

Klimatické modely aneb jak nahlédnout nejen do budoucnosti našeho klimatu

Michal Žák
Peter Huszár
Michal Belda

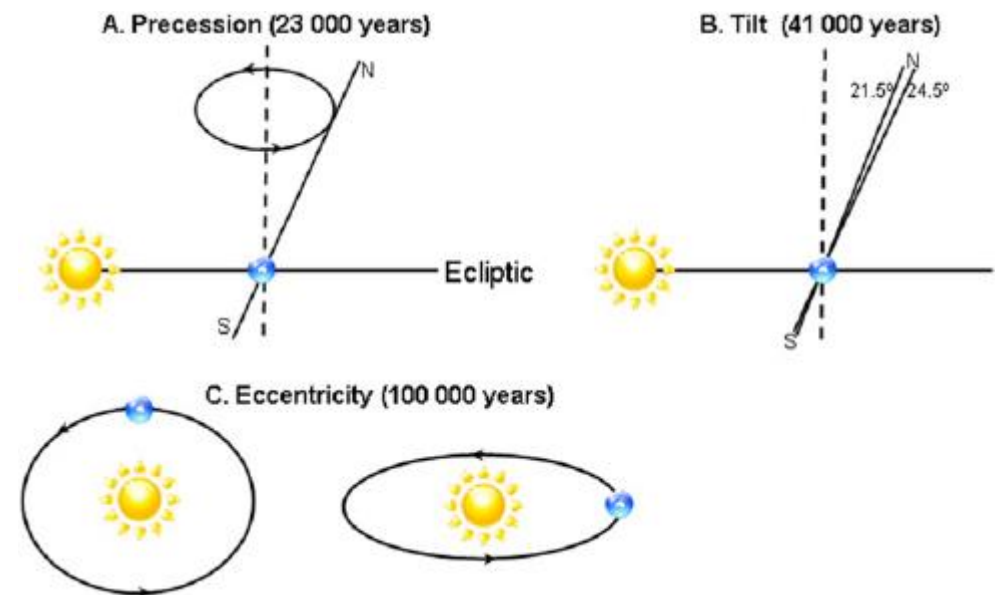
Katedra fyziky atmosféry MFF UK

- Co je *klima* (*podnebí*)?
 - dlouhodobý charakteristický režim počasí na Zemi nebo její části, daný variabilitou stavů klimatického systému
 - průměrné hodnoty meteorologických prvků, extrémy a četnosti jejich výskytu, další statistické charakteristiky
 - jeho vývoj ovlivňují ***klimatické faktory***, které se zpravidla navzájem ovlivňují a lze je dělit do několika skupin:
 - a) astronomické
 - b) geografické
 - c) antropogenní

Faktory ovlivňující vývoj klimatu

- **Astronomické:**

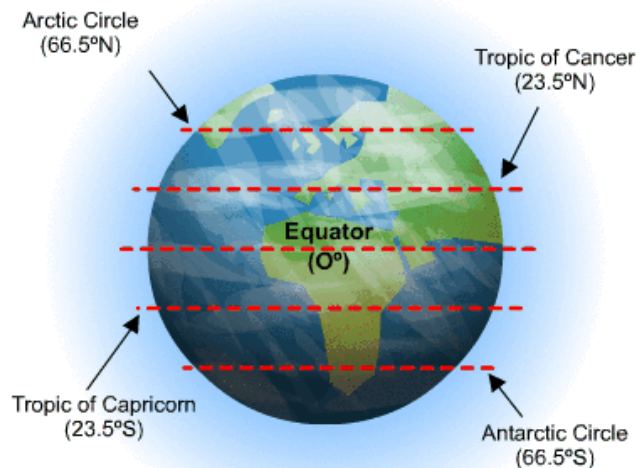
- podmíněné vlastnostmi Země jako planety v rámci sluneční soustavy
- určují množství slunečního záření dopadajícího na horní hranici atmosféry a jeho rozdělení v čase a prostoru
- vlastnosti záření Slunce (intenzita, vlnová délka), dále pak vlastnosti oběžné dráhy Země kolem Slunce, sférický tvar Země a její rotace, sklon zemské osy k rovině ekliptiky a vzájemná poloha perihelia a afelia vůči jarnímu a podzimnímu bodu
- Kvaziperiodické výkyvy orbitálních parametrů (*Milankovičovy cykly*) vysvětlují střídání dob ledových a meziledových



Faktory ovlivňující vývoj klimatu

- **Geografické:**

- podmíněné heterogenitou přírodního prostředí Země v různých měřítkách, například zeměpisná šířka, rozložení pevniny a oceánů, uspořádání všeobecné cirkulace atmosféry a systém oceánských proudů
- v menším prostorovém měřítku se uplatňuje vliv nadmořské výšky, tvarů zemského reliéfu a krajinného pokryvu
- můžeme mezi ně taky řadit složení atmosféry Země, na zemský vulkanismus



Faktory ovlivňující vývoj klimatu

- **Antropogenní:**

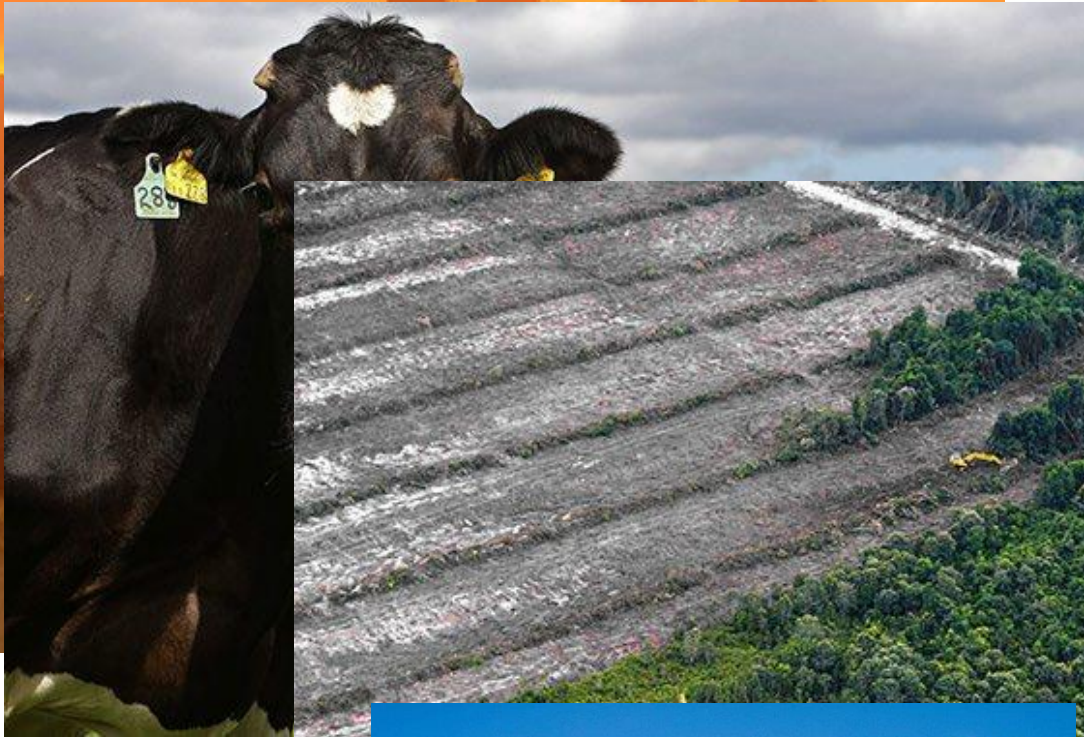
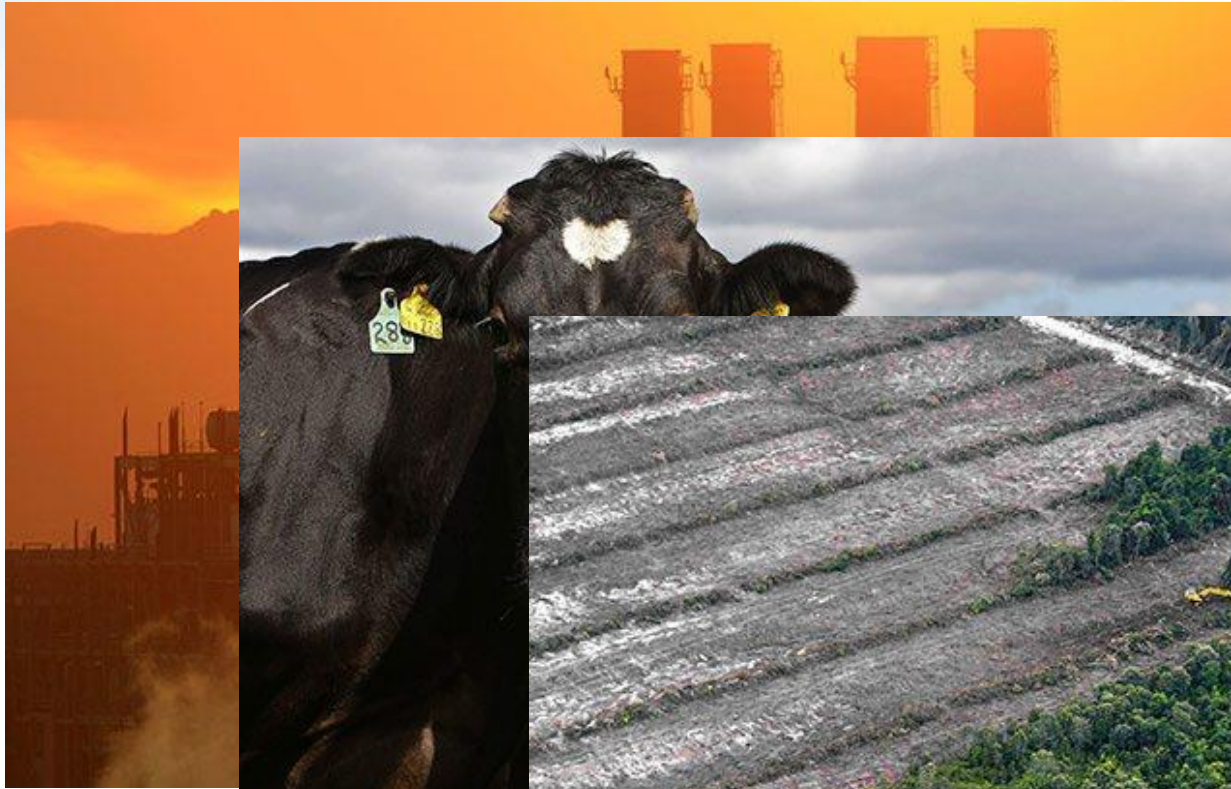
- vyvolané lidskými zásahy do klimatického systému
- působením člověka došlo především v posledních staletích k modifikaci některých geografických klimatických faktorů, a to od planetárního měřítka (změny složení atmosféry Země z hlediska koncentrace některých skleníkových plynů a atmosférického aerosolu) po regionální a lokální (změny energetické bilance v důsledku změn vlastností aktivního povrchu, uvolňování



- Co je *změna klimatu*?
 - vývoj klimatu probíhající v uvažovaném časovém měřítku po dlouhou dobu jednostranně, např. směrem k oteplení nebo ochlazení
 - týká se buď určitého regionu, nebo Země jako celku, i v tom případě se však může na různých místech projevit různě intenzivně; oteplení či ochlazení bývá například nejvíce patrné ve vysokých zeměpisných šířkách
 - ***antropogenní změna klimatu (a globální oteplování)***

Proč k antropogenní změně klimatu dochází?

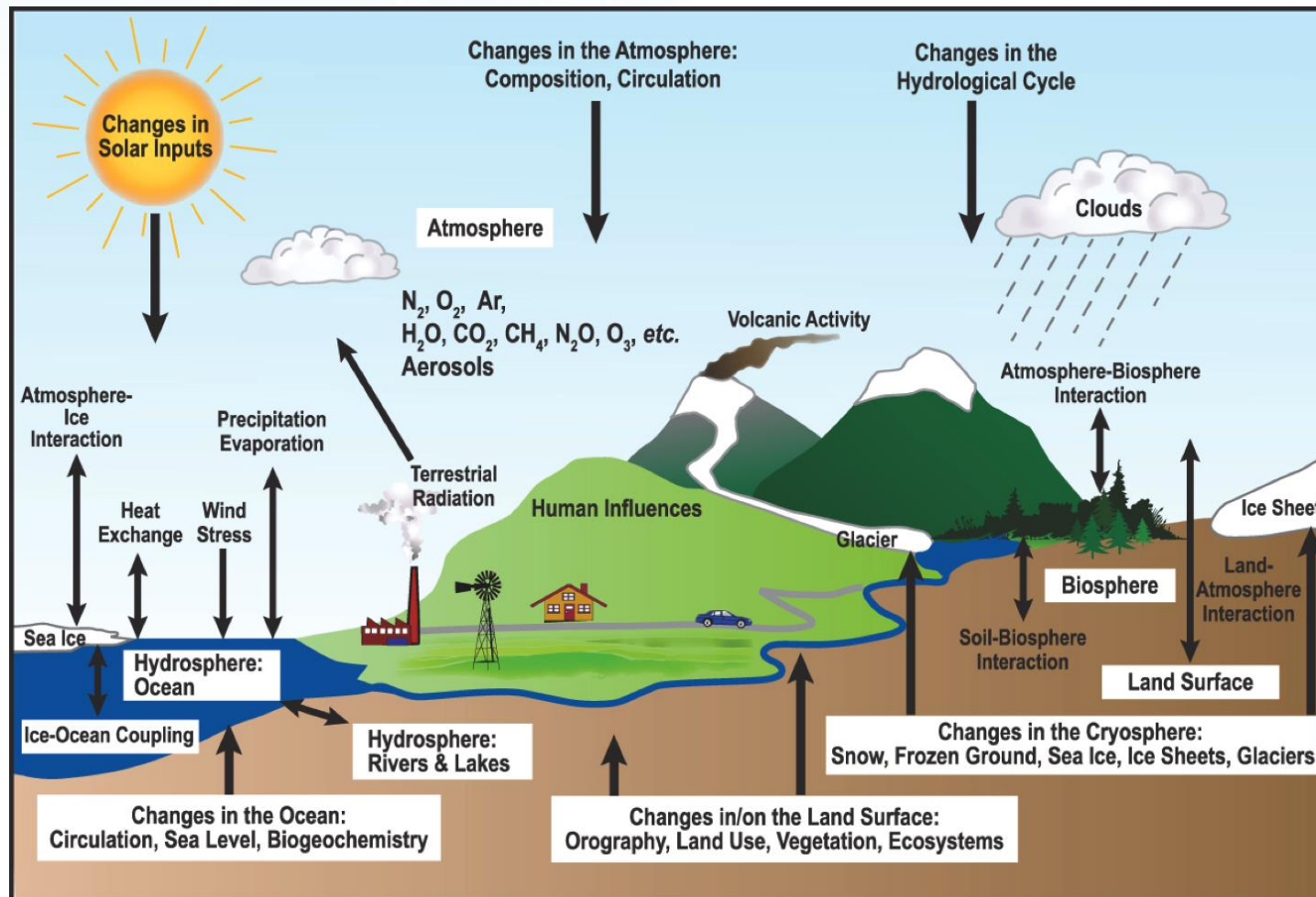
KFA



Modelování klimatu

Proč modelování?

System, který chceme zkoumat



Fyzikálně-chemické zákony

A. Druhý Newtonův zákon

$$\frac{du}{dt} - \left(f + u \frac{\tan \phi}{a} \right) v = -\frac{1}{a \cos \phi} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_\lambda$$

$$\frac{dv}{dt} + \left(f + u \frac{\tan \phi}{a} \right) u = -\frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + F_\phi$$

momentum

$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

B. Zákon zachování hmoty

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \phi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial \phi} (\rho v \cos \phi) \right] - \frac{\partial}{\partial z} (\rho w)$$

mass

C. Hlavní věty

termodynamiky

$$C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = Q$$

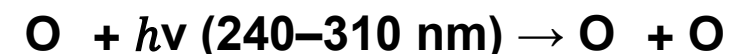
energy

D. Stavová rovnice (ideální plyn)

$$p = \rho RT$$

equation of state

E. chemické reakce $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2 \text{O}\cdot$



.....

2

2

3

3

2

Fyzikálně-chemické zákony

Fyzikální zákony, jimiž se děje v atmosféře řídí, dobře známe již ~10 až 100 let.
Proč tedy zkoumáme atmosféru země?

Protože **soustava zákonů** (rovníc) popisující procesy v atmosféře

- 1) **Tyto rovnice nemají analytické řešení**
- 2) **Nelze z nich jednoduše analyticky vyčíst kauzální propojení jednotlivých dějů a procesů (problém zpětných vazeb)**
- 3) **Vede k dějům na velice širokém spektru prostorových i časových měřítek (od mikrometrů až po 1000 km, od mikrosekund až po 100 let)**



Problém



Toto jde jenom v detailech pro maloměřítkové procesy – např. výzkum kondenzačních jader (v mlžných komorách), “průchod” větru uličním kanálem (v aerodynamických tunelech), studium atmosférických chemických reakcí v laboratoři atd.

Řešení



Podobné jako u výzkumu jiných složitých nelineárních systémů:

Numerická integrace rovnic využitím numerických modelů běžících na superpočítačích



Modely atmosféry

Jak “řešit” rovnice popisující procesy v atmosféře?

Numericky – tj. atmosféra a povrch Země se rozkouskují do pravidelných segmentů (čtverce) a pro každý takovýto segment se řeší rovnice zvlášť.



Modely atmosféry

Jak “řešit” rovnice popisující procesy v atmosféře?

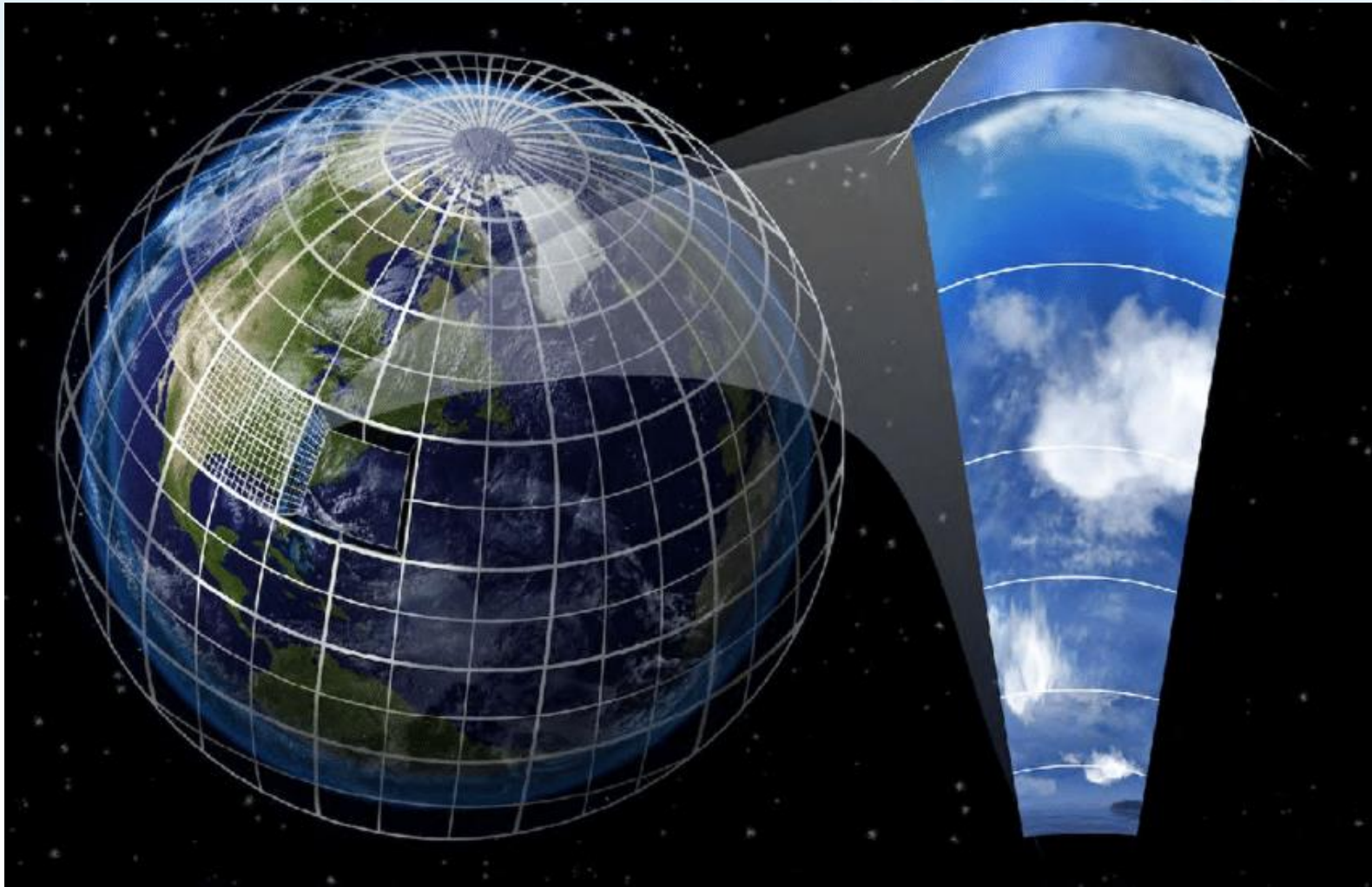
Numericky – tj. atmosféra a povrch Země se rozkouskují do pravidelných segmentů (čtverce) a pro každý takovýto segment se řeší rovnice zvlášť.



```
do n = 1 , nqx
  if (kphase(n) == 1) then
    ztnew = ztnew-wlhvocp*(zqxx(j,i,k,n)+ &
      (zqxtendc(j,i,k,n)-ztenkeep(j,i,k,n))*dt)
  else if ( kphase(n) == 2 ) then
    ztnew = ztnew-wlhsocp*(zqxx(j,i,k,n)+ &
      (zqxtendc(j,i,k,n)-ztenkeep(j,i,k,n))*dt)
  end if
  zsumq1(j,i,k) = zsumq1(j,i,k) + &
    (zqxx(j,i,k,n)+(zqxtendc(j,i,k,n)-ztenkeep(j,i,k,n))*dt)* &
    (papf(j,i,k+1)-papf(j,i,k))*regrav
end do
zsumh1(j,i,k) = zsumh1(j,i,k)+(papf(j,i,k+1)-papf(j,i,k))*ztnew
zrain = d_zero
do n = 1 , nqx
  zrain = zrain+dt*zpfplsx(j,i,k+1,n)
end do
zerrorq(j,i,k) = zsumq1(j,i,k)+zrain-zsumq0(j,i,k)
end do
end do
do k = 1 , kz
  do i = ici1 , ici2
    do j = jci1 , jci2
      zdtgdp(j,i) = dt*egrav/(papf(j,i,k+1)-papf(j,i,k))
    end do
  end do
end do
```

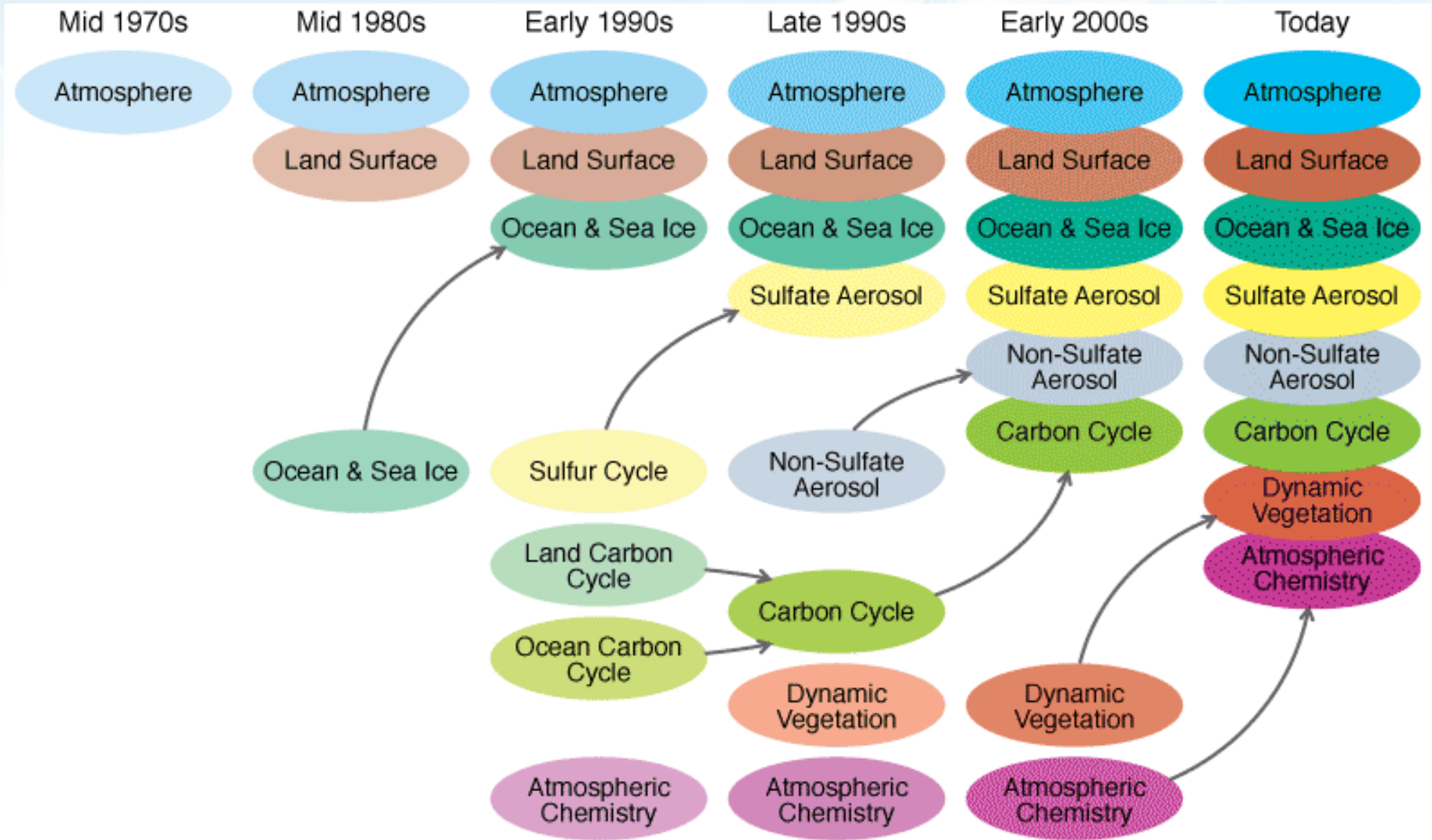
Kus počítačového kódu klimatického modelu

Modely atmosféry



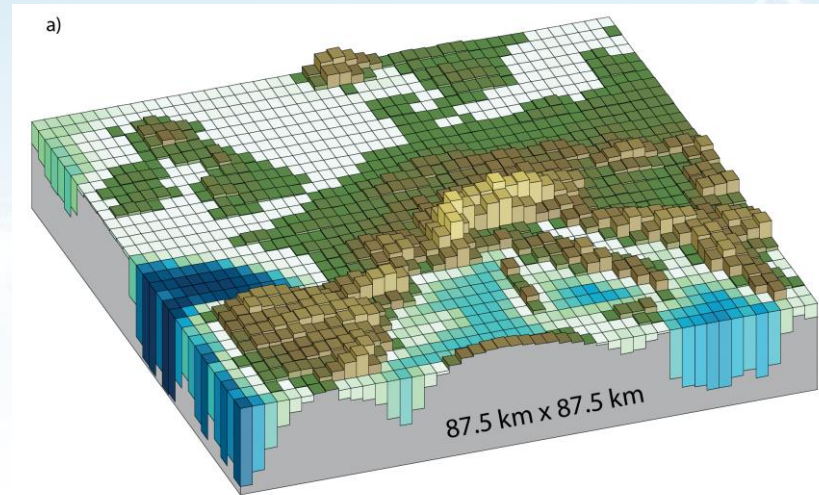
globální model

Vývoj klimatických modelů

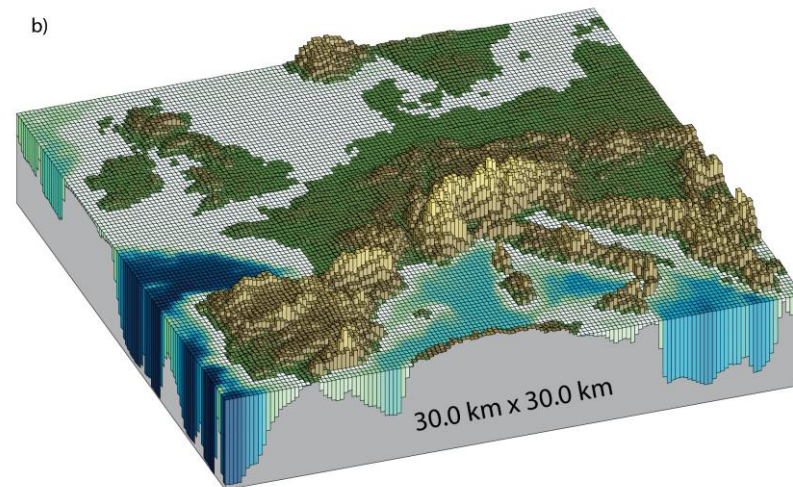


Modely atmosféry

Hrubé rozlišení



Jemnější rozlišení



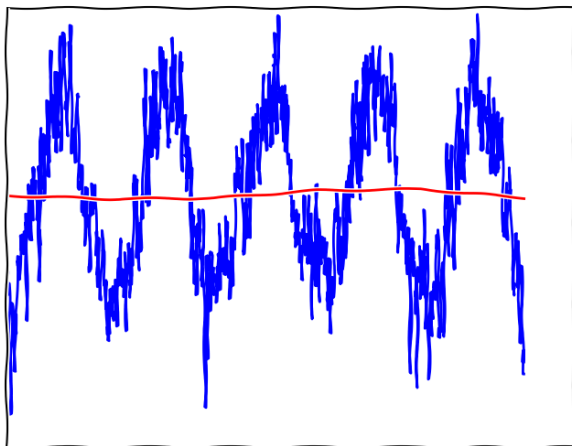
Regionální model

Numerické modely klimatu vs. počasí

Důležité si uvědomit rozdíly mezi počasím a klimatem

Počasí

- krátkodobý, případně aktuální stav klimatického systému
- chaotické chování



Klima (podnebí)

- dlouhodobý charakteristický režim počasí podmíněný energetickou bilancí, cirkulací atmosféry, charakterem aktivního povrchu a lidskou činností
- průměrné hodnoty meteorologických prvků, extrémy a četnosti jejich výskytu, popřípadě další statistické charakteristiky

Numerické modely klimatu vs. počasí

KFA

Počasí

Klima



Numerické modely klimatu vs. počasí

Modelování počasí

• Modelování klimatu

Stejné fyzikálně-chemické zákony vyjádřené rovnicemi

Stejná diskretizace (“rozkostkování”) atmosféry a numerické řešení rovnic

Počítání průběhu počasí v čase v každém bodě výpočetní sítě

Zajímáme se o
stav počasí v každém čase
(např. 7.11.2019, 19:15)



Zajímáme se o
dlouhodobí průměr počasí vč. extrémů
za nějaké období (např. průměrná
intenzita srážek za období 2040-2050)

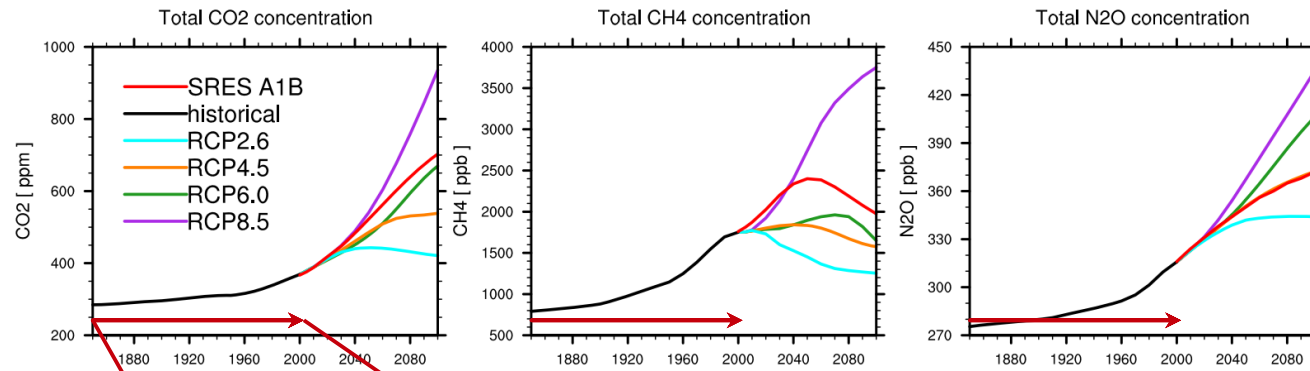
Jak můžeme chtít předpovídat klima, když „neumíme“ ani počasí ...?

Předpověď počasí versus „předpověď klimatu“

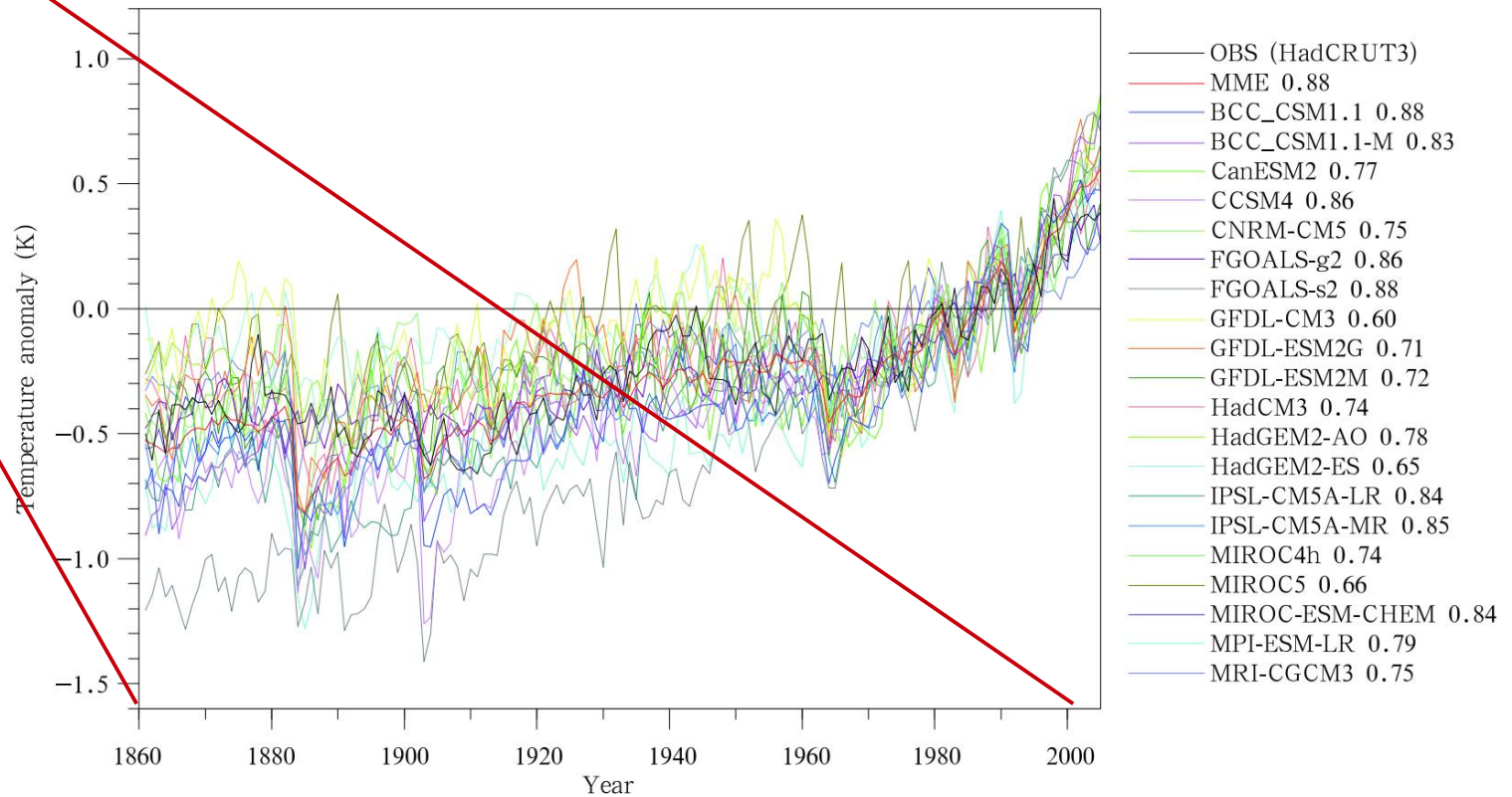


Dráha psa - počasí
Dráha chlapce - klima

Modelování současného klimatu

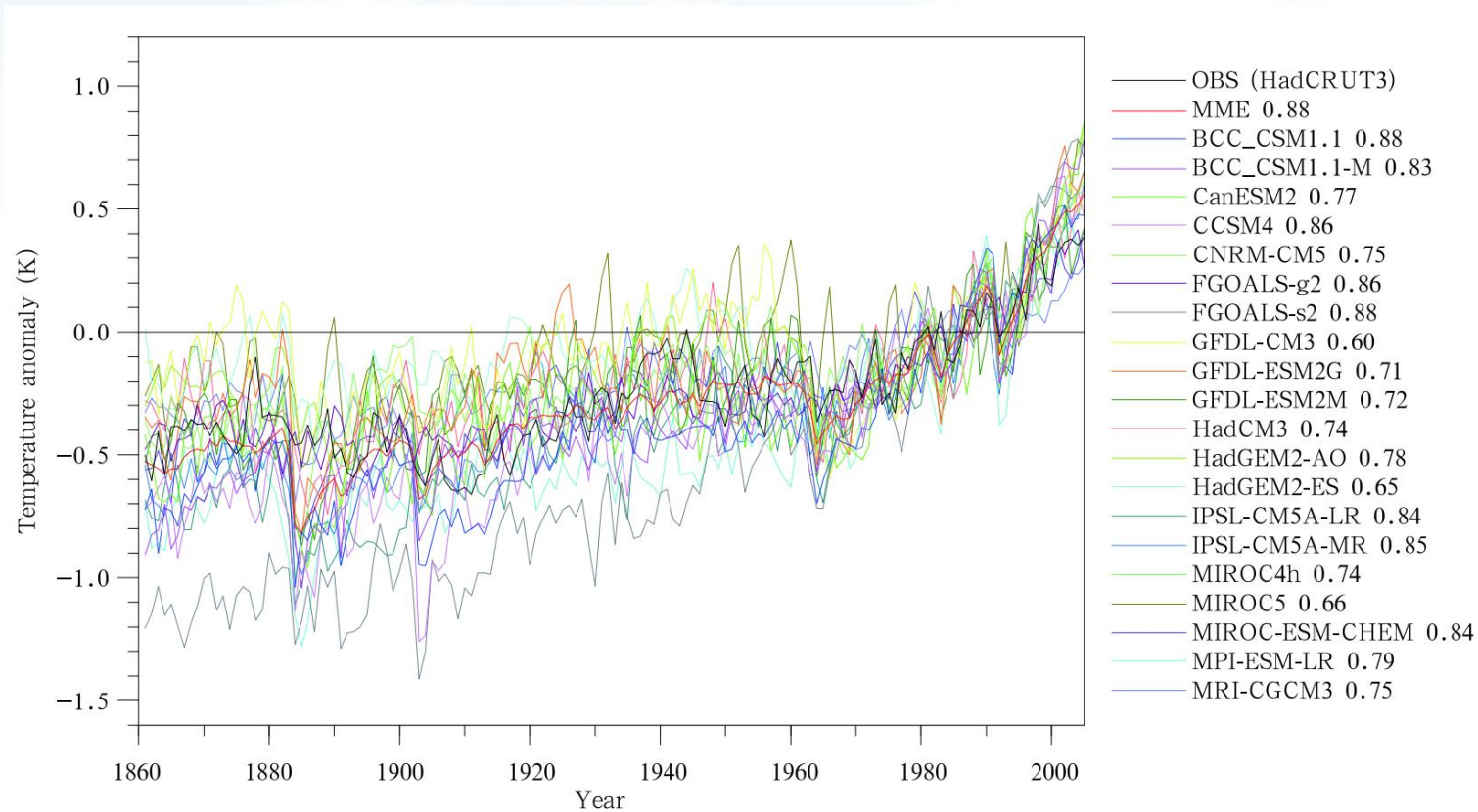


Globální klimatické modely



Modelování současného klimatu

Proč modeluje každý model “jiné” klima???



Modelování současného klimatu

KFA

Proč modeluje každý model “jiné” klima?

Modelování současného klimatu

KFA

Protože (téměř) stejný recept, jiný výsledek...



Na přípravu budete potřebovat:

husa o hmotnosti 3,5- 4kg
sůl
kmín celý nebo drcený

Na červené zelí:

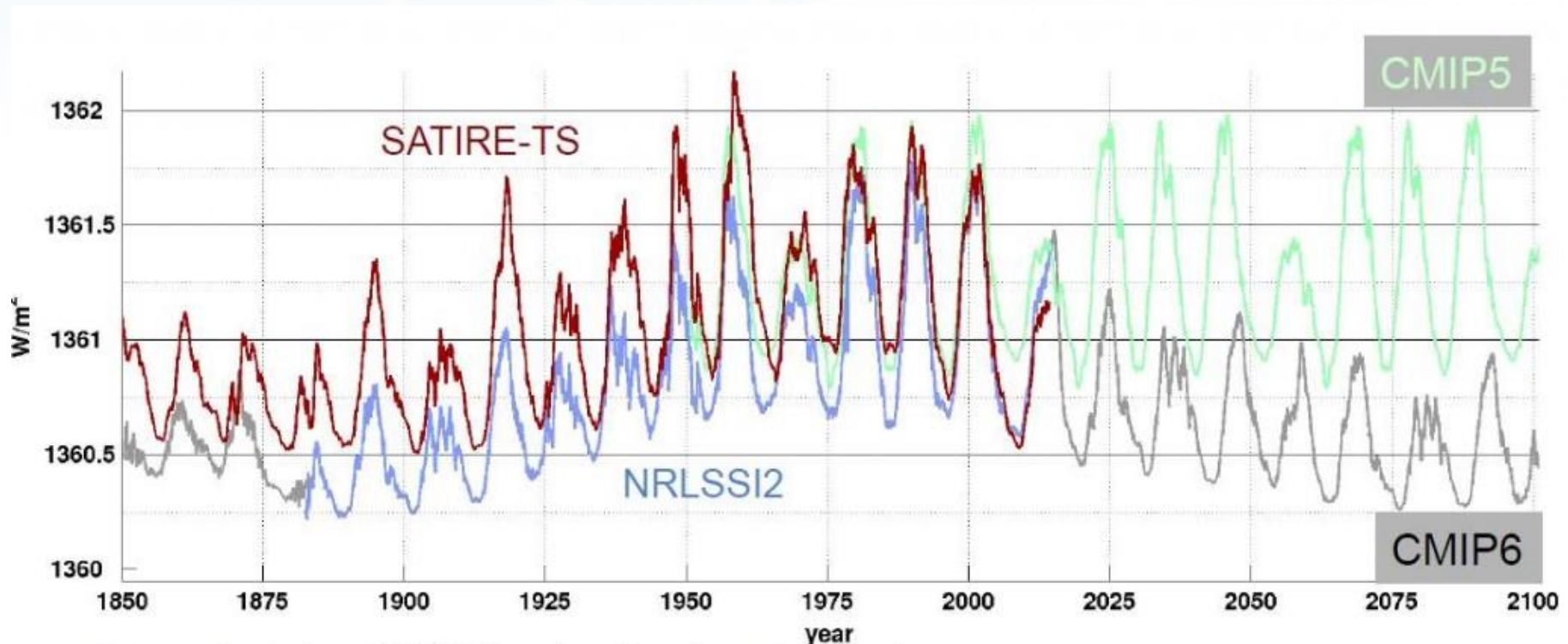
1 cibule
sterilované brusinky
100ml červeného vína
1-2 hřebíčky
2PL cukru
sůl



Předpověď budoucího klimatu

Abychom dokázali modelovat a tím předpovědět klima budoucnosti, potřebujeme znát a do modelů vnést změnu některých vnějších a vnitřních faktorů ovlivňujících klima

- **Intenzita Slunečného záření**
- Změna koncentrace skleníkových plynů
- Výbuch sopky, dopad meteoritu ...



Current status CMIP6 solar forcing dataset:

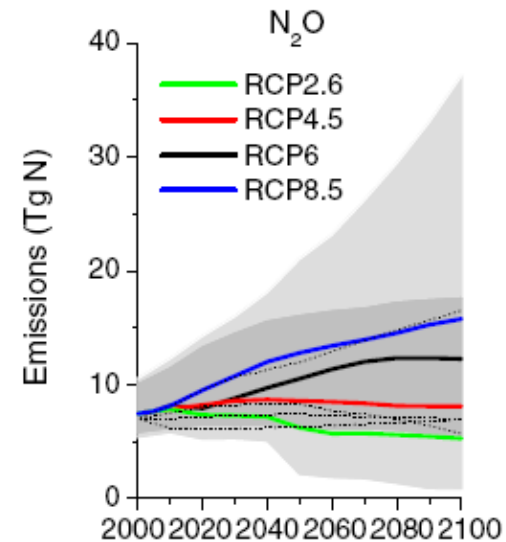
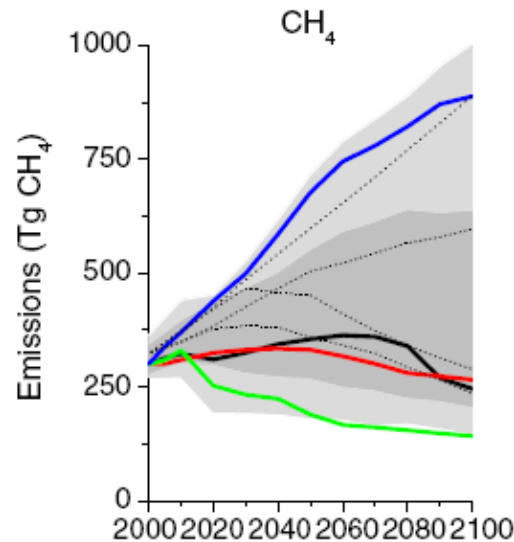
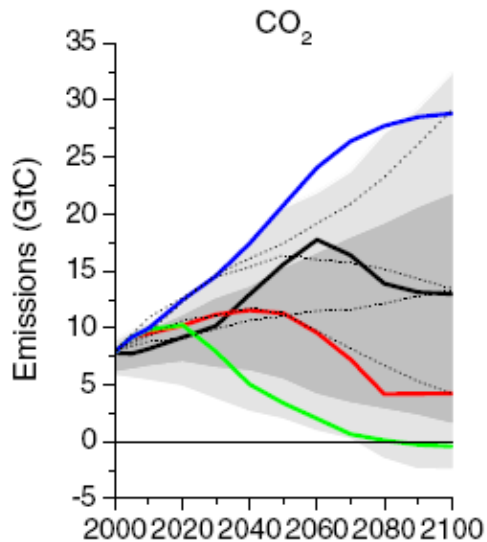
- Option1: Reconstruction based on empirical scaling (sunspot number – solar modulation potential) (ready, grey curve above)
- Option2: Merged SS/TSI dataset from NRLSSI2 and SATIRE-S models (SATIRE-S ready, NRLSSI2 almost)

Předpověď budoucího klimatu

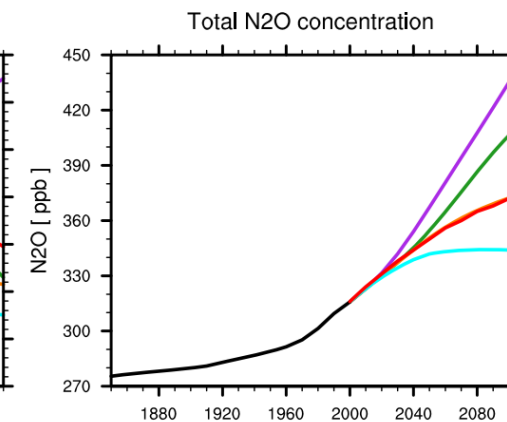
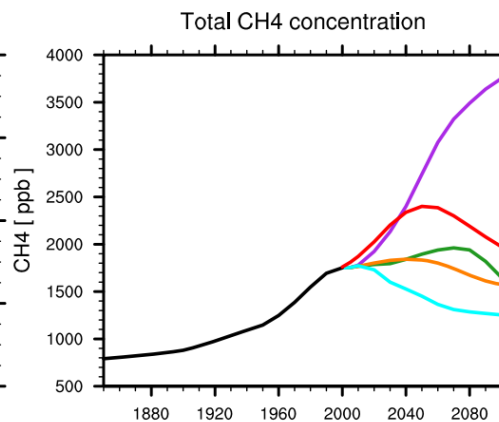
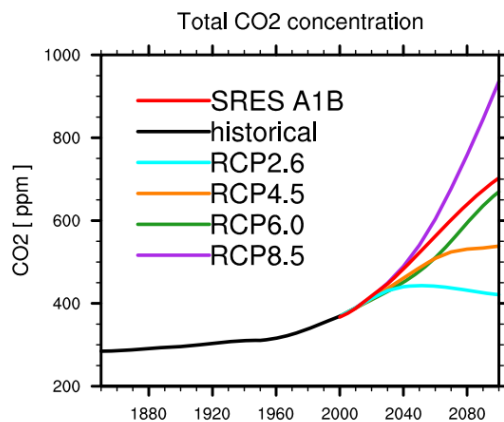
Abychom dokázali modelovat a tím předpovědět klima budoucnosti, potřebujeme znát a do modelů vnést změnu některých vnějších a vnitřních faktorů ovlivňujících klima

- Intenzita Slunečního záření
- **Změna koncentrace skleníkových plynů**
- Výbuch sopky, dopad meteoritu ...

• Změna emise



• Změna koncentrace



Předpověď' budoucího klimatu

Abychom dokázali modelovat a tím předpovědět klima budoucnosti, potřebujeme znát a do modelů vnést změnu některých vnějších a vnitřních faktorů ovlivňujících klima

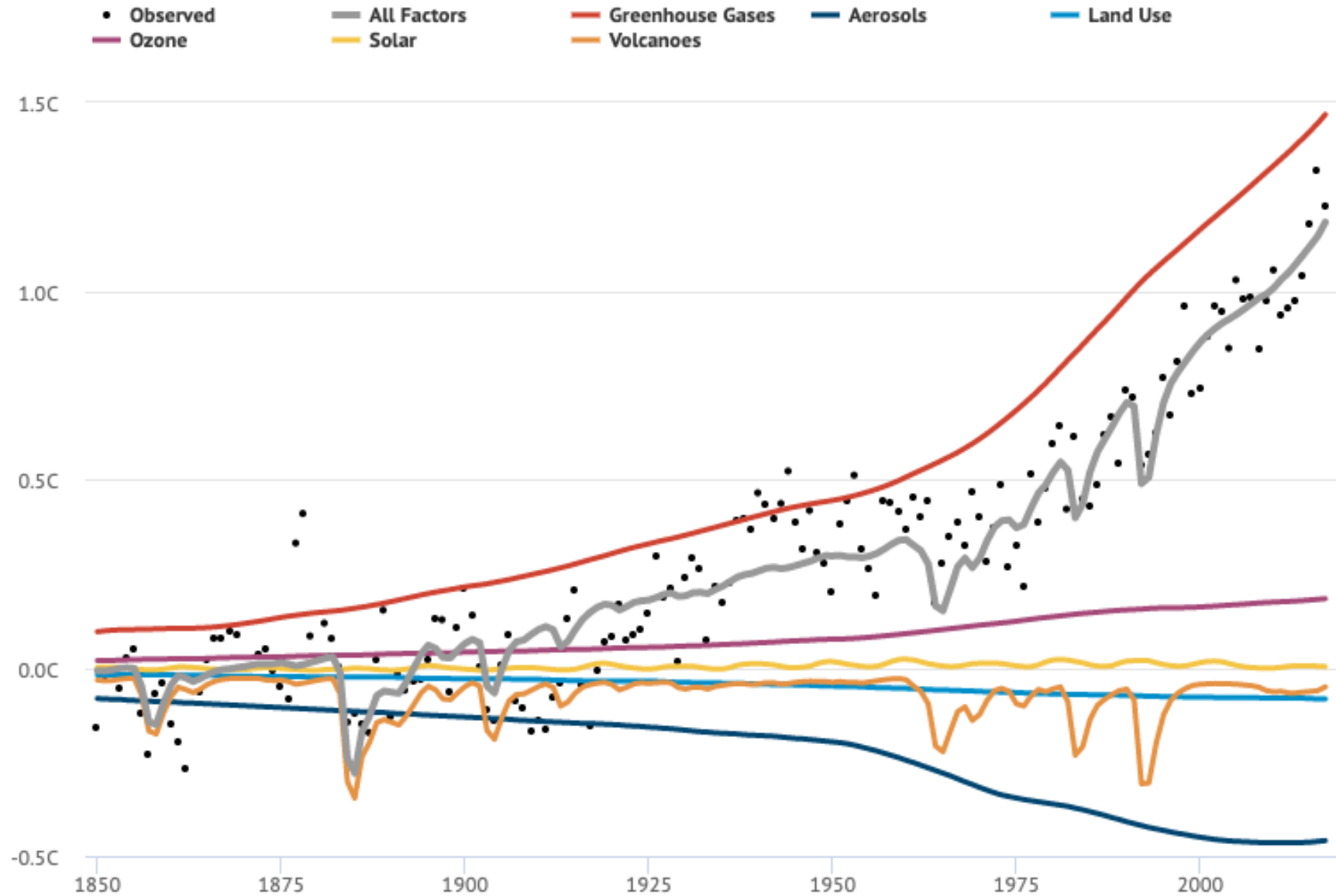
- Intenzita Slunečního záření
- Změna koncentrace skleníkových plynů
- **Výbuch sopky, dopad meteoritu ...**

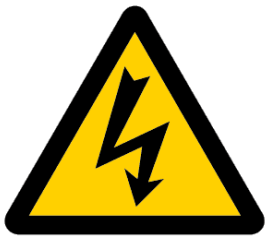


???

Přirozené vs. antropogenní příčiny změny

Global temperatures: Human and natural factors, 1850-2017





! POZOR !

Nejedná se o předpovědi budoucích klimatických podmínek

- Scénáře popisují přijatelné alternativní stavy klimatu v budoucnosti, které mohou za předpokládaných okolností nastat
- Jejich účelem osvětlit nejistoty budoucího vývoje, pomoci najít rámec či meze budoucího vývoje
- Využívají informace z více modelů
- Předpokládané okolnosti např. vývoj koncentrací skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře
- **Odpověď na otázku: co se může stát, když**

- a) jak porostou emise a koncentrace skleníkových plynů a aerosolů v budoucích letech, tedy mj. jakou cestou se bude ubírat vývoj lidské společnosti
- b) jaká bude reakce klimatického systému na růst koncentrací skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře

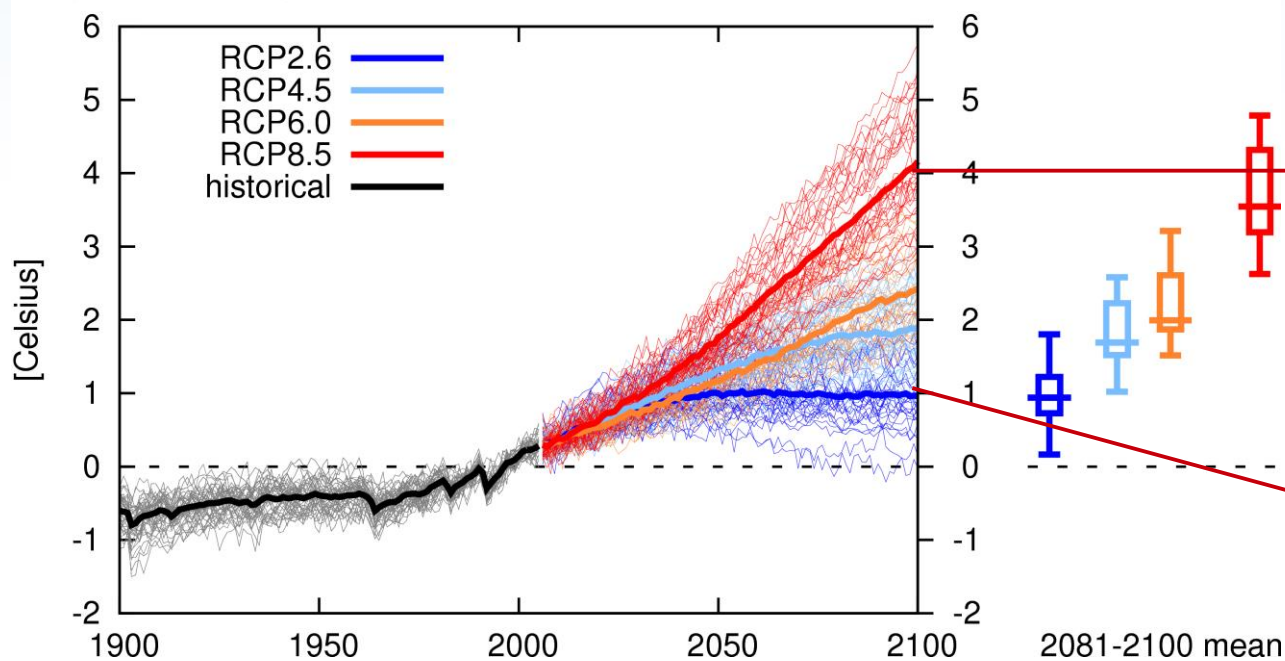
Ve výhledech není zahrnut vliv vnějších faktorů na klimatický systém

Scénáře budoucího klimatu

Změny globální teploty ve 2 m

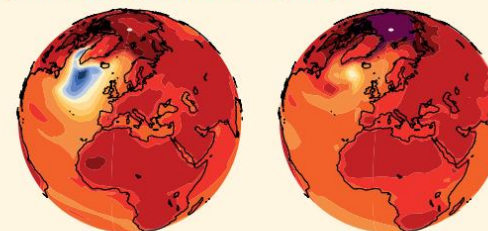
Globální průměr

Temperature change World Jan-Dec wrt 1986-2005 AR5 CMIP5 subset

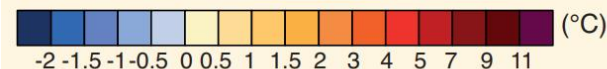
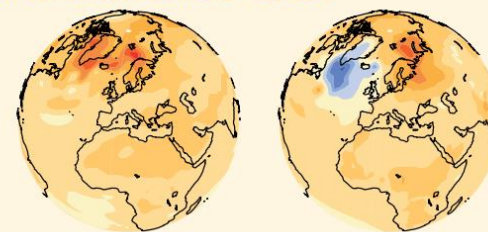


Geografické rozložení

Possible temperature responses in 2081-2100 to high emission scenario RCP8.5

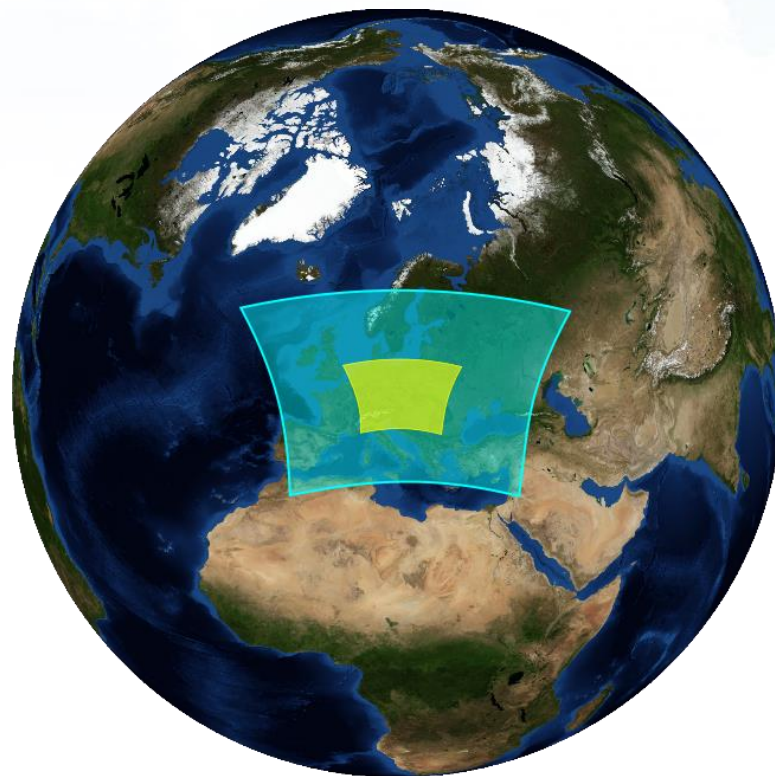


Possible temperature responses in 2081-2100 to low emission scenario RCP2.6



Regionální modely

- „Zahušťují“ informace z globálních modelů (downscaling)
- Statistické (SD)
- Dynamické (RCM)
 - fyzikálně konzistentní – řeší stejné rovnice jako GCM
 - výpočetně náročné (ve srovnání se SD)
 - stále nedostatečné rozlišení se řeší parametrizacemi



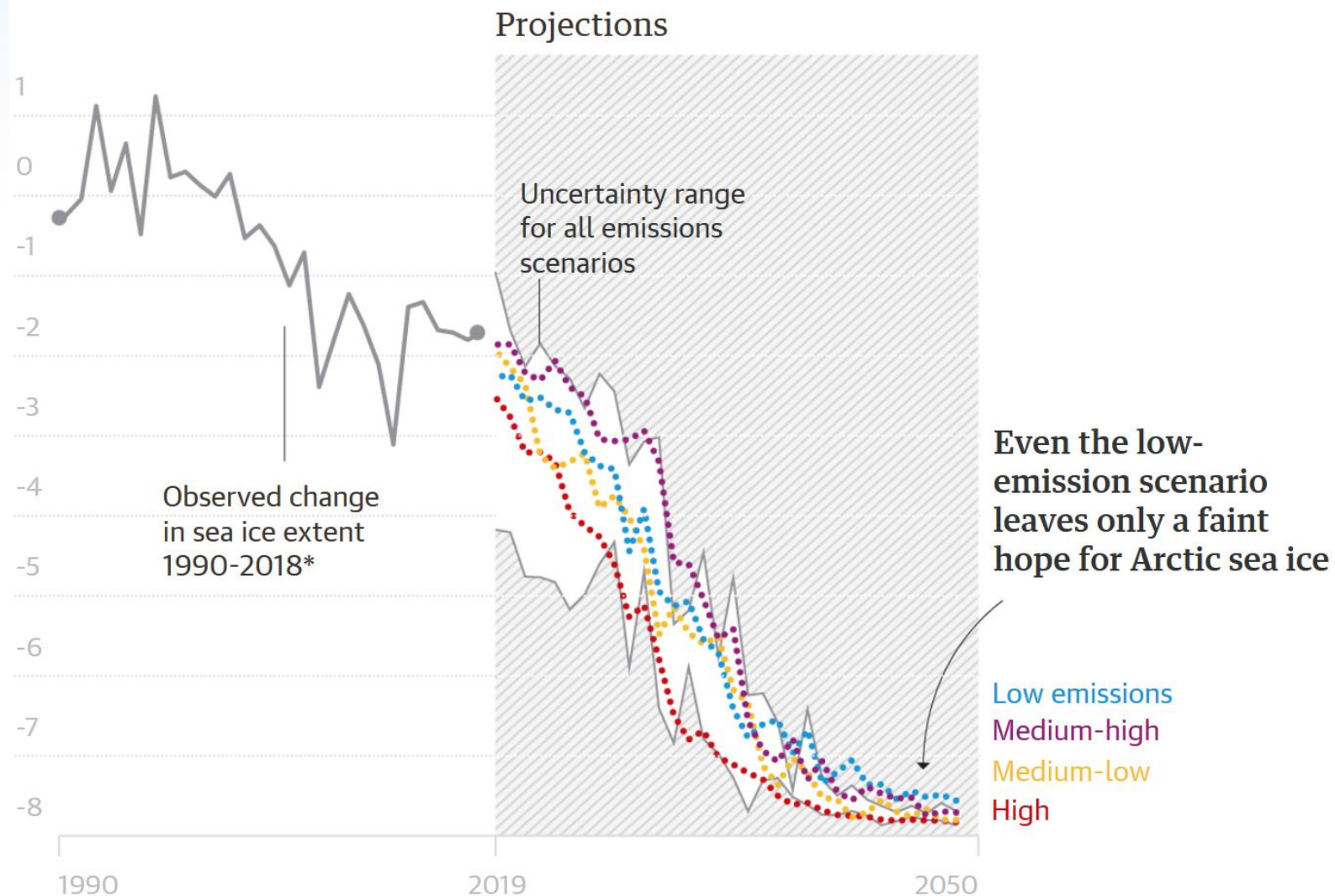
Příklady vývoje klimatu



Vývoj ledu v Arktidě

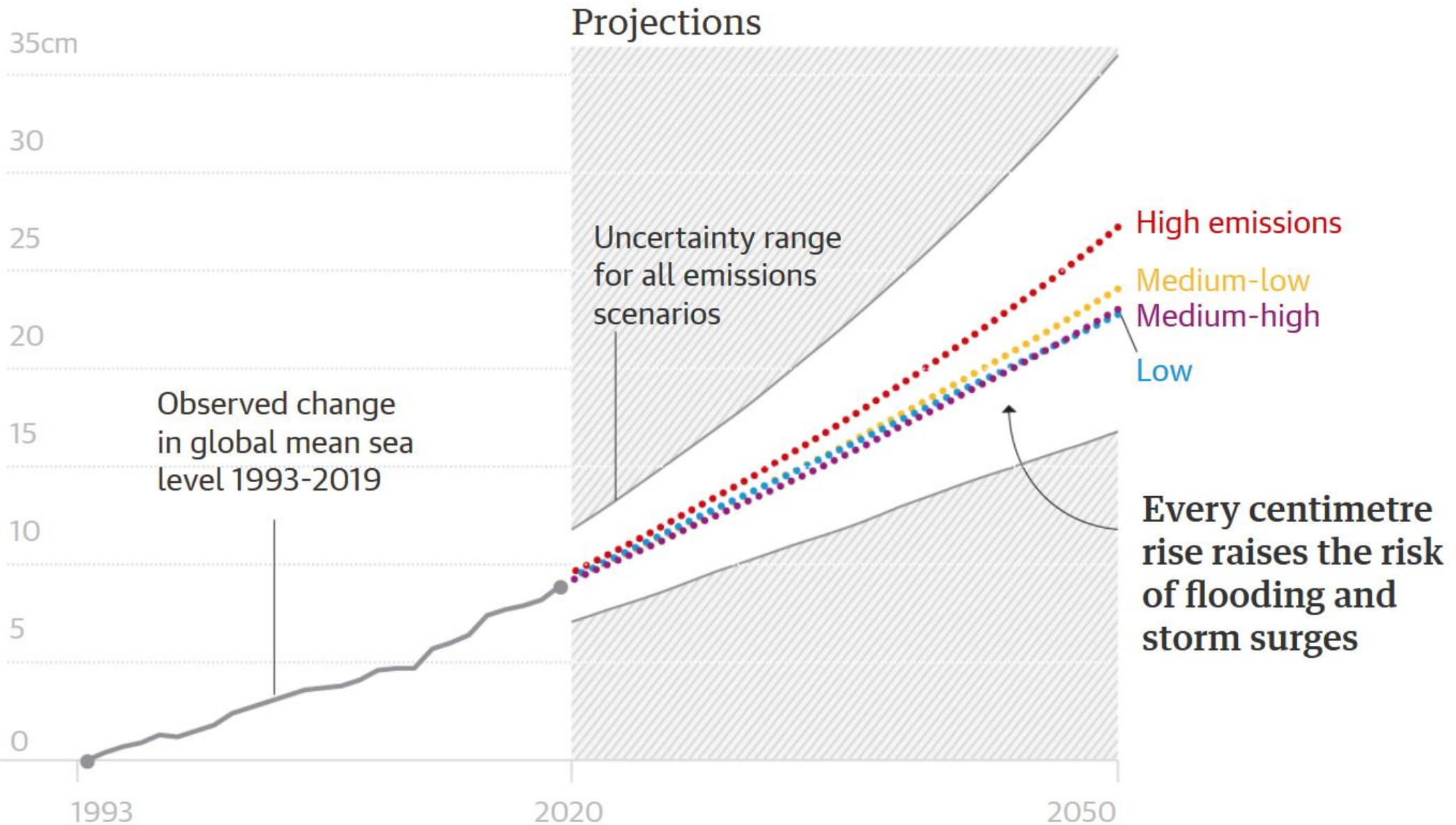
Change in September Arctic sea ice extent

Million sq km, relative to the 1981-2010 average



Vzestup hladiny oceánů

Centimetres difference, compared with 1981-2000 average



Vzestup teploty vzduchu



1950

1990

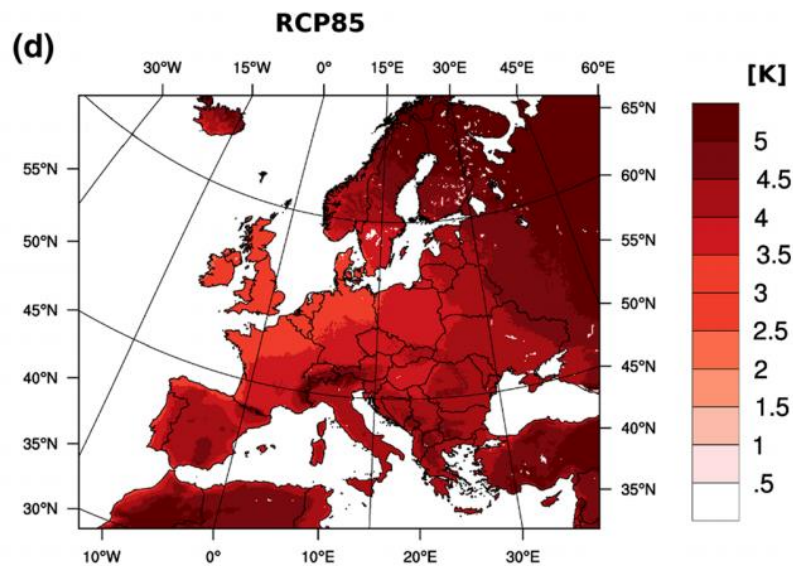
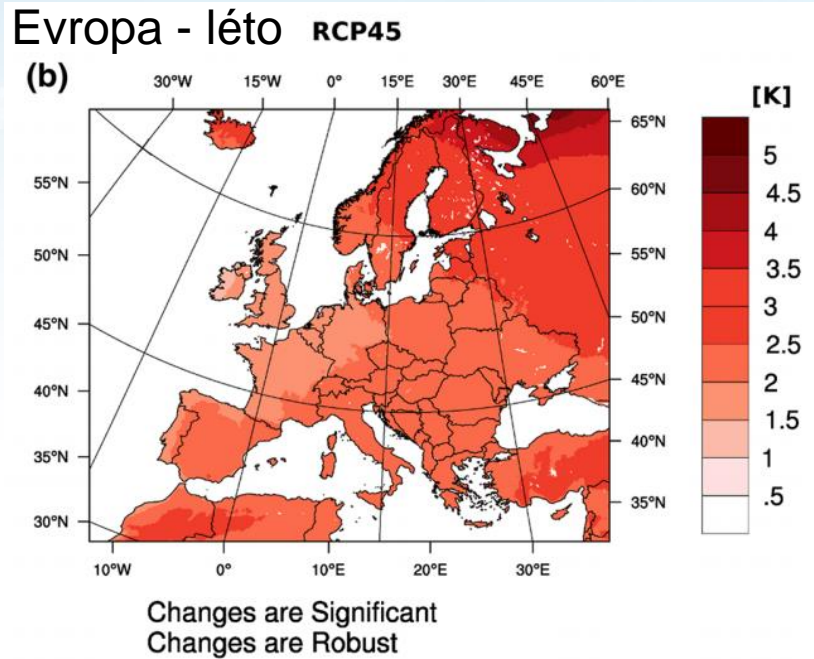
2020

2050

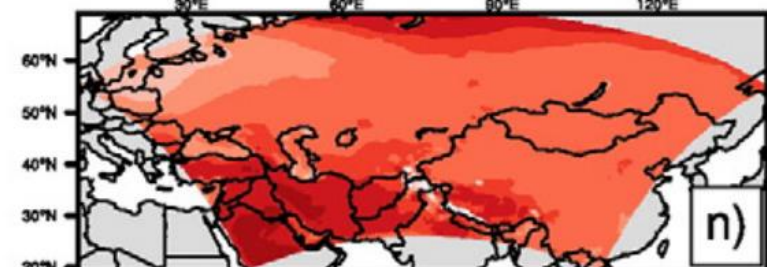
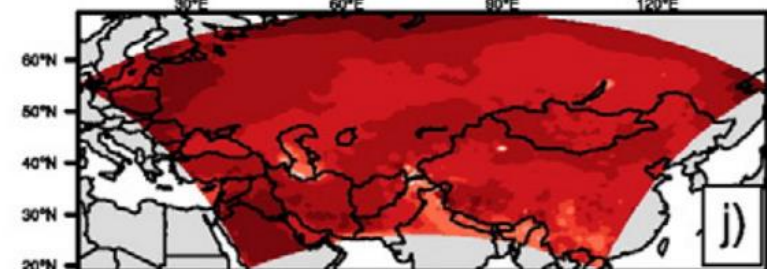
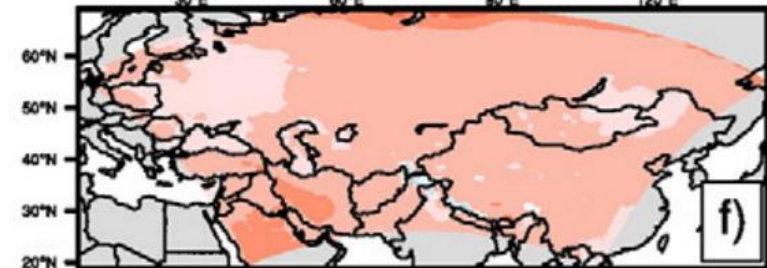
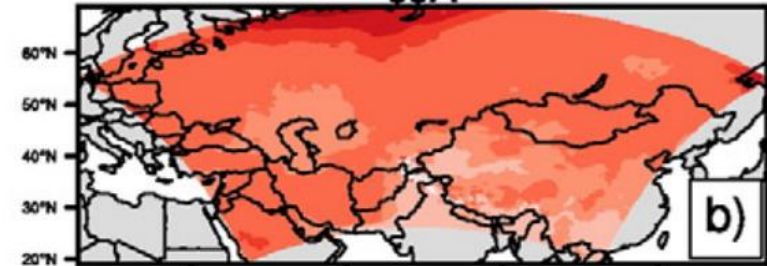
2098

Vzestup teploty vzduchu

Teplota vzduchu ve 2 m (2071-2100) – (1980-2010)

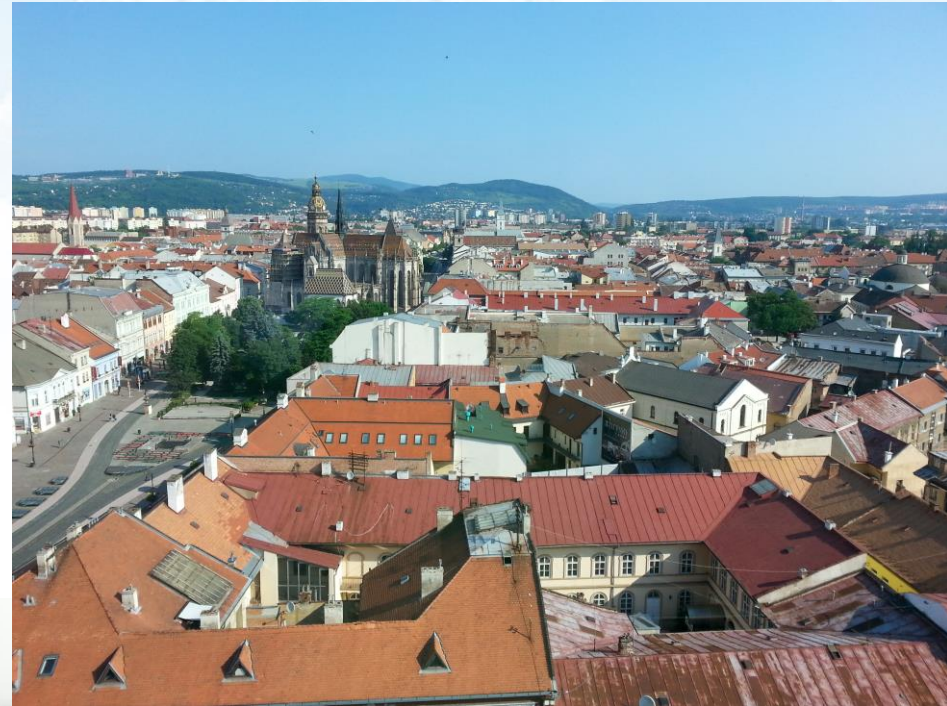


Asie - léto **JJA** různé regionální modely



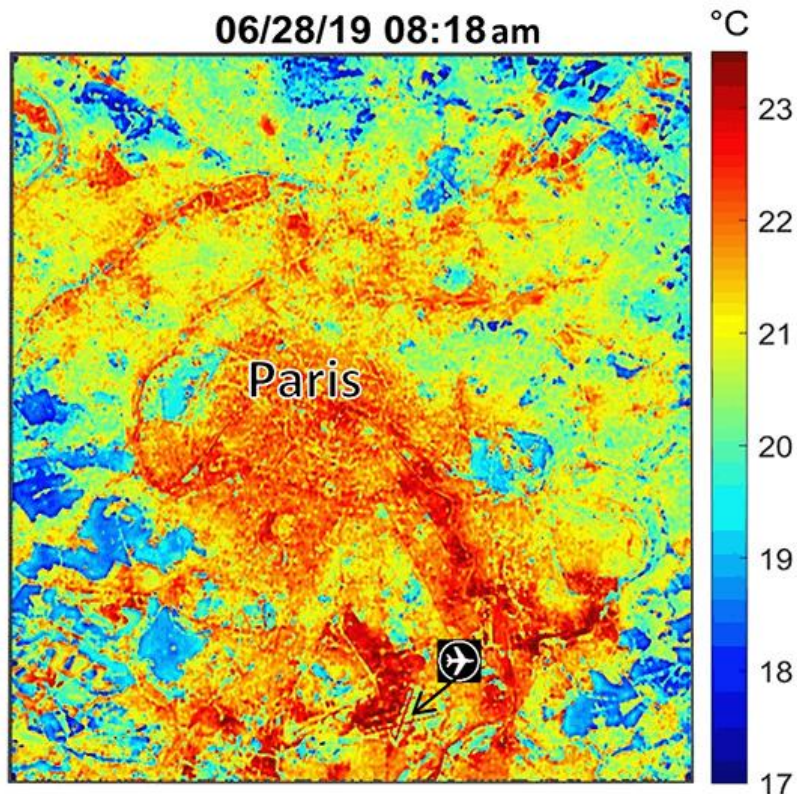
Města jako domov většiny lidí

KFA



Vliv urbanizace

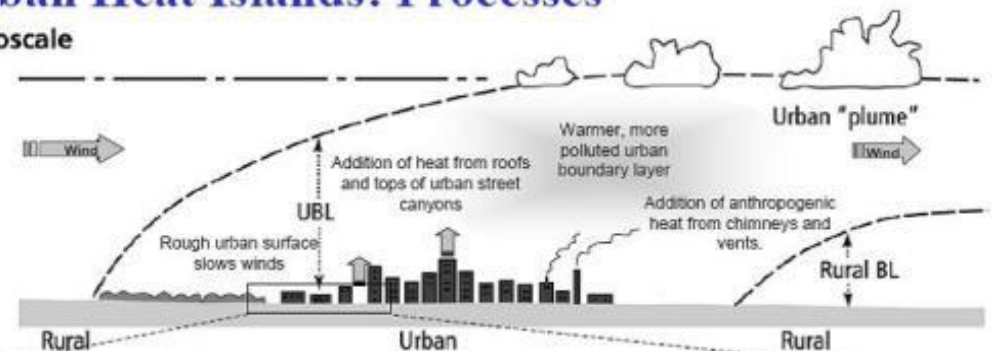
- Vyšší teploty
- Nižší absolutní vlhkost
- Méně oblačnosti



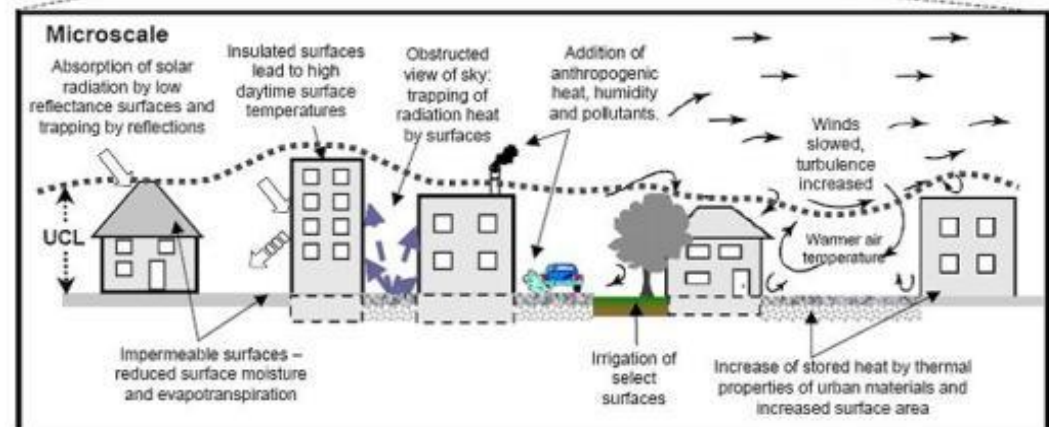
- V průměru nižší rychlosti větru
- Větší turbulentní promíchávání vzduchu

Urban Heat Islands: Processes

Mesoscale

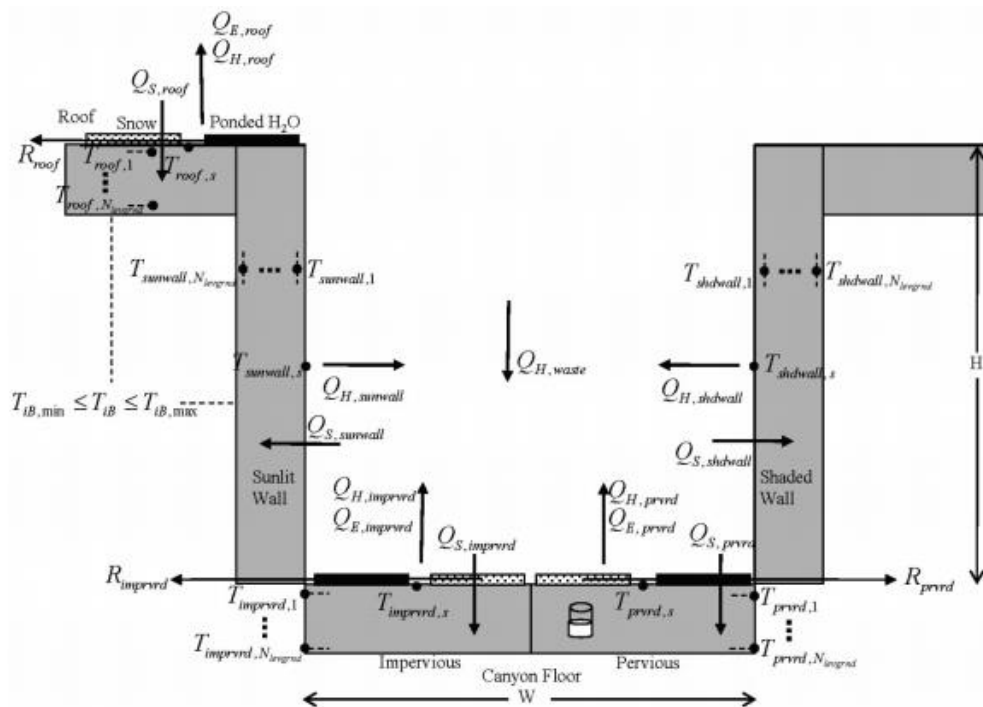


Microscale



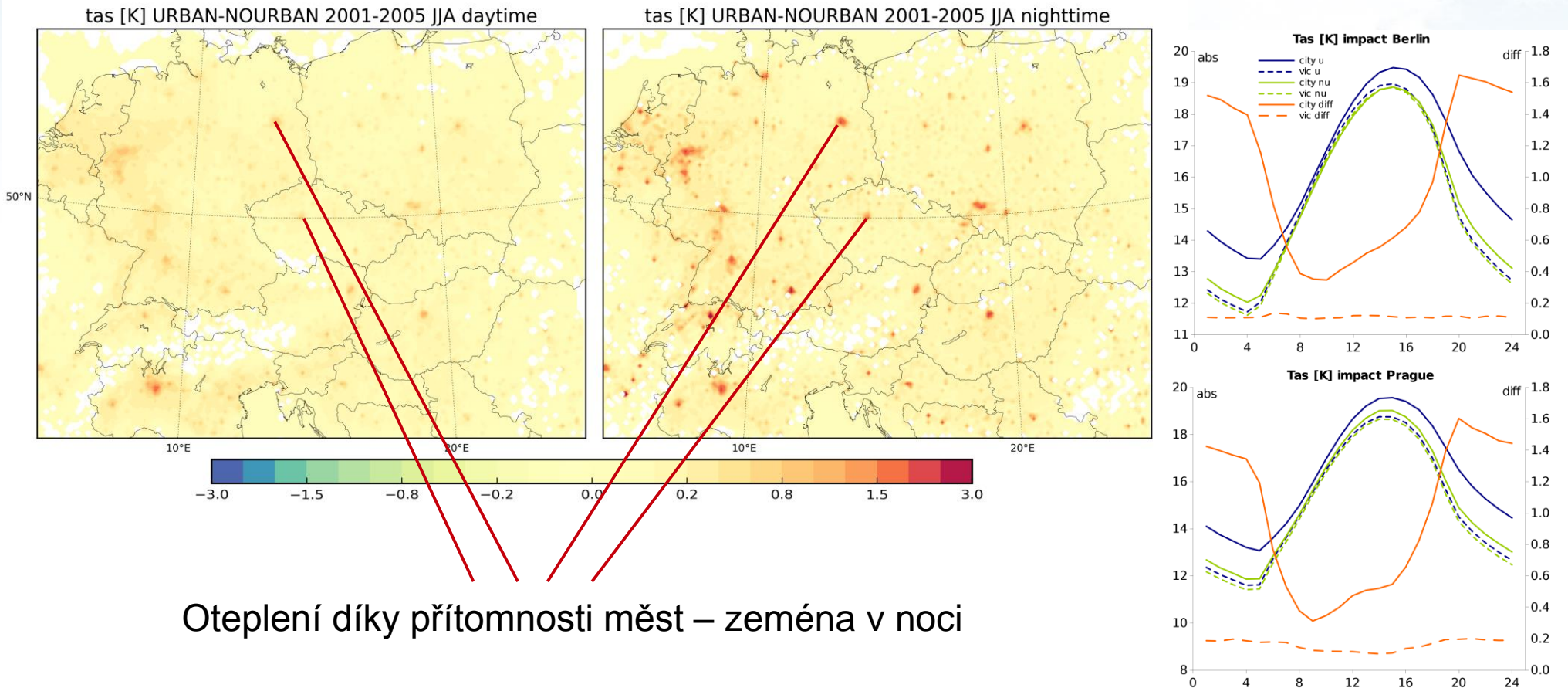
Modelování městského tepelného ostrova

- Zahrnutí vlivu městských povrchu do klimatických modelů (regionálních i globálních) vyžadují speciální postupy (modely) pro popis městských meteorologických efektů
- Urban Canopy Models (UCM) – „modely městské pokrývky“
- Nejjednodušší jsou tzv. jednovrstvové UCM – Single layer Urban Canopy Models, které uvažují město je množina různě orientovaných uličních kaňonů, s předem nastavenou výškou budov a šířkou ulice.
- UCM umožňují zahrnout vliv měst na meteorologické podmínky i při rozlišení modelů $\sim 10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$.



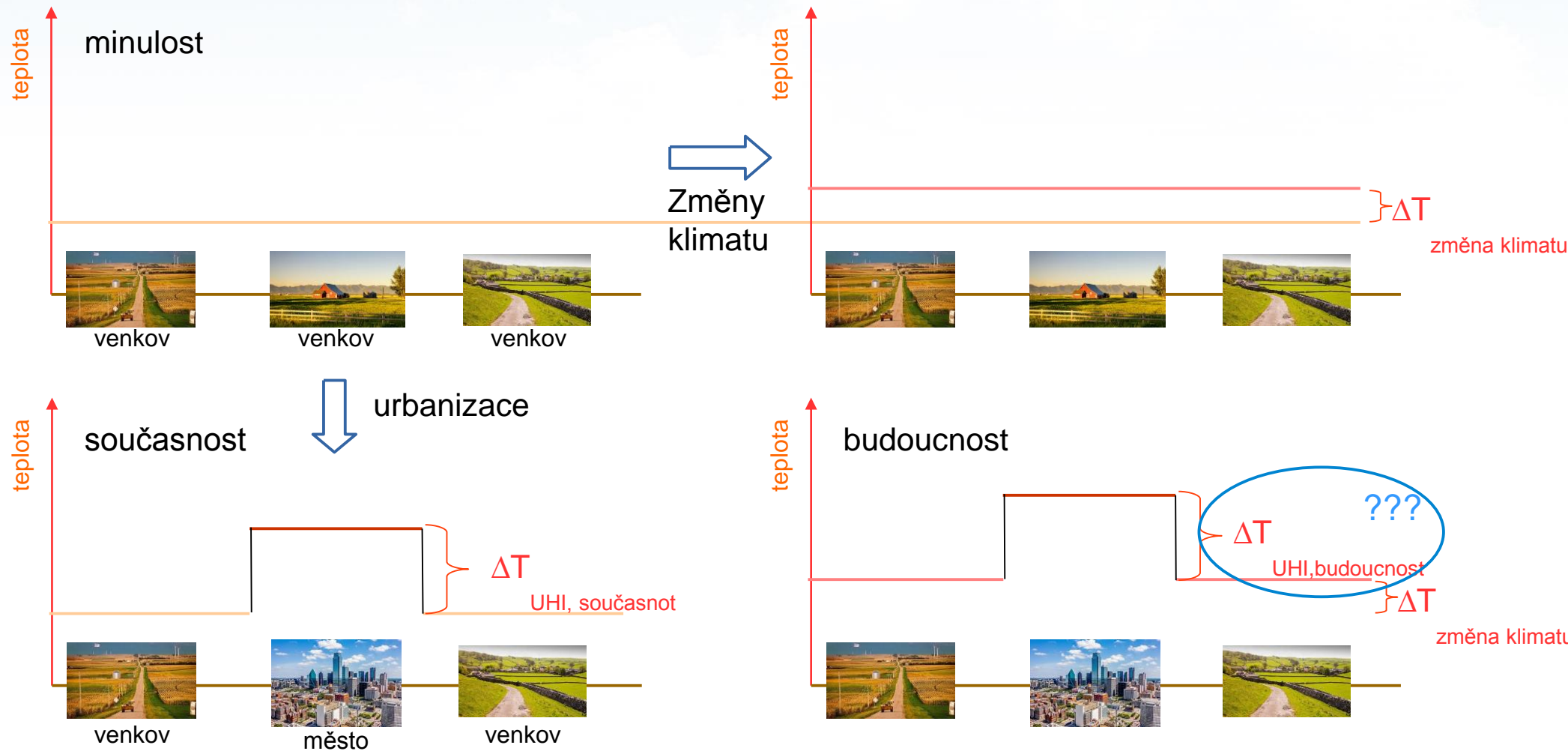
Modelování městského tepelného ostrova

- Regionální modelování vlivu městského povrchu ve střední Evropě pomocí regionálního klimatického modelu RegCM se zahrnutým modelem UCM



Městský tepelný ostrov a klimatické změny

- Samotná města díky svému charakteristickému povrchu způsobují zvýšení lokálních teplot
- Navíc probíhá globální klimatické změny – zvyšování průměrných globálních teplot
- Jaký je vzájemný vliv těchto dvou změn: *urbanizace a klimatických změn?*



Městský tepelný ostrov a klimatické změny

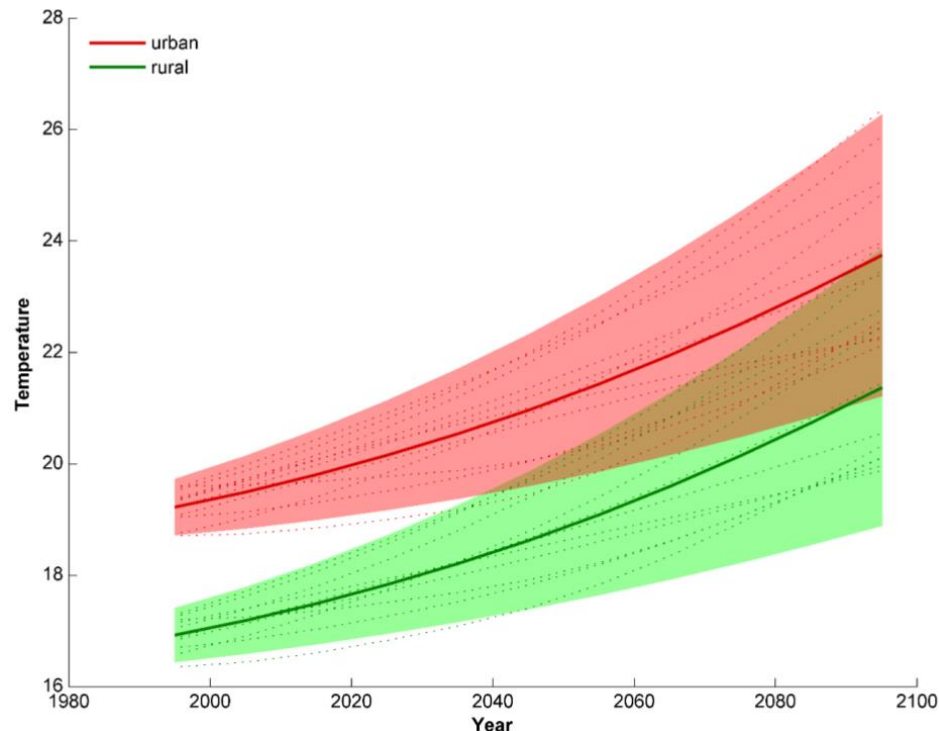
- V rámci klimatických změn se zvyšují průměrné teploty jak nad venkovními oblastmi, tak i v městech
- Otázka ale je, jestli je toto zvyšování v obou případech rovnoměrné, nebo budou teploty v městech růst jiným tempem
- Jinými slovy, jak se bude UHI v budoucnosti v důsledku klimatických změn měnit.

??? ΔT

$\geq < \Delta T$

UHI, budoucnost ???

UHI, současnost



Městský tepelný ostrov a klimatické změny



- Ukazuje se, že se teploty v centrech měst zvyšují rychleji, než v okolí
- Zvětšuje se tedy intenzita tepelného ostrova
- Jde ale o malý růst, který může být “maskován” změnami urbanizace přírodního povrchu

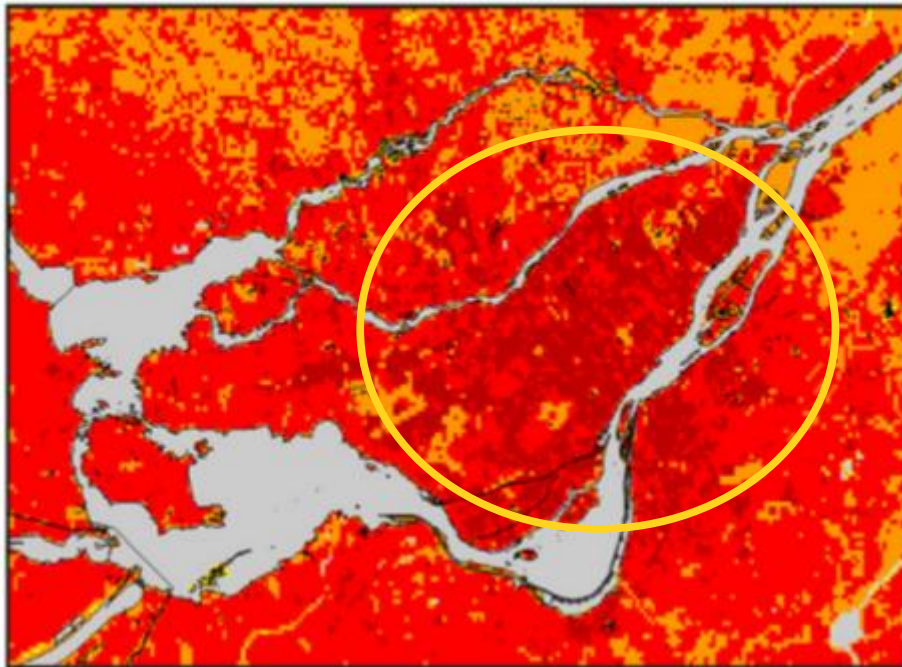
??? ΔT

UHI, budoucnost???

$\geq \leq \Delta T$

UHI, současnost

- Montreal – teplota (2071-2100) – (1980-2010)



City	Ref. UHI (°C)	Δ Rural (°C)	Δ Urban (°C)	Δ UHI (°C)	Uncertainty (°C)
Almada	2.47	4.51	4.58	0.07	0.07
Antwerp	2.30	4.12	4.20	0.08	0.07
Berlin	2.70	4.53	4.64	0.11	0.09
Bilbao	2.12	4.56	4.63	0.08	0.06
London	2.98	4.31	4.32	0.01	0.08
New York	3.57	4.87	5.08	0.21	0.12
Rio	2.95	3.30	3.18	-0.12	0.10
Skopje	2.25	6.74	6.85	0.10	0.09



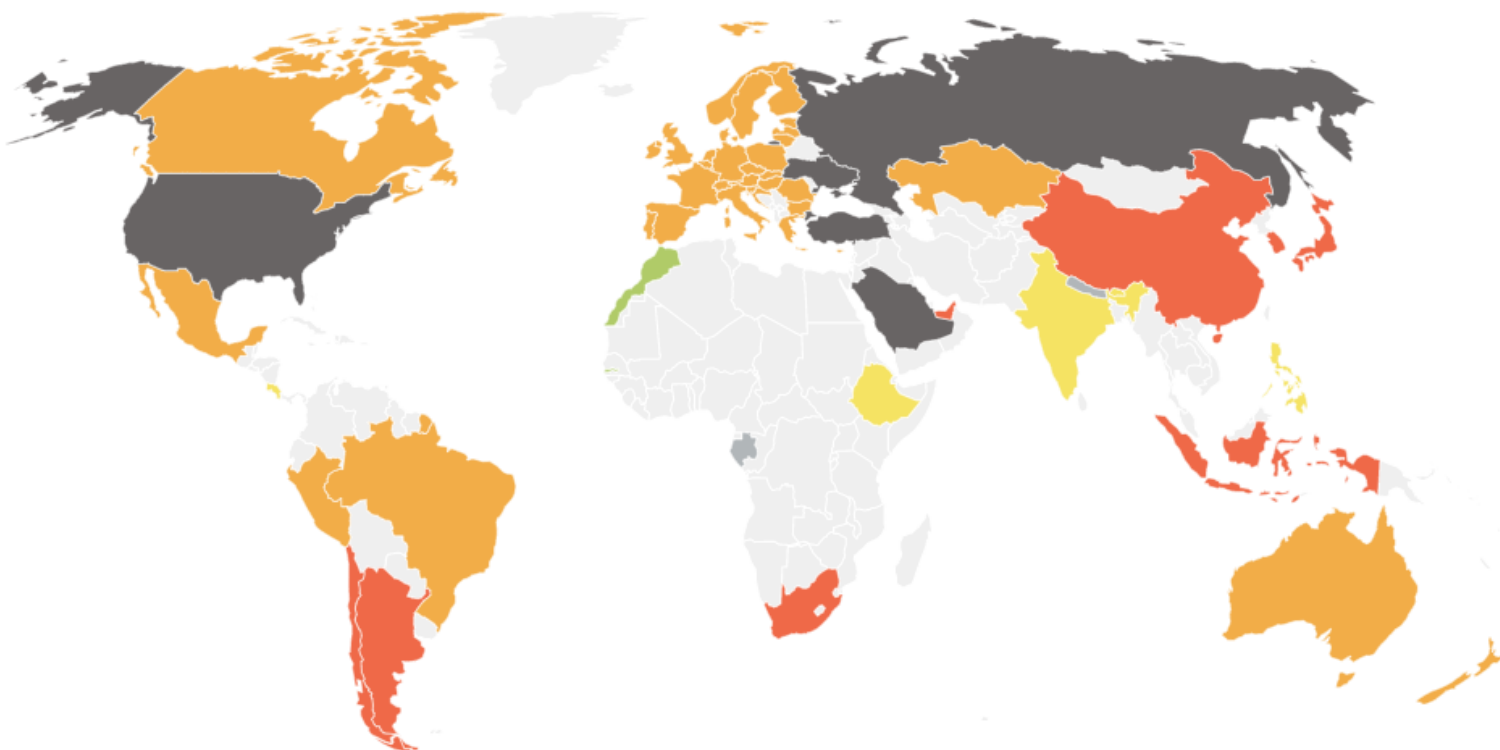
Změna intenzity tepelného ostrova vybraných měst do konce 21. století

A co bude dál?



2100 WARMING PROJECTIONS

Emissions and expected warming based on pledges and current policies



The maps displayed are for reference only.

LAST UPDATE: September 2019



1.5°C consistent
1.3°C



Projevy změny klimatu

- V mnoha oblastech a podobách ...

vyšší teploty

častější sucha

extrémnější počasí

změna režimu srážek

méně sněhu

tání permafrostu
a ledovců

zvyšování kyselosti
oceánů

oteplování oceánů
vzestup hladiny
moří



Změna klimatu v Česku

- Dochází k oteplování, roste počet teplých a **extrémně teplých** dnů i nocí, klesá počet dnů studených
- Množství ročních srážek se příliš nezmění – rozdíly mezi modely
- Mění se charakter srážek – **stoupá množství intenzivních srážek** (bouřky) a zároveň se zvyšuje počet za sebou jdoucích dnů bez srážek
- Změna zimních srážek – **méně sněhu**, problém s podzemní vodou
- Kvůli zvýšené teplotě a nevýrazné změně v množství srážek roste výpar a tedy **větší tendence k suchu**
- Rychlejší nástup vegetačního období na jaře = dřívější spotřeba půdní vláhy rostlinami = další vysušování

Projekt PERUN

- **P**rediction, **E**valuation and **R**esearch for **U**nderstanding **N**ational sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia
- zaměřen na výzkum klimatických extrémů, sucha a důsledků jeho prohlubování v České republice
- zapojena řada institucí:
 - ČHMÚ, Česká geologická služba, MFF a PŘF UK, ÚFA a ÚVGZ AV ČR, v. v. i., Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. M., v. v. i. a PROGEO, s. r. o.
- bude podrobně analyzovat probíhající a predikované budoucí změny, včetně identifikace rizik pro životní prostředí a pro společnost
- výstupem budou mj. podklady nutné pro přípravu a aktualizaci strategických dokumentů a pro rozhodovací procesy nejen v oblasti adaptací na změnu klimatu, ale i pro doporučení a hodnocení mitigačních opatření v procesu jejich přípravy i realizace

A co se s „tím“ dá dělat?

MITIGACE



ADAPTACE



Mitigace



Adaptace



Je vhodné zdůraznit, že ...

- Extrémy jsou přirozenou součástí klimatu Země, ale při oteplování kvůli skleníkovým plynům roste jejich četnost a velikost/intenzita
- Klimatický systém je **nelineární** – **malá změna může vyvolat masivní odezvu**
- Mimořádně citlivé jsou hlavně arktické oblasti – jakmile roztaje led a permafrost, bude to mít dramatické dopady
- Pro budoucí vývoj je nutné klima co nejlépe modelovat

Závěrem

- Výsledky pozorování i modelování potvrzují, že probíhající změna klimatu je z velké části způsobena činností člověka (hlavně spalováním fosilních paliv)
- Klimatické modely jsou velmi užitečné pro hodnocení dopadu činnosti člověka na klima i pro vytváření scénářů budoucího vývoje
- V následujících desetiletích lze očekávat prohlubování (negativních) dopadů změny klimatu, nejen samotný nárůst teploty vzduchu a oceánů
- Problém budoucího vývoje – jak se budou měnit emise skleníkových plynů, i samotné nejistoty vlastních modelů
- S ohledem na rostoucí počet obyvatel ve městech je důležité modelovat i specifika městského klimatu a jeho změny

Dopady změny klimatu nejsou/nebudou spravedlivé

KFA



COSTA A

Děkuji Vám za pozornost

