

Mikrofon podnebjju: znanje in kompetence za komuniciranje podnebnih sprememb

Fizika podnebnih sprememb

dr. Žiga Zaplotnik



CARE
4 CLIMATE



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Fizika podnebnih sprememb

ziga.zaplotnik@fmf.uni-lj.si
<https://zaplotnik.github.io/>
@ZaplotnikZiga

Žiga Zaplotnik,
Podoktorski raziskovalec
Fakulteta za matematiko in fiziko, UL

Sosledje

1. **Zemlja v Osončju:** nekaj o sevanju in časovnih variacijah sevanja Sonca
2. **Ozračje:** sestava; kaj pomeni „toplogredni“ plin?
3. **Spreminjanje podnebja:** dokazi za krivdo človeka
4. **Obeti**
5. **Sklepne misli**

Spekter sevanja

- Vsa telesa sevajo!
- Kaj je sevanje? → EM valovanje
- Količina energije, ki jo lahko seva telo, najbolj zavisi od temperature telesa

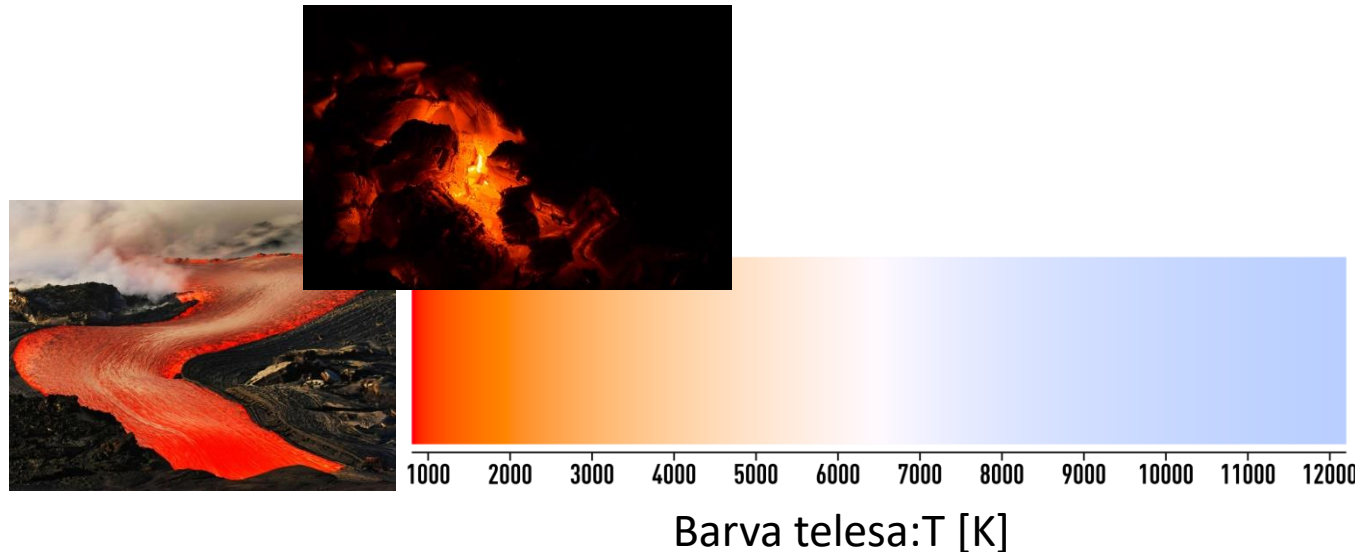
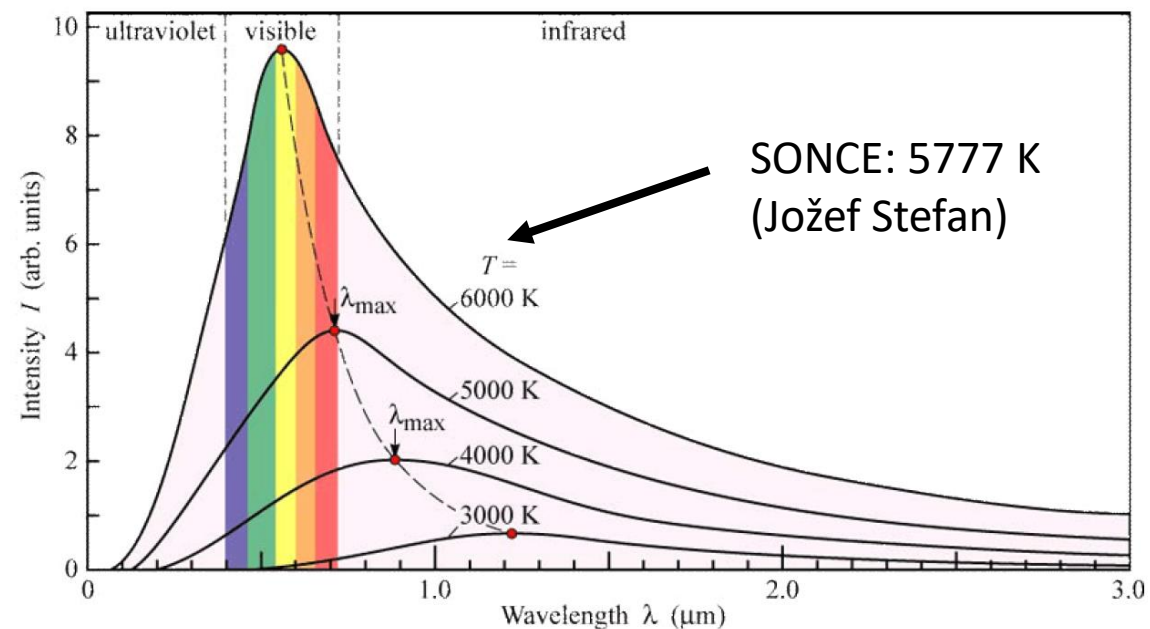
- Skupni izsev : $j = \int_0^{\infty} j(\lambda)d\lambda = \sigma T^4$

→ Stefan-Boltzmannov zakon

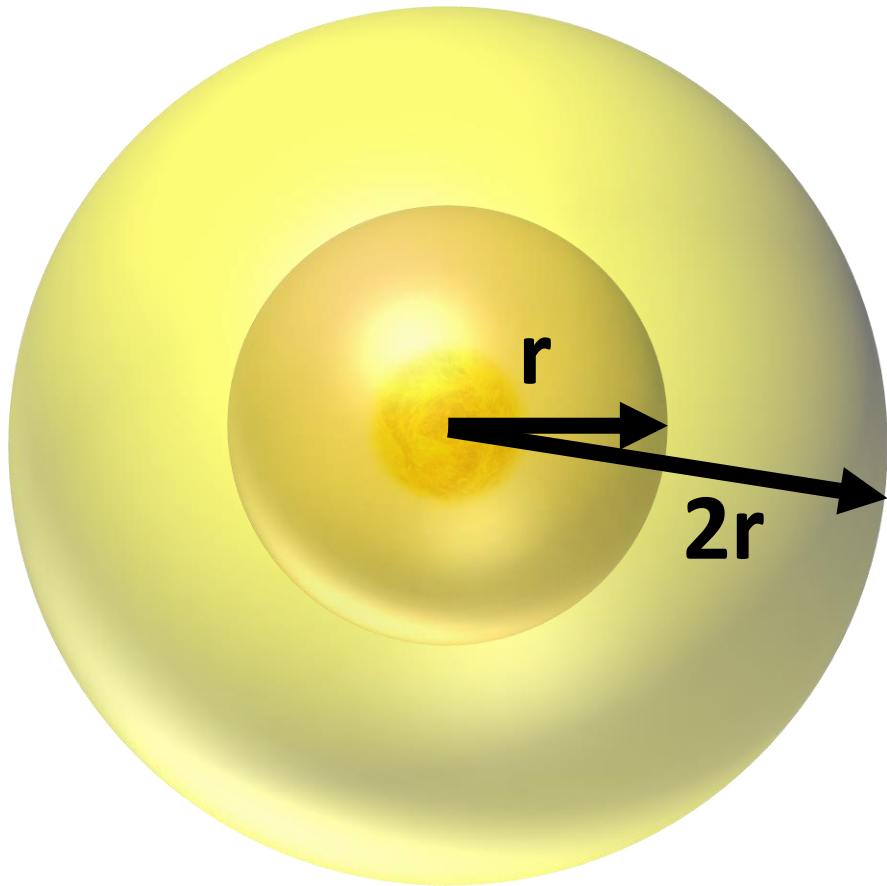
- Valovna dolžina, pri kateri telo izseva največ (Wienov zakon):

$$\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T}$$

Spekter sevanja črnega telesa pri različnih temperaturah



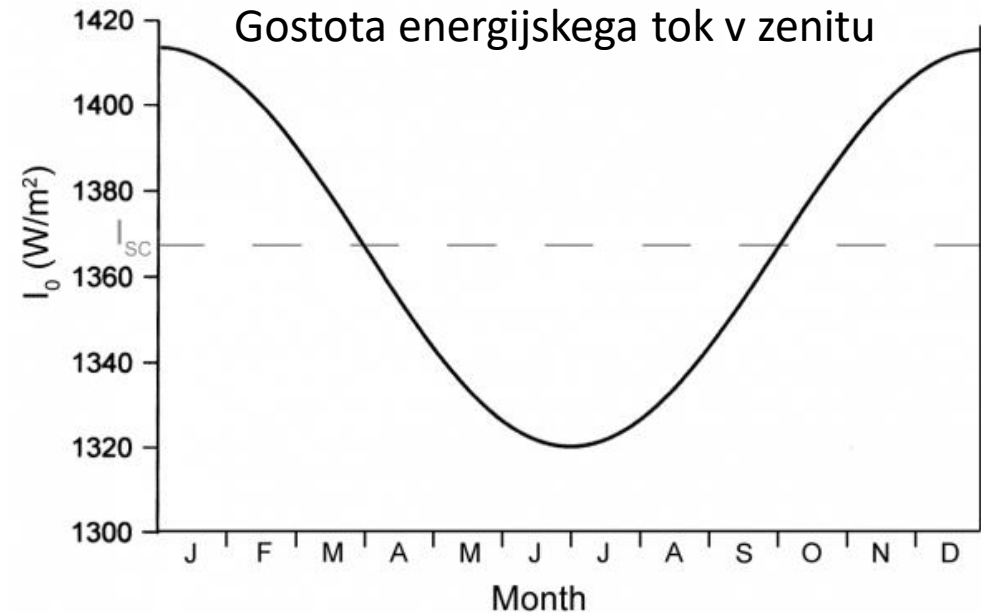
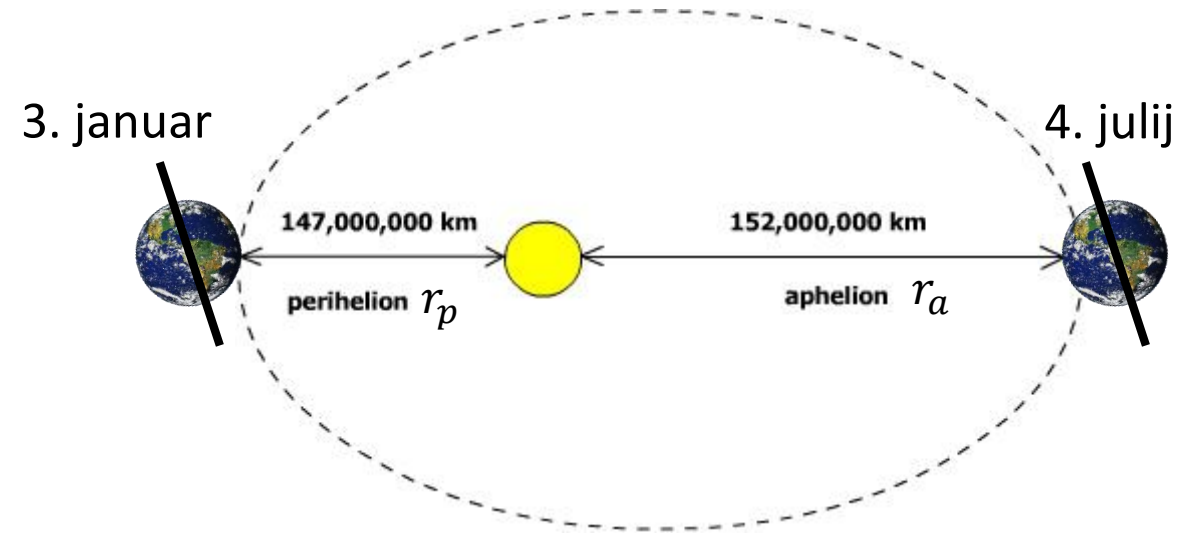
Sevanje v prostoru



1. Sonce seva z močjo **P**.
2. Na razdalji **r** se moč **P** enakomerno razporedi po površini krogle z radijem **r**, torej po površini **$4\pi r^2$**
 \Rightarrow gostota energijskega toka:
$$j(r) = P/S = P / (4\pi r^2)$$
3. Na razdalji **2r** se moč **P** enakomerno razporedi po površini krogle z radijem **2r**, torej po površini **$4\pi(2r)^2 = 16\pi r^2$**
 \Rightarrow gostota energijskega toka:
$$j(2r) = P/S = P / (16\pi r^2) = j(r)/4$$
4. Na vrhu atmosfere je energijski tok v povprečju enak **1361 W/m^2** (solarna konstanta)

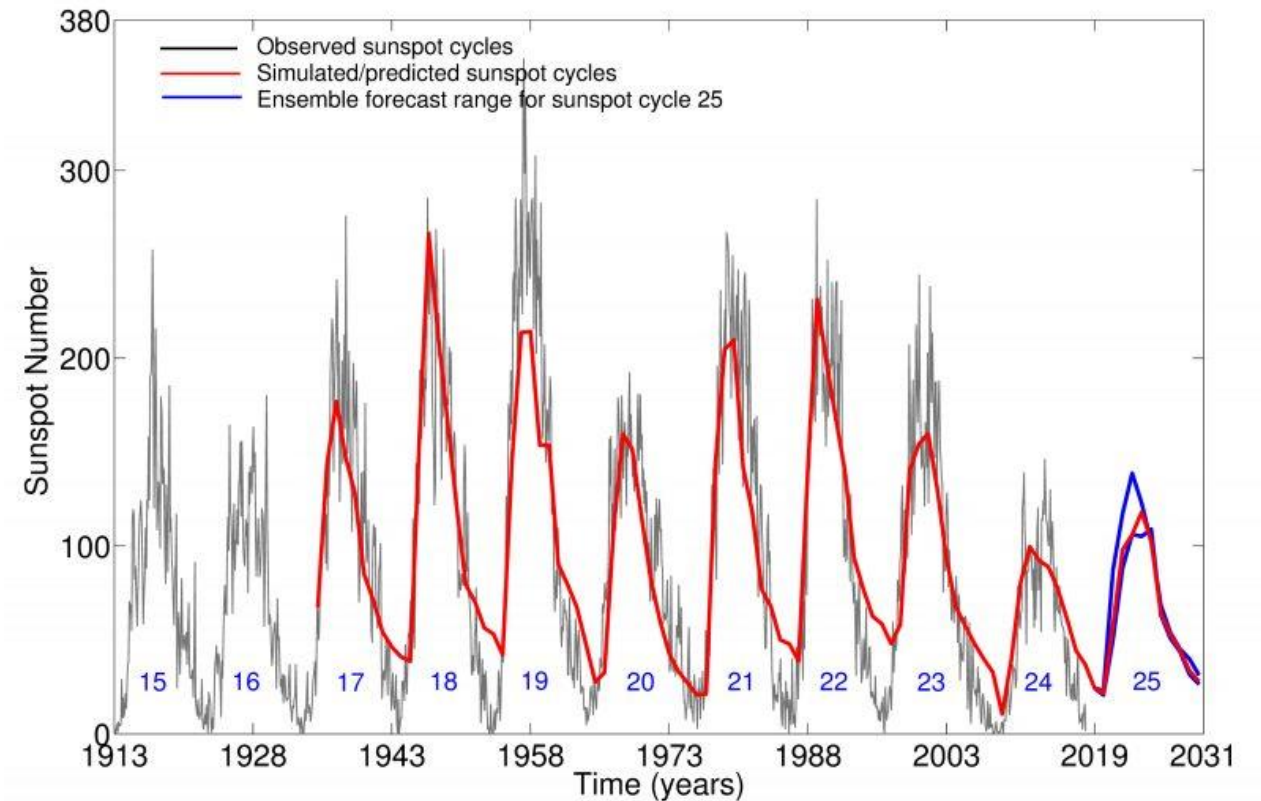
Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)



Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)



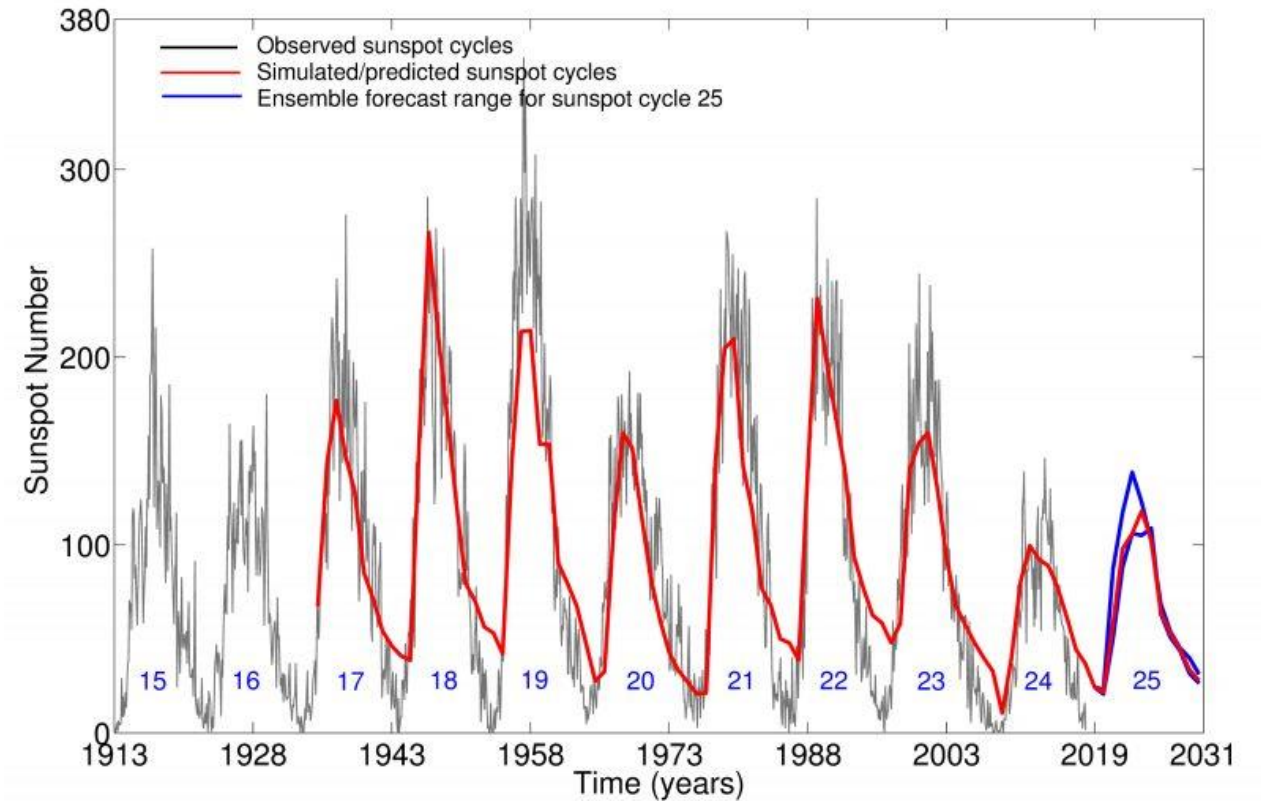
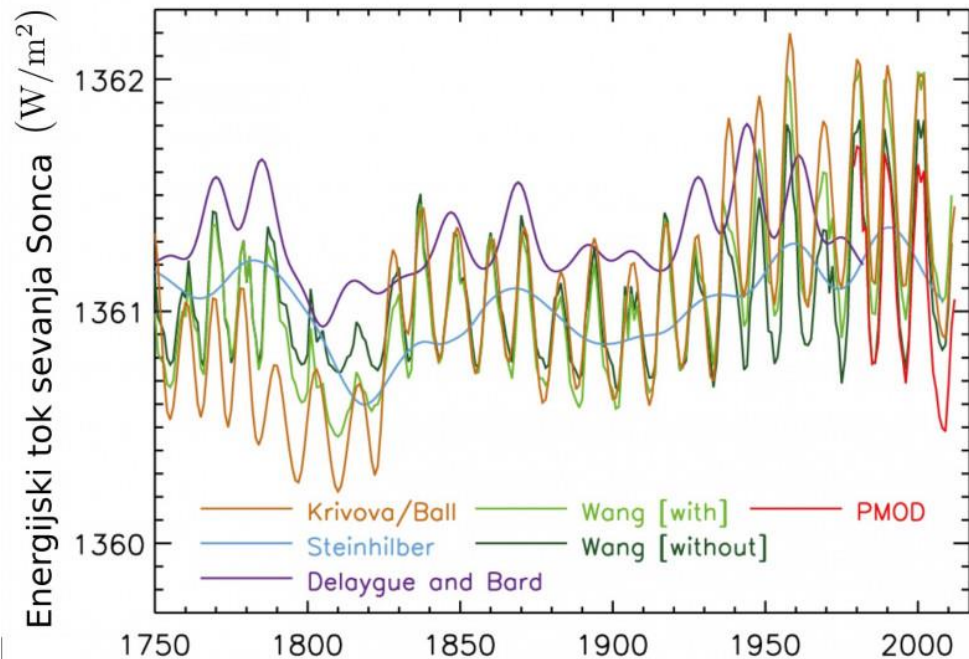
Trenutno ni sončevih peg!

Število sončevih peg je pozitivno korelirano z gostoto energijskega toka na vrhu atmosfere.

11-letno drseče povprečje pada že od 1990 dalje!

Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)



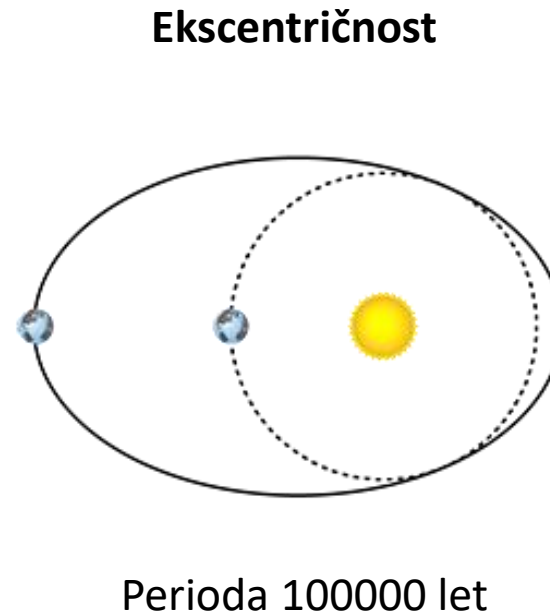
Trenutno ni sončevih peg!

Število sončevih peg je pozitivno korelirano z gostoto energijskega toka na vrhu atmosfere.

11-letno drseče povprečje pada že od 1990 dalje!

Zemlja v Osončju

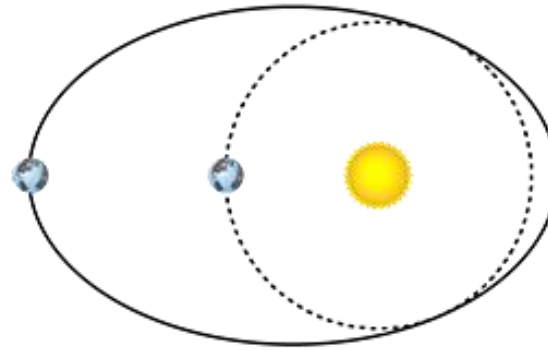
- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Ekscentričnost pada → čez 27000 let bo tirnica skoraj krožnica



Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Ekscentričnost pada → čez 27000 let bo tirnica skoraj krožnica
 - Nagib Zemljine osi za 23.5° glede na pravokotnico na ravnino ekliptike → letni časi (trenutno 23.44° in pada)

Ekscentričnost



Perioda 100000 let

Nagib osi

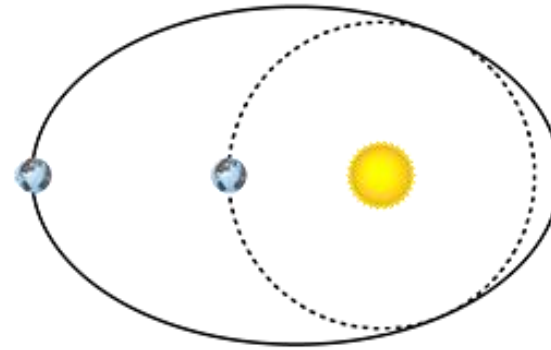


Perioda 41000 let

Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Ekscentričnost pada → čez 27000 let bo tirnica skoraj krožnica
 - Nagib Zemljine osi za 23.5° glede na pravokotnico na ravnino ekliptike → letni časi (trenutno 23.44° in pada)
 - Precesija osi

Ekscentričnost



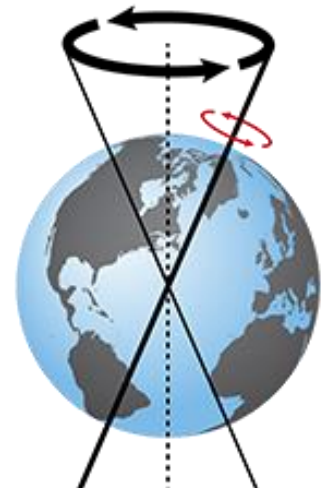
Perioda 100000 let

Nagib osi



Perioda 41000 let

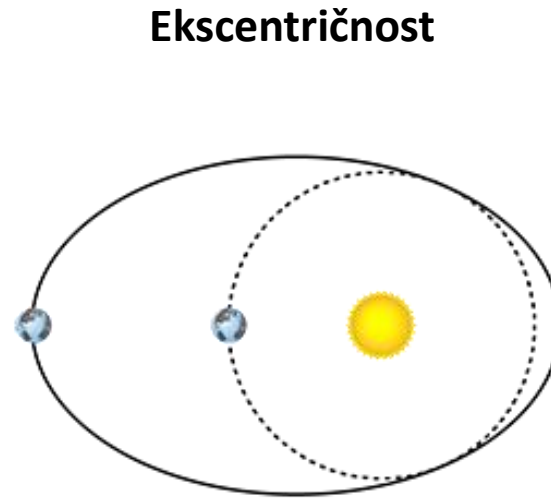
Precesija



Perioda 26000 let

Zemlja v Osončju

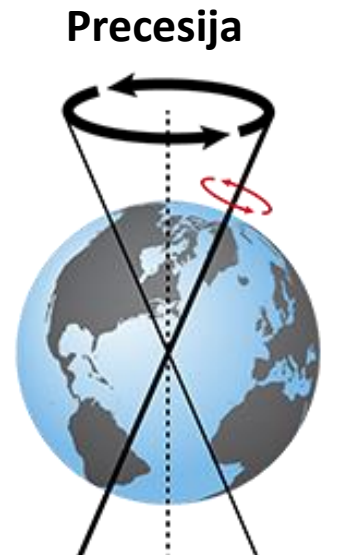
- Vzroki časovnih variacij solarne konstante:
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Ekscentričnost pada → čez 27000 let bo tirnica skoraj krožnica
 - Nagib Zemljine osi za 23.5° glede na pravokotnico na ravnino ekliptike → letni časi (trenutno 23.44° in pada)
 - Precesija osi
 - Zemljino površje hkrati ni homogeno (npr. na S polobli mnogo več kopnega)
- **Milankovičevi podnebni cikli**



Perioda 100000 let



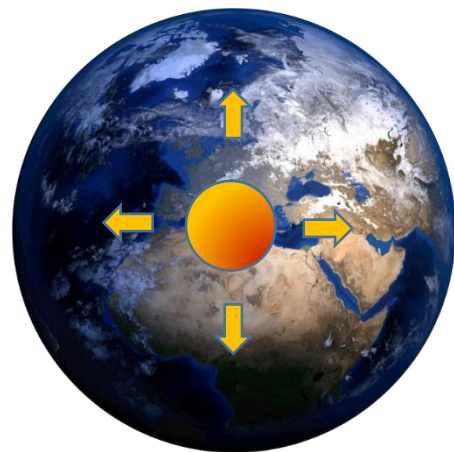
Perioda 41000 let



Perioda 26000 let

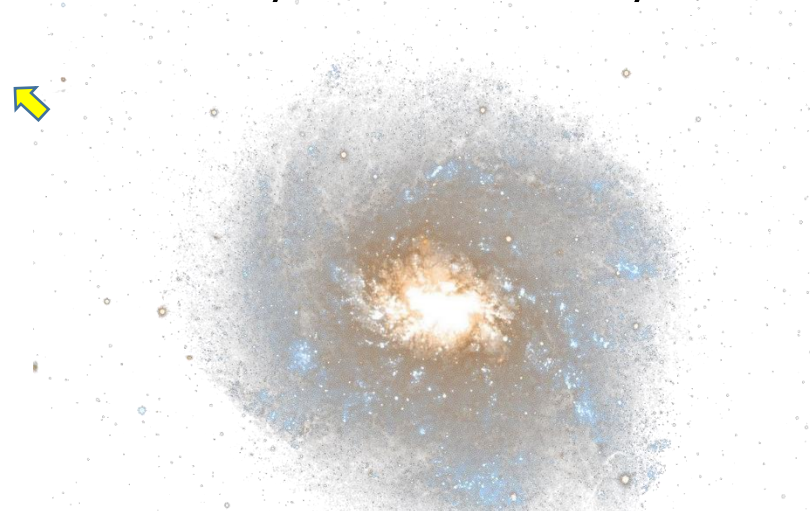
Energijska bilanca Zemlje brez ozračja

Od tal odbito
sončevo sevanje



Drugi vplivi ?

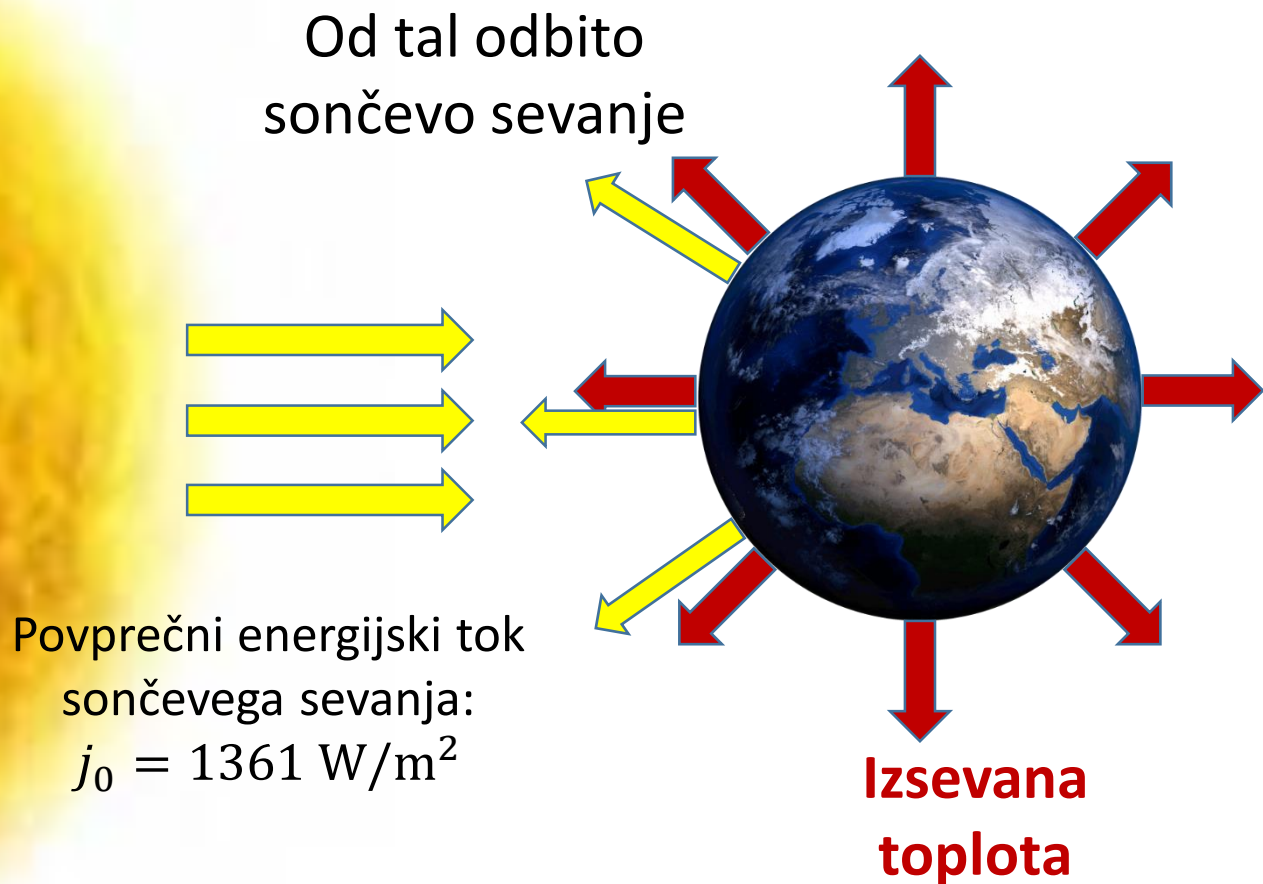
- Tok ... notranjosti navzven: W/m^2
- Kozmično sevanje
- Lunarni vplivi (odboj sončeve svetlobe): $0.003 W/m^2 + 0.024 W/m^2$



Povprečni energijski tok
sončevega sevanja:

$$j_0 = 1361 W/m^2$$

Energijska bilanca Zemlje brez ozračja



IZRAČUN

energija sevanja, ki ga Zemlja prejme =
energija, ki jo Zemlja izseva v vesolje

$$E_{IN} = E_{OUT}$$

$$\iint_S j_0(1 - a) \cos \varphi \cos \lambda dS \Delta t = \varepsilon \sigma T^4 4\pi r_E^2 \Delta t$$

$$j_0(1 - a)\pi r_E^2 = \varepsilon \sigma T^4 4\pi r_E^2$$

$$T = \sqrt[4]{j_0(1 - a)/(4\varepsilon\sigma)}$$

Če upoštevamo povprečni albedo vidnega površja $a = 0.3$ in dejstvo, da Zemljino površje seva skoraj kot črno telo, $\varepsilon = 0.98$, dobimo ravnovesno temperaturo

$$T = 256 \text{ K } (-17 \text{ }^\circ\text{C})$$

Energijska bilanca Zemlje brez ozračja

Od tal odbito
sončevo sevanje

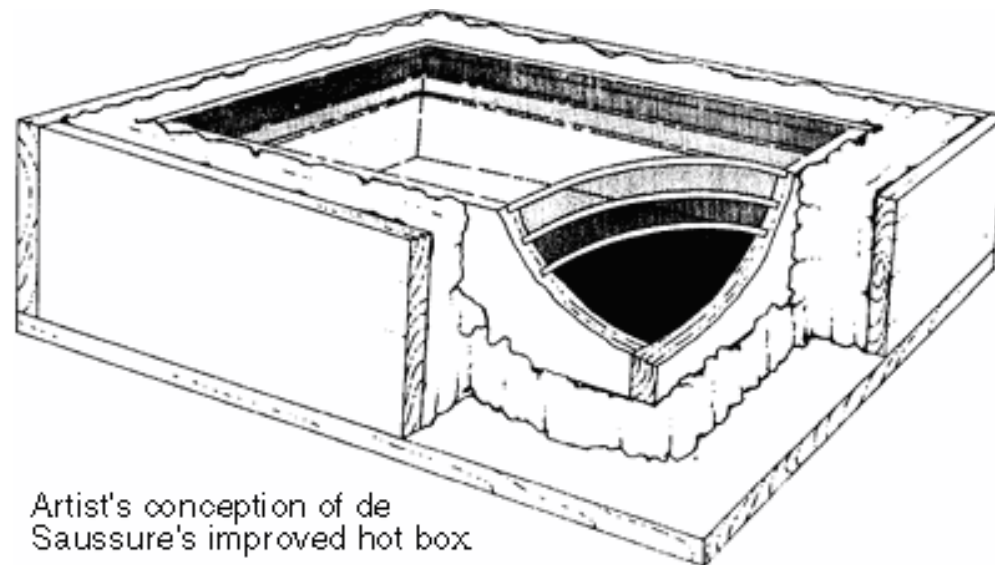


Povprečen energijski tok
sončevega sevanja:
 $j_0 = 1361 \text{ W/m}^2$

**Izsevana
toplota**

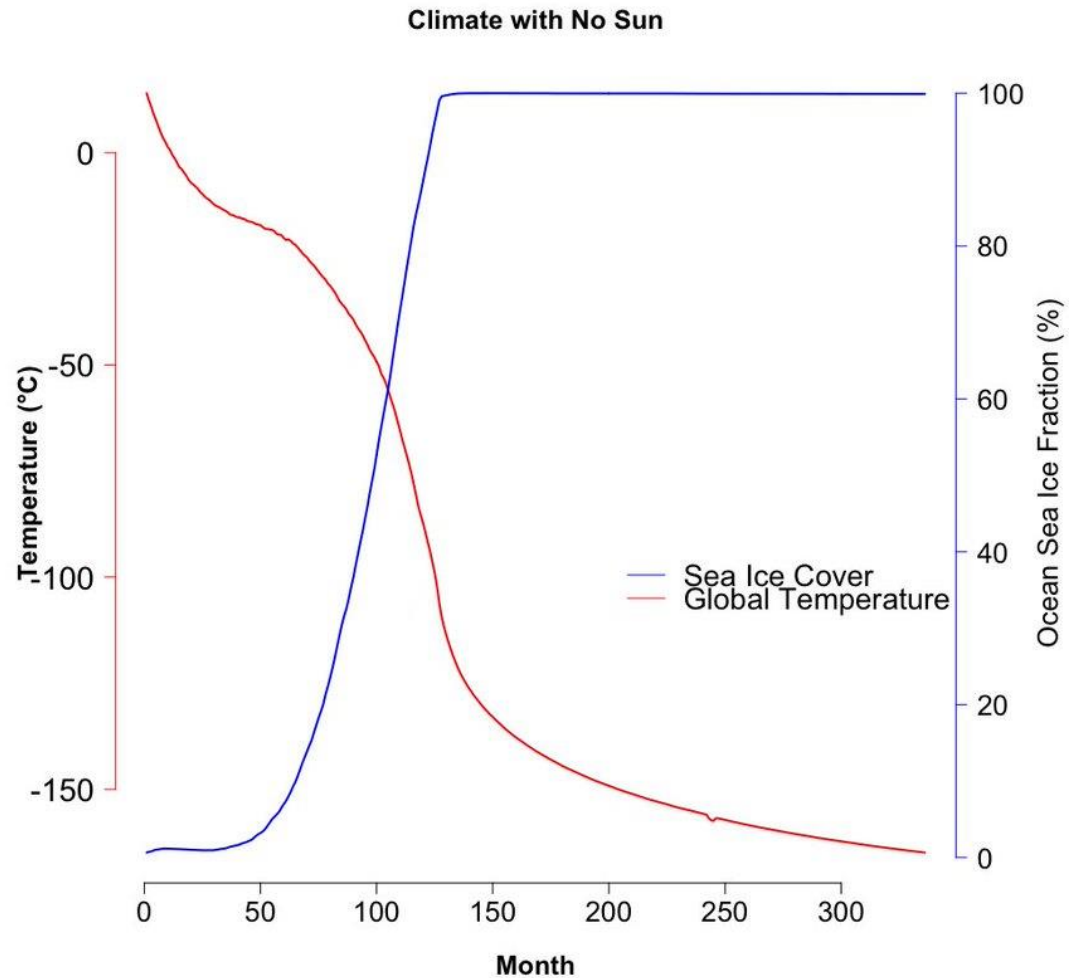


Joseph Fourier, francoski matematik in
fizik, 1824:
„Zemljina atmosfera deluje kot izolator.“



Artist's conception of de
Saussure's improved hot box

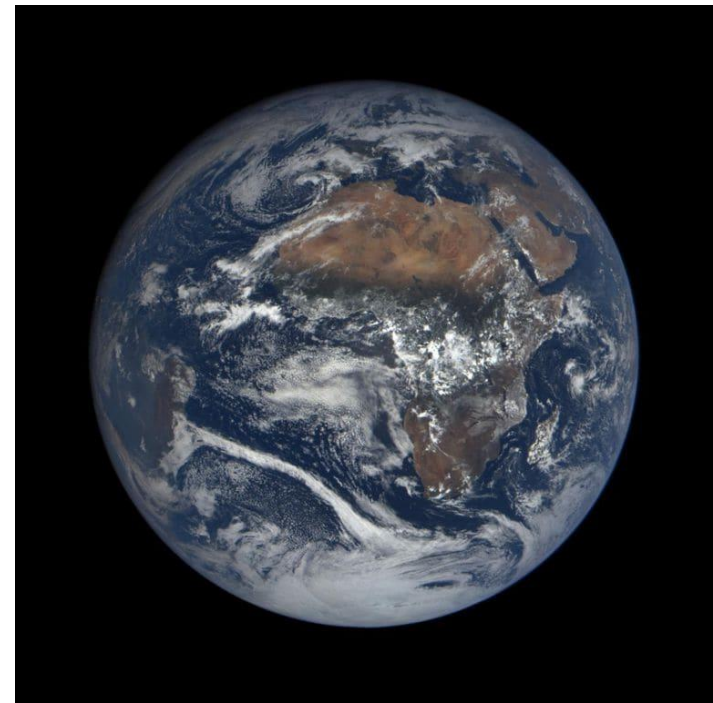
Kaj bi se zgodilo, če Sonce naenkrat ugasne?



Eksperiment z modelom splošne cirkulacije (NASA GISS)

Sestava ozračja

- gostota zraka z naraščajočo višino pada približno eksponentno
- na višini 5.5 km je gostota zraka samo nekaj več kot 50% → **PAS ŽIVLJENJA**
- razmerje plinov v volumnu zraka je po celotni troposferi enako:
 - 78 % N₂
 - 21 % O₂
 - 0.9 % Ar
 - 0.04 % CO₂ (!!narašča!!)
 - 0 - 4 % H₂O (zelo variabilen delež)



DEBELINA: 0.1 mm



PREMER: 230 mm

Toplogredni plini (GHG)

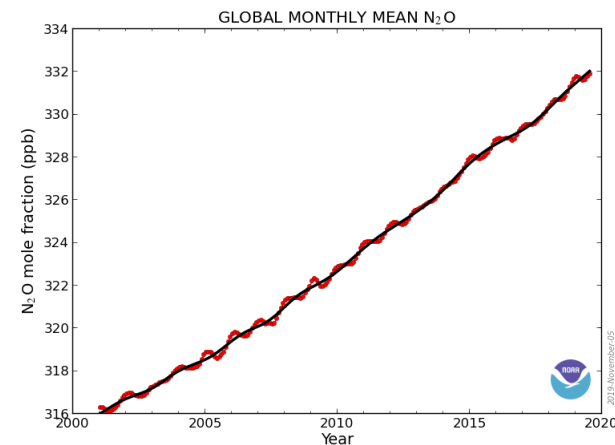
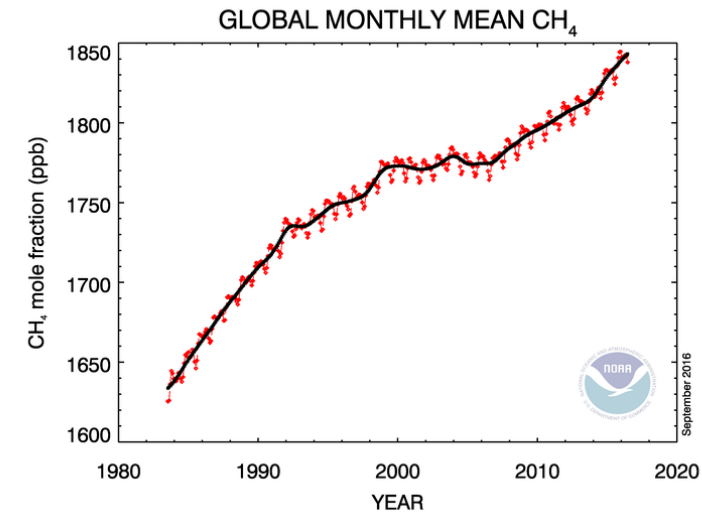
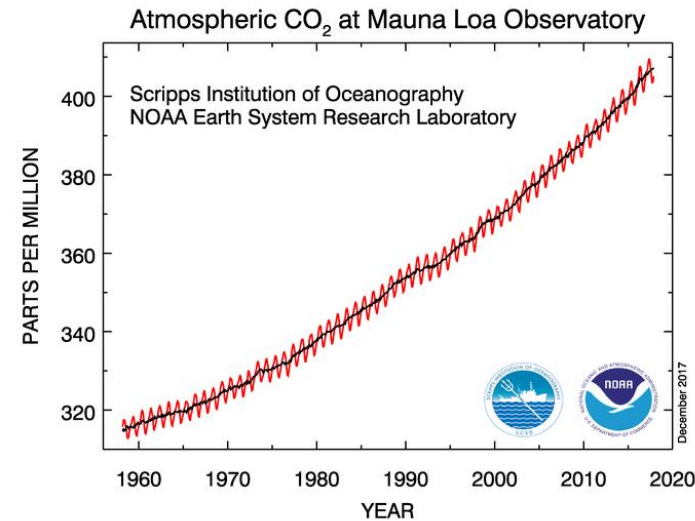
- DEFINICIJA: tisti plini, ki absorbirajo in emitirajo sevalno toploto (IR del spektra sevanja)
- Tyndall, 1859: O₂ in N₂ prozorna za IR sevanje, H₂O in CO₂ ne
- Vodna para (H₂O), ogljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), didušikov oksid (smejalni plin, N₂O), ozon (O₃)



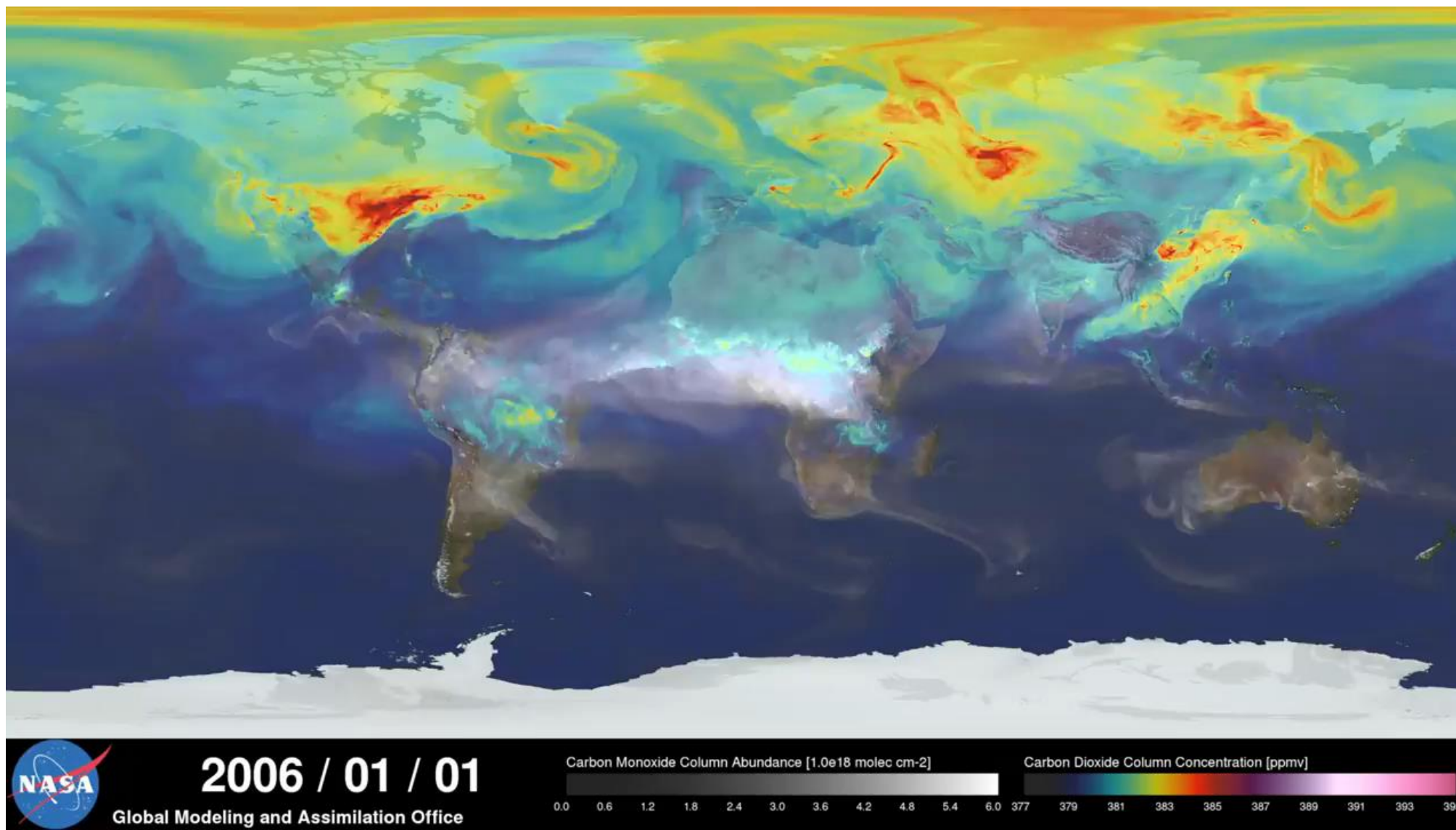
John Tyndall, irski fizik, 1859:
dokazal toplogredni učinek z merjenjem absorptivnosti posameznih plinov pri različnih valovnih dolžinah svetlobe

Toplogredni plini (GHG)

- DEFINICIJA: tisti plini, ki absorbirajo in emitirajo sevalno toploto (IR del spektra sevanja)
- Tyndall, 1859: O_2 in N_2 prozorna za IR sevanje, H_2O in CO_2 ne
- Vodna para (H_2O), ogljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4), didušikov oksid (smejalni plin, N_2O), ozon (O_3)
- Poleg nekaterih ključnih kemijskih značilnosti jim je skupno to, da njihove koncentracije v ozračju naraščajo

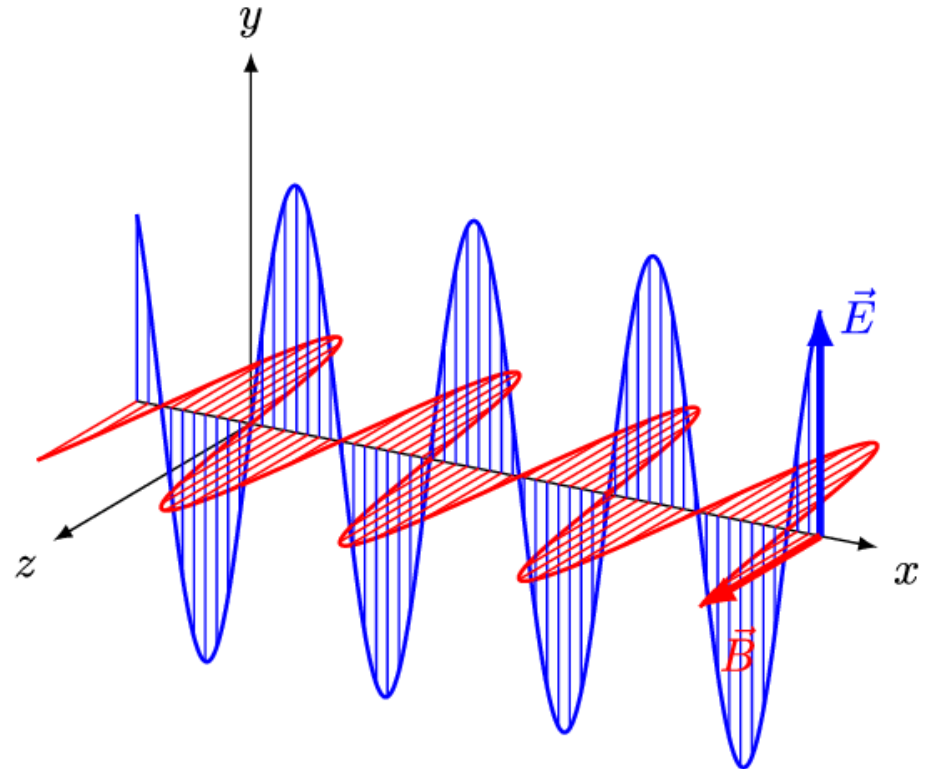


Letni cikel koncentracije CO₂ (vir: NASA)



Toplogredni plini (GHG)

- Zakaj nekatere molekule lahko interagirajo z IR sevanjem, druge pa ne?
- Sevanje = elektromagnetno valovanje. Pri tem niha smer električnega polja $\vec{E} \perp$ na smer razširjanja. \vec{E} povzroči silo, ki pospešuje različne naboje v različnih smereh



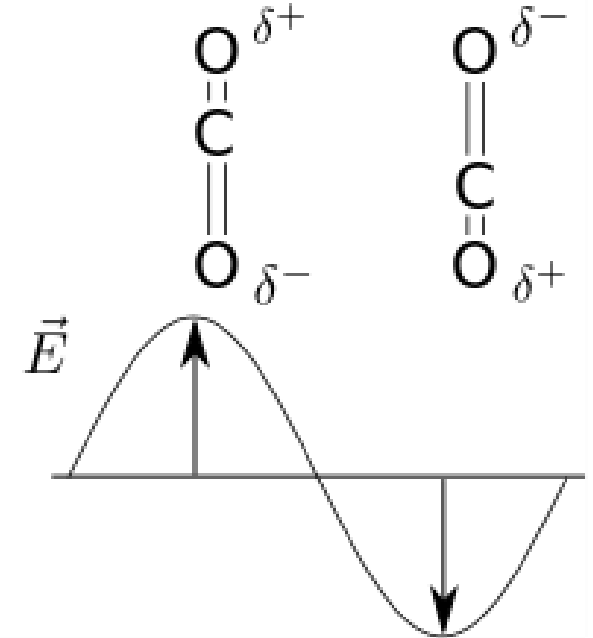
Toplogredni plini (GHG)

- Zakaj nekatere molekule lahko interagirajo z IR sevanjem, druge pa ne?
- Sevanje = elektromagnetno valovanje. Pri tem niha smer električnega polja $\vec{E} \perp$ na smer razširjanja. \vec{E} povzroči silo, ki pospešuje različne naboje v različnih smereh
- Geometrija molekul \rightarrow sevanje lahko absorbirajo zgolj tiste molekule, pri katerih EMV lahko prerazporedi naboj, tako da sta centra pozitivnega in negativnega naboja v molekuli ločena – **dipolni moment**
- \vec{E} oscilira. Posledično tudi molekula **zavibrira** z enako frekvenco in tako **absorbira** sevanje

a)



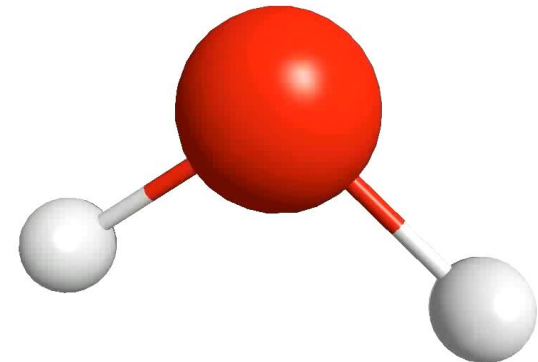
b)



Toplogredni plini (GHG)

- Zakaj nekatere molekule lahko interagirajo z IR sevanjem, druge pa ne?
- Sevanje = elektromagnetno valovanje. Pri tem niha smer električnega polja $\vec{E} \perp$ na smer razširjanja. \vec{E} povzroči silo, ki pospešuje različne naboje v različnih smereh
- Geometrija molekul \rightarrow sevanje lahko absorbirajo zgolj tiste molekule, pri katerih EMV lahko prerazporedi naboj, tako da sta centra pozitivnega in negativnega naboja v molekuli ločena – **dipolni moment**
- \vec{E} oscilira. Posledično tudi molekula **zavibrira** z enako frekvenco in tako **absorbira** sevanje

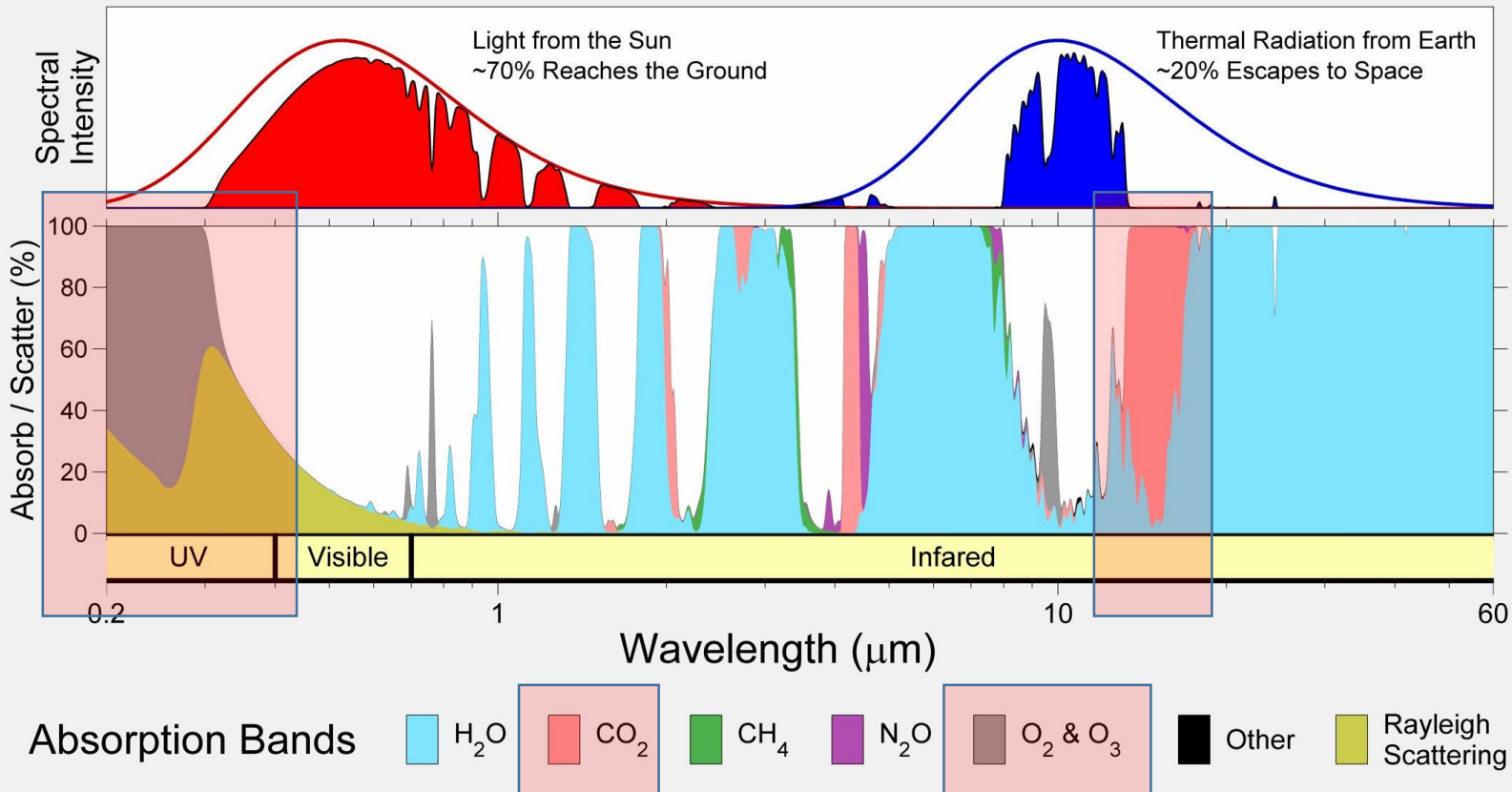
Pod vplivom IR sevanja vibrira tudi molekula H₂O



Zemlja izseva nazaj v vesolje

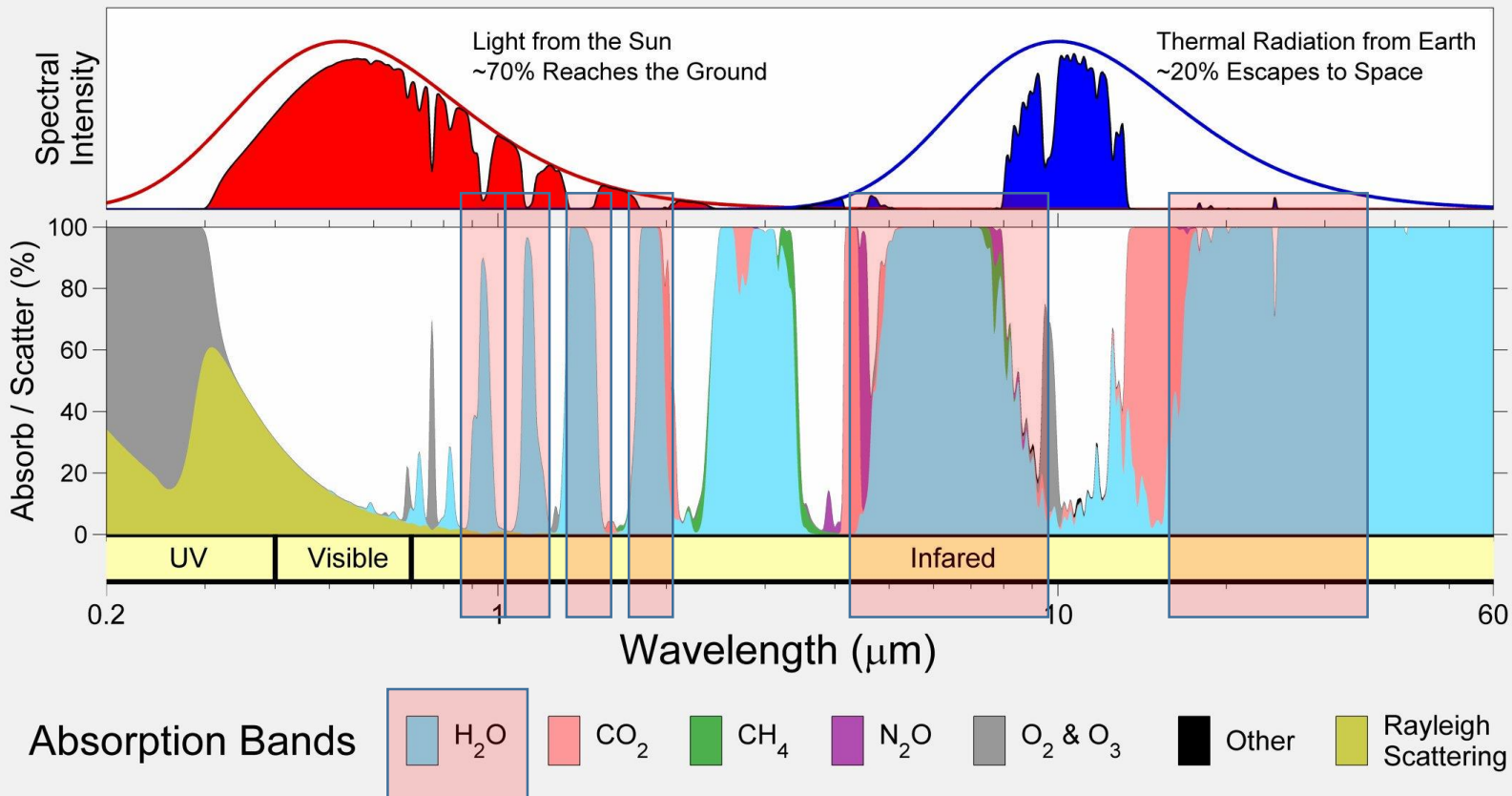
- Ozon nas ščiti pred UV sončnim sevanjem, hkrati pa je pomemben toplogredni plin pri $\sim 10 \mu\text{m}$
- **CO₂ najbolj absorbira v delu spektra Zemljinega sevanja, kjer je izsev velik (pri $\sim 15 \mu\text{m}$)**
- **2x CO₂ pomeni 1.1°C ogrevanja (brez povratnih zank)**

Clear-Sky Atmospheric Transmission



Zemlja izseva nazaj v vesolje

Clear-Sky Atmospheric Transmission

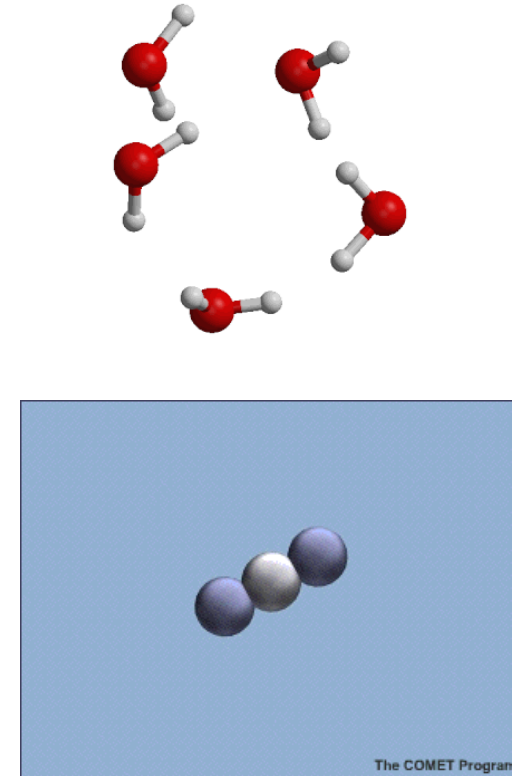


- Ozon nas ščiti pred UV sončnim sevanjem, hkrati pa je pomemben toplogredni plin pri $\sim 10 \mu\text{m}$
- CO₂ najbolj absorbira v delu spektra Zemljinega sevanja, kjer je izsev velik (pri $\sim 15 \mu\text{m}$)
- 2x CO₂ pomeni 1.1°C ogrevanja (brez povratnih zank)
- Vodna para zmanjšuje direktno sončno IR sevanje
- Hkrati je najmočnejši absorber Zemljinega IR sevanja (2.5 x močnejši kot CO₂)
→ najmočnejša povratna zanka
- N₂O in CH₄ pomembna pri 8 μm na območjih, kjer je koncentracija vodne pare nizka in v sušnih območjih

Interakcija molekul GHG s sevanjem

Ko molekula sevanje absorbira, se lahko zgodi dvoje:

- Vzbujena molekula CO_2 se najbolj verjetno zaleti v katerokoli drugo molekulo v ozračju in ji prenese dodatno energijo kot toploto (kinetično energijo)
- CO_2 molekula emitira sevanje z enako energijo, kot jo je absorbirala, in se vrne v osnovno stanje



Svante Arrhenius, 1896
švedski fizik, Nobelov
nagrajenec za kemijo



Večja kot je koncentracija molekul toplogrednih plinov, večji je sevalni tok navzdol proti tlam.
→ Bolj se ozračje in tla grejejo.

Pedagoški zgled toplogrednega efekta



Vir:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/greenhouse>

Vpliv GHG na temperaturo

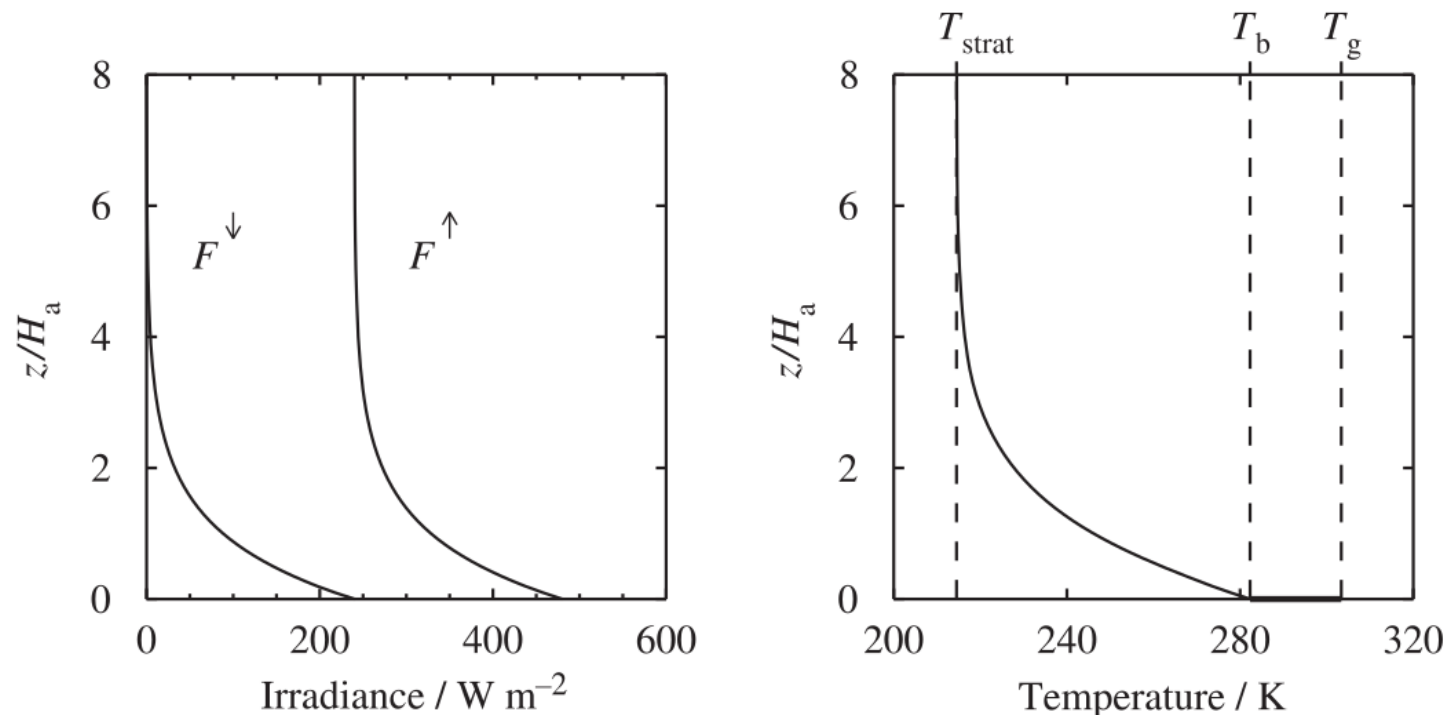
- Zemlja v povprečju prejme energijski tok:

$$(1 - albedo) \frac{j_0}{4} = 238 \text{ W/m}^2$$

- Ne glede na to, da ima Zemlja ozračje, mora približno toliko sevanja, kot ga prejme, tudi oddati, torej 238 W/m^2

- Če atmosferski stolpec razrežemo na rezine, mora biti vsaka plast v TD ravnovesju, torej mora enako sevanja, kot ga prejme, tudi oddati

- Če se spuščamo skozi ozračje navzdol, je gostota zraka vse večja, hkrati tudi gostota TGP, absorpcija IR sevanja višja. Večji tok navzdol, navzgor in tudi višja temperatura.



$$F^\uparrow - F^\downarrow = \text{konst.} = 238 \text{ W/m}^2$$

Vpliv GHG na temperaturo – več CO₂?

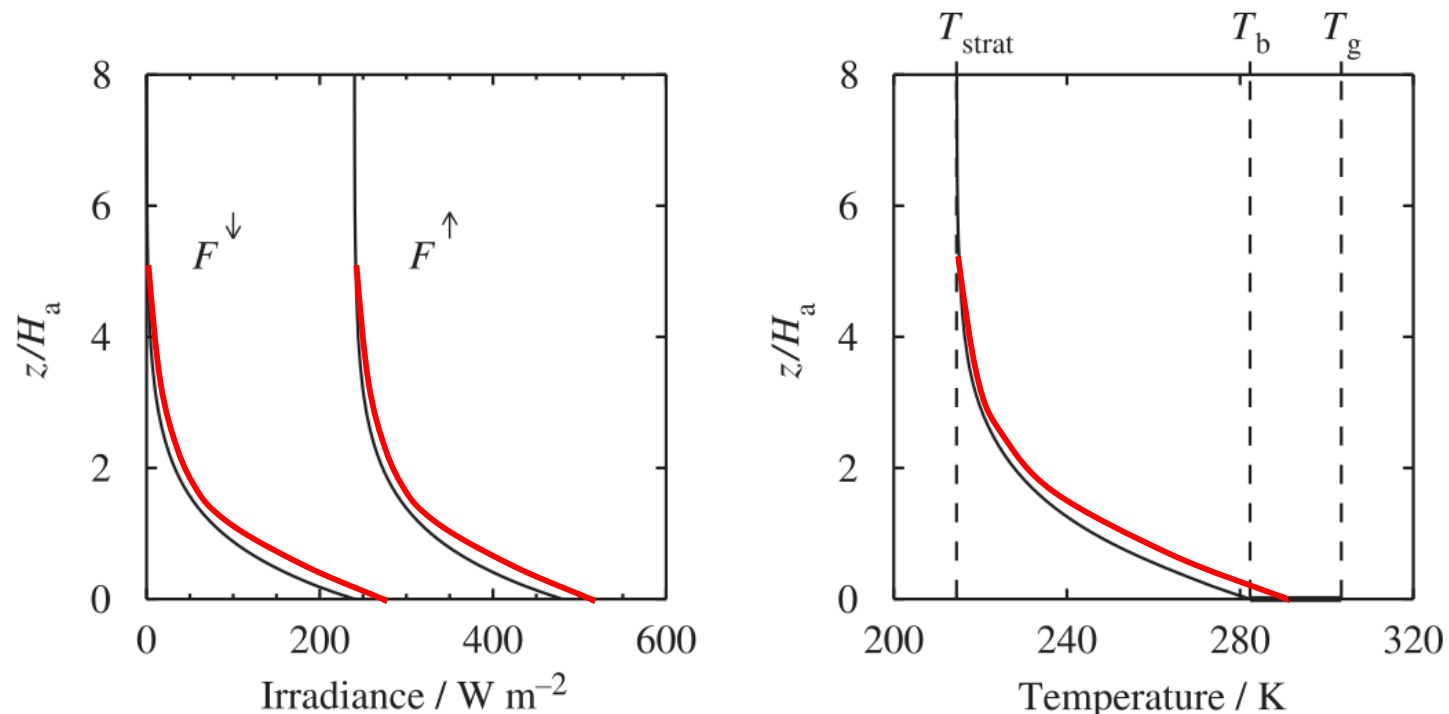
- Zemlja v povprečju prejme energijski tok:

$$(1 - \textit{albedo}) \frac{j_0}{4} = 238 \text{ W/m}^2$$

- Ne glede na to, da ima Zemlja ozračje, mora približno toliko sevanja, kot ga prejme, tudi oddati, torej 238 W/m²

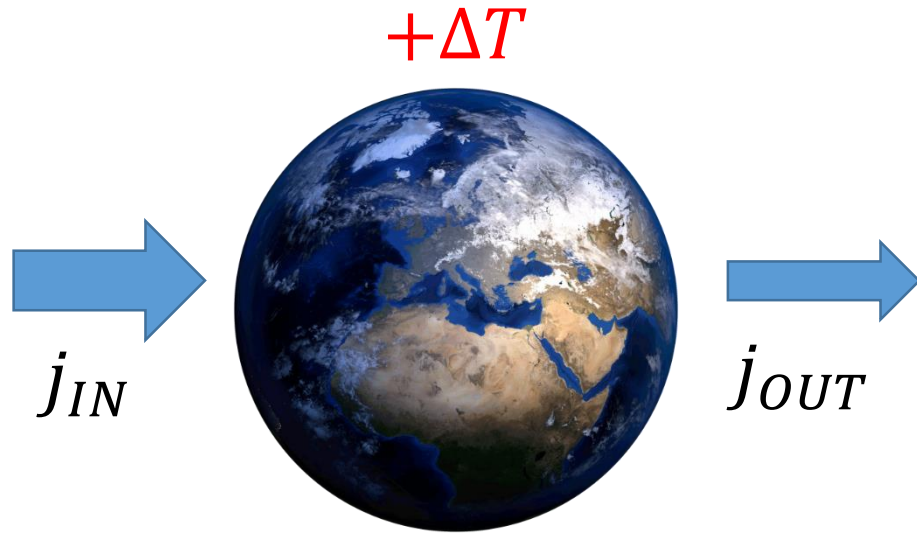
- Če atmosferski stolpec razrežemo na rezine, mora biti vsaka plast v TD ravnovesju, torej mora enako sevanja, kot ga prejme, tudi oddati

- Če se spuščamo skozi ozračje navzdol, je gostota zraka vse večja, hkrati tudi gostota TGP, absorpcija IR sevanja višja. Večji tok navzdol, navzgor in tudi višja temperatura.



$$F^\uparrow - F^\downarrow = \textit{konst.} = 238 \text{ W/m}^2$$

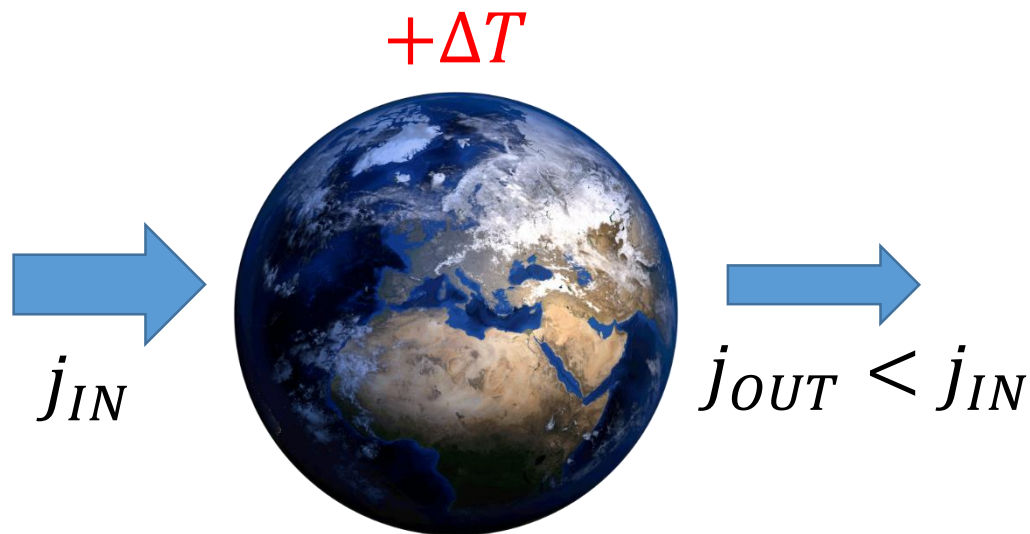
Spremembe toplotnega ravnovesja



Zemljino površje ni v toplotnem ravnovesju, s sevanjem namreč prejme več energije, kot pa je izseva.

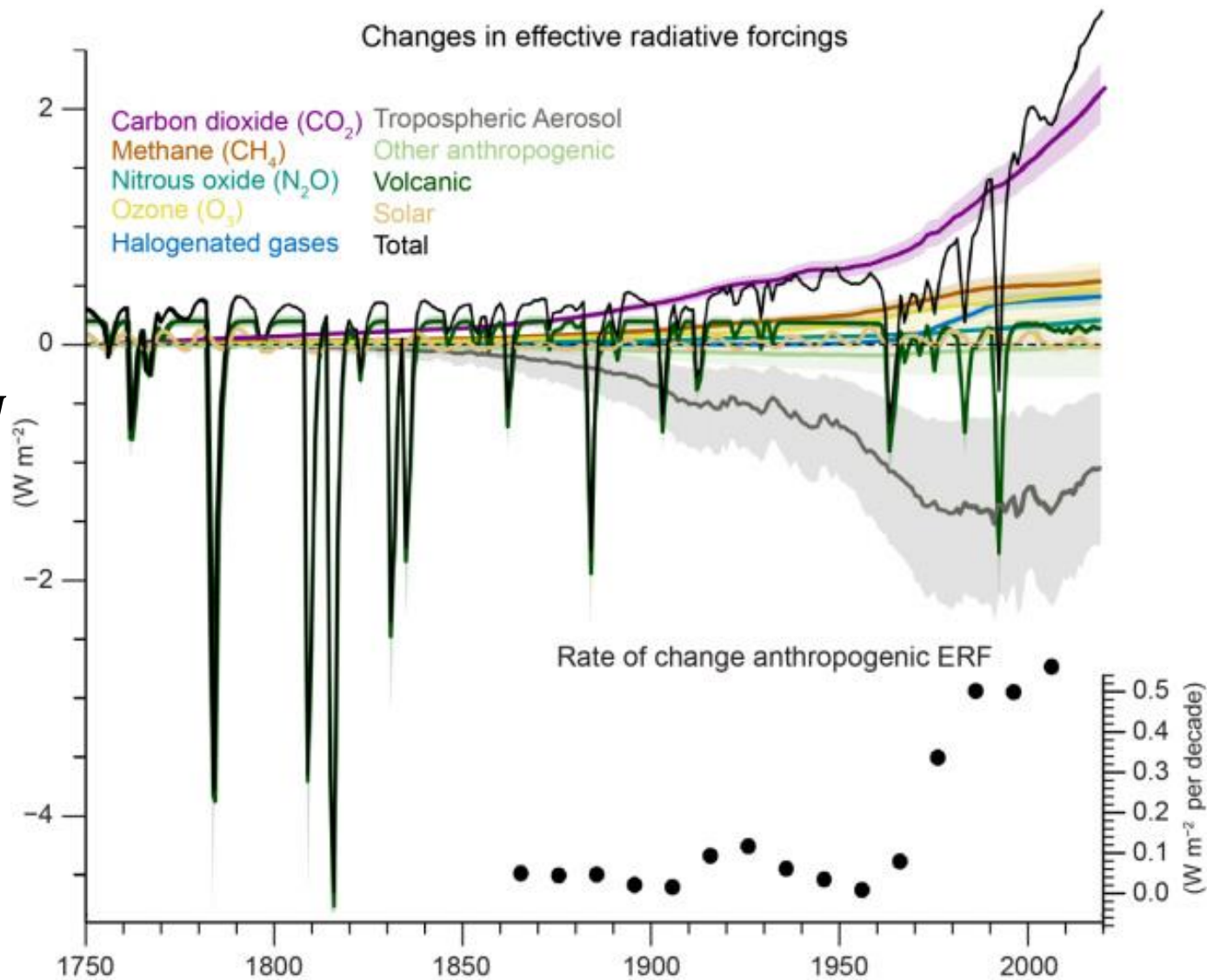
Posledično **se segreva**.

Spremembe toplotnega ravnovesja



Zemljino površje ni v toplotnem ravnovesju, s sevanjem namreč prejme več energije, kot pa je izseva.

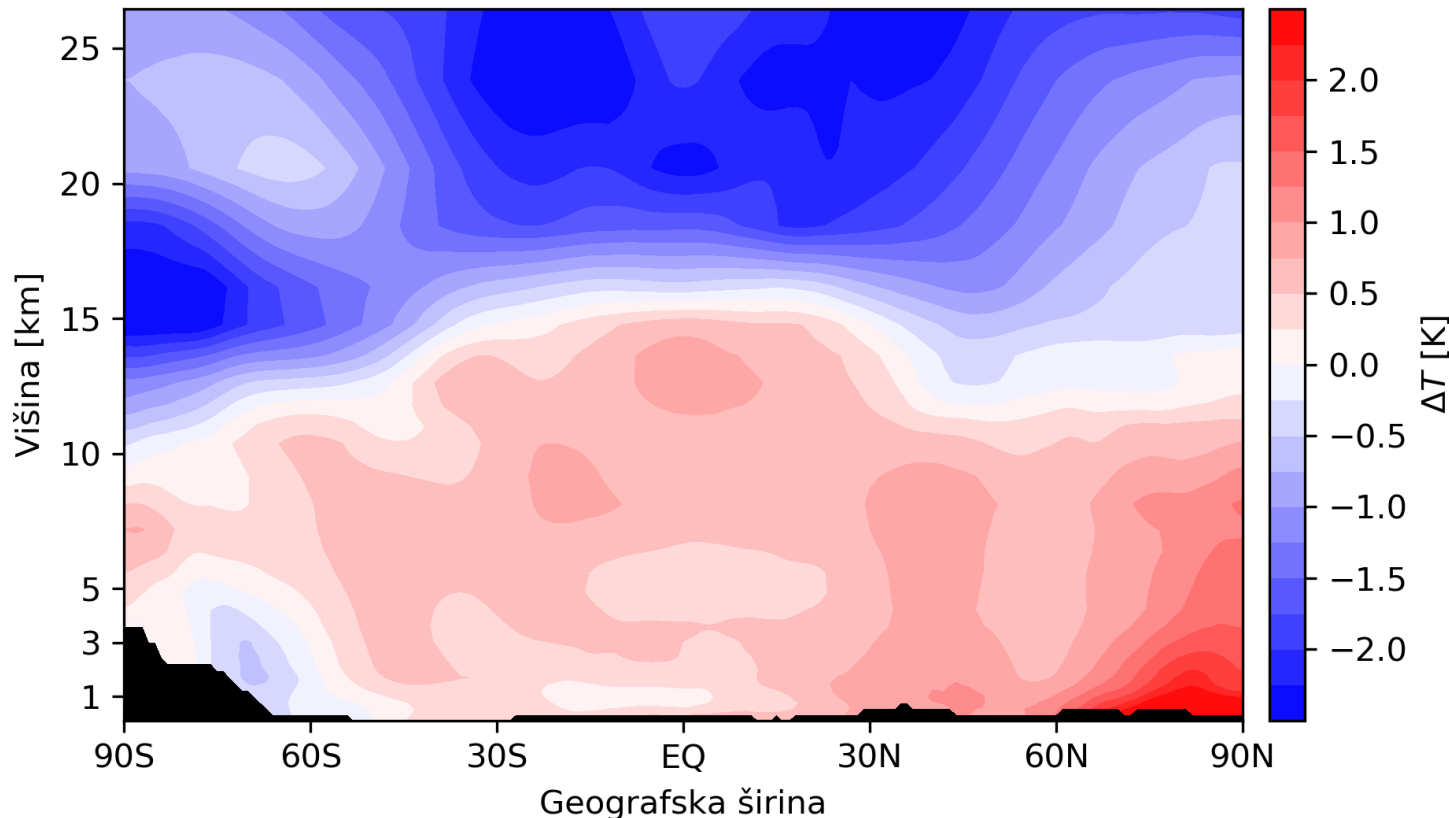
Posledično se segreva.



Ali se je ozračje segrelo enakomerno?

(Najmanj) dva razloga:

Sprememba temperature med 1980 in 2018



- 1) V spodnji troposferi manjša koncentracija stratosferskega ozona O_3 zaradi CFCjev:
 1. $O_3 + UV \rightarrow O_2 + O$
 2. $O + O_2 \rightarrow O_3 + \text{toplota}$Efektivno: $UV \rightarrow \text{toplota}$
- 2) Večja koncentracija $CO_2 \rightarrow$ več IR sevanja se absorbira že v troposferi, posledično manj zemljinega sevanja pride do vrha atmosfere \rightarrow Zemlja je trenutno v **sevalnem neravnovesju** (več sevanja prejme kot ga odda, **začasen efekt**)

Povratna zanka – vodna para?

Teorija:

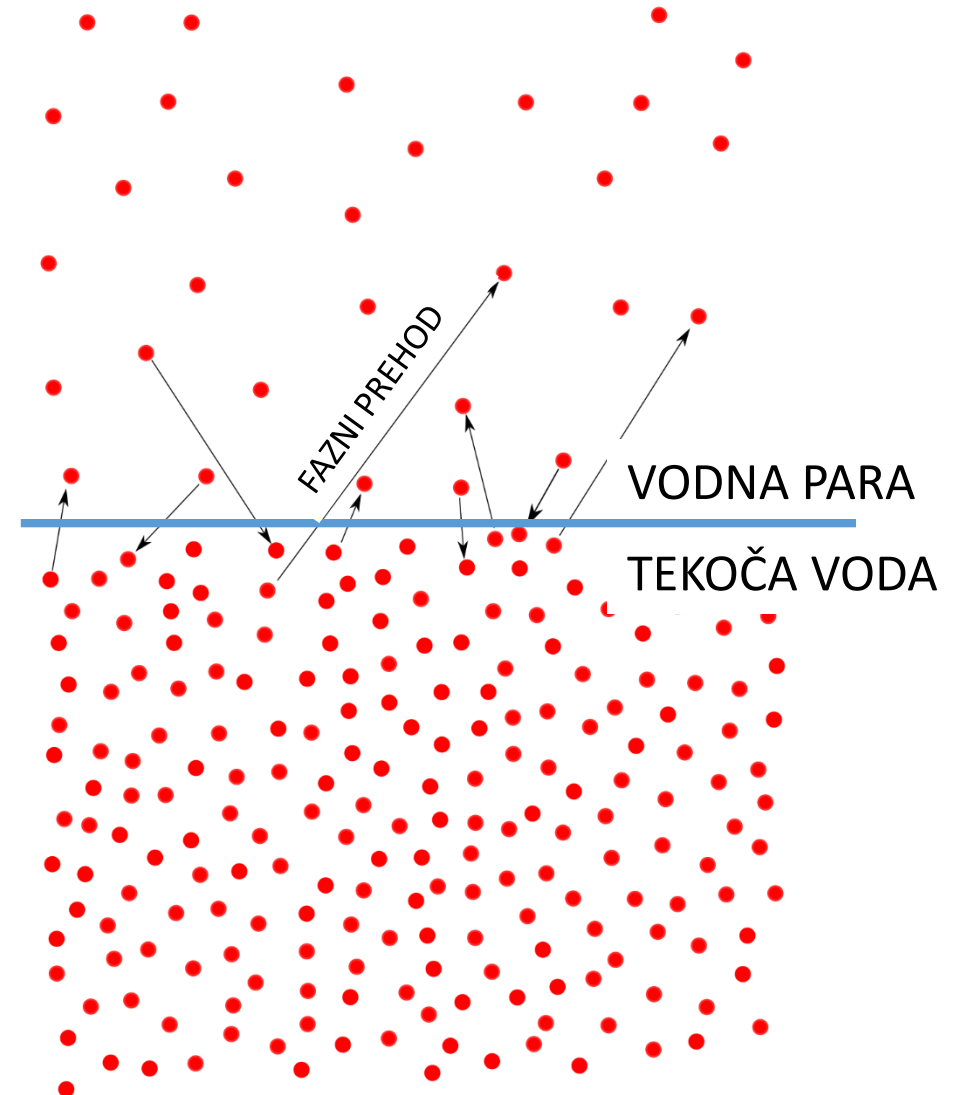
višja temperatura →

→močnejše izhlapevanje →

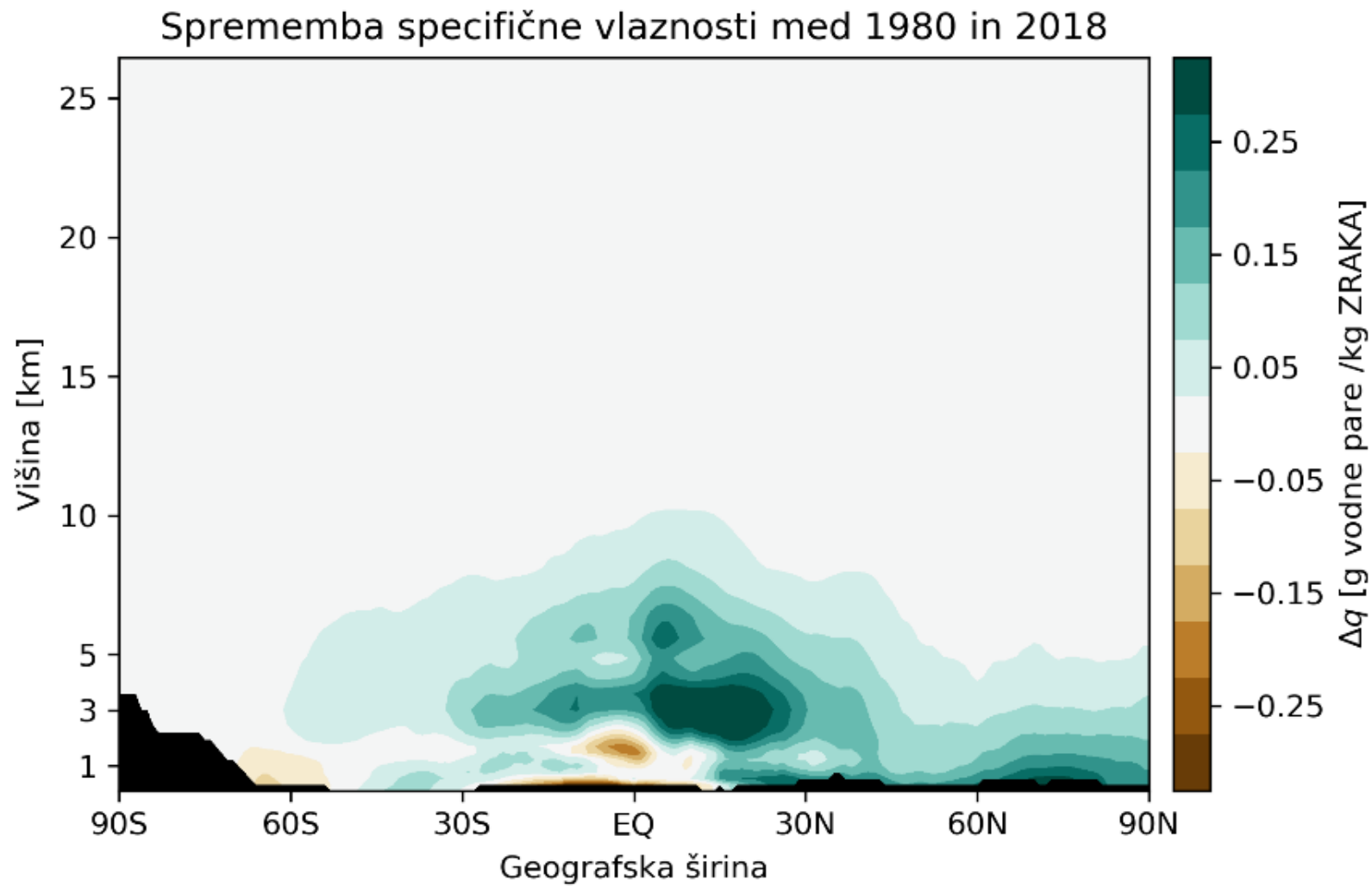
→več vodne pare je lahko **teoretično** v zraku →

→vodna para najmočnejši toplogredni plin

Vodna para več kot podvoji vpliv CO₂ na rast temperatur.



Povratna zanka – vodna para?



Vir: ECMWF ERA5
reanalize vremena

Spreminjanje podnebja – nedvoumen dokaz o krivdi človeka

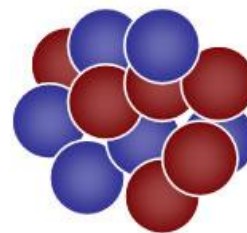
Izotopska razmerja posameznih elementov

- C^{12} in C^{13} sta stabilna, C^{14} pa radioaktiven z razpolovnim časom $t_{1/2} = 5730$ let
- Vprašanje: koliko je C^{14} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Točno, 0!** Razmerje C^{14} / C^{12} označimo z R . Velja:

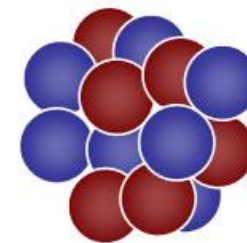
$$dR = -R \frac{dt}{t_{1/2}} \rightarrow R = R(0) \exp\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)$$

Že samo po 50000 letih: $R = 0.00016 R(0)$

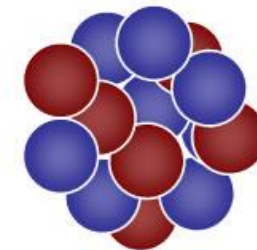
- Koliko je C^{13} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Malo**, ker se je počasnejši (težji!) pri difuziji na listih in ker rastline pri fotosintezi preferirajo C^{12} . Seveda fosilna goriva niso nič drugega kot odmrta biosfera...



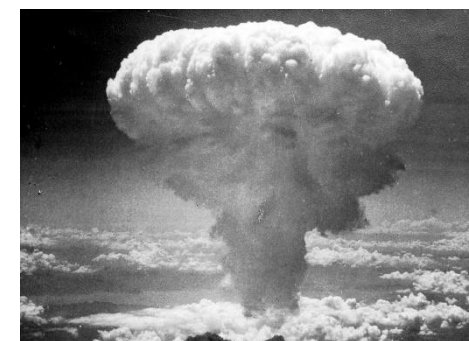
carbon-12
98.9%
6 protons
6 neutrons



carbon-13
1.1%
6 protons
7 neutrons



carbon-14
<0.1%
6 protons
8 neutrons



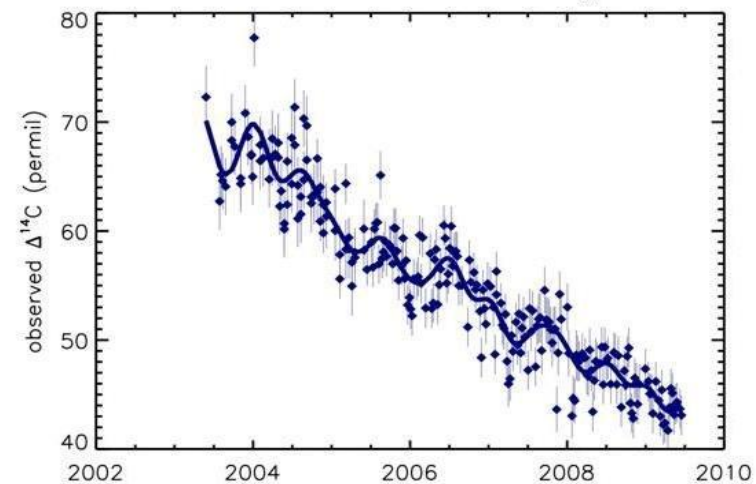
Spreminjanje podnebja – nedvoumen dokaz o krivdi človeka

Izotopska razmerja posameznih elementov

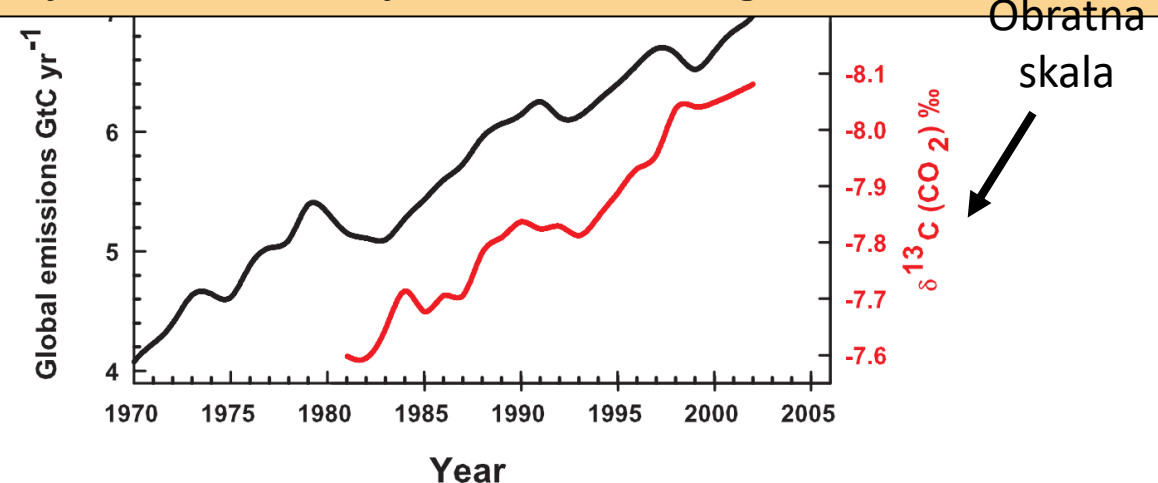
- C^{12} in C^{13} sta stabilna, C^{14} pa radioaktiven z razpolovnim časom $t_{1/2} = 5730$ let
- Vprašanje: koliko je C^{14} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Točno, 0!** Razmerje C^{14} / C^{12} označimo z R . Velja:
$$dR = -R \frac{dt}{t_{1/2}} \rightarrow R = R(0) \exp\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)$$

Že samo po 50000 letih: $R = 0.00016 R(0)$
- Koliko je C^{13} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Malo**, ker se je počasnejši (težji!) pri difuziji na listih in ker rastline pri fotosintezi preferirajo C^{12} . Seveda fosilna goriva niso nič drugega kot odmrli biosfera...

Clean Air Measurements at Niwot Ridge, Colorado

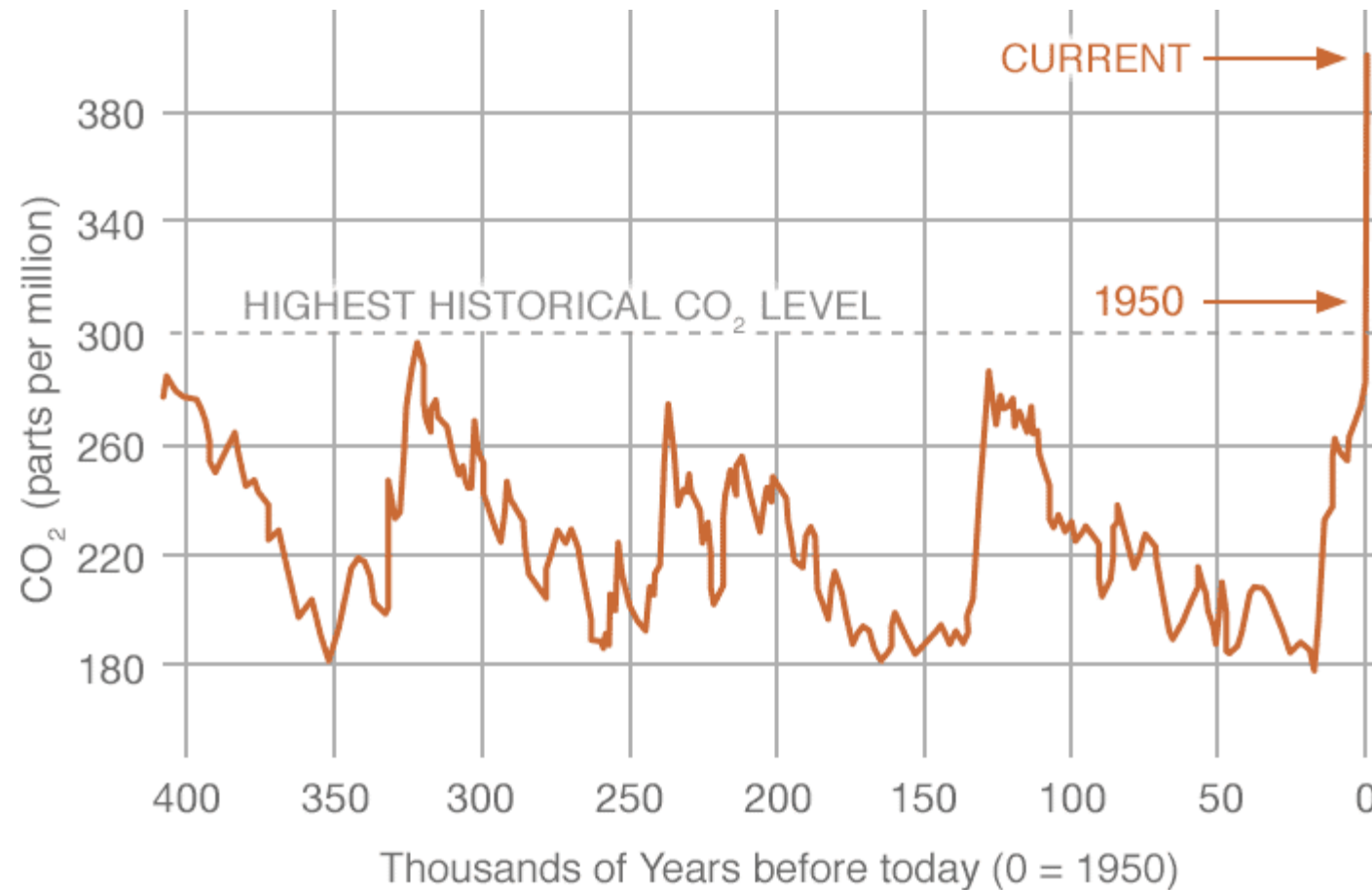


Razmerji C^{13} / C^{12} in C^{14} / C^{12} se obe v ozračju zmanjšujeta. V ozračje namreč dodajamo s fosilnimi gorivi le C^{12}



Dr. James Powell (NPSC): „Ljudje lažejo, izotopi pa ne.“

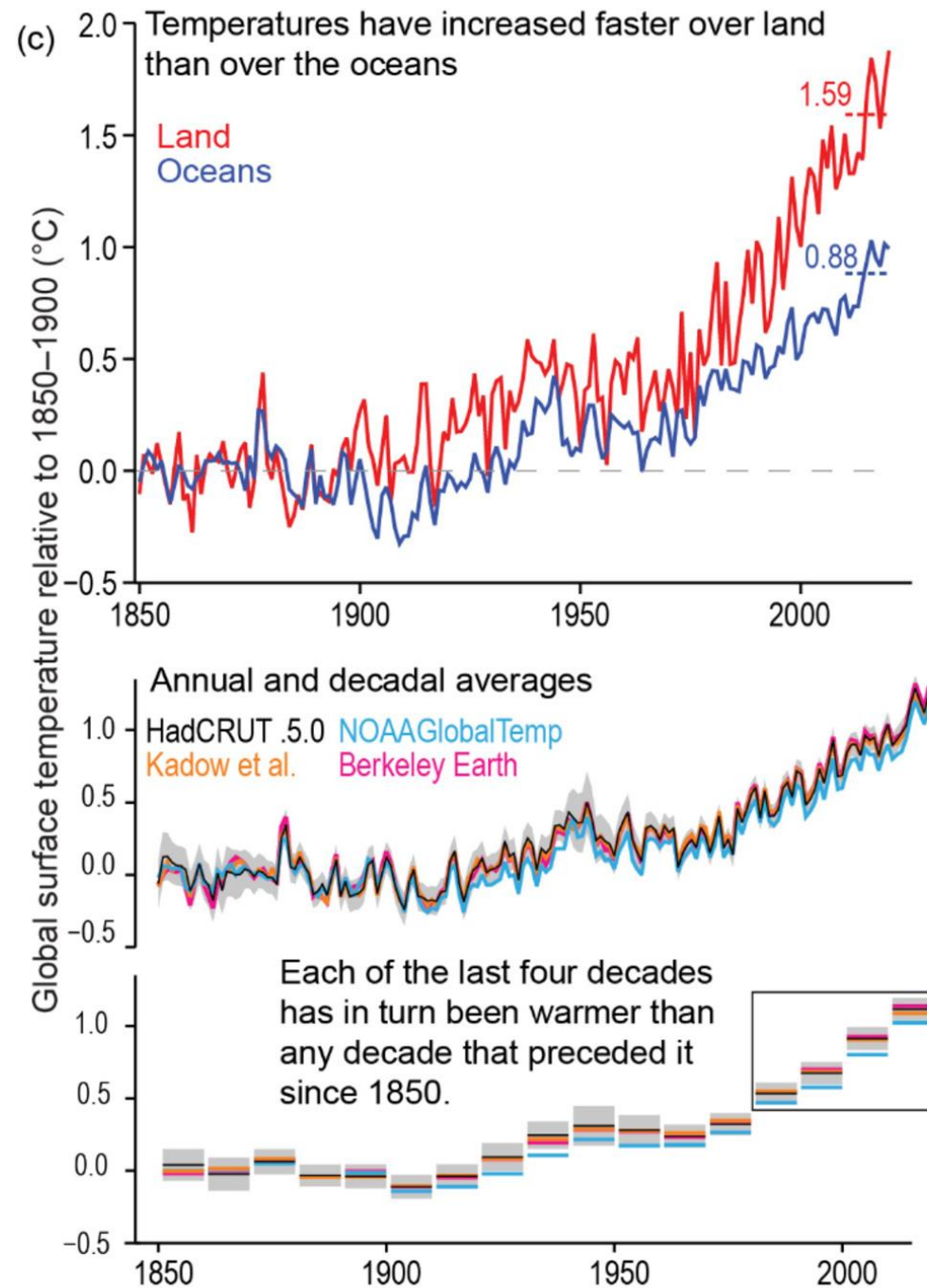
Spreminjanje podnebja – dokazi za krivdo človeka



Koncentracija CO₂ izmerjena v mehurčkih zraka, ujetih v ledu – vrtina EPICA DOME C (Antarktika)

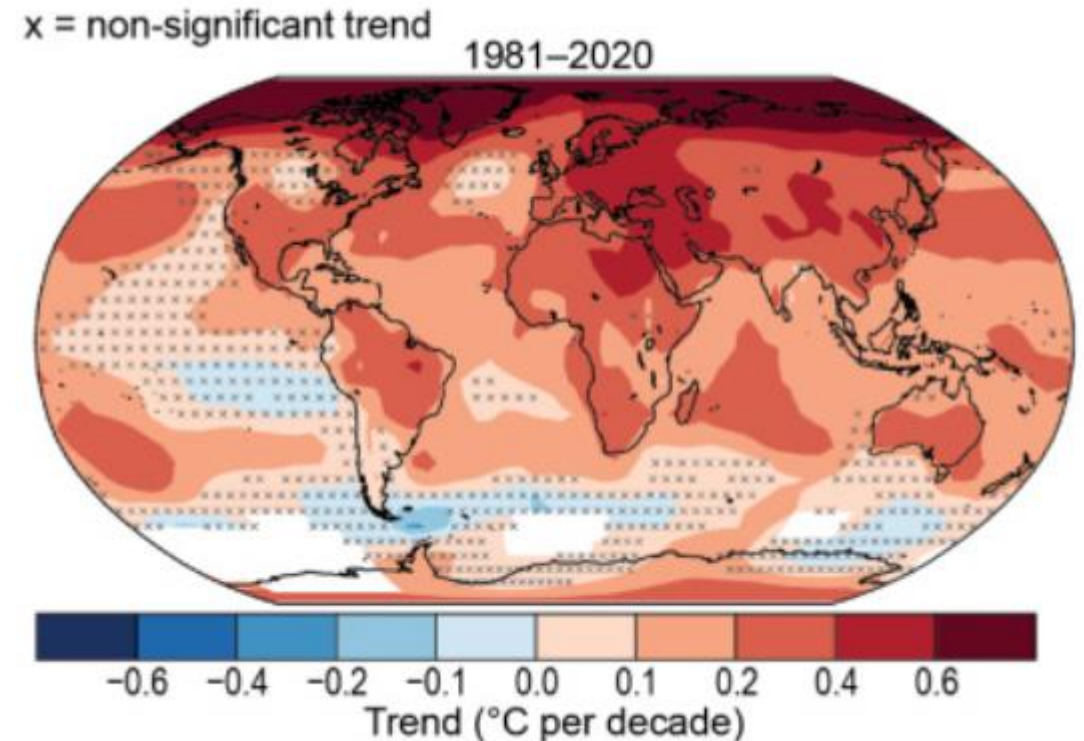
Indici – meritve

- Površje Zemlje se je v povprečju ogrelo za približno 1.2°C napram predindustrijski dobi
- Kopenski predeli so se segreli bolj kot oceanski, tako bo tudi v prihodnje.
- Vodna para, ki izhlapeva iz ogromnega oceanskega rezervoarja, namreč povzroča, da se vertikalni temperaturni gradient manj zniža nad oceanom kot nad kopnim
- Zanimivost: noči se grejejo bolj kot dnevi, tudi to se bo nadaljevalo v prihodnje!!

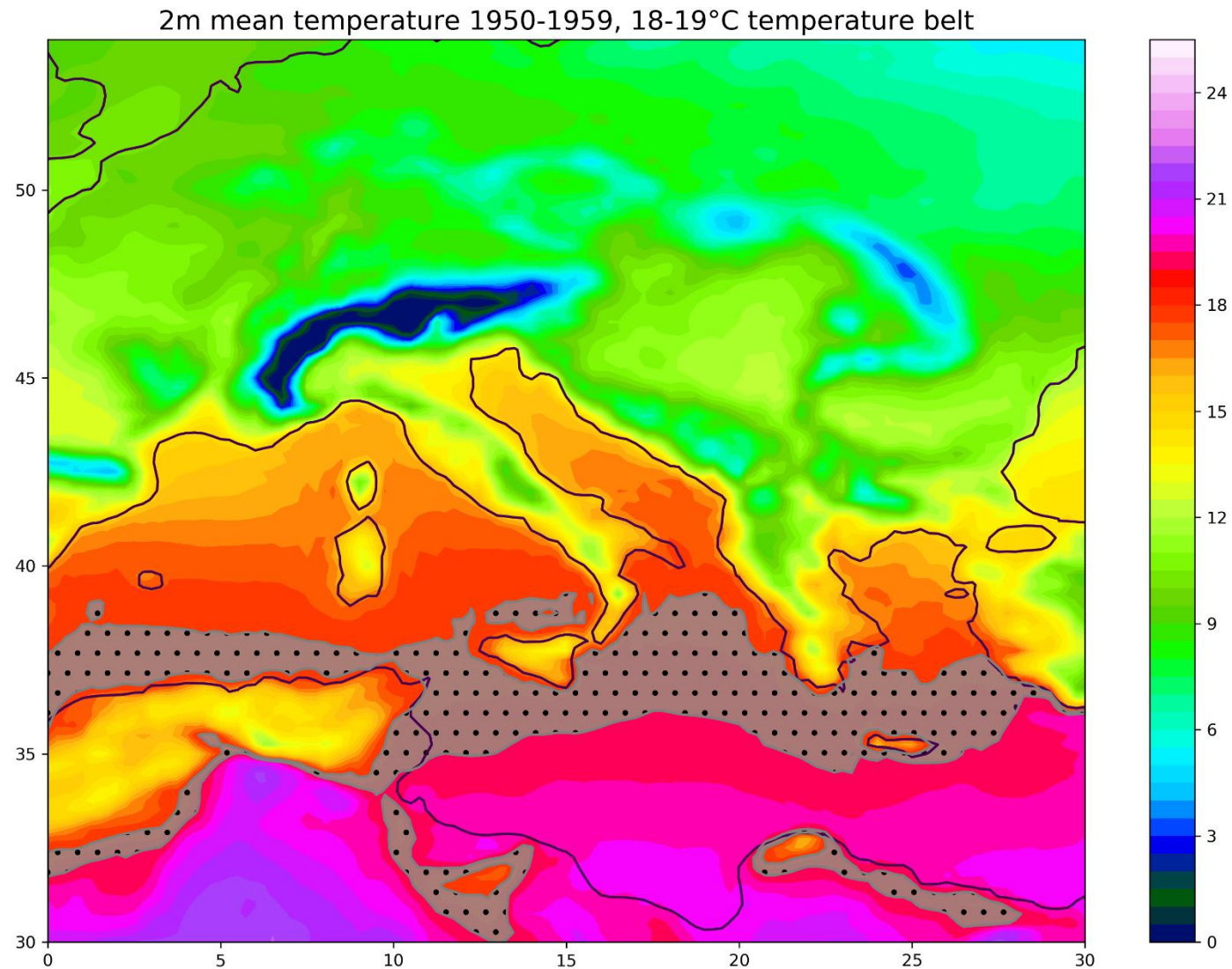


Indici – meritve

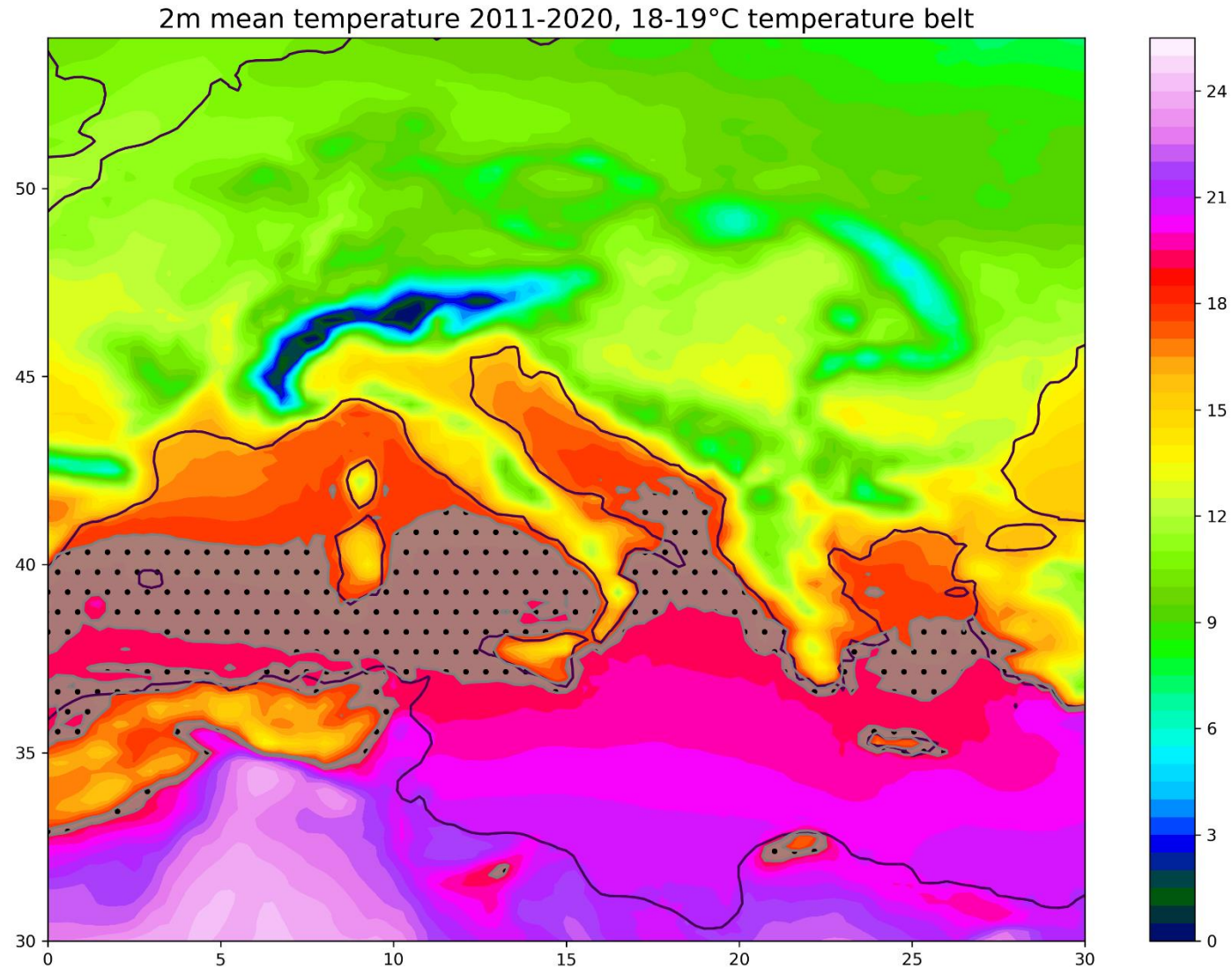
- Površje Zemlje se je v povprečju ogrelo za približno 1.2°C napram predindustrijski dobi
- Kopenski predeli so se segreli bolj kot oceanski, tako bo tudi v prihodnje.
- Vodna para, ki izhlapeva iz ogromnega oceanskega rezervoarja, namreč povzroča, da se vertikalni temperaturni gradient manj znižuje nad oceanom kot nad kopnim
- Zanimivost: noči se grejejo bolj kot dnevi, tudi to se bo nadaljevalo v prihodnje!!



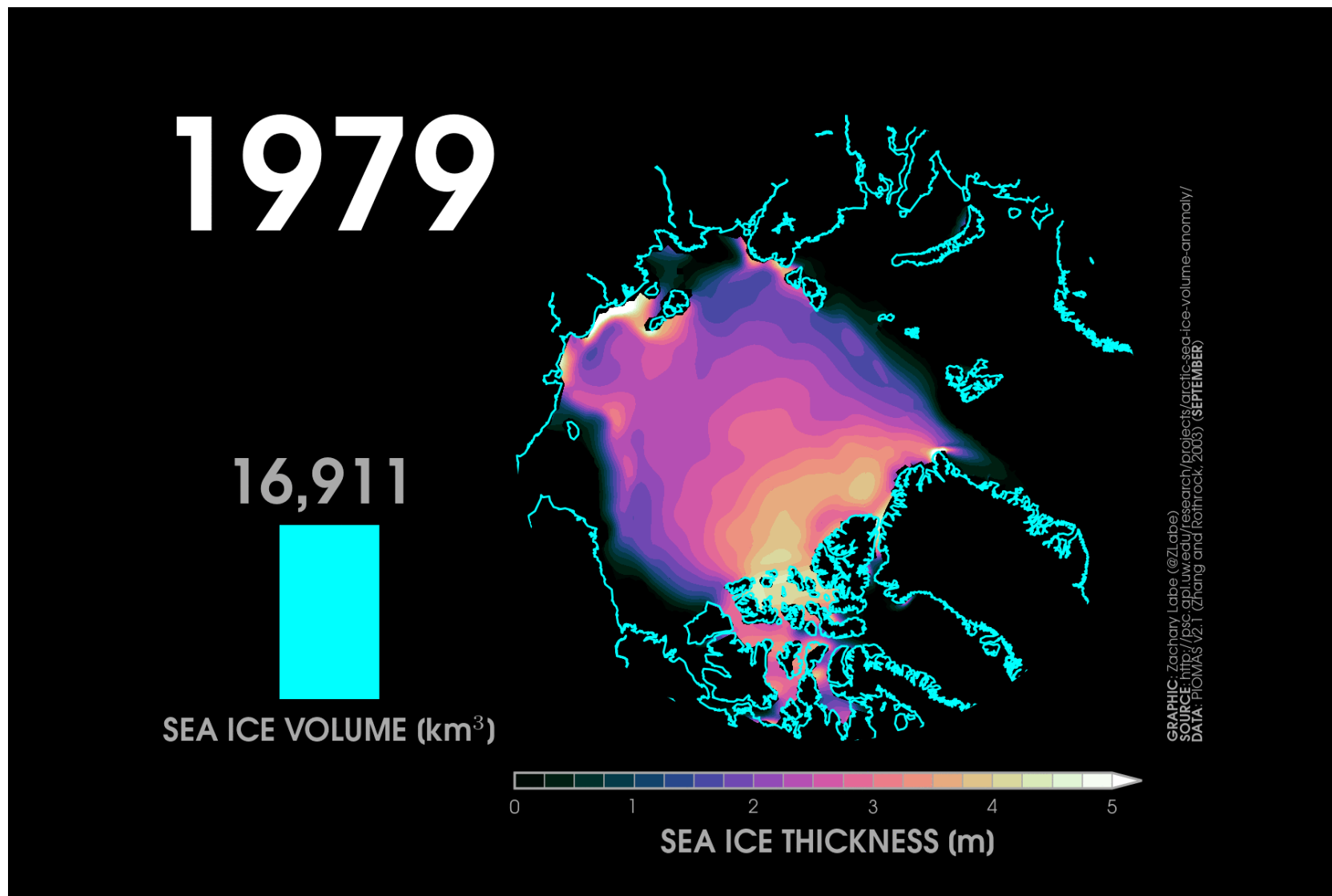
Indici – meritve – premiki klimatskih pasov



Indici – meritve – premiki klimatskih pasov

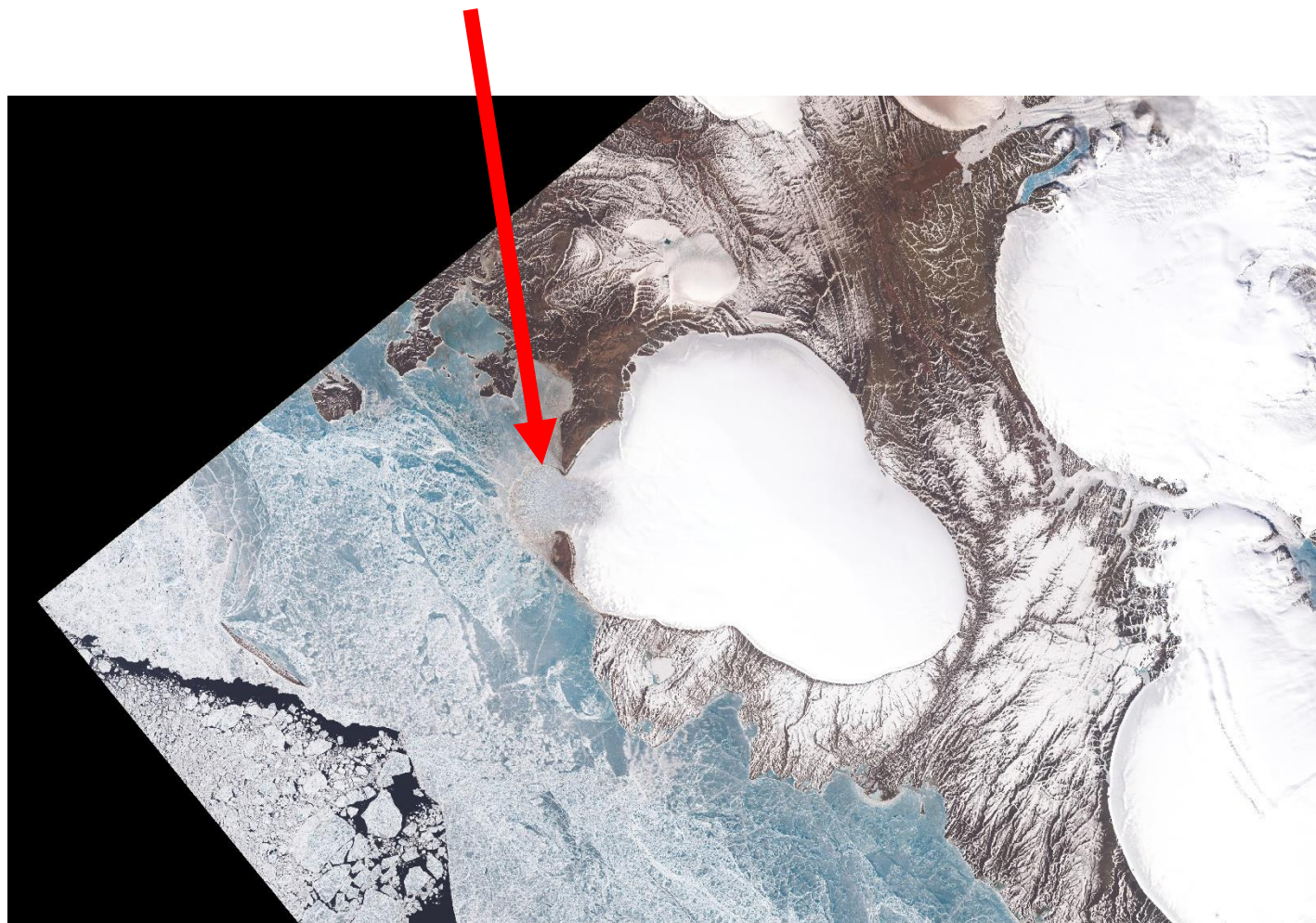


Indici – izginjanje Arktičnega ledu



Vir: Zachary Labe

Indici – hitro izginjanje kopenskega ledu

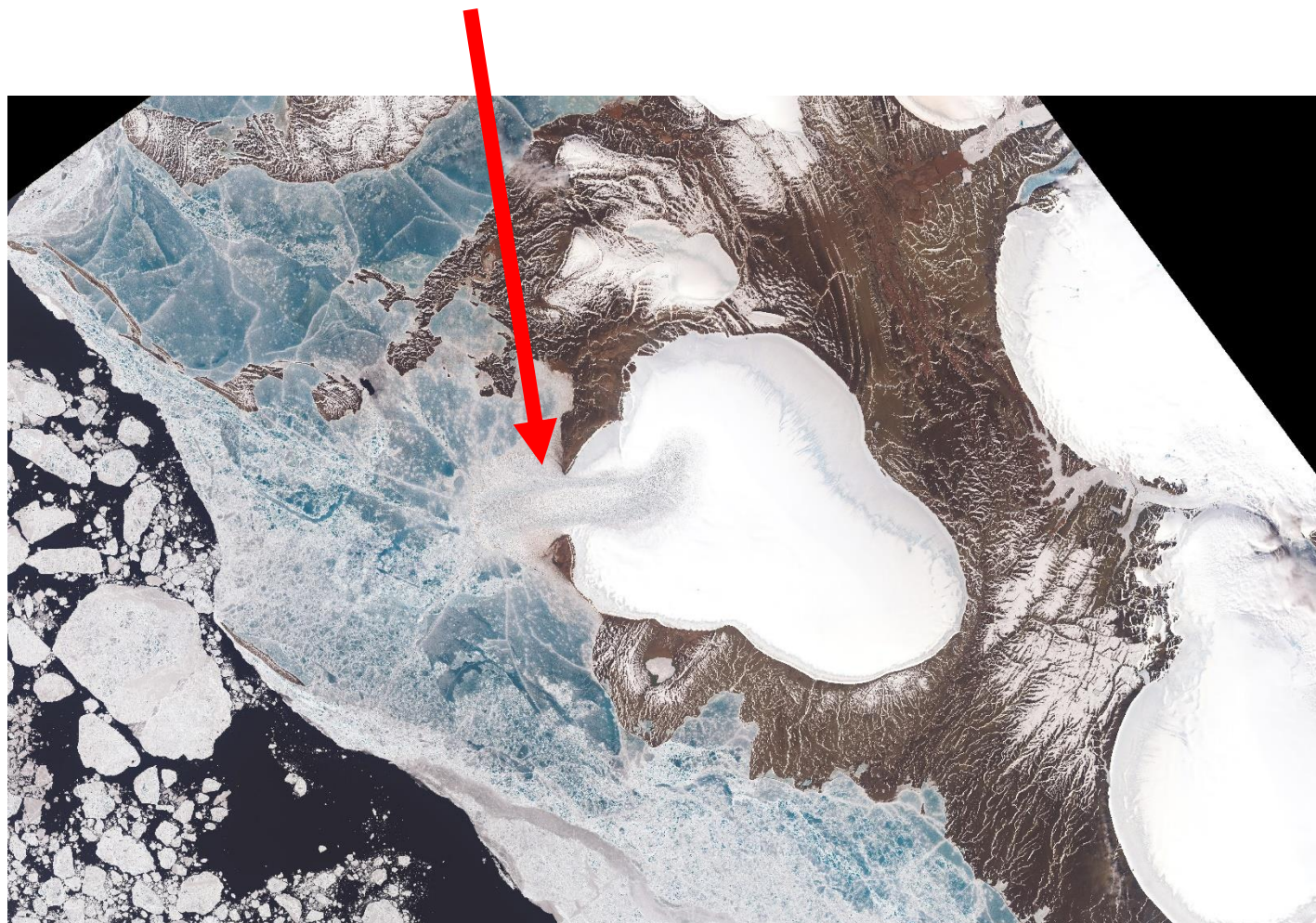


NAJVERJETNEJŠI MEHANIZEM:

Ko se stali morski led, topla voda pride pod ledeniški jezik, ga tali od spodaj, ta se tako preneha drgniti ob spodnji rob kamnine, kar močno zmanjša trenje in pospeši drsenje ledenikov v morje.

Primer: ledenik Vavilov

Indici – hitro izginjanje kopenskega ledu



2018

NAJVERJETNEJŠI MEHANIZEM:

Ko se stali morski led, topla voda pride pod ledeniški jezik, ga tali od spodaj, ta se tako preneha drgniti ob spodnji rob kamnine, kar močno zmanjša trenje in pospeši drsenje ledenikov v morje.

Primer: ledenik Vavilov

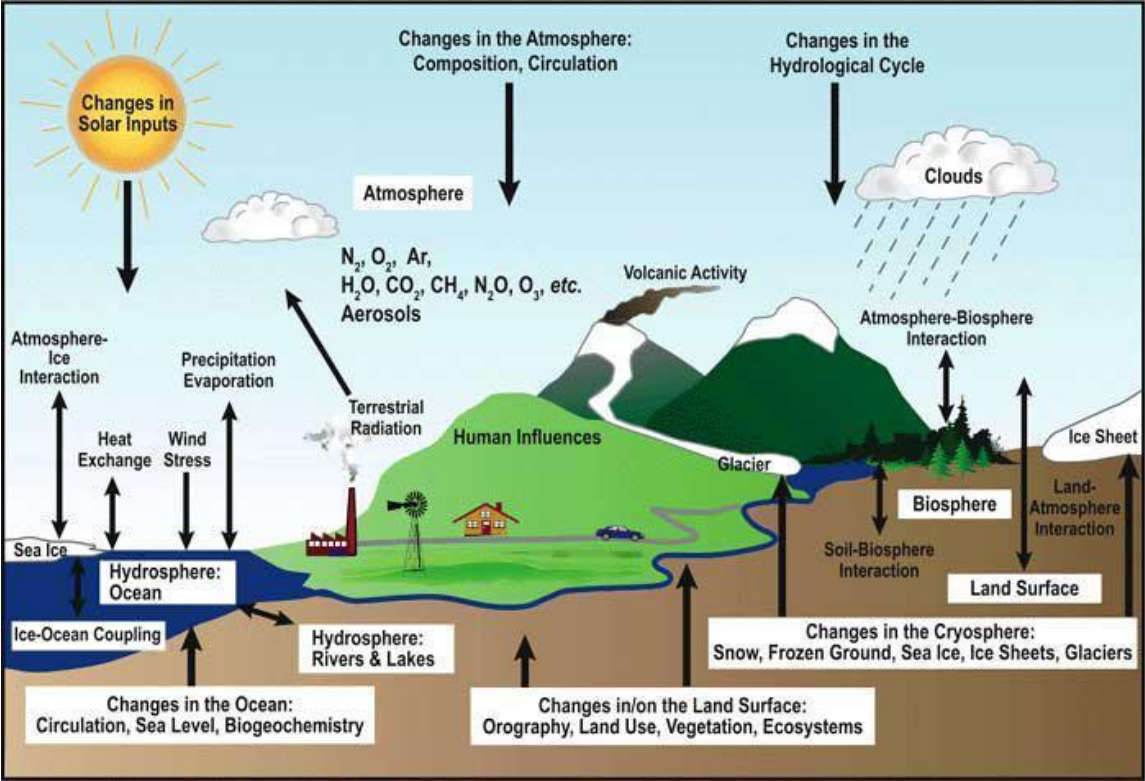
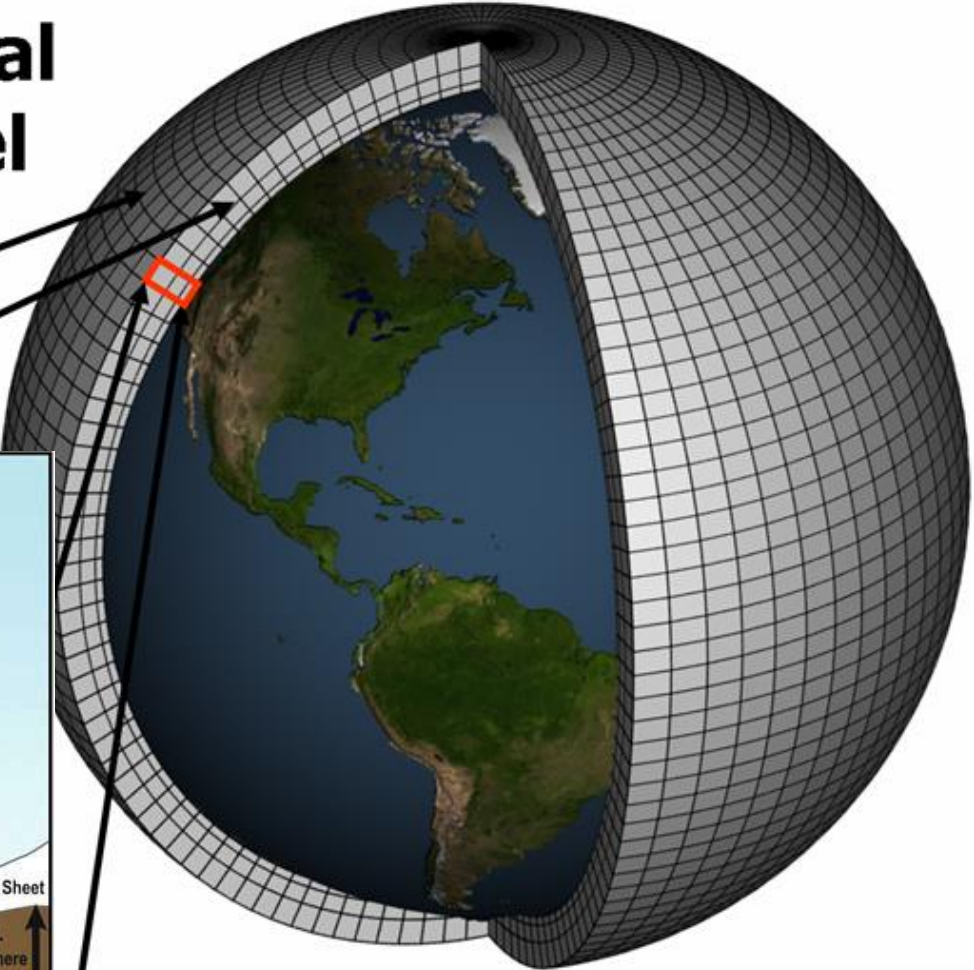
MOČNO NELINEAREN ODZIV, med 2015 in 2016 se je ponekod debelina ledu stanjšala za 100 m (~ 0.3 m/dan), še danes hitrost drsenja 5-10 m/dan

Klimatski modeli

Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)

Vertical Grid (Height or Pressure)



Klimatski modeli

where T is temperature, q is specific humidity and R_{vap} is the gas constant for water vapour. P_U and P_V represent the contributions of the parameterised physical processes, while K_U and K_V are the horizontal diffusion terms.

The thermodynamic equation is

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \theta} \left\{ U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right\} + \dot{\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\kappa T_v \omega}{(1 + (\delta - 1)q)p} = P_T + K_T \quad (2.3)$$

where $\kappa = R_{\text{dry}}/c_{p_{\text{dry}}}$ (with $c_{p_{\text{dry}}}$ the specific heat of dry air at constant pressure), ω is the pressure-coordinate vertical velocity ($\omega = dp/dt$), and $\delta = c_{p_{\text{vap}}}/c_{p_{\text{dry}}}$ (with $c_{p_{\text{vap}}}$ the specific heat of water vapour at constant pressure).

The moisture equation is

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \theta} \left\{ U \frac{\partial q}{\partial \lambda} + V \cos \theta \frac{\partial q}{\partial \theta} \right\} + \dot{\eta} \frac{\partial q}{\partial \eta} = P_q + K_q \quad (2.4)$$

In (2.2) and (2.3), P_T and P_q represent the contributions of the parameterised physical processes, while K_T and K_q are the horizontal diffusion terms.

The continuity equation is

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{v}_H \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (2.5)$$

where ∇ is the horizontal gradient operator in spherical coordinates and $\mathbf{v}_H = (u, v)$ is the horizontal wind.

The geopotential ϕ which appears in (2.1) and (2.2) is defined by the hydrostatic equation

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = - \frac{R_{\text{dry}} T_v}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (2.6)$$

while the vertical velocity ω in (2.3) is given by

$$\omega = - \int_0^\eta \nabla \cdot \left(\mathbf{v}_H \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta + \mathbf{v}_H \cdot \nabla p \quad (2.7)$$

Expressions for the rate of change of surface pressure, and for the vertical velocity $\dot{\eta}$, are obtained by integrating (2.5), using the boundary conditions $\dot{\eta} = 0$ at $\eta = 0$ and at $\eta = 1$

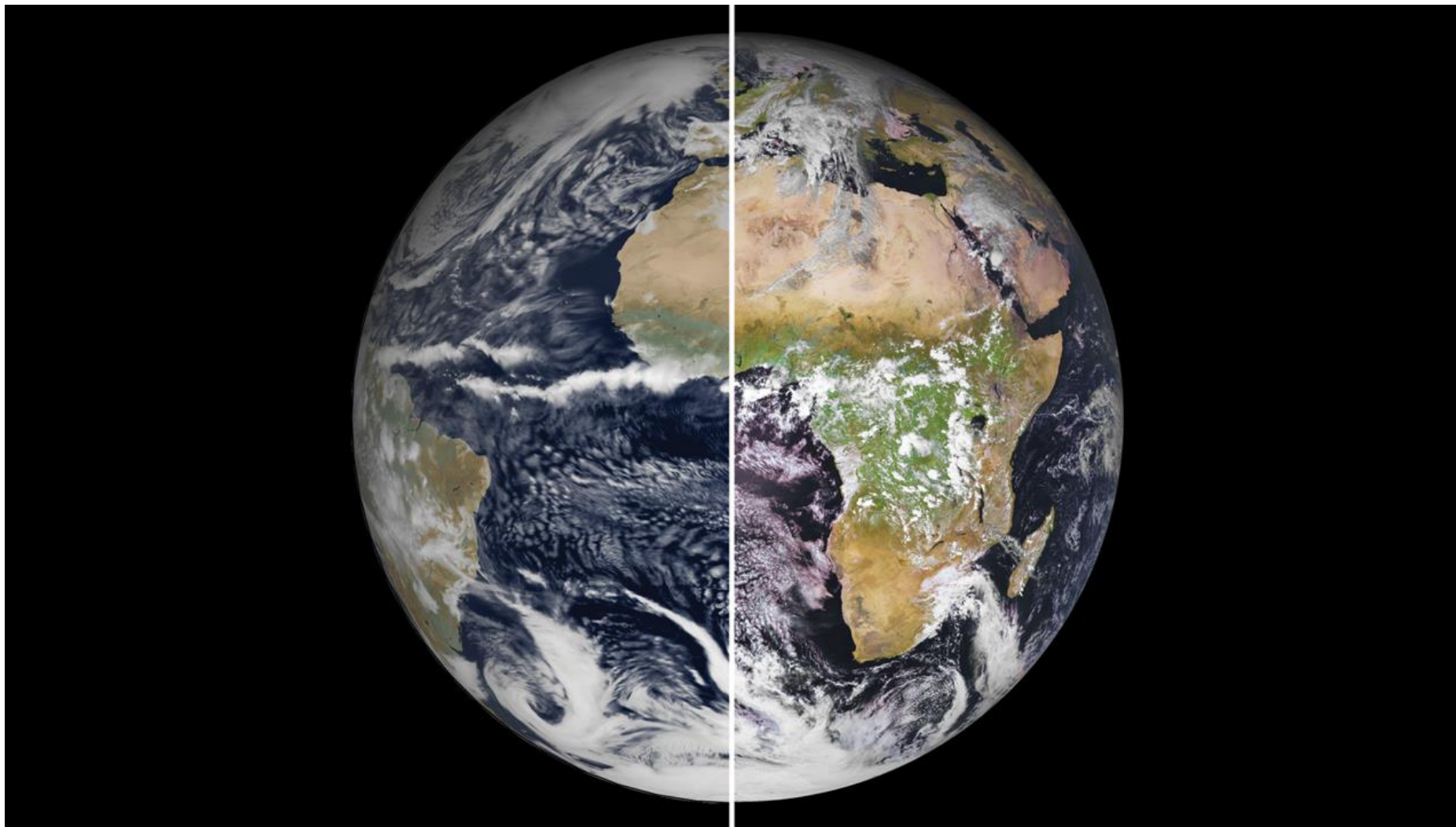
$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^1 \nabla \cdot \left(\mathbf{v}_H \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \quad (2.8)$$

$$\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} = - \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^\eta \nabla \cdot \left(\mathbf{v}_H \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \quad (2.9)$$

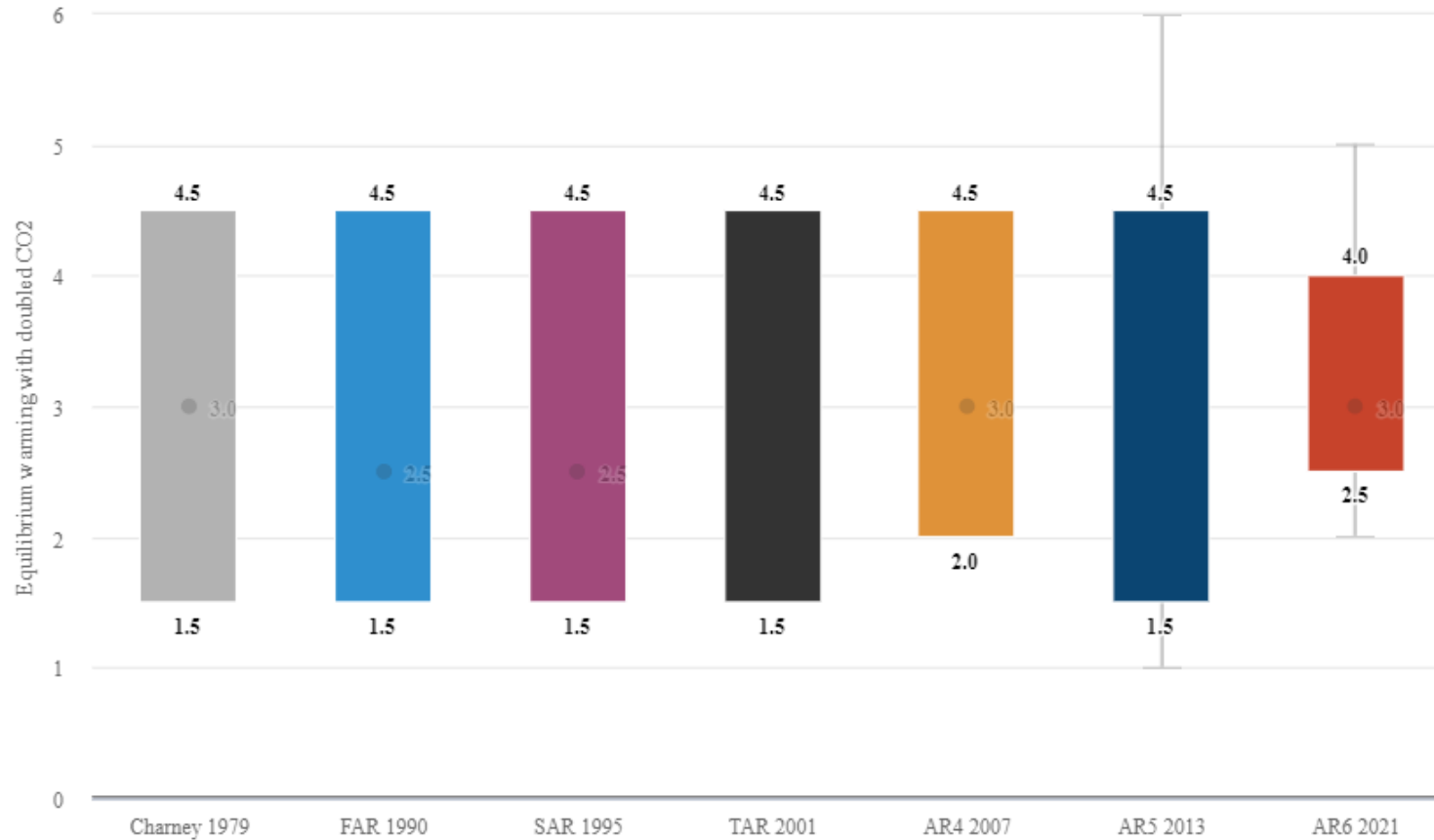
Since we use $\ln(p_s)$ rather than p_s as the surface pressure variable, it is convenient to rewrite (2.8) as

$$\frac{\partial}{\partial t} (\ln p_s) = - \frac{1}{p_s} \int_0^1 \nabla \cdot \left(\mathbf{v}_H \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \quad (2.10)$$

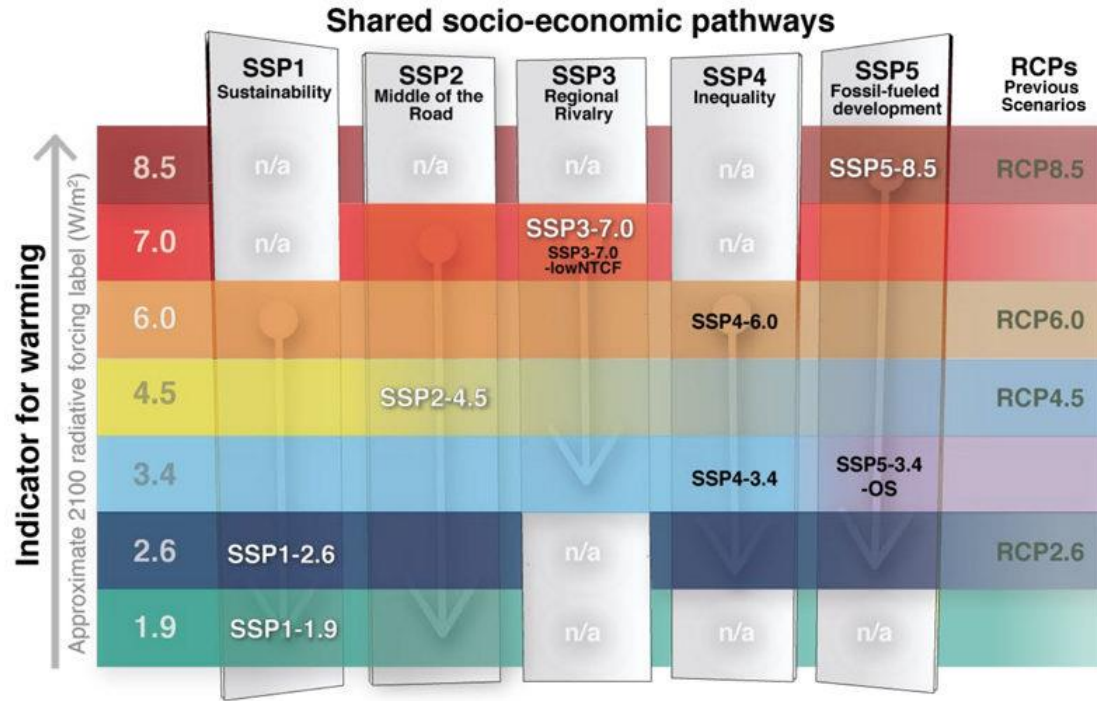
Klimatski modeli – digitalni dvojčki?



Klimatski modeli – občutljivost T na 2x CO₂ (ECS)

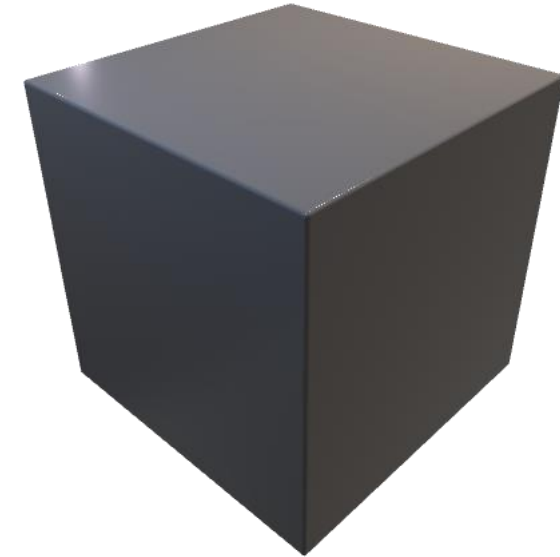


Klimatski modeli – emisijski scenariji



No additional climate policy reference scenario
 Mitigation
 Mitigation scenarios
 Five main SSP scenarios investigated in WG1
 SSPX-Y Additional SSP scenarios
 RCPY Previous RCP scenarios

KLIMATSKI MODEL (ECS)

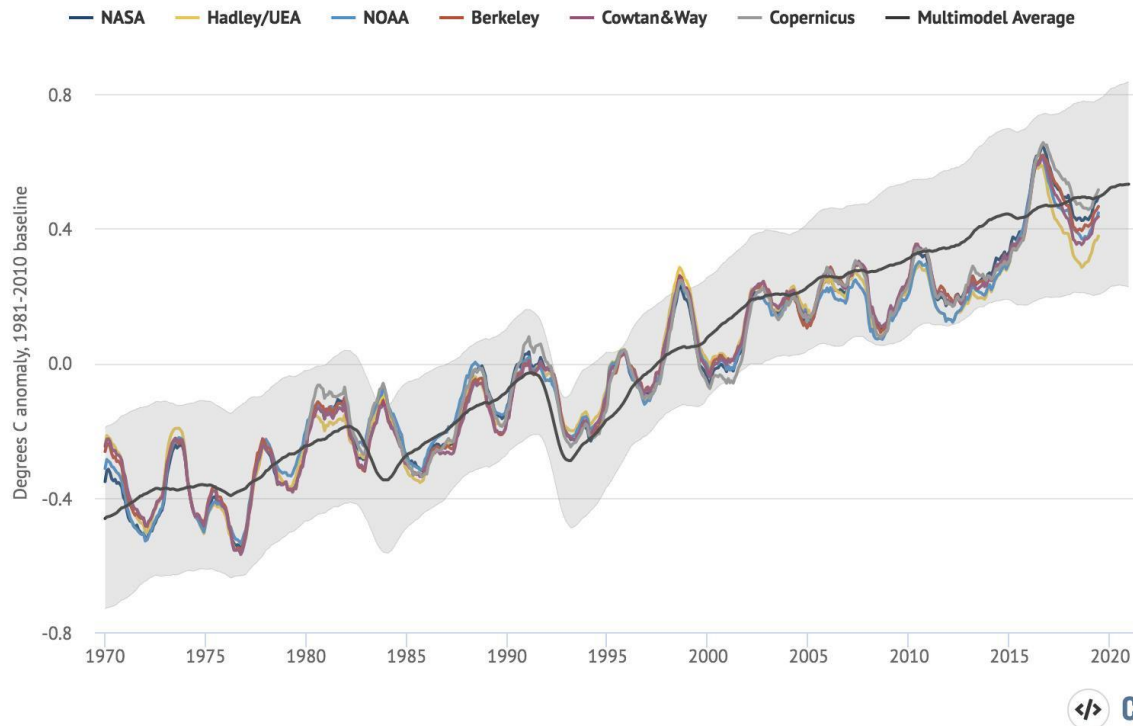


PROJEKCIJE

Pretekle napovedi klimatskih modelov

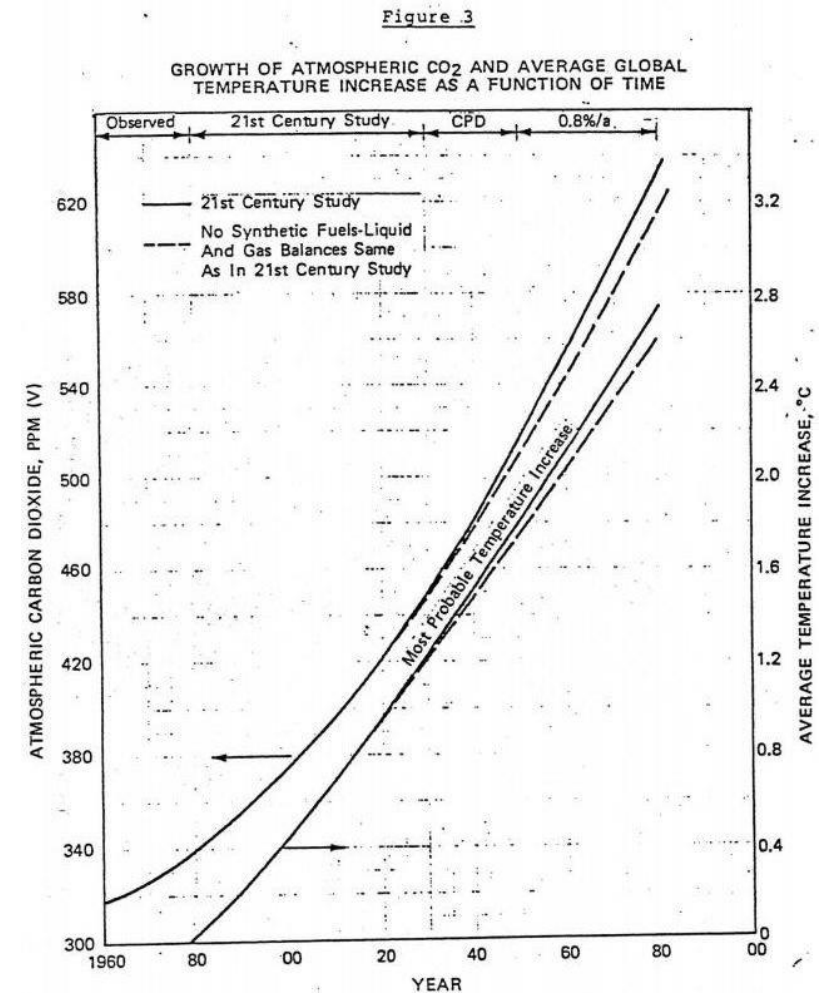
Odlično ujemanje CMIP5 modelov in meritev!

Global surface temperatures 1970-2019: climate models and observations

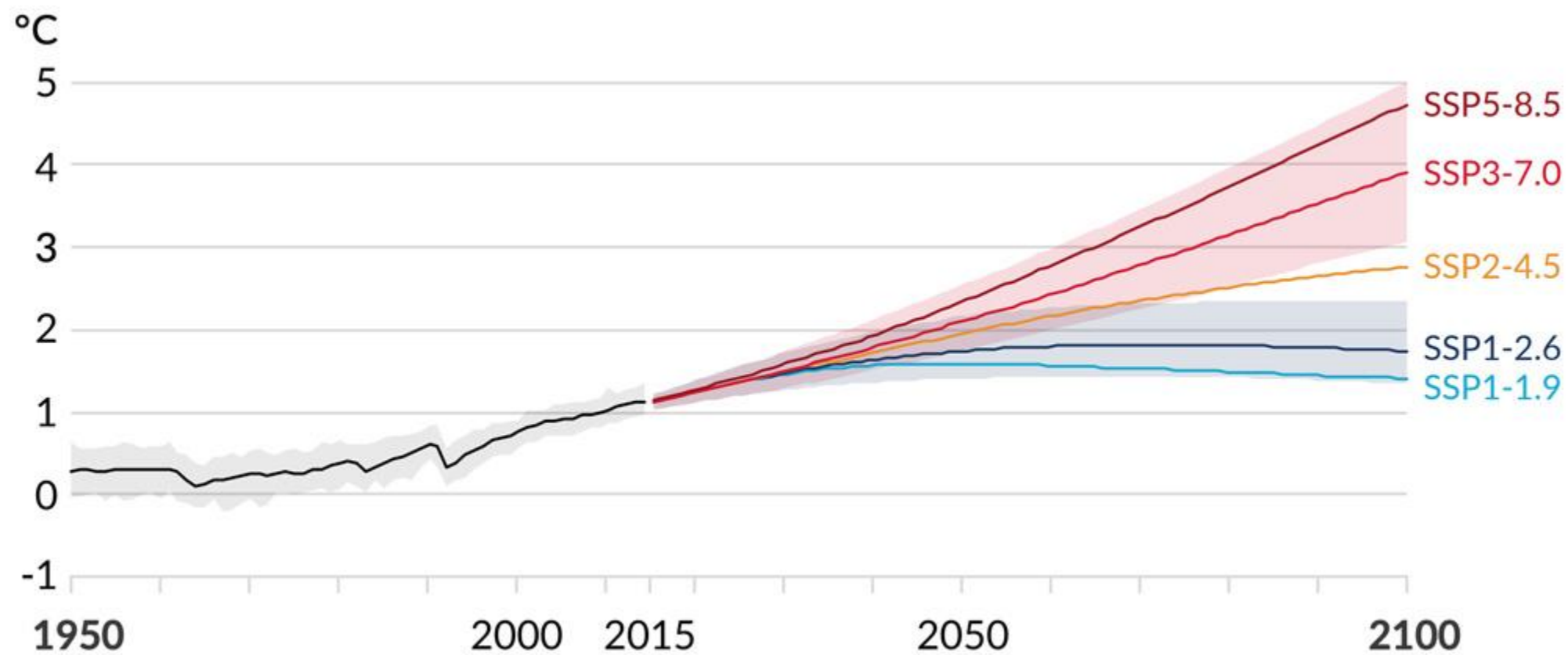


12-month average global average surface temperatures from [CMIP5 models](#) and observations between 1970 and 2020. Models use RCP4.5 forcings after 2005. They include sea surface temperatures over oceans and surface air temperatures over land [to match what is measured by observations](#). Anomalies plotted with respect to a 1981-2010 baseline. Chart by Carbon Brief using [Highcharts](#).

Exxon, 1982



Projekcije klimatskih modelov - temperature



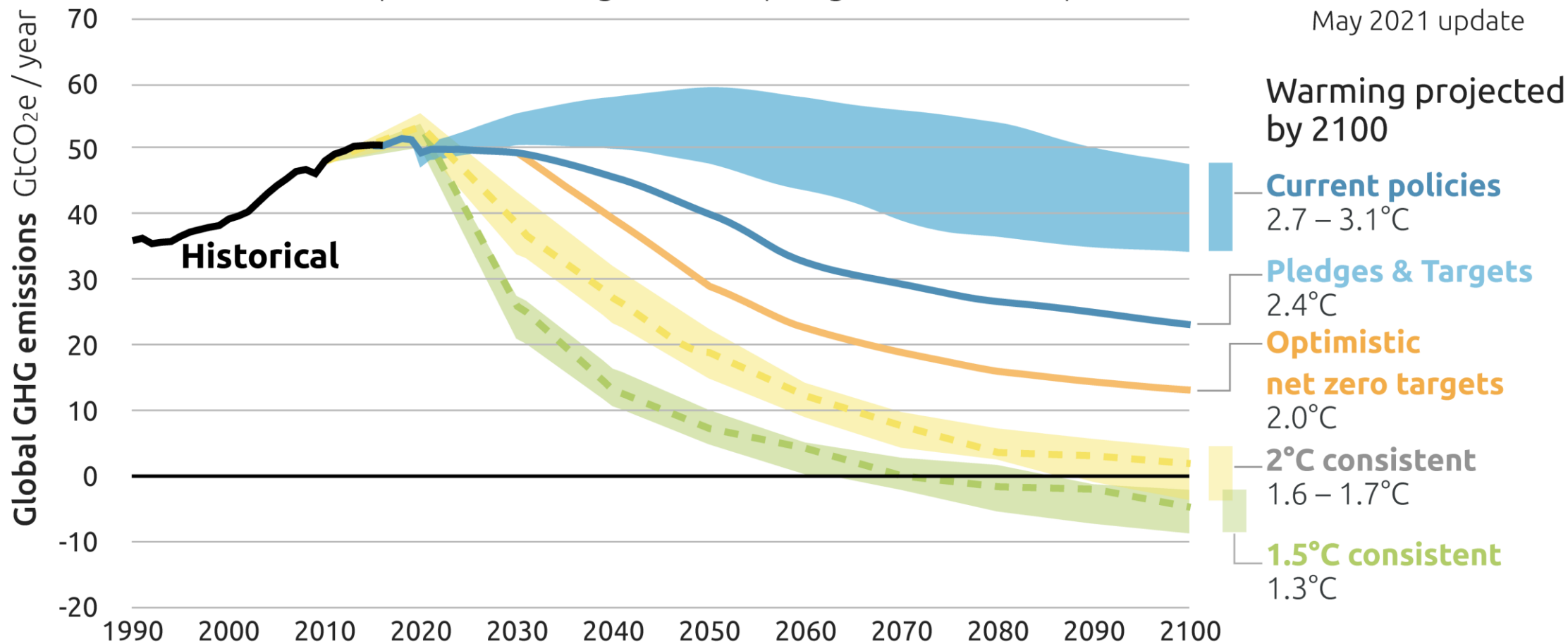
Projekcije klimatskih modelov - temperature

2100 WARMING PROJECTIONS

Emissions and expected warming based on pledges and current policies

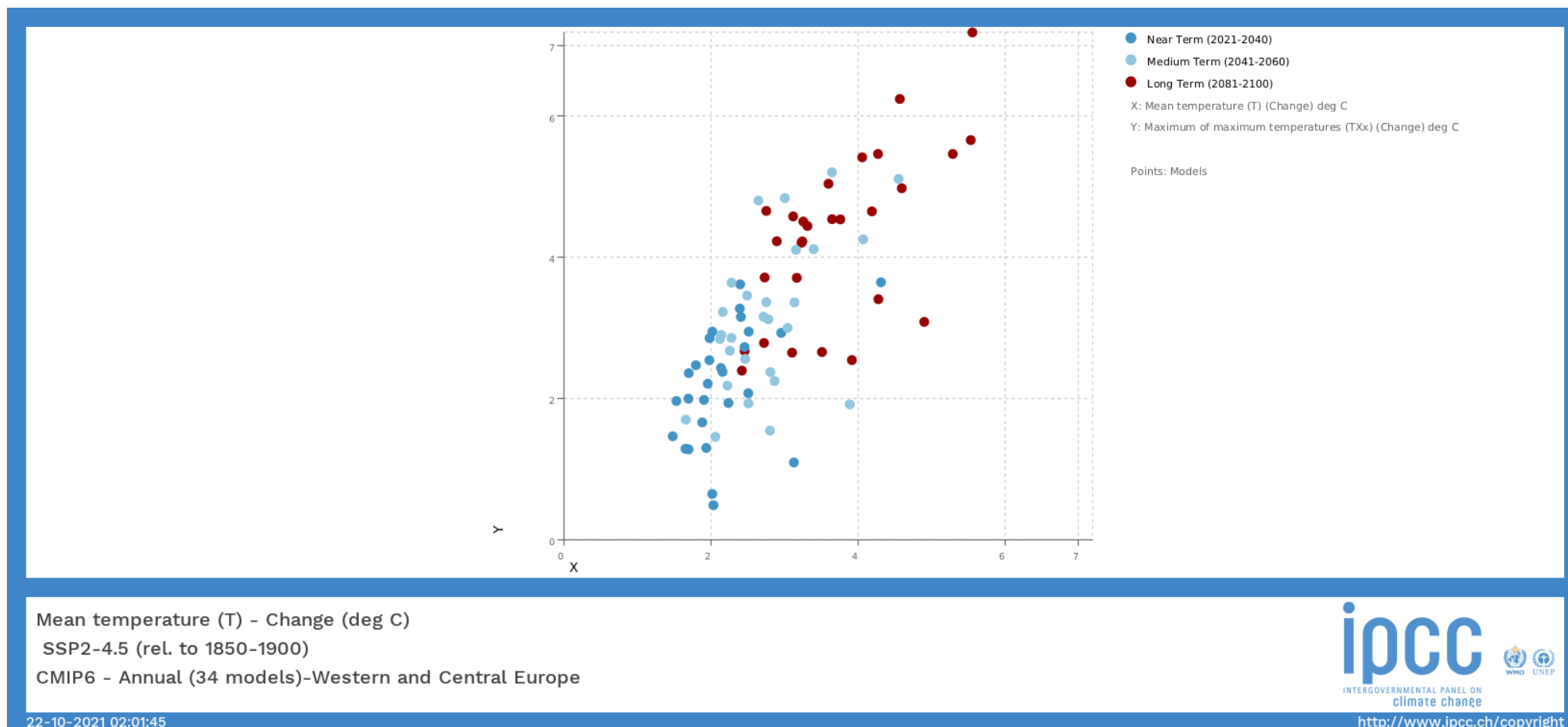


May 2021 update



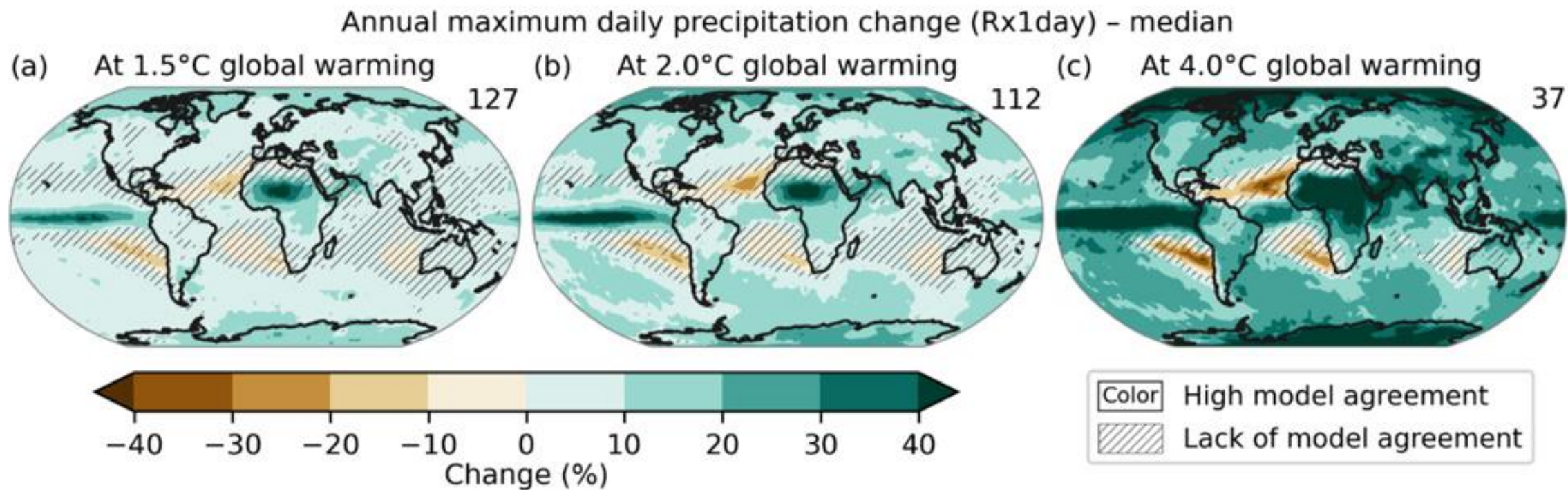
Vir: Climate Action Tracker

Projekcije klimatskih modelov - temperature



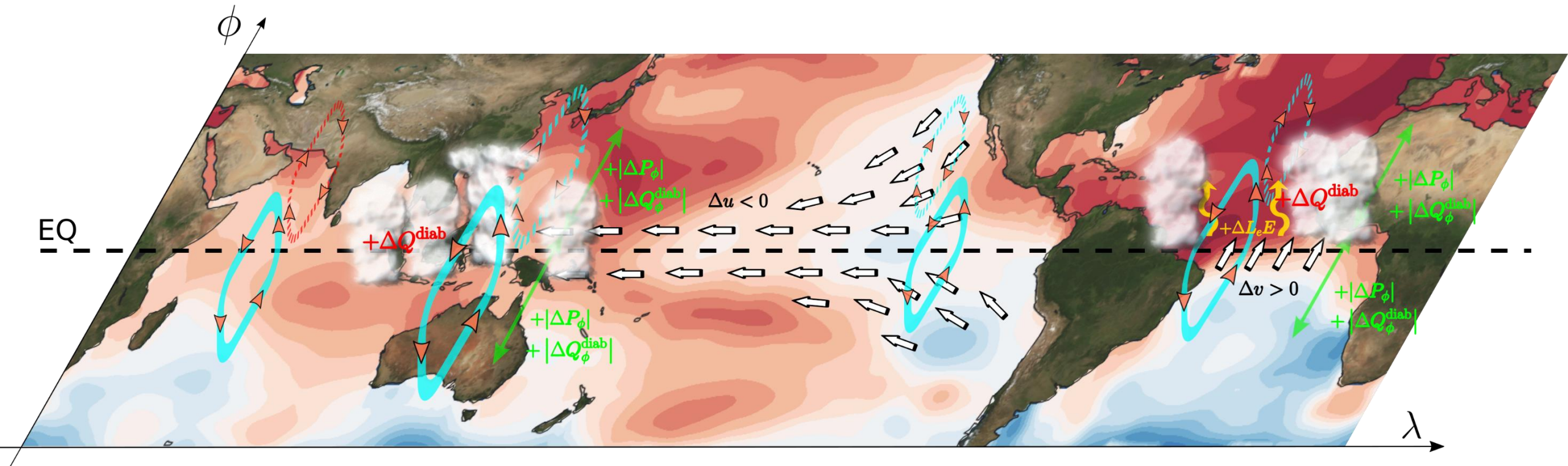
Absolutne maksimalne temperature bodo narasle bolj kot povprečne letne temperature

Projekcije klimatskih modelov - padavine



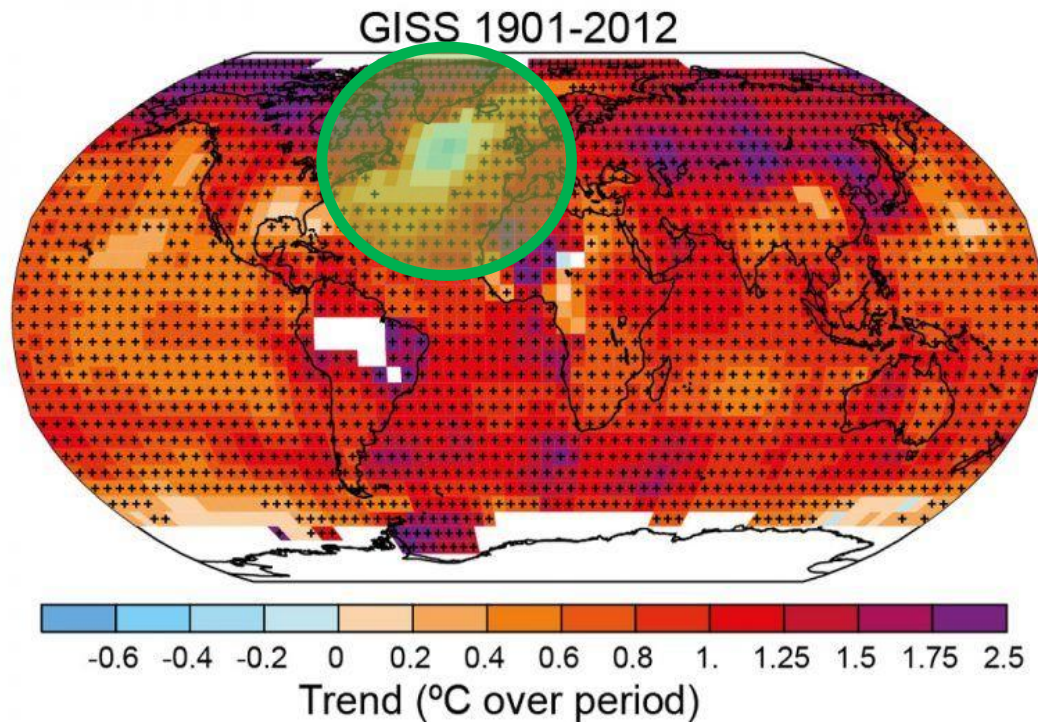
Projekcije klimatskih modelov

- Spremembe atmosferske cirkulacije



Projekcije klimatskih modelov

- Spremembe oceanske cirkulacije („Zalivski tok“)

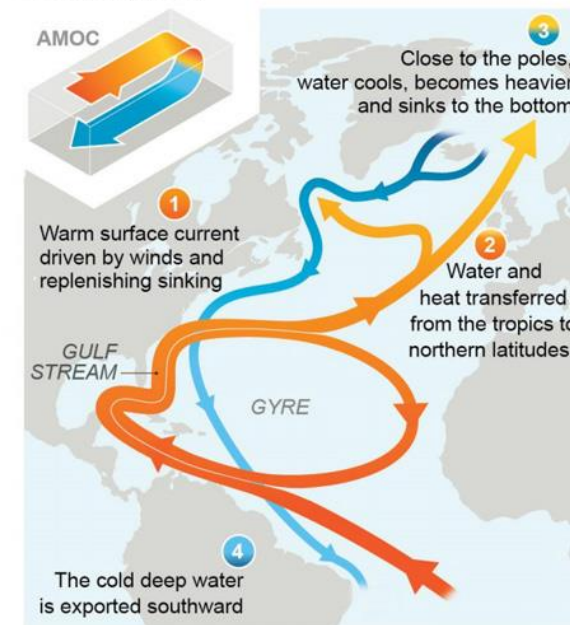


FAQ 9.3: Will the Gulf Stream shut down?

The Gulf Stream, a warm current, is expected to weaken but not cease. This slowdown will affect regional weather and sea level.

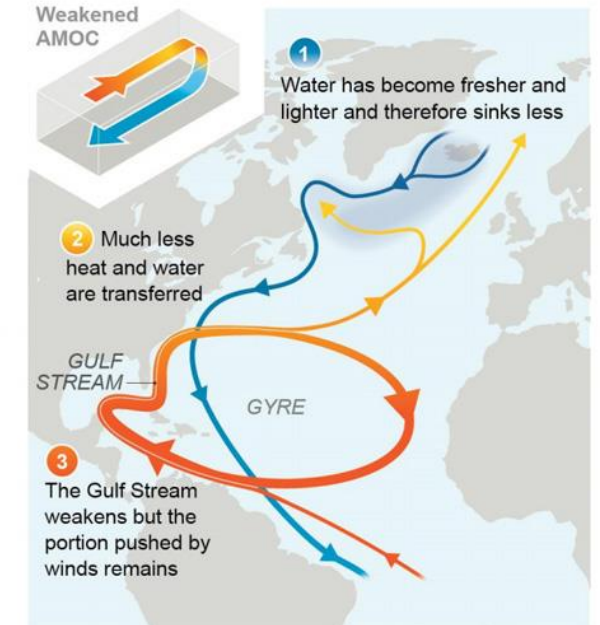
Today

The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



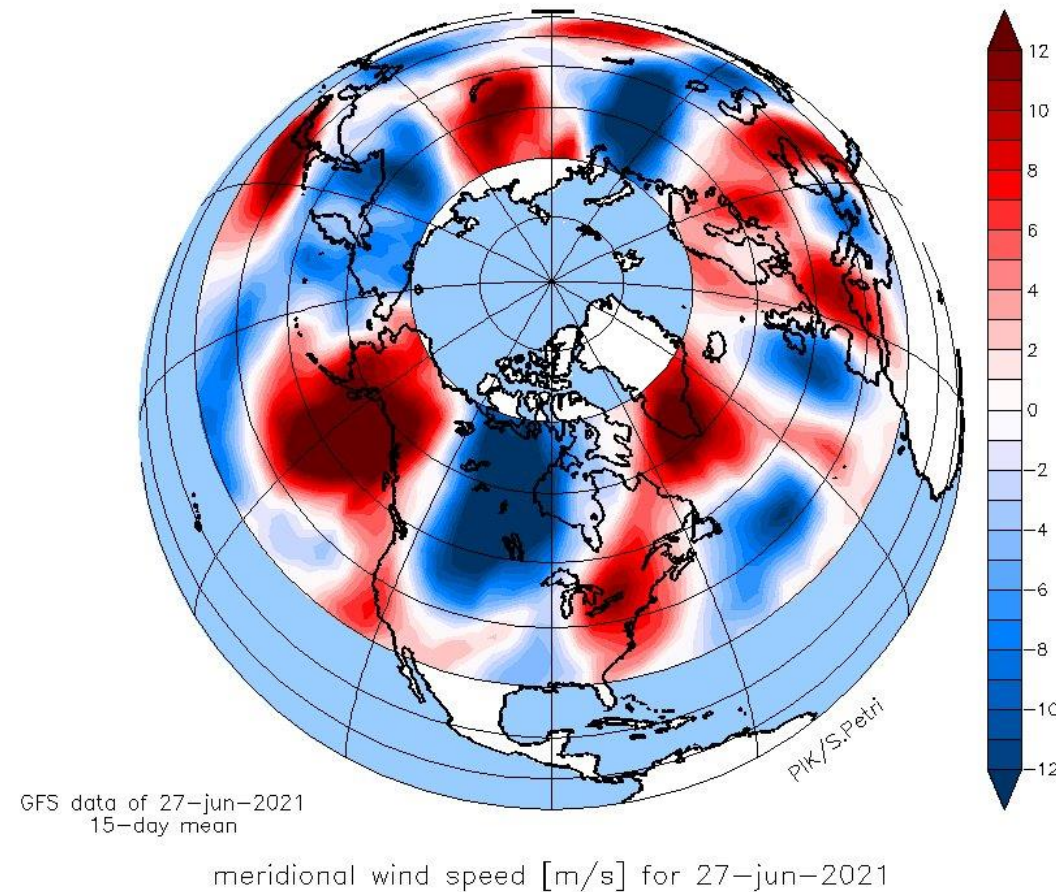
In a warmer world

Climate change weakens the AMOC, which slows the Gulf Stream down



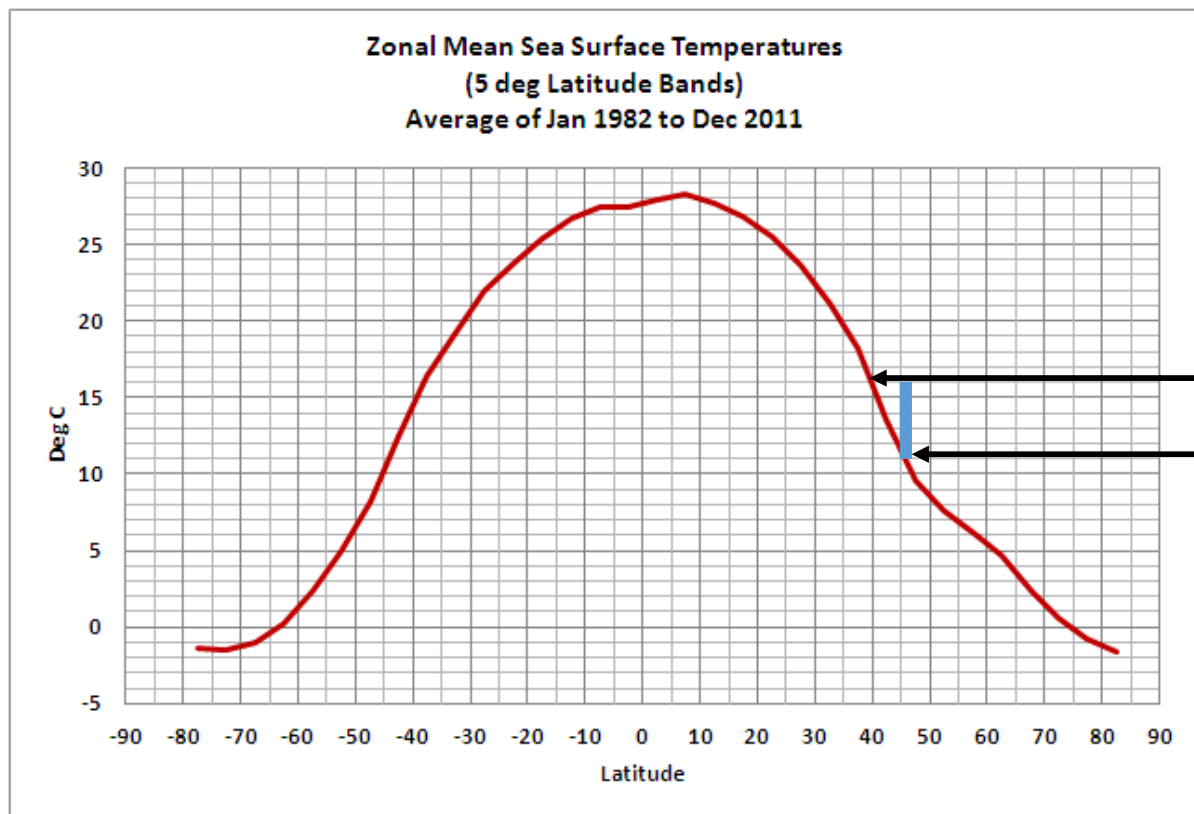
Projekcije klimatskih modelov

- Spremembe vremenskih vzorcev – pogostejše „blocking“ situacije poleti



Obeti – zgledi

- ...vsekakor niso dobri (če ne bomo ukrepali TAKOJ)



POMEMBNO PODAJANJE ILUSTRATIVNIH ZGLEDOV!

Klimatsko bi se ob dvigu za 5°C efektivno premaknili za 6° - 7° južneje, npr.:

- Koper → Atene, Malaga, Tunis
- Ljubljana → Toledo (južno od Madrida), Podgorica

... ali pa za skoraj 1000 m navzdol.

Obeti – zgledi

- ...vsekakor niso dobri (če ne bomo ukrepali TAKOJ)

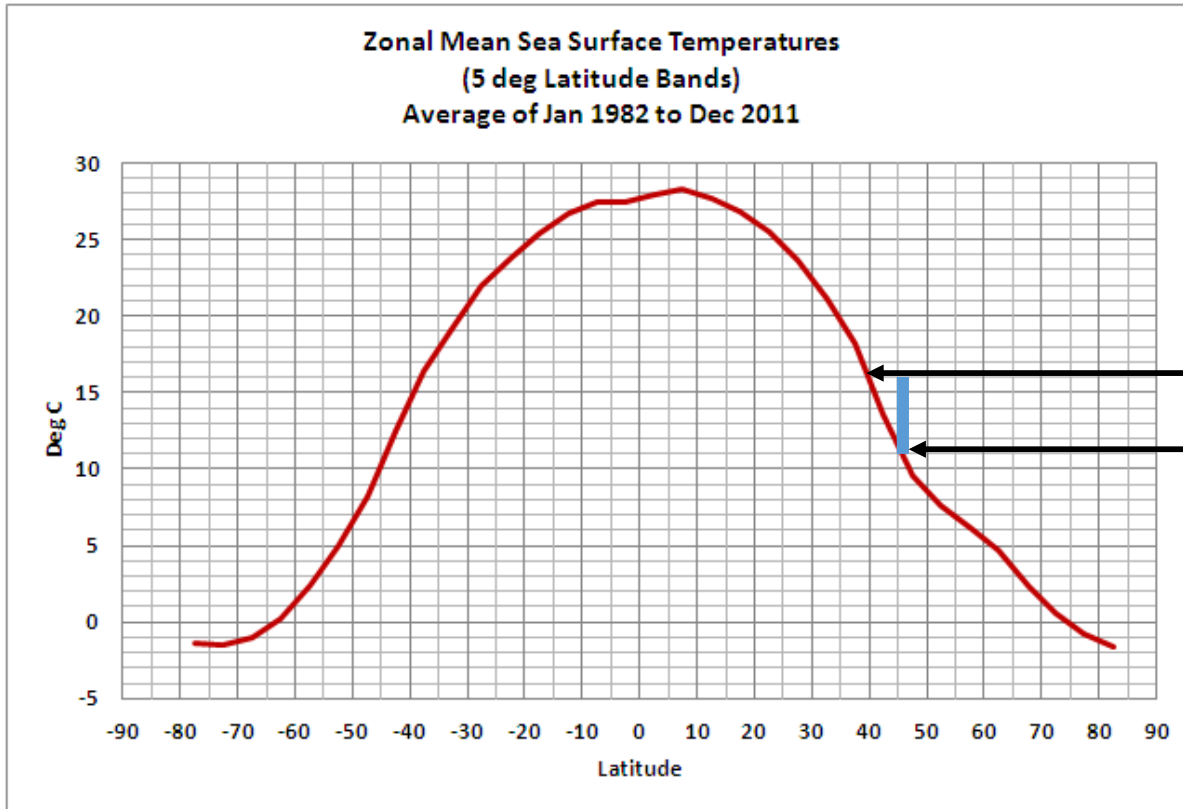
KOPER



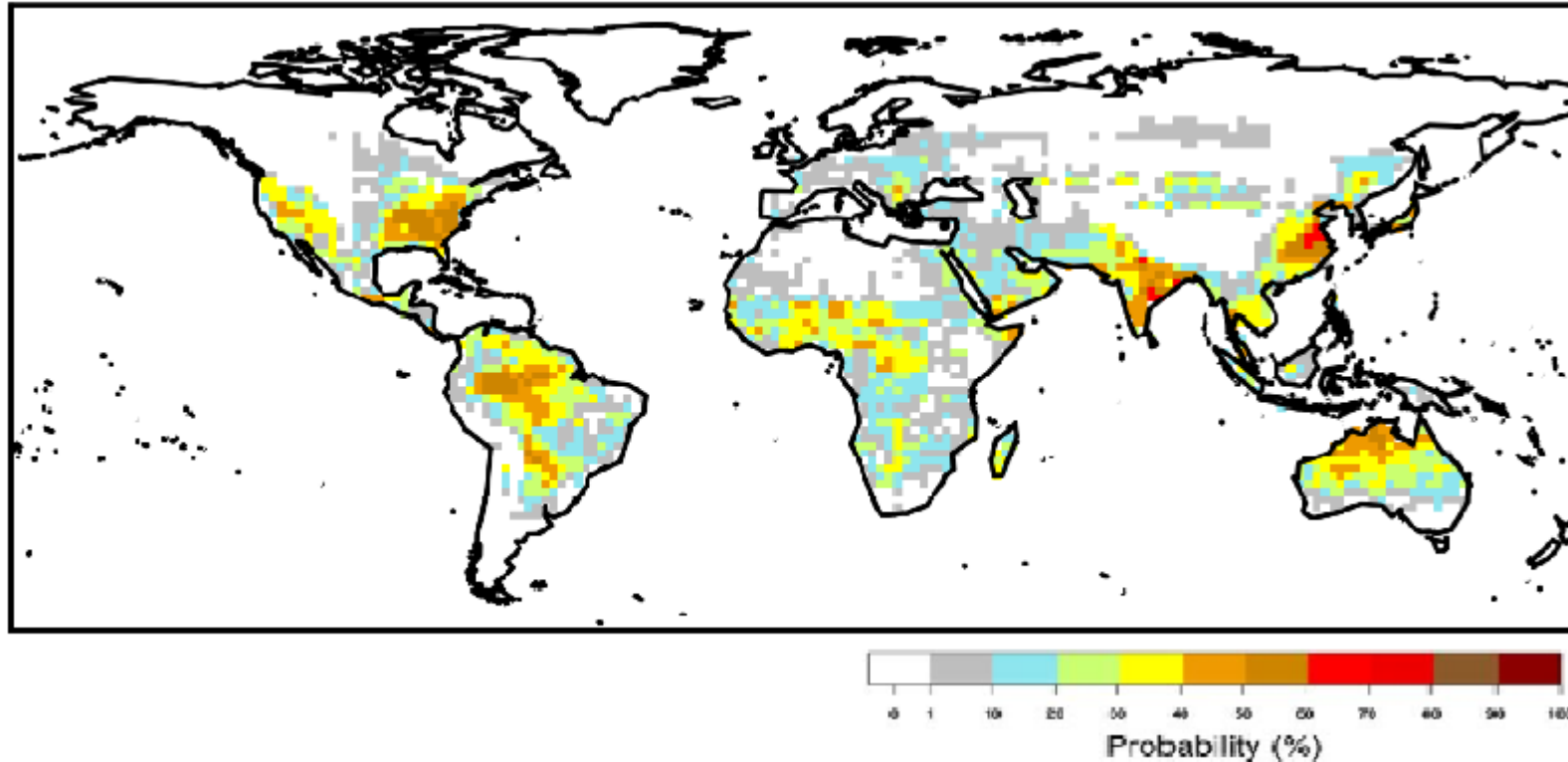
ATENE



MALAGA



Obeti – območja, kjer bo človeško življenje ogroženo?



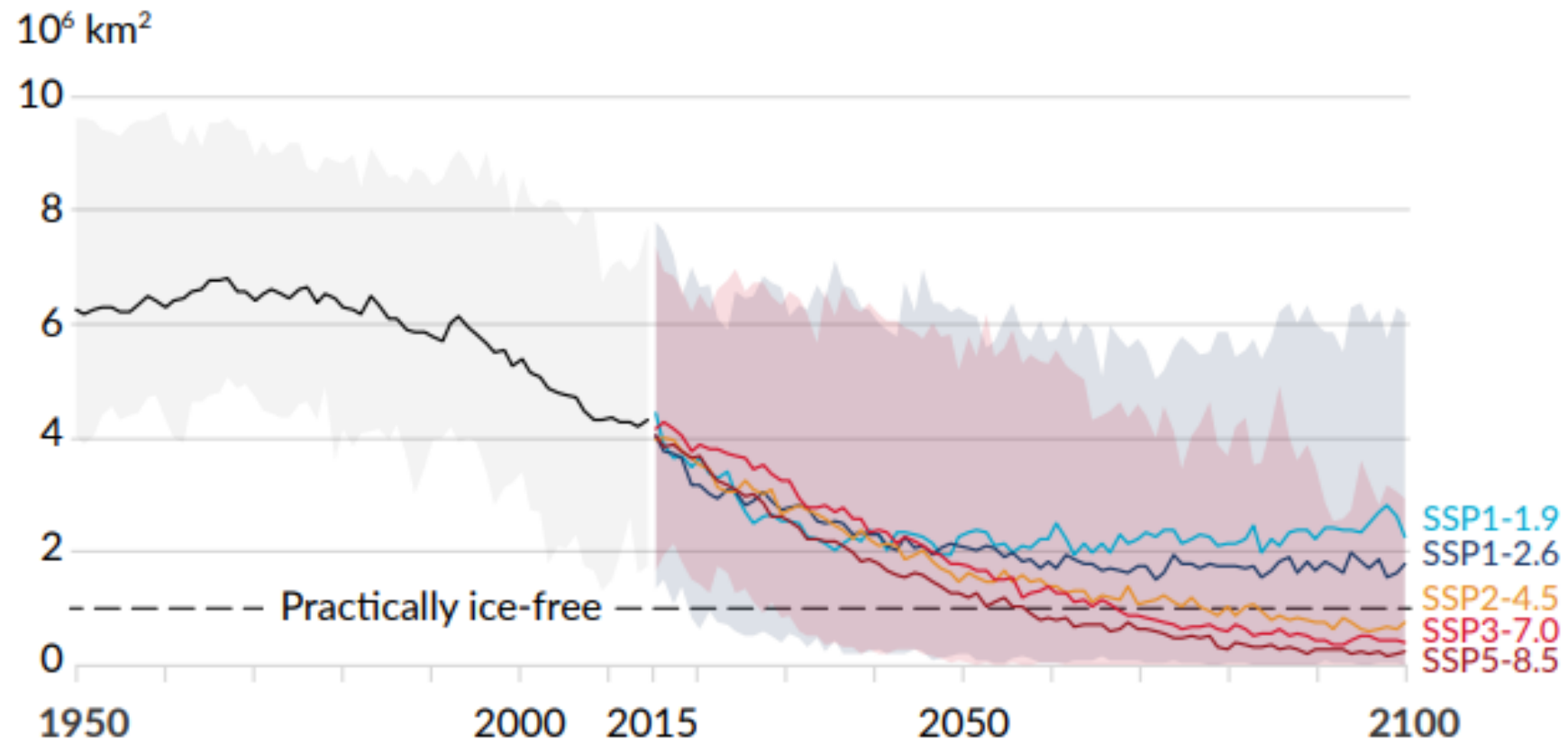
Vir: Russo et al., Nature Scientific Reports (2017)

Verjetnost, da se v obdobju enega leta pojavi vročinski val, pri katerem bi maksimalna vrednost temperature mokrega termometra (TMT) presegla vrednost 35°C. Pri tej TMT človek (na prostem) doživi v nekaj urah spontani vročinski udar že v mirovanju, v senci, pri popolni ventilaciji, kar vodi v hitro smrt. Hlajenje telesa ni teoretično možno niti s potenjem.

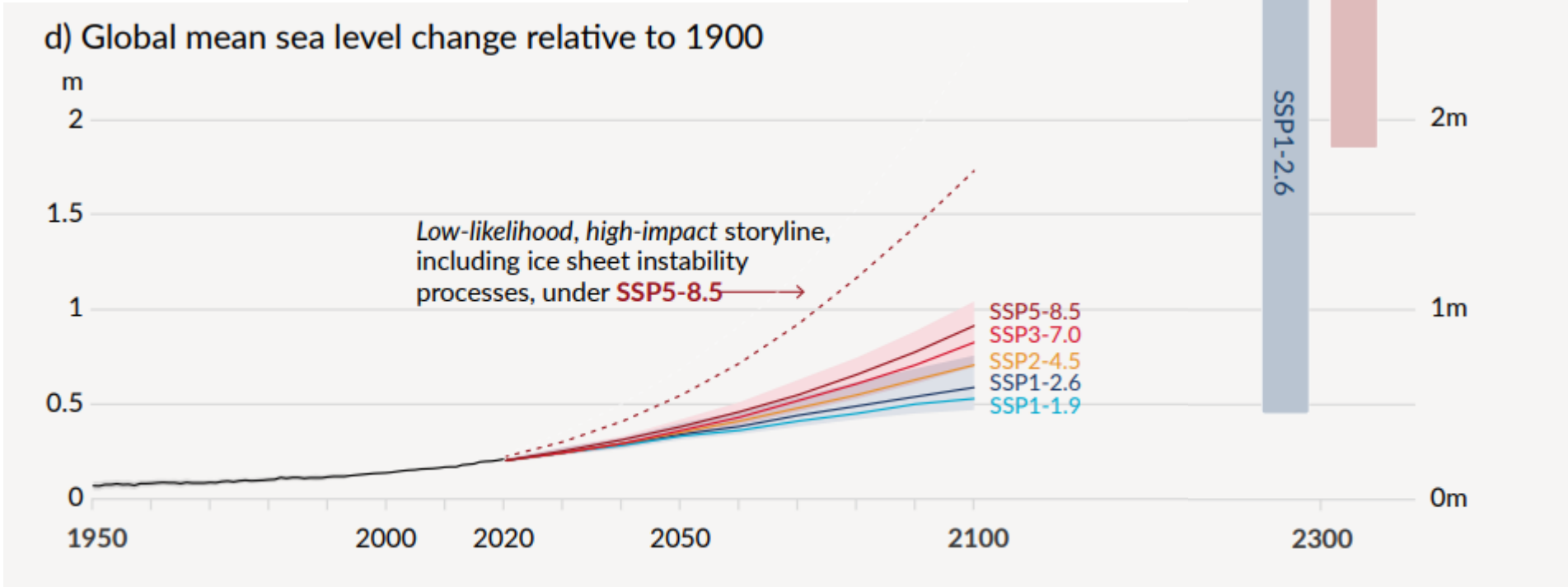
Po RCP 8.5 scenariju („*business as usual*“) za obdobje 2070-2100 (+3.2 – 5.4 °C glede na predindustrijsko dobo).

Obeti – Arktični led

b) September Arctic sea ice area



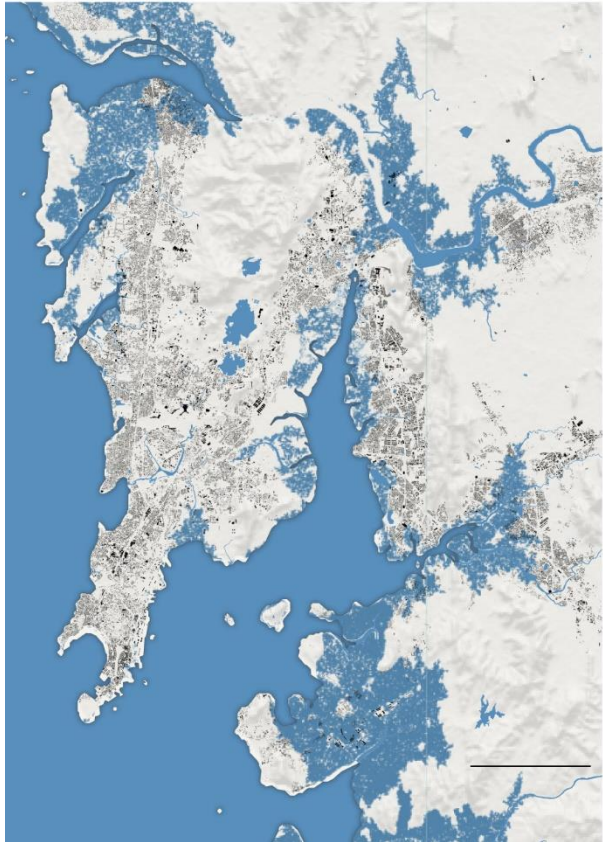
Obeti – rast gladine morja



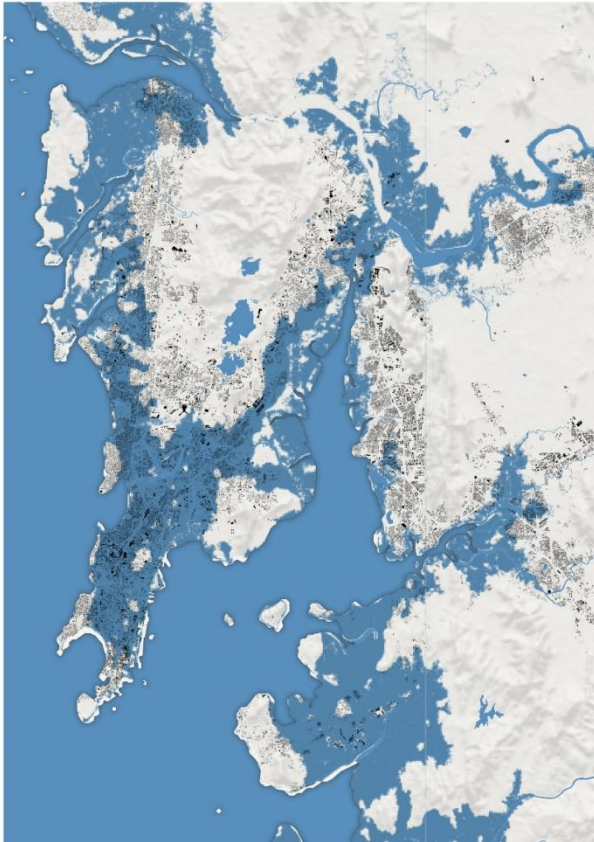
Obeti – rast gladine morja

Mumbai (Indija)

2050 (stara)



2050 (nova)



- Napake v satelitskih lidarskih podatkih, bolj natančni lidarski podatki z letal niso povsod na voljo, ker so meritve izjemno drage → popravek podatkov s strojnim učenjem
- Glede na RCP 4.5 bo l. 2050 pod nivojem visoke plime 150 mio ljudi, 300 mio ljudi pa vsaj 1x letno
- Podatki populacije za l. 2010, čeprav na teh območjih populacija močno narašča

S. A. Kulp in B. H. Strauss, 2019

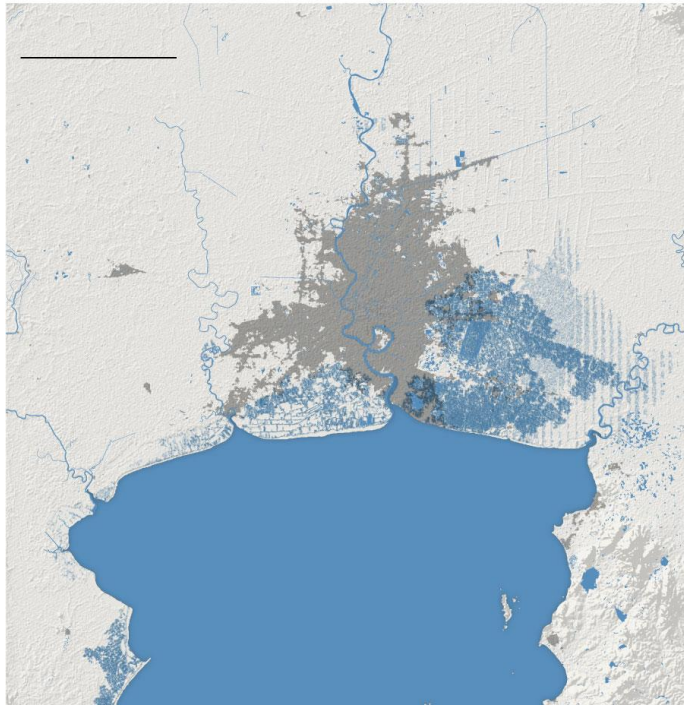
New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

Nature Communications **10**(4844)

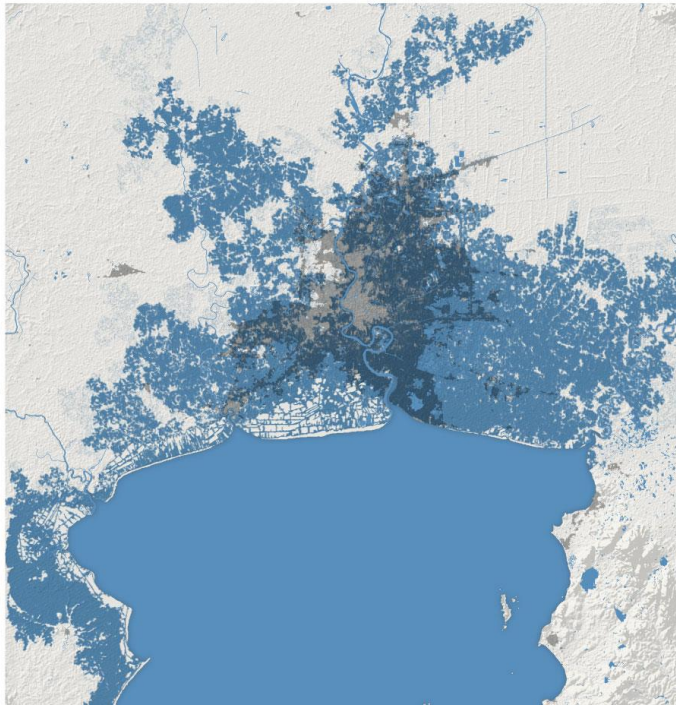
Obeti – rast gladine morja

Bangkok (Tajska)

2050 (stara)



2050 (nova)



- Napake v satelitskih lidarskih podatkih, bolj natančni lidarski podatki z letal niso povsod na voljo, ker so meritve izjemno drage → popravek podatkov s strojnim učenjem
- Glede na RCP 4.5 bo l. 2050 pod nivojem visoke plime 150 mio ljudi, 300 mio ljudi pa vsaj 1x letno
- Podatki populacije za l. 2010, čeprav na teh območjih populacija močno narašča

S. A. Kulp in B. H. Strauss, 2019

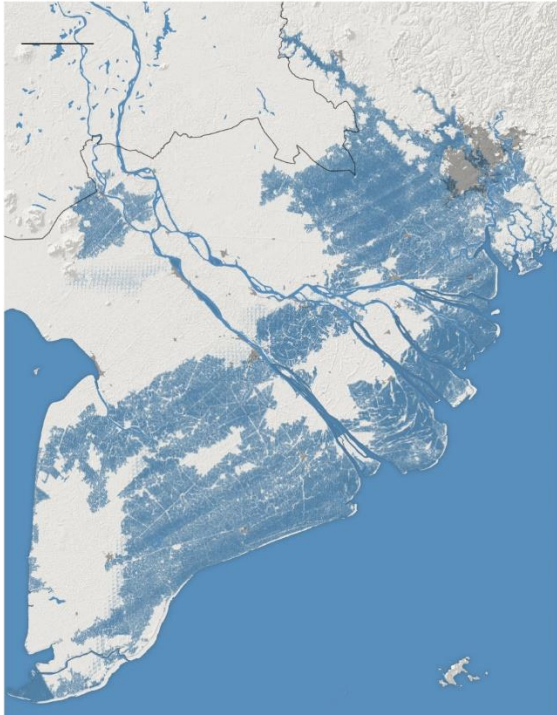
New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

Nature Communications **10**(4844)

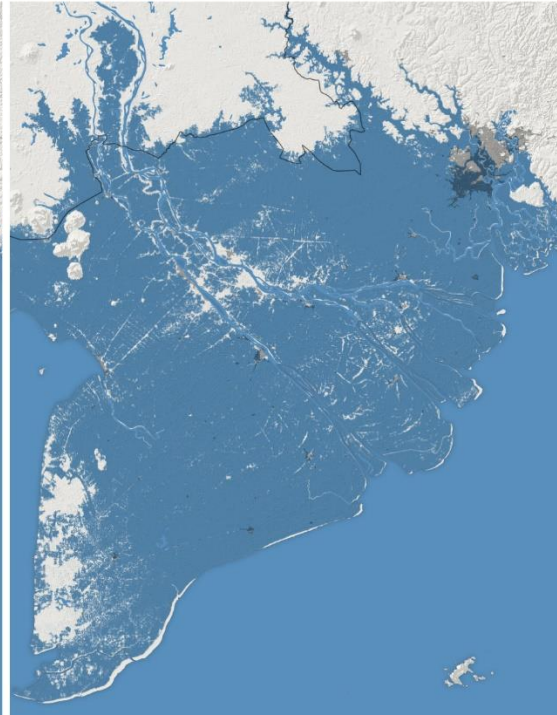
Obeti – rast gladine morja

Vietnam

2050 (stara)



2050 (nova)



- Napake v satelitskih lidarskih podatkih, bolj natančni lidarski podatki z letal niso povsod na voljo, ker so meritve izjemno drage → popravek podatkov s strojnim učenjem
- Glede na RCP 4.5 bo l. 2050 pod nivojem visoke plime 150 mio ljudi, 300 mio ljudi pa vsaj 1x letno
- Podatki populacije za l. 2010, čeprav na teh območjih populacija močno narašča

S. A. Kulp in B. H. Strauss, 2019

New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

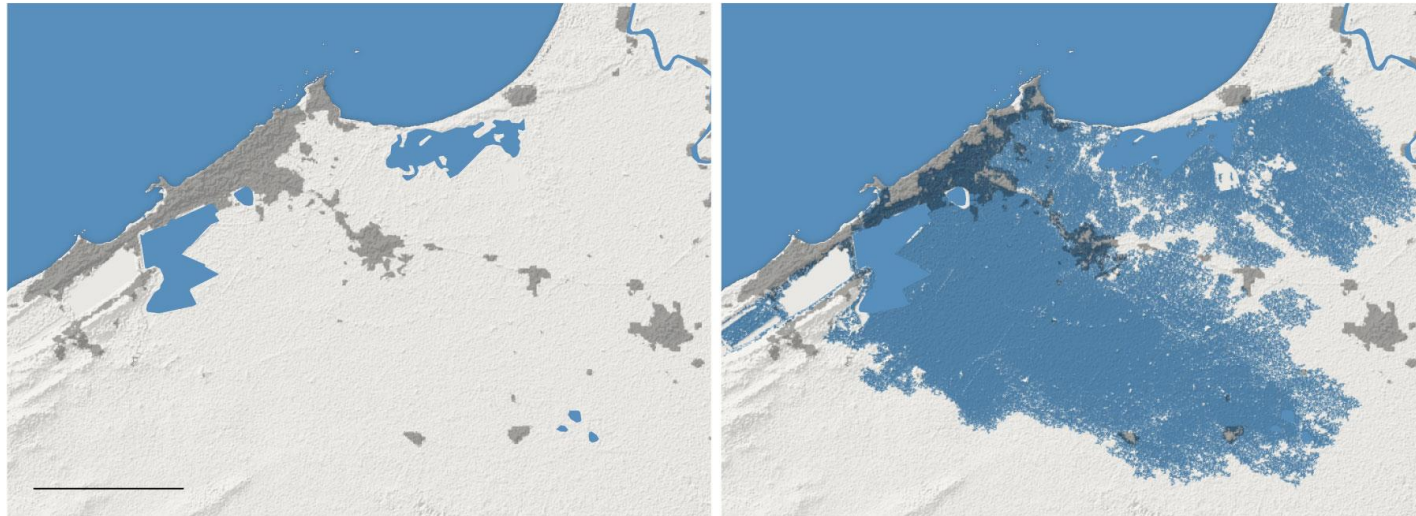
Nature Communications **10**(4844)

Obeti – rast gladine morja

Aleksandrija (Egipt)

2050 (stara)

2050 (nova)

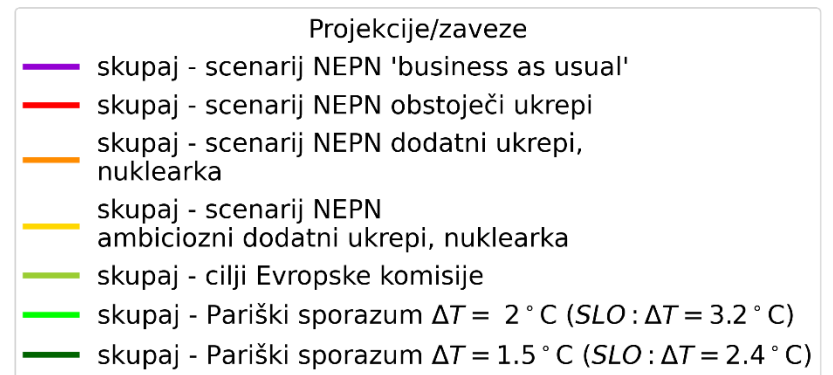
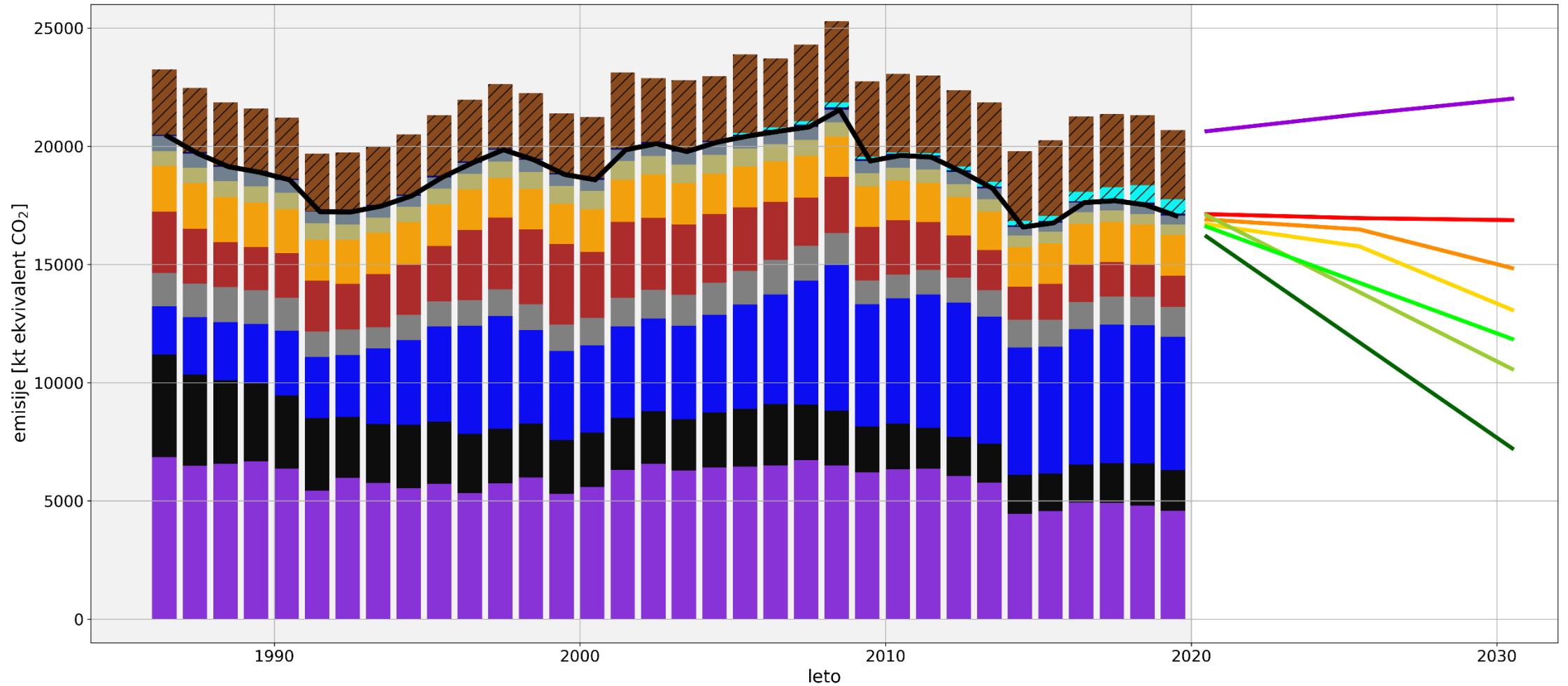


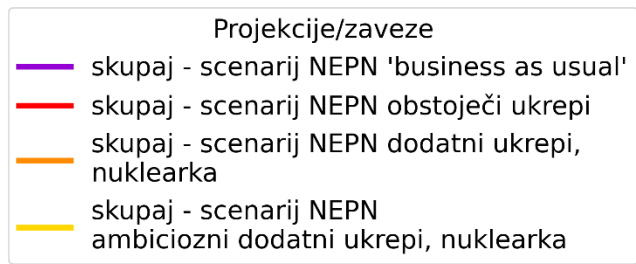
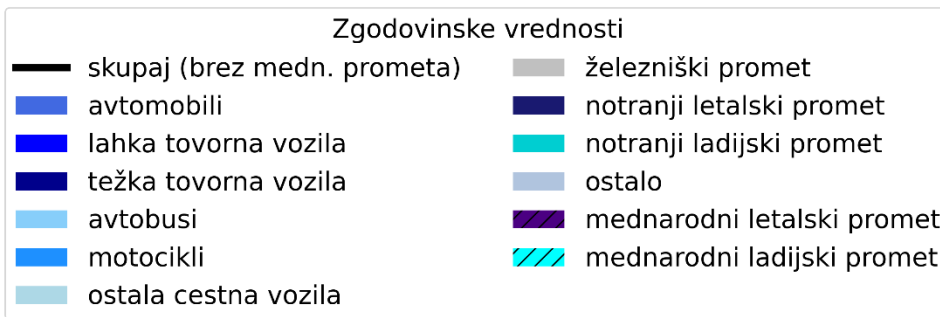
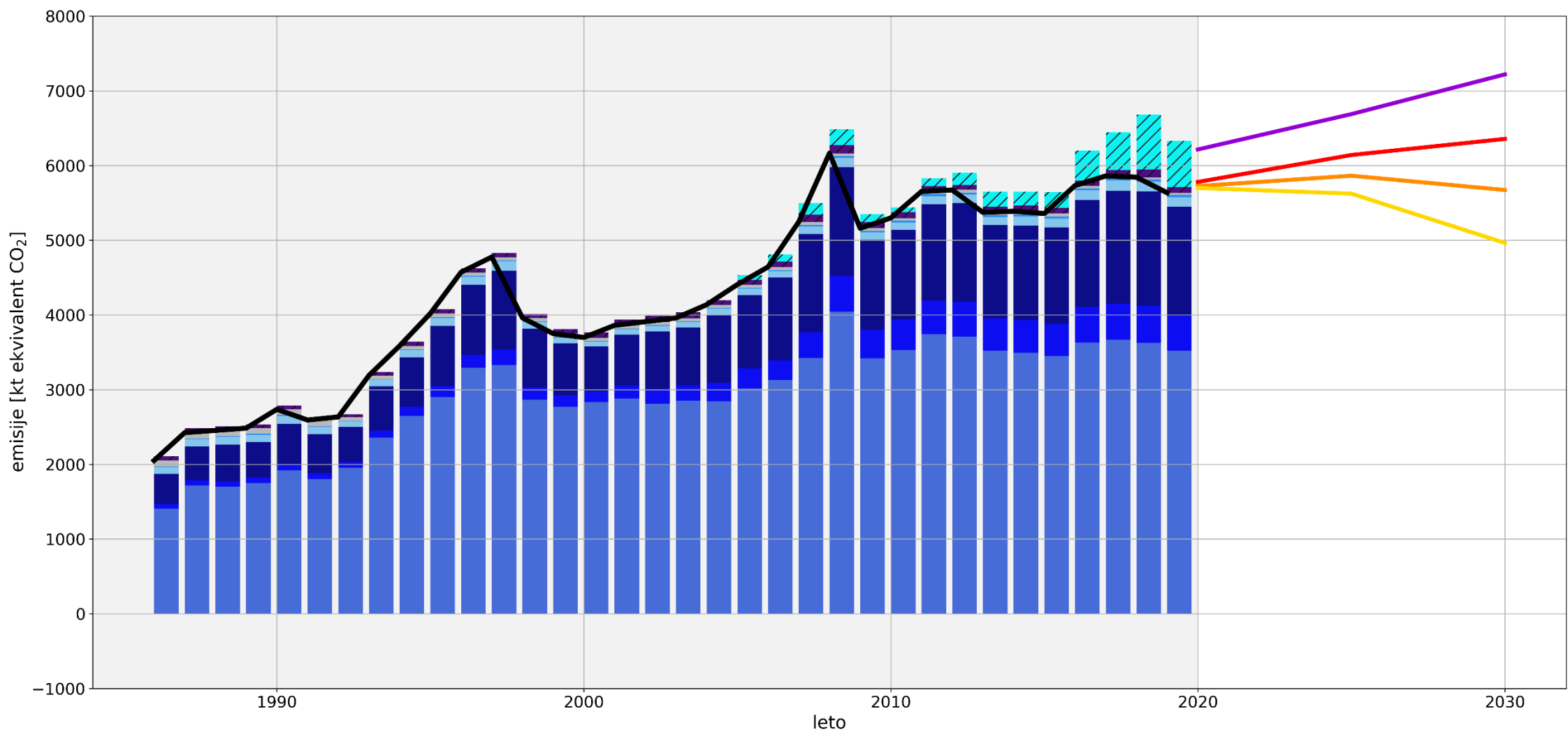
- Napake v satelitskih lidarskih podatkih, bolj natančni lidarski podatki z letal niso povsod na voljo, ker so meritve izjemno drage → popravek podatkov s strojnim učenjem
- Glede na RCP 4.5 bo l. 2050 pod nivojem visoke plime 150 mio ljudi, 300 mio ljudi pa vsaj 1x letno
- Podatki populacije za l. 2010, čeprav na teh območjih populacija močno narašča

S. A. Kulp in B. H. Strauss, 2019

New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

Nature Communications **10**(4844)





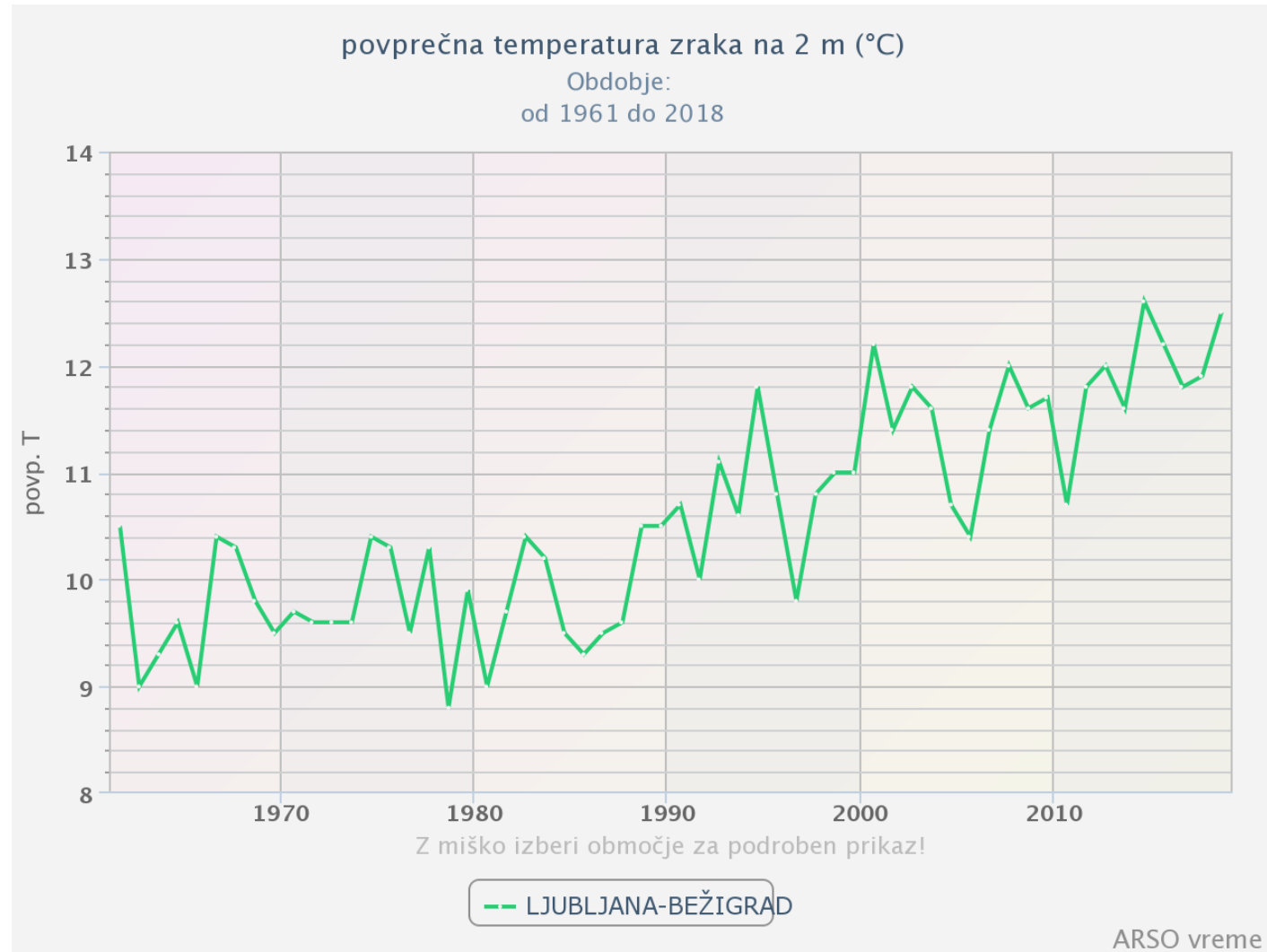
Sklepne misli

- 200 držav na tem svetu bo moralo sodelovati, vsaka s svojo računico. Takšnega izziva v človeški zgodovini še ni bilo!!
- Če želimo doseči potrebne cilje, moramo hitro in radikalno transformirati celotno ekonomijo, prehranske sisteme, transport in energetiko, hkrati pa moramo v razvitem svetu zmanjšati porabo energije (npr. izboljšati izolativnost, bolj učinkovite naprave)
- Pri tem mora biti prvi kriterij brezogljična energija!
- Razvijati tehnologijo (npr. CCS, fuzija, bolj učinkoviti solarni paneli, modularni mali fizijski reaktorji), sredstva za raziskave in razvoj
- Sprememba ekonomske cenilke: okolju bo potrebno pripisati ceno (ogljčni davek razširiti tudi na druge industrije poleg energetike)

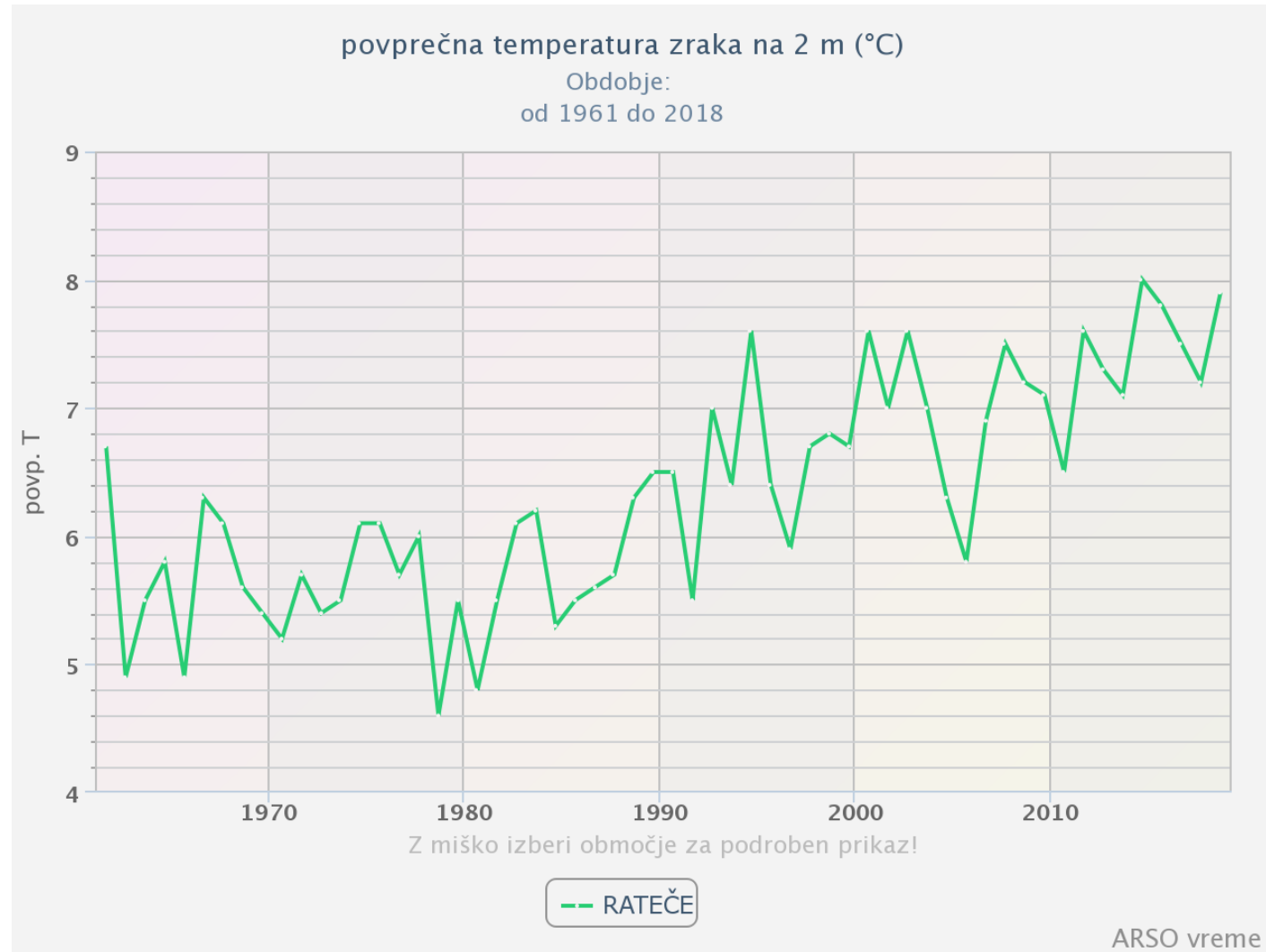
Sklepne misli

- Poleg sistemskih sprememb so nujne tudi vedenjske spremembe ljudi: T v stanovanju, poraba ogrevane sanitarne vode, uporaba javnega prometa, letenje, razvade, popravila (daljše garancije), prehranske navade
- Spremembe sistema vrednot (vzgoja in izobraževanje) → PLANET JE OMEJEN!
- Podnebne spremembe so le en aspekt okoljske degradacije
- EC je podala zelo ambiciozen načrt, a obljube in zaveze se v preteklosti pogosto niso uresničile
- **ZAHTEVAJTE SPREMEMBE!**

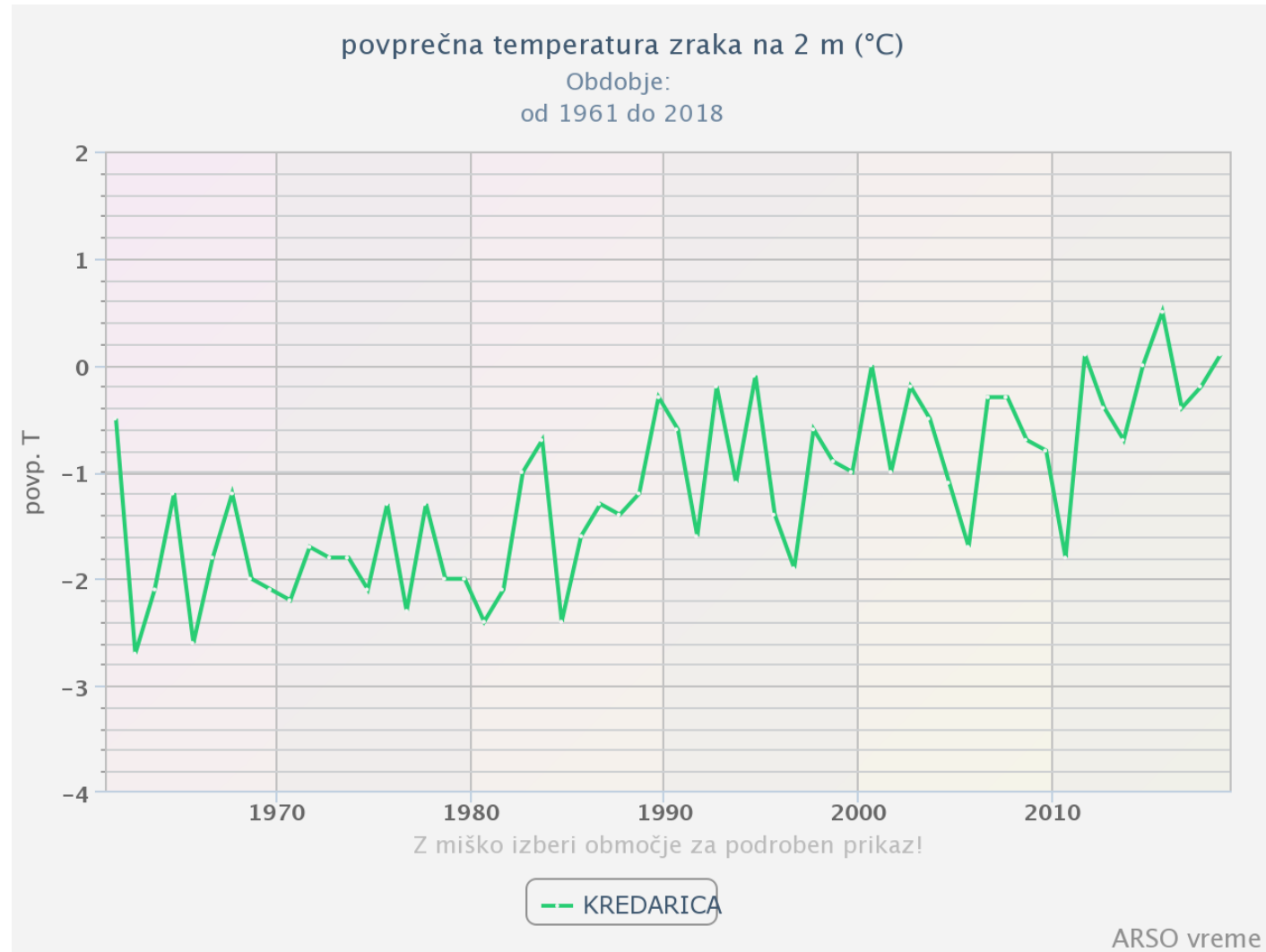
Slovenija – meritve



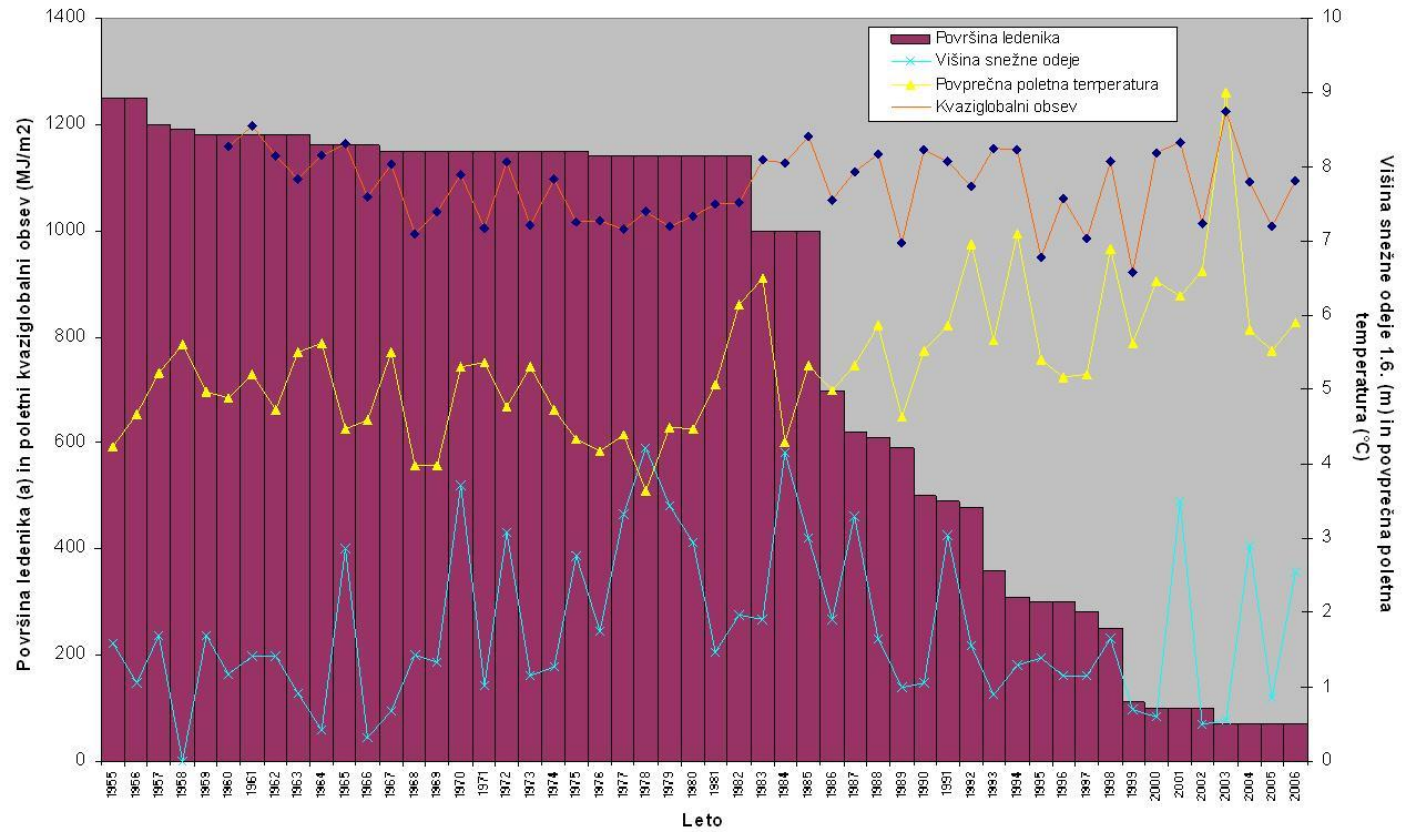
Slovenija – meritve



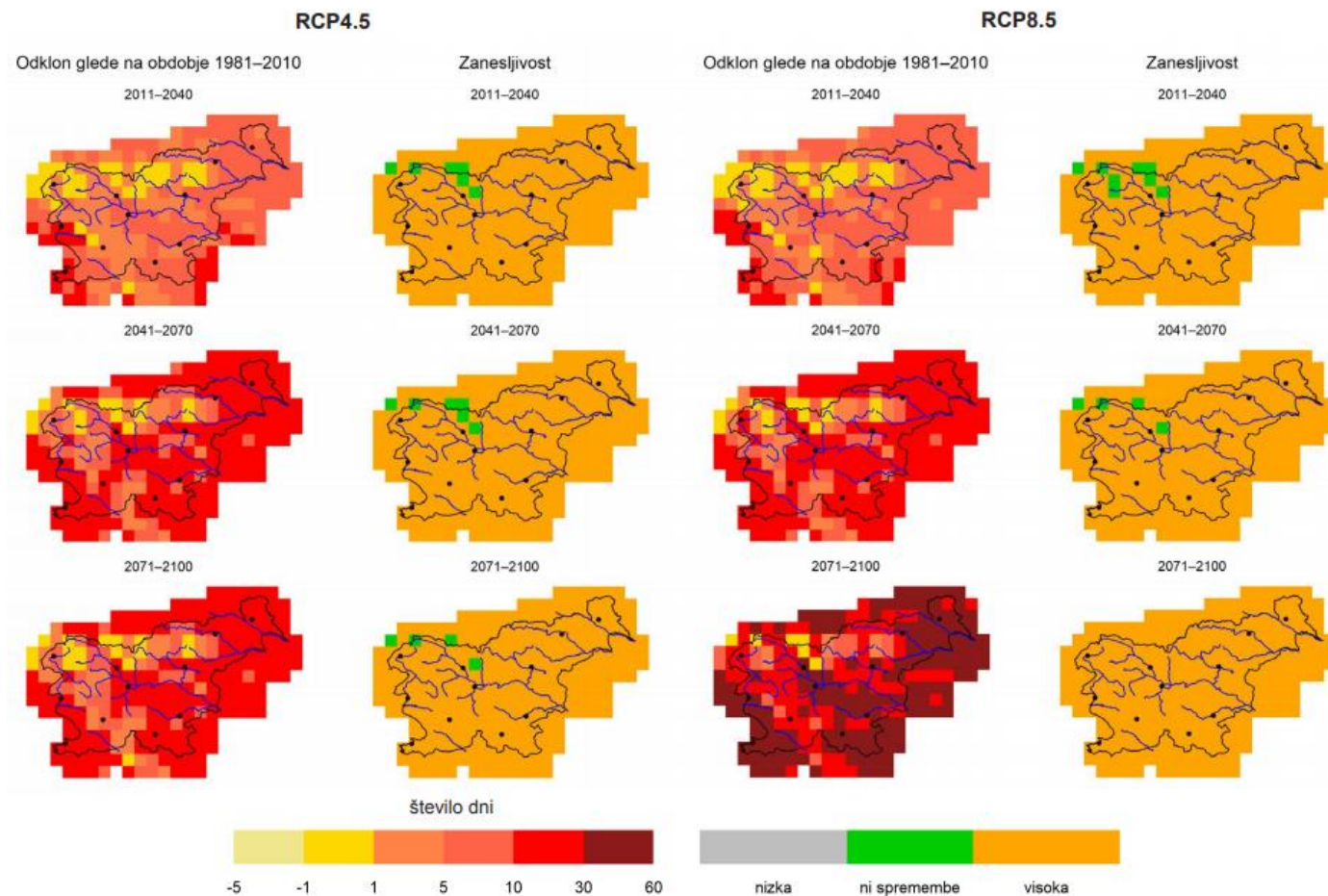
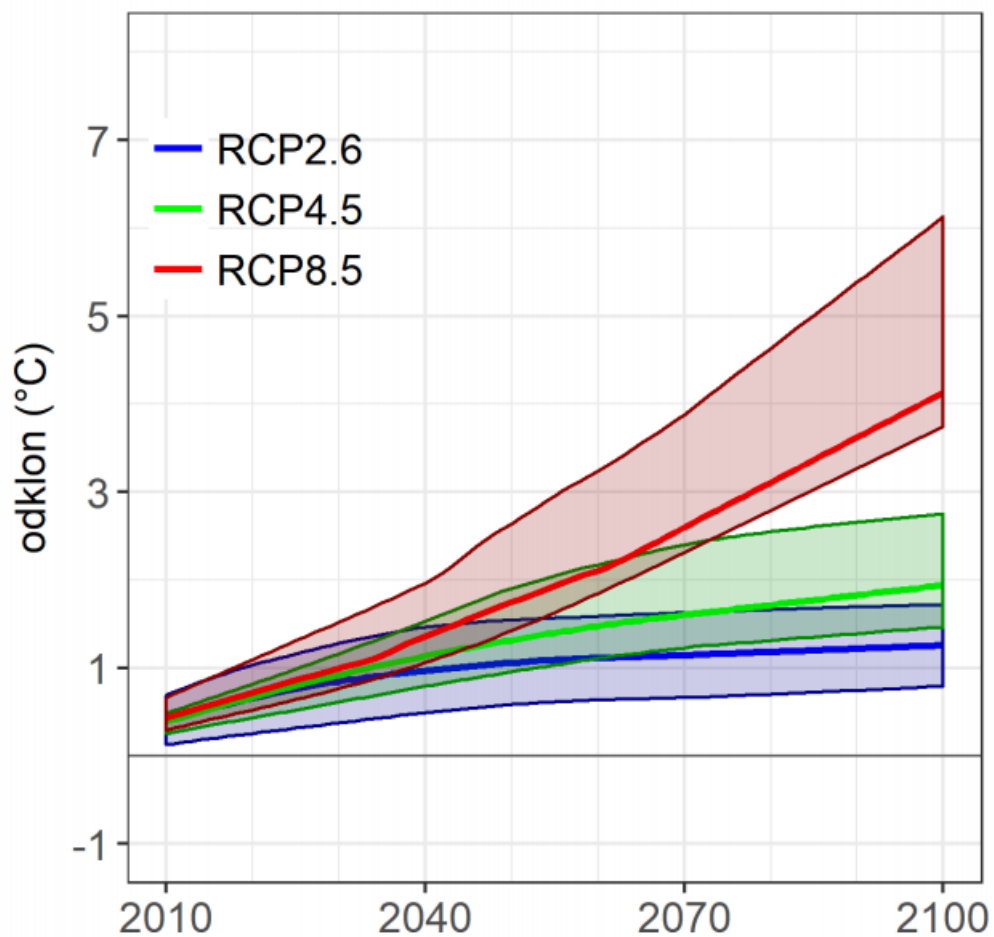
Slovenija – meritve



Slovenija – meritve



Slovenija – napovedi



Slika 5.11 | Sprememba povprečnega števila vročih dni na leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



CIPRA
ŽIVETI
V ALPAH



Univerza v Ljubljani
Filozofska fakulteta
Oddelek za geografijo

več na care4climate.si



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA INFRASTRUKTURO



EKO SKLAD
SLOVENSKI OKOLJSKI
JAVNI SKLAD

UMAN  TERA

Institut
"Jožef Stefan"
Ljubljana, Slovenija



GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE
SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE



IPOP Institut
za politike prostora
Institute
for Spatial Policies



ZUM
URBANIZEM, PLANIRANJE, PROJEKTIRANJE
d.o.o.


Univerza v Mariboru
Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo



ZAG ZAVOD ZA
GRADNENIŠTVO
SLOVENIJE

Dagency

Projekt LIFE IP CARE4CLIMATE (LIFE17 IPC/SI/000007) je sofinanciran s sredstvi Evropskega programa LIFE, sredstvi Sklada za podnebne spremembe in sredstvi partnerjev projekta.