

O podnebni občutljivosti na vsebnost CO₂ v ozračju

On the Climate Sensitivity to Atmospheric CO₂ Concentration

Erik Margan
Experimental Particle Physics Dept.
Jožef Stefan Institute
Ljubljana, Slovenia
erik.margan@ijs.si

Povzetek

Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) v svojem zadnjem poročilu (AR6, 2020) določa za 3°C višjo globalno povprečno temperaturo kot najverjetnejšo vrednost podnebne občutljivosti na podvojitve koncentracije toplogrednih plinov v ozračju, kar naj bi se zgodilo do konca XXI stoletja, upoštevajoč scenarij BAU (*business as usual*). Ob tem navaja še najverjetnejše območje zanesljivosti med 2°C in 4,5°C. Pokazali bomo, da način določanja podnebne občutljivosti (ki temelji na termičnem sevalnem ravnovesju planeta) kot ga uporabljajo pri IPCC sloni na nekaterih napačnih predpostavkah in je zato zgrešen, tako določena vrednost občutljivosti pa je previsoka. Predstavili bomo pravi način za določanje tega parametra, po katerem bomo dobili mnogo nižjo vrednost.

Ključne besede

Podnebna občutljivost, vsebnost toplogrednih plinov, sevalno ravnovesje, adiabatno segrevanje, prenos toplote v ozračju.

Abstract

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) in its latest report (AR6, 2020) states a 3°C higher global average temperature as the most likely value of the climate sensitivity to a doubling of greenhouse gases concentration, which is predicted to occur by the end of the XXI century under the BAU (*business as usual*) scenario. A most likely range of 2°C to 4.5°C is also stated. It will be shown here that the method of estimating the climate sensitivity as used by the IPCC (which is based on the thermal radiative balance) is wrong, so the obtained sensitivity is too high. Here a correct method is given, by which a much lower sensitivity value is obtained.

Keywords

Climate sensitivity, concentration of greenhouse gases, thermal radiative balance, adiabatic warming, atmospheric heat transfer.

Opomba

Pričujoči prispevek je nastal na osnovi članka [6]; vsebina je posodobljena na osnovi novejših podatkov iz zadnjega poročila IPCC AR6 [1]. Hkrati so v ponujeni razlagi pravilnega načina izračuna podnebne občutljivosti popravljene nekatere manjše metodološke nedoslednosti, v skladu s standardno teorijo regulacije v povratnih zankah.

1 Definicija podnebne občutljivosti

IPCC v svojih poročilih uporablja dve definiciji podnebne občutljivosti, pri čemur se obe nanašata na spremembo globalne povprečne temperature pod vplivom podvojitve vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju. V prvem primeru gre za prehodno občutljivost (*transitional climate sensitivity*, TCS), kjer se količina toplogrednih plinov postopoma povečuje do podvojitve. Ta način se uporablja za določanje učinka različnih scenarijev omejevanja izpustov toplogrednih plinov in je dokaj zapleten za izračunavanje, ne prinaša pa spoznanja o dinamičnih lastnostih in odzivu podnebja kot sistema. Ravnovesna občutljivost (*equilibrium climate sensitivity*, ECS) pa predvideva podvojitve vsebnosti toplogrednih plinov v razmeroma kratkem času, nakar spremlja odziv sistema dokler ta ne doseže novo termično ravnovesje pri ustrezno višji temperaturi. Zato je ta način bolj primeren za določanje lastnosti sistema in njegove odzivnosti, poleg tega pa je razmeroma preprost za izračun. V nadaljevanju bomo uporabljali ECS in razložili ugotovitve, ki iz tega izhajajo.

2 Termično sevalno ravnovesje planeta

IPCC kot osnovo za izračun globalne povprečne temperature izhaja iz zahteve po termičnem sevalnem ravnovesju: koliko toplote sprejme planet od Sonca, toliko je mora tudi oddati, pri čemur pa je mogoče, da se del toplotnega toka začasno ohrani v snovi z visoko termično kapaciteto (v primeru Zemlje je to voda), zaradi česar se ravnovesje ob spremembi pogojev vzpostavi šele po razmeroma dolgem času.

Sevalno ravnovesje določajo poleg sončevega sevanja (s površinsko gostoto sevalne moči $S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$) še geometrija in rotacija planeta. Vstopno sevanje je sorazmerno površini kroga z radijem enakim radiju planeta ($A_s = \pi R^2$), izstopno sevanje pa je sorazmerno celotni površini planeta ($A_p = 4\pi R^2$). Povprečna gostota sevalne moči vstopnega sevanja je zato enaka sončevemu sevanju pomnoženemu z razmerjem obeh površin:

$$j_v = S_0 A_s / A_p = S_0 / 4 = 340,25 \text{ W/m}^2$$

Vendar do površja planeta ne pride celotno sevanje, del se odbije od svetlih površin oblakov, ter poledenelih in zasneženih površin. Ocenjena povprečna vrednost albeda znaša $a = 0,294$. Zato

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).
Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia
© 2025 Copyright held by the owner/author(s).
<https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.10>

površje absorbira vstopno gostoto sevalne moči zmanjšano za albedo. Segreto površje nato oddaja enako gostoto moči izstopnega infrardečega sevanja:

$$j_i = (1-a)j_v = 240 \text{ W/m}^2$$

Dejanska vrednost, ki jo izmerijo sateliti je sicer nekoliko nižja:

$$j_{ii} = 232 \text{ W/m}^2$$

Razlika je majhna, ni pa nepomembna. Lahko jo pripišemo različnim vplivom, med drugimi tudi dejstvu, da satelitski senzorji niso enako občutljivi na vse dele sevalnega spektra. Tukaj bomo še naprej upoštevali teoretično vrednost 240 W/m^2 .

Gostota sevalne moči je odvisna od četrte potence absolutne temperature (v Kelvinih), kot določa Stefan-Boltzmannov zakon:

$$j = \sigma T^4$$

kjer je Stefanova konstanta $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Iz znanega sevanja lahko izračunamo sevalno temperaturo (čeprav to ni vedno možno zaradi spektralne odvisnosti, ki je lahko drugačna od Planckovega spektra za idealno črno telo), kar za izstopno sevanje 240 W/m^2 znaša:

$$T_i = (j_i/\sigma)^{1/4} = (240/5,67 \times 10^{-8})^{1/4} = 255 \text{ K}$$

kar je enako -18°C .

Del vstopnega sevanja se absorbira že v ozračju, in sicer okoli 23%, kar pomni, da tla v povprečju segreva le:

$$j_p = (1-0,23)(1-a)j_v = 185 \text{ W/m}^2$$

Ta delež potem tla tudi izsevajo. Vendar bi temu sevanju po Stefan-Boltzmannovem zakonu ustrezala temperatura tal:

$$T_p = (j_p/\sigma)^{1/4} = (185/5,67 \times 10^{-8})^{1/4} = 239 \text{ K}$$

To pa je samo -34°C . Na podlagi dolgoletnega povprečja temperaturnih meritev pa vemo, da mora biti povprečna temperatura zraka pri tleh okoli $+15^\circ\text{C}$, ali $T_i = 288 \text{ K}$. In tej temperaturi ustreza večja gostota sevalne moči:

$$j_i = \sigma T_i^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 288^4 = 390 \text{ W/m}^2$$

Vidimo da je $j_i > j_p$ in seveda tudi $T_i > T_p$. Kako to lahko pojasnimo?

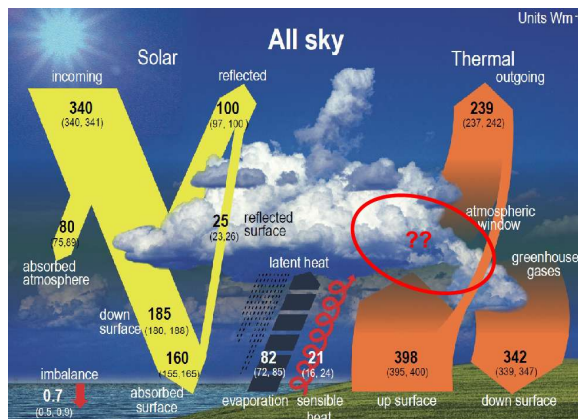
Vemo da temperatura zraka pada z višino in sicer za okoli 1°C za vsakih 100 m višine (suha adiabata), oziroma za okoli $0,6^\circ\text{C}$ (vlažna adiabata). Če je temperatura zraka pri tleh $T_i = 288 \text{ K}$ in je na neki višini $T_i = 255 \text{ K}$, pomeni, da mora biti razlika temperatur $\Delta T = T_i - T_i = 33 \text{ K}$. Ob vlažni adiabati potem lahko izračunamo višino, ki ustreza temperatura zraka $T_i = 255 \text{ K}$:

$$h_i = 100 \times \Delta T/0,6 = 100 \times 33/0,6 = 5500 \text{ m}$$

To je višina, ki ustreza približno polovici debeline ozračja, kjer je tudi srednja specifična masna gostota ozračja $0,6 \text{ kg/m}^3$, torej pol manjša kot ob normalnih pogojih pri tleh ($1,2 \text{ kg/m}^3$), tlak na

tej višini pa je približno enak tretjini pritiska pri tleh (300 hPa v primerjavi s 1013 hPa). Plast zraka na tej višini je pretežno odgovorna za izstopno sevanje, ki ga merimo s sateliti.

Na podlagi teh števil so pri IPCC za AR6 sestavili diagram enakovrednih sevalnih pretokov moči v ozračju, SI.1. Iz tega diagrama lahko še razberemo, da zaradi močnega sevanja tal prihaja do absorpcije sevanja v ozračju, kar skupaj z deležem absorbiranega vstopnega sončevega sevanja predstavlja toplogredni učinek ozračja. Uradna klimatologija trdi, da zaradi toplogrednega učinka ozračje močnejše seva nazaj proti tlam, poleg deleža, ki ga izseva proti vesolju.



SI.1: Enakovredni sevalni pretoki moči v ozračju, AR6, ch7, p934. Manjka vrednost toplogrednega učinka.

Na SI.1 je vsota zgornjih števil premajhna za 1 W/m^2 , vsota spodnjih pa je prevelika za $1,7 \text{ W/m}^2$. Torej bi namesto neravnovesja (*imbalance*) za $0,7 \text{ W/m}^2$ morali zapisati $1,7 \text{ W/m}^2$. Sicer pa v poglavju 7 poročila AR6 na strani 925 (glej tudi Tabelo 7.1 na strani 938) takole opredeljujejo energijske pretoke v posameznih obdobjih:

The global energy inventory increased by 282 [177 to 387] Zettajoules (ZJ; 10^{21} Joules) for the period 1971–2006 and 152 [100 to 205] ZJ for the period 2006–2018. This corresponds to an Earth energy imbalance of 0.50 [0.32 to 0.69] W m^{-2} for the period 1971–2006, increasing to 0.79 [0.52 to 1.06] W m^{-2} for the period 2006–2018, expressed per unit area of Earth's surface.

SI.2: Opredelitev energijskih pretokov v besedilu AR6.

Vidimo, da so navedena območja nezanesljivosti dokaj široka.

A ne bodimo pikolovski. Precej večji problem predstavlja dejstvo, da poleg navedenih 12 števil manjka še (nesrečna?) 13. Ironično je da manjka ravno številka za absorpcijo sevalne moči toplogrednih plinov. Sicer v besedilu na str. 968 najdemo omenjeno, da mora biti toplogredni učinek $G = 159 \text{ W/m}^2$ (torej $398-239$). Potem je vsota vseh absorbiranih pretokov enaka $80+82+21+159 = 342$, kar ustreza sevanju toplogrednih plinov proti tlam. Ni pa jasno zakaj naj bi toplogredni plini sevali nesimetrično, 342 W/m^2 proti tlam in 239 W/m^2 proti vesolju. Fizikalno bi pričakovali, da bi morale biti sevanje simetrično, saj gre za sevanje istih molekul z isto temperaturo. Pa tudi sicer

lahko vidimo, da se v sistemu pretaka mnogo več moči, kot je Zemlja dobi od Sonca. Kratkoročno je to sicer možno, če bi sistem iz nekega razloga spremenil absorpcijske parametre, vendar le dokler se ne vzpostavi drugačno ravnovesje.

Sklepamo lahko, da ima model na Sl.1 resne pomanjkljivosti.

3 Modeliranje termičnega odziva

Vendar nas tukaj bolj zanima temperaturna razlika 33 K, ki naj bi bila posledica absorpcije toplogrednih plinov v ozračju. Ta temperaturna razlika je faktor, ki množi ostale vplive v ozračju, zaradi česar predvidevamo, da je tako izražena občutljivost na spremembe precej visoka.

A preden se lotimo problema občutljivosti pogledjmo, kako koncentracija toplogrednih plinov v ozračju (predvsem CO₂) vpliva na absorpcijo sevanja. Laboratorijske meritve nam nakazujejo, da je absorpcija sevanja CO₂ sorazmerna logaritmu koncentracije, empirično smo prišli do naslednje relacije:

$$\Delta j = k \ln(C/C_0)$$

Tu je C₀ začetna koncentracija CO₂, C pa je nova spremenjena koncentracija, ln je naravni logaritem (po bazi e = 2,71828...). Konstanta sorazmernosti k = 5,35 pa je bila določena z minimiziranjem odstopanja od izmerjenih podatkov.

Iz te relacije sledi, da se ob vsaki podvojitvi koncentracije CO₂ (C/C₀ = 2) absorpcija sevanja poveča za enako vrednost, in sicer:

$$\Delta j = 5,35 \ln(2) = 3,7 \text{ W/m}^2$$

Sprememba absorpcije sevanja kot posledica podvojene koncentracije CO₂ vpliva tudi na spremembo globalne povprečne temperature površja planeta po naslednjem obrazcu:

$$\Delta T_p = \Delta j \{T_p / [S_0(1-a)]\} = 3,7 \{288 / [1361(1-0,294)]\} = 1,1 \text{ K}$$

Če pa pogledamo zgodovinsko izmerjene koncentracije CO₂ in temperature lahko vidimo, da je bila leta 1850 C₀ = 315 ppm, danes (leta 2020 ob izidu IPCC AR6) pa je C = 420 ppm, torej se je koncentracija povečala za 420/315 = 1,33 ali le za 33%. Zato po relaciji za absorpcijo sevanja pričakujemo manjšo spremembo, in sicer $\Delta j = 5,35 \ln(420/315) = 1,54 \text{ W/m}^2$. Posledično pa bi se temperatura povečala za samo $\Delta T_p = 0,46 \text{ K}$. Toda globalno povprečje izmerjenih temperatur kaže, da se je to v istem obdobju povečalo od okoli 14,5°C na 15,55°C (287,5 K na 288,55K), ali za 1,05 K.

Zaradi tega uradna klimatologija ugotavlja, da ji za pojasnitev zgodovinsko izmerjenih podatkov nekje manjka faktor 3. Tega pa najdejo v povratni zanki prek vodne pare in sicer sklicujoč se na Clausius-Clapeyronovo relacijo, po kateri vsako segrevanje zraka za 1 K omogoča povečanje vlažnosti zraka do 7%. Ker je vodna para močan toplogredni plin, katere absorpcijski spekter pokriva precej širši pas valovnih dolžin kot CO₂, je vpliv te povratne zanke lahko razmeroma velik.

Toda uradna klimatologija pri tem ne upošteva vpliva vodne pare same na temperaturo, kar razlaga s tem, da se ta vpliv natančno kompenzira s tvorbo oblakov in zato povečanim albedom, kar ohlaja površje. Pozitivna povratna zanka prek vodne pare torej zgolj ojačuje vpliv CO₂.

Vrnimo se problemu občutljivosti. V pogojih brez povratne zanke je občutljivost λ_0 (Planckova osnovna občutljivost) določena kot preprosto razmerje med spremembo temperature in spremembo sevalne absorpcije:

$$\lambda_0 = \Delta T_p / \Delta j_i = 1/4\sigma T^3 = T/4\sigma T^4$$

oziroma številčno:

$$\lambda_0 = 255/(4 \times 240) = 0,2656 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$$

Pri tem pa IPCC upošteva še odvisnost od geografske širine in za globalno povprečje določa nekoliko višjo vrednost:

$$\lambda_0 = 0,3125 \text{ KW}^{-1}\text{m}^2$$

To vrednost bomo uporabili tudi tukaj, da se držimo enakega postopka kot pri IPCC. Opozoriti pa je treba, da je v poročilih IPCC običajno navedena inverzna vrednost 3,2 Wm⁻²K⁻¹.

Celotna vrednost λ pa je enaka vsoti posameznih prispevkov ostalih povratnih vplivov:

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

Pri tem se nekatere komponente lahko s časom spreminjajo, nekatere pa so med seboj odvisne, na pr., suha in vlažna adiabatata sta seveda odvisni od količine vlage v zraku. Ker je to težko enoznačno določiti, so območja nezanesljivosti precej široka.

Lahko torej enačbo za spremembo temperature kot posledico delovanja povratnih zank zapišemo v naslednji obliki:

$$\Delta T = \lambda_0 (\Delta j + \lambda_1 \Delta T + \lambda_2 \Delta T + \lambda_3 \Delta T \dots + \lambda_n \Delta T)$$

Brezdimenzijski faktor povratne zanke f je določen kot produkt osnovne Planckove občutljivosti λ_0 in posameznih prispevkov λ_i :

$$f = \lambda_0 \lambda$$

V resnici, kot bomo videli kmalu, je v poročilih IPCC faktor f določen za nazaj iz zgodovinsko izmerjenih podatkov.

Analogno standardni teoriji regulacije v zaprti zanki faktor f ustreza izrazu βA_0 , kjer je β delež izhodne informacije, ki se vrača v sistem, A_0 pa je ojačenje sistema z odprto zanko, brez povratnega deleža. Toda v standardni teoriji regulacije želimo imeti stabilen sistem, zato imamo običajno popravka z negativno povratno zanko in izhodno informacijo atenuirano za faktor β peljemo na invertirajoči vhod sistema, zaradi česar imamo naslednji izraz za ojačenje zaprte zanke:

$$A_z = A_0 / [1 - (-\beta A_0)] = A_0 / (1 + \beta A_0)$$

V uradni klimatologiji pa velja domneva o nestabilnem sistemu s pozitivno povratno zanko, zato:

$$A_z = 1 / (1 - f)$$

Potem spremembo temperature sistema zaradi delovanja povratne zanke po ustreznem dolgem času lahko izrazimo kot produkt osnovne razlike temperature površja in ojačenja sistema:

$$\Delta T = A_z \Delta T_p$$

Brez povratne zanke je $f=0$, $A_Z = 1$ in $\Delta T = \Delta T_p$.

V sistemu z negativno povratno zanko je $f < 0$, $A_Z < 1$ in zato bo $\Delta T < \Delta T_p$, med tem ko v sistemu s pozitivno povratno zanko velja $f > 0$, $A_Z > 1$ in zato $\Delta T > \Delta T_p$.

Vrednosti, ki jih za f navajajo v poročilih IPCC, ter v tam citiranih člankih in v računalniških algoritmi (CMIP3-CMIP5) so relativno velike, pa tudi v širokem razponu, med 0,3 in 0,75. Zaradi tega je tudi ojačenje sistema razmeroma veliko, kar se ne ujema z izmerjenimi temperaturnimi trendi. V naslednjih vrsticah bomo videli zakaj je temu tako in kakšne so posledice.

Že smo določili spremembo temperature površja ΔT_p , kar lahko sedaj izrazimo takole:

$$\Delta T_p = \Delta j_0 \lambda_0 = 3,7 / 3,2 = 1.15 \text{ K}$$

Srednja ocena ravnovesne občutljivosti ΔT_s (Charney [2], pa tudi AR6) znaša 3,3 K (z območjem nezanesljivosti $\pm 1,5$ K). Iz tega lahko podamo oceno za srednjo vrednost f :

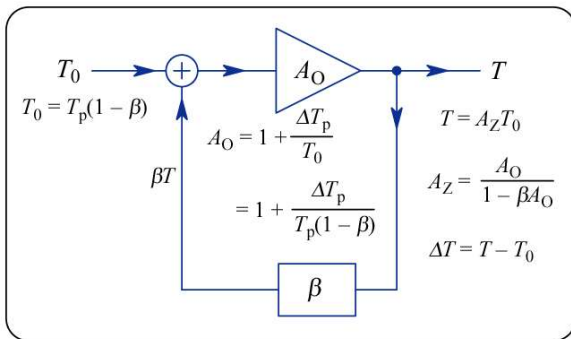
$$f = 1 - \Delta T_p / \Delta T_s = 1 - 1,15 / 3,3 = 0,65$$

Srednja ocena ojačenja sistema je potem enaka:

$$A_Z = 1 / (1 - 0,65) = 2,857$$

To nakazuje zakaj računalniški klimatski modeli napovedujejo v povprečju skoraj $3\times$ večje segrevanje, kot smo ga dejansko izmerili v zadnjih 30 letih, saj imajo vsi sistemsko vgrajeno preveliko ojačenje.

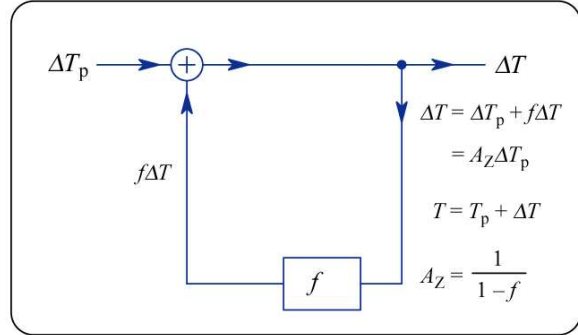
Ugotoviti moramo še zakaj pride do take visoke vrednosti ojačenja. To najpreprosteje ugotovimo, če primerjamo standardno (H. W. Bode, [16]) povratno zanko iz regulacijske teorije v elektroniki z znanim modelom zgrajenim na osnovi enačb, kot jih uporabljajo v klimatologiji. Na Sl.3 je predstavljena Bodejeva pozitivna povratna zanka z ustreznimi relacijami za temperaturo:



Sl.3: Standardna Bodejeva regulacijska povratna zanka.

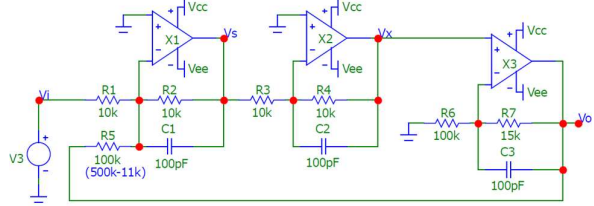
Na Sl.4 pa je predstavljena povratna zanka na osnovi relacij uporabljenih v uradni klimatologiji. Ključna razlika, ki jo je potrebno poudariti je v dejstvu, da povratna zanka v uradni klimatologiji ojačuje zgolj spremembo površinske temperature ΔT_p , kar je fizikalno nesmiselno. Ojačenje mora v sistemski odziv vključevati celotno vhodno količino T_0 , kot je to označeno

na Sl.3. Zaradi tega mora imeti zanka na Sl.4 veliko večje zanočeno ojačenje A_Z za enak izstopni učinek, tudi če je ojačenje odprte zanke $A_O = 1$.



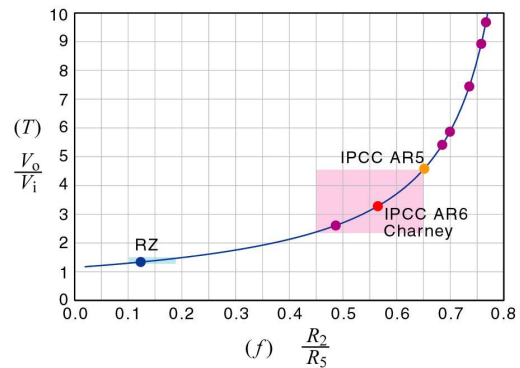
Sl.4: Povratna zanka na osnovi klimatoloških relacij IPCC.

Na Sl.5 je električna shema vezja zgrajenega na osnovi Sl.3, delovanje lahko preveri vsak elektrotehnik. Ojačevalnik X1 invertira vsoto vhodnega toka V_i/R_1 in povratnega toka V_o/R_5 , zaradi česar je potrebna napetost $V_s = -R_2(V_i/R_1 + V_o/R_5)$ spet invertirati (V_x) z ojačevalnikom X2, ojačenje katerega je enako $-R_4/R_3 = -1$. Ojačevalnik X3 ima ojačenje $1 + R_7/R_6 = 1,15$. Povratno zanko $\beta = R_2/R_5$ spreminjamo z vrednostjo R_5 v razponu med 500 kΩ in 11 kΩ, torej bo β med 0,02 in 0,909.



Sl.5: Shema dejanske vezave za simulacijo zanke na Sl.3.

Normirani odziv vezja V_o/V_i prikazuje Sl.6.

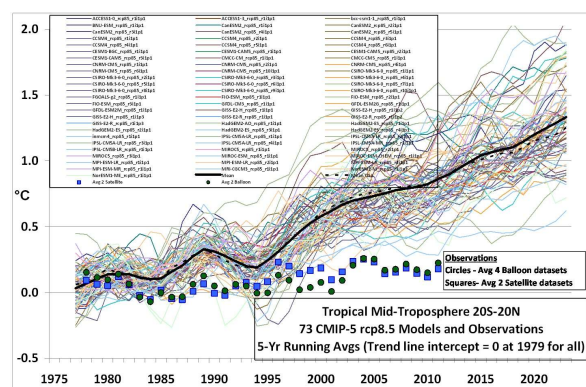


Sl.6: DC odziv vezja na Sl.5 na spremembo razmerja R_2/R_5 .

V Sl.6 modra točka RZ označuje odziv na parametre izračunane na osnovi regulacijske zanke. Rdeča točka označuje odziv na parametre kot so podani v IPCC AR6 [1], ter Charney [2].

Oranžna točka označuje odziv na parametre podane v IPCC AR5, vijolične točke pa so rezultati iz nekaterih člankov citiranih v poročilih IPCC. Izračuni skladni s standardno teorijo regulacije ob ojačenju odprte zanke $A_0 = 1,15$ in β v razponu med 0,1 in 0,2 dajo sistemsko občutljivost v razponu med 1,1 in 1,5 K. Ker pa pri IPCC uporabljajo napačno metodo, dobijo srednjo vrednost občutljivosti 3,2 K z območjem nezanesljivosti med 2,5 in 4,5 K. Pri nekaterih avtorjih, katerih članki so med citiranimi v poročilu IPCC, pa so vrednosti še višje, do 10 K.

Zaradi te napake, ki jo imajo v svojih algoritmi vgrajeno vsi računalniški klimatski programi, so vse njihove napovedi prihodnjih temperaturnih trendov preveliki za približno faktor 3. To lahko vidimo iz primerjave trendov računalniških napovedi in izmerjenega segrevanja ozračja, Sl.7, kar je ob svojem pričevanju v ameriškem Kongresu pokazal dr. John Christy [17].



Sl.7: Trendi računalniških napovedi segrevanja ozračja (73 CMIP-5 model po scenariju RCP8.5) v primerjavi s temperaturami izmerjenimi s sateliti (modri kvadratici) in meteorološkimi baloni (zeleni krogi). J. Christy, 2015.

4 Zaključek

Računalniški klimatski modeli s pomočjo katerih analizirajo in napovedujejo prihodnje segrevanje planeta vsebuje vsaj eno resno napako, zaradi katere je klimatska občutljivost na podvojitve vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju (predvsem CO₂) ocenjena 5–6 krat previsoko. Posledično so tudi računalniško napovedani trendi preveliki vsaj za faktor 3.

Faktor pozitivne povratne zanke, izračunan na osnovi standardne teorije regulacije je relativno majhen in v nobenem primeru ne povzroča klimatske nestabilnosti planeta. Negativne povratne zanke (predvsem zaradi tvorbe oblakov in posledično zniževanja albeda), ki jih tukaj nismo vključili v obravnavo, zlahka prevladujejo nad dejavniki pozitivne povratne zanke in zato dolgoročno ohranjajo relativno stabilne klimatske razmere. Manjše spremembe so posledica variacij v časovni zakasnitvi akumulirane toplote predvsem v oceanih, pa tudi posledica naključnih lokalnih sprememb.

Človeški vpliv zaradi izpustov toplogrednih plinov je majhen, večji vpliv imajo lokalne spremembe namembnosti zemljišča.

Datasets / Viri podatkov

- [1] CO₂ Emissions 1850-2022
<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>

- [2] CO₂ concentrations measured at Mauna Loa, 1958-2024
https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
 [3] Berkeley Earth Temperature Anomaly 1850-2020
http://berkeleyearth.lbl.gov/auto/Global/Complete_TAVG_complete.txt
 [4] HadCRUT v5.0 Temperature Anomaly 1850-2023
https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis_gl.txt
 [5] University of Alabama, Huntsville, satellite era temperature anomaly
https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tlt/uahncdc_lt_6.0.txt

References / Literatura

- [1] IPCC AR6 Workgroup 1, The Physical Science Basis, Full Report
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
 [2] J.G. Charney, A. Arakawa, D.J. Baker et al., Carbon dioxide and climate: a scientific Assessment. Report of an ad-hoc study group on carbon dioxide and climate, Climate Research Board, Assembly of Math. Phys. Sci., Nat. Research Coun., Woods Hole, 1979.
 [3] J. Hansen, A. Lacis, D. Rind et al., Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms, in: J. Hansen, T. Takahashi (Eds.), Climate Processes and Climate Sensitivity, AGU Geophysical Monograph 29, Maurice Ewing Vol. 5, Amer. Geophys. Union, Washington DC (1984) 130–163.
 [4] R.S. Lindzen, Y.-S. Choi, On the observational determination of climate sensitivity and its implications, Asia-Pacific J. Atmos. Sci. 47 (2011) 377–390.
 [5] C.W. Monckton of Brenchley, W. W.-H. Soon, D.N. Legates and W.M. Briggs, Why models run hot: results from an irreducibly simple climate model, Sci. Bull. 60:1 (2015) 122–135, doi:10.1007/s11434-014-0699-2.
 [6] C.W. Monckton of Brenchley, The temperature feedback problem, Energy & Envir. 26:5 (2015) 829-840.
 [7] J.A. Curry, P.J. Webster, Thermodynamics of atmospheres and oceans, Acad. Press, Amsterdam, 1999.
 [8] T. Friedrich, A. Timmermann, M. Tigheelaar et al, Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming. Sci Adv 2(11) (2016) e1501923, doi:10.1126/sciadv.1501923.
 [9] N.G. Andronova and M.E. Schlesinger, Objective estimation of the probability density function for climate sensitivity. J. Geophys. Res. Atmos. 106 (2001) 22605–22611.
 [10] G. Myhre, E.J. Highwood, K.P. Shine and F. Stordal, New estimates of radiative forcing due to well-mixed greenhouse gases, Geophys. Res. Lett. 25 (1998) 2715–2718.
 [11] J.M. Gregory, W.J. Ingram, M.A. Palmer et al., A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity, Geophys. Res. Lett. 31 (2004) L03205, doi:10.1029/2003GL018747.
 [12] R.D. Cess, M.-H. Zhang, G.L. Potter et al., Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general-circulation models. Science 262(5137) (1993) 1252–1255.
 [13] H. Harde, Radiative transfer calculations and assessment of global warming by CO₂, Int. J. Atmos. Sci (2017), doi:10.1155/2017/9251034.
 [14] G. Myhre, C.L. Myhre, P.M. Forster and K.P. Shine, Halfway to doubling of CO₂ radiative forcing. Nature Geoscience (2017) advance online publication, September 18.
 [15] R.B. Skeie, T.K. Berntsen, G. Myhre et al., Anthropogenic radiative forcing time series from pre-industrial times until 2010. Atmos. Chem. Phys. 11 (2011) 11827–11857, doi:10.5194/acp-11-11827-2011.
 [16] H.W. Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand Reinhold, New York, 1945.
 [17] John Christy Testimony May 13, 2015, Natural Resources Committee
<https://www.youtube.com/watch?v=Cz45fETw078>