

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Fizika podnebnih sprememb

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

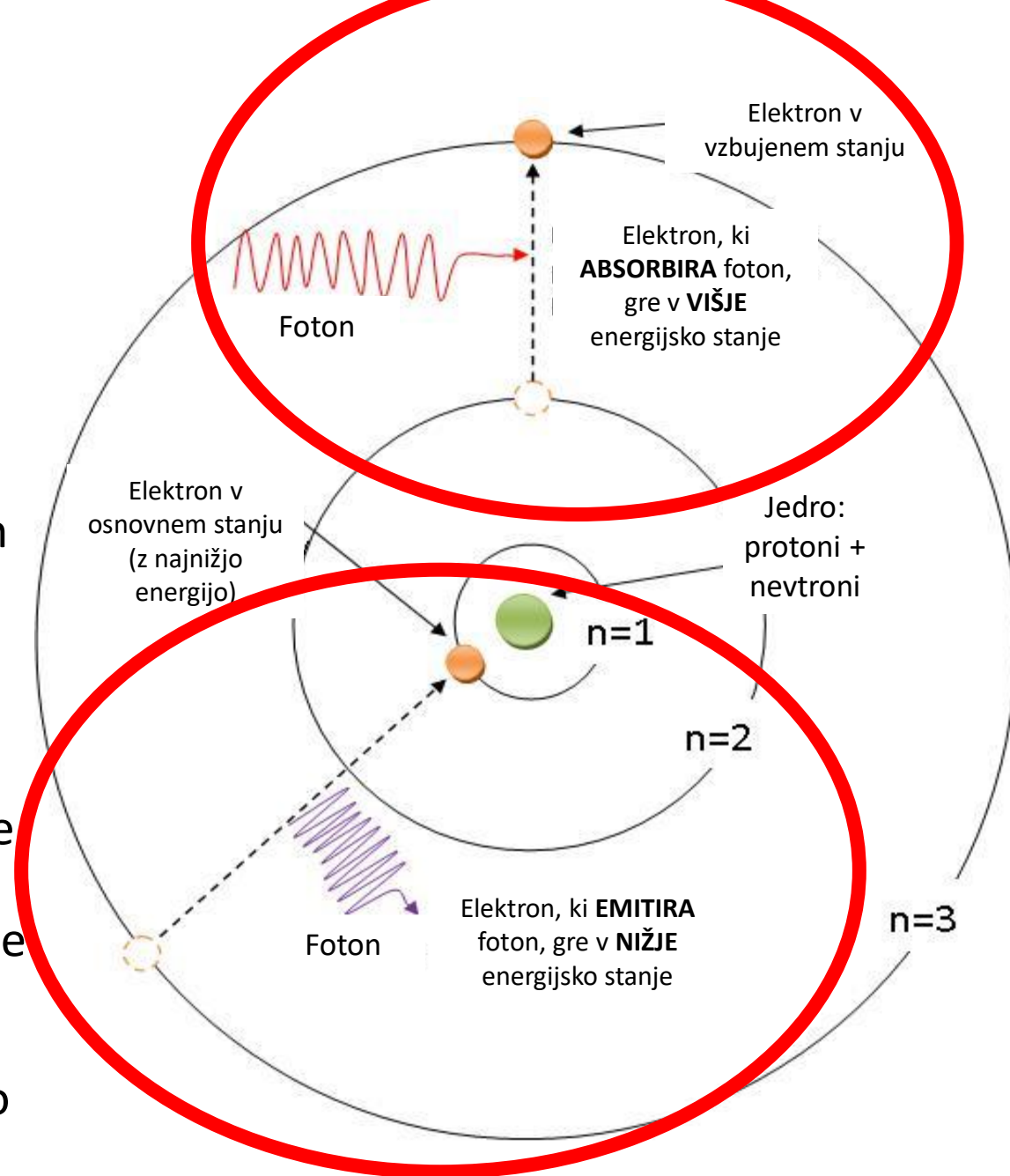
Žiga Zaplotnik,
Podoktorski raziskovalec
Fakulteta za matematiko in fiziko, UL

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**

Sevanje

- Vsa telesa sevajo – zakaj?
- Razlika v energiji, $\Delta\varepsilon$, med začetnim in končnim stanjem, je povezana z valovno dolžino (λ) emitiranega sevanja:
$$\Delta\varepsilon = \frac{h c}{\lambda}$$
- Ker so stanja atoma kvantna, diskretna, lahko le foton s točno določeno energijo (oz. valovno dolžino) vzbudi elektron v višje energijsko stanje
- Tudi molekulo se lahko vzbudi v višje energijsko stanje, le da so razlike energij med stanji nižje



Spekter sevanja

- Količina energije, ki jo lahko seva telo, najbolj zavisi od temperature telesa
- Max Planck je l. 1900 prvi pojasnil spekter sevanja **črnega telesa**(?)

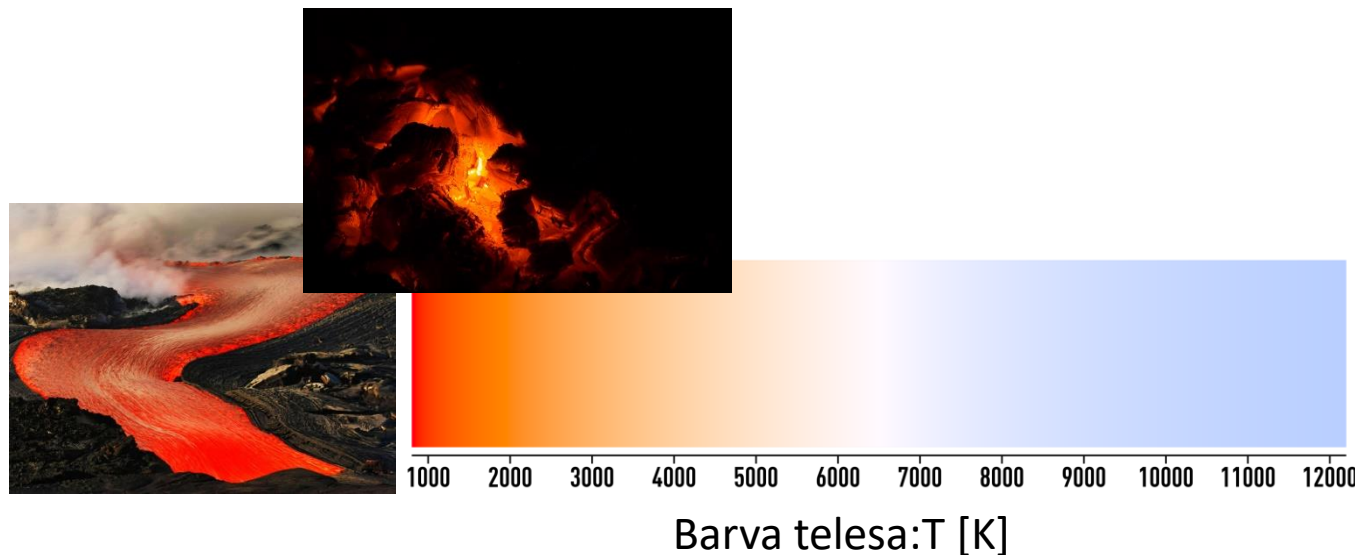
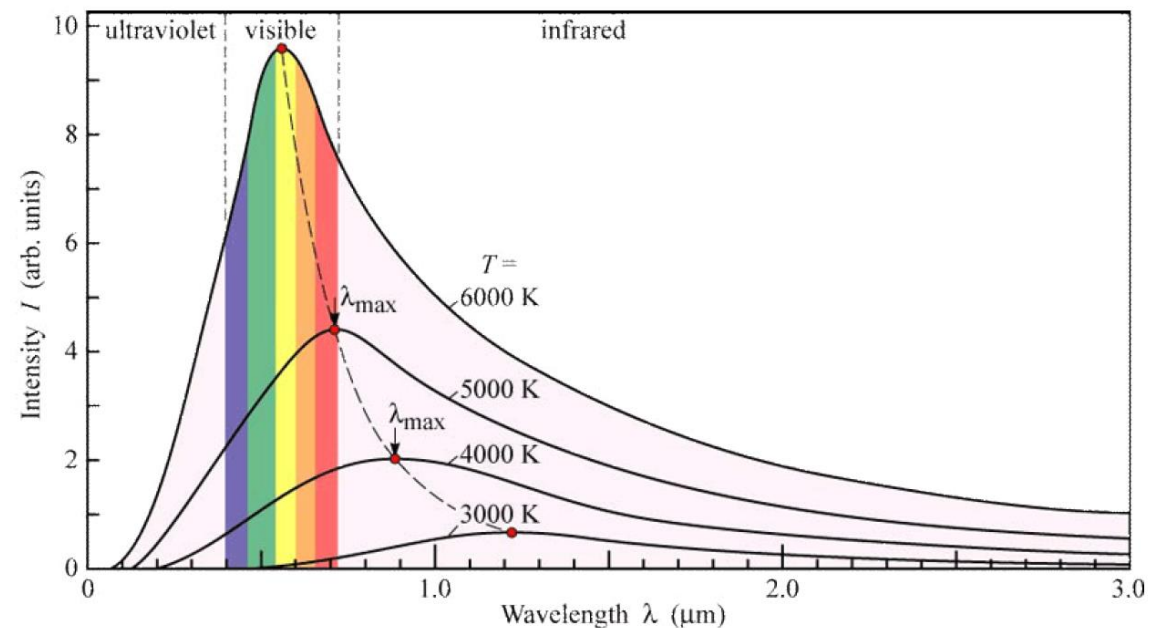
- Valovna dolžina, pri kateri telo izseva največ (Wienov zakon):

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

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

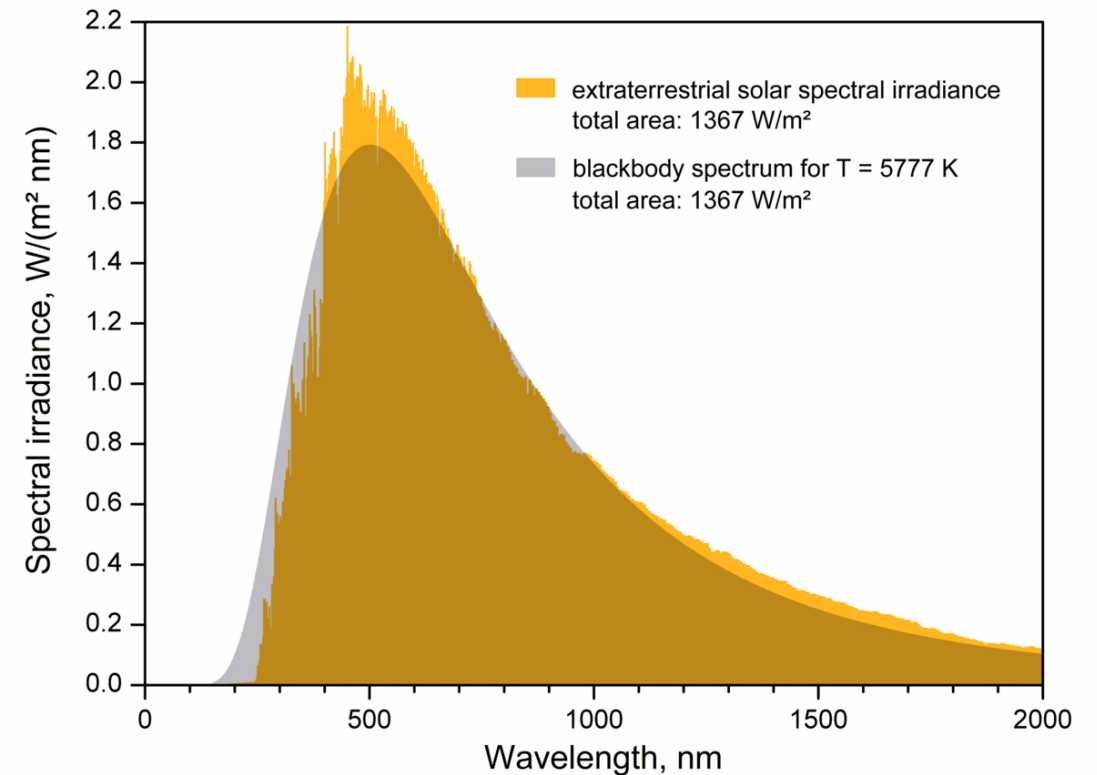
→ Stefan-Boltzmannov zakon

Spekter sevanja **črnega telesa** pri različnih temperaturah

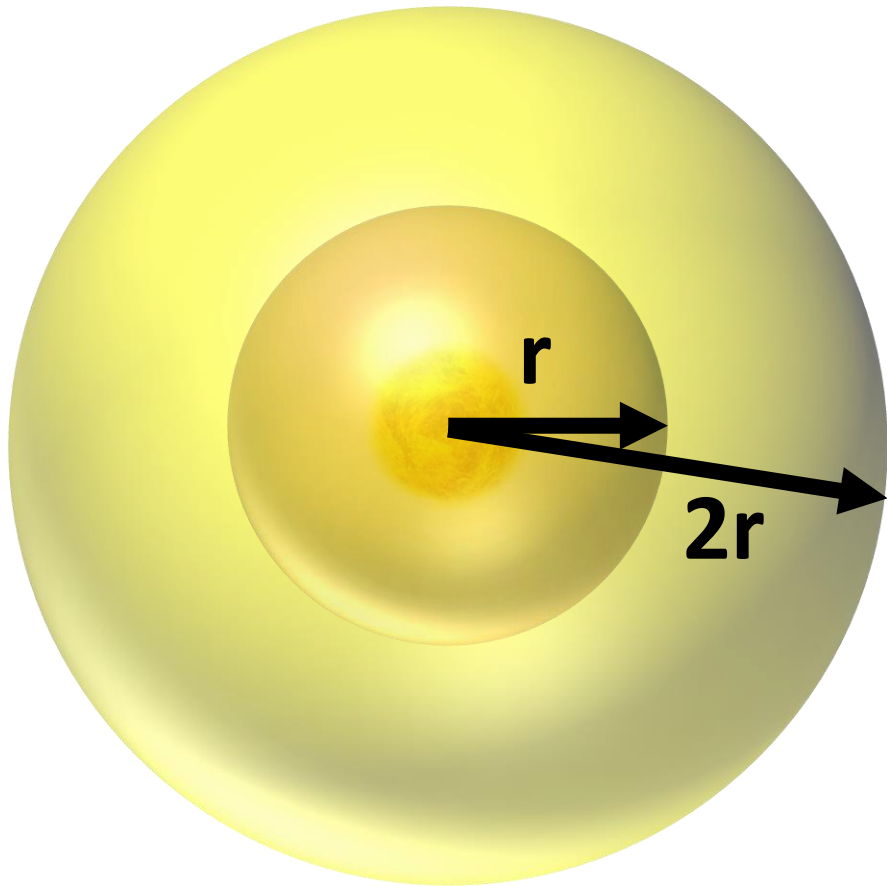


Spekter sončevega sevanja

- Približno enak sevanju črnega telesa pri $T = 5777 \text{ K}$
- Spekter zašumljen – posledica absorpcije fotonov v različnih elementih v sončevi atmosferi – Fraunhoferjeve linije



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 **$4\pi r^2$**

⇒ 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 **$4\pi(2r)^2 = 16\pi r^2$**

⇒ gostota energijskega toka:

$$j(2r) = P/S = P / (16\pi r^2) = j(r)/4$$

Zemlja v Osončju

- Povprečna temperatura površja Sonca je $T=5777$ K, njegov radij pa je $r = 695510$ km
- Zemlja je od Sonca v povprečju oddaljena $R=149.6$ milijonov km
- To je le povprečna vrednost energijskega toka v zenitu → **SOLARNA KONSTANTA**
- Gostota energijskega toka v času in prostoru precej variira

IZRAČUN

- Gostota energijskega toka na površju Sonca na razdalji r od središča je:

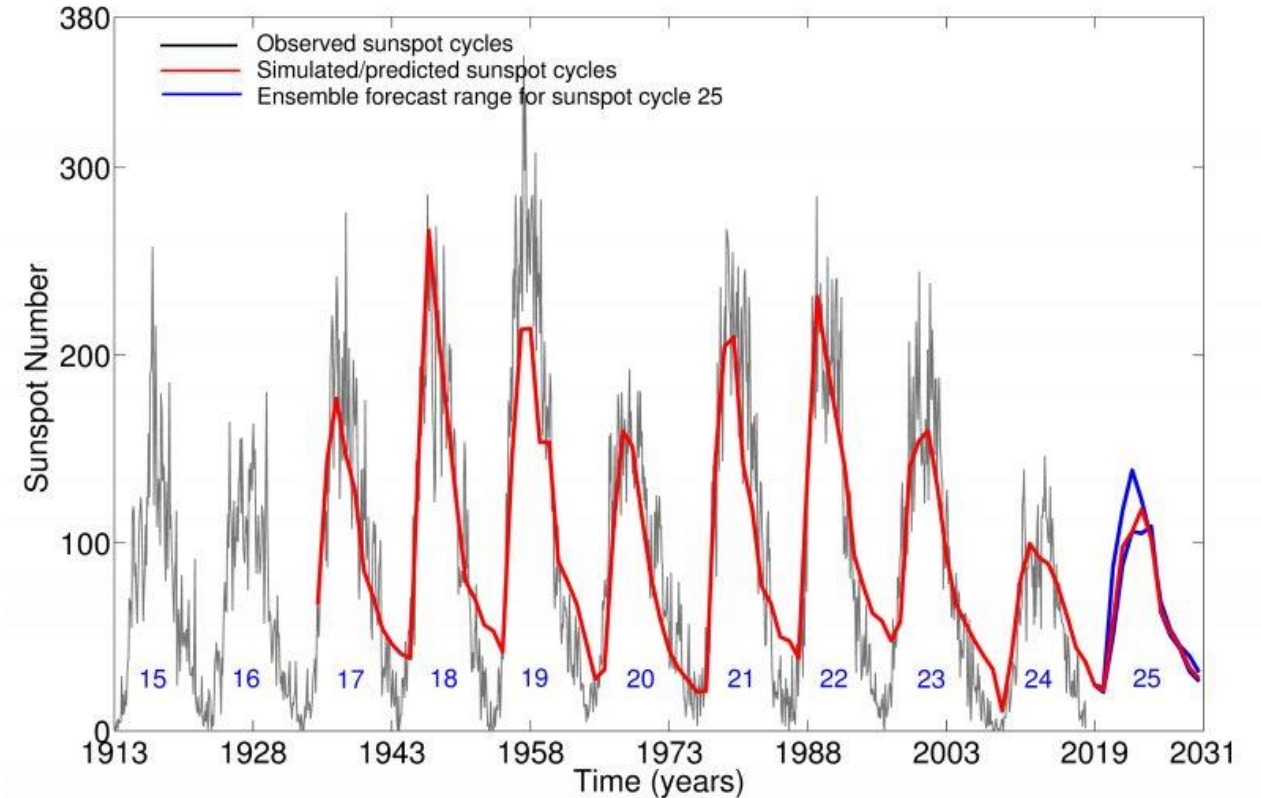
$$j(r) = \sigma T^4$$

- Gostota energijskega toka nad Zemljo (in njeno atmosfero) na razdalji R od središča je torej:

$$j(R) = j(r) \frac{r^2}{R^2} \approx 1360 \text{ W/m}^2$$

Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih in prostorskih variacij energijskega toka brez vplivov ozračja:
 - Dnevni hod sonca (perioda 1 dan)
 - Geografska širina
- Vzroki časovnih in prostorskih variacij solarne konstante
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)



Trenutno ni sončevih peg!

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

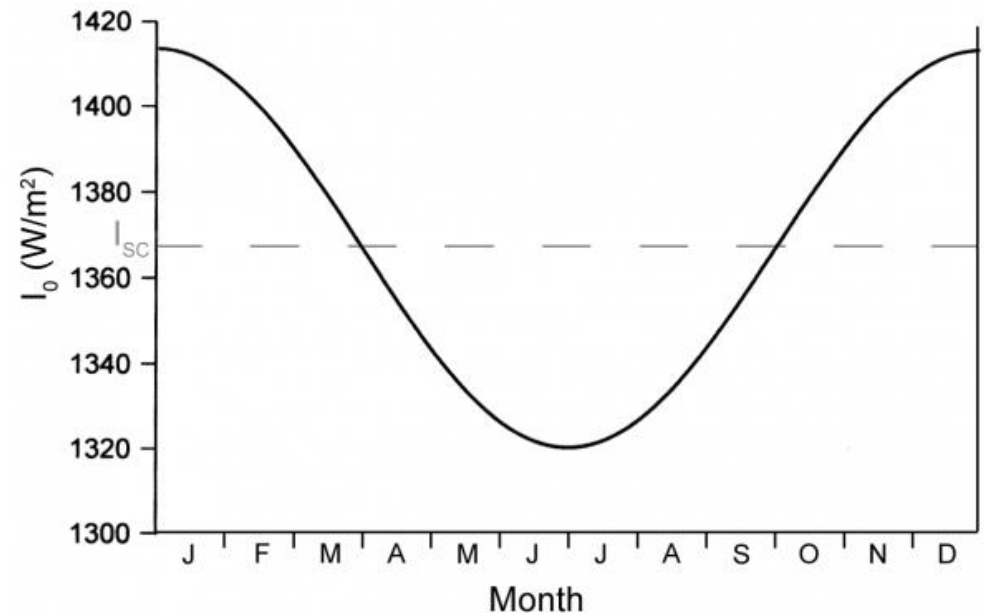
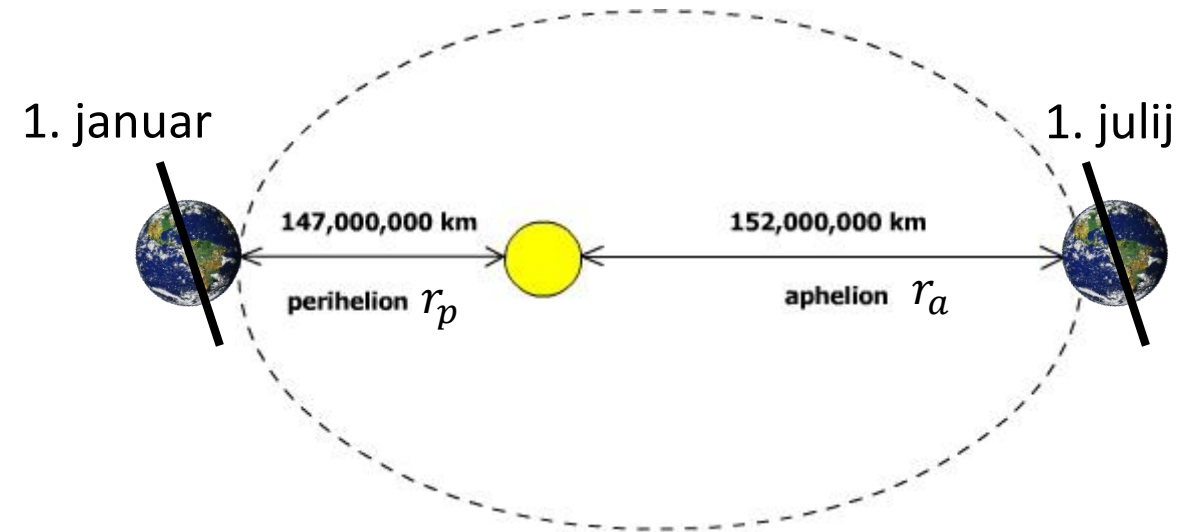
11-letno drseče povprečje pada že od 1990 dalje!

Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih in prostorskih variacij energijskega toka brez vplivov ozračja:
 - Dnevni hod sonca (perioda 1 dan)
 - Geografska širina
- Vzroki časovnih in prostorskih variacij solarne konstante
 - Sončeva aktivnost se spreminja (najkrajša kvaziperioda 11 let)
 - Eliptičnost tirnice (perioda 1 leto)

EKSCENTRIČNOST

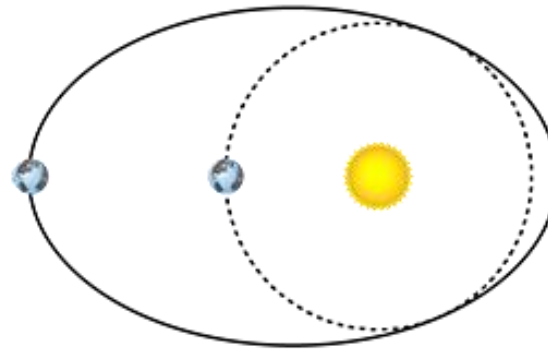
$$e = \frac{r_p - r_a}{r_p + r_a} = 0.0167$$



Zemlja v Osončju

- Vzroki časovnih in prostorskih variacij solarne konstante
 - 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**

Ekscentričnost



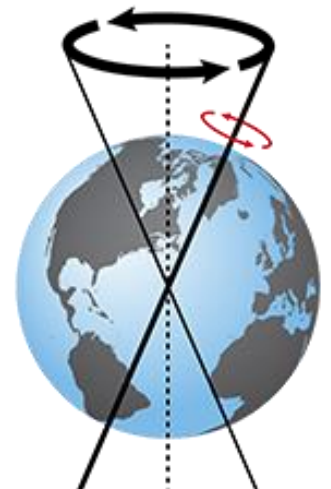
Perioda 100000 let

Nagib osi



Perioda 41000 let

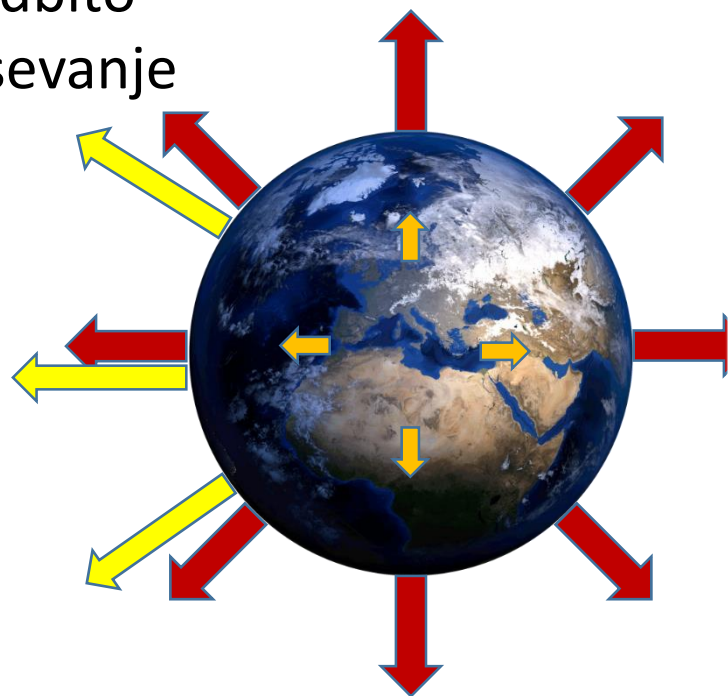
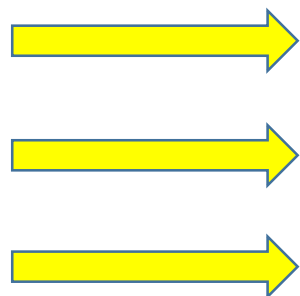
Precesija



Perioda 23000 let

Energijska bilanca Zemlje brez ozračja

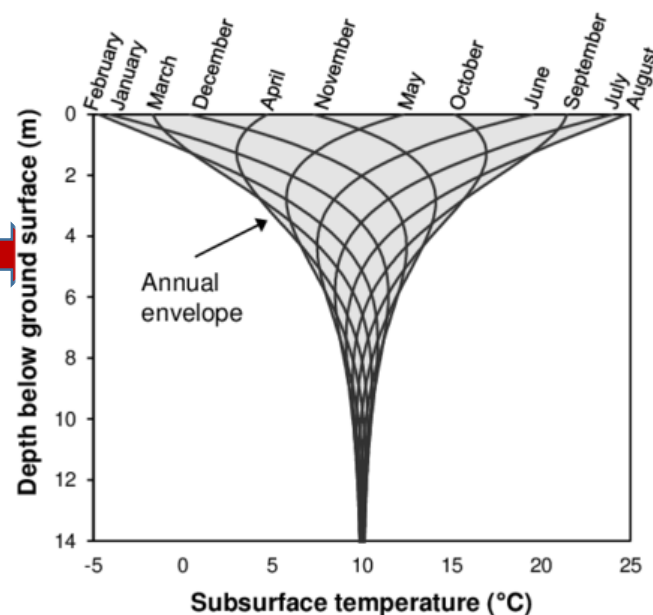
Od tal odbito
sončevo sevanje



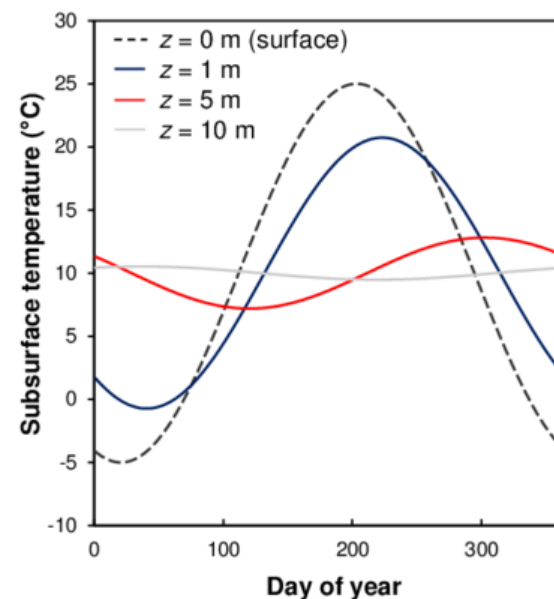
Povprečen
energijski tok
sončevega sevanja:
 $j_0 = 1366 \text{ W/m}^2$

**Izsevana
toplota**

(a) Seasonal temperature depth profiles for each month



(b) Seasonal temperature time series at different depths



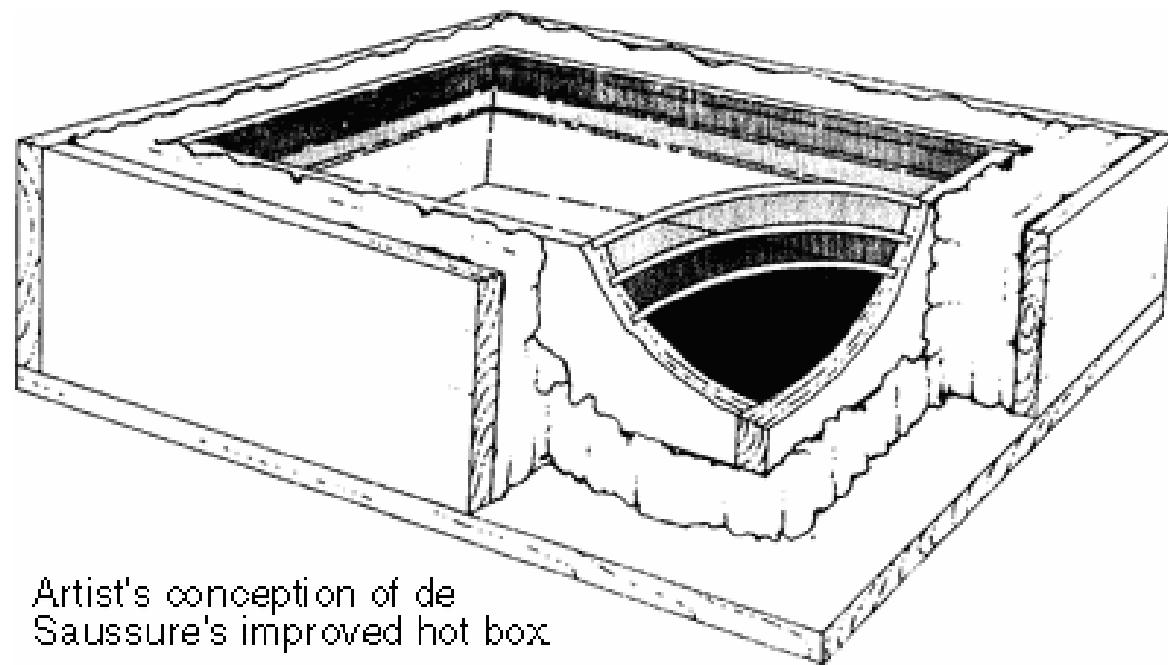
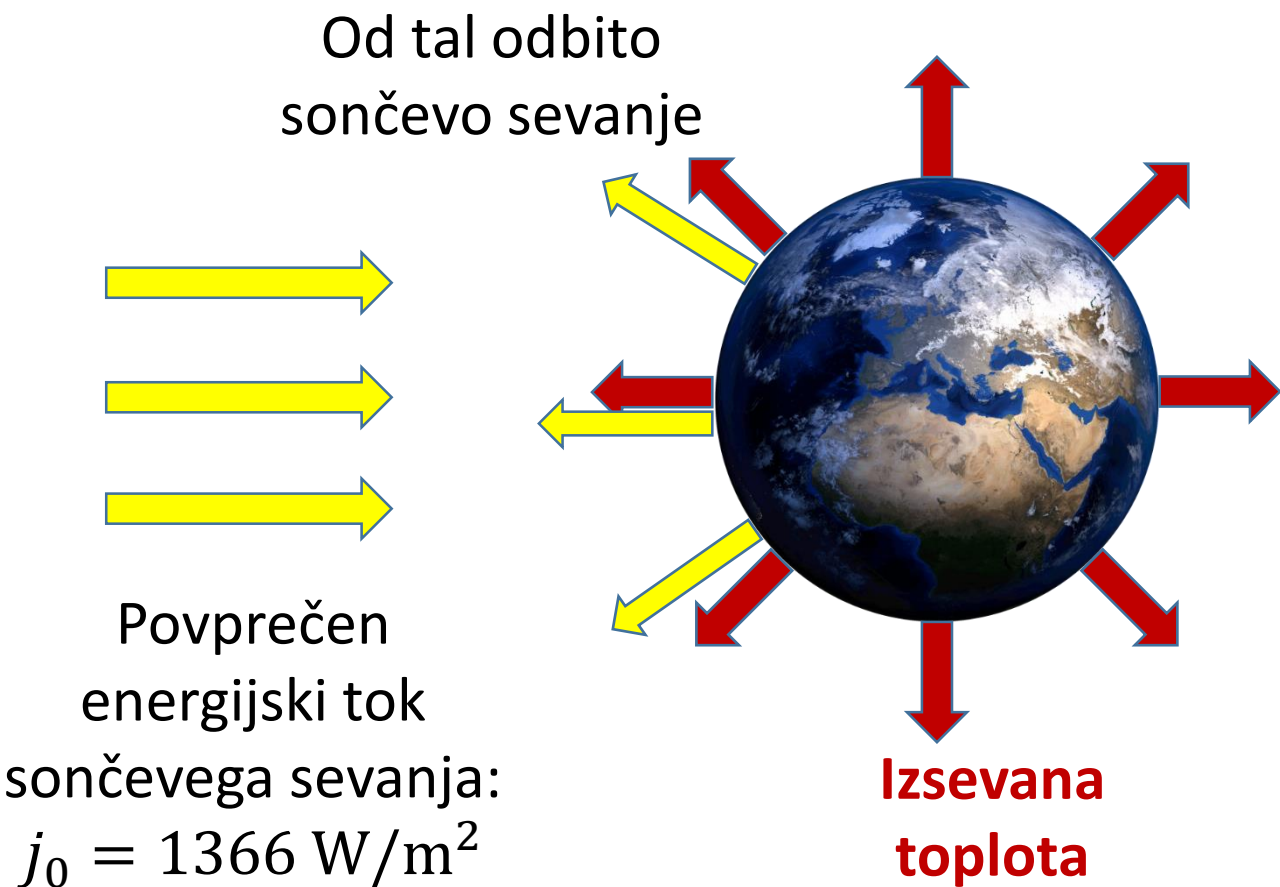
Tok iz Zemljine notranjosti navzven: 0.087 W/m^2

Kozmično sevanje: 0.003 W/m^2

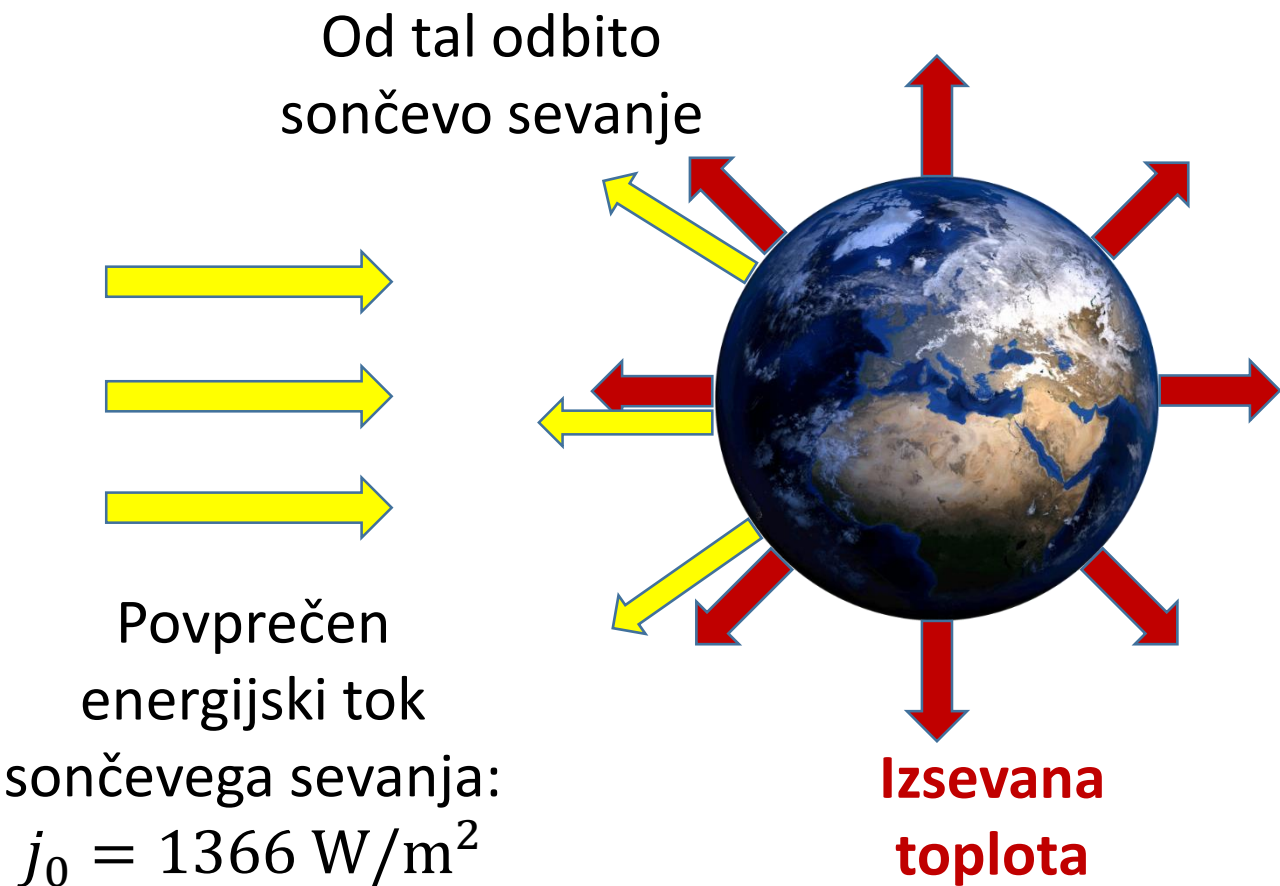
Polna Luna: dva vpliva (odboj sončeve svetlobe + izsev):
 $0.003 \text{ W/m}^2 + 0.024 \text{ W/m}^2$

Prazna Luna: 0.00011 W/m^2

Energijska bilanca Zemlje brez ozračja



Energijska bilanca Zemlje brez ozračja



IZRAČUN

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

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

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

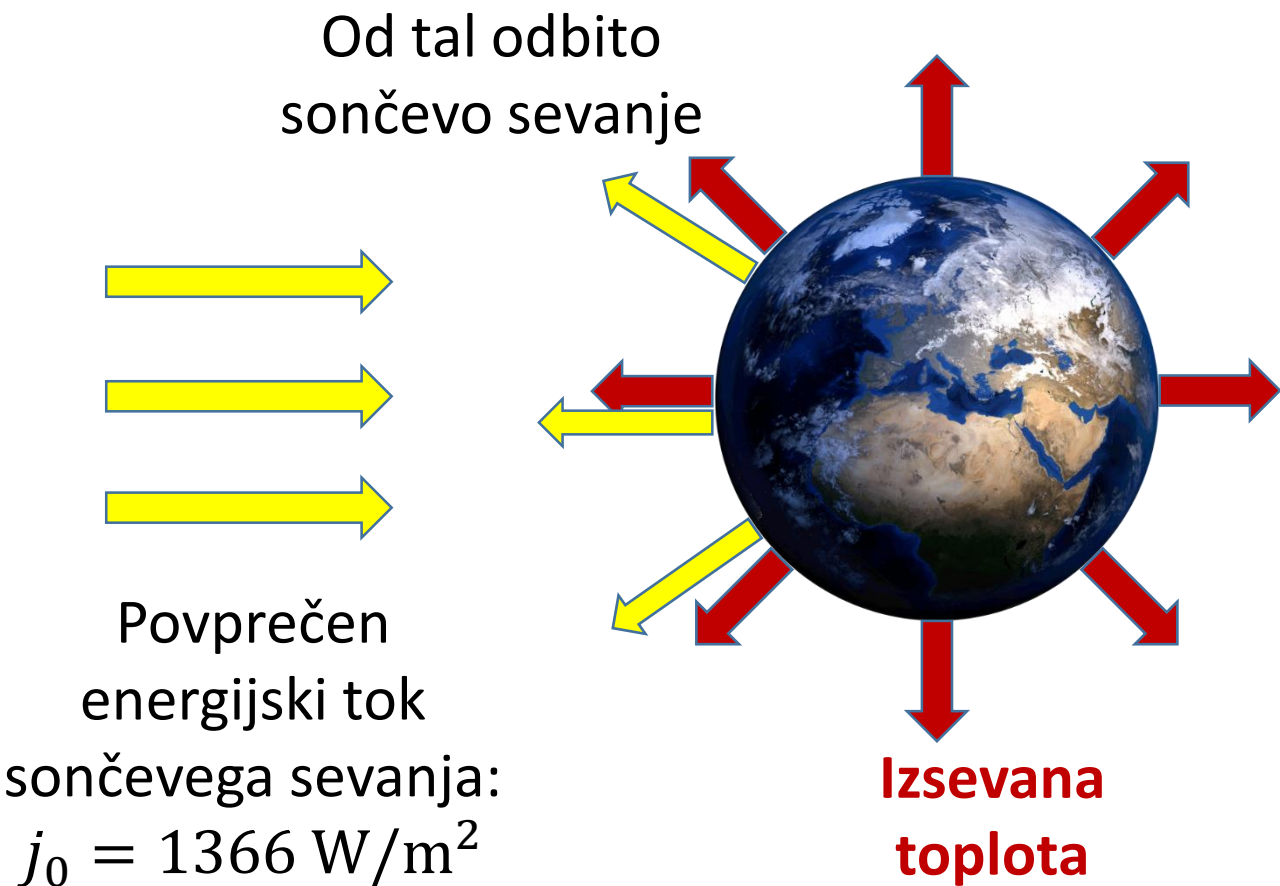
$$j_0(1 - a)\pi r_E^2 = \varepsilon \sigma T^4 4\pi r_E^2$$

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

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



IZRAČUN

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

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

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

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

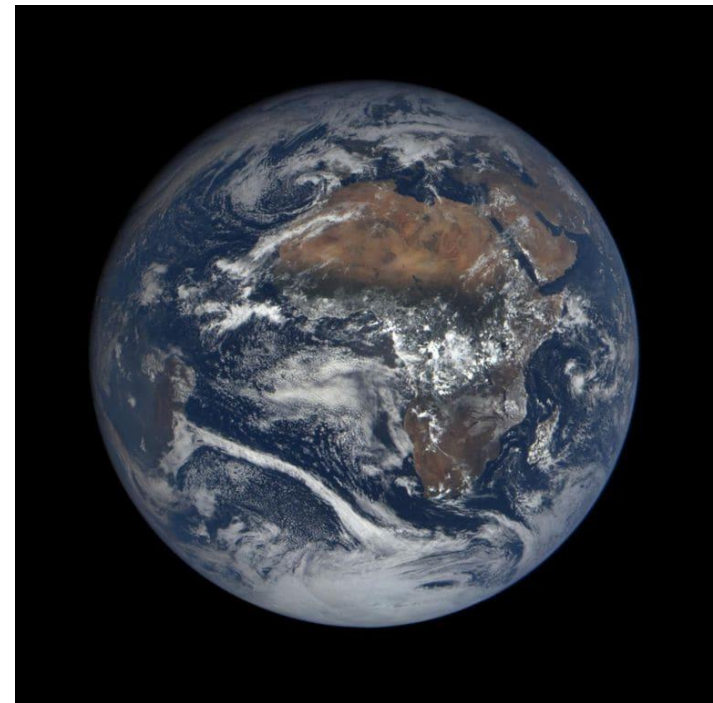
$$T = \sqrt[4]{j_0(1 - a)/(4\varepsilon\sigma)}$$

Če upoštevamo povprečni albedo vidnega površja $a = 0.68$ in dejstvo, da Zemljino površje seva skoraj kot črno telo, $\varepsilon = 0.98$, dobimo ravnovesno temperaturo

$$T = 211 \text{ K } (-62 \text{ }^\circ\text{C})$$

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)



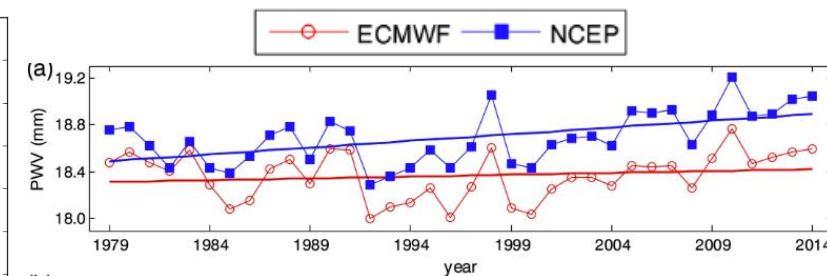
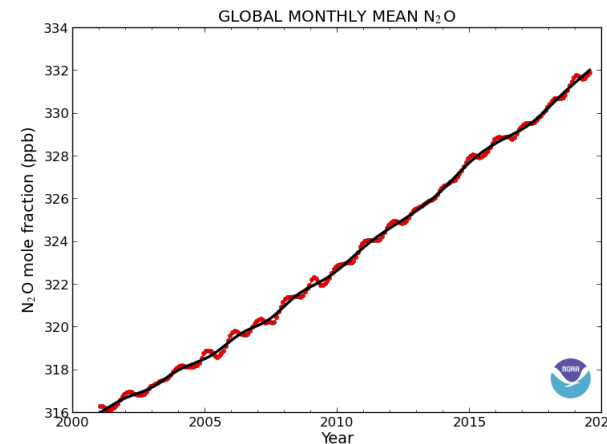
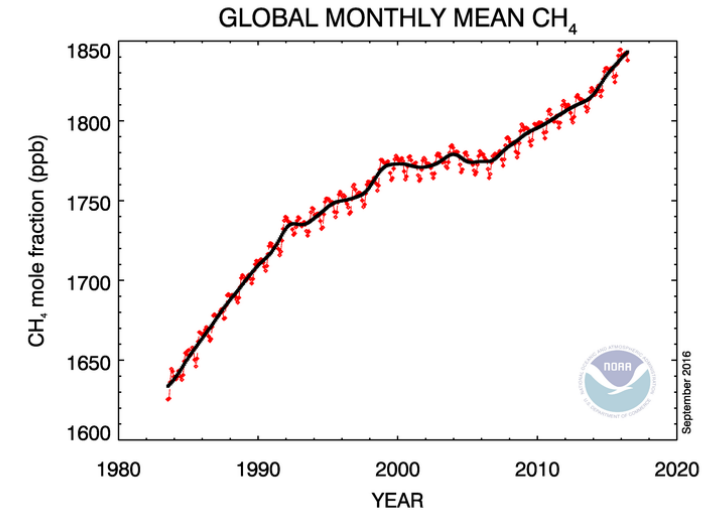
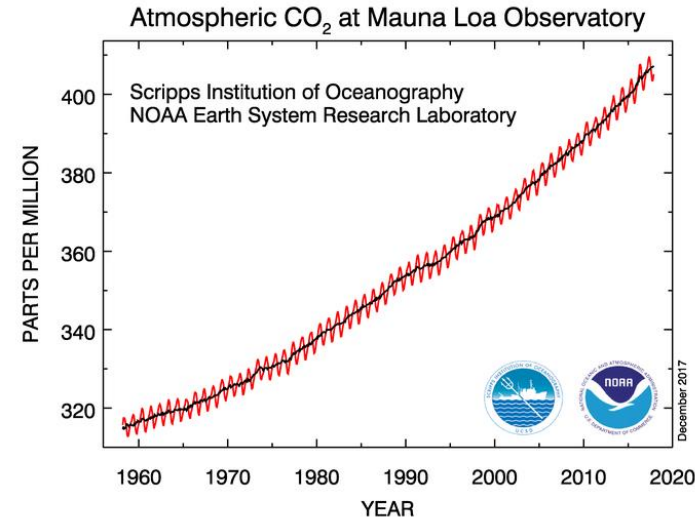
DEBELINA: 0.1 mm



PREMER: 230 mm

Toplogredni plini (GHG)

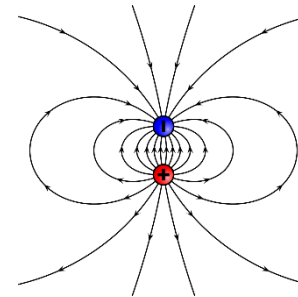
- DEFINICIJA: tisti plini, ki absorbirajo in emitirajo sevalno toploto (IR del spektra sevanja)
- Tyndall, 1859: O₂ in N₂ prozorna za IR sevanje, H₂O in CO₂ ne
- Vodna para (H₂O), ogljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), didušikov oksid (smejalni plin, N₂O), ozon (O₃)
- Poleg nekaterih ključnih kemijskih značilnosti jim je skupno to, da njihove koncentracije v ozračju naraščajo



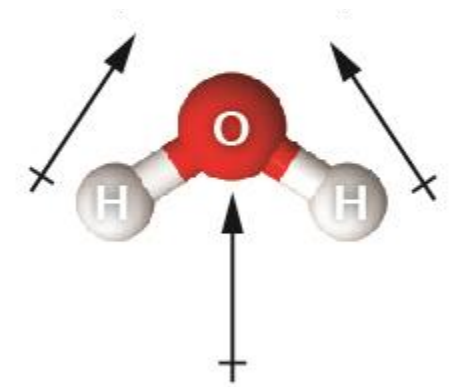
VODNI STOLPEC (globalni trend)
Chen & Liu, JGR, 2016

Toplogredni plini (GHG)

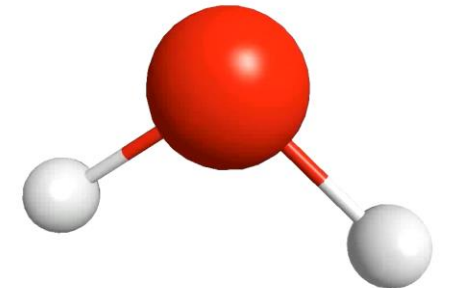
- Zakaj nekatere molekule lahko interagirajo z IR sevanjem, druge pa ne?
- Geometrija →
 - → Sevanje lahko absorbirajo zgolj tiste molekule, ki imajo **DIPOLNI MOMENT**. Zakaj?
- Sevanje = elektromagnetno valovanje. Pri tem niha smer električnega polja \perp smer razširjanja. Ta povzroča torej silo, ki se ji spreminja smer in ki pospešuje različne atome v različnih smereh (glede na naboj)
- Posledično molekula **vibrira** in **absorbira** sevanje



Dipolni moment vezi

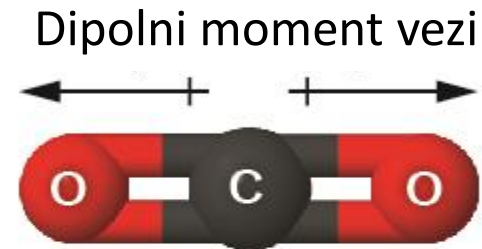


Skupni dipolni moment $\neq 0$

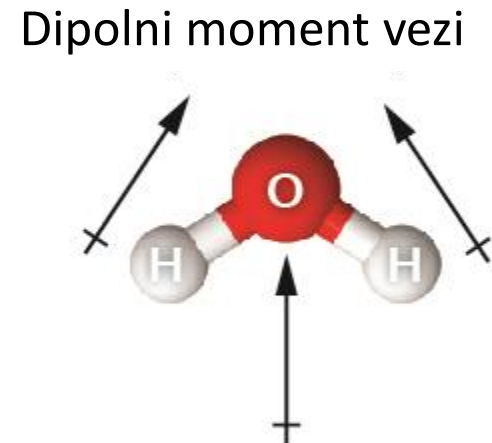
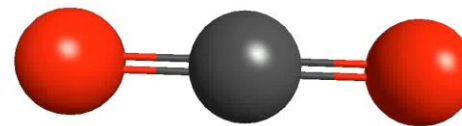


Toplogredni plini (GHG)

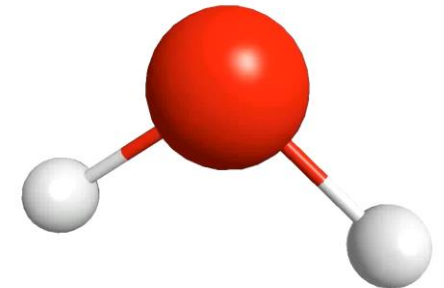
- V osnovnem stanju pa je dipolni moment molekule CO_2 ničen, molekula je linearna
- Vendar pa **molekula** CO_2 tudi v osnovnem stanju lahko preprosto vibrira (npr. ob trku z drugo molekulo), pri čemer postane skupni dipolni moment različen od 0
- Takrat lahko EMV (IR sevanje) molekulo vzbudi v višje energijsko stanje in molekula zavibrira (sprejme foton)
- Homonuklearne dvoatomne molekule, npr. O_2 in N_2 , so simetrične in imajo tudi ob vibriranju ničeln dipol in so tako povsem prepustne za IR sevanje



Skupni dipolni moment = 0

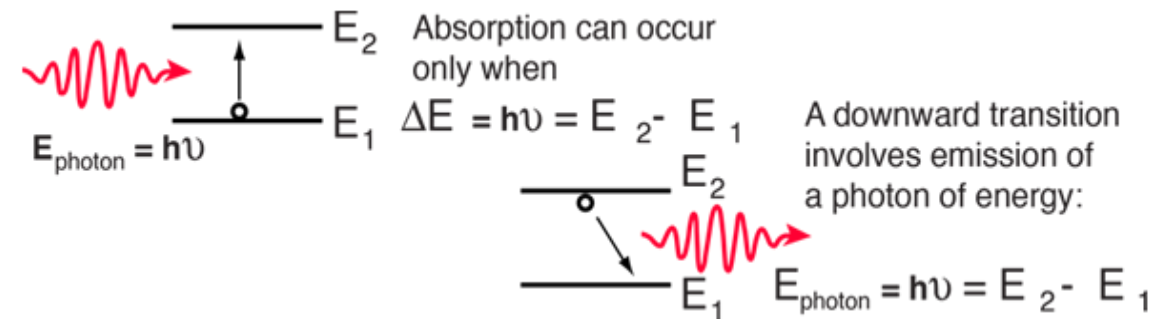
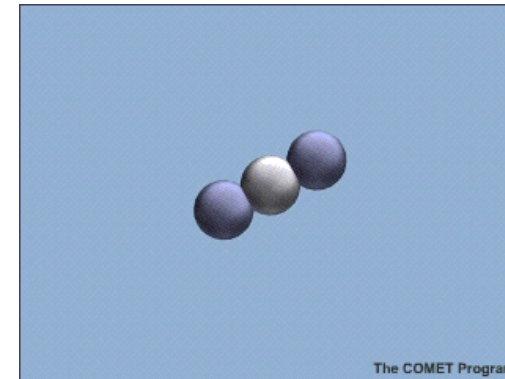


Skupni dipolni moment $\neq 0$



Interakcija molekul GHG s sevanjem

1. Foton infrardeče svetlobe, ki ga izseva Zemlja, zadane molekulo CO_2
2. Če je energija fotona ravno pravšnja, enaka razliki med osnovnim energijskim stanjem in vzbujenim stanjem molekule, bo ta absorbirala energijo fotona
3. Od tod naprej so 3 možnosti:
 - a) Vzbujena molekula CO_2 se najbolj verjetno zaleti v katerokoli drugo molekulo v ozračju in ji prenese dodatno energijo kot toploto (kinetično energijo)
 - b) CO_2 molekula emitira **navzgor** foton z enako energijo, kot jo je absorbirala, in se vrne v osnovno stanje
 - c) CO_2 molekula emitira **navzdol** foton z enako energijo, kot jo je absorbirala



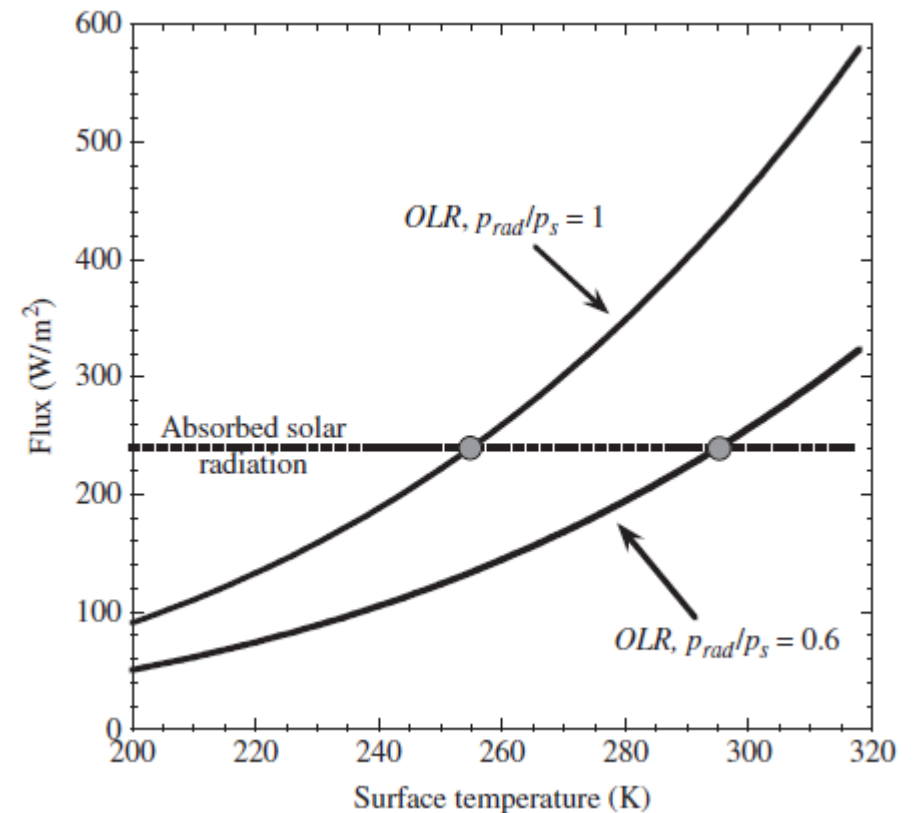
Večja kot je volumska koncentracija molekul toplogrednih plinov, več fotonov je izsevanih navzdol.
→ Večji je neto tok sevanja navzdol proti tlam.

Vpliv GHG na temperaturo

- Zemlja v povprečju prejme energijski tok:

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

- Ne glede na to, da ima Zemlja ozračje, mora ravno toliko energije, kot jo prejme, tudi oddati



Vpliv GHG na temperaturo

- Zemlja v povprečju prejme energijski tok:

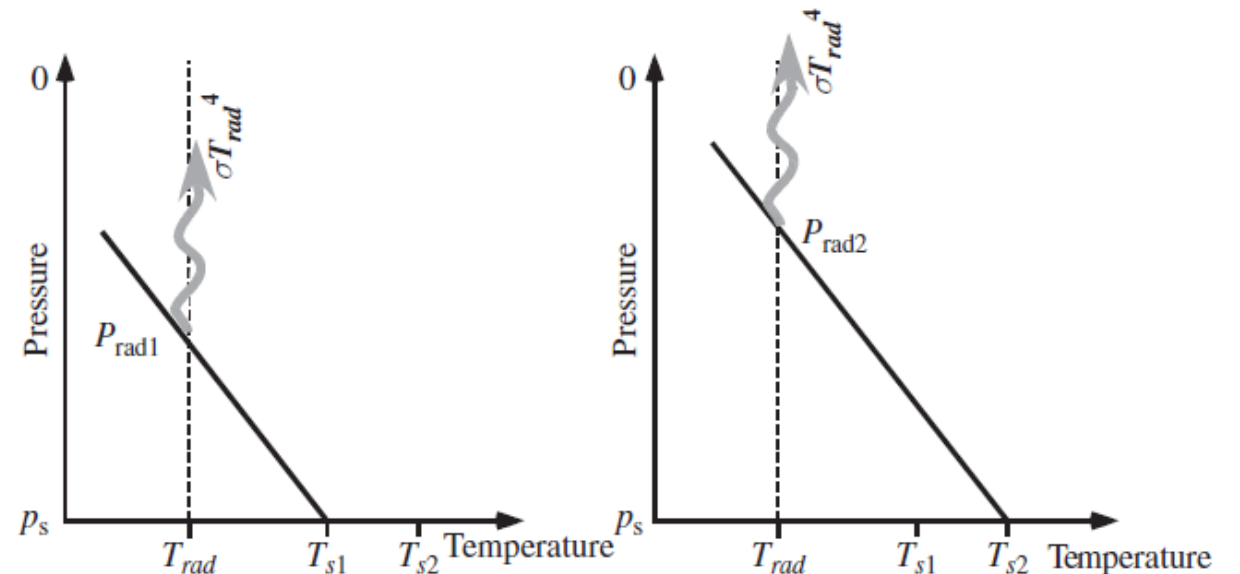
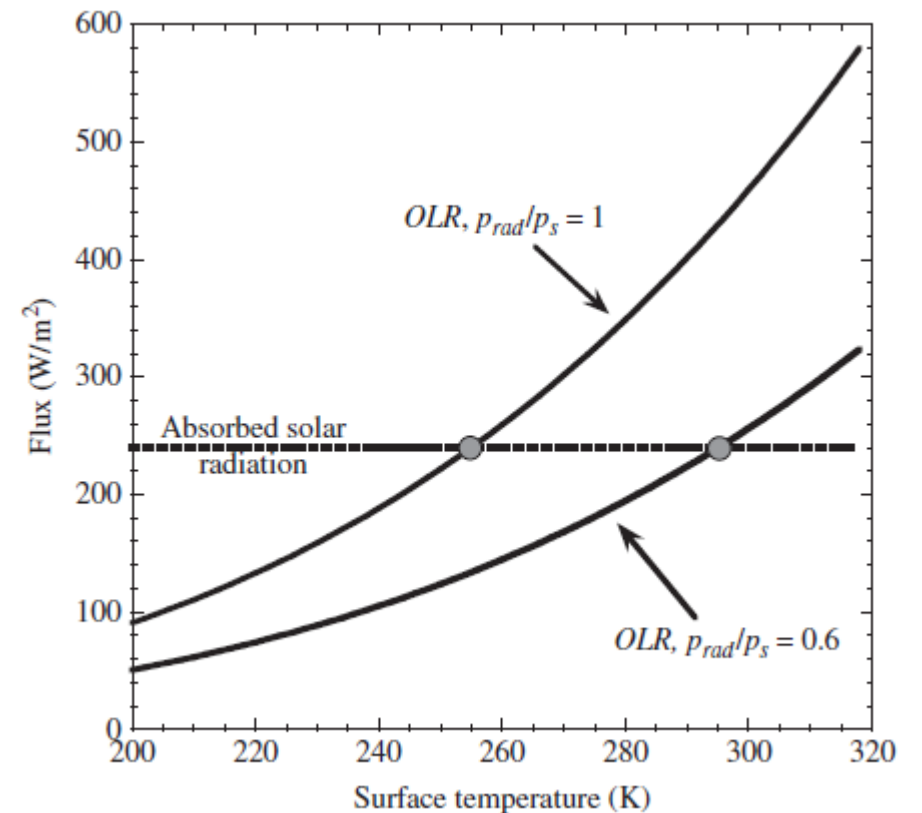
$$(1 - a) \frac{j_0}{4} = 238 \text{ W/m}^2$$

- Ne glede na to, da ima Zemlja ozračje, mora ravno toliko energije, kot jo prejme, tudi oddati

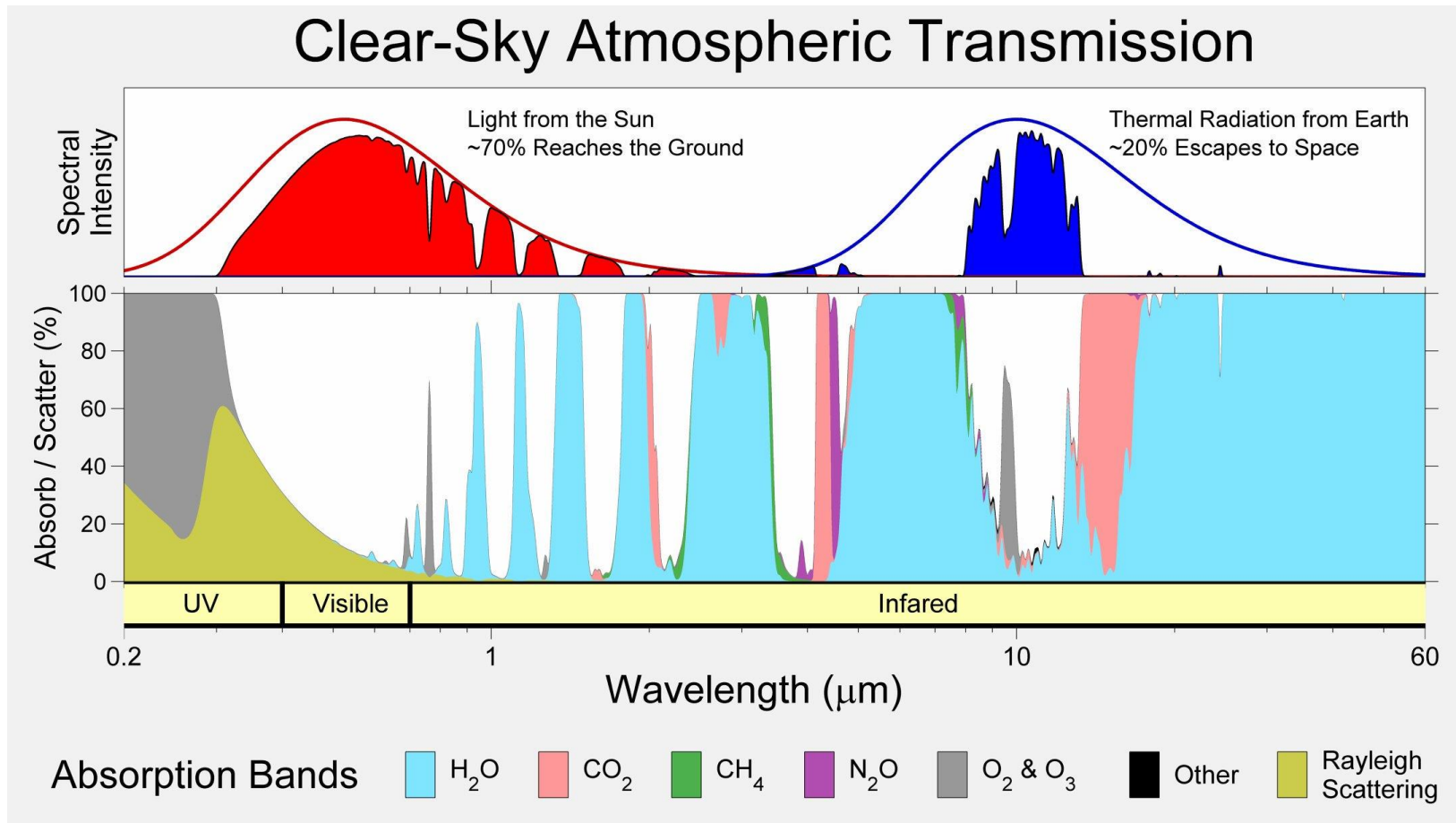
- Torej mora efektivna sevalna temperatura T_{rad} ostati enaka:

→ zmanjša se efektivni pritisk izseva p_{rad}

→ poveča se temperatura pri tleh T_s



Zemlja izseva nazaj v vesolje

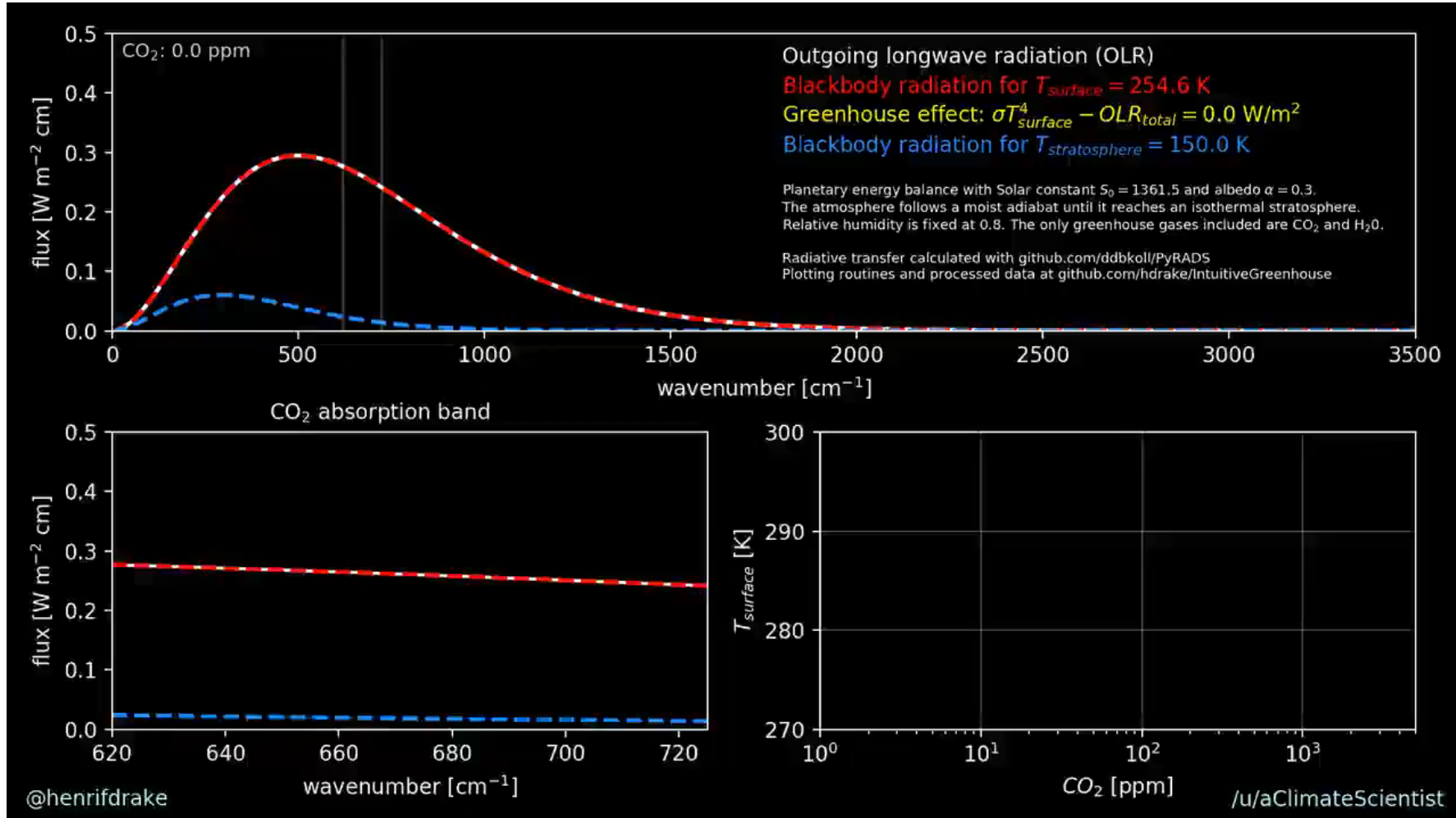


- Ozon nas ščiti pred UV sevanjem, hkrati pa je pomemben toplogredni plin pri $10 \mu\text{m}$
- **Vodna para zmanjšuje direktno sončno IR sevanje, je hkrati najmočnejši absorber Zemljinega IR sevanja (2-3x močnejši kot CO_2)**
→ najmočnejša povratna zanka
- **CO_2 najbolj absorbira v delu spektra Zemljinega sevanja, kjer je izsev velik**
- **N_2O in CH_4 pomembna pri $8 \mu\text{m}$ na območjih, kjer je koncentracija vodne pare nizka.**

Zemljin izsev

Dostopno na: <https://nextcloud.fmf.uni-lj.si/s/w3KQMrZwnCrqXjJ>

Vir: Henry Drake



Pedagoški zgled toplogrednega efekta



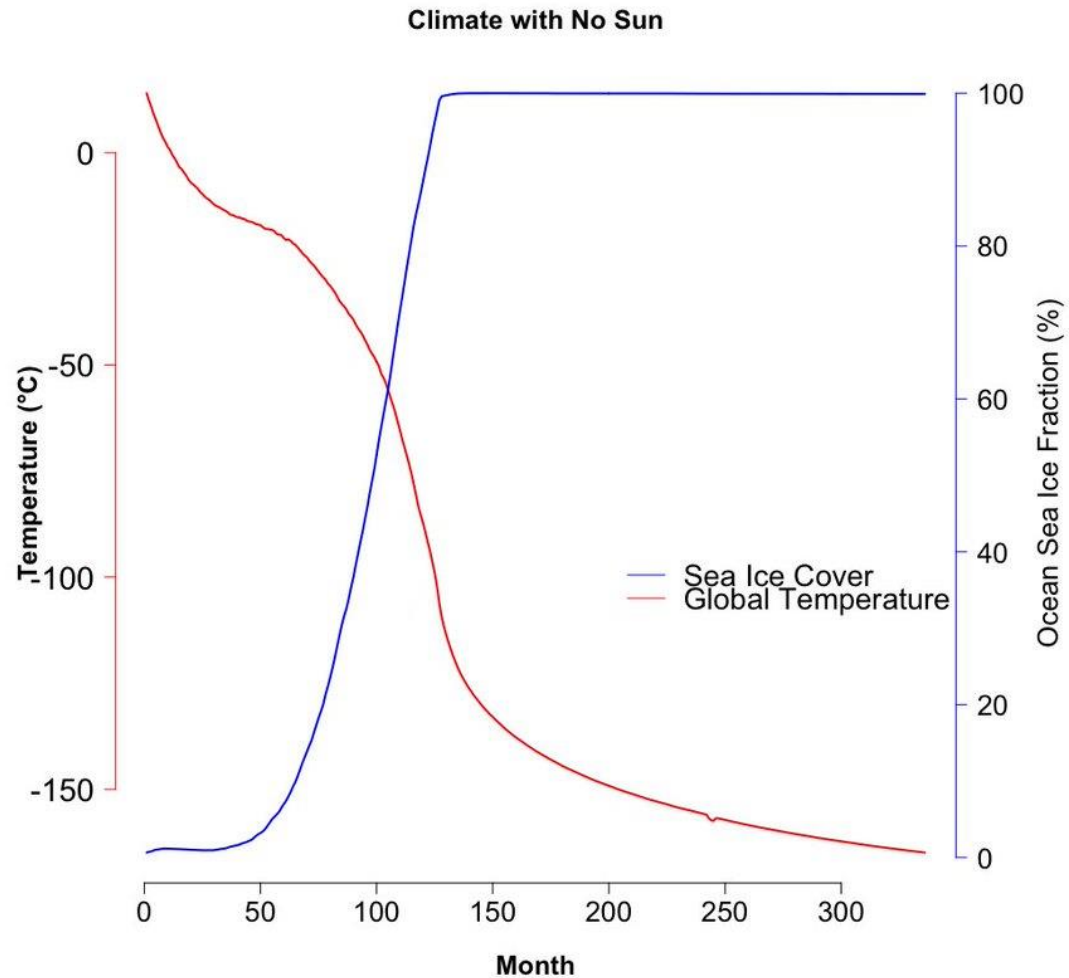
Vir:

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

Ostale fizikalne simulacije:

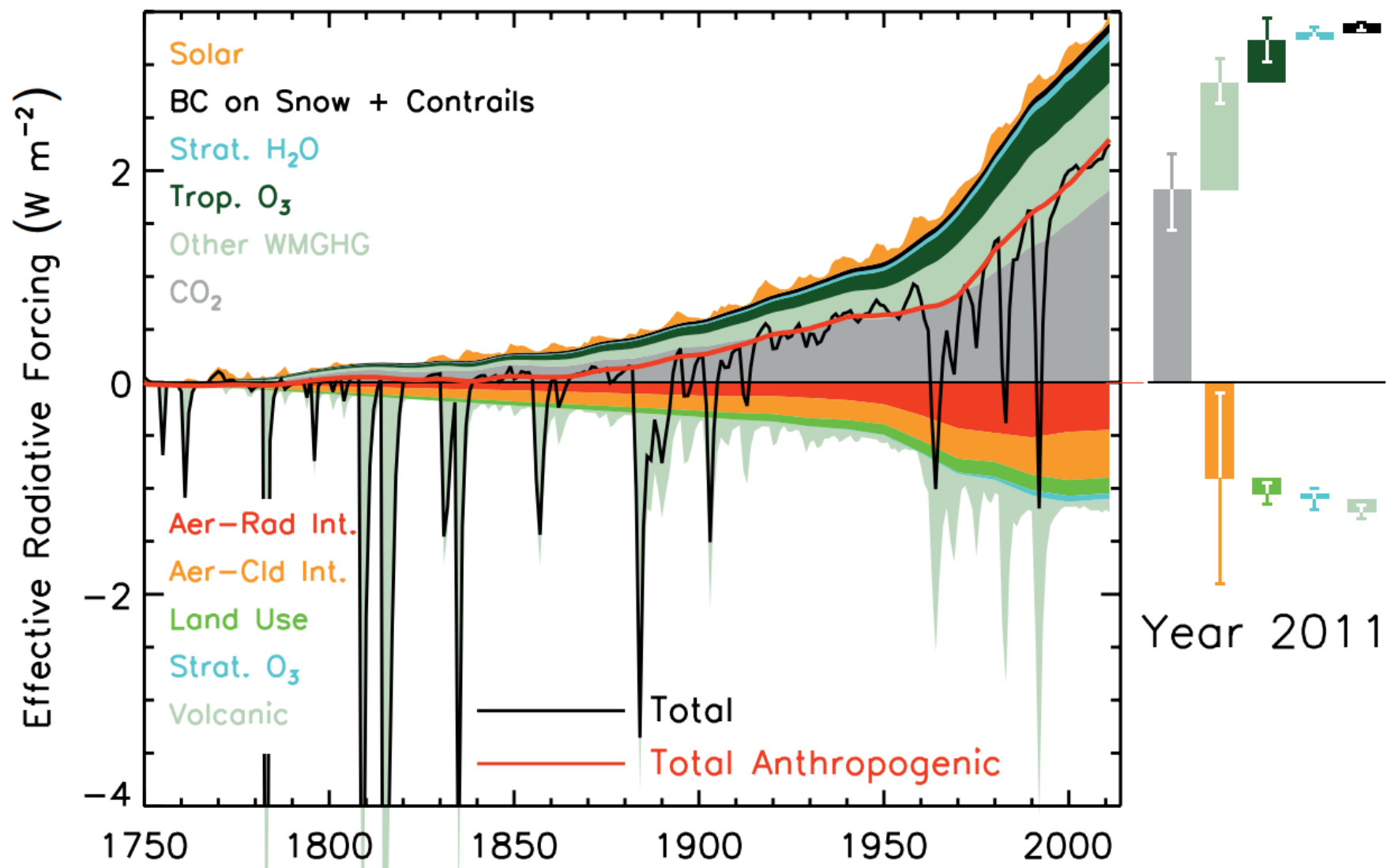
<https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics>

Kaj bi se zgodilo, če Sonce naenkrat ugasne?



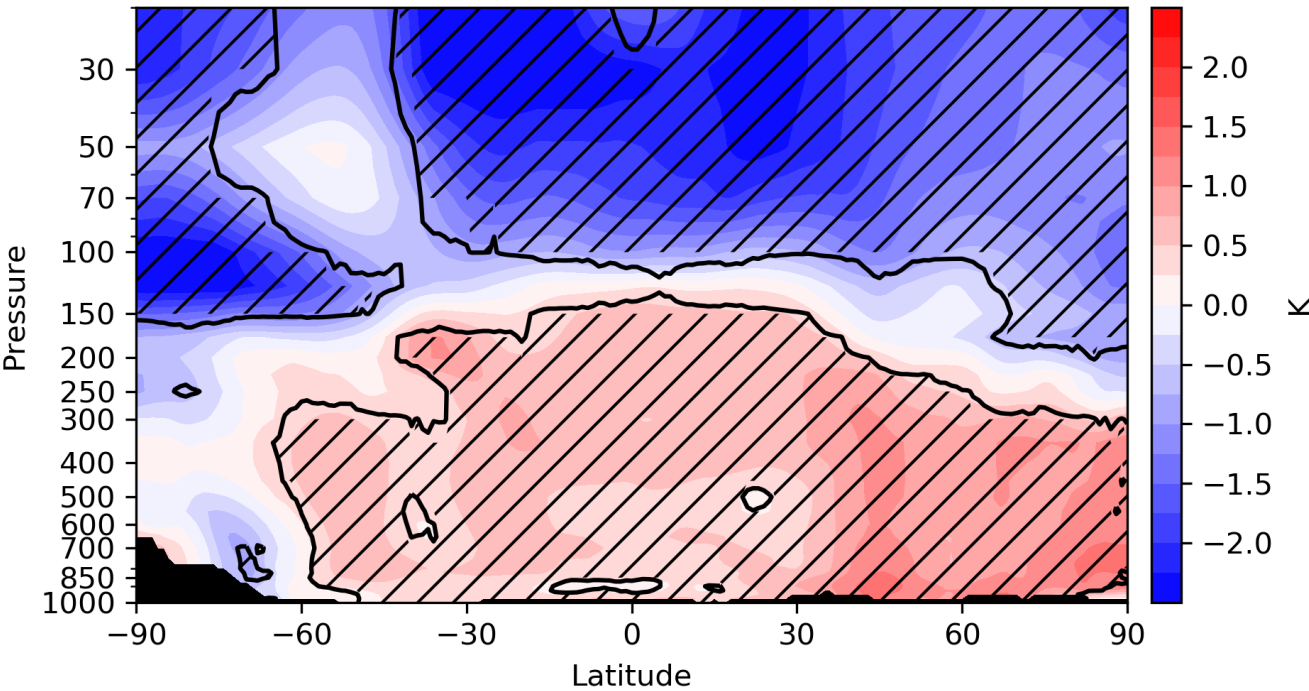
Eksperiment z modelom splošne cirkulacije (NASA GISS)

Efektivno sevanje zaradi človeškega delovanja



Zakaj se je ohladila stratosfera?

Razlika v povprečni temperaturi v obdobju junij-avgust med letom 1980 in 2018



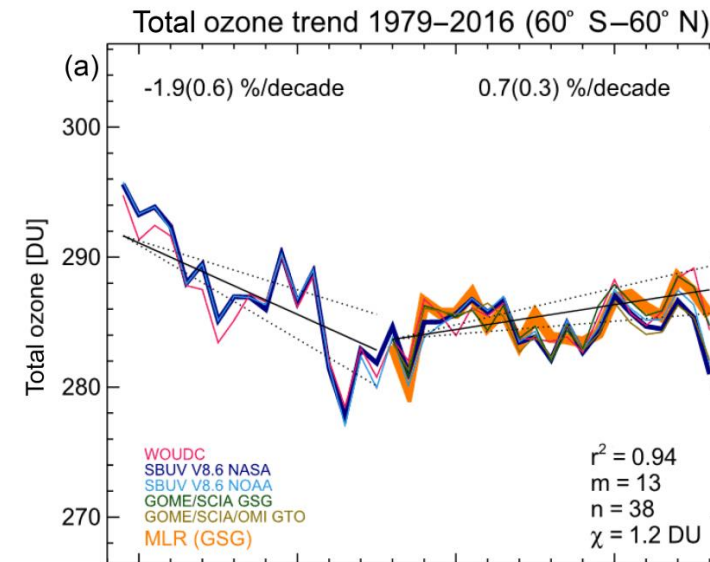
(Najmanj) dva razloga:

1) V spodnji troposferi manjša koncentracija stratosferskega ozona O_3 zaradi CFCjev:



Efektivno: $UV \rightarrow \text{toplota}$

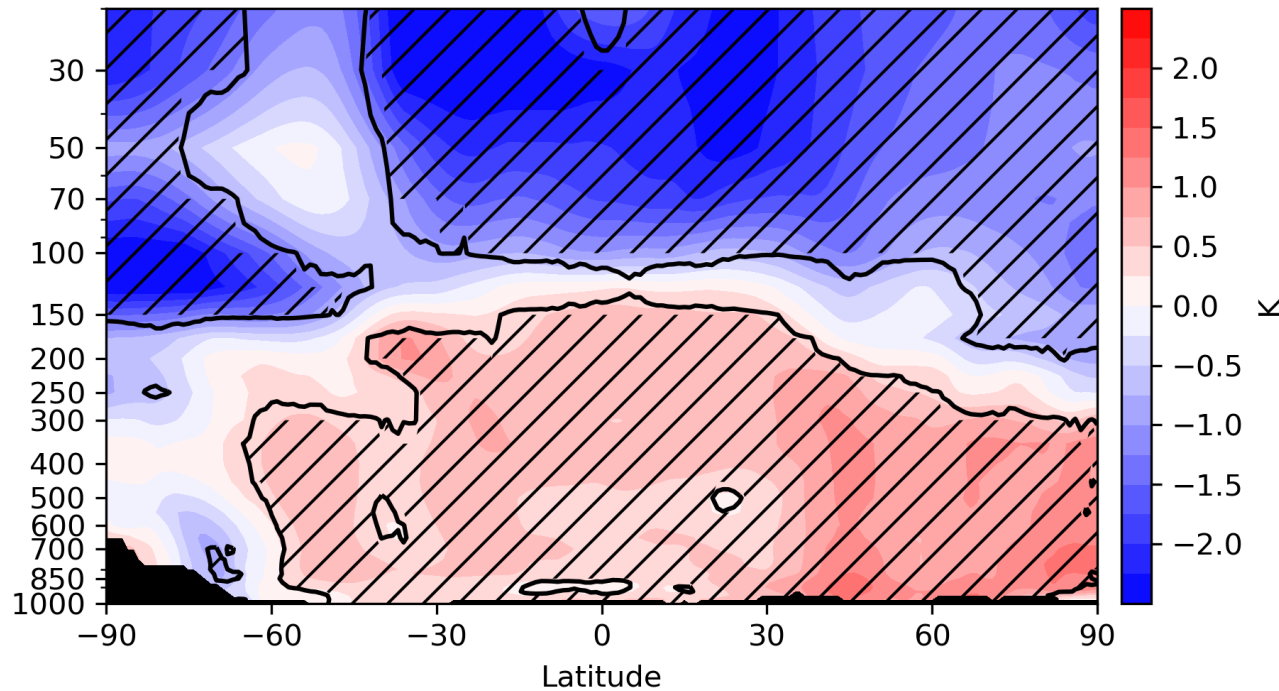
Manj ozona \rightarrow manj sproščene toplote v stratosferi
(jasno: v stratosferi temperatura narašča le zaradi ozona)



Weber et al.,
2018, ACP 18

Zakaj se je ohladila stratosfera?

Razlika v povprečni temperaturi v obdobju
junij-avgust med letom 1980 in 2018



(Najmanj) dva razloga:

- 2) Večja koncentracija CO_2 → več IR sevanja se absorbira že v troposferi, manj ga je na voljo za interakcijo s CO_2 v stratosferi (Zemlja je trenutno v termalnem neravnovesju, zato temperatura narašča – več energije prejme kot odda) – ZAČASEN EFEKT (ko bo doseženo novo TD ravnovesje, se stratosfera ne bo več hladila)

Zakaj se je ohladila stratosfera?

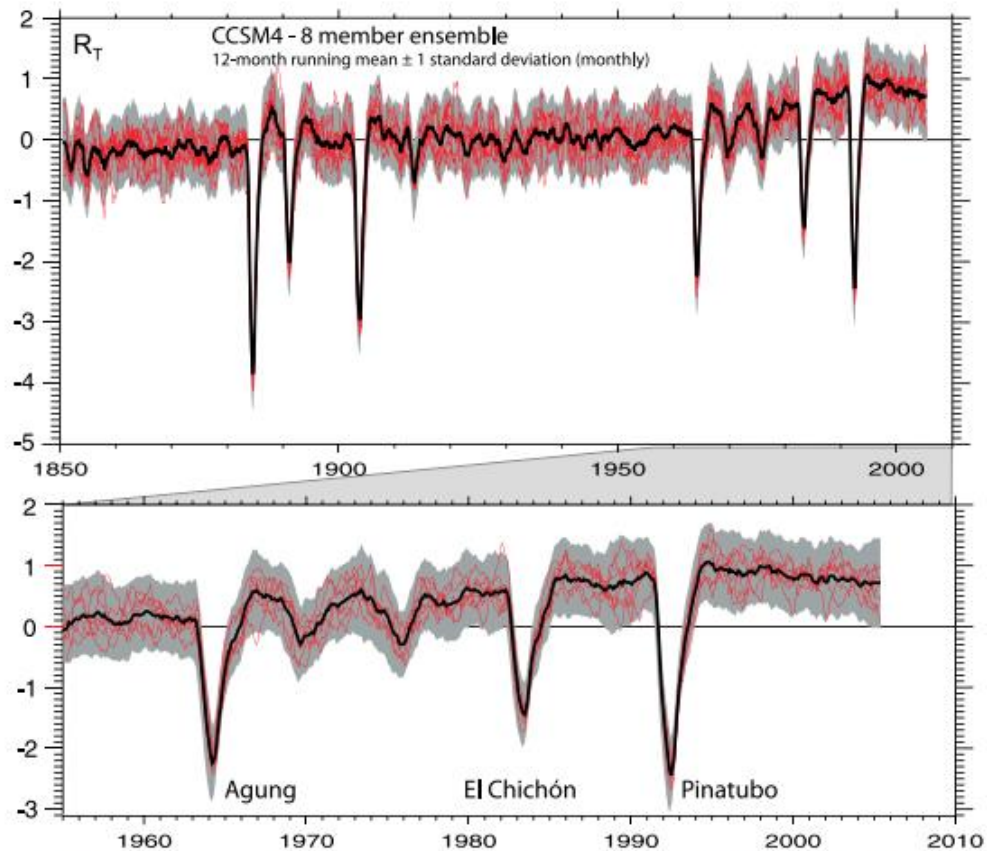
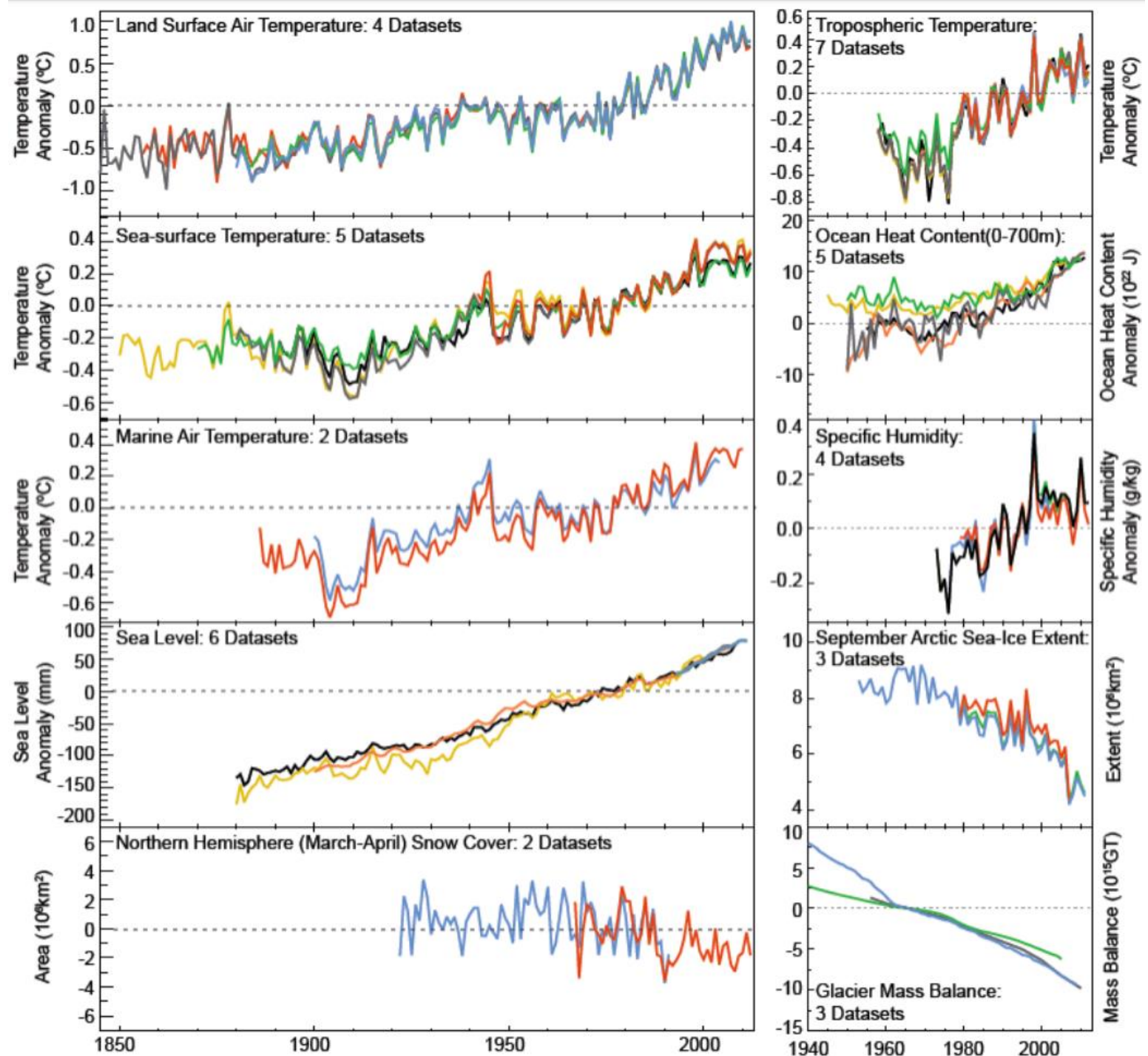


FIG. 1. (top) The net TOA radiation (down; $W m^{-2}$) from CCSM4 run at 1° resolution for eight members of the ensemble. Shown are the ensemble 12-month running mean (black line) with ± 1 standard deviation of the individual monthly values (gray shaded region) and the eight individual ensemble values as 12-month running means. (bottom) An expanded version of the last 50 years that includes the Mt. Agung, El Chichón, and Mt. Pinatubo volcanic eruptions.

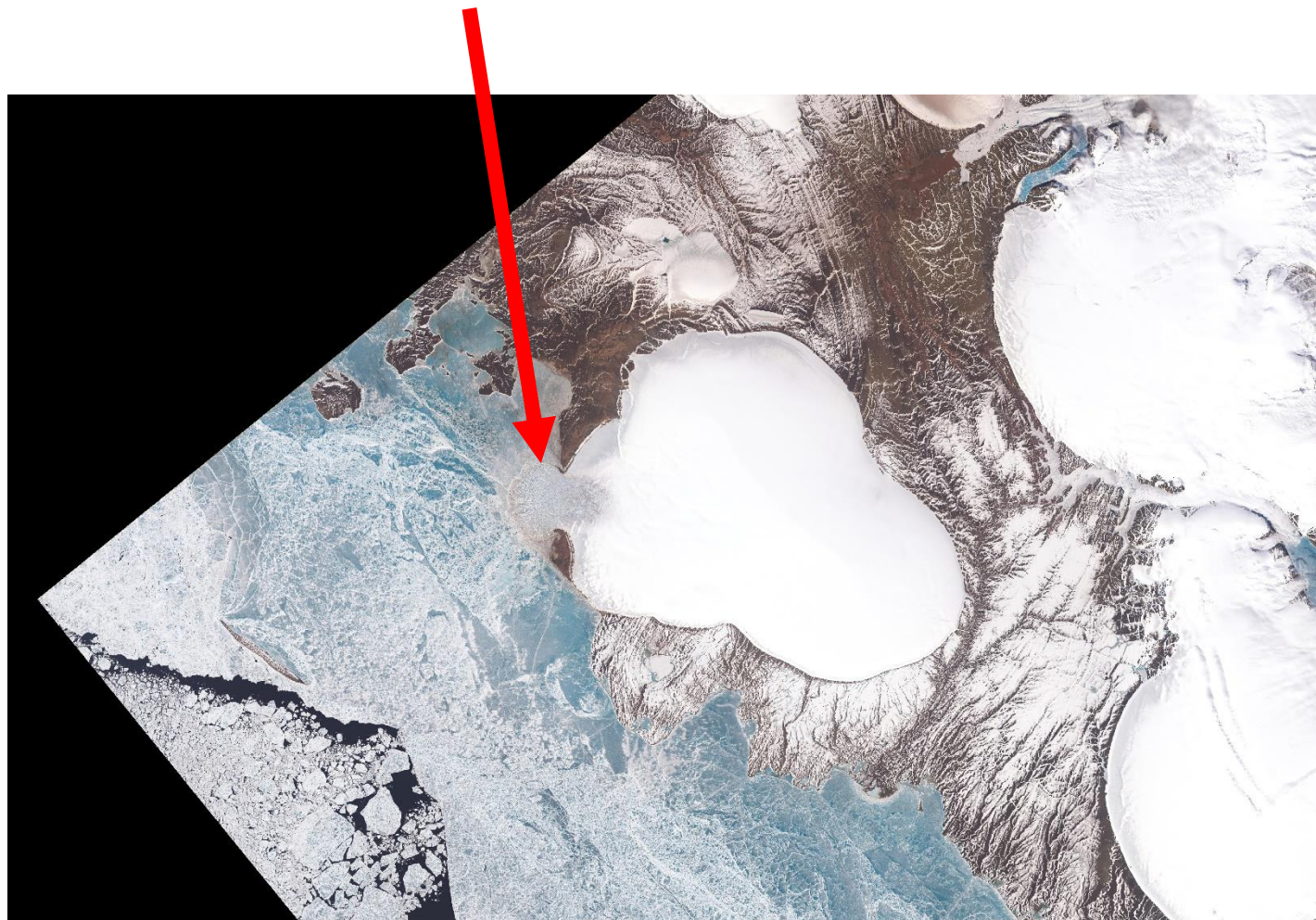
(Najmanj) trije razlogi:

- 2) Večja koncentracija $CO_2 \rightarrow$ nekaj translacijske energije se porabi pri trkih za vzbuditev CO_2 molekul v višje stanje, zmanjša se povprečna hitrost molekul in temperatura. Vzbujene CO_2 molekule potem emitirajo sevanje, pri čemer sevanje z lahkoto „zapusti“ optično redko stratosfero
- 3) Večja koncentracija $CO_2 \rightarrow$ več IR sevanja se absorbira že v troposferi, manj ga je na voljo za interakcijo s CO_2 v stratosferi (Zemlja je trenutno v termalnem neravnovesju, zato temperatura narašča – več energije prejme kot odda)

Indici – meritve



Indici – hitro izginjanje kopenskega ledu

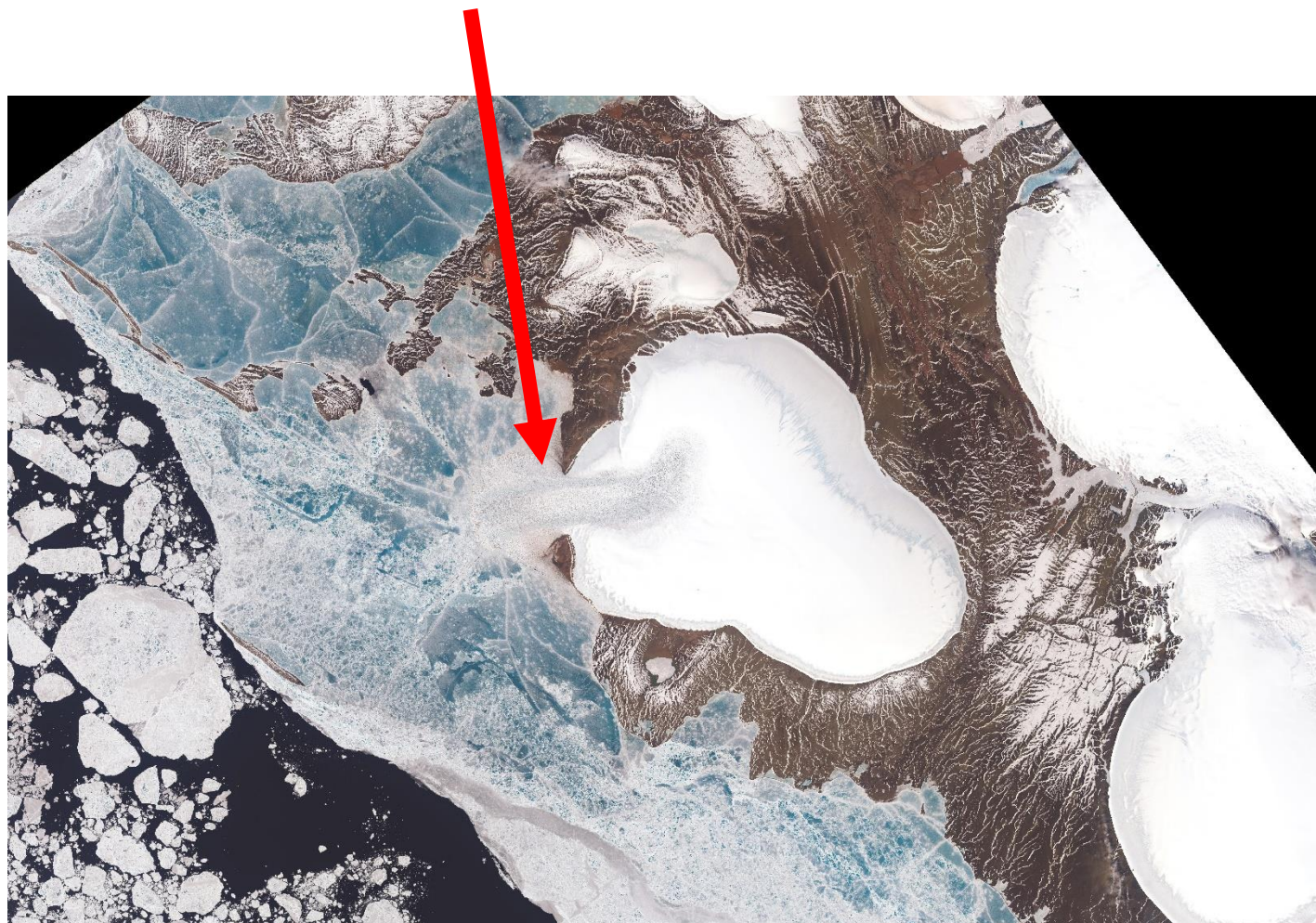


NAJVERJETNEJŠI MEHANIZEM:

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

Spreminjanje podnebja – nedvoumen dokaz o krivdi človeka

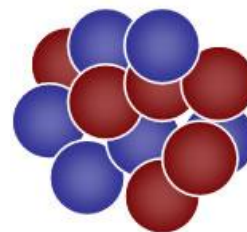
Izotopska razmerja posameznih elementov

- 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:

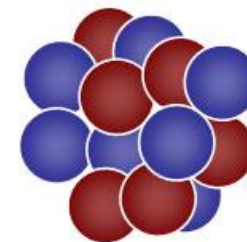
$$dR = -R \frac{dt}{t_{1/2}} \rightarrow R = R(0) \exp\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)$$

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

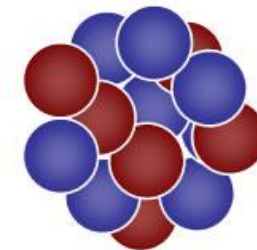
- Koliko je C^{13} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Malo**, ker se je počasnejši (težji!) pri difuziji na listih in ker rastline pri fotosintezi preferirajo C^{12} . Seveda fosilna goriva niso nič drugega kot odmrta biosfera...



carbon-12
98.9%
6 protons
6 neutrons



carbon-13
1.1%
6 protons
7 neutrons



carbon-14
<0.1%
6 protons
8 neutrons

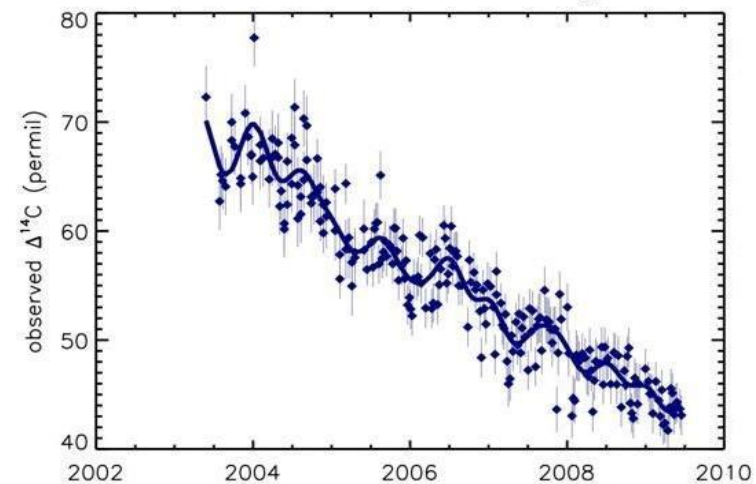
Spreminjanje podnebja – nedvoumen dokaz o krivdi človeka

Izotopska razmerja posameznih elementov

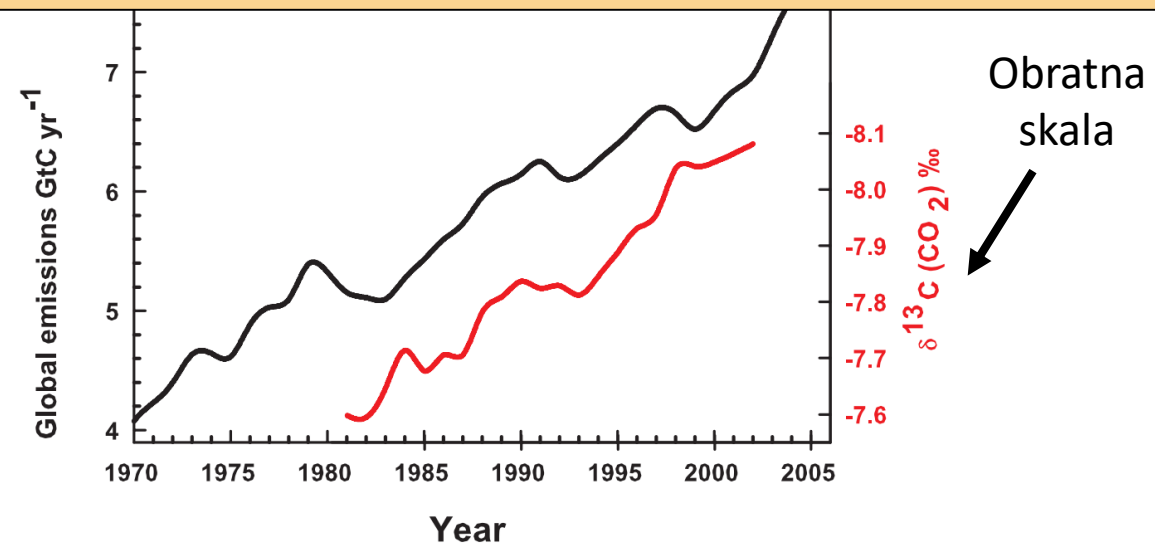
- C^{12} in C^{13} sta stabilna, C^{14} pa radioaktiven z razpolovnim časom $t_{1/2} = 5730$ let
- Vprašanje: koliko je C^{14} v premogu, nafti ali zemeljskem plinu?
- **Točno, 0!** Razmerje C^{14} / C^{12} označimo z R . Velja:
$$dR = -R \frac{dt}{t_{1/2}} \rightarrow R = R(0) \exp\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)$$

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

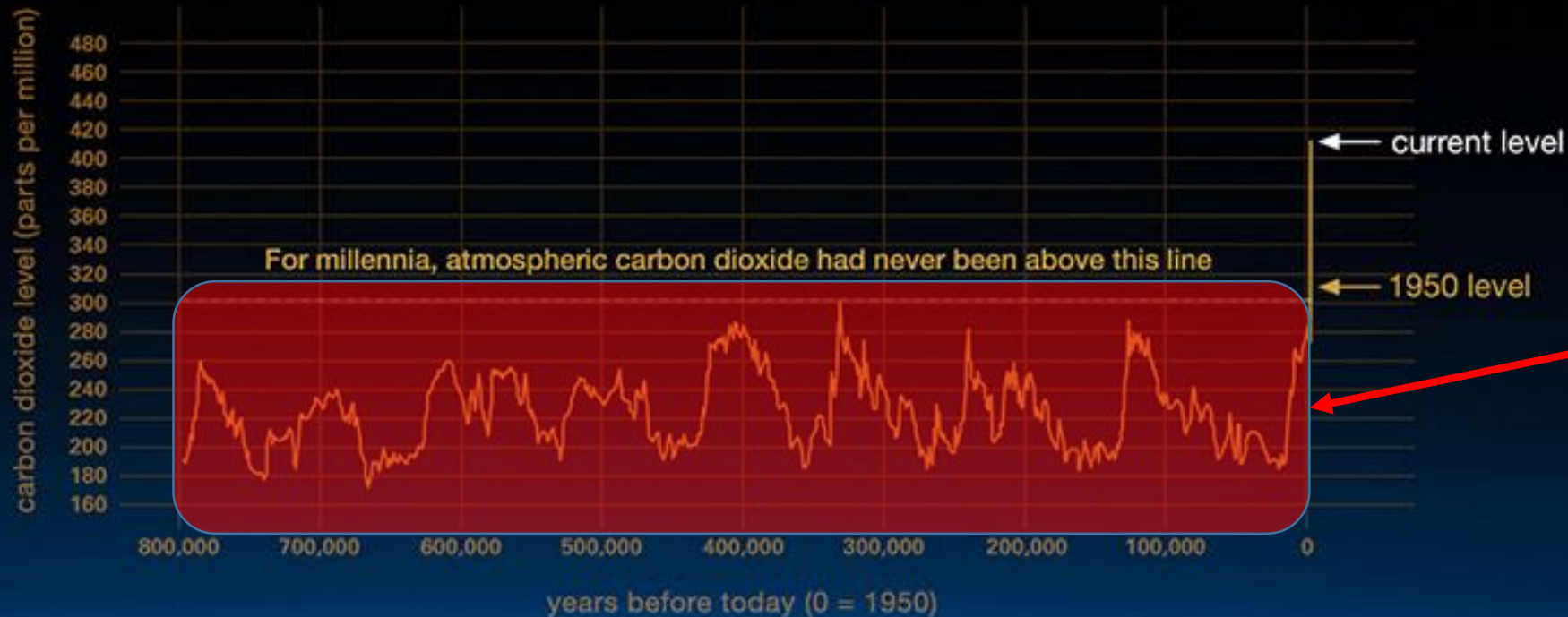


Razmerji C^{13} / C^{12} in C^{14} / C^{12} se obe zmanjšujeta v ozračju



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

Spreminjanje podnebja – dokazi za krivdo človeka



Koncentracija CO₂ izmerjena v mehurčkih zraka, ujetih v ledu – vrtini Vostok in EPICA

Napovedovanje vremena in podnebja - razlike?

- Zakaj lahko napovemo stanje podnebja čez nekaj desetletij, če lahko vreme napovemo < 14 dni vnaprej?
- Pri razlagi si pomagamo s preprostim Lorenzovim (63) modelom

Sistem treh sklopljenih prognostičnih enačb:
 x, y, z ... spremenljivke
 σ, ρ, β ... parametri

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

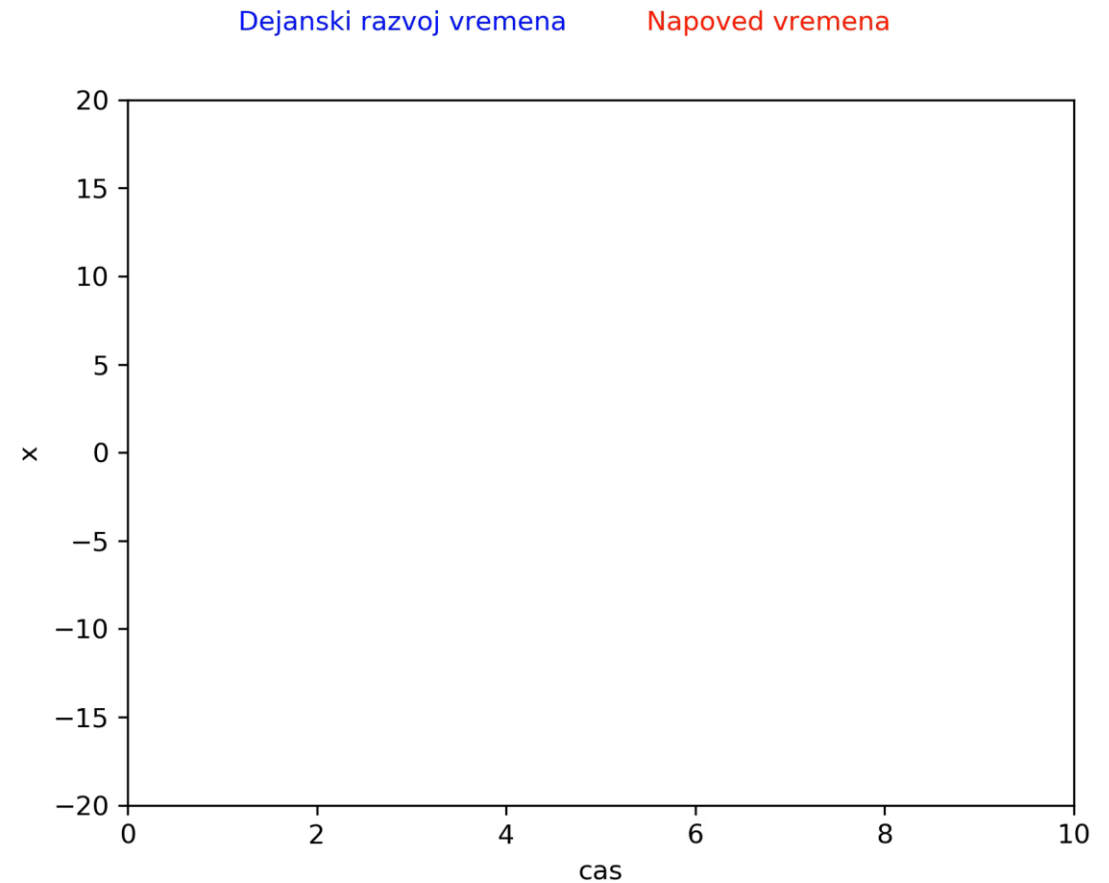
$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y$$

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

Sistem je kaotičen – dve rešitvi, ki sta si ob začetnem času skoraj identični, postaneta po dolgem času povsem različni → učinek metulja

Napovedovanje vremena in podnebja - razlike?

- Zakaj lahko napovemo stanje podnebja čez nekaj desetletij, če lahko vreme napovemo < 14 dni vnaprej?
- Pri razlagi si pomagamo s preprostim Lorenzovim (63) modelom
- Tudi vreme je kaotičen proces, zato ima končno mejo napovedljivosti

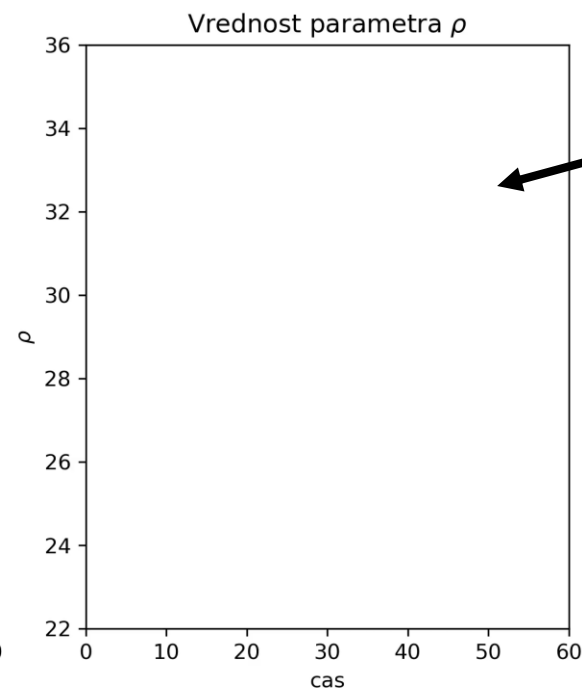
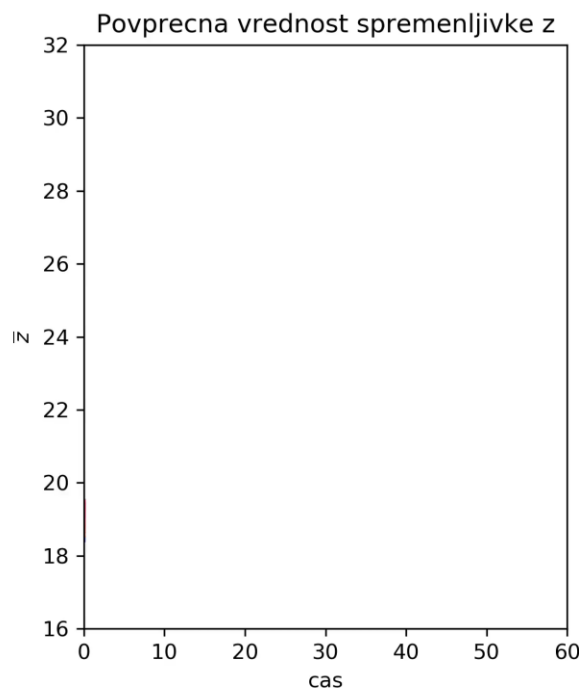
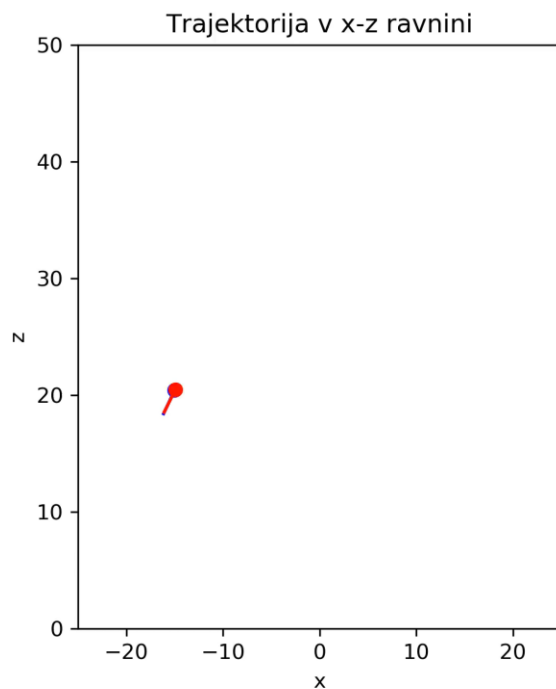


Dostopno na: <https://nextcloud.fmf.uni-lj.si/s/wNNLflWQJajCW6R>

Napovedovanje vremena in podnebja - razlike?

- Podnebje so statistične značilnosti vremena: povprečje, odkloni, ekstremi

Pri napovedovanju podnebja z modeli simuliramo vreme. Vendar pa nas ne zanima točno stanje vremena ob nekem trenutku (niti ga ne moremo napovedati za dolgo vnaprej), temveč nas zanima le statistika vrednosti. Bo toplejše ali hladnejše? Bo padavin več ali manj? Kakšni bodo ekstremi



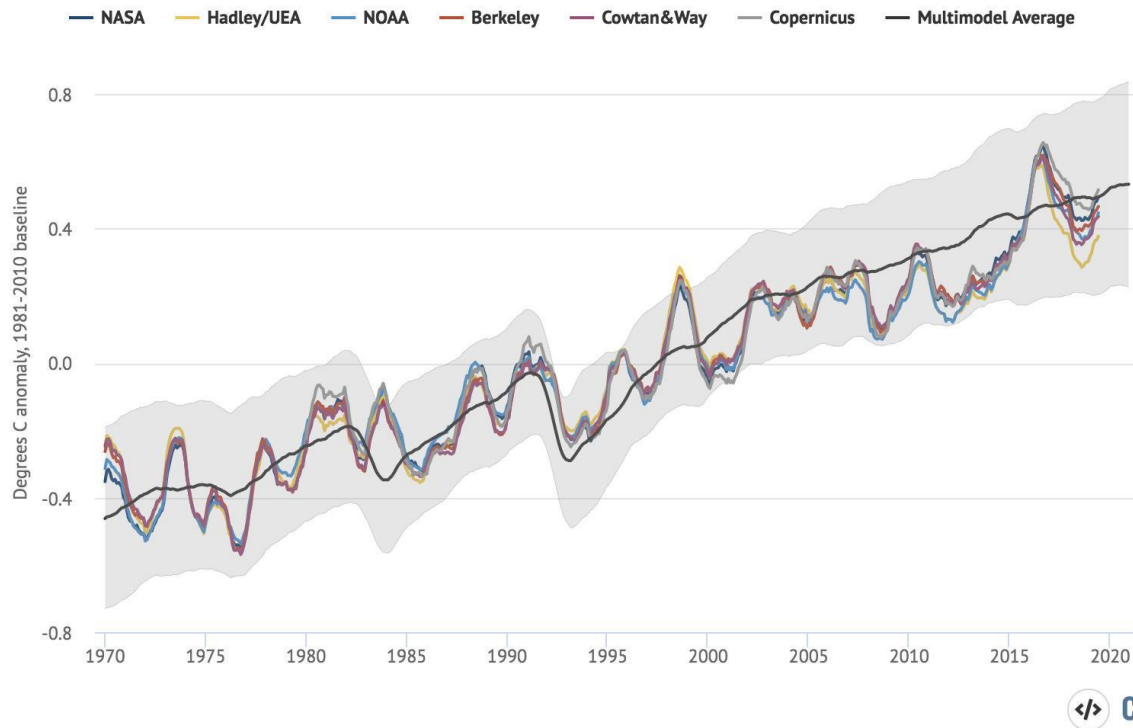
Variiramo parameter ρ . Posledično se spremeni območje, ki ga opišejo posamezne rešitve (tipično „vreme“) oz. spremeni se „podnebje“ Lorenzovega sistema.

Dostopno na:
<https://nextcloud.fmf.uni-lj.si/s/rBdsA84wQriJxSR>

Napovedi klimatskih modelov

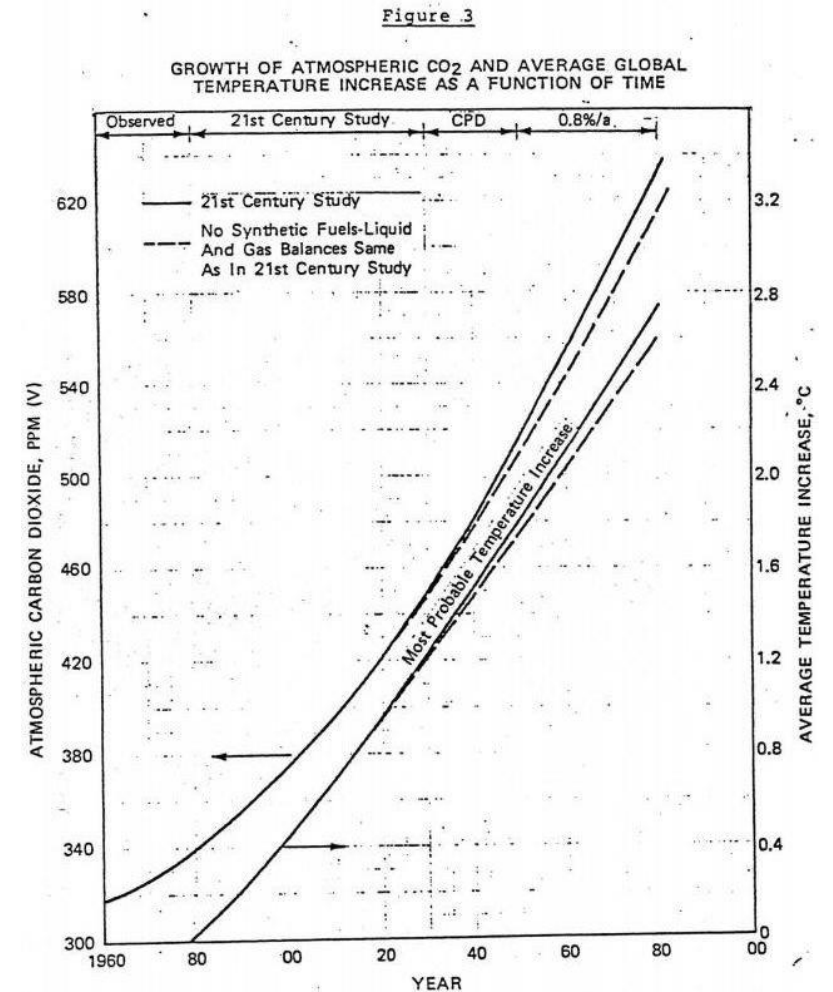
Odlično ujemanje CMIP5 modelov in meritev!

Global surface temperatures 1970-2019: climate models and observations



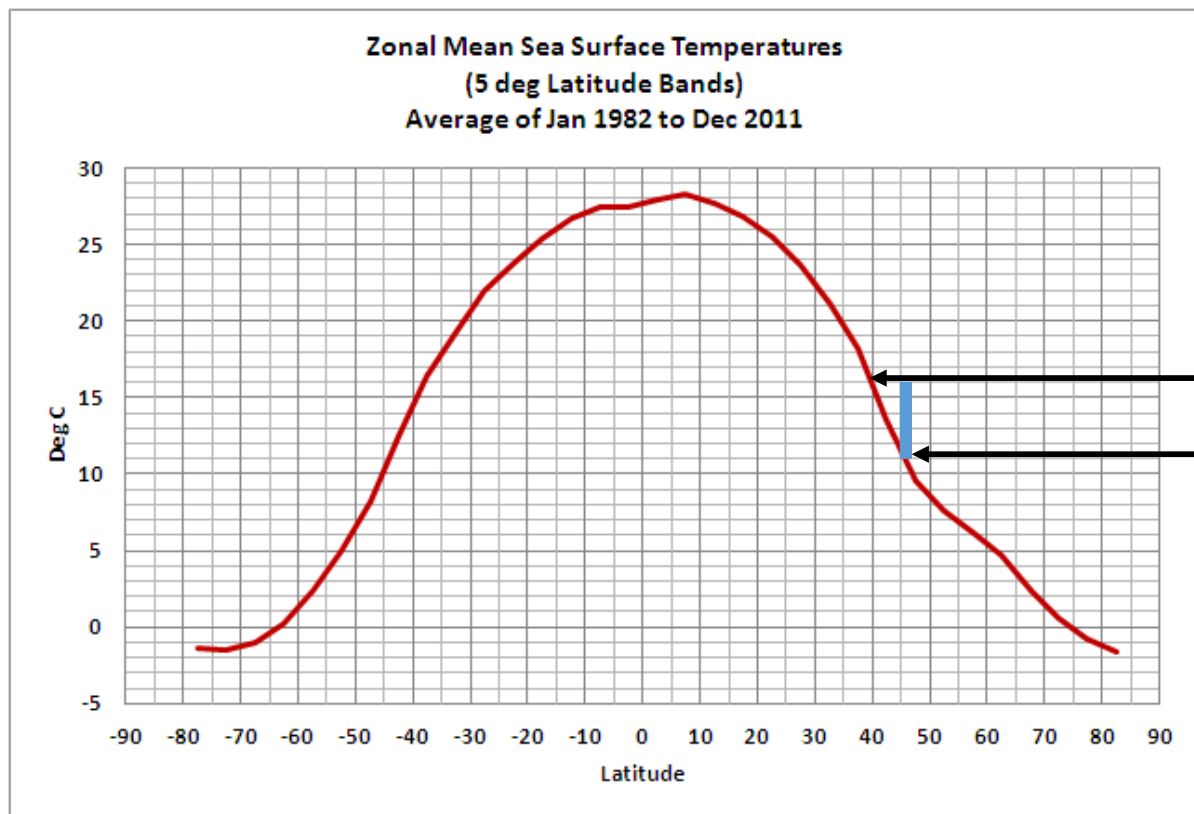
12-month average global average surface temperatures from [CMIP5 models](#) and observations between 1970 and 2020. Models use RCP4.5 forcings after 2005. They include sea surface temperatures over oceans and surface air temperatures over land [to match what is measured by observations](#). Anomalies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

Exxon, 1982



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)

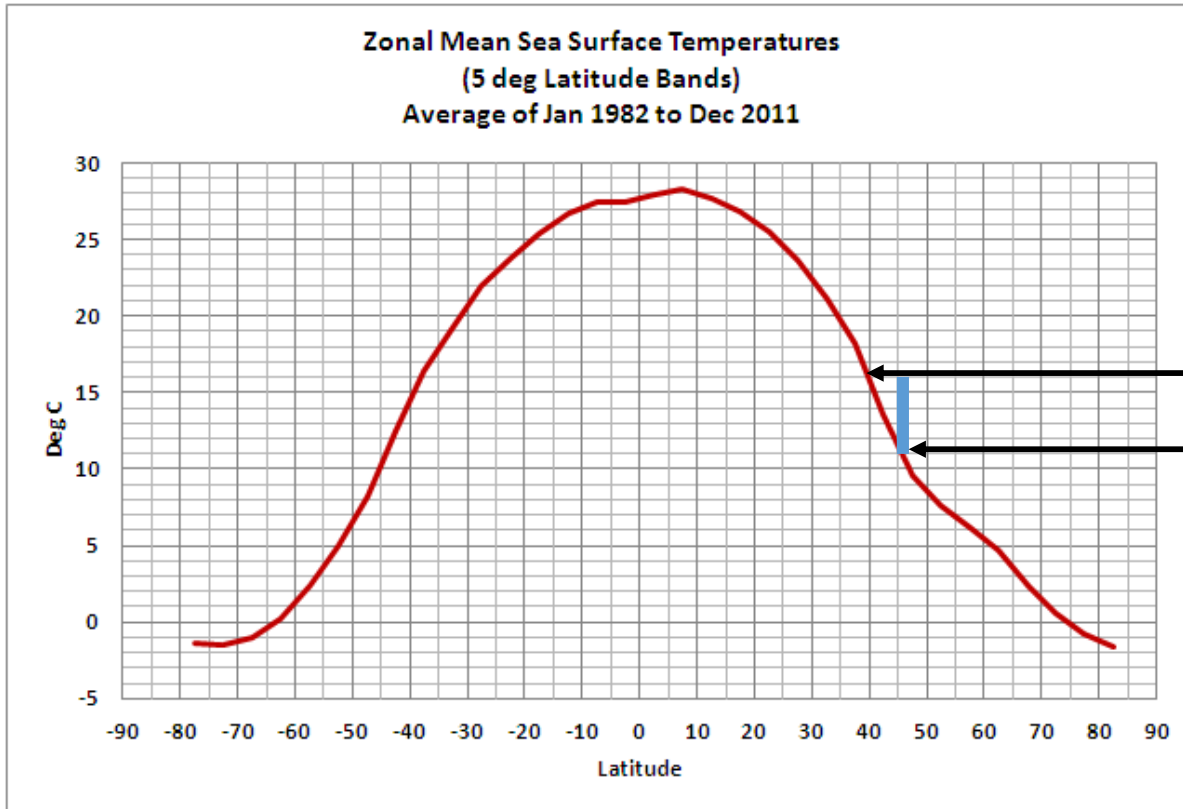
KOPER



ATENE



MALAGA



Obeti – zgledi

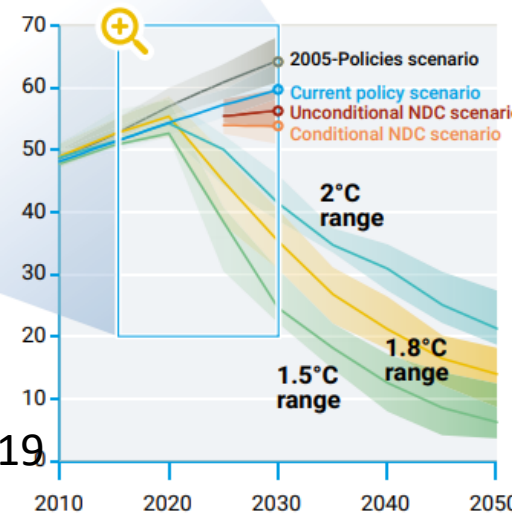
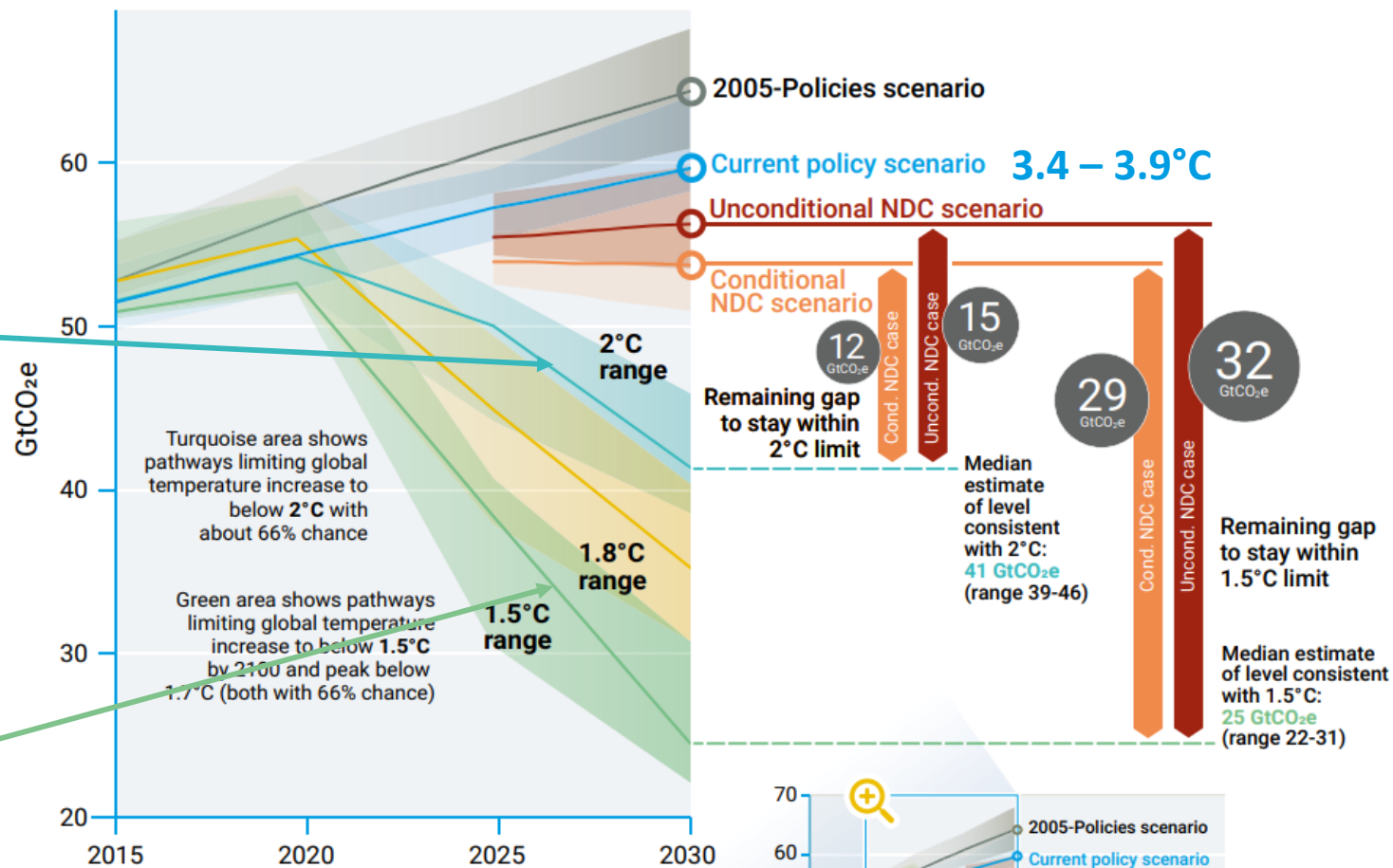
Climate data for Ljubljana [hide]													
Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Average high °C (°F)	3.4 (38.1)	6.4 (43.5)	11.4 (52.5)	16.1 (61.0)	21.4 (70.5)	24.6 (76.3)	27.3 (81.1)	26.7 (80.1)	21.6 (70.9)	15.9 (60.6)	8.8 (47.8)	3.8 (38.8)	15.6 (60.1)
Daily mean °C (°F)	0.3 (32.5)	1.9 (35.4)	6.5 (43.7)	10.8 (51.4)	15.8 (60.4)	19.1 (66.4)	21.3 (70.3)	20.6 (69.1)	16.0 (60.8)	11.2 (52.2)	5.6 (42.1)	1.2 (34.2)	10.9 (51.6)
Average low °C (°F)	-2.5 (27.5)	-2.0 (28.4)	1.7 (35.1)	5.8 (42.4)	10.3 (50.5)	13.7 (56.7)	15.5 (59.9)	15.2 (59.4)	11.5 (52.7)	7.7 (45.9)	2.8 (37.0)	-1.1 (30.0)	6.6 (43.9)
Average precipitation mm (inches)	69 (2.7)	70 (2.8)	88 (3.5)	99 (3.9)	109 (4.3)	144 (5.7)	115 (4.5)	137 (5.4)	147 (5.8)	147 (5.8)	129 (5.1)	107 (4.2)	1,362 (53.6)

Climate data for Podgorica [hide]													
Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Average high °C (°F)	9.5 (49.1)	11.3 (52.3)	15.0 (59.0)	19.1 (66.4)	24.3 (75.7)	28.3 (82.9)	31.8 (89.2)	31.6 (88.9)	27.4 (81.3)	21.7 (71.1)	15.5 (59.9)	11.1 (52.0)	20.6 (69.0)
Daily mean °C (°F)	5.0 (41.0)	6.8 (44.2)	10.0 (50.0)	13.9 (57.0)	19.0 (66.2)	22.8 (73.0)	26.0 (78.8)	25.6 (78.1)	21.4 (70.5)	15.9 (60.6)	10.5 (50.9)	6.5 (43.7)	15.3 (59.5)
Average low °C (°F)	1.4 (34.5)	3.2 (37.8)	5.8 (42.4)	9.2 (48.6)	13.6 (56.5)	17.3 (63.1)	20.3 (68.5)	20.2 (68.4)	16.5 (61.7)	11.6 (52.9)	6.8 (44.2)	2.9 (37.2)	10.7 (51.3)
Average precipitation mm (inches)	191.6 (7.54)	166.5 (6.56)	159.0 (6.26)	145.2 (5.72)	89.8 (3.54)	63.3 (2.49)	38.5 (1.52)	65.9 (2.59)	119.6 (4.71)	164.2 (6.46)	238.5 (9.39)	217.2 (8.55)	1,659.3 (65.33)

Obeti

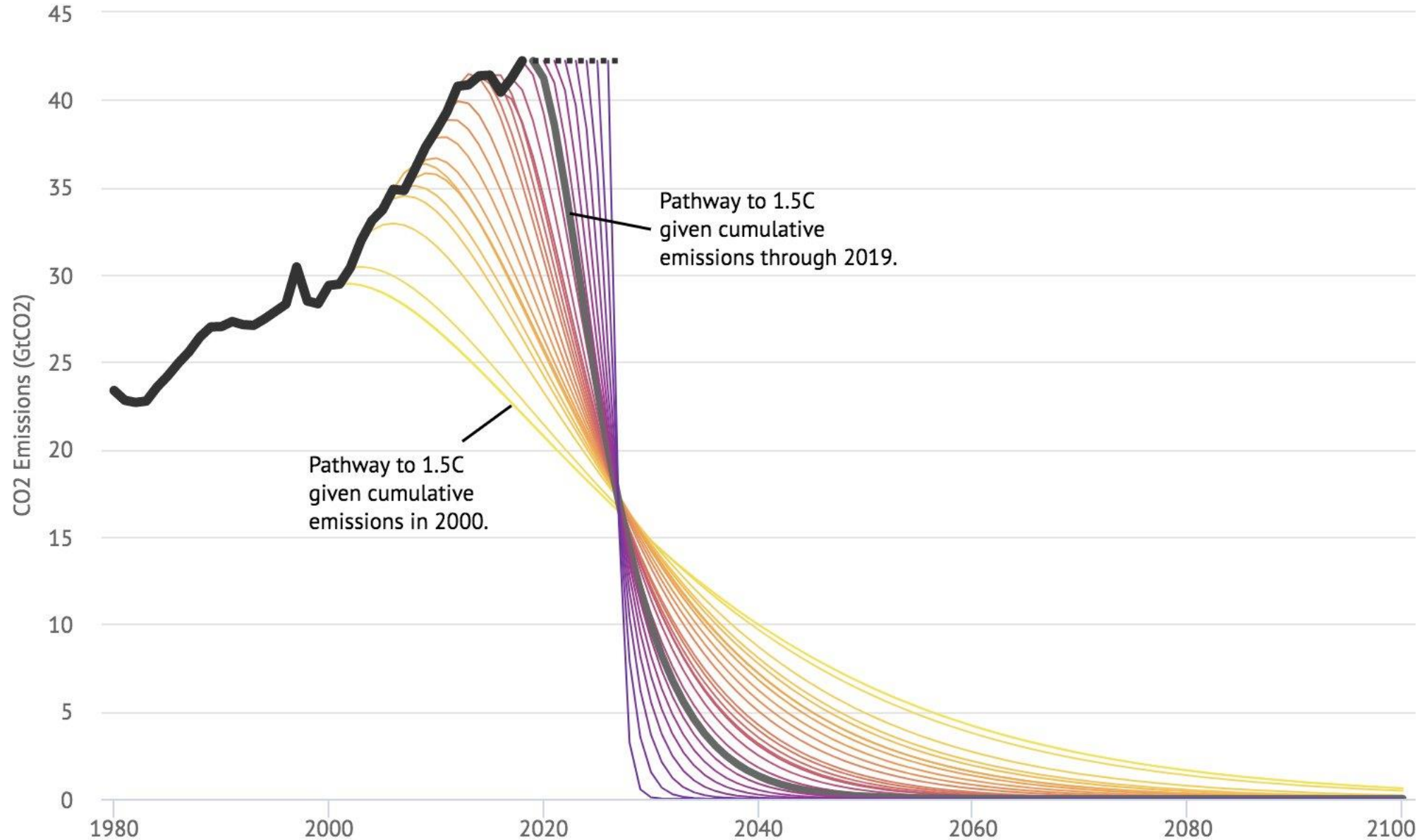
4 – 5 % letno zmanjšanje emisij od 2019 dalje
7 % letno zmanjšanje, če odlašamo še 10 let

15 % zmanjšanje emisij vsako leto od 2019 dalje



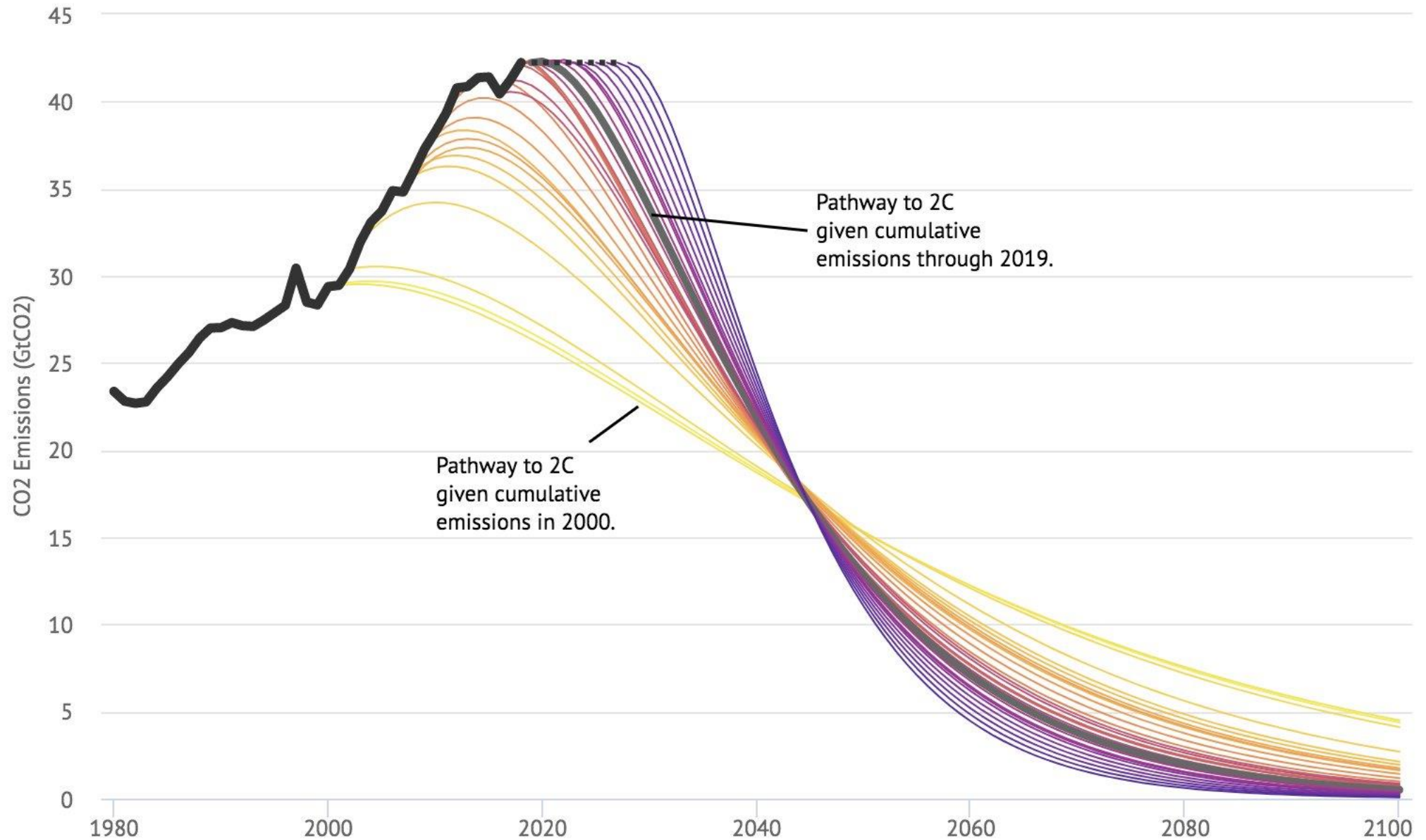
Obeti

Limiting warming to 1.5C increasingly difficult without large-scale negative emissions

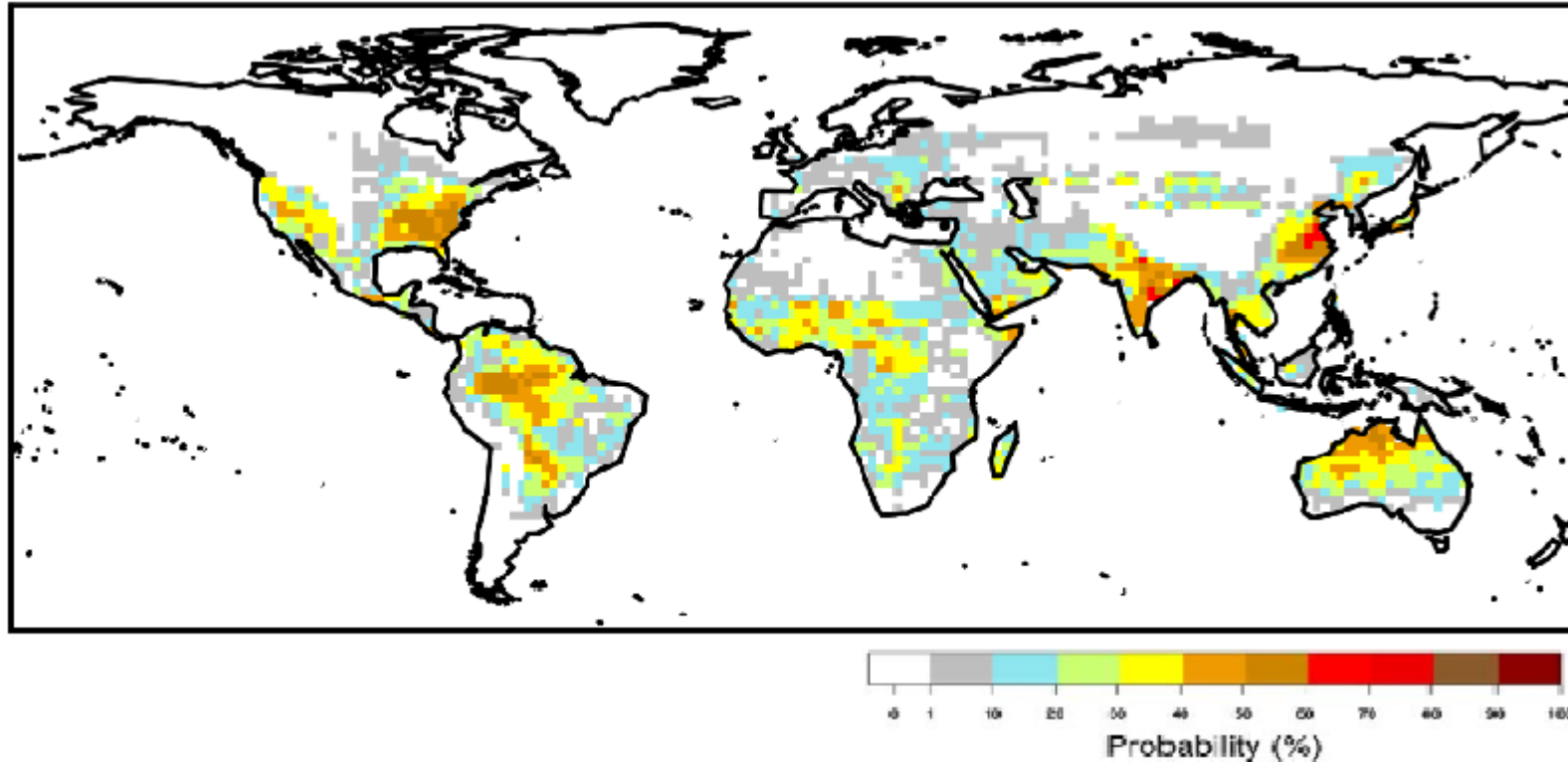


Obeti

The later emissions peak the harder it is to limit warming below 2C



Obeti – območja, kjer bo človeško življenje ogroženo?



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

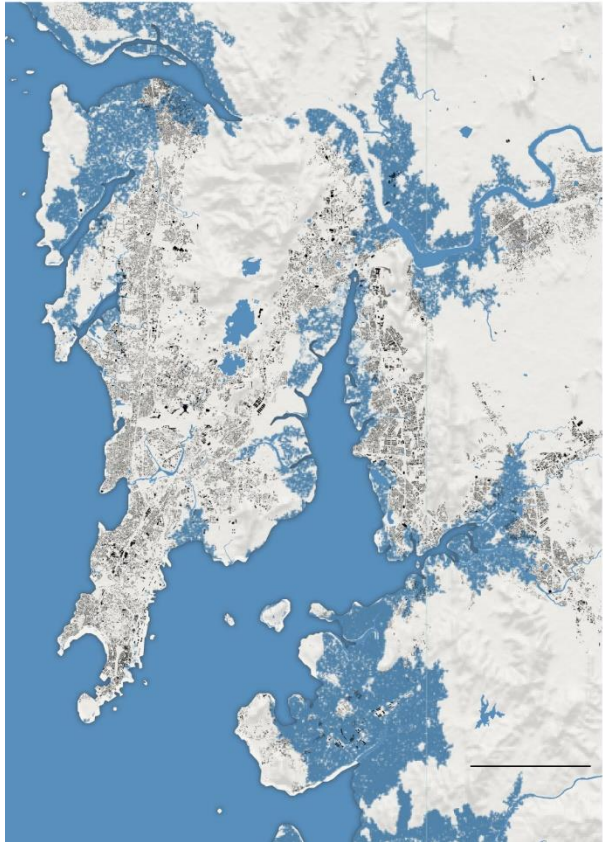
Verjetnost, da se v obdobju enega leta pojavi vročinski val, pri katerem bi maksimalna vrednost temperature mokrega termometra (TMT) presegla vrednost 35°C. Pri tej TMT človek (na prostem) doživi v nekaj urah spontani vročinski udar že v mirovanju, v senci, pri popolni ventilaciji, kar vodi v hitro smrt.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

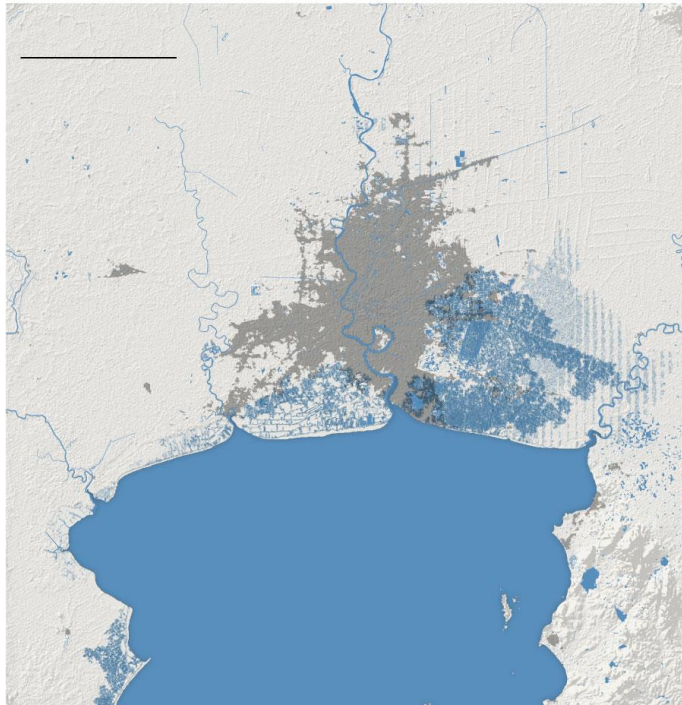
New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

Nature Communications **10**(4844)

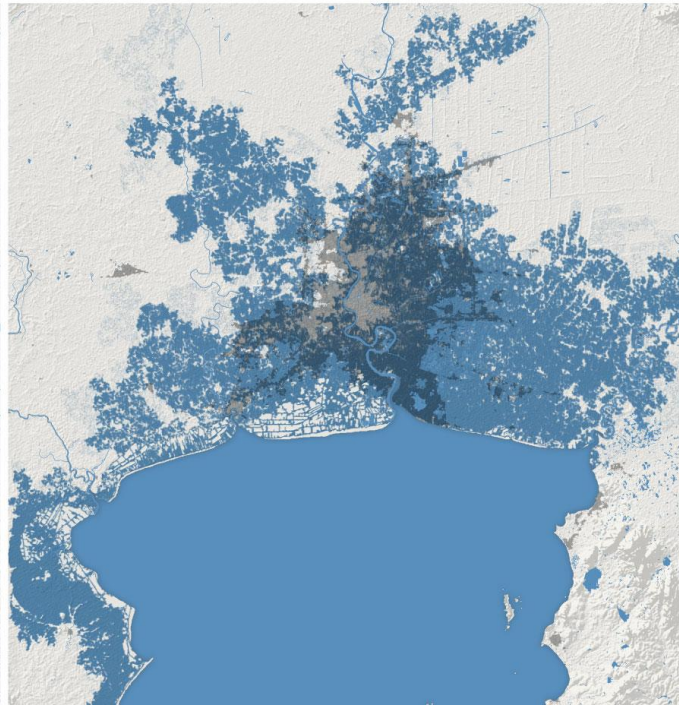
Obeti – rast gladine morja

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

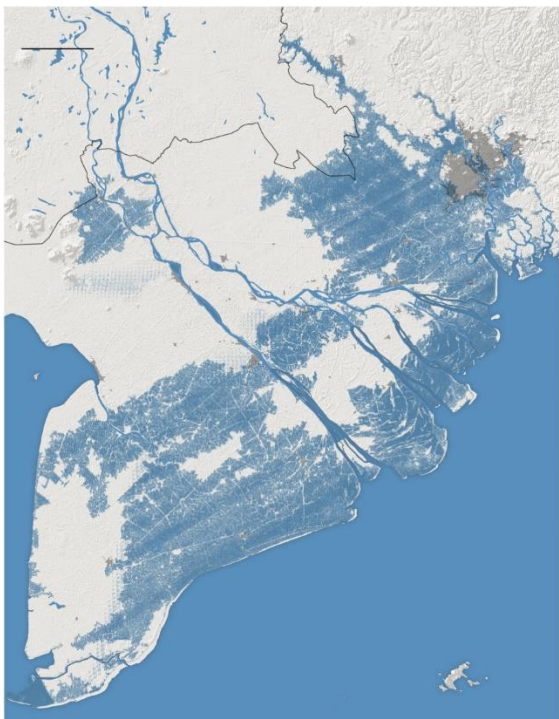
New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding.

Nature Communications **10**(4844)

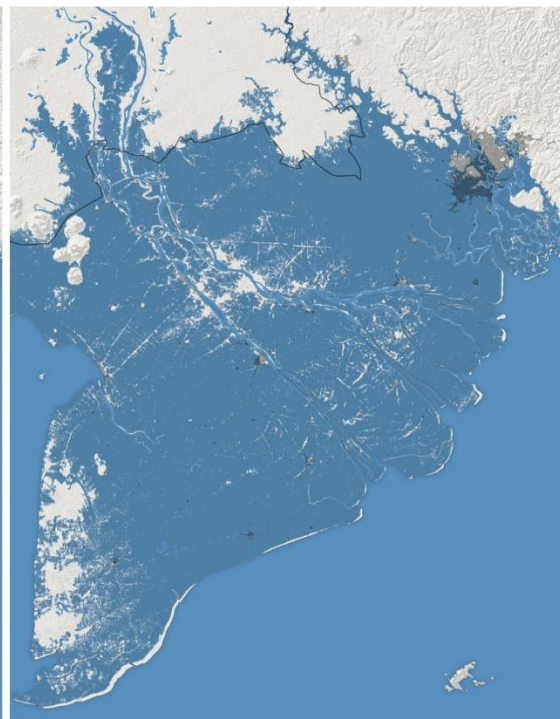
Obeti – rast gladine morja

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.

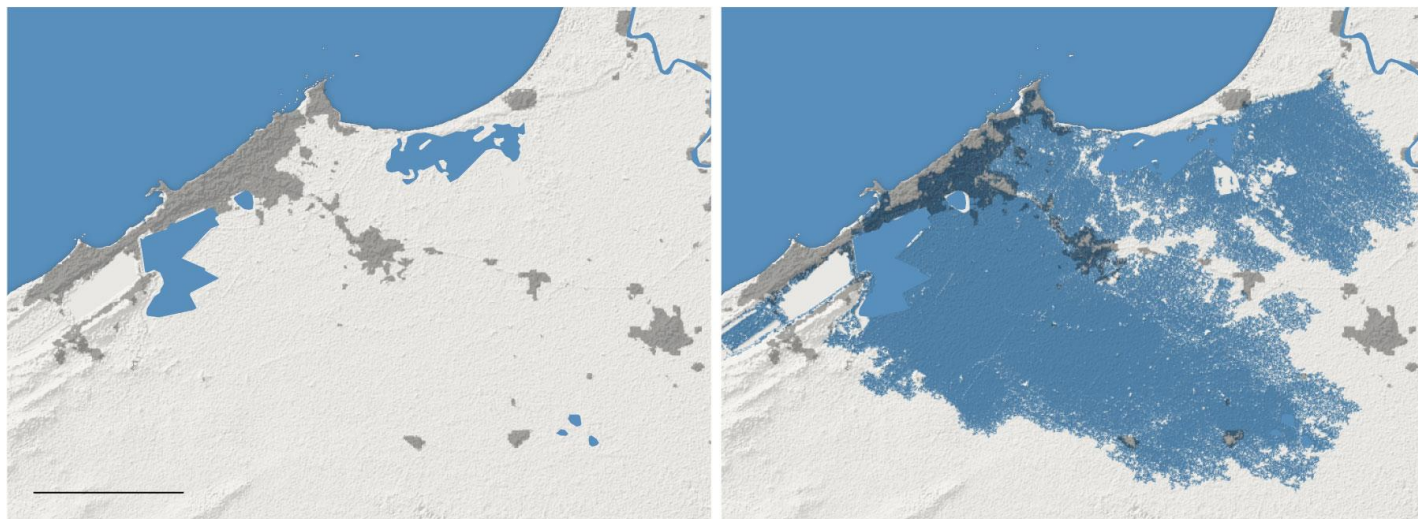
Nature Communications **10**(4844)

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. Takšnega izziva v človeški zgodovini še ni bilo!!
- Tisti, ki se kakorkoli ukvarjamo z vremenom in podnebjem, moramo voditi z zgledom
- Če želimo podnebne spremembe uspešno in zanesljivo komunicirati javnosti in odločevalcem, potem moramo osnovne fizikalne mehanizme dobro poznati
- Vzgoja in izobraževanje (spremembe sistema vrednot)!
- Pred kratkim smo slovenski raziskovalci ozračja napisali odprto pismo državnim institucijam – uradnega odziva še ni bilo! (*pričakovano*)
- Neformalno: govor Predsednika Državnega zbora mag. Dejan Židan in Ministra za okolje in prostor Simon Zajc na posvetu Podnebni dogovor; predsednik republike napovedal ustanovitev stalnega odbora za podnebno politiko pri predsedniku republike
- Potrebno je vztrajati in še stopnjevati pritisk (zakaj bi zaupali obljubam, če se ne uresničujejo?) !!

Literatura

- Priporočam:

Seinfeld in Pandis: Atmospheric Chemistry and Physics

Pierrehumbert: Principles of Planetary Climate