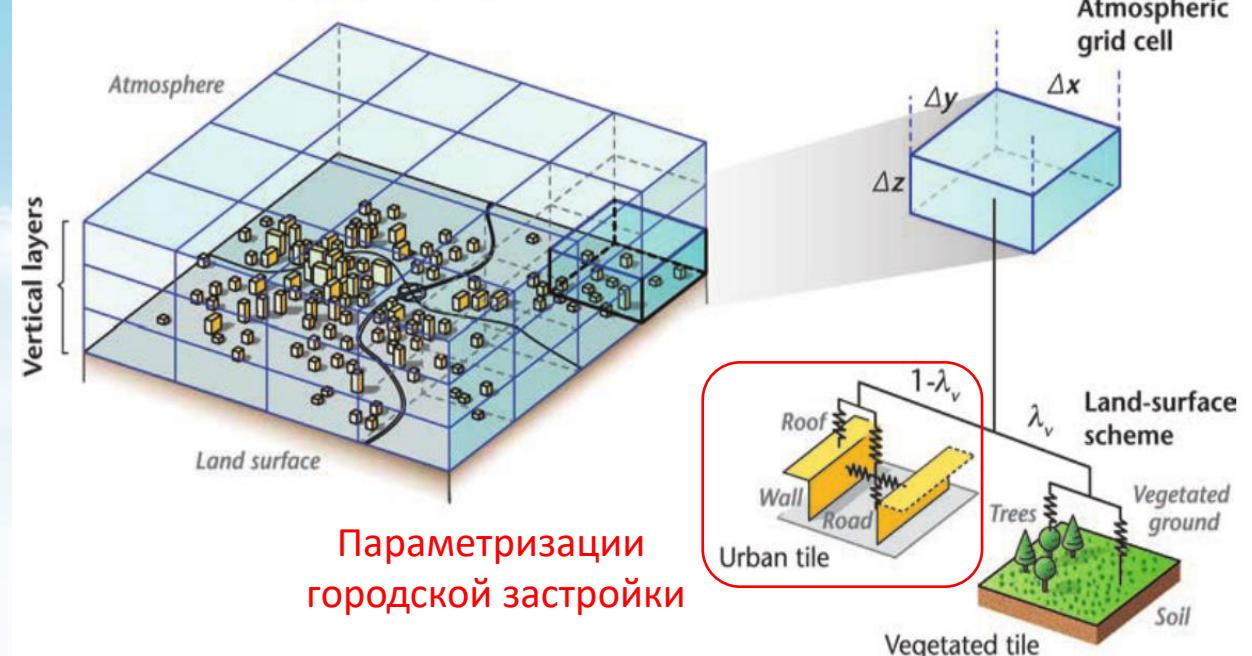
(шаг сетки: первые метры)



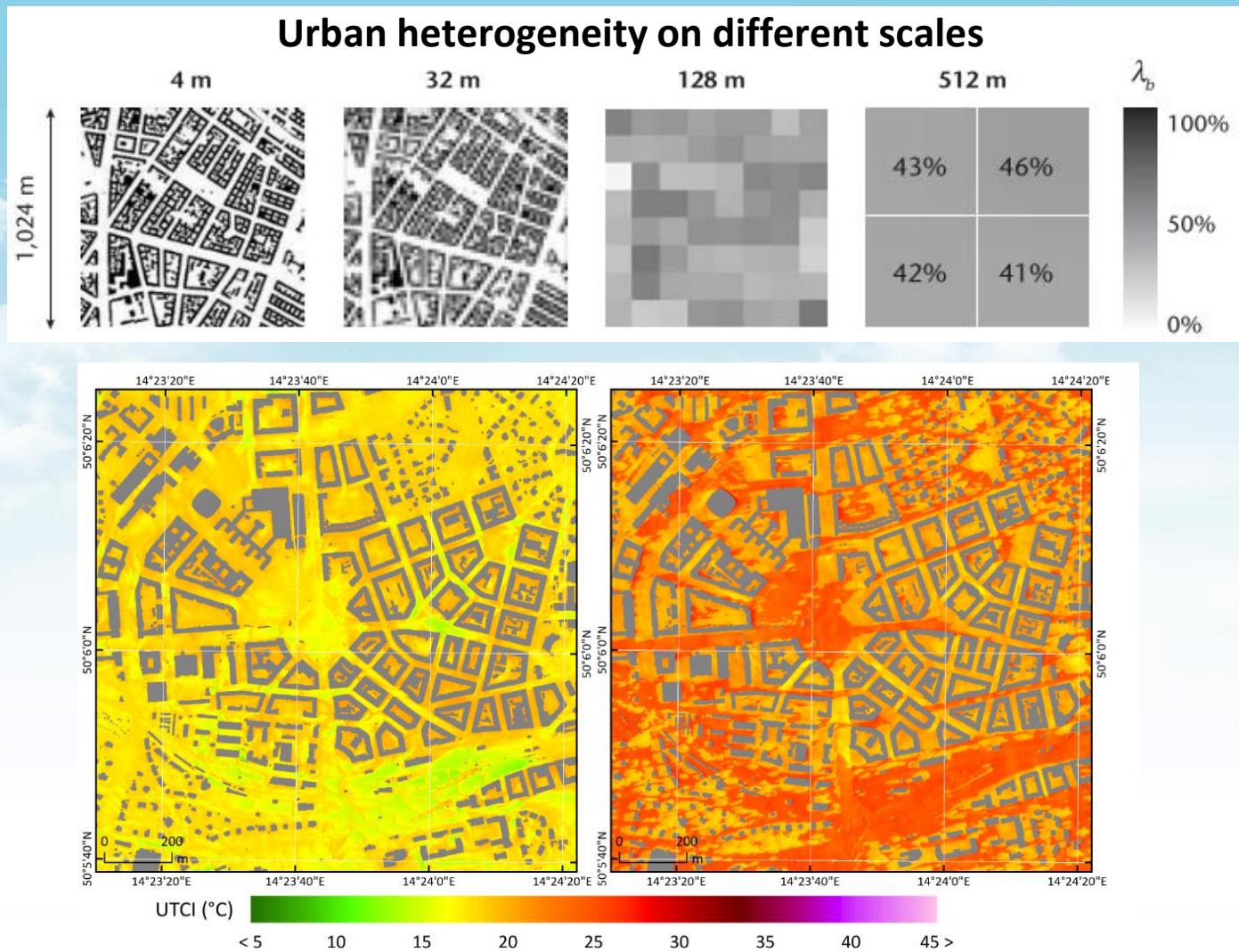
ENVI-MET

Мезомасштабные модели

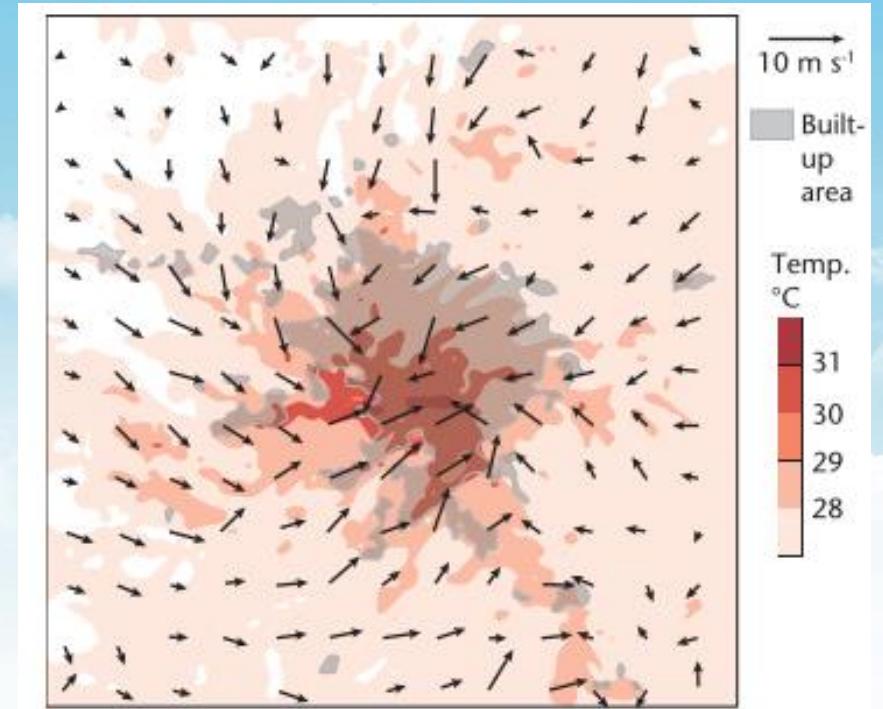
(шаг сетки: первые сотни метров – километры)



Описание города в микро- и мезомоделях



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

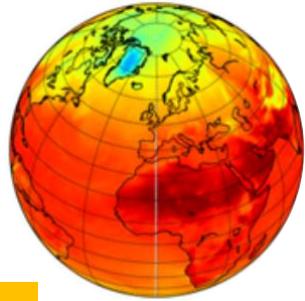


Моделирование острова тепла и
«городского бриза» на масштабе крупного
города, Парижа
([Lemonsu et al., 2002](#))

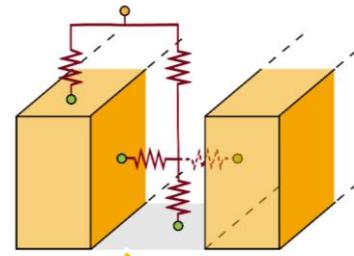
Что нужно для моделирования?

Крупномасштабный форсинг

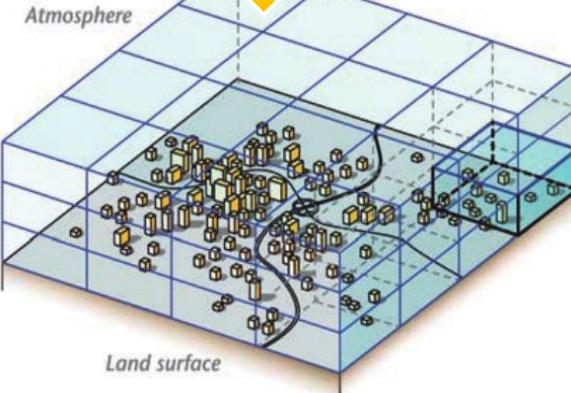
- Реанализ
- Прогноз
- Сценарии изменений климат



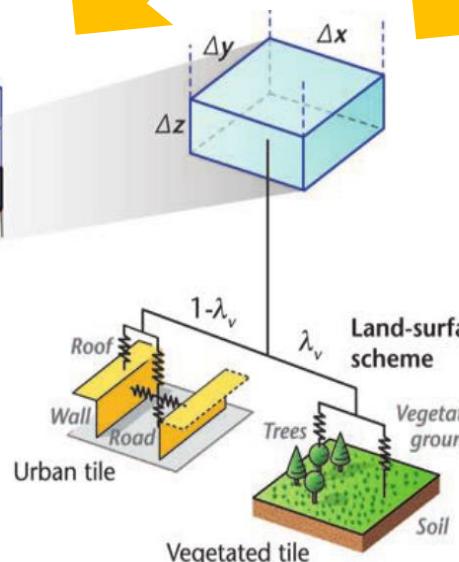
Городская параметризация



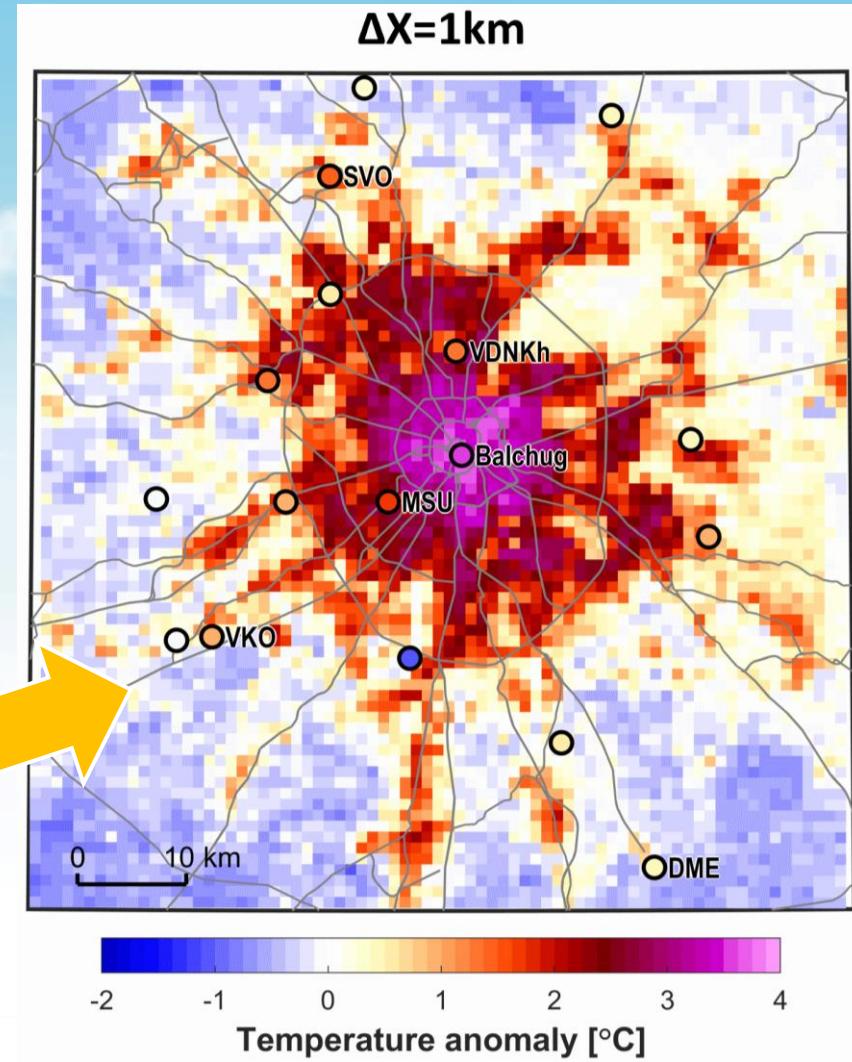
Параметры поверхности и городской среды



Региональная модель атмосферы

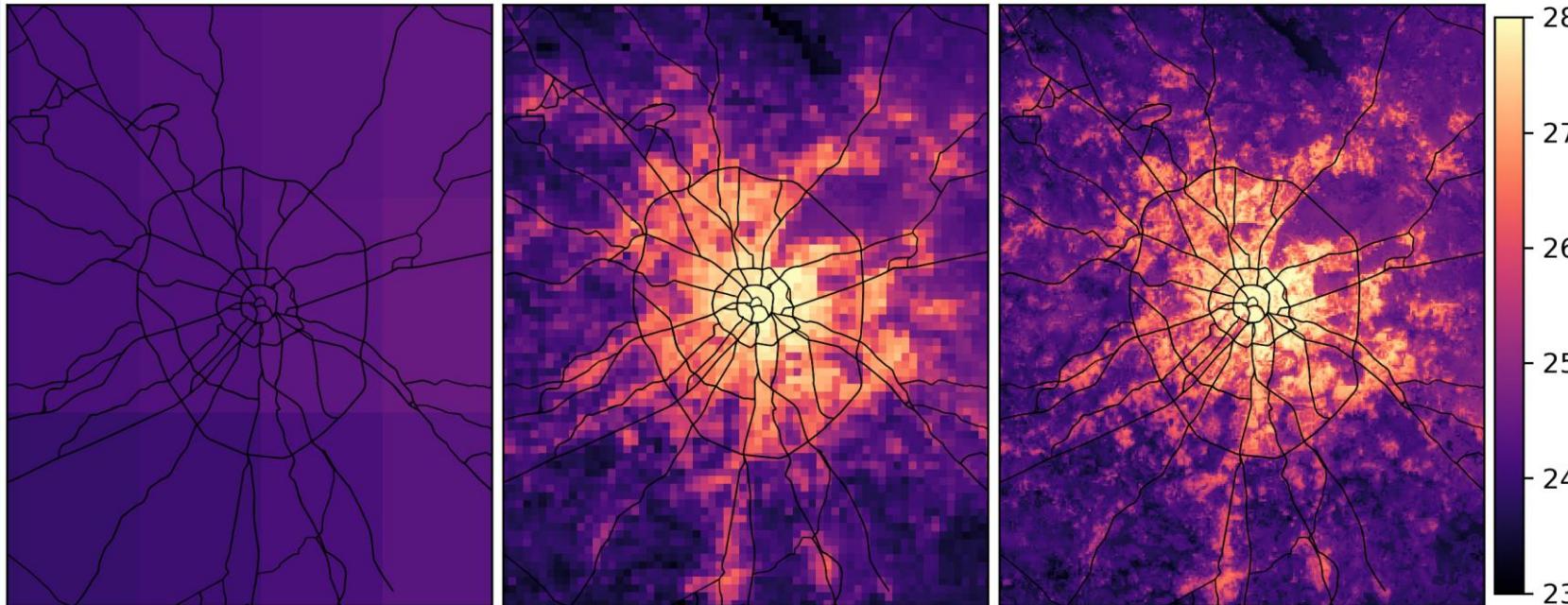


Вычислительные ресурсы



Еще раз про даункейлинг

Температура в Москве во время волны жары в июне 2021 г. (Varentsov et al., 2023)

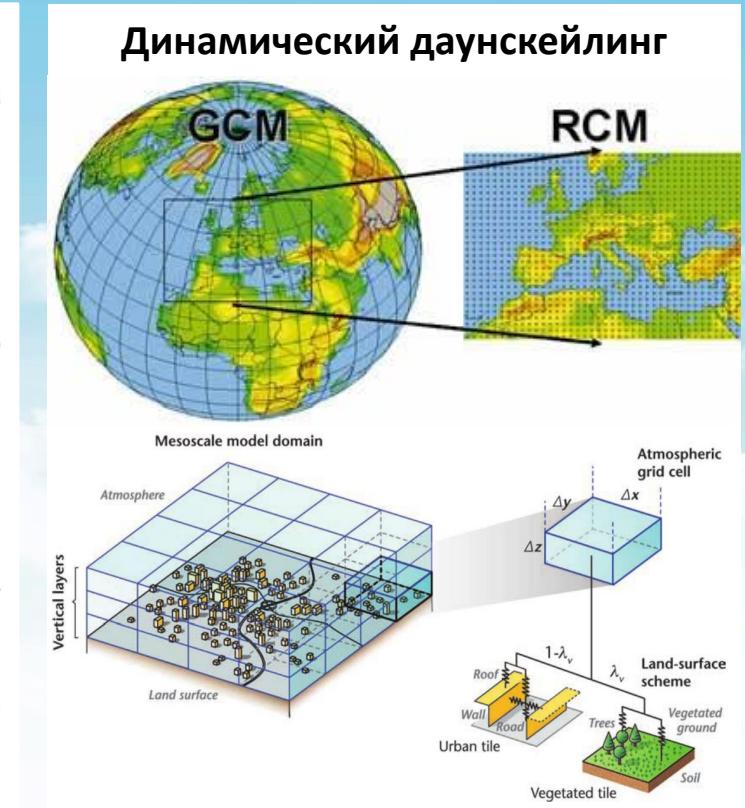


Результаты глобального моделирования (реанализ ERA5, шаг сетки ≈ 30 км)

Региональное моделирование с шагом сетки **1 км**
 ≈ 100 процессоро-часов на 1 модельный день

Региональное моделирование с шагом сетки **250 м**
 ≈ 1000 процессоро-часов на 1 модельный день

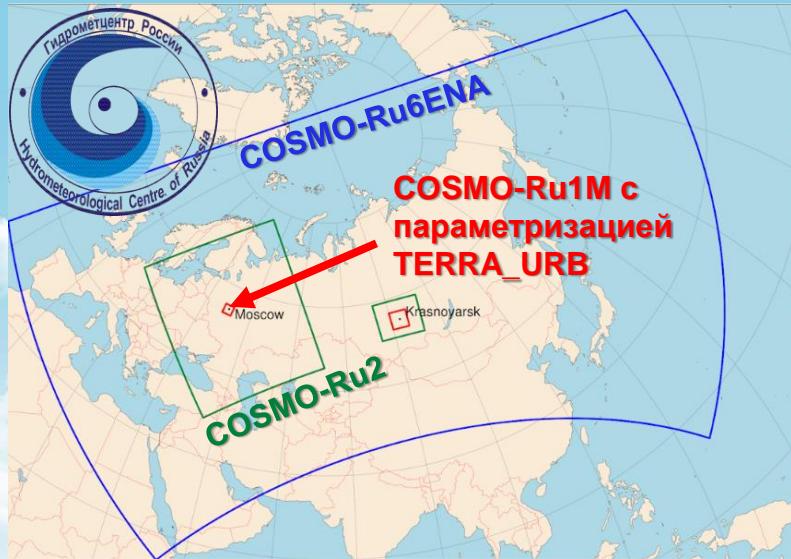
Динамический даунскейлинг





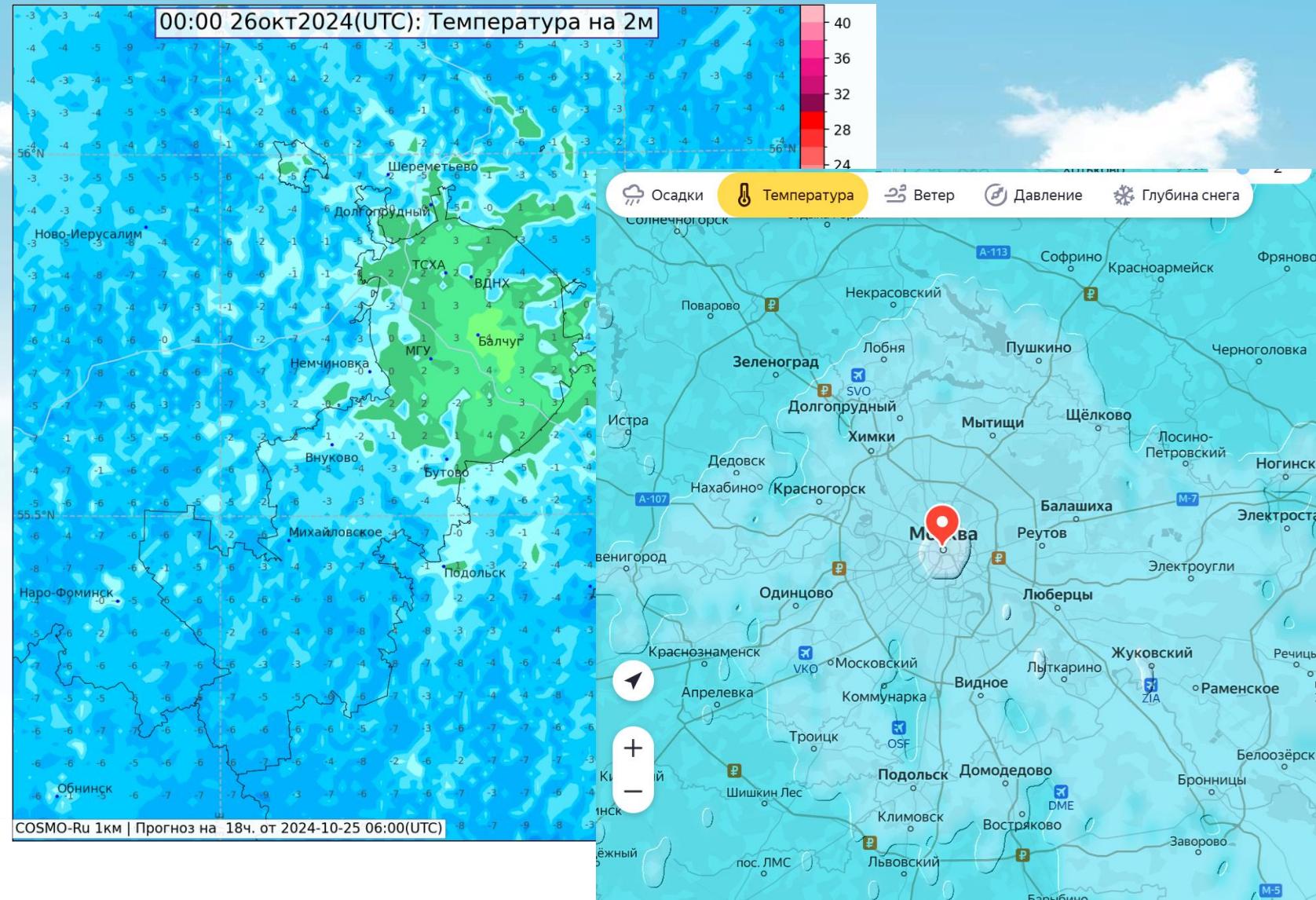
**А что вообще можно делать с
моделями для городов?**

Прогноз погоды



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)

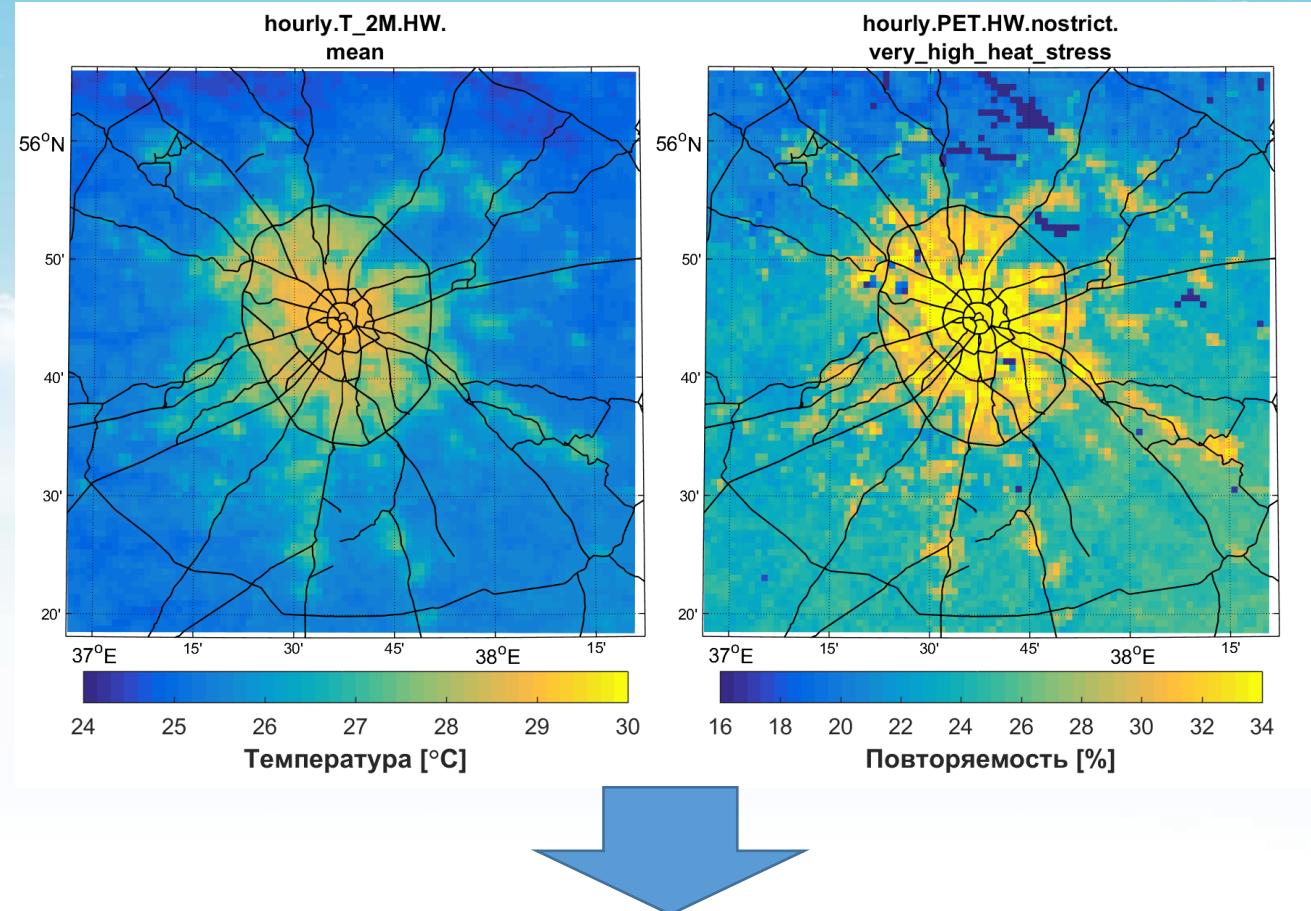
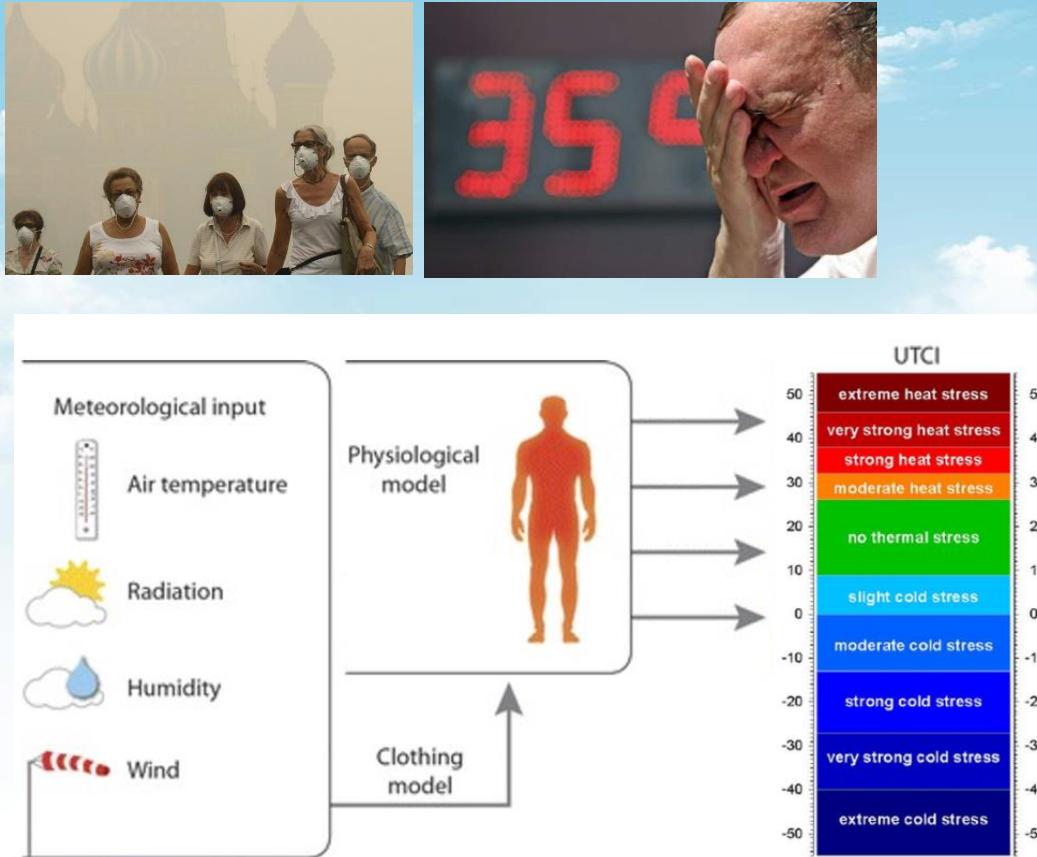


Прикладные и фундаментальные исследования



Применение модели: биометеорология

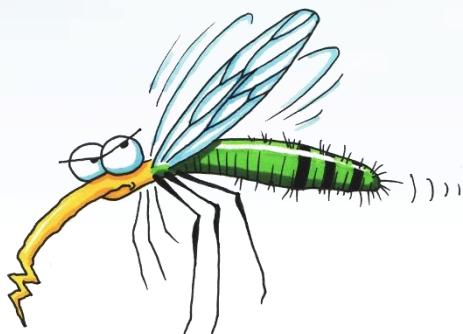
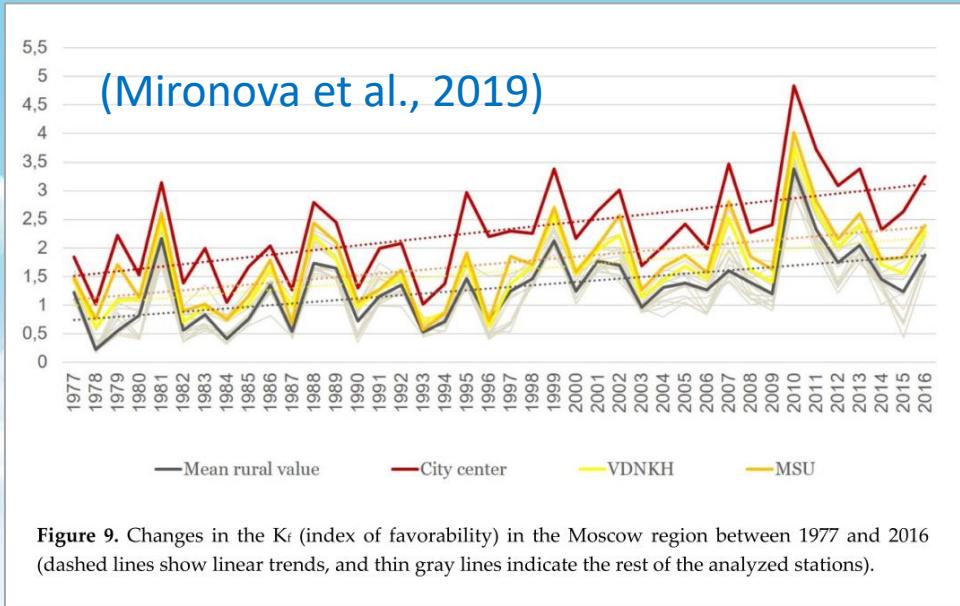
Оценка теплового стресса в Москве во время экстремальной жары 2010 г.



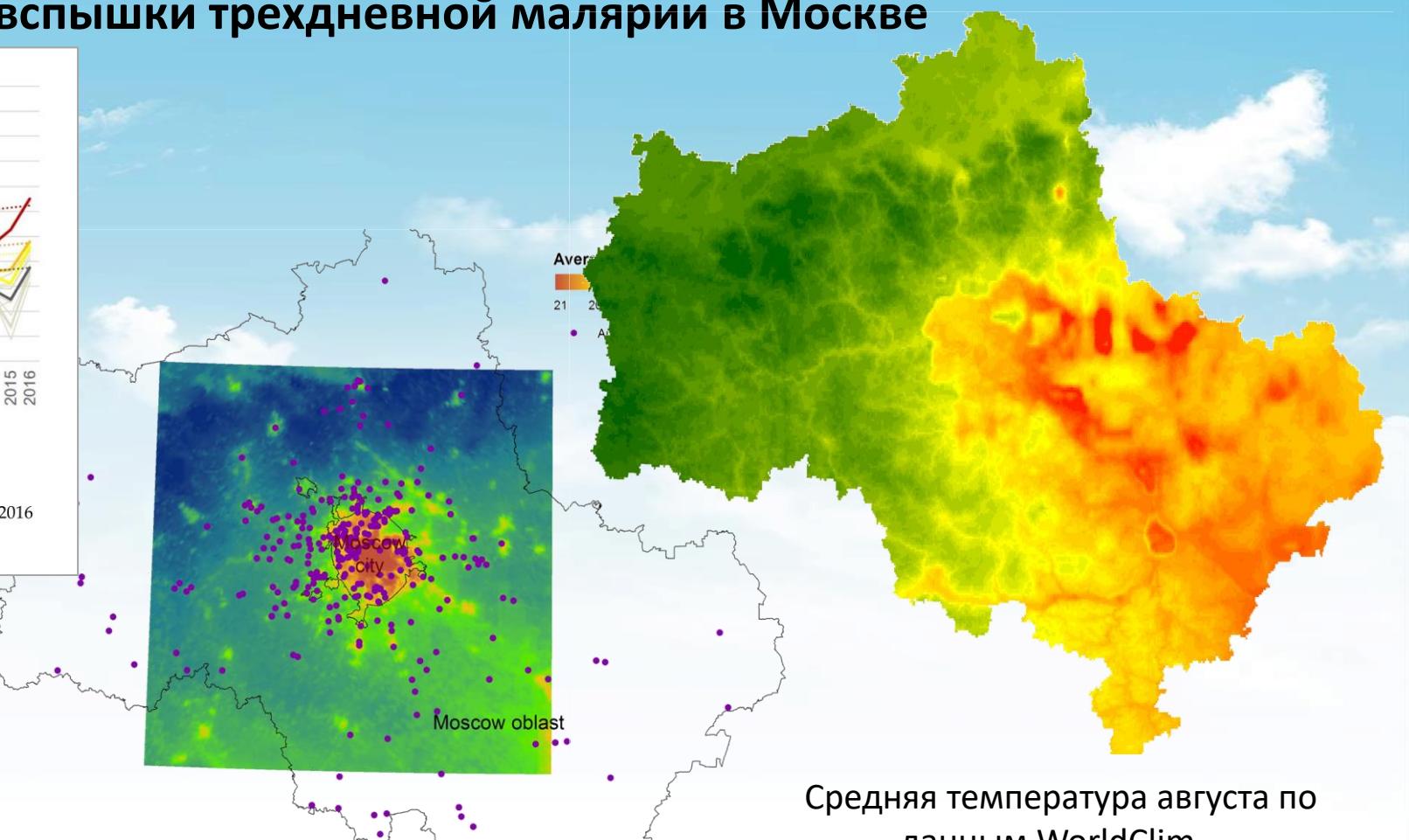
Сравнение с данными по смертности
(Zemtsov et al, 2020)

Применение модели: эпидемиология

Исследование вспышки трехдневной малярии в Москве



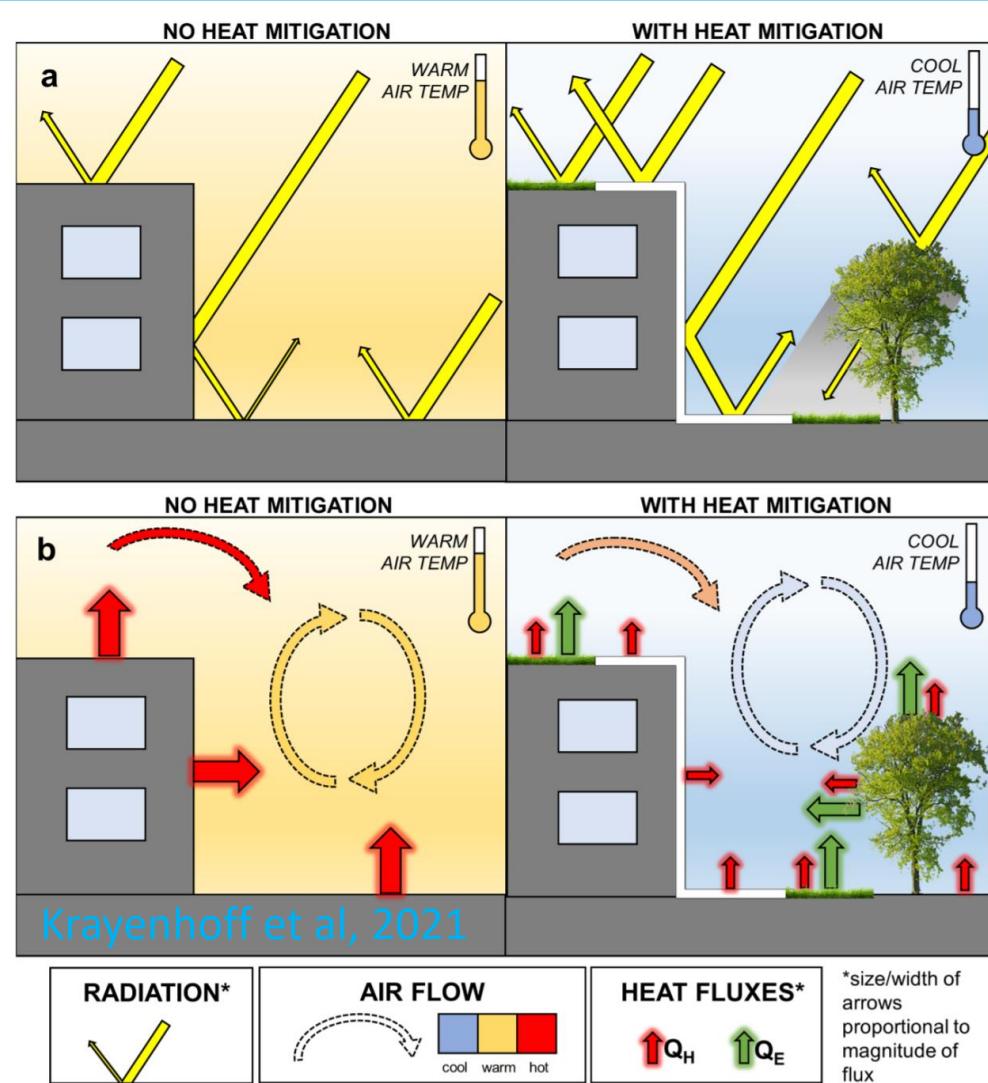
Средняя температура летнего сезона за 2007-2016 гг.
по данным расчетов COSMO-CLM и TERRA_URB с
шагом 1 км + данные по вспышке малярии в Москве
в 1999-2003 гг. (Mironova et al., 2020)



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

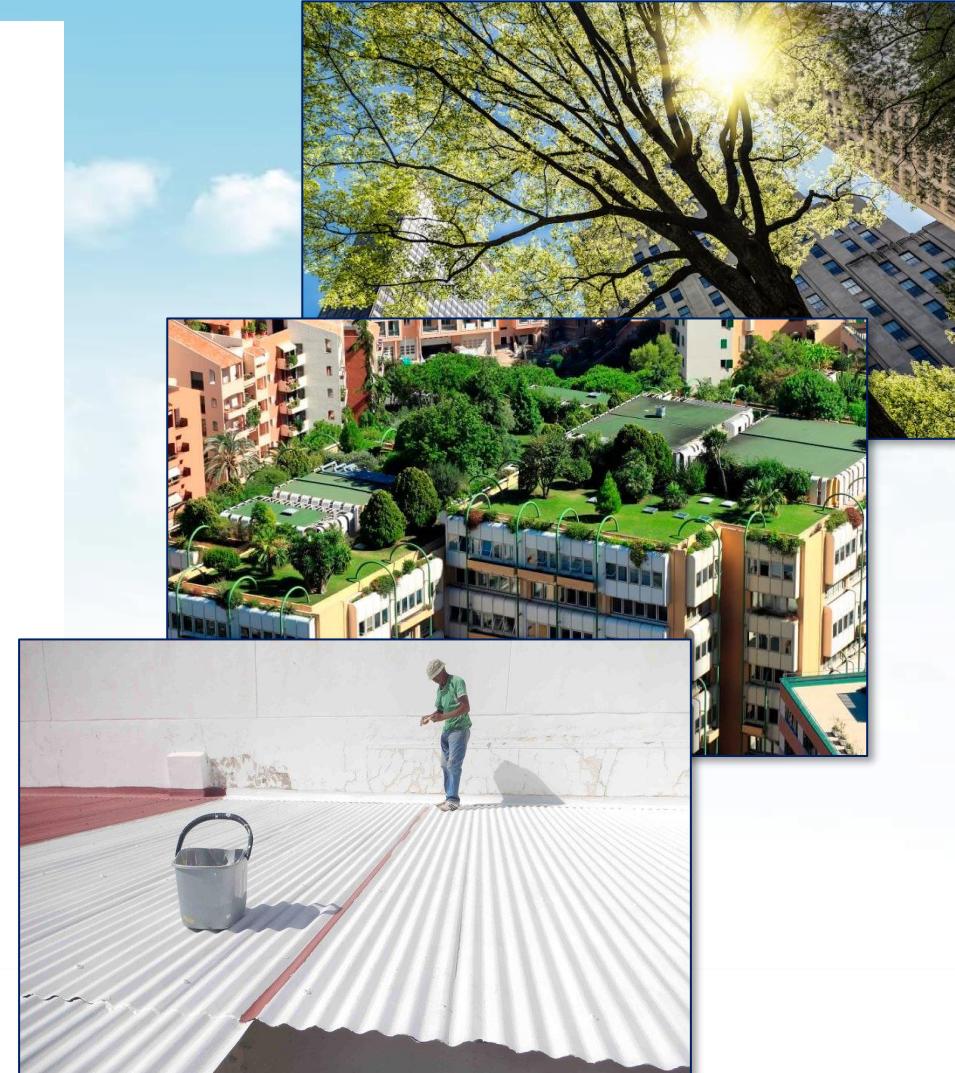
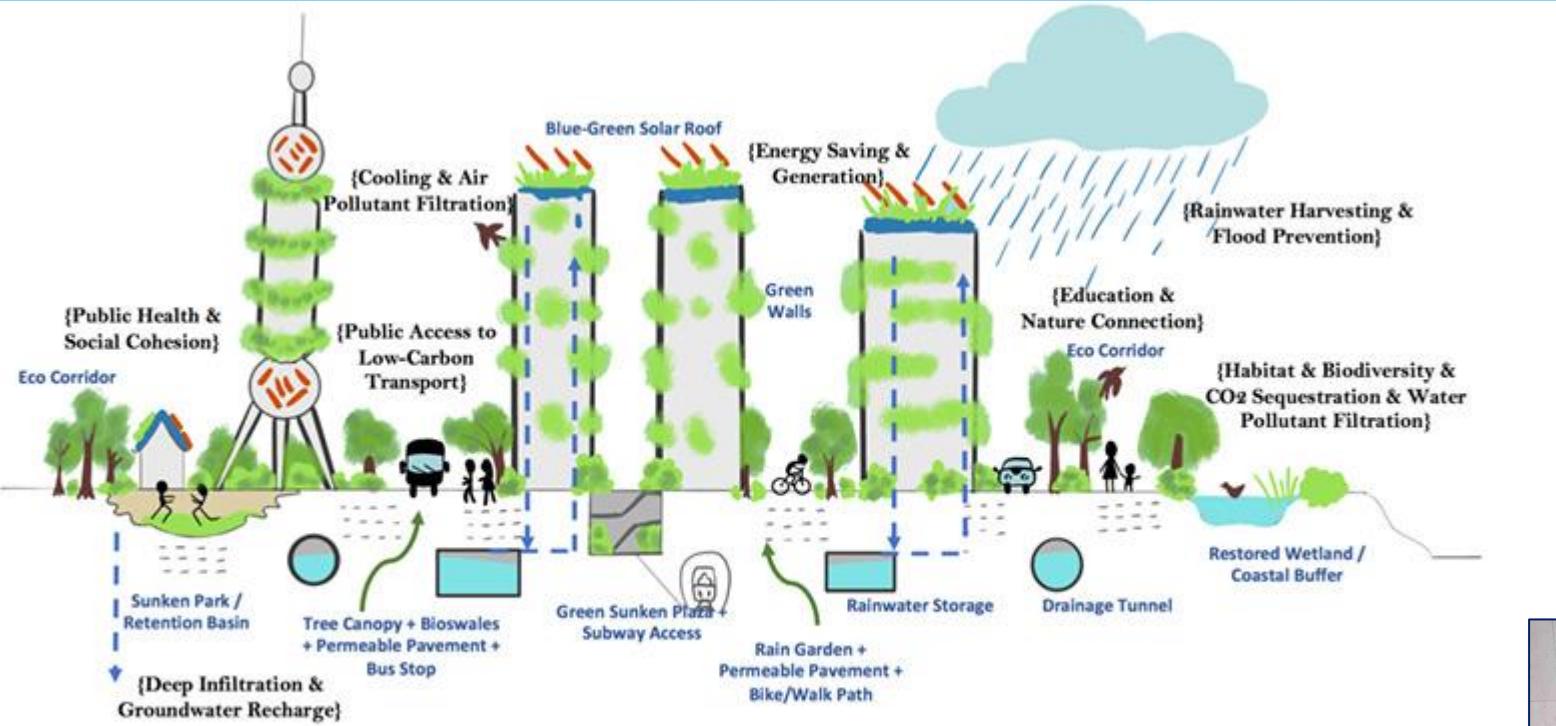
Градостроительное планирование

Как адаптировать города к изменению климата?



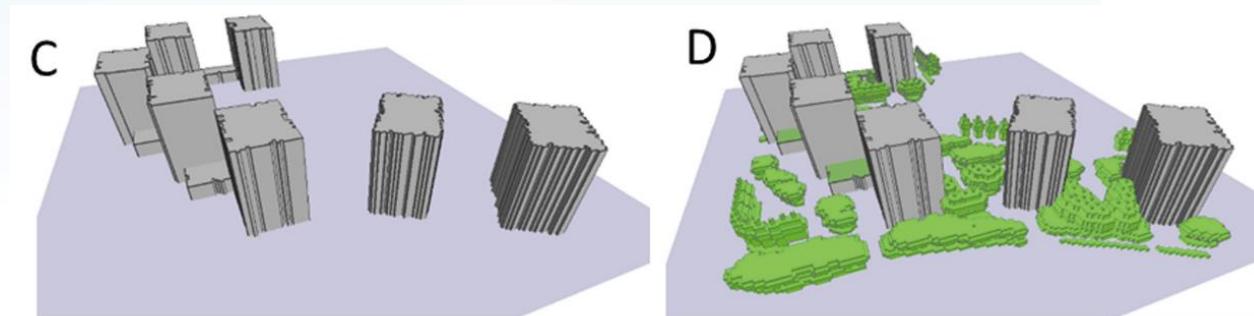
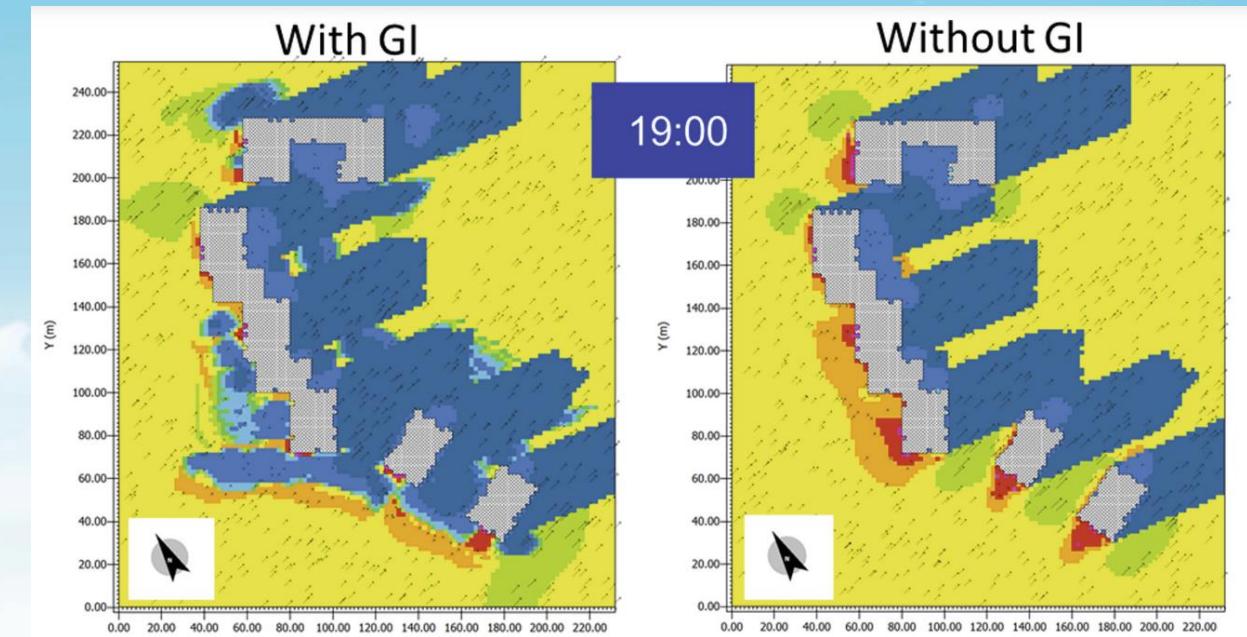
Градостроительное планирование

Как адаптировать города к изменению климата?



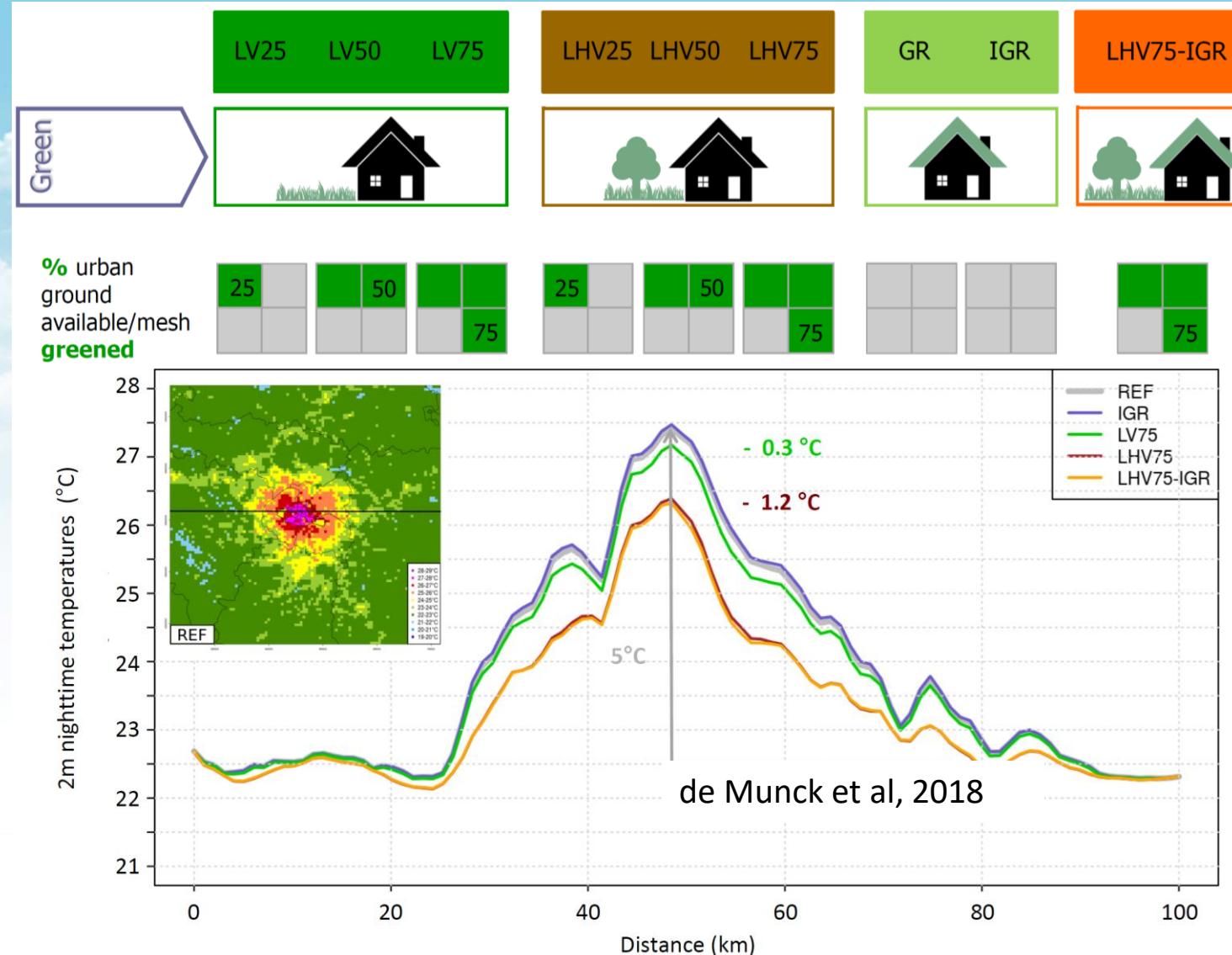
Градостроительное планирование

Микромасштабное моделирование



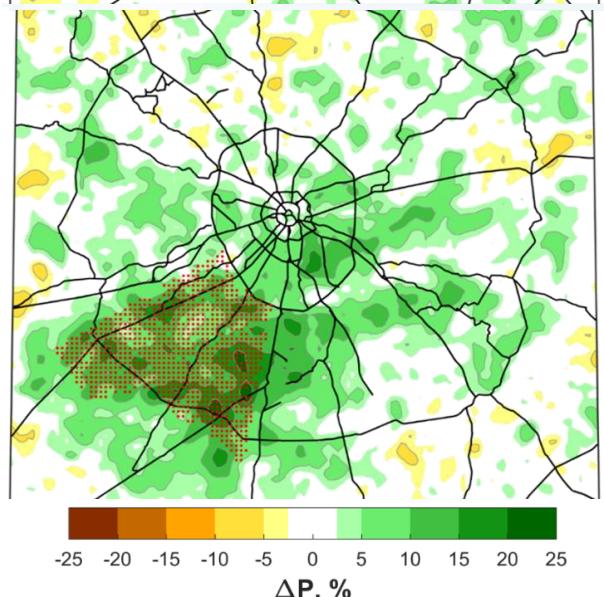
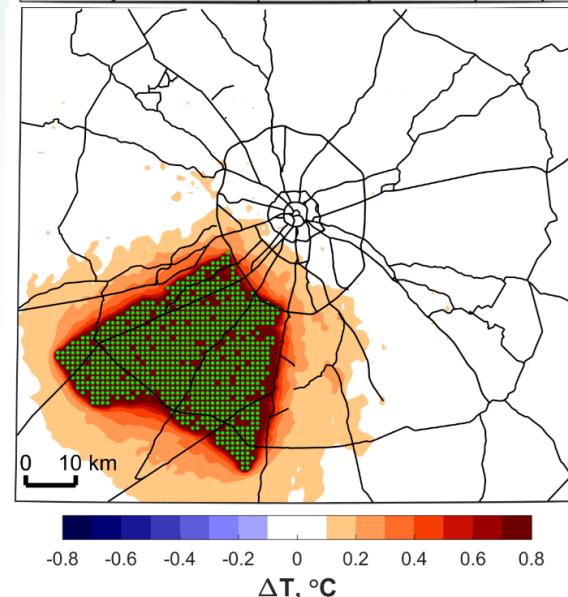
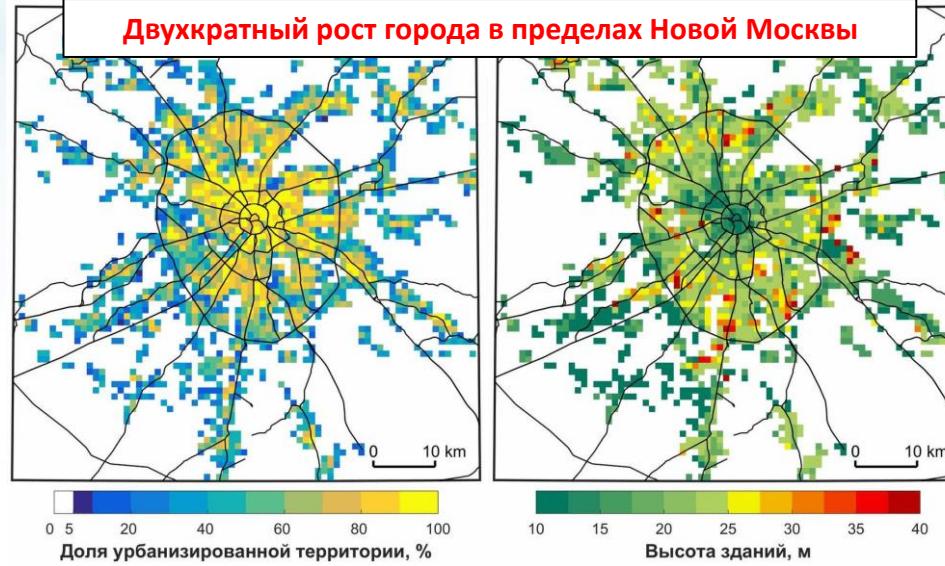
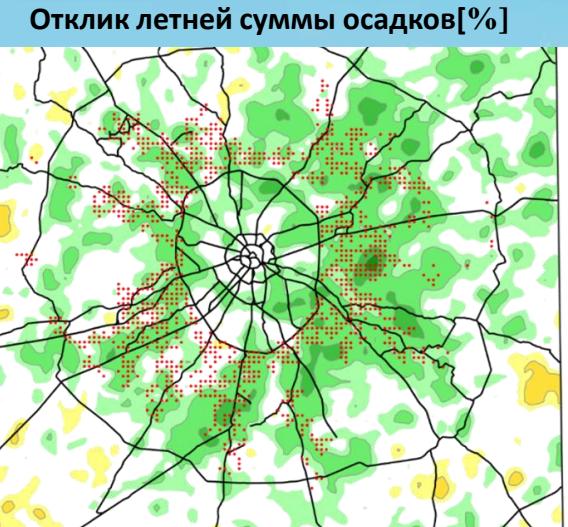
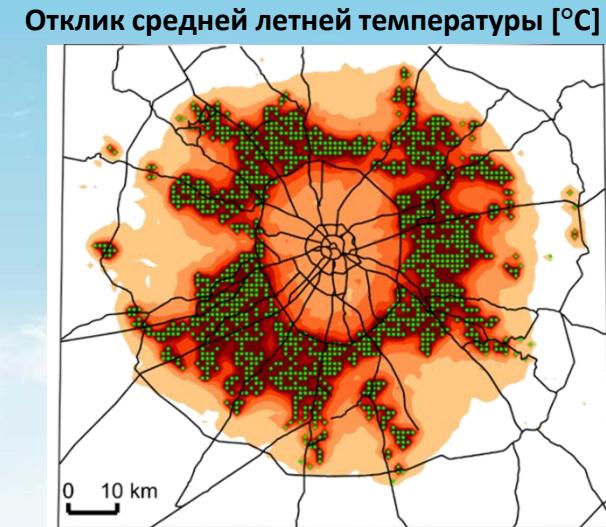
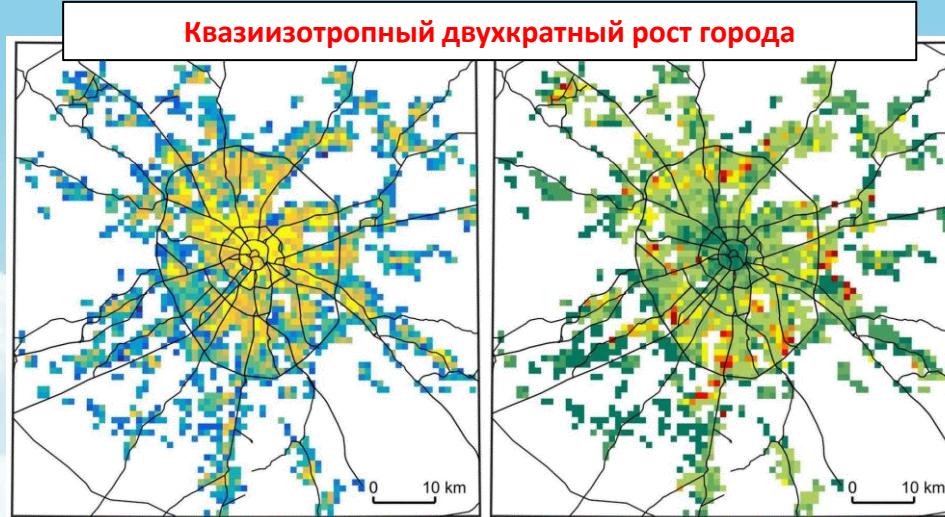
Градостроительное планирование

Мезомасштабное моделирование



Градостроительное планирование

Мезомасштабное моделирование



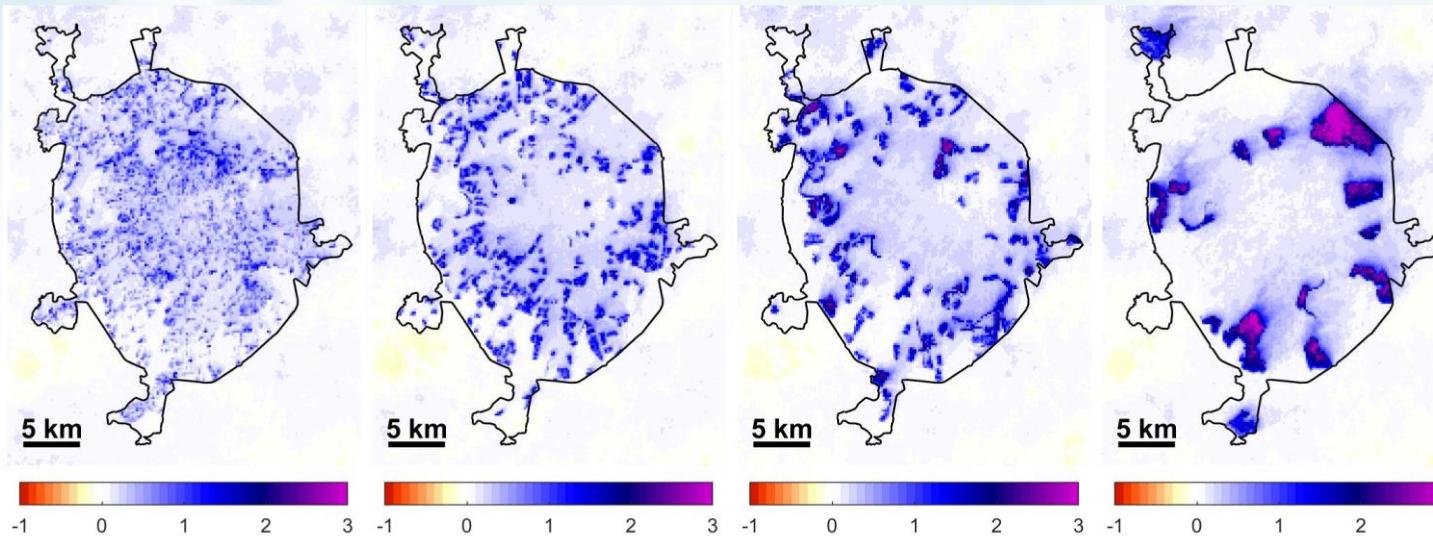
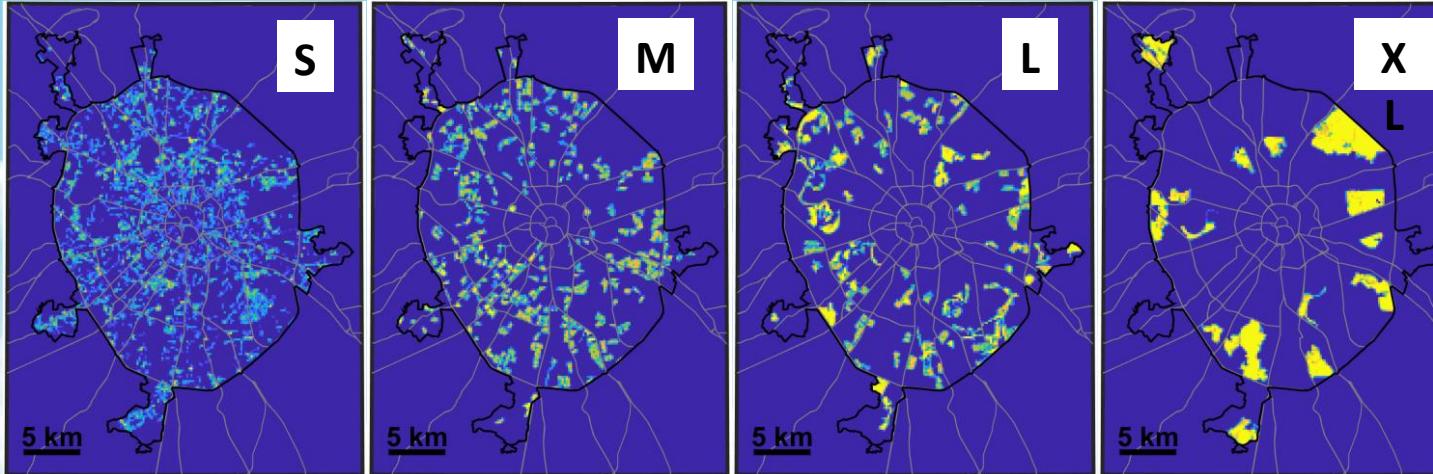
Градостроительное планирование

Охлаждающий эффект городских парков

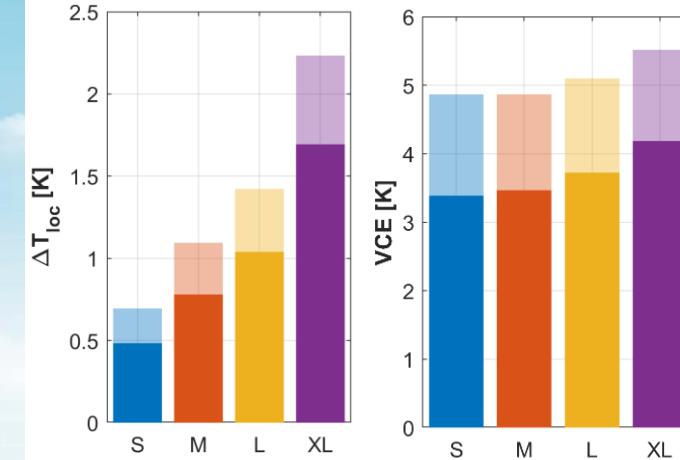


Градостроительное планирование

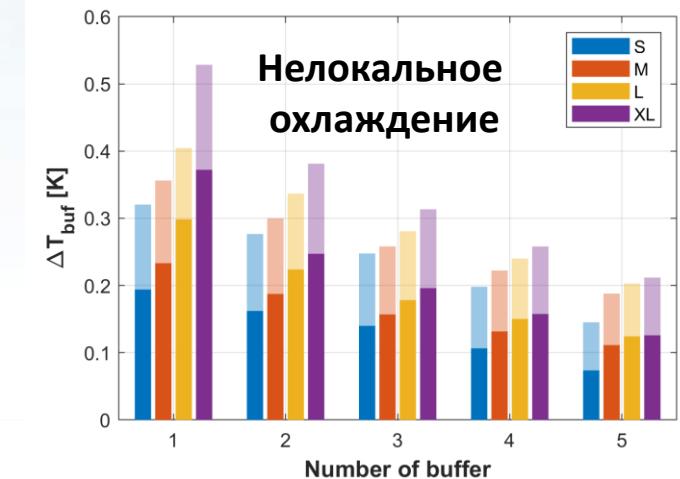
Охлаждающий эффект городских парков



Локальное охлаждение



Нелокальное охлаждение

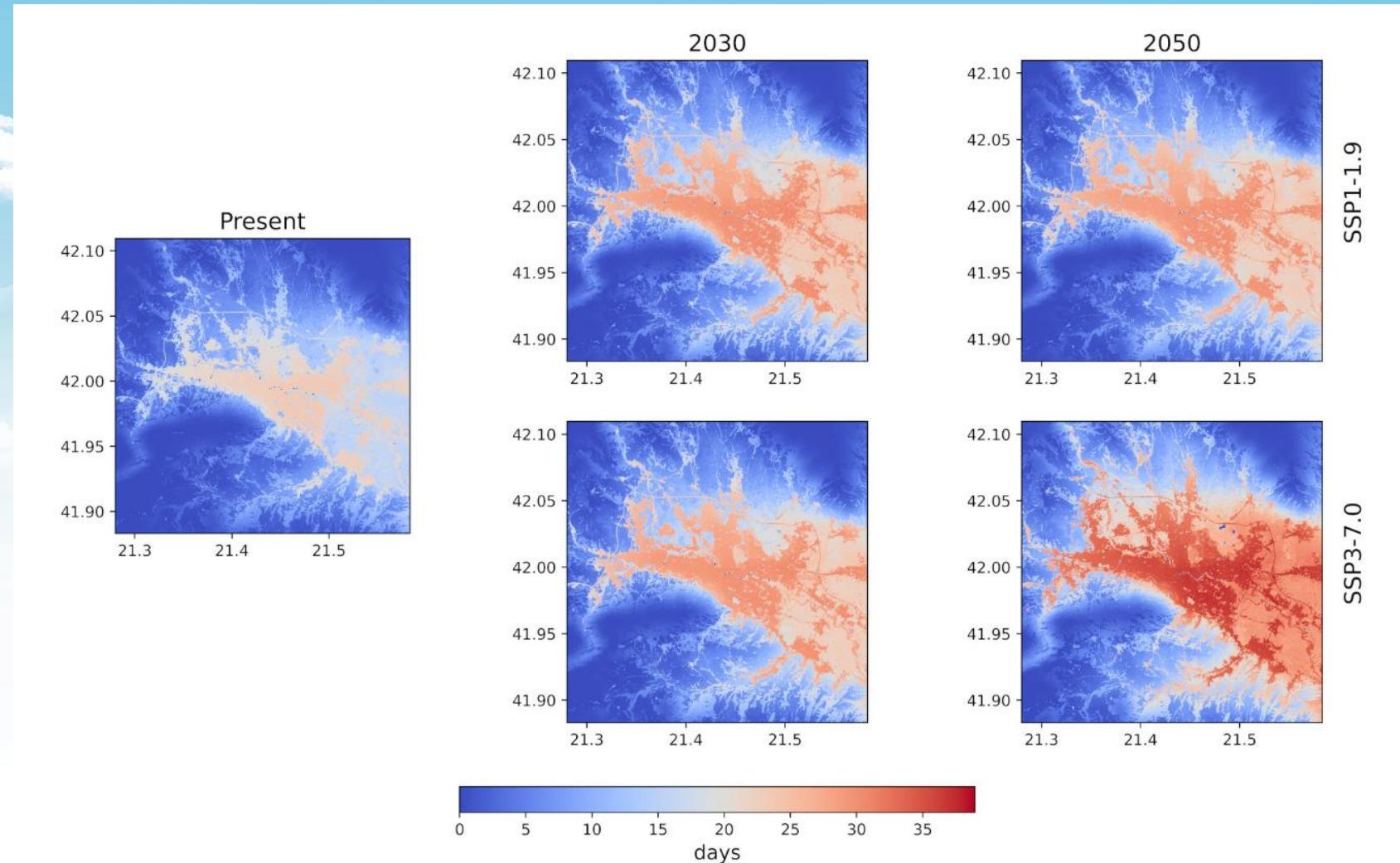


Детализация климатических проекций



<https://www.urban-climate.eu/>

<https://zenodo.org/records/8304199>



Heatwave days for the city of Skopje (Macedonia).

Технические вопросы

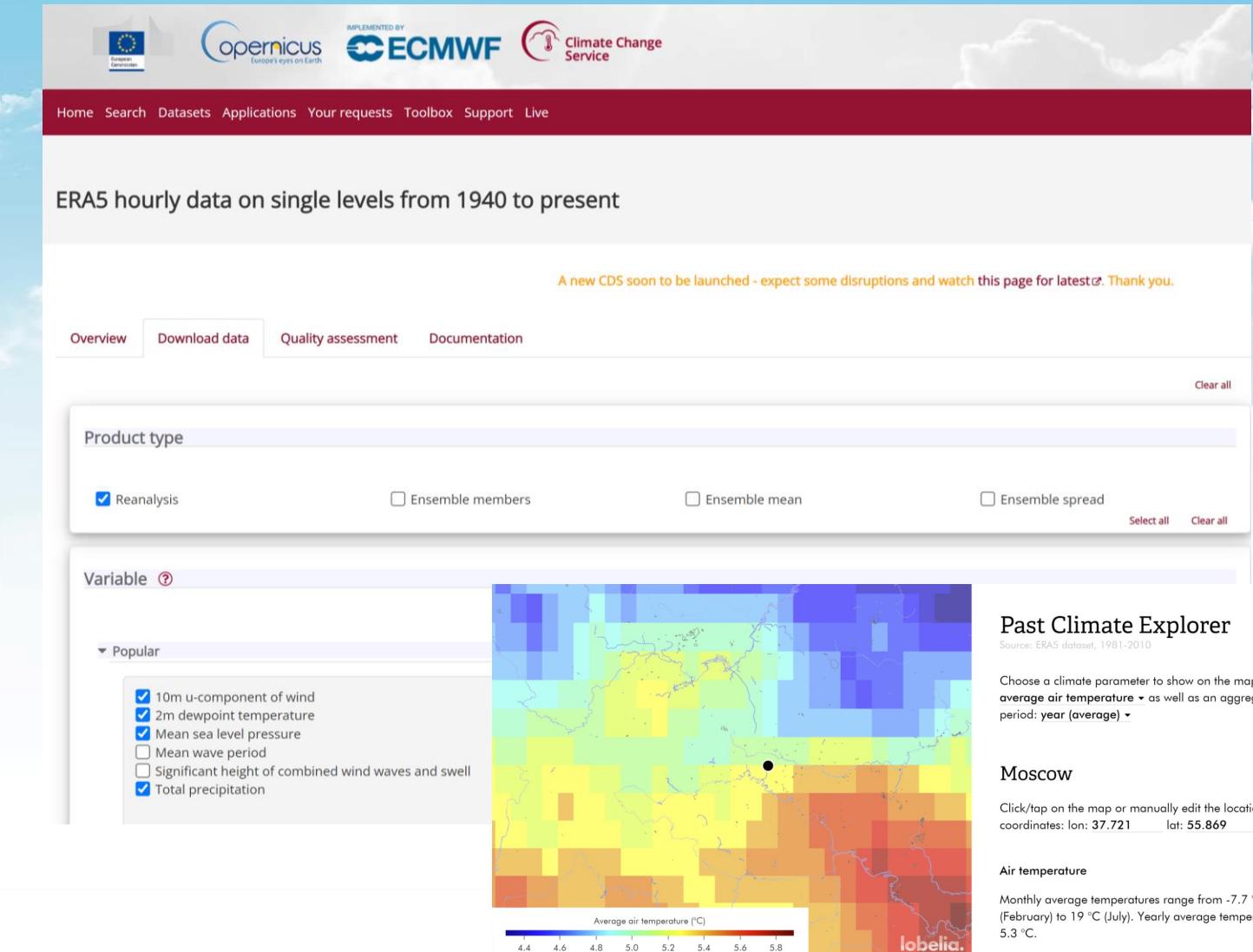
Полезные ресурсы в интернете

Copernicus Data Store (данные реанализов, проекций и пр.)
<https://cds.climate.copernicus.eu/>

Расчеты с Национальной моделью Земной системы:
<https://esm-data.inm.ras.ru/>

Готовые визуализации прогнозов и реанализов:

- <https://earth.nullschool.net/>
- <https://meteologix.com/>
- <https://era5.lobelia.earth/>
- <https://climatereanalyzer.org/>



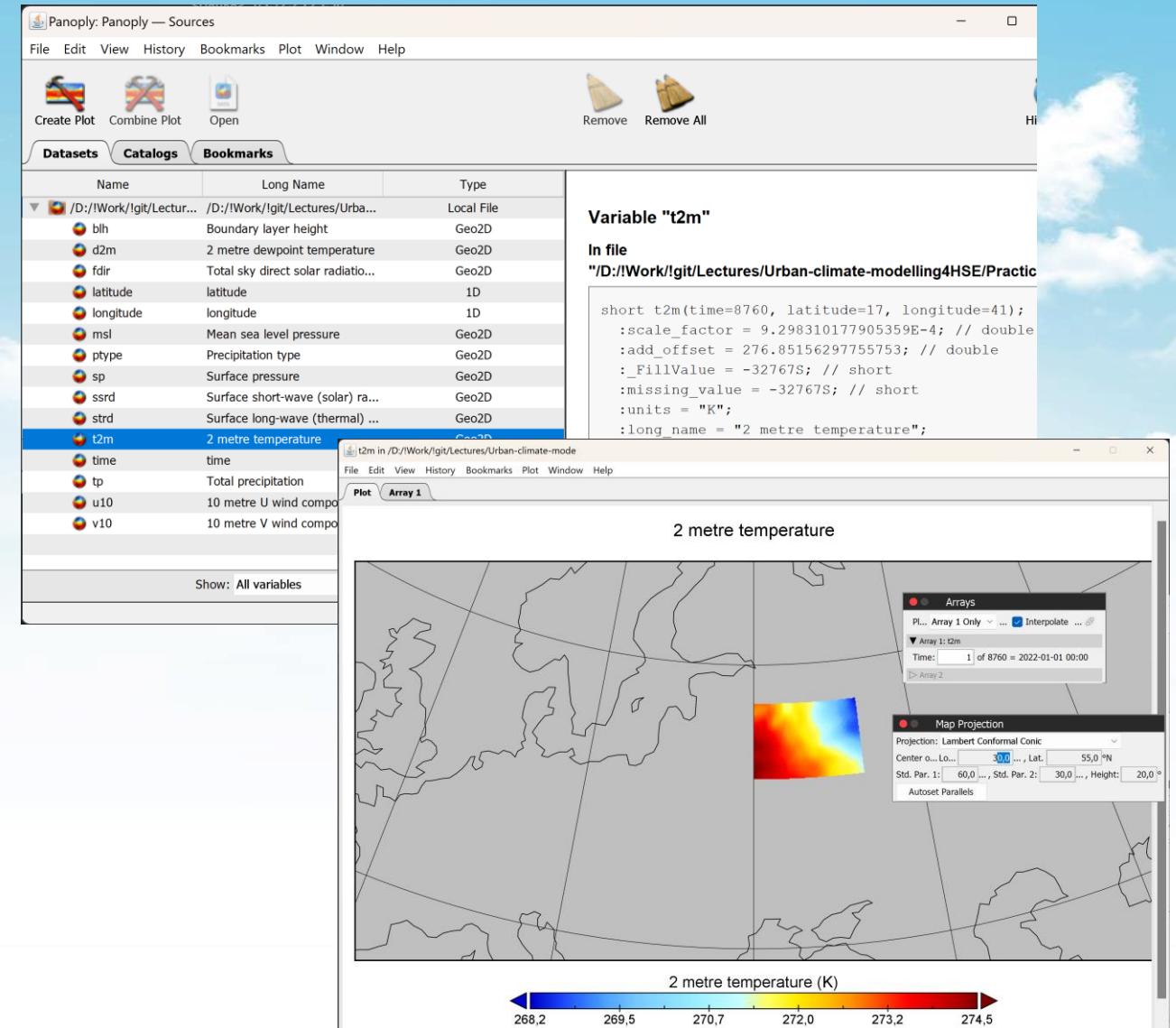
Работа с данными моделирования

Основные форматы выходных данных:

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

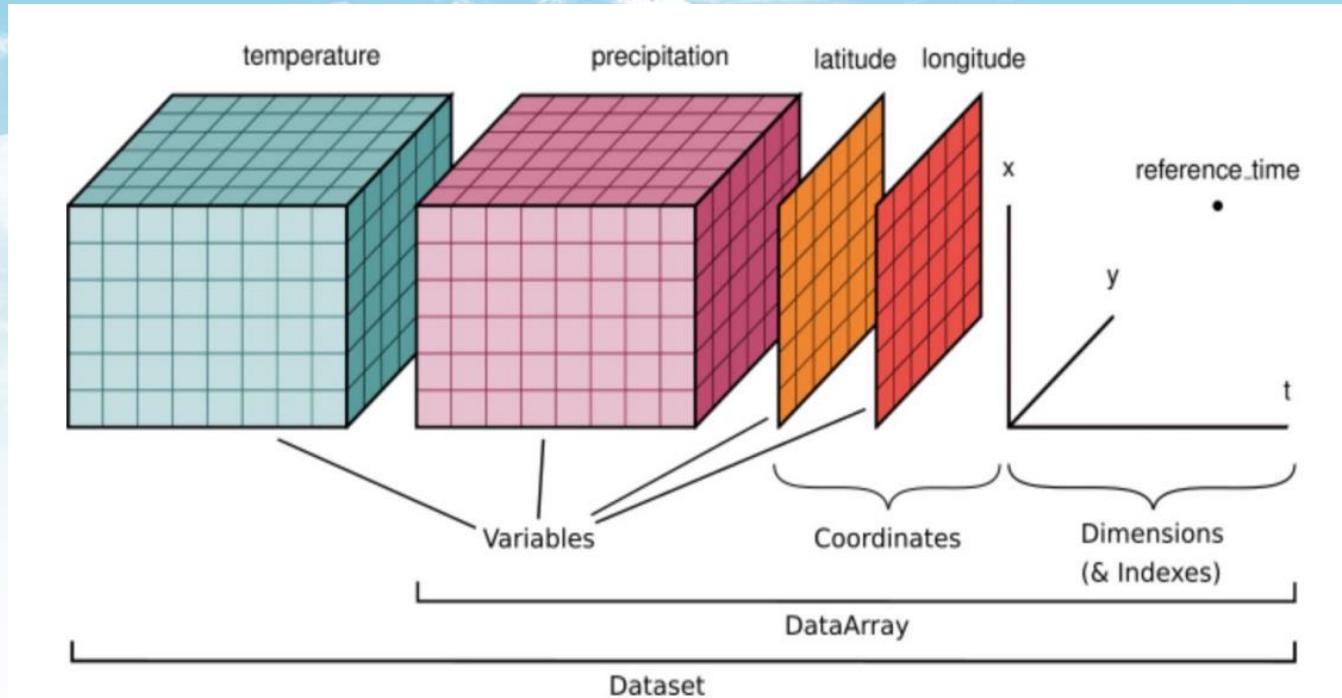
ПО для работы с данными:

- **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**

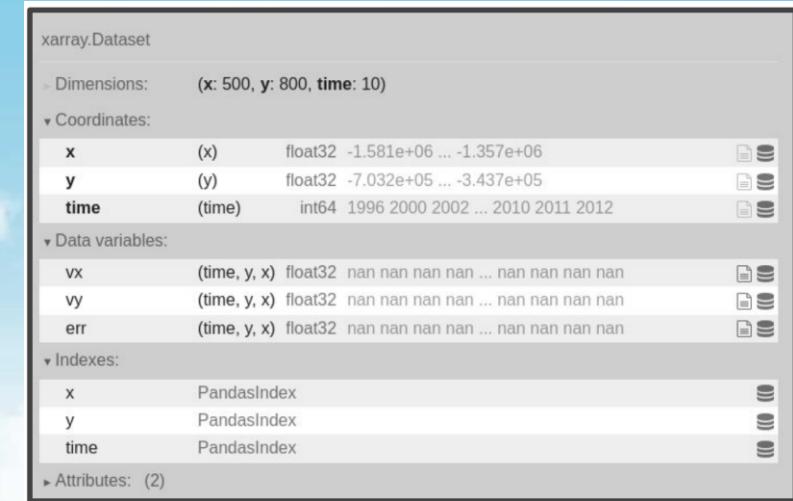


Работа с данными моделирования

“Xarray is an open source project and Python package that makes working with labelled multi-dimensional arrays simple, efficient, and fun”



Schematic of xarray data structure



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



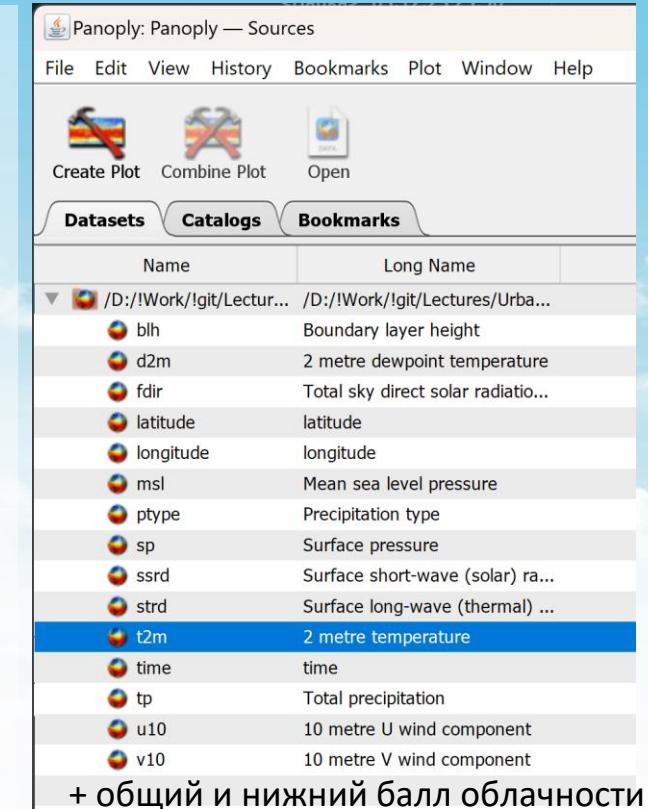


The end

Вопросы?

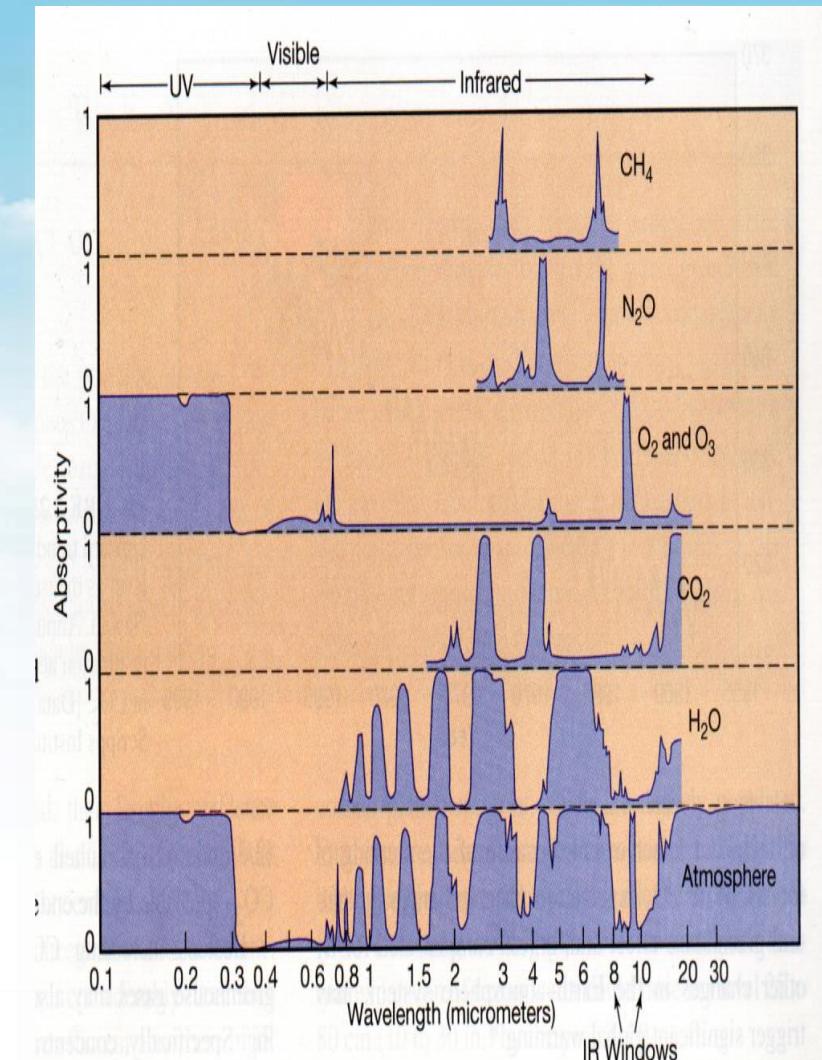
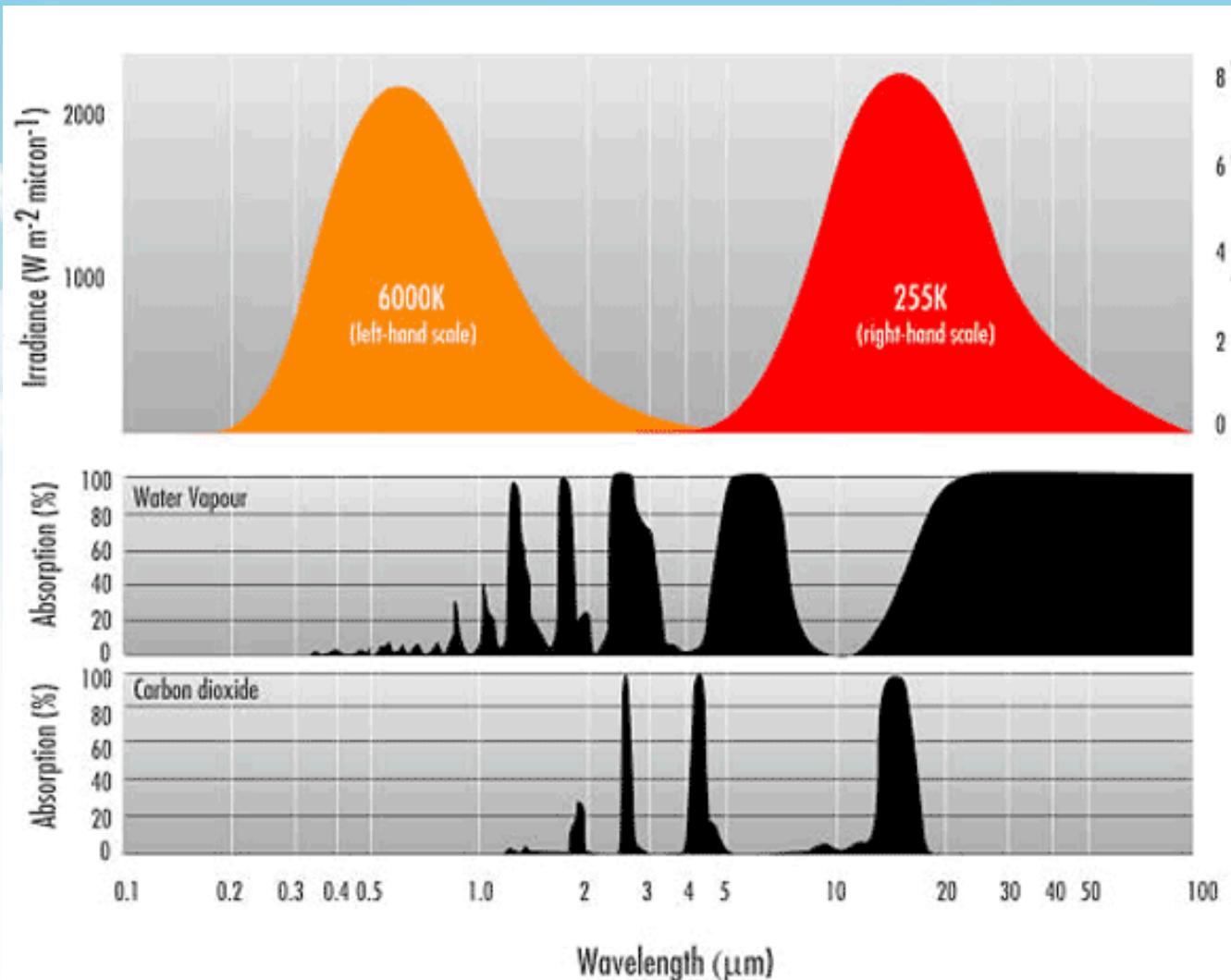
ДЗ №3: анализ низкоразрешенных данных моделирования

- Зарегистрироваться в [Copernicus Climate Data Store](#)
- Скачать данные реанализа ERA5 для выбранного города и его окрестностей (10*10 градусов):
 - нужны приземные переменные, включая все те, что на скриншоте Panoply Data Viewer (они нам еще пригодятся) с часовой дискретностью ([hourly data on single levels](#))
 - за тот же период, за который вы скачали данные наблюдений (или внутри него).
- Интерполировать данные реанализа в точки расположения метеостанций
- Построить графики динамики температуры и скорости ветра по данным реанализа и наблюдений реанализа для городской и фоновой станций. В какой степени реанализ воспроизводит различия «город-фон»?
- Построить графики суточного хода средних (МЕ) и среднеквадратичных (RMSE) ошибок реанализа по температуре и скорости ветра для городской и фоновой станций.
- *Скачать [данные климатической проекции CMIP6](#) по любой модели со среднемесячным осреднением для сценариев «Historical» и «экстремального» сценария SSP5-8.5 построить графики динамики средней зимней и средней летней температуры воздуха за 1940-2050 гг.
- ** Скачать [среднемесячные данные реанализа ERA5](#) (только по температуре) за 1940-2024 гг., добавить реанализ на графики для сравнения с данными климатической модели



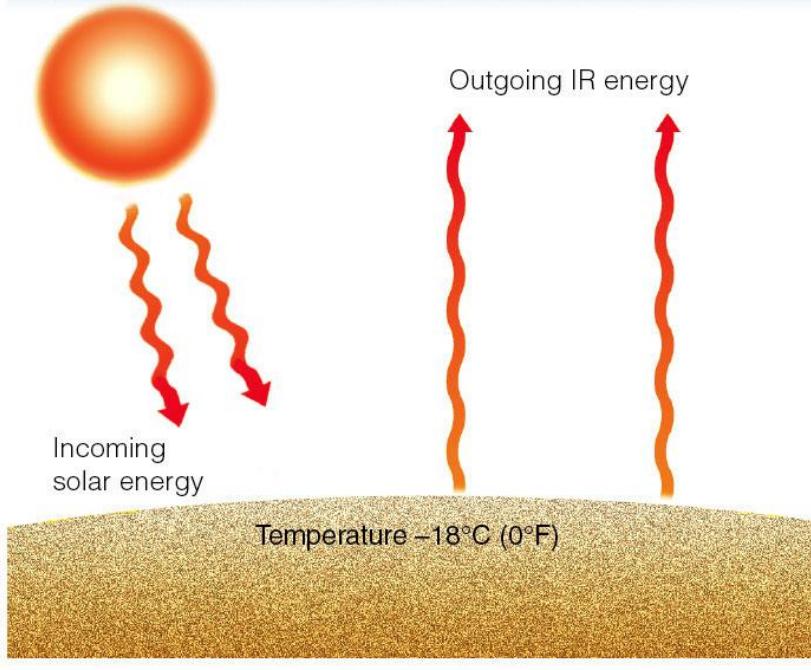
Дополнительные слайды

Как состав атмосферы влияет на климат?

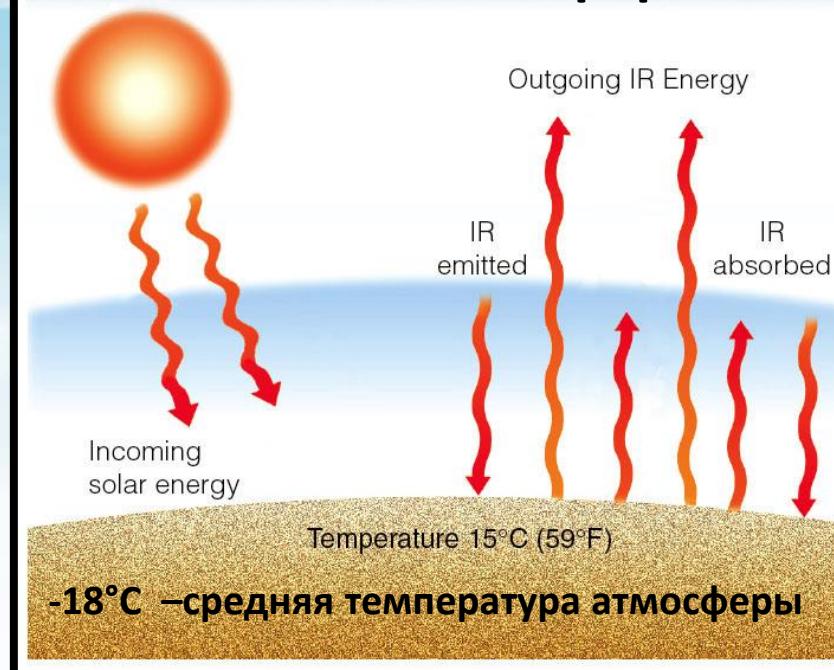


Парниковый эффект

Планета без атмосферы



Планета с атмосферой



Глобальное потепление

