

O problemima suvremene klimatologije

Jesmo li zbilja u podnebnjoj krizi i što nam govore podaci

Erik Margan

Općenito o znanstvenoj metodi

"Kao znanstvenik moram reći to što vidim. ... Ne možeš se baviti znanošću ako te brine da bi ljudi mogli pomisliti da si lud."

(D. Adams, Štoperski vodič po galaksiji)

Političari nas uvjeravaju, da se moramo pouzdati u znanost, ili čak vjerovati znanosti.

No znanosti se ne vjeruje, znanost se provjerava. To je temelj znanstvene metode: kad znanstvenik ustanovi postojanje određene korelacije između određenih količina ili pojava, te zaključi da se vjerojatno radi o uzročno-poslijedičnom odnosu, njegova dužnost je da svoju hipotezu empirijski provjeri i rezultate objavi, kako bi ih i drugi mogli provjeriti.

Ali čak i ako provjeravanje potvrdi hipotezu, to još ne znači da je neki drugi eksperiment ne bi mogao opovrgnuti. Filozof Karl Popper nas uči da teorije nije moguće konačno dokazati, moguće ih je samo konačno opovrgnuti i za opovrgnuće je dovoljan jedan sam argument, koji se ne slaže s postavljenom tezom. Ili, rječima Nobelovca Richarda P. Feynmana:

"Nije važno kako lijepa je teorija, niti kako pametan i ugledan je njen autor; ako se ne slaže s eksperimentom, je pogrešna."

Amerikanci imaju i jednu drugu uzrečicu:

"U Boga vjerujemo. Svi ostali moraju dati na stol neoborive dokaze – ili keš!"

Ovo zadnje možda zvuči cinično, no na žalost u stvarnosti to nije rijedak slučaj.

Klimatologija je zapletena znanost, brojni čimbenici utječu na mnoge druge i veoma je teško razlučiti međusobno povezane utjecaje. Mjerenja bi morali izvesti tako da se odstrane svi drugi mogući čimbenici ili utjecaji osim količine ili utjecaja, koje želimo izmjeriti. To na žalost nije uvijek moguće, odnosno barem ne u tolikoj mjeri da bi mogli sa sigurnošću tvrditi da se radi o uzročno-poslijedičnoj relaciji isključivo između količina uzetih u obzir. Isto tako mjerenja izvedena u kontroliranim i izoliranim laboratorijskim uvjetima nisu nužno reprezentativna i za uvjete u prirodi, gdje naravno nastupaju svi čimbenici i utjecaji istovremeno i u najrazličitijim međusobnim ovisnostima, bilo neposredno, bilo sa različito dugim zakašnjenjima.

Globalna prosječna temperatura, koju tako rado navode kao glavni argument hipoteze o globalnom zagrijavanju, je u prvom redu statistički konstrukt: nije moguće jednostavno zbrojiti temperature u Sahari i na Antarktiki, te podijeliti s dva, već i samo zato, što se u Sahari izmjenjuju dan i noć u toku 24 sata, a na Antarktiki u toku 12 mjeseci. Osim toga, promjene temperature mogu biti poslijedica brojnih utjecaja, kako lokalnih, tako i globalnih, pa čak i astronomskih.

Sama činjenica, da postoji određena korelacija u određenom geološkom razdoblju među trendom porasta atmosferske koncentracije CO₂ i umjetno izračunane prosječne globalne temperature nije

još dokaz uzročno-poslijedičnog odnosa, niti ne znači da su ostali mogući utjecaji isključeni. Općenito, korelacija može biti indikator mogućeg postojanja uzročno-poslijedičnog odnosa, no korelaciju između dviju količina može uzrokovati i neki treći zajednički uzrok, ili se jednostavno može raditi o slučajnoj podudarnosti inače međusobno neovisnih količina. Na primjer, kad odlazim u trgovinu uvijek obujem cipele i uzmem novčanik: novčanik uzmem, jer u trgovini moram platiti ono što kupim, no obuću nosim iz sasvim drugog razloga.

U svakom slučaju je stvarni karakter odnosa potrebno tek dokazati.

U nastavku ćemo pored detaljne analize pokazati podatke na temelju kojih će postati jasno, da je uzročnost upravo suprotna od one, koju nam nekritično navode mediji, politika i podnebnici aktivisti.

Sažetak misije IPCC

Međuvladni odbor za podnebnne promjene (*Intergovernmental Panel for Climate Change*, IPCC) je političko (ne znanstveno!) tijelo, ustanovljeno 1988. godine u okviru Organizacije udruženih nacija (OUN) i Međunarodne meteorološke organizacije (MMO), kojega je ustanovna zadaća da vladama država posreduje rezultate ocjenjivanja podnebnih situacija po svijetu, te savjetuje i koordinira njihove aktivnosti za sprječavanje i ublaživanje posljedica podnebnih promjena.

U tu svrhu IPCC svakih 6-7 godina izdaje ocjenjujući izvještaj (*Assessment Report*) u kojemu se analiziraju promjene od zadnjeg izvještaja, ocjenjuje se vjerojatne buduće promjene u okviru raznih scenarija ispusta tzv. stakleničkih plinova (prije svega ugljikovog dioksida CO₂, metana CH₄, te drugih), pa se na toj osnovi savjetuje vladama poduzimanje ili intenziviranje aktivnosti u smjeru smanjivanja ispusta i uvedbe drugih ograničenja ili podrške drugim djelatnostima, za koje se vjeruje da pomažu pri ograničavanju porasta globalne prosječne temperature, kao i aktivnosti vezane za zaštitu stanovništva pred ekstremnim vremenskim pojavama, osiguranja proizvodnje hrane, informiranja i osvještavanja stanovništva o utjecaju njihovih aktivnosti na podnebnne promjene, itd.

Izvještaji IPCC su podijeljeni u tri kategorije, za svaku je zadužena posebna radna grupa za tu priliku izabranih stručnjaka za pojedina područja. Ovdje nas pretežno zanimaju samo rezultati rada prve radne grupe (*Workgroup I*), koja razrađuje znanstveni i analitički dio izvještaja. Ostale dvije grupe se bave uglavnom posljedicama onoga što ustanovi prva radna grupa.

Temeljna zadaća IPCC, određena u samoj ustanovnoj listini je pronaći i analizirati sve moguće načine na koje čovjek s svojom aktivnošću utječe na okoliš, prirodne procese u njemu i u konačno na samu klimu. Šire poznavanje i tumačenje prirodnih procesa je isključivo u funkciji tog osnovnog cilja. Tako usko opredjeljena aktivnost nužno dovodi do smanjene objektivnosti, pa i pristranosti u odnosu na čovjekove aktivnosti. Te se automatski tretiraju kao strane i ugrožavajuće, te zato nepoželjne pri nastojanjima za očuvanje prirodnog okoliša u svom prvobitnom obliku.

Na svaku čovjekovu aktivnost se uvijek gleda s stajališta mogućeg štetnog utjecaja čak i u slučaju kada se radi o uređivanju i kultiviranju okoliša. Tako je ljudska vrsta zapravo *a priori* predstavljena kao ometajući element s interesima suprotnim prirodnom razvoju, umjesto kao produkt tog istog prirodnog razvoja. Takvo stajalište proizlazi iz teorije o Gaji ("Mati Zemlja") kao idealnoj prirodnoj cjelini, koja je uvijek u stanju savršene ravnoteže, dok čovjek samo narušava tu idealnu ravnotežu.

Takvo pojednostavljeno i iskrivljeno gledanje nas navodi da se zapitamo tko je u stvari taj, koji niječe postojanje podnebnih promjena, s obzirom da već i sama zamisao o postojanju idealne ravnoteže isključuje mogućnost bilo kakvih promjena, pa i onih s prirodnim uzrocima.

Znanstvena objektivnost IPCC je upitna i iz drugih razloga. U svojim analizama prikazuju razlike između utjecaja stakleničkih plinova i ostalih prirodnih procesa, no pri tom prikazuju samo neke prirodne procese, utjecaj kojih je relativno mali, mnoge druge procese jednostavno ignoriraju i niti ne spominju, ili njihov utjecaj minimiziraju i zanemaruju. Rezultat je prikazan tako, kao da je promjena prosječne globalne temperature isključivo posljedica porasta koncentracije stakleničkih

plinova u atmosferi. Slično je i pri samoj koncentraciji stakleničkih plinova, za koje navode da su isključivo ili najmanje pretežno posljedica čovjekovih aktivnosti. Uz to prikazuju i druge prirodne izvore i ponore tih plinova, no ti su prikazani kao da su uvijek u savršenoj ravnoteži.

U svojem radu radna grupa sama ne obavlja nikakva znanstvena istraživanja, ograničava se samo na skupljanje već objavljenih znanstvenih radova (naravno, po svojim kriterijima; radove koji ukazuju na rezultate suprotne od usmjerenja IPCC jednostavno ne uključuju među referencije). Iz tako napravljenog izbora stvaraju nekakav prosjek, uz neke arbitrarno ocijenjene intervale nesigurnosti (koji su često drugačiji nego u originalnim radovima), te konačno razglasi da su ustanovljene ovisnosti statistički značajno opredjeljene, pri čemu se navode različiti stupnjevi vjerojatnosti ("*likely*", "*very likely*", ili "*virtually certain*", odnosno slično za nekorelirane količine, "*not very likely*", itd.).

Tako je i stručnjacima teško ustanoviti da li su negdje pogriješili, i ako jesu, gdje i koliko. Potrebno je detaljno analizirati što su napravili, te ukazati na moguće greške u obliku brojeva, koji se ne slažu, te po mogućnosti ukazati i na fizikalne nepravilnosti u modeliranju prirodnih procesa, ili na pogrešne početne pretpostavke.

Naravno, većini ljudi je to nemoguće, bilo da su im podaci teško dostupni, bilo da ne vladaju dovoljno fizikom, matematikom i statistikom. Pa i kada im netko predoči analizu, toj teško mogu slijediti, hrvanje s brojevima i mjerskim jedinicama ih odbija, te na kraju ostanu pri pitanju komu vjerovati. No pozivanje na znanstvene autoritete, iako prilično rašireno u medijima, nema nikakve znanstvene težine. Stroga znanstvena analiza problema je jedina mjerodavna za dokaz, drugog oruđa nemamo.

Tko uopće smije komentirati klimatološke podatke?

Političari i podnební aktivisti danas tvrde, da je vrijeme za raspravu poteklo i da je vrijeme za akciju, jer "planet već gori". Na taj način pokušavaju izbjeći raspravu, jer s jedne strane žele javnosti prikazati sliku o skoro potpunoj znanstvenoj suglasnosti (*consensus*), a s druge strane su svjesni, da ne poznaju najbolje sve znanstvene argumente i boje se, da bi ih neki bolji poznavatelj mogao dovesti u neugodnu situaciju, da ne bi mogli uvjerljivo odgovoriti na suprotne tvrdnje. U svakom slučaju je znanstveno suglasje *contradictio in adjecto*.

Jedan od često upotrijebljenih argumenata, kojim pokušavaju unaprijed diskreditirati svakoga tko bi se makar malo protivio "opće prihvaćenom stajalištu" je, da ga etiketiraju kao "podnebnog zanijekovača" (eng. *climate denier*). Time se pokušava asociacijom na "*holocaust denier*" moralno ocrniti sumnjičave do čovjekovog utjecaja na podnebné promjene. Pri tom im je sasvim svejedno da li netko tvrdi, da se podneblje u zadnjih 70 godina nije statistički bitno promijenilo, ili samo tvrdi, da čovjekova uloga nije dominantna i da su zapažene promjene pretežno posljedice prirodnih ciklusa.

Također se može često čuti prigovor kako protivnik "nije klimatolog", pa zbog toga nijedan njegov argument ne može imati nikakvu težinu. Pustimo po strani činjenicu, da su prvi studenti klimatologije diplomirali tek prije nekoliko godina, prije toga takvog studijskog smjera na nijednom univerzitetu nije bilo, klimatolozi su dolazili u pravilu iz redova meteorologa, geologa, geografa, astronoma, pa drugih fizičara, biologa, kemičara; bitno je bilo, da su se bavili jednim od vidika problema podneblja, ne nužno cjelokupne klimatologije, kakvu imamo danas u mislima kad govorimo o klimatologiji kao znanstvenoj kategoriji.

Medijski napad te vrste je nedavno doživio i Nobelovac John F. Clauser (poznat kao značajan znanstvenik s područja kvantne mehanike, godine 2022. dobio je Nobelovu nagradu skupa s Alanom Aspectom i Antonom Zeilingerom za eksperimente s prepletenim fotonima, te posljedično dokazom o kršenju Bellove nejednadžbe). Clauser je pokazao da računarski modeli, koji su podloga analiza dosadašnjih i budućih podnebnih promjena u raznim scenarijima IPCC, ne uzimaju u obzir utjecaje oblaka na podnebné promjene, jer ih niti ne znaju pravilno modelirati, jednostavno ih modeliraju kako konstantne. Ukoliko se uzme u obzir promjene u gustini oblačnog pokrova Zemlje, te zbog toga promjene u albedu (odbojnosti sunčevog zračenja od vrhova atmosfere), za utjecaj CO₂ i ostalih stakleničkih plinova na globalno zagrijavanje ostaje jako malo. Clausera su grubo napali skoro svi mediji, njihov glavni argument je bio da "nije klimatolog", te da na području klimatologije do sada nije objavio ništa. No njegovi kritičari zaboravljaju, da je ravnoteža toplotnog (dakle elektromagnetnog) zračenja Sunca i Zemlje osnova za izračun prosječne globalne temperature, pa zato Clauser kao fizičar ima sve potrebne kvalifikacije, da o tom problemu izloži svoje mišljenje i pokaže svoje izračune.

A i inače u tom argumentu nema nikakve logike. Ako ne možeš kao laik komentirati klimatske promjene, kako o tome mogu govoriti aktivisti, koji također nisu stručnjaci? Skladno s tom logikom ne bi smjeli komentirati nogometne utakmice, jer nismo nogometaši, treneri, selektori. Ili ne bi smjeli govoriti o automobilima, jer nismo automehaničari ili profesionalni vozači. Ili da ne bi smjeli govoriti o umjetnosti, jer nismo umjetnici ili umjetnički kritičari. Ili ne bi smjeli komentirati poteze vlade na području financijske, socialne, ili kakve druge politike, jer nismo

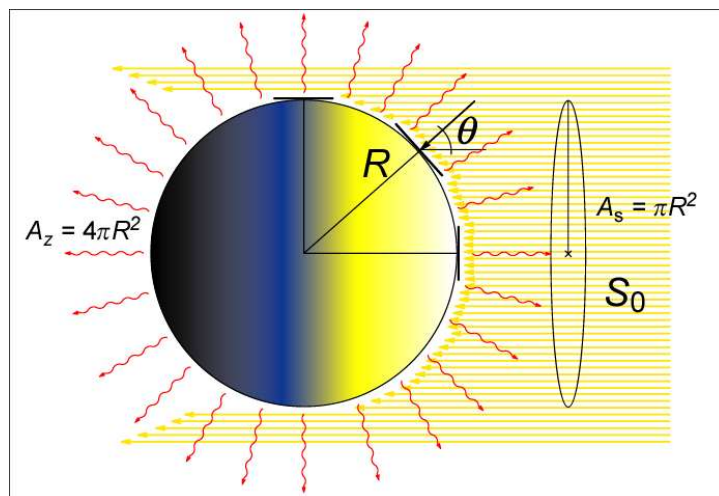
profesionalni političari. Zanimljivo je, da kad kritiziramo poteze vlade na području bilo koje druge zakonodajne problematike, svatko će nam s odobravanjem prikimati, ali ako kritiziramo vladu zbog pogrešnih poteza na području "zelene" politike, odmah nas proglase za ostarjele konzervativce i zanijekovače podnebnih promjena. Glupost!

Prije par godina sam o "zelenoj" politici debatirao s kolegom iz službe. Kad mu je ponestalo fizikalnih i racionalnih argumenata, pokušao me je retorički satjerati u kut tipičnim moralnim aktivističkim argumentom, rekavši: *"Ljude ne brine koliko ti znaš, željeli bi znati koliko si ti zabrinut!"* Za trenutak sam se zamislio i odgovorio: *"Zbilja sam jako zabrinut kako malo ljudi znaju!"*

Ima još mnogo drugih besmislenih argumenata na području podnebnog aktivizma, no predaleko bi nas odvelo ako bi pokušali sve logički analizirati, a o samom problemu podnebnih promjena pak ne bi rekli ništa konkretno. Zato je vrijeme da pogledamo osnovne podatke i teorijske osnove suvremene klimatologije. U raspravi nećemo moći izbjeći nešto matematike, fizike, kemije i biologije, no pokušat ćemo ostati u srednješkolskim okvirima, kako bi omogućili što širem krugu čitatelja da razumiju i prate navedene argumente.

Osnovne klimatološke pretpostavke

Osnovna ideja suvremene klimatologije proizlazi iz fizikalno opravdanog i logičnog zahtjeva o dugoročnoj energetskej ravnoteži toplotnog zračenja. Izračun zahtjeva malo elementarne geometrije, prikazane na Sl.1. Sunčevo kratkovalno zračenje (blisko infracrveno, vidno i blisko ultraljubičasto područje valnih dužina, odnosno frekvencija) zagrijava Zemljinu površinu, koja onda zrači u dugovalnom infracrvenom području prema hladnom svemiru.



Sl.1: Geometrijske osnove za izračun ravnoteže toplotnog zračenja.

Površinska gustina snage Sunčevog zračenja je bila teoretski izračunata već krajem XIX stoljeća na temelju Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja, a kasnije na temelju Planckovog spektralnog zakona zračenja, te izmjerena visinskim meteorološkim balonskim sondama, a zatim i satelitima u orbiti oko Zemlje. Tu gustinu zračenja obično nazivamo solarna konstanta (iako nije sasvim konstantna, mijenja se zbog Sunčeve aktivnosti u 11-godišnjim ciklusima za oko 0,1%) i obično ju označavamo sa S_0 , njena vrijednost iznosi 1361 W/m^2 (stariji i nešto manje precizni satelitski senzori su davali vrijednosti oko 1366 W/m^2).

Sunčevo ukupno zračenje, koje pada na Zemlju proporcionalno je površini kruga s polumjerom jednakim polumjeru Zemlje. To zračenje se absorbira na površini Zemlje i zagrijava površina zrači prema svemiru na sve strane površinom jednakom površini Zemlje. Pri tom problem pojednostavljamo uzevši u obzir srazmjerno brzu rotaciju zemaljske kugle oko svoje osi, da neosvijetljena površina nema dovoljno vremena da se potpuno ohladi, pa uzimamo, da toplotno zračenje Zemlje odgovara njenoj prosječnoj temperaturi.

Matematički možemo dakle zapisati, da ukupna snaga Sunčevog zračenja odgovara solarnoj konstanti pomnoženoj s površinom kruga kroz koji Sunčevo zračenje dostiže Zemlju:

$$P_s = A_s S_0 = \pi R^2 S_0$$

Zemlja u termičkoj ravnoteži mora zračiti jednakom snagom, pa će prosječna površinska gustina snage tog zračenja biti srazmjerna površini Zemljine kugle. Možemo dakle zapisati:

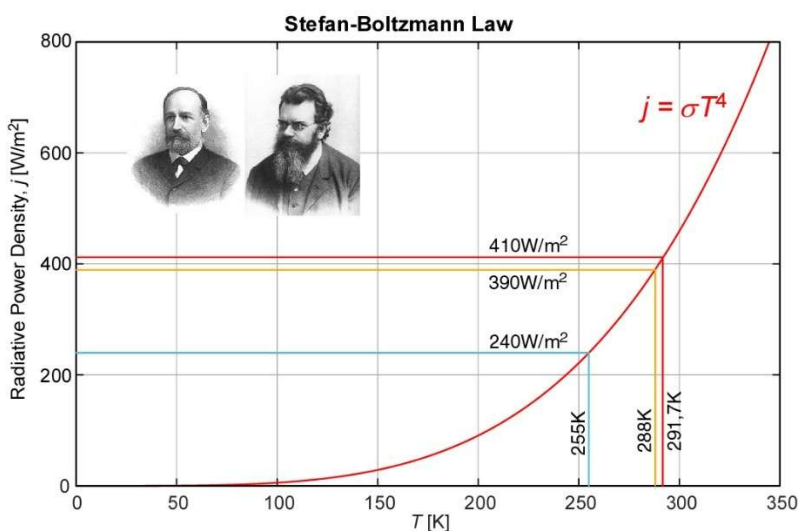
$$j_z = P_s / A_z = \pi R^2 S_0 / 4\pi R^2 = S_0 / 4 = 1361 / 4 = 340,25 \text{ W/m}^2$$

Površinska gustina zračenja Zemlje mora dakle biti jednaka četvrtini gustine Sunčevog zračenja.

Ovisnost zračenja o temperaturi tijela koje zrači nam daje Stefan-Boltzmannov zakon zračenja, Sl.2. Taj zakon vrijedi uz pretpostavku, da je tijelo "crno", dakle da u potpunosti absorbira zračenje, koje pada na njegovu površinu, te da istu količinu zrači i samo, pa smijemo reći da je tijelo u termičkoj ravnoteži. U tim uvjetima vrijedi relacija srazmjernosti zračenja s četvrtom potencijom absolutne temperature u Kelvinovim stupnjevima (što odgovara °C+273):

$$j = \sigma T^4$$

pri čemu je vrijednost Stefanove konstante $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.



Sl.2. Stefan-Boltzmannov zakon zračenja idealnog crnog tijela; označene su vrijednosti iz izračuna u nastavku teksta.

Vrijednost Stefanove konstante je bila sprva eksperimentalno određena, kasnije su to izračunali pomoću drugih osnovnih fizikalnih konstanti:

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3)$$

Tu je Boltzmannova termodinamička konstanta:

$$k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ Ws/K},$$

Brzina svjetlosti:

$$c = 299792458 \text{ [m/s]},$$

Planckova akcijska konstanta:

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ Ws/Hz}$$

Matematički bi mogli ovisnost zračenja o temperaturi obrnuti, pa bi iz poznatog zračenja izračunali temperaturu tijela (no pritom moramo biti oprezni, fizikalno obrnuti postupak nije uvijek moguć):

$$T = (j/\sigma)^{1/4}$$

U slučaju prethodno izračunanog Zemljinog toplotnog zračenja bi gustini snage 340 W/m^2 odgovarala temperatura od oko 278 K (ili 5°C). No tako izračunata vrijednost bi bila točna samo ako Zemlja ne bi imala atmosferu i bila potpuno crna. Zemljina atmosfera absorbira dio Sunčevog zračenja, a dio se odbija od svijetlih površina oblaka i ledom i snijegom pokrivenih površina, pa taj dio zračenja ne zagrijava površinu. Isto tako je spektar zračenja ovisan o svojstvima različitih površina Zemlje, nemaju svi materijali jednaku emisivnost i nisu svi spektri jednaki Planckovom spektru idealno crnog tijela. I konačno, sama atmosfera absorbira dio Zemljinog dugovalnog zračenja, pa sama zrači svojom temperaturom, koja je niža od površinske. Zbog svega toga je potrebno uvesti nekoliko korekcija u gornji pojednostavljeni model.

Pogled na Zemlju iz orbite, Sl.3, nam raskriva da je albedo (odbojnost) Zemlje relativno velik zbog odboja Sunčeve svjetlosti od oblaka i ledenih površina, a i ostale površine reflektiraju dio spektra.



Sl.3: Pogled na Zemlju iz satelita u geostacionarnoj orbiti.

Na temelju staelitskih mjerenja se ocjenjuje, da je albedo Zemlje približno $a = 0,294$. Površinu Zemlje dakle zagrijava samo $(1-a)$ sunčevog zračenja. Prosječna emisivnost površine se ocjenjuje na približno $\varepsilon = 0,91$. No neki znanstvenici navode znatno drugačije vrijednosti, od 0,6 do 1,0. Ovdje ćemo se držati ocjene, koju preuzima i IPCC, da je $\varepsilon = 1$.

Ako jednadžbu za ravnotežu zračenja korigiramo za navedenu vrijednost albeda, možemo zapisati:

$$j_z = (1-a) S_0 / 4 = (1 - 0,294) \times 1361 / 4 = 240 \text{ W/m}^2$$

Tom zračenju bi tada odgovarala temperatura:

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

No temperatura 255 K (-18°C) nije više temperature površine Zemlje, nego temperature zračenja same atmosfere.

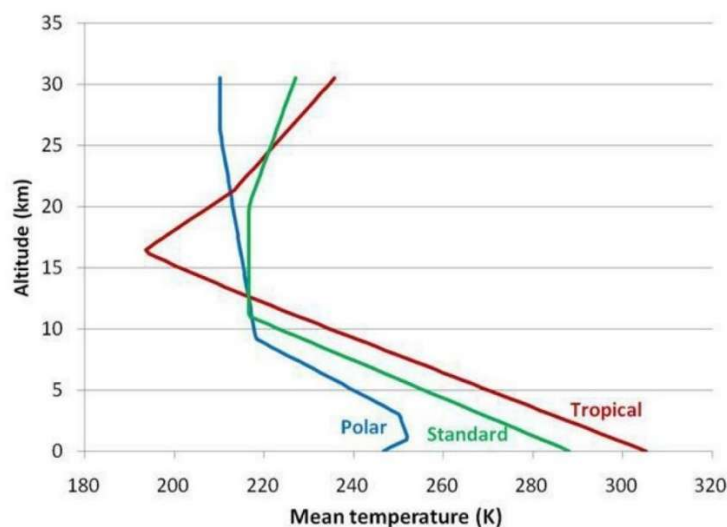
Prosječna površinska temperature planeta, koju je moguće izračunati kao prosjek svih termometarskih podataka meteoroloških stanica (s popravkom za nadmorsku visinu) je bila ocjenjena na 288 K ($+15^{\circ}\text{C}$). Pri toj temperaturi mora biti gustina snage zračenja oko 390 W/m^2 .

Ukoliko uzmemo u obzir kombinaciju suhe i vlažne adiabate (zakonitosti po kojoj temperature pada s nadmorskom visinom, pri čemu se oslanjamo na američku Standardnu atmosferu), za svakih 100 m nadmorske visine pada temperatura za oko 0,589 K.

Ako dakle imamo temperaturnu razliku između površine i temperature na kojoj u prosjeku zrači atmosfera, koja iznosi $288 - 255 = 33 \text{ K}$, možemo izračunati, da atmosfera zrači najvećim intenzitetom na nadmorskoj visini od oko $33 \times 0,589 \times 100 = 5600 \text{ m}$. To je također visina kod koje je zračni tlak približno jednak polovini tlaka pri tlu, i gustina mase zraka je približno jednaka polovini gustine pri tlu. Radi se dakle o nekakvoj srednjoj atmosferi u odnosu na nadmorsku visinu.

Kinetička energija molekula zraka je proporcionalna brzini zvuka, pa je iz mjerenja brzine zvuka moguće izračunati prosječnu kinetičku energiju molekularnih sudara, zbog kojih ima atmosfera tako određenu temperature na toj nadmorskoj visini.

Na Sl.4 su prikazane ovisnosti temperature od nadmorske visine za tropsko i polarno područje, te standardna prosječna ovisnost. Pri tom nas zanima pretežno samo nadmorska visina do 10 km (poznata kao troposfera), unutar koje se odvijaju sve meteorološke pojave.



Sl.4. Atmosferski profil temperature i nadmorske visine za polarna i tropska područja, te standardni profil.

Primjetimo da vlada u polarnim područjima talna inverzija, temperature na visini od 1-1,5km je obično viša od temperature pri tlu.

Pojava talne inverzije je česta i u područjima s kontinentalnom klimom zimi, a ponekad i u jesen i proljeće. Sl.5 prikazuje dnevne varijacije adiatae.

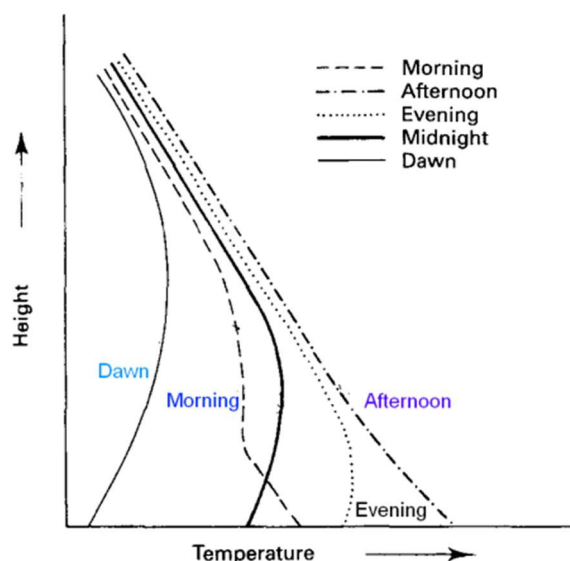
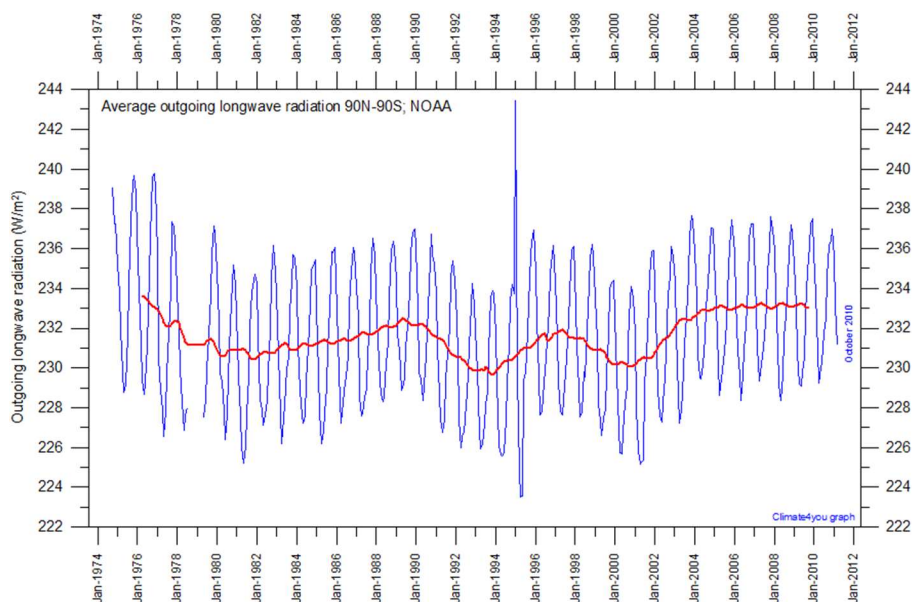


Figure 4.10 Typical diurnal variation in atmospheric stability. Note the breakdown of inversion conditions established during the preceding cloudless night. The morning heating is seen to proceed more rapidly for the surface than for the atmosphere and the night-time cooling is also more rapid for the surface than for the air.

Sl.5: Dnevne varijacije adiatae.

Pogledajmo sada što pokazuju satelitska mjerenja atmosferskog zračenja, Sl.6:



Sl.6: Izlazno dugovalno prosječno atmosfersko zračenje izmjereno s satelitima u periodu 1974-2012.

Na Sl.6 opažamo najprije znatne sezonske varijacije zračenja, koje su posljedica veće kopnene površine na sjevernoj polutki, koja se ljeti više zagrijava a zimi više hladi nego pretežno morska površina južne polutke.

Također možemo opaziti, da je prosječna gustina snage zračenja oko 232 W/m^2 , za razliku od naše izračunate vrijednosti 240 W/m^2 . Tu razliku možemo djelomično pripisati činjenici, da satelitski senzori ne absorbiraju sve valne dužine jednakom osjetljivošću, duge valne dužine nose nisku energiju, koju je teže detektirati. Inače toj razlici u zračenju odgovara razlika u temperaturi oko 2°C , ili približno 300 m visinske razlike, ne radi se dakle o značajnijem odstupanju.

No najvažnije je primijetiti da se dugoročni prosjek nije bitno promijenio, iako bi to očekivali zbog absorpcije zračenja radi povećane koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi.

Spomenuta temperaturna razlika od 33 K između površine i centra mase atmosfere je za klimatologe dokaz postojanja stakleničkog učinka atmosfere. Ta velika razlika potom utječe na klimatsku osjetljivost ovisno od koncentracije stakleničkih plinova. Visoka osjetljivost znači, da relativno male razlike u koncentraciji proizvode relativno velike promjene prosječne globalne temperature planeta.

No veliko je pitanje kako dobro se slažu razni stručnjaci u analizi i ocjenama klimatske osjetljivosti. Klimatsku osjetljivost ćemo detaljnije pogledati nešto kasnije, za sada samo na kratko preletimo usporedbu ocjena različitih stručnjaka i vrijednosti koje se navode u izvještajima IPCC.

Najprije moramo pogledati definiciju pojma. U izvještajima IPCC nailazimo na dvije definicije.

Prijelazna klimatska osjetljivost (*transient climate sensitivity*, TCS) se upotrebljava pri analizi postupnog povećanja koncentracije stakleničkih plinova za analizu različitih scenarija porasta temperature, no ta analiza je za naše potrebe prezahtjevna, pa o tome neće biti govora.

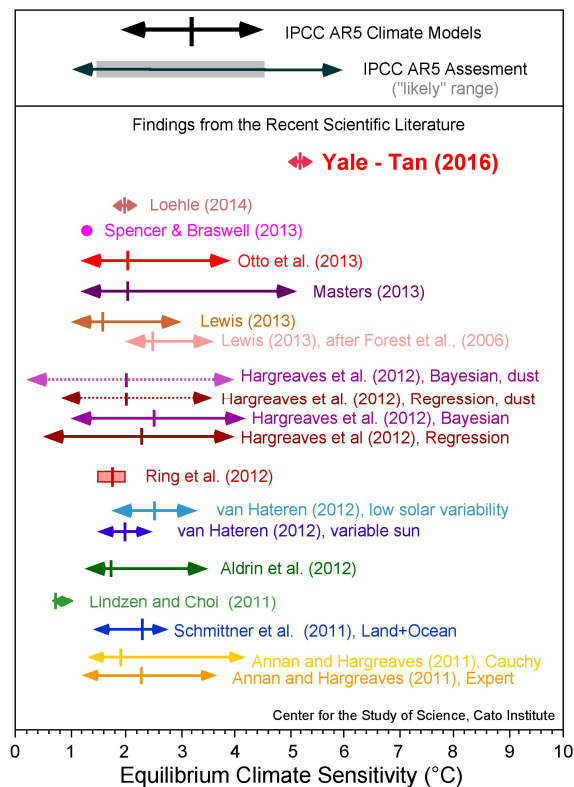
Ravnotežna klimatska osjetljivost (*equilibrium climate sensitivity*, ECS) je nešto jednostavnija, tu se pretpostavlja da se u nekom trenutku količina stakleničkih plinova udvostruči i takva ostane dok se ne uspostavi nova ravnoteža toplotnog zračenja. Pri višoj vrijednosti ECS će se nova ravnoteža zračenja (pri višoj temperaturi) uspostaviti u kraćem vremenu nego za niže vrijednosti.

Pogledajmo usporedbu studija različitih autora, koje su pri IPCC u petom izvještaju (AR5) uzeli u obzir za svoju ocjenu vrijednosti ECS, Sl.7.

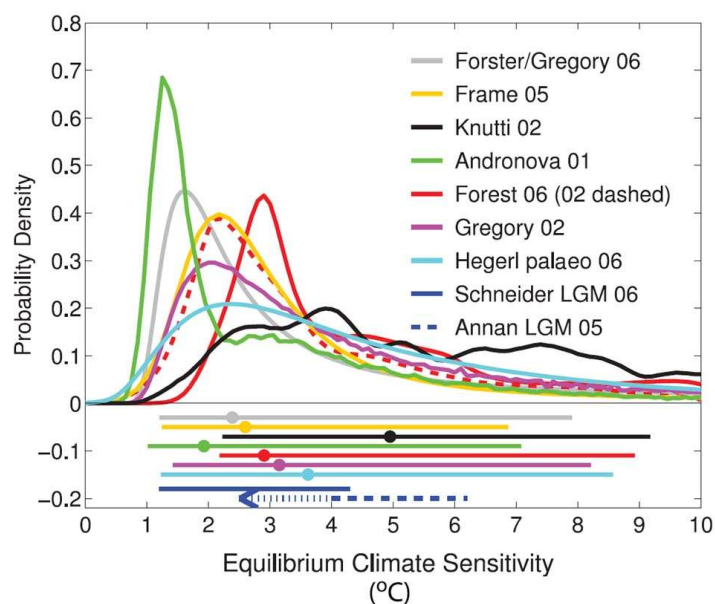
Velika većina autora studija navod vrijednosti oko 2°C za udvostručenje koncentracije stakleničkih plinova. Samo jedan par autora navodi vrijednost ispod 1°C , dok samo jedan par navodi vrijednost oko 5°C . I što radi IPCC? Uzme prosjek oko 3°C , budući da većina autora navodi prilično široke intervale (ne)sigurnosti analize. Nije baš jako znanstveno.

Sličnu usporedbu možemo pogledati i za skupinu studija uzetih u obzir za zadnji, šesti izvještaj IPCC, prikazane na Sl.8. Tu je na vertikalnoj osi prikazana gustina vjerojatnosti ispravnosti određenog rezultata. Najvišu gustinu vjerojatnosti, daleko najbolje ocijenjenu vrijednost, je imala skupina ruskih autora s vrhom oko $1,2^\circ\text{C}$ za udvostručenje koncentracije stakleničkih plinova.

No IPCC u AR6 navodi vrijednosti oko 3°C, dok je u intervalu ocjene *very likely* naveden raspon od 2°C do 5°C, Sl.9.



Sl.7. Usporedba vrijednosti ravnotežne klimatske osjetljivosti kod raznih autora u usporedbi s IPCC.



Sl.8. Gustina vjerojatnost ECS studija uzetih u obzir za IPCC AR6.

Table 7.13 | Summary of equilibrium climate sensitivity (ECS) assessment.

Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)	Central Value	Likely	Very likely	Extremely likely
Process understanding (Section 7.5.1)	3.4°C	2.5°C to 5.1°C	2.1°C to 7.7°C	–
Warming over instrumental record (Section 7.5.2)	2.5°C to 3.5°C	>2.2°C	>1.8°C	>1.6°C
Paleoclimates (Section 7.5.3)	3.3°C to 3.4°C	<4.5°C	>1.5°C	<8°C
Emergent constraints (Section 7.5.4)	2.4°C to 3.3°C	–	1.5°C to 5.0°C	–
Combined assessment	3°C	2.5°C to 4.0°C	2.0°C to 5.0°C	–

Sl.9. Tabela 7.13 izvještaja IPCC AR6, str.1007.

No vratimo se problemu odnosa između temperature i koncentracije stakleničkih plinova. Iz laboratorijskih mjerenja proizlazi, da je ovisnost temperature o koncentraciji CO₂ logaritmička funkcija. Točan fizikalni uzrok nam (još uvijek, nakon gotovo 60 godina istraživanja) nije poznat, no izmjerenim podacima se dobro podudara funkcija s numerički određenim koeficijentom:

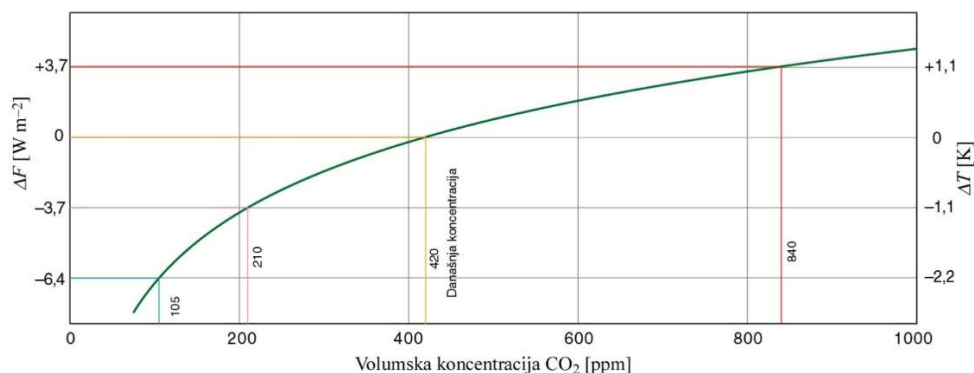
$$\Delta F = 5,35 \ln(C/C_0)$$

Promjena absorpcije zračenja ΔF je dakle srazmjerna prirodnom logaritmu (po bazi $e = 2,71828\dots$) koncentracije C u odnosu na početnu koncentraciju C_0 .

Za udvostručenje koncentracije ($C/C_0 = 2$) vrijedi:

$$\Delta F = 5,35 \ln(2) = 5,35 \times 0,6931 = 3,7083 \text{ W/m}^2$$

Dakle za svako udvostručenje koncentracije CO₂ se gustina snage absorbiranog zračenja povećava za oko 3,7 W/m². Sl.10 prikazuje tu logaritmičku ovisnost relativno na današnju koncentraciju CO₂ (oko 420 volumskih dijelova na milijon, *parts per million*, ppm).



Sl.10. Logaritamska ovisnost promjene gustine snage zračenja i temperature u ovisnosti od koncentracije CO₂.

Promjenu temperature dobijemo ako promjenu gustine snage zračenja pomnožimo omjerom početne prosječne temperature planeta s solarnom konstantom smanjenom za albedo:

$$\Delta T = \Delta F \{T_p / [S_0(1-a)]\} = 3,71 \{288 / [1361(1-0,3)]\} = 1,1 \text{ K}$$

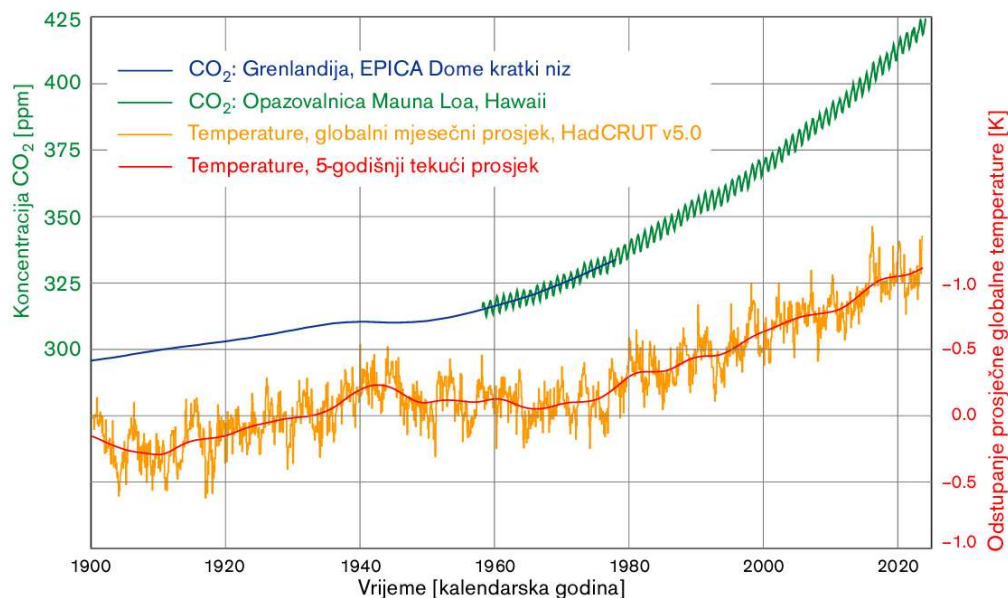
Toj promjeni odgovara vertikalna ljestvica na desnoj strani grafa na Sl.9.

Tu sada nastaje ključni problem!

Povjesna mjerenja temperature i koncentracije CO₂ nam pokazuju prilično drgačiju sliku. Sistematična mjerenja temperature s dovoljno gustom mrežom meteoroloških stanica (barem u Evropi, Sjevernoj Americi, Australiji i Japanu) počela su se vršiti godine 1850., a Međunarodna meteorološka organizacija osnovana je godine 1873. Iako su mnogi dijelovi svijeta ostali slabo pokriveni sve do iza drugog svjetskog rata, ipak možemo usporedbom kasnijih podataka steći približan dojam o tadašnjim promjenama temperature.

Koncentraciju CO₂ u zraku se je mjerilo sporadično i različitim metodama, pretežno kemijskim, te u slabo kontroliranim uvjetima. Iako su ta mjerenja vršili znanstvenici, među njima i neki Nobelovci, ta mjerenja se ne uzimaju kao dovoljno reprezentativna. Mjerenja koncentracije optičkim metodama započela su tek godine 1958., kada je C.D. Keeling postavio prvu mjernu napravu u okviru Opservatorija Mauna Loa na obronku vulkana Havajskog otoka.

Dodatne podatke za prethodno razdoblje dobili smo tek nakon godine 1990., kada su analizom zračnih mjehurića uhvaćenih u ledu iz bušotina polarnih područja (Grenlandije i Antarktike) dobiveni podaci i za koncentraciju CO₂ (analizom izotopa ugljika ¹⁴C) i za temperaturu (analizom izotopa kisika ¹⁸O). Kombiniranjem i kalibracijom svih tih podataka dobili smo graf na Sl.11. Elektronske adrese službenih arhiva numeričkih podataka su navedene u spisku literature.

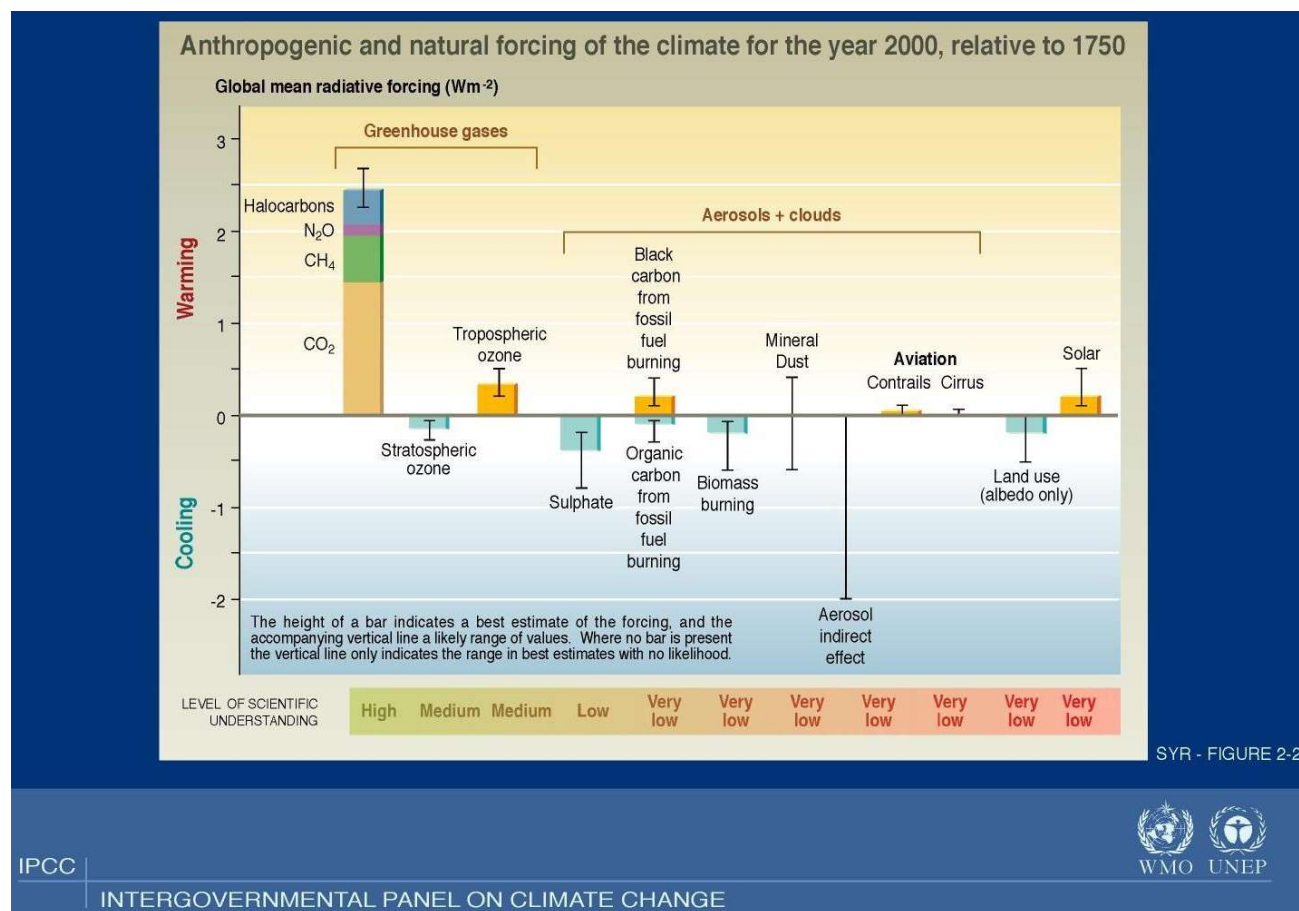


Sl.11. Povijesni podaci prosječnih mjesečnih temperatura i koncentracije CO₂.

Iz Sl.11 možemo otčitati, da se je u razdoblju od 1900-2022 prosječna temperatura porasla za oko $1,2^{\circ}\text{C}$, dok je koncentracija CO_2 porasla za samo 45% (od 290 do 420 ppm). To bi značilo otprilike 33% za 1°C . To se nikako ne slaže s laboratorijskim mjerenjima na Sl.9, gdje se je koncentracija CO_2 morala udvostručiti za temperaturnu razliku $1,1^{\circ}\text{C}$.

Da bi pojasnili porast temperature s porastom koncentracije CO_2 nam **manjka približno faktor 3**.

IPCC, umjesto da bi se pouzdao u laboratorijska mjerenja, te 2/3 porasta temperature logično pripisao prirodnim varijacijama (različitih uzroka), uzima povijesne podatke kao nedvoumne, te u prirodnim procesima traži "mehanizam", kojim bi se utjecaj CO_2 posredno pojačao za manjkajući faktor 3. Time se opravdava i vrijednost ravnotežne klimatske osjetljivosti $\text{ECS} = 3^{\circ}\text{C}$ za udvostručenje koncentracije stakleničkih plinova (dakle ne samo CO_2). Taj problem je poznat već dugo, još od priprema trećeg izvještaja IPCC (g. 2000.). Sl.12 prikazuje koliko utjecaja na klimu su imali pojedini čimbenici prema njihovoj ocjeni u razdoblju od 1750-2000.



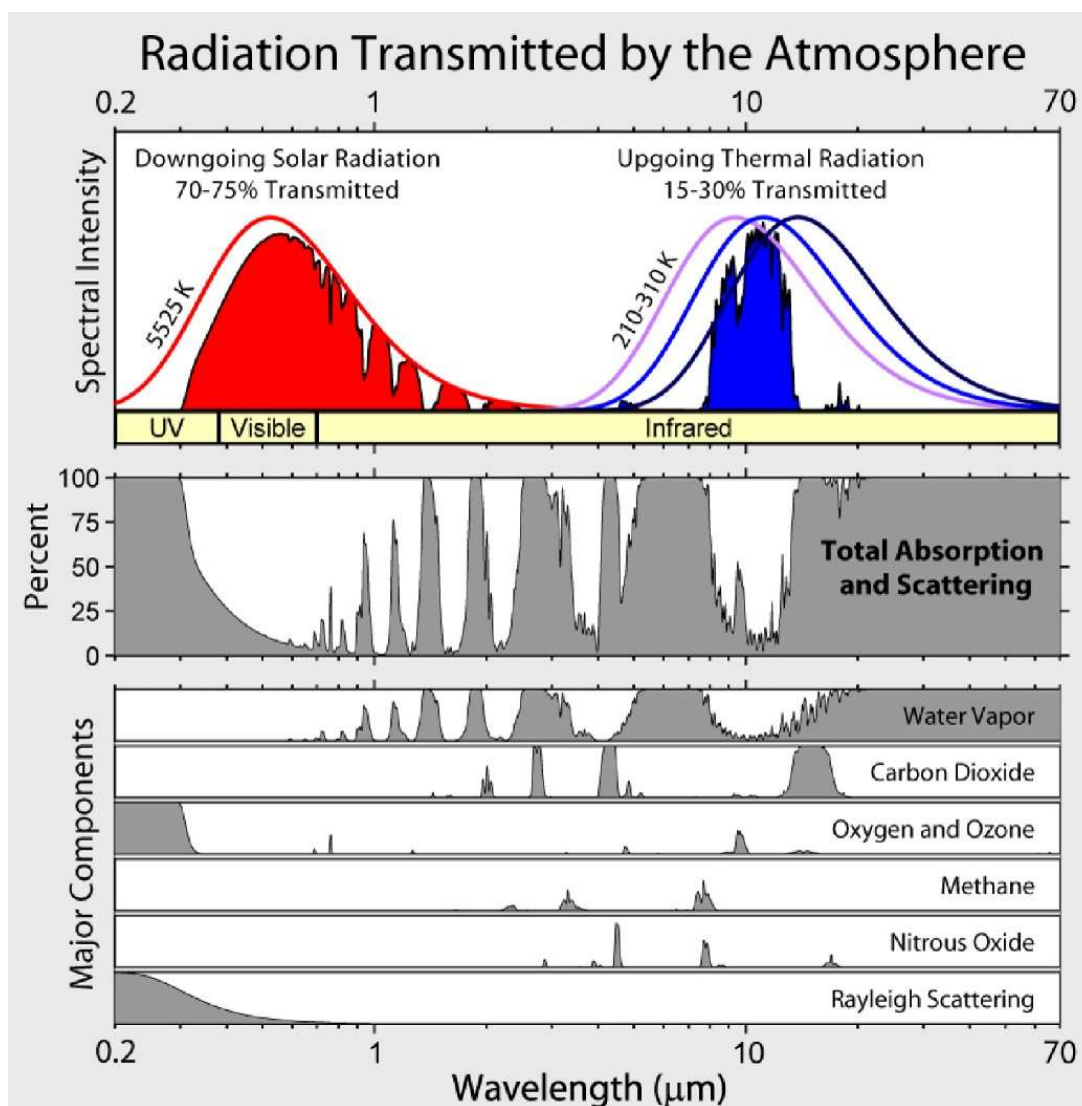
Sl.12. Tabela iz trećeg izvještaja IPCC s pregledom svih utjecaja na klimu.

Vidimo, da su utjecaj CO_2 ocijenili na oko $1,4 \text{ W/m}^2$, a zajedno sa svim ostalim stakleničkim plinovima (izuzevši vodenu paru!) oko $2,5 \text{ W/m}^2$. Mnoge utjecaje ni ne znaju dobro ocijeniti, o čemu govore veliki intervali sigurnosti, posebno za sulfate, goruću biomasu, anorgansku prašinu. aerosole, pa i albedo i promjene sunčevog zračenja. Pri tome se uopće ne sramuju niske ili vrlo

niske ravni znanstvenog razumijevanja (štogod to značilo!) u donjem dijelu grafa. No ravan znanstvenog razumijevanja utjecaja stakleničkih plinova je opredjeljena kao visoka!

Posebno zanimljivo je potpuno odsustvo utjecaja vodene pare i oblaka. Znamo, da koncentracija vodene pare može varirati od 0 u pustinjama i u polarnim predjelima, pa do 4% u tropskim prašumama, prosječno iznosi oko 1%, što je 25 puta više od CO_2 . Vodena para interagira s elektromagnetnim zračenjem na skoro svim valnim dužinama, ne samo na par uskih rezonancija poput CO_2 . Dio spektra vodene pare se prekriva s spektrom CO_2 , pa mu dakle znatno smanjuje utjecaj. Također vodena para kondenzira u veće aglomerate, kapljice i ledene kristale, koji tvore više ili manje guste oblake, pa time smanjuje insolaciju i zagrijavanje niskih zračnih masa. Ukoliko bi dakle na Sl.12 dodali utjecaj vodene pare, svi ostali utjecaji se uopće ne bi vidjeli.

Na Sl.13 su prikazani normirani spektri zračenja Sunca i Zemlje, te absorpcijski spektri plinova.

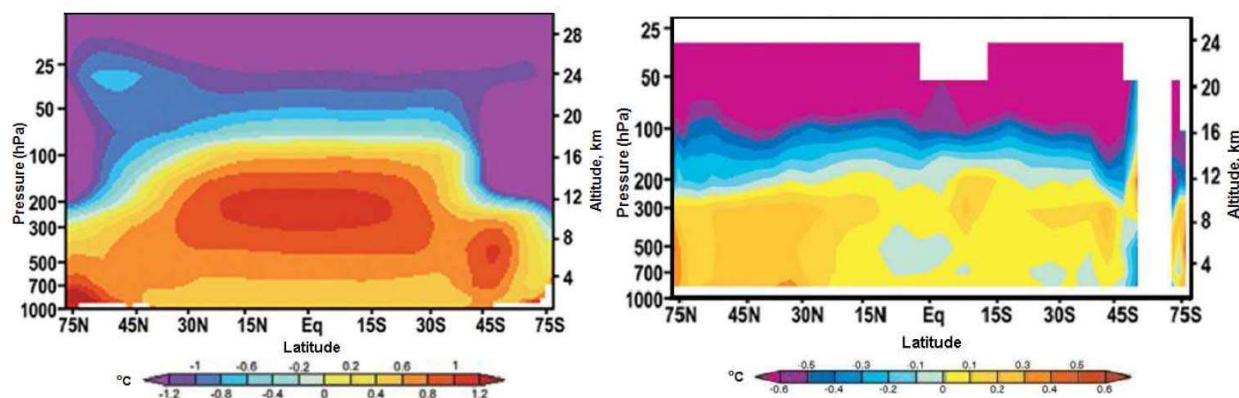


Sl.13. Usporedba spektra zračenja Sunca i Zemlje te absorpcijski spektri plinova u atmosferi u odnosu na valnu dužinu.

Sl.13 često prikazuju kao dokaz utjecaja stakleničkih plinova na globalnu temperaturu, no ta slika je prije obrnuti dokaz! CO_2 ima tri izrazite rezonancije, oko $2,8\text{ }\mu\text{m}$, $4,3\text{ }\mu\text{m}$, te $15\text{ }\mu\text{m}$, te jednu manje izrazitu oko $2,1\text{ }\mu\text{m}$. Od tih je samo ona pri $15\text{ }\mu\text{m}$ u području u kojem je zračenje Zemlje veliko, ostale su u području u kojem ni Sunce ni Zemlja ne zrače mnogo, a osim toga su potpuno ili djelomično prekrivene spektrom vodene pare. Pa i dio spektra između $15\text{--}16\text{ }\mu\text{m}$ prekriva spektar vodene pare.

Važno je opaziti i to, da spektar CO_2 i spektar vodene pare dostižu unutar svoji područja 100% absorpciju već pri sadašnjim koncentracijama, pa ako bi se koncentracije dodatno povećale, jednostavno nema više fonona u zračenju Zemlje, koje bi molekule plina absorbirale. Jedino što se mijenja s povećanjem koncentracije je strmina na rubovima spektralne absorpcije, a ti utjecaji su kod CO_2 vrlo mali.

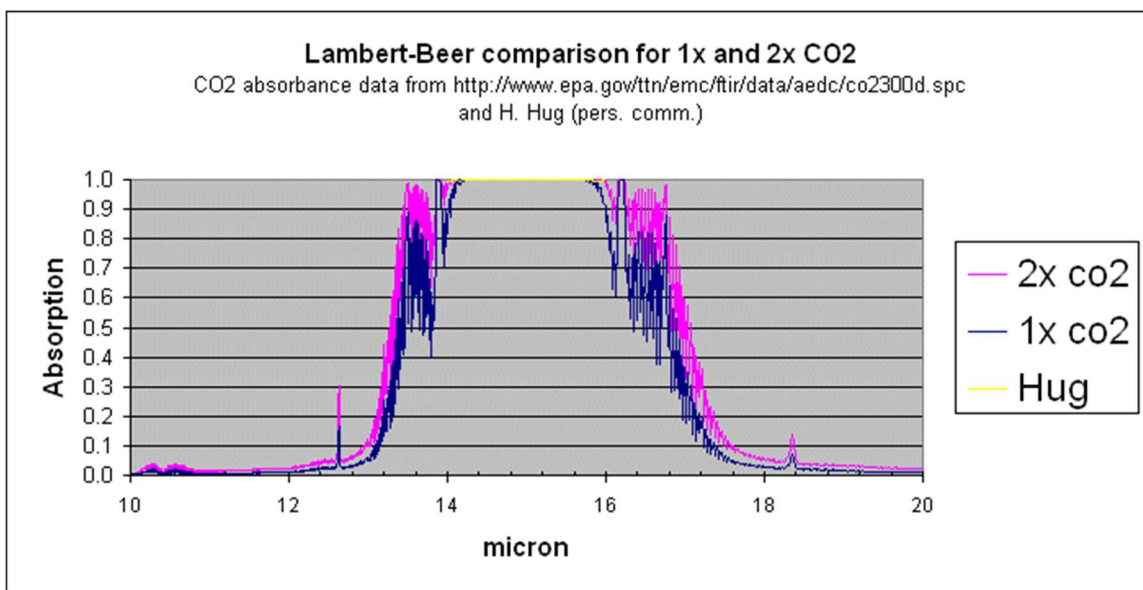
Zbog navedenog kažemo, da je spektar CO_2 u zasićenju, s koncentracijom amplituda absorpcije nema više kamo rasti, jer se u niskom sloju atmosfere svi fotoni već absorbiraju. Razlika nastaje tek u gornjim slojevima atmosfere, dakle iznad $5,6\text{ km}$, gdje je gustina zraka upola manja, a osim toga je znatan dio vodene pare već kondenzirao, pa je koncentracija vodene pare znatno manja. To je teoretski razlog, da IPCC tvrdi, da se globalno zagrijavanje mora očitovati najviše u području između $5\text{ i }8\text{ km}$ nadmorske visine. Sl.14 prikazuje na lijevoj strani računarsko modelirani očekivani utjecaj CO_2 , desno su mjerenja izvedena meteorološkim balonima: u zadnjih 30 godina nismo zabilježili brže zagrijavanje na visinama $5\text{--}8\text{ km}$.



Sl.14. Lijevo je računarsko modeliran trend zagrijavanja u zadnjih 30 godina, desno mjerenja meteorološkim balonima.

Dokaz o zasićenju spektralne absorpcije CO_2 vidimo, ako pogledamo detaljnije dio spektra između valnih dužina $14\text{--}16\text{ }\mu\text{m}$, Sl.15, gdje vidimo potpunu absorpciju, kako pri sadašnjoj koncentraciji CO_2 , tako i pri udvostručenoj koncentraciji.

Udvostručenjem koncentracije se absorpcija poveća samo na strmim rubovima spektra i to za samo oko 2%. Mogući budući porast koncentracije CO_2 se dakle neće odraziti u mjerljivom porastu temperature; ako ta bude i dalje rasla, to će biti posljedica drugih prirodnih uzroka. Predviđeni preporučeni cilj podnebnice politike od $1,5^\circ\text{C}$ u odnosu na predindustrijsko razdoblje je dakle već osiguran, ograničavanje upotrebe fosilnih goriva radi ograničavanja ispusta s ciljem smanjenja porasta temperature je besmisleno.



Sl.15. Absorpcijski spektar CO₂ je u zasićenju pri sadašnjoj koncentraciji i udvostručenoj koncentraciji.

S promjenom koncentracije se dakle mijenja samo strmina rubova spektra. Spektar se neće širiti prema kraćim i dužim valnim dužinama, jer su energetske nivoe međuatomskih veza kvantizirani i ovise o energiji elektronskih orbitala. Nešto dodatne energije doprinosi interakcija s molekularnim rotacijama preko Dopplerovog pomaka, koji se odražava u oscilacijama na rubovima spektra.

Karakteristični spektar elektromagnetne interakcije znamo izračunati s visokom preciznošću iz poznatih osnovnih svojstava pojedinih molekula (atomskih masa i vezne energije elektronskih orbitala). Pri tome je intrinzični dipolni moment molekule neposredno ovisan o nesimetriji polja efektivnog električnog naboja elektronskih orbitala. Jedno-atomski (argon, Ar) i dvo-atomski plinovi (dušik, N₂, kisik, O₂) imaju uvijek prostorno simetrična polja, te zbog toga nemaju izražen dipolni moment.

Neke tri-atomske molekule imaju energetske minimume međuatomskih veza kad atomi tvore određen kut, na primjer kod molekule vode, H₂O, je kut vodikovih atoma u odnosu na kisikov atom 105°. Zbog toga ima molekula vode izrazit intrinzični dipolni moment, koji se dodatno povećava i spektralno raširi preko svih mogućih vibracijskih i rotacijskih energetskih stanja molekule. Osim toga molekule vodene pare tvore različito velike aglomerate, od dvije molekule pa do veličine makroskopskih kapljica, što utječe na rezonantne frekvencije atomskih veza. Utjecaj toga smo vidjeli na Sl.13, vodena para ima brojne rezonancije i pokriva širok spektar valnih dužina.

Za razliku od molekule vode je molekula CO₂ simetrična, atomi kisika su poravnati s atomom ugljika i međusobno tvore kut od 180°. To znači da molekula CO₂ nema intrinzični dipolni moment u svojem osnovnom energetskom stanju. Nesimetrija nastane tek ako molekulu uzbudimo u jedno od viših energetskih stanja, zbog čega nastane privremeni dipolni moment, pa molekula može absorbirati foton na jednoj od svojih karakterističnih rezonantnih frekvencija.

Sl.16 prkazuje moguće načine oscilacija molekule CO_2 , te pripadajuće središnje valne dužine pojedinih rezonantnih frekvencija. Svaka rezonancija se može malo raširiti zbog molekularnih rotacija, kao posljedica Dopplerovog pomaka.

Da bi molekula CO_2 absorbirala foton, mora najprije u sudaru s nekom drugom molekulom pridobiti dio energije, koji uzbuđi jednu od karakterističnih rezonancija. Važno je primijetiti, da molekula u određenom uzbuđenom energetsom stanju ne može absorbirati foton iste valne dužine, no može absorbirati foton valne dužine neke od ostalih rezonancija. Recimo, ako molekula već oscilira pri valnoj dužini $15\ \mu\text{m}$, može ponovno absorbirati foton te iste valne dužine samo ako se prethodno oslobodi dijela energije i prijeđe u neko drugo uzbuđeno stanje.

Rezultat toga je da molekule CO_2 relativno rijetko absorbiraju fotone, to se događa u prosjeku dva do tri puta u sekundi pri normalnim uvjetima gustine zraka pri tlu, te pripadajućeg tlaka i temperature. Naime, broj molekularnih sudara je u tim okolnostima jako velik, svaka molekula zraka doživi oko 10^{11} (sto milijardi) sudara u sekundi (više o tome nešto kasnije). Dio energije sudara se razdjeli u kinetične energije sudarenih molekula, dio prijeđe u jednu od mogućih rezonancija, a dio u jedno od mogućih rotacijskih stanja. Zbog toga su molekule rijetko u pravom energetsom stanju da mogu absorbirati foton određene valne dužine, a isto tako rijetko ostanu na miru dovoljno dugo, da se mogu spontano osloboditi suvušne energije emisijom fotona određene valne dužine.

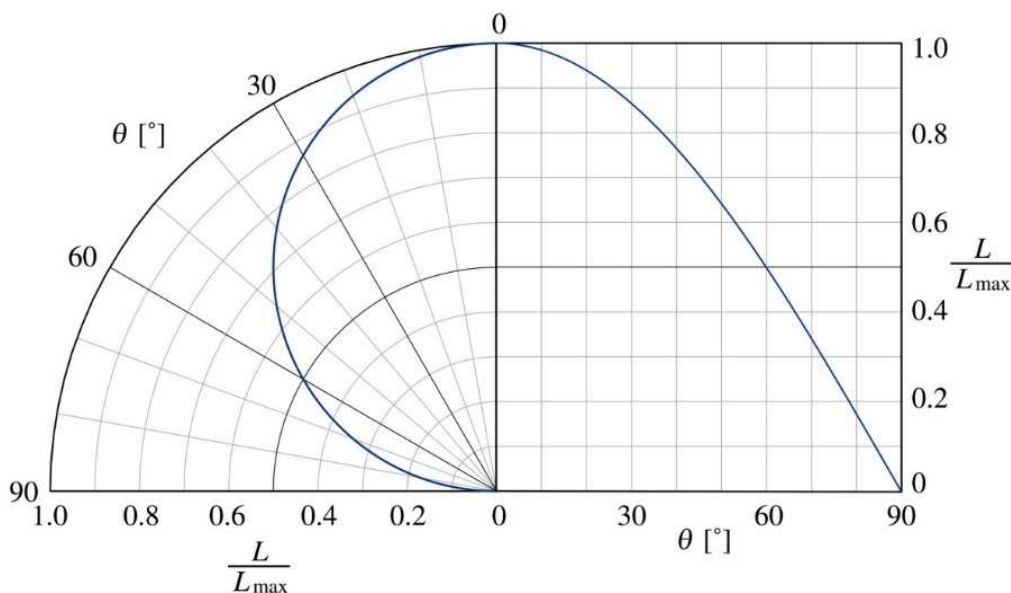


Sl.16. Oscilacije molekule CO_2 s pripadajućim frekvencijama i valnim dužinama.

S druge strane je gustina molekula CO_2 u tim uvjetima dovoljno velika, da u prvih 200 m visinske razlike absorbira praktično sve fotone, koje tla zrače pri temperaturi 288 K u intervalu valnih dužina CO_2 . No osnovni problem leži u činjenici da tla u dodiru s zrakom ne zrače jednaku količinu energije, koliko bi inače zračila u vakuumu. Zbog molekularnih sudara zraka i tla su tla u termičkoj ravnoteži s tankim doljnjim slojem zraka, koji je na istoj temperaturi kao tla. Zbog toga se prijenos toplote u tim uvjetima odvija preko molekularnih sudara, a tek mali dio preko zračenja. Upravo tu leži velika pogreška IPCC, oni pretpostavljaju da je prijenos energije zračenjem dominantan, te zbog toga moraju umjetno povećati učinak stakleničkih plinova, što onda rezultira visokom vrijednošću izračunane klimatske osjetljivosti na povećanje koncentracije stakleničkih plinova. To ćemo detaljnije pokazati malo kasnije. Prije toga pogledajmo ponovo definiciju i uvjete u kojima vrijedi Stefan-Boltzmannov zakon zračenja.

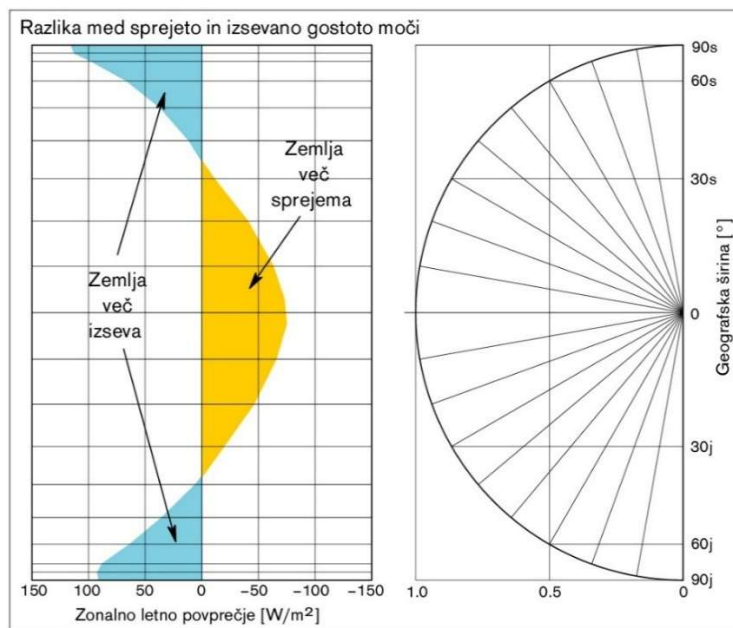
Već smo spomenuli, da Stefan-Boltzmannov zakon zračenja vrijedi za idealno crno tijelo, koje zrači konstantnom protokom energije, pri čemu je gubitak energije dovoljno mali, da ga možemo zanemariti (makar tek na kratak rok). Eksperimentalno takvo stanje uspostavimo tako, da imamo dobro izoliranu kavitaciju, pocrnjenu iznutra, te zagrijanu na neku dovoljno visoku temperaturu, da zračenje možemo mjeriti (najčešće bolometarskim senzorima). U tu svrhu mora imati kavitacija otvor dovoljno male površine, da gubitak energije zračenjem ne smanjuje bitno unutrašnju temperaturu kavitacije. Osim toga mora otvor zračiti prema vakuumu, da ne bi prisutnost kakvog plina dodatno hladila površinu otvora.

U tim vrlo specifičnim uvjetima vrijedi već na početku (str.6) navedena proporcionalnost zračenja četvrtoj potenci absolutne temperature. No osim toga je i gustina energije zračenja ovisna o smjeru zračenja prema Lambertovom kosinusnom pravilu: zračenje je najgušće (ima najveći intenzitet) u smjeru okomito na površinu otvora, dok je u smjeru usporedno s površinom zračenje jednako nuli. Lambertovu ovisnost od kosinusa kuta u odnosu na normalu na površinu zračenja prikazuje Sl.17, na lijevoj polovini slike u polarnim koordinatama, na desnoj polovini u kartezijskim koordinatama.

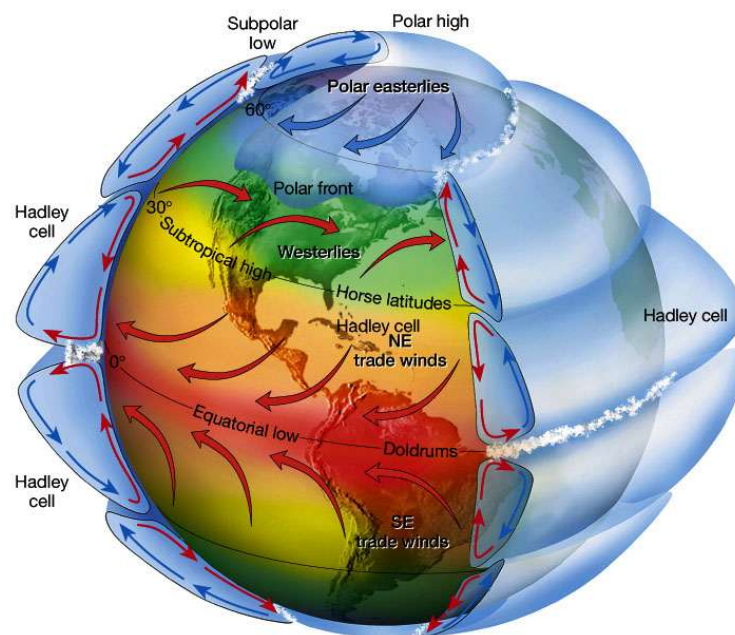


Sl.17. Lambertova zakonitost ovisnosti intenziteta zračenja od kosinusa kuta u odnosu na okomicu na površinu.

Isti kosinusni zakon vrijedi i za absorpciju zračenja, na primjer Sunčevo zračenje na Zemlji ima najveću gustinu u ekvatorijalnom pojasu, u polarnim područjima je ta vrlo mala (za ravnodnevnicu je na samom polu nula), no zbog nagnutosti Zemljine osi rotacije za 23° se količina energije, koju dobivaju polovi u toku godine mijenja, šest mjeseci je tama, idućih šest mjeseci je Sunce stalno iznad obzorja. Zbog toga polove pretežno zagrijava toplota (pretežno u vodi oceana), koju je Zemlja dobila na ekvatoru, što prikazuju Sl.18 i Sl.19.



Sl.18. Razlika između primljene i emitirane energijske gustine zračenja u odnosu na geografsku širinu Zemlje. U ekvatorijalnom pojasu Zemlja primi više energije nego što zrači, u polarnim područjima više zrači nego što primi.



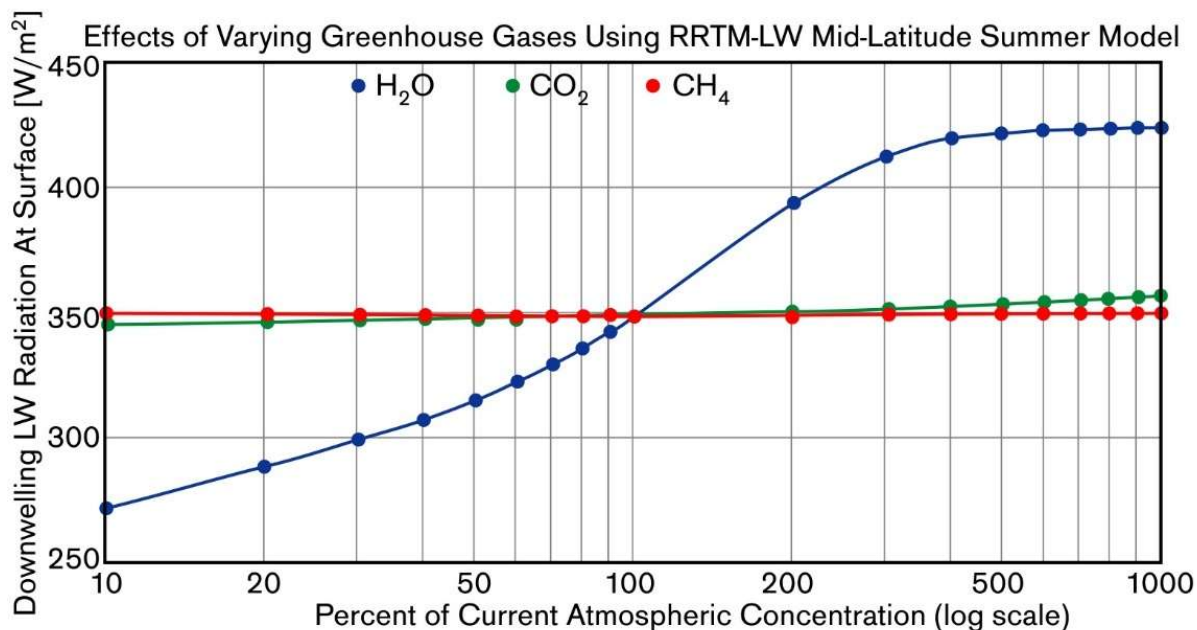
Sl.19. Tipične vertikalne i horizontalne cirkulacije zračnih masa uslijed primljene količine toplote.

Jedan od važnih uvjeta za prikladnu primjenu Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja je u zahtjevu za termičkom ravnotežom. No Zemlja očigledno ne može biti u termičkom ravnotežu, tla su toplija od viših zračnih slojeva, ekvator je znatno topliji od polova, dneva strana prima velike količine zračenja (oko 1 kW/m^2), noćna strana ništa.

Da imamo relativno podnošljive klimatske uvjete se moramo zahvaliti relativno brzom rotaciji Zemlje oko svoje osi, te spontanom transportu toplote od ekvatorijalnog pojasa prema polovima morskim i zračnim tokovima, te vertikalno isparavanju i kondenzaciji vode.

Često nas pokušavaju prestrašiti činjenicom, da se polovi brže zagrijavaju nego ekvator, no to je posve logična posljedica činjenice, da ekvator stalno prima maksimum energije, dok polovi primaju energiju u šestmesečnim intervalima, pa se brzo zagrijavaju, ali i još brže hlade.

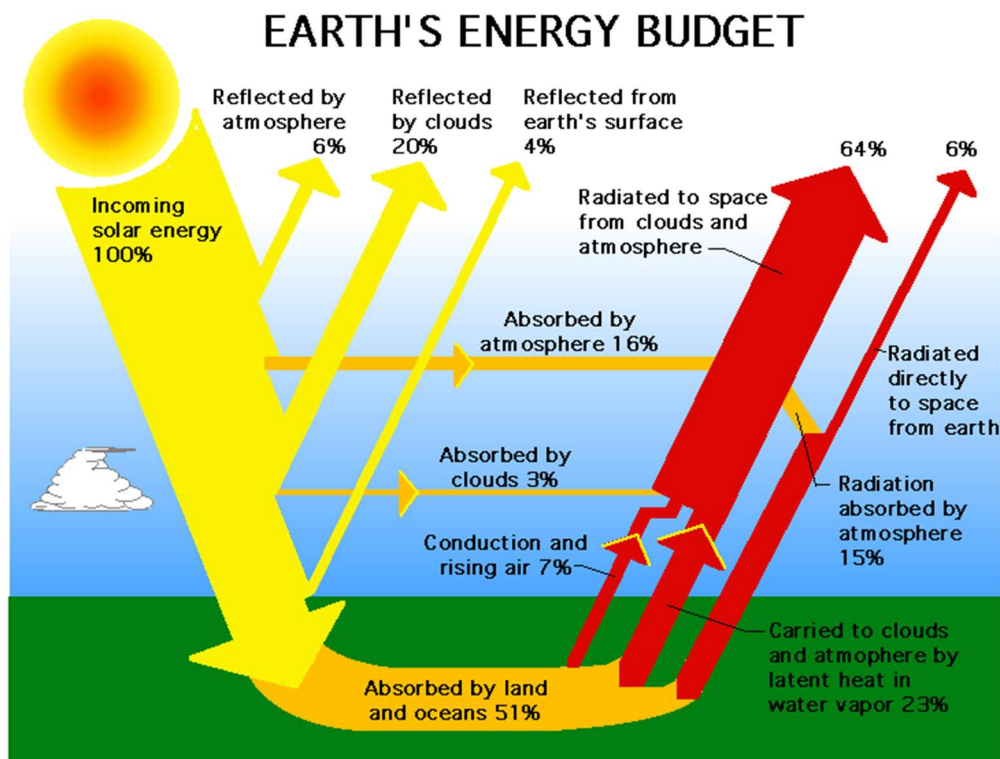
Pri prijenosu toplote je važna i činjenica da ima voda mnogo veći toplotni kapacitet nego ostali plinovi u zraku. To se odnosi ne samo na tekuću vodu, nego i na vodenu paru, koja promjenom koncentracije uzrokuje mnogo veći toplotni učinak nega ostali plinovi. Sl.20 prikazuje usporedbu toplotnog zračenja zbog promjene koncentracije plina pri istoj temperaturi, relativno u odnosu na današnje prosječne koncentracije.



Sl.20. Učinak promjene koncentracije plinova na promjenu zračenja pri istoj temperaturi plina. Vodena para ima približno 40 puta veći učinak nego CO₂ i skoro 300 puta veći učinak od metana.

Modeliranje toplotnih protoka i učinka staklenika

Globalna ravnoteža zračenja je bila prvi put modelirana u američkoj agenciji NASA 1984. godine na osnovi podataka izmjerenih s satelitom ERBE, Sl.21. Engleski naslov slike govori o energetske budžetu, no zapravo se radi o gustini snage zračenja izražene u postotku Sunčevog ulaznog zračenja na vrhu atmosfere.



Sl.21. Model protoka gustine snage zračenja na osnovi podataka dobivenih s satelitom ERBE, 1984. godine.

Navedeni postoci su vrijednosti prosjeka preko cijele godine i za cijelu površinu planeta. Ucertani postoci i smjerovi zračenja i posljedično pretvorbe u toplotu, te ponovne pretvorbe u zračenje na pojedinim visinama su relativno korektni. Današnje vrijednost se malo razlikuju, prije svega radi veće preciznosti novih mjernih uređaja.

Označene postotke možemo pretvoriti u gustinu snage zračenja jednostavnim množenjem s ulaznim Sunčevim prosječnim zračenjem, kojega smo već izračunali na početku (340 W/m^2). Kako vidimo, ukupni albedo (odbijeno Sunčevo kratkovalno zračenje) iznosi $6+20+4 = 30\%$, dok je ukupno izlazno dugovalno zračenje ocijenjeno na $64+6 = 70\%$, skupa to odnosi istu količinu zračenja kao što je ulazno Sunčevo zračenje. Slika je relativno jednostavna, pojedini fizikalni procesi u nižim slojevima atmosfere su modelirani skladno s pretpostavkom o ravnoteži zračenja, te pretpostavkom da je zračenje dominantni način prijenosa toplote. No tu (još) nema modela učinka staklenika.

Ideja o analogiji atmosfere kako Zemaljskog staklenika se je pojavila već krajem XVIII stoljeća, u literaturi se kao otkrivaatelj obično navodi francuski matematičar i fizičar Jean Baptiste Joseph

Fourier (1768-1830). Kao topničkog generala u Napoleonovoj vojsci ga je zanimala ovisnost preciznosti pogodaka od temperature topovske cijevi, te je pomoću željeznih prstena zagrijanih na jednom mjestu te zakopanih u pijesak mjerenjima temperature slijedio širenju toplote. Na toj osnovi je matematičkom analizom došao do zakonitosti kutnih funkcija, danas poznate kao Fourierova transformacija.

Kasnije se je Fourier posvetio još mnogim drugim problemima s područja matematičke analize i prijenosa toplote. Jedno od njegovih opažanja se odnosi na porast temperature u zatvorenoj kutiji, koju kroz stakleni pokrov zagrijava sunce. Danas se to često citira kao otkriće učinka staklenika, no Fourier je eksplicitno zapisao da je porast temperature posljedica sprječavanja toplom zraku da se diše i širi, te tako ohladi.

Zakonitosti ponašanja plinova su bile poznate u empiričkom obliku već za Fourierova života, no danas znamenita Clapeyronova opća jednadžba idealnog plina bila je objavljena tek nekoliko godina nakon Fourierove smrti. Ta jednadžba postavlja preciznu relaciju između tlaka, volumena i temperature plina:

$$pV = nRT$$

gdje je n molarna masa, a R je opća plinska konstanta (koja je u stvari umnožak Avogadrovog broja i Boltzmannove energetske konstante).

Fourier je dakle imao zbilja dobar nos kada je kvalitativno protumačio što se zbiva sa zrakom u staklom pokrivenoj kutiji. Kasnije su analogno to proširili na čitavu atmosferu, koju gravitacija zadržava uz površinu planeta. No ujedno su previdjeli činjenicu, da na vrhu atmosfere nema prepreke, koja bi ograničavala plinovima da se šire i povećaju svoj volumen uslijed zagrijavanja. Zadržavanje toplote u atmosferi nije analogno pokrivaču kojim se noću pokrivamo da nas ne zebe, kako se danas često pogrešno tumači učinak stakleničkih plinova.

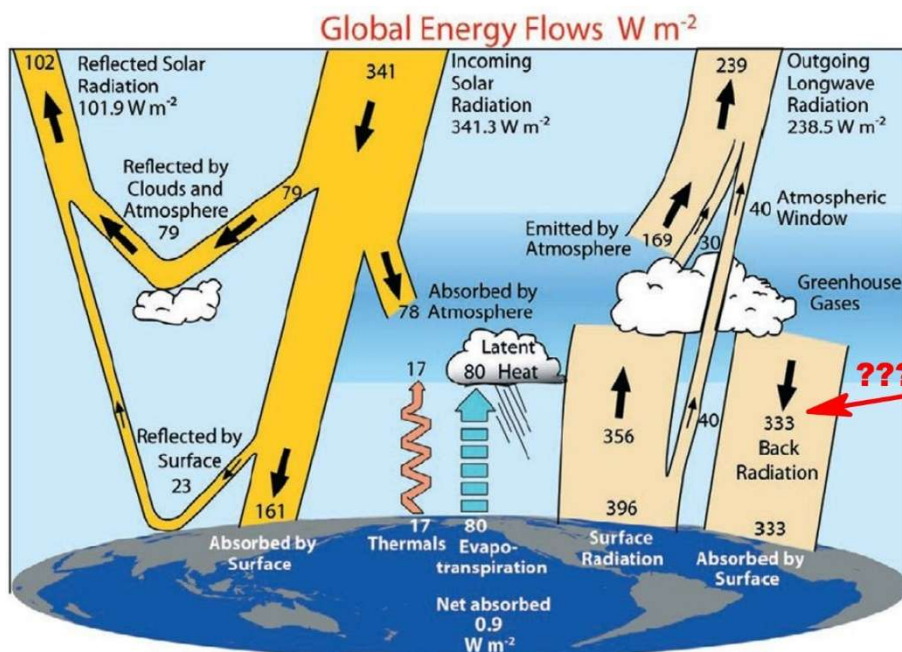
Većina fizičara, koji su se kasnije bavili tim problemima su ili površno čitali Fourierove zapise, ili su slabo razumjeli francuski. Drugačije je teško razumjeti da su Tyndall, Arrhenius, Callendar, te 1967. godine Manabe (Nobelova nagrada 2021.) i Wetherald, te potom i drugi posve nekritično preuzimali model atmosfere s učinkom staklenika.

Godine 1997. su Kiehl i Treberth objavili novu analizu toplotnih protoka, koja je uključivala učinak stakleničkih plinova, pri čemu su vodenu paru tretirali kao pretežno neutralnu, jer su pretpostavili (ali ne i dokazali) da se za vodenu paru toplotni učinak absorpcije dugovalnog zračenja kompenzira visokim albedom oblaka. Sl.22 prikazuje rezultat njihove analize.

Na Sl.21 vidimo oznake gustine snage zračenja u jedinicama W/m^2 . Većina protoka ima slične vrijednosti kao i na Sl.20, nova je ocjena zračenja površine Zemlje te povratno zračenje stakleničkih plinova, koje dodatno zagrijava površinu zemlje gustinom snage zračenja od $333 W/m^2$.

Tu treba odmah primijetiti nekoliko nelogičnih odnosa. Zračenje Zemlje je izračunato na osnovi Stefan-Boltzmannovog zakona za vrijednost globalne prosječne temperature $289 K (+16^{\circ}C)$

tretirajući pritom Zemlju kao idealno crno tijelo koje zrači prema vakuumu (albedo i ostale toplotne gubitke prema atmosferi su obradili posebno: 23 W/m^2 za odboj dijela Sunčeva zračenja s površine, 17 W/m^2 za termičko uzdizanje toplog zraka i 80 W/m^2 za isparavanje i latentnu toplotu, koja se pri kondenzaciji vodene pare oslobađa u srednjim slojevima atmosfere). Sunčevo zračenje u prosjeku zagrijava tla gustinom snage zračenja od oko 161 W/m^2 . Tla zagrijana na 289 K oslobađaju gustinu snage zračenja od oko 396 W/m^2 . Od toga nekih 40 W/m^2 odlazi u svemir bez interakcije s atmosferom. Oko 30 W/m^2 je rezultat zračenja zraka zagrijanog u oblacima oslobađanjem kondenzacijske toplote, dok 169 W/m^2 zrače zagrijani staklenički plinovi. Stakleničke plinove u srednjim slojevima atmosfere zagrijava neposredno i Sunce s oko 78 W/m^2 . Dakle staklenički plinovi ukupno absorbiraju $396 + 78 = 474 \text{ W/m}^2$, dok sami zrače 169 W/m^2 prema svemiru i 333 W/m^2 nadolje prema tlu, ukupno 502 W/m^2 .



Sl.22. Globalni protoci gustine snage zračenja po Kiehl i Treberthu, 1997.

Postaviti moramo pitanje gdje je tu ravnoteža zračenja? Staklenički plinovi moraju prema tom modelu absorbirati ukupno 502 W/m^2 , a oslobađaju 474 W/m^2 , razlika je čitavih 28 W/m^2 , za koje nema nikakvog objašnjenja odakle dolaze. Tla absorbiraju višak od $0,9 \text{ W/m}^2$, čime se opravdava ukupno globalno zagrijavanje u proteklih 150 godina. Gdje nastaje i kamo nestaje tih $28,9 \text{ W/m}^2$?

Nasuprot tome, Sunčevo zračenje i ukupno zračenje Zemlje su prema navedenim podacima dobro uravnoteženi: $341 - 102 = 239 \text{ W/m}^2$. Zbog toga bi očekivali dobru ravnotežu i svih ostalih procesa unutar atmosfere (osim ako se mali dio toplote negdje dugoročno pohranjuje, na primjer u oceanima).

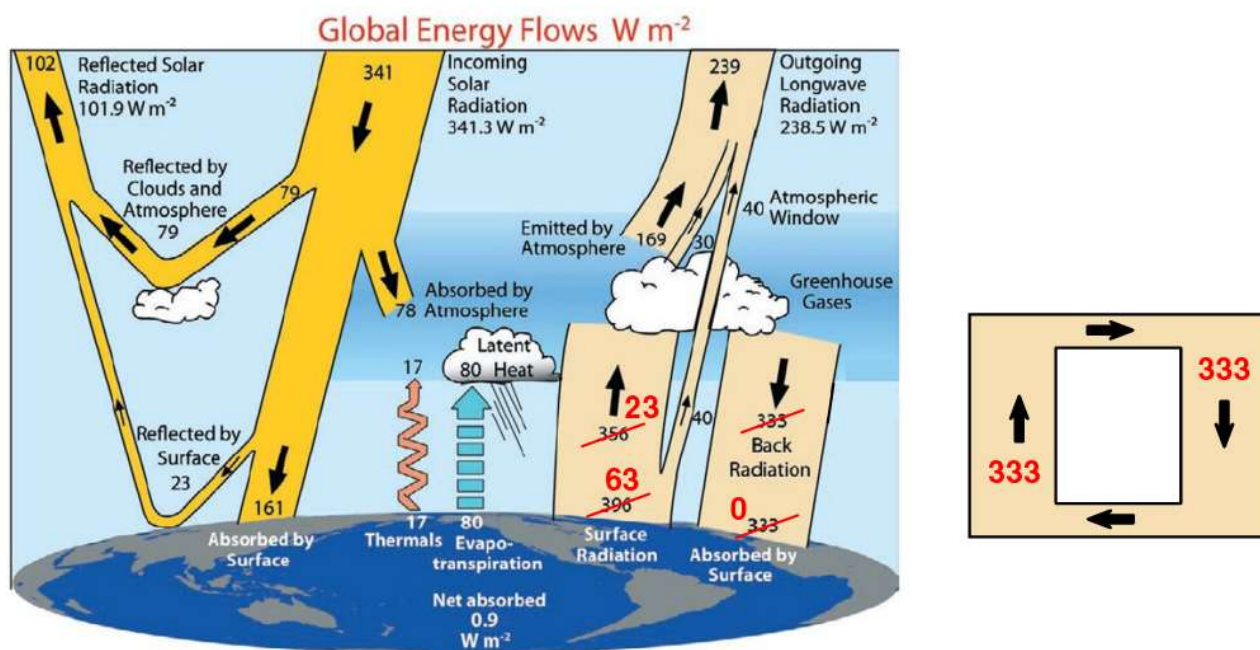
Nadalje: zračenje stakleničkih plinova iznosi ukupno $169 + 333 = 502 \text{ W/m}^2$, no svaki fizičar bi naivno očekivao, da bi moralo biti njihovo zračenje simetrično, jednako prema svemiru kao i

prema tlu, odnosno po 251 W/m^2 u svakom smjeru! Za takvu nesimetriju nije moguće naći nikakvo fizikalno opravdanje, pa niti sami autori modela toga ne daju.

Konačno, po Stefan-Boltzmannovom zakonu gustini snage zračenja 333 W/m^2 odgovara temperatura od oko 277 K ($+4\% \text{C}$). Tko od vas bi kupio peč s temperaturom 4°C , da vam zagrije sobu na 16°C ?

Možemo slobodno zaključiti kako model na Sl.22 predstavlja termodinamički *perpetuum mobile* prvog reda.

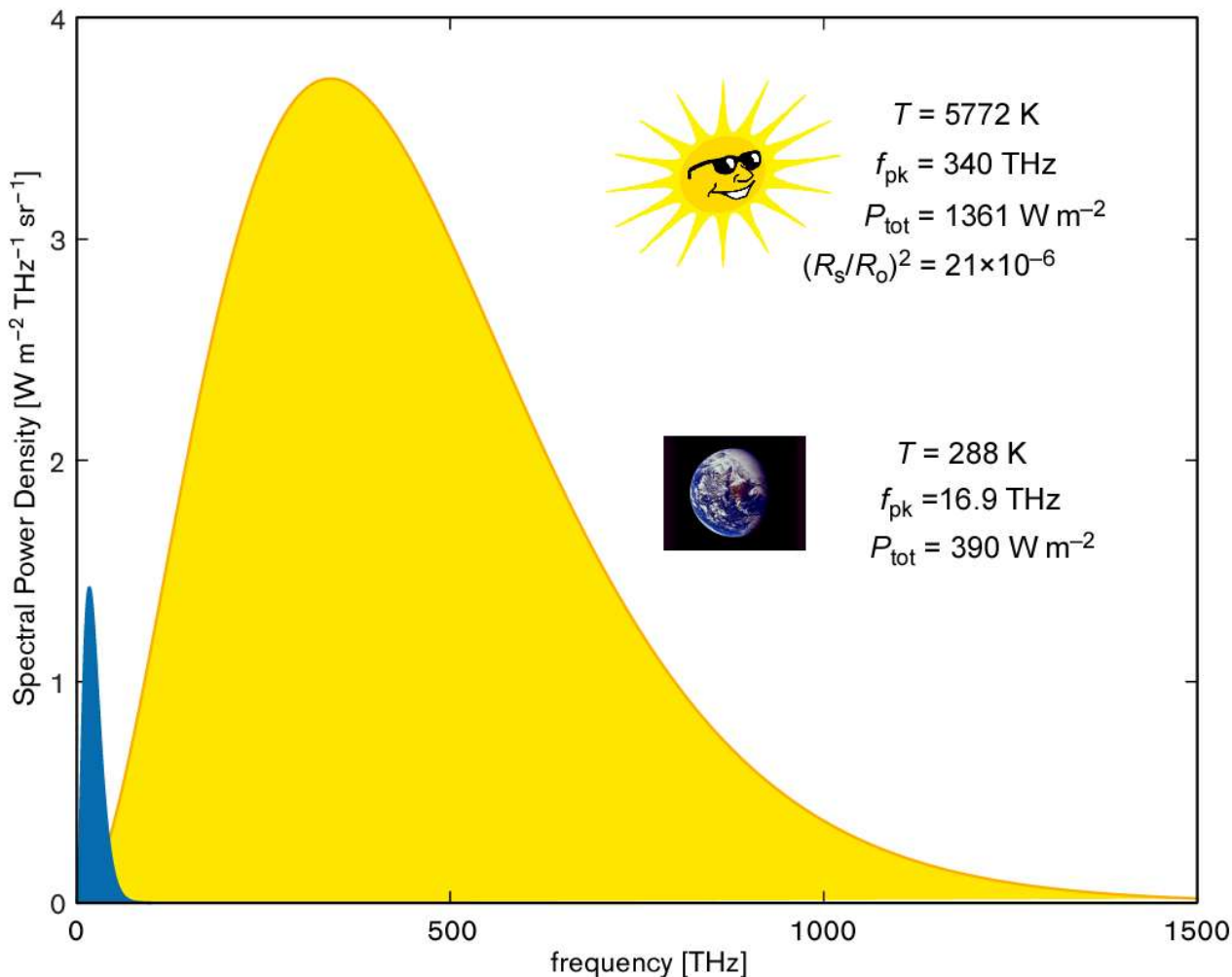
Vidimo da nekritička upotreba Stefan-Boltzmannovog zakona u uvjetima koji ne odgovaraju definiciji po kojoj zakon vrijedi predstavlja fizikalnu besmislicu i veliku grešku u logičnom razmišljanju. Zbilja, mogli bi taj model pojednostaviti tako, da bi cirkulaciju 333 W/m^2 između tla i stakleničkih plinova odvojili od ostalih protoka, Sl.23. U toj cirkulaciji bi se mogla pretakati bilo kakva gustina snage zračenja, pa se ne bi ništa bitno promijenilo, osim što bi model i dalje bio neuravnotežen.



S.23. Model s Sl.21 s povratnim zračenjem stakleničkih plinova odvojenim u posebnu cirkulaciju bilo kakve vrijednosti.

Dodatni problem modela na Sl.22 predstavlja i činjenica, da se u sistemu pretaje dvostruko više toplote nego što je sistem dobiva od Sunca, ta iznosi u prosjeku samo 161 W/m^2 . Prema istoj pogrešnoj upotrebi Stefan-Boltzmannovog zakona bi tom zračenju odgovarala temperatura od samo 231 K ili ni više ni manje nego -42°C . Iako je i maloj djeci jasno, da Sunce grije Zemlju, ipak pogledajmo usporedbu spektara snage zračenja Sunca i Zemlje, no ovaj put u odnosu na frekvenciju, budući da je energija fotona direktno srazmjerna frekvenciji, prema poznatoj Planckovoj relaciji $E = hf$. Usput, Planckov spektar zračenja je diferencijalni oblik Stefan-

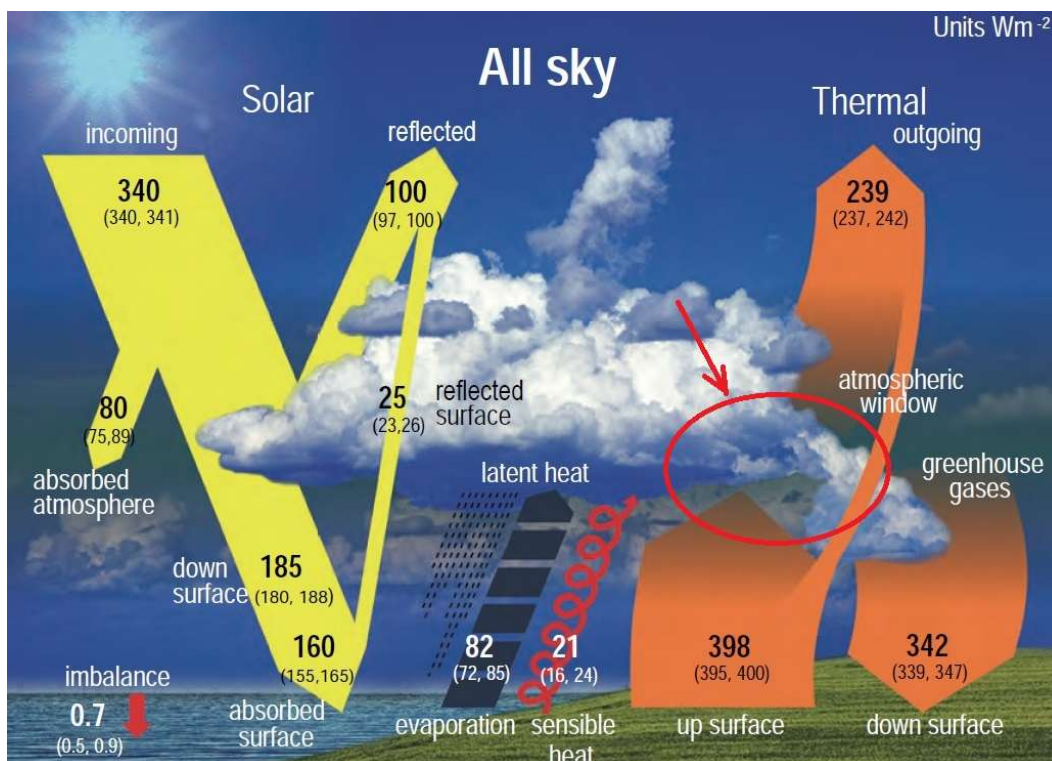
Boltzmannovog zakona, obično se daje normiran na određeni uski frekventni opseg i na steradian kao jedinicu kuta zračenja. Na Sl.24 je prikazana usporedba s podacima za ukupnu snagu zračenja (za Sunce smanjeno za kvadrat omjera polumjera Sunca prema prosječnom polumjeru Zemljine orbite). Ukupna snaga zračenja je srazmjerna površini spektralne karakteristike.



Sl.24. Usporedba Zemljinog i Sunčevog spektra zračenja.

Da pri IPCC imaju velike probleme s upotrebom Stefan-Boltzmannovog zakona možemo vidjeti i iz drugih podataka navedenih u njihovim izvještajima. Na primjer, kakva bi trebala biti temperatura krajem ovog stoljeća (2100.), ukoliko bi i dalje trošili svake godine sve više fosilnih goriva po jednakom trendu povećanja kakav je danas – taj scenarij IPCC imenuje BAU (*business as usual*).

Pogledajmo najprije kako je ocijenjeno sadašnje stanje ravnoteže toplotnog zračenja u zadnjem izvještaju AR6 (poglavlje 7, str. 934), Sl.25. Grafički je slika svakako ljepša od one na Sl.22, ispušten je model Zemlje kao ravne ploče (!!), a i navedeni brojevi se ponešto razlikuju, iako ne bitno. Navedenih je 12 (kanonskih?) brojeva, ali nedostaje nesretni 13. (u području označenom elipsom). Pogodite koji?



Sl.25. Ocjena toplotnih protoka iz IPCC AR6, Ch.7, pp 924. Važan podatak manjka.

Pomoći ću vam: koja je glavna specijalnost IPCC? Naravno, staklenički učinak.

I što manjka na Sl.25? Naravno, staklenički učinak!

U samom tekstu AR6 na str. 968, pod 7.4.2.1 Planck Response, ipak nalazimo pomalo sramežljivo i kao usput i u drugom kontekstu navedenu vrijednost stakleničkog učinka: $G = 159 \text{ W/m}^2$. Po prvi put nako 36 godina djelovanja IPCC je staklenički učinak dobio simbol G . I po prvi put se eksplicitno navodi da pri tome ima ključnu ulogu Stefan-Boltzmannova konstanta, i premda se taj zakon upotrebljava od samog početka, ni u jednom izvještaju nije bio eksplicitno imenovan, Sl.26.

a value that is strongly negative: a warmer planet radiates more energy to space. A crude estimate of α_p can be made using the normalized greenhouse effect $\tilde{g}$, defined as the ratio between the greenhouse effect G and the upwelling LW flux at the surface (Raval and Ramanathan, 1989). Current estimates (Section 7.2, Figure 7.2) give $G = 159 \text{ W m}^{-2}$ and $\tilde{g} \approx 0.4$. Assuming $\tilde{g}$ is constant, one obtains for a surface temperature $T_s = 288 \text{ K}$, $\alpha_p = (g - 1) 4 \sigma T_s^3 \approx -3.3 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, where σ is the Stefan-Boltzmann constant. This parameter α_p is estimated more accurately

Sl.26. AR6, str. 968 – prva navedba vrijednosti stakleničkog učinka: $G = 159 \text{ W/m}^2$.

Naravno, svatko može sam to izračunati iz Sl.25, jer je $398 - 239 = 159$. Ali samo ako vas netko upozori da ta vrijednost u Sl.25 manjka! Inače to uopće ne bi opazili. Podatak $G = 159 \text{ W/m}^2$ je

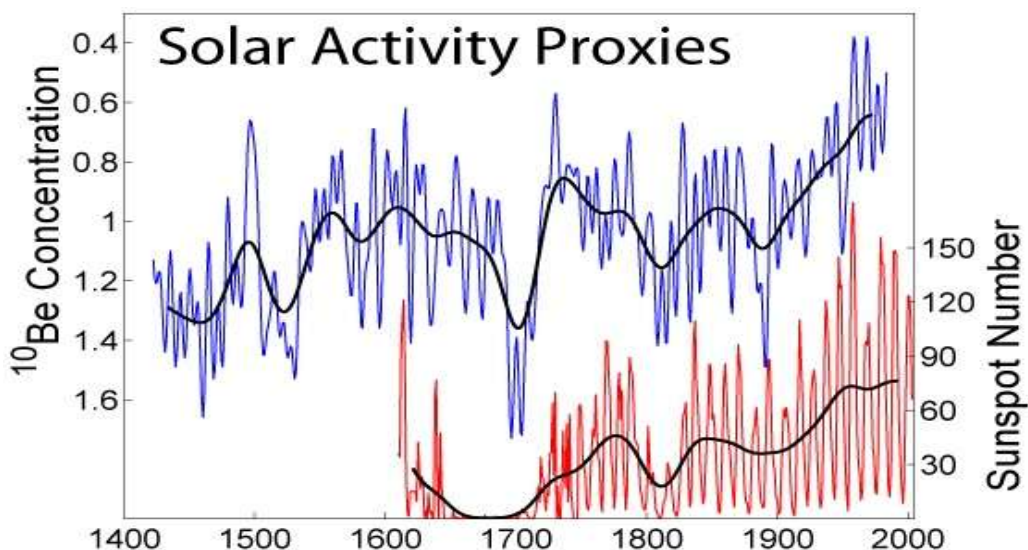
važan ne samo da upotpuni Sl.25, već je temelj cjelokupne teorije, koju zastupa IPCC. No vrijednost G (ukupna absorpcija stakleničkih plinova) se ne slaže s vrijednošću ukupnog zračenja tih plinova: sa Sl.22 smo nabrojili ukupno 502 W/m^2 .

Pogledajmo kako se to odražava u spektru zračenja. Najprije treba napomenuti (da se ne zaboravi!) da je Sl.25 (kao i Sl.23) sastavljena na temelju ideje o ravnoteži zračenja, Sunčevo ulazno zračenje smanjeno za albedo mora biti jednako Zemljinom izlaznom zračenju na vrhu atmosfere. Što znači da tri broja na vrhu Sl.24 moraju tvoriti jednadžbu izraženu u jedinicama W/m^2 :

$$240 = 340 - 100$$

Na Sl.25 je navedena vrijednost u stvari 239 W/m^2 , no u donjem desnom kutu slike nalazimo malu neravnotežu, *imbalance*, u vrijednosti od $0,7 \text{ W/m}^2$, kojom se opravdava dugoročno zagrijavanje.

Sunčevo zračenje je gotovo konstantno, mijenja se s sunčevom aktivnošću za oko 0,1% — iako mnogi astronomi i geologi upozoravaju da se na dugi rok ta vrijednost mijenja za mnogo više, na primjer mala ledena doba je bila uzrokovana znatno smanjenom aktivnošću Sunca, ukoliko aktivnost možemo ocjenjivati brojem Sunčevih pjega, ogtomnih magnetnih polja, koja uzrokuju lokalnu cirkulaciju i hlađenje plazme u fotosferi Sunca. Sl.27 prikazuje usporedbu ocjene aktivnosti Sunca brojenjem Sunčevih pjega, te koncentracijom berilijevog radioizotopa ^{10}Be .

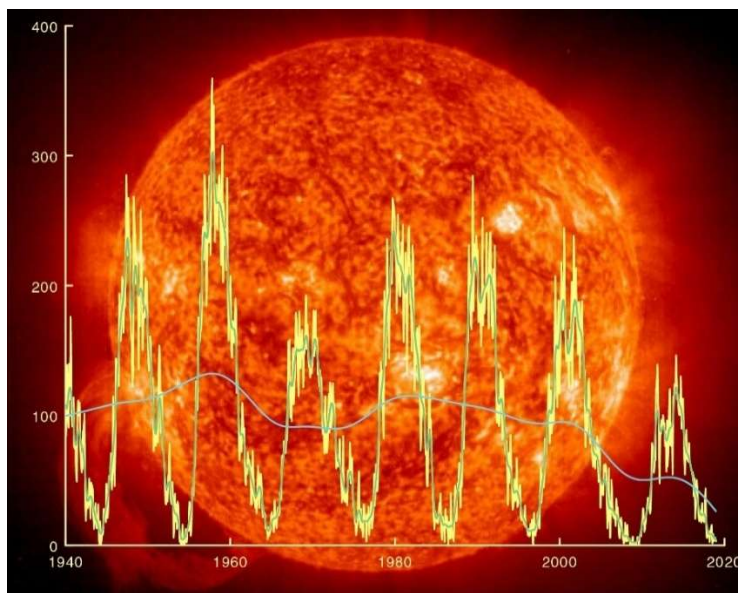


Sl.27. Aktivnost Sunca: mala ledena doba 1650-1730 je poznata kao Maunderov minimum u broju Sunčevih pjega.

No recimo da nas ovdje zanima samo kraće razdoblje, zadnjih 75 godina, kada je koncentracija CO_2 porasla za oko 35% (s 315 na 420 ppm). U tom razdoblju je Sunce bilo veoma aktivno, no u prosjeku pojedini 11-godišnji ciklusi nisu bitno odstupali jedni od drugih.

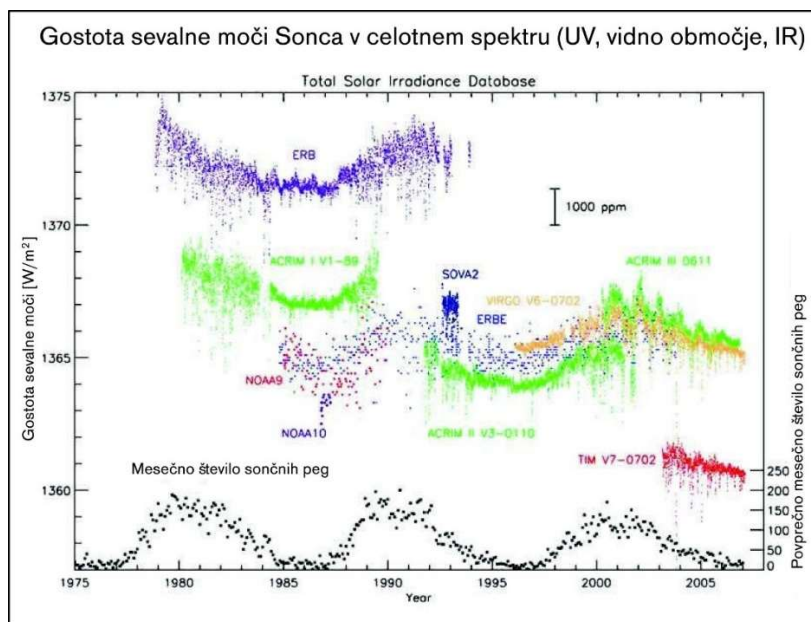
Na Sl.28 vidimo Sunčevu aktivnost izraženu brojem Sunčevih pjega malo detaljnije za nekoliko zadnjih ciklusa.

Na Sl.29 pak vidimo kako smo tu aktivnost mjerili optički sa satelitima u Zemljinoj orbiti. Mjerenja su vršena u širokom spektru, pa nose oznaku TSI, *total solar irradiation index*. Oznake satelita su ujedno i oznake pojedinih istraživačkih programa američke agencije NASA.



Sl.28. Sunčeva aktivnost predstavljena brojem sunčevih pjega u zadnjih nekoliko ciklusa.

Stariji sateliti su bili kalibrirani na malo drugačiji način od novijih, pa su zbog toga izmjerene vrijednosti Solarne konstante nešto više, oko 1366 W/m^2 , novije su oko 1361 W/m^2 . Misije su trajale različito dugo i uglavnom su se trajanja prekrivala, tako da je moguće kontinuirano slijediti sunčevu aktivnost i ta mjerenja usporediti s onima na Sl.27 za isto razdoblje.



Sl.29. Sunčeva aktivnost u razdoblju satelitskih mjerenja. Promjene TSI iznose oko 0,1%.

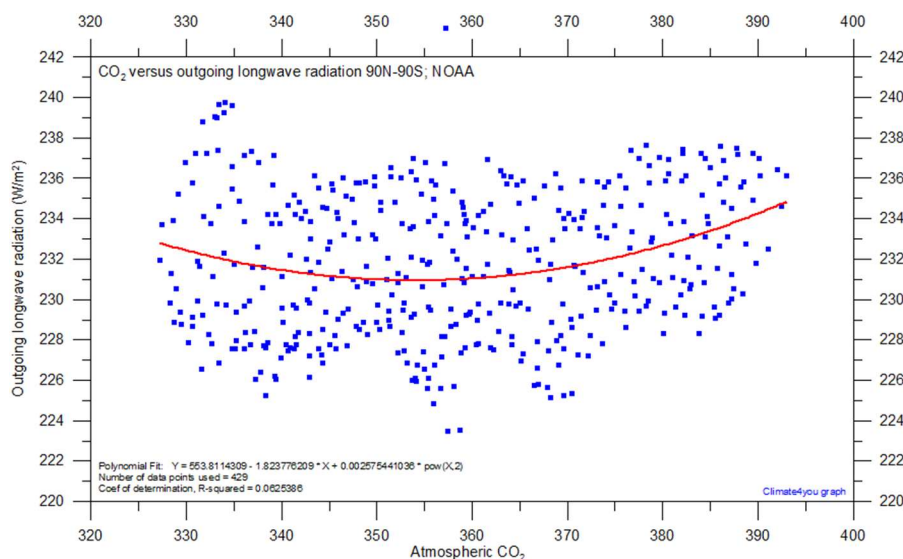
Ako je dakle Sunčevo zračenje bilo približno konstantno, i albedo približno jednak, tada se mora ta razlika točno skladati s dugovalnim infracrvenim zračenjem Zemlje. Pa ako se albedo nije bitno mijenjao, tada se ni Zemljino zračenje nije moglo bitno mijenjati. Ali Zemljino zračenje je ovisno od koncentracije stakleničkih plinova i njihove apsorpcije zračenja, od toga je onda ovisna i efektivna temperatura Zemlje, pa zato i izlazno zračenje.

Taj nesklad pokušavaju pri IPCC objasniti tako, da se s povećanjem koncentracije stakleničkih plinova smanji atmosferski temperaturni gradient, pa su niži slojevi atmosfere topliji, dok su viši (stratosfera) hladniji, a ravnotežno zračenje se uspostavi na nešto većoj visini. To objašnjenje je prvi predlagao Manabe i to danas važi kao dokaz, da je teorija efekta staklenika pravilna. Ovako to objašnjavaju u zadnjem izvještaju IPCC, AR6 poglavlje 3, str. 445:

et al., 2014). Mitchell (2016) used regularized optimal fingerprinting techniques to carry out an attribution analysis of annual mid- to upper-stratospheric temperature in response to external forcings. They found that anthropogenic forcing has caused a cooling of approximately 2°C – 3°C in the upper stratosphere over the period of 1979–2015, with greenhouse gases contributing two thirds of this change and ozone depletion contributing one third. They found a large upper-stratospheric temperature change in response to volcanic forcing (0.4°C – 0.6°C for Mount Pinatubo) but that change is still smaller than the lower-stratospheric signal. Aquila et al. (2016) found that the cooling of the

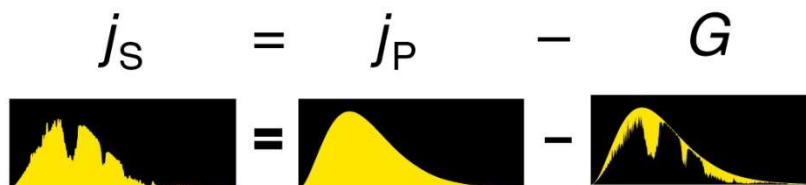
Sl.30. O zabilježenom hlađenju stratosfere. Iz AR6, poglavlje 3, str. 455.

Pa pogledajmo kako to izgleda u stvarnosti. Na Sl.6 smo već vidjeli satelitima izmjerene vrijednosti izlaznog dugovalnog IR zračenja, a na Sl.31 su ti podaci predstavljeni u odnosu na promjenu koncentracije CO_2 . Tu također vidimo da se gustina snage zračenja nije bitno mijenjala, iako je u tom razdoblju (1978-2012.) koncentracija CO_2 porasla za oko 20% (s 325 na 395 ppm).



Sl.31. Satelitski izmjereno izlazno dugovalno IR zračenje u odnosu na koncentraciju CO_2 .

Ovako možemo prikazati spektralnu ravnotežu zračenja Zemlje:

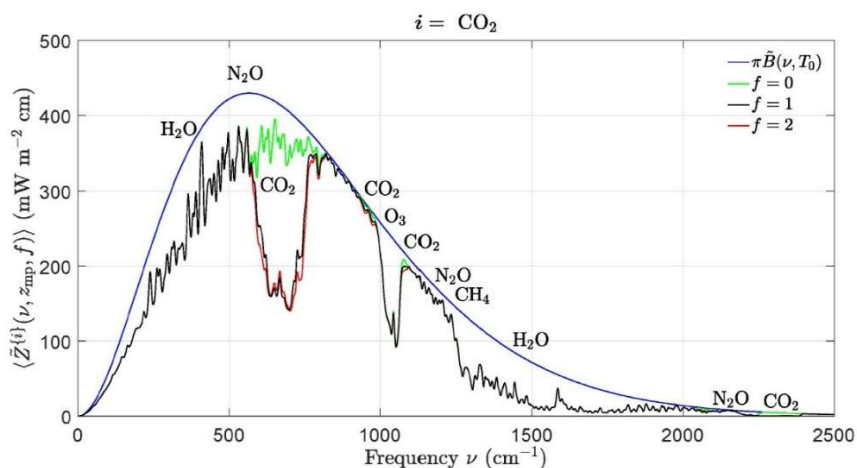


Sl.32. Spektralni prikaz ravnoteže zračenja na vrhu atmosfere.

Tu je j_P spektralna gustina snage zračenje tla (Planckov spektar za globalnu prosječnu temperaturu 289 K, odnosno $+16^\circ\text{C}$) u iznosu 398 W/m^2 , j_S je efektivno izlazno zračenje od 240 W/m^2 , a G je ukupna absorpcija stakleničkih plinova od 159 W/m^2 . Pri tom mora biti j_S jednake vrijednosti kao ulazno Sunčevo zračenje smanjeno za albedo ($340 - 100 = 240$, kako smo već prethodno napomenuli).

Recimo da se je prosječna globalna temperatura pri tlu povećala za okruglo 1°C , sa 288 K na 289 K. Tome po Stefan-Boltzmannovom zakonu odgovara promjena j_P sa 390 na 395.5 W/m^2 , odnosno za skoro 6 W/m^2 . Za isti iznos se mora tada povećati i vrijednost absorpcije stakleničkih plinova, G , dakle sa prijašnjih 153 na sadašnjih 159 W/m^2 . Topliji staklenički plinovi moraju zračiti više i to jednako prema tlu kao i prema svemiru, dakle bi se zračenje prema svemiru moralo povećati za oko 3 W/m^2 . No na Sl.31 toga nema. Sezonske varijacije su relativno velike, skoro $3\times$ veće od izračunatog povećanja izlaznog zračenja, pa ipak bi to morali vidjeti kao uzlazni trend.

Na Sl.33 je izračun za koliko bi se promijenila absorpcija gustine snage zračenja Zemlje ukoliko bi se koncentracija CO_2 udvostručila. Modra glatka krivulja je Planckov spektar zračenja za prosječnu globalnu temperaturu 288 K ($+15^\circ\text{C}$), zeleno je spektar bez CO_2 u atmosferi, crno je spektar pri današnjoj koncentraciji CO_2 (420 ppm), crveno je spektar pri udvostručenoj koncentraciji (840 ppm).



Sl.33. Razlika u spektralnoj absorpciji pri današnjoj (crno) i udvostručenoj (crveno) koncentraciji CO_2 . Zeleno je bez CO_2 . Wijngaarden i Happer, 2019.

Iz Sl.33 možemo razabrati da bi se absorpcija zračenja zbog udvostručenja koncentracije CO₂ povećala za oko 2% i to samo na rubovima karakterističnog spektra CO₂ u području između 14 i 16 μm valne dužine (na slici u području prostornih učestalosti između 714 i 625 valova na cm).

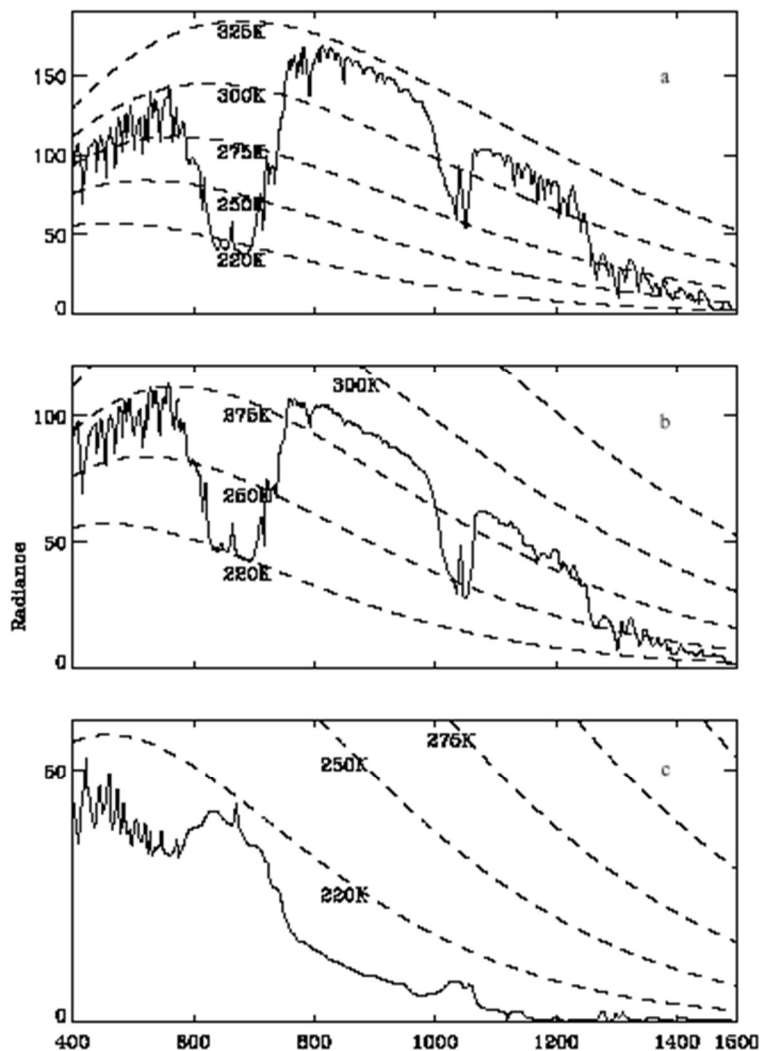


Figure 1.2 Thermal emission spectra of Earth measured by the IRIS Michelson interferometer instrument on the *Nimbus 4* spacecraft (see Endnote 4). Shown also are the radiances of blackbodies at several temperatures. (a) Sahara region; (b) Mediterranean; (c) Antarctic.

Sl.34. Satelitski izmjereni spektri gustine sbage zračenja nad Saharom, Mediteranom i Antarktikom.
Wijngaarden i Happer, 2019.

Sl.34 prikazuje kako su satelitski snimljeni spektri zračenja ovisni o temperaturi. Graf na vrhu je snimljen nad Saharom, srednji graf nad Mediteranom i donji graf nad Antarktikom. Pri tom zadnjem grafu vidimo da CO₂ tu više zrači nego absorbira, jer u sudaru s drugim zračnim molekulama preuzima dio energije, koje se onda oslobodi zračenjem, te tako hladi zrak.

Problematični faktor 3

Već smo uz komentar k Sl.11 napomenuli da u osjetljivosti promjene temperature na porast koncentracije CO₂ u standardnoj interpretaciji manjka faktor 3.

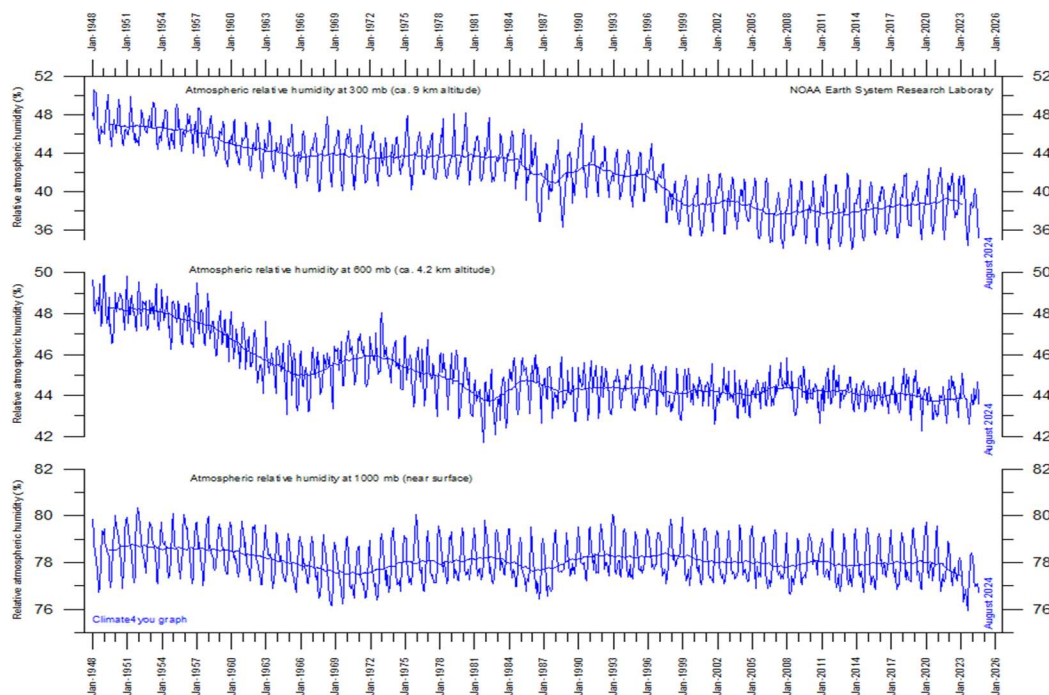
Slično nam faktor 3 manjka i pri razlici između absorpcije stakleničkih plinova i njihovog ukupnog zračenja: $502/159 = 3,157$.

Tog problema su svjesni i pri IPCC, pa su to pokušali objasniti povratnom spregom preko vodene pare. Iako utjecaj same vodene pare ocjenjuju neutralno (njen velik staklenički učinak bi se morao kompenzirati albedom oblaka), ipak bi po njihovoj interpretaciji morala vodena para pojačavati utjecaj CO₂ i ostalih stakleničkih plinova. To ide otprilike ovako:

- povećanje temperature zraka zbog veće koncentracije stakleničkih plinova povećava isparavanje;
- ujedno topliji zrak može primiti više vodene pare, zbog čega se zrak dodatno zagrijava;
- to uzrokuje zagrijavanje površine oceana, koja onda ispušta više CO₂;
- to opet povećava temperaturu, i tako u krug.

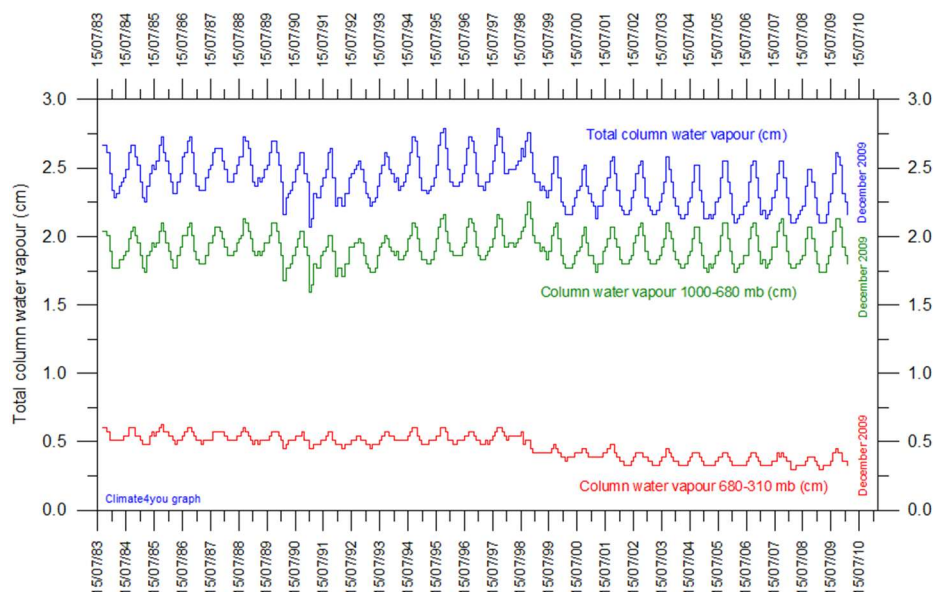
Pri tom objašnjenju se pozivaju na poznatu Clausius-Clapeyronovu relaciju, koja predviđa vlažnost zraka veću za oko 7% za svaki 1°C toplijeg zraka.

A što su zabilježina naša mjerenja atmosferske vlage meteorološkim balonima protekih desetljeća? Sl.35 prikazuje izmjerene vrijednosti relativne vlažnosti na 3 različite visine u razdoblju od 1948. do 2024. godine. Vidimo da je vlažnost zraka na svim visinama padala, umjesto da bi rasla.



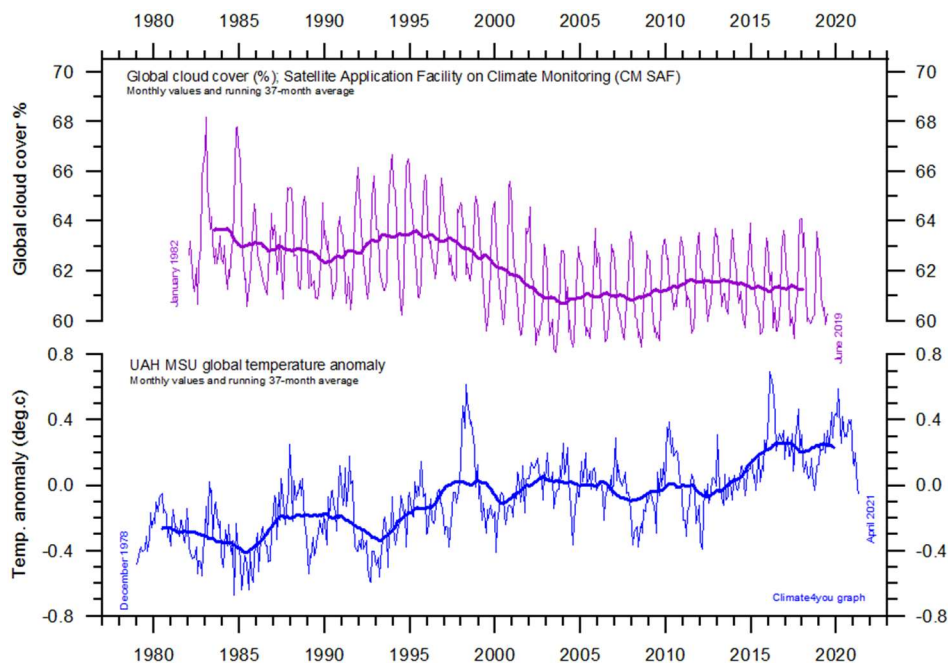
Sl.35. Izmjereni mjesečni prosjeci relativne vlažnosti zraka na 9km, 4,2km, te pri tlu u razdoblju 1948-2024.

Slični su i podaci za izmjerenu absolutnu vlažnost, Sl.36.



S.36. Izmjereni mjesečni prosjek zračne vlage (u cm). Vrijednost pri tlu su se vidno smanjile.

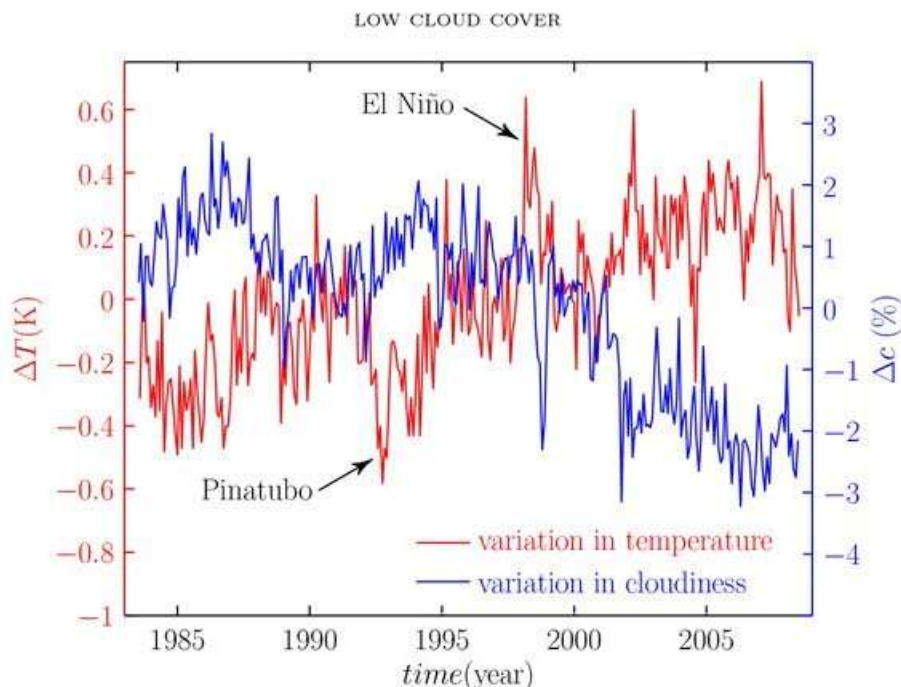
Jednaku sliku nam daju i satelitska mjerenja oblačnosti (u postotku površine planeta), dok je globalna temperatura rasla, oblačnost je opadala, Sl.37.



Sl.37. Usporedba oblačnosti i globalne prosječne temperature, mjereno satelitima.

Vidimo da je već samo 3% manje površine prekrivene oblacima dovoljno da u potpunosti objasni povjesno zabilježen porast globalne temperature. Nobelovac prof. John Clauser je dakle bio u

pravu, medijski napadi na njega nisu bili opravdani. Do sličnih zaključaka su došli i drugi istraživači, Sl.38.



Sl.38. Usporedba oblačnosti s globalnom temperaturom. Kauppinen i Malmi, 2019.

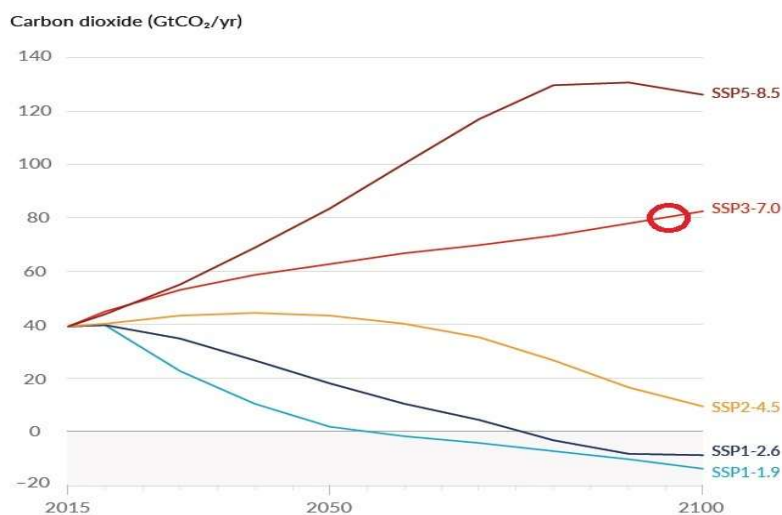
Možemo zaključiti da, iako Clausius-Clapeyronova relacija pravilno predviđa mogućnost da topli zrak sadrži više vlage, to ne znači da i mora. Očigledno u prirodi prevladavaju drugi procesi. Zbog toga ideja o postojanju povratne sprege, koja pojačava učinak stakleničkih plinova preko vodene pare, pada u vodu.

IPCC unatoč svemu i dalje propagira isto. To vidimo i iz računarskih modela koje upotrebljavaju za izračune porasta temperature ovisno o različitim scenarijima smanjivanja ispusta CO_2 . Do nedavno su nas plašili BAU scenarijem (službeni naziv RCP-8.5), po kojem bi se radi utrostručenja godišnjih količina ispusta do kraja stoljeća temperatura povećala za 5 do 8°C nad prosječnom temperaturom predindustrijske dobe.

U zadnjem izvještaju AR6 su zbog kritika, da je takav scenarij nerealan, promijenili definicije, pa sada BAU scenarij predviđa samo udvostručenje godišnjih ispusta do kraja stoljeća. Promijenili su i službeni naziv tih scenarija, sada se imenuju *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), Sl.39.

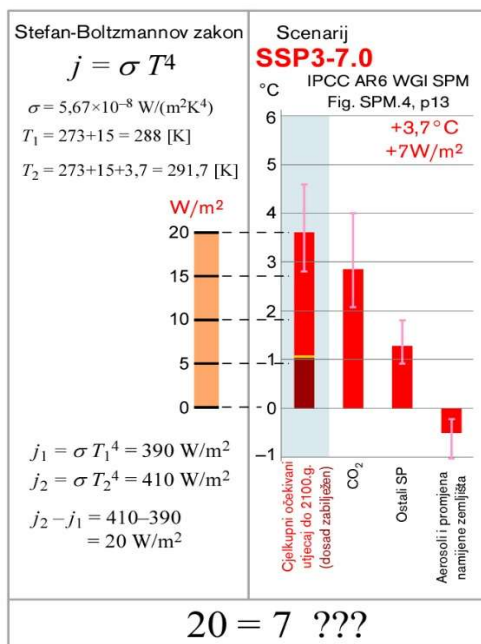
Scenarij SSP5-8.5 je još uvijek jedna od mogućnosti, no sada se tretira kao ekstremna, malo vjerojatna mogućnost. *Business As Usual* je sada predstavljen s SSP3-7.0. Po tom scenariju bi uz sadašnji porast ispusta od oko 4,7% godišnje dostigli udvostručenje godišnjih ispusta (na 80 milijardi tona CO_2 godišnje) negdje oko 2095. godine. Ostali scenariji predviđaju različita smanjenja godišnjih ispusta, te skladno s time i postizanje efektivno nultih ispusta (*Net Zero Emissions*) do određenog roka. No već sada (u 2025. godini) je jasno da su svi scenariji smanjivanja ispusta upitni, budući da su se zadnjih 5 godina od objave AR6 ispusti i dalje

povećavali, čak unatoč epidemiji corona virusa, koja je za nekoliko mjeseci ohromila svjetsku ekonomiju. Među njima je SSP1-1.9, po kojem bi *Net Zero* postigli već do 2050., potpuno nerealan.



Sl.39. IPCC AR6: Novi scenariji rasta ispusta do kraja stoljeća. Novi BAU scenarij je SSP3-7.0.

Posvetimo malo pažnje scenariju SSP3-7.0. Što zapravo znače ti brojevi u imenu? Prvi broj predstavlja predviđeno približno povećanje globalne temperature uzrokovano pripadajućem povećanju (ili smanjenju) ispusta. Drugi broj predstavlja povećanje absorpcije snage zračenja stakleničkih plinova kao posljedicu povećanja ispusta. AR6 grafički predstavlja pojedine količine za svaki scenarij. Desni dio slike na Sl.40 je za primjer SSP3-7.0.



Sl.40. Na desni polovini je scenarij SSP3-7.0; lijevo je pripadajući izračun povećanja zračenja.

Na desnoj strani Sl.40 vidimo ukupno predviđeno povećanje prosječne globalne temperature u odnosu na predindustrijsku dobu za slučaj udvostručenja ispusta CO₂ do kraja stoljeća, te utjecaje pojedinih komponenata: pored CO₂, koji bi dodao oko 2,85°C, bi ostali staklenički plinovi dodali oko 1,3°C, dok bi aerosoli oduzeli oko 0,4°C. Ukupno bi se temperatura povećala za 3,7°C u odnosu na predindustrijsku dobu, od čega smo oko 1,1°C već realizirali u zadnjih 175 godina,

IPCC predviđa, da bi tih 3.7°C bilo posljedica povećanja absorpcije stakleničkih plinova za 7 W/m².

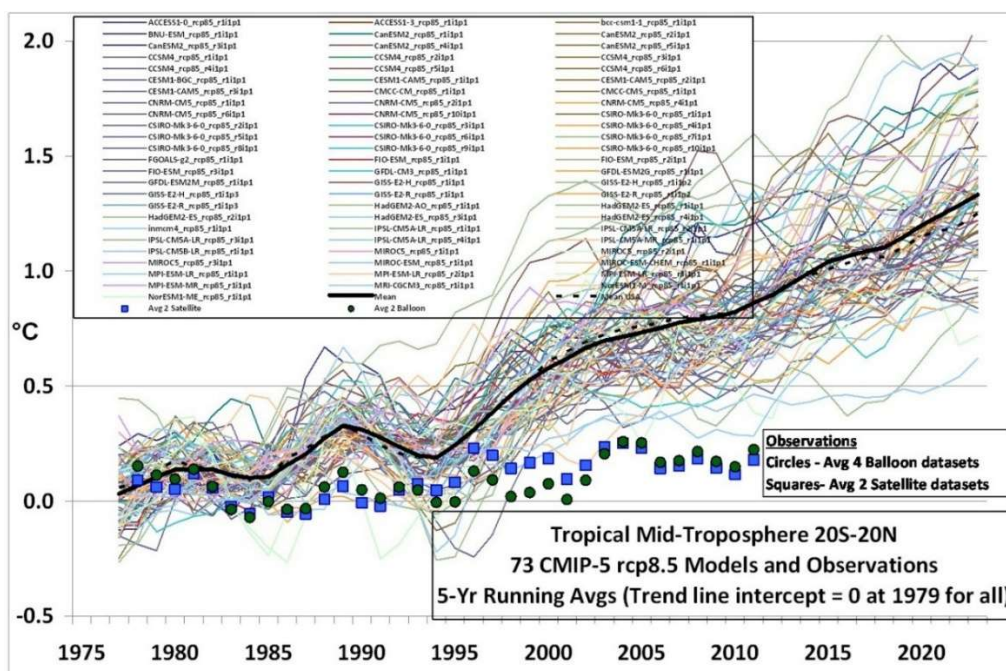
Ali ako po Stefan-Boltzmannovom zakonu izračunamo (Sl.40, lijevo) za koliko bi se moralo povećati zračenje, ako bi se prosječna globalna temperatura povećala za 3,7°C, je rezultat 20 W/m². Cinik bi rekao da je 20 = 7 pri vrlo visokoj vrijednosti 7.

Podsjetimo se Sl.32 i činjenice da izlazno zračenje Zemlje mora ostati jednako ulaznom zračenju Sunca, smanjenom za albedo. Po kakvom fizikalnom procesu bi povećanje absorpcije stakleničkih plinova za 7 W/m² spriječilo povećanje zračenja tla za 20 W/m², to znaju samo pri IPCC.

Ili zapravo ne znaju, jer se nitko od njih nije potrudio **provjeriti** rezultate?

Kako bilo, i ovdje vidimo na djelu sada već znameniti faktor 3.

Da je taj faktor 3 ugrađen i u sve računarske klimatske modele smo vidjeli već prije desetak godina, kada je dr. John Christy (University of Alabama, Huntsville) pokazao graf na Sl.41 prilikom saslušanja pred Senatnim odborom Američkog Parlamenta.



Sl.41. Predviđeni porast temperature do godine 2025., prema simulacijama 73 računarska modela. Modri kvadrati i zeleni krugovi su realni podaci izmjereni meteorološkim balonima i satelitima. Dr. John Christy, prilikom svjedočenja pred Senatnim odborom Američkog Parlamenta.

Dakle, već je godine 2012. bilo jasno, da računarsko modeliranje klimatskih promjena preuveličava izmjereno zagrijavanje za faktor 3. Tu divergenciju imaju ugrađenu u svoje rutine svi računarski klimatski modeli – osim dva Ruska, koja su se najbolje približila izmjerenim podacima.

Sva upozorenja političara, sav pomp masovnih medija, te svo paničarenje podnebnih aktivista su posljedica preuveličavanja temperaturnih trendova računarskih modela za faktor 3 (najmanje!).

Kako izgleda realnost vidjet ćemo u slijedećem poglavlju.

Što o podnebnim promjenama govore šturi podaci?

Kolika je u stvari temperatura? Pa pogledajmo termometar! Ali koji?

Već smo rekli da je prosječna globalna temperatura statistički konstrukt, koji nema mnogo veze s realnošću. Ipak, pri IPCC su jako oprezni, pa ne govore o temperaturi, već o ***temperaturnoj anomaliji***.

Kakav bi rezultat dobili, ako bi uzeli zbroj svih zabilježenih temperatura te ih podijelili s brojem termometara, ne znamo, jer to još nitko nije učinio. Grubu ocjenu prosječne globalne temperature smo dobili tek mjerenjima iz satelita, koji pokrivaju cijelu površinu planeta istim senzorom, iako je taj manje točan od termometara na tlu. No stvarna temperatura nas zapravo ni ne zanima, zanimaju nas dugoročni trendovi. Temperaturna anomalija je u stvari **prosjek odstupanja svih izmjerenih temperatura u odnosu na prosjeke tih istih izmjerenih temperatura unutar nekog referentnog razdoblja**, jednakog za sve termometre.

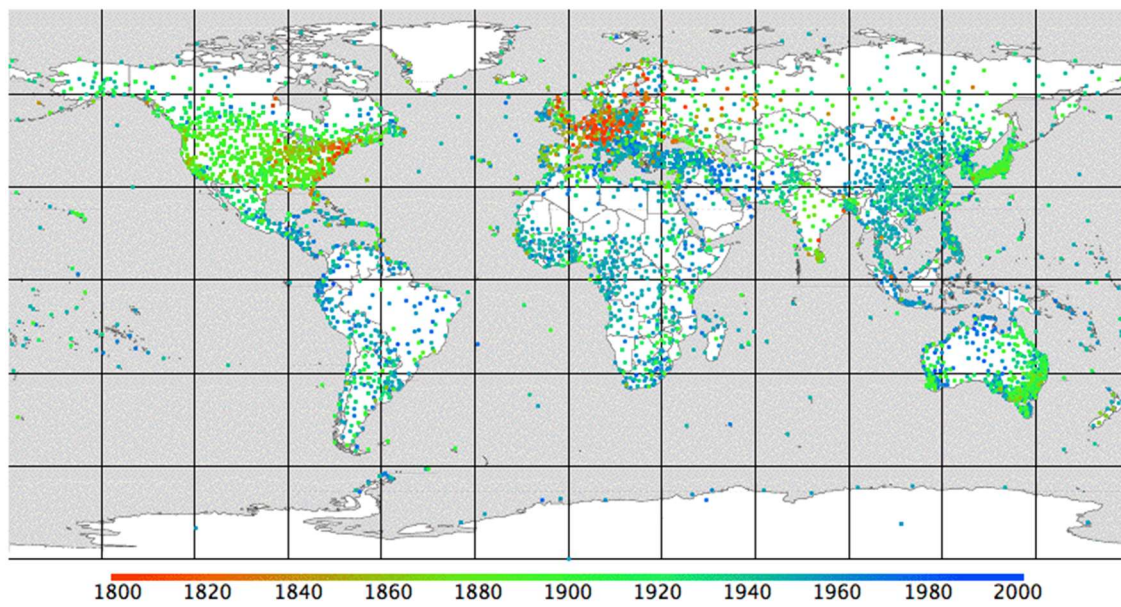
Na primjer, termometar u dolini mjeri stalno znatno više temperature nego termometar na vrhu planine. No ako bilježimo temperature u toku duljeg niza godina, pa prosjek tih izmjerenih vrijednosti svakog termometra uzmemo za osnovu, koju zatim oduzmemo od budućih mjerenja, dobijemo odstupanja od prosjeka svakog termometra. Na kraju možemo izračunati prosječno odstupanje uobičajenim postupkom.

Na taj način smo također (barem teoretski) smanjili sistematske pogreške pojedinih mjernih mjesta, jer jednake pogreške vrijede i za prosjek unutar referentnog razdoblja.

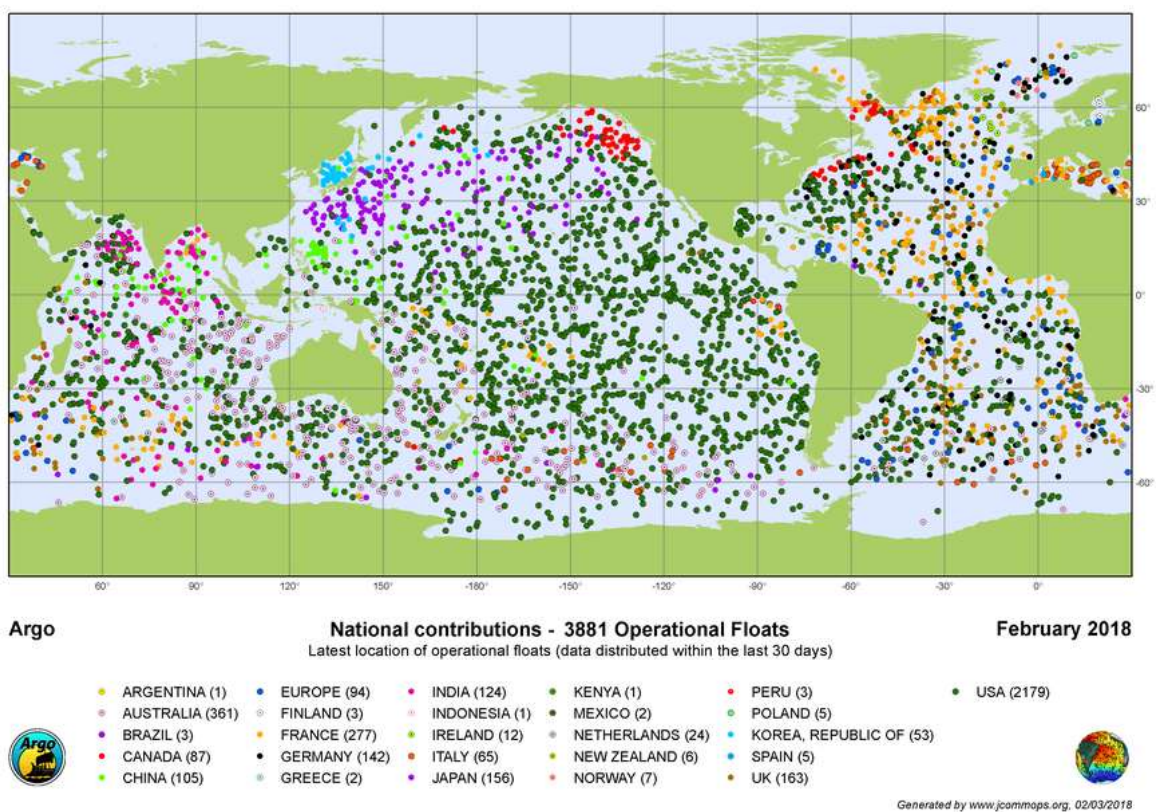
No to nije jedini problem termometara pri tlu. Glavni problem je nejednakomjerna pokrivenost površine planeta i promjene te pokrivenosti tokom godina. Sl.42 prikazuje kako se je mijenjao broj termometara i njihova gustina tijekom zadnjih 200 godina.

Još daleko veći problem su površine oceana, koji pokrivaju 70% površine planeta. Tek od godine 2005. dalje djeluje ARGO sistem automatskih plutača, koje se u redovitim potapljaaju do dubine od 2000 m, te po izronjavanju pošalju radijskim valovima podatke o položaju i temperaturi površine, te dubinskom profilu temperatura, Sl.43.

Prije aktiviranja sistema ARGO su temperaturu površine oceana mjerili brodovi, koji su plovili više-manje stalnim rutama, pa pokrivenost površine nije bila dovoljno gusta. Zbog velikog termičkog kapaciteta vode se temperatura ne mijenja brzo niti u velikim varijacijama, pa su pogreške zbog gustine mjerenja nešto manje, ali ostaje problem da ponegdje uopće nije bilo mjerenja, a drugdje često.



Sl.42. Kako se je mijenala gustine mreže termometara; bojom su označene starosti pojedinih mjernih mjesta.



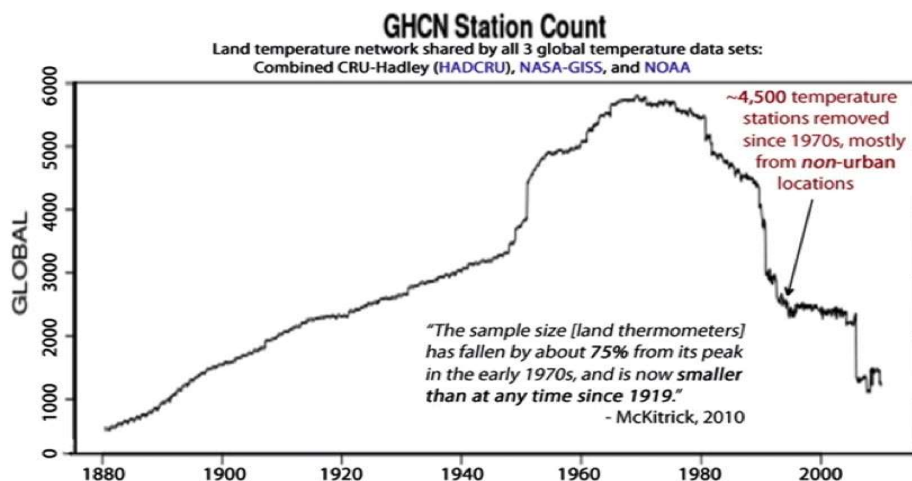
Sl.43. Plutače sistema ARGO od 2005. dalje. Bojom su označene starosti (crvene su najstarije).

Sličan problem predstavlja i način kako su mjerenja vršena. Nekada su u more bacali vedro, koje su zatim podigli na palubu, postavili bilo kamo, na sunce ili u sjenu, dali u vodu termometar, počekali nekoliko minuta (koliko je koji mornar imao strpljenja), te očitali vrijednost, koju su zapisali u brodski dnevnik zajedno s trenutnim geografskim položajem. Kasnije su postavili termometre na usisne cijevi za hlađenje brodskih motora, pa je sakupljanje podataka postalo automatizirano, ali s upitnom sistematskom pogreškom. No ostaje problem i u tome, da se plitka mora zagrijava brže od dubokih i tropska brže od polarnih, pa je u interpolacijama između udaljenih mjernih mjesta potrebno uzeti u obzir dubine, morske struje, pasatne vjetrove, itd.

Danas se temperature površine oceana mjere i iz satelita, pa usporedbom poznatih podataka možemo donekle nadomjestiti manjkajuće podatke s područja koje mreža termometara ne pokriva s dovoljnom gustoćom. No svejedno podaci sakupljeni prije sistematskih satelitskih mjerenja (prije 1979.) ipak imaju mnogo širi interval nesigurnosti.

Općenio je problem termometara pri tlu u novije vrijeme postao veći, umjesto da bi se smanjivao. Razlog tome je smanjenje broja registriranih meteoroloških stanica u mreži GHCN. Padom Sovjetskog saveza su brojne stanice sjeverne Azije prestale djelovati. Prije su mnogi krajevi dobivali od centralnih vlasti u Moskvi dozvole za nabavku energenata, prije svega nafte i ugljena, na osnovi podataka o temperaturama koje su redovito slali. Naravno da su pri tom mnogi podatke namjerno snižavali. Taj sistem je potom ukinut, pa je prestao i interes za redovito izvještavanje o temperaturama. Slično se je dogodilo i drugdje u državama istočne Evrope.

Nešto kasnije, uvedbom računala i digitalnih komunikacija, mnoge stare stnice su bile zamijenjene novima, s preciznijim senzorima, koje su automatski slale izmjerene podatke u centralni arhiv. No takve stanice su većinom postavljali najprije uz aerodrome, što je naravno poželjno za informacije o trenutnom stanju vremena pilotima aviona, posebno pri slijetanju, ali posve neprikladno za studije globalnih podnebnih trendova. Sl.44 pokazuje kako se je s vremenom mijenjao broj registriranih stanica u GHCN (*Global Historical Climate Network*) mreži do 2010. godine, kada je broj stanica pao ispod 1500, kasnije se je taj broj postepeno povećao i danas iznosi oko 5000. Ipak, ostaje problem kompenzacije zbog ispušnih plinova aviona, velikih parkirališta u blizini aerodroma i gustog prometa.

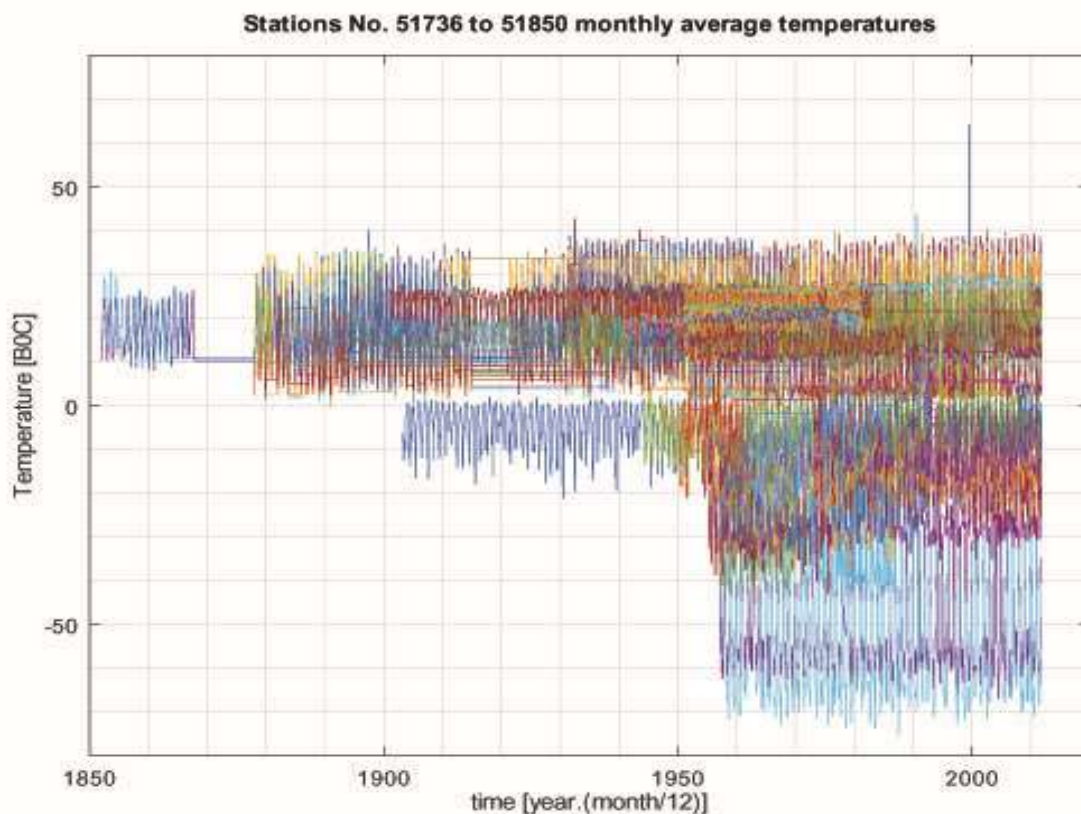


Sl.44. Kako se je s vremenom mijenjao broj registriranih GHCN stanica.

Velika je vjerojatnoća, da je znatan dio zabilježenog porasta temperatura u zadnjim desetljećima posljedica urbanizacije. Kada se je istraživalo trendove isključivo ruralnih stanica, se je pokazalo, da nije moguće govoriti o nekom statistički značajnom porastu temperature. No IPCC tvrdi, da stručnjaci znaju dovoljno dobro kompenzirati učinke toplih urbanih otoka.

Za ilustraciju pogledajmo neprerađene podatke prosječnih mjesečnih temperatura 79tak nasumično izabranih registriranih stanica, Sl.45. Duge ravne crte označavaju razdoblja u kojima neke od tih stanica nisu djelovale, ili je iz nekog od mnogih mogućih razloga dio potataka bio nesiguran.

Među stanicama uključenim u Sl.45 ih je nekoliko iz Sibira i dvije na području Antarktike, gdje su prosječne zimske temperature često oko -70°C . Jedna od stanica je u izvještajima 1999 godine zaboravila pretvoriti podatke iz $^{\circ}\text{F}$ u $^{\circ}\text{C}$, pa tako vidimo jednu visoku špicu, koja nije popravljena, te je i danas dio službene prosječne temperaturne anomalije. No to na sreću ne utječe mnogo na prosijek.

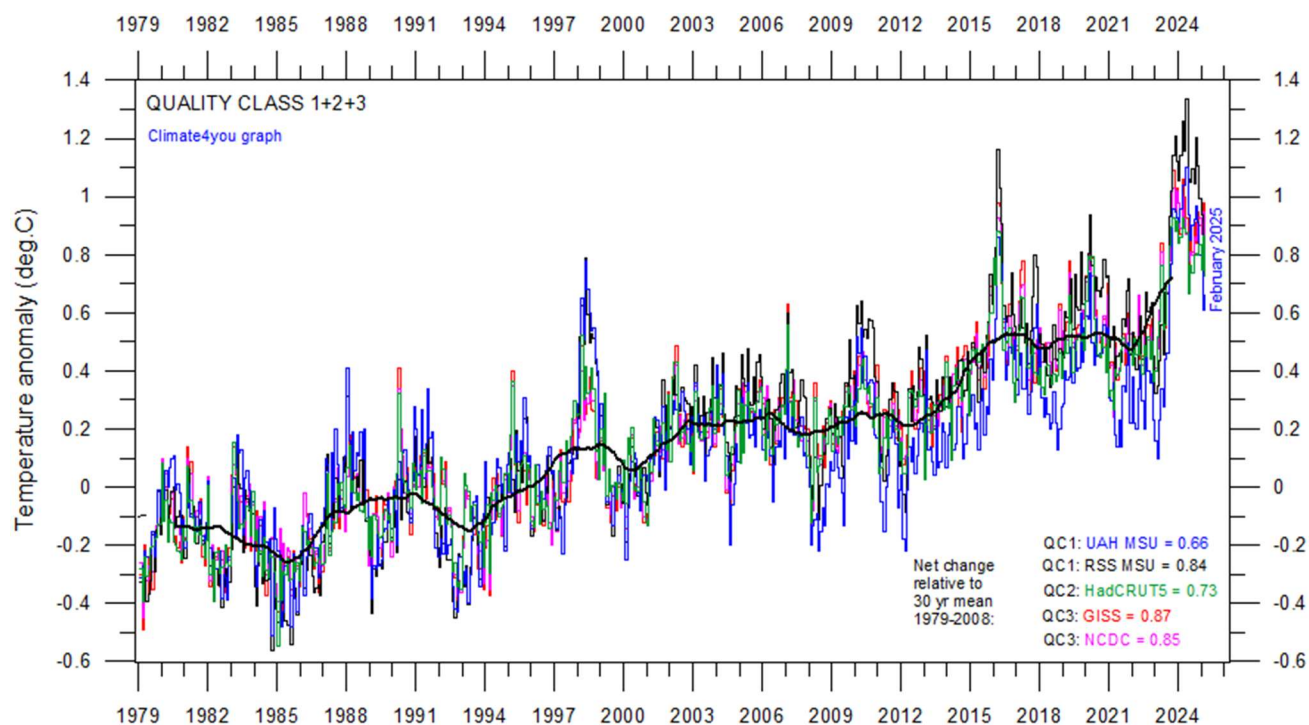


Sl.45. Neobrađeni prosječni mjesečni podaci nekih 79tak registriranih GHCN stanica.

Iz Sl.45 je jasno da rasprava o trendu od oko $0,15$ do $0,20^{\circ}\text{C}$ na desetljeće nema baš mnogo smisla. Takav je naime trend temperaturne anomalije u zadnjih "najstrmijih" 45 godina.

Sl.46. prikazuje globalna prosječna mjesečna temperaturna odstupanja za svih 5 glavnih svjetskih temperaturih arhiva u razdoblju satelitskih mjerenja (od godine 1989. dale), te njihov zajednički

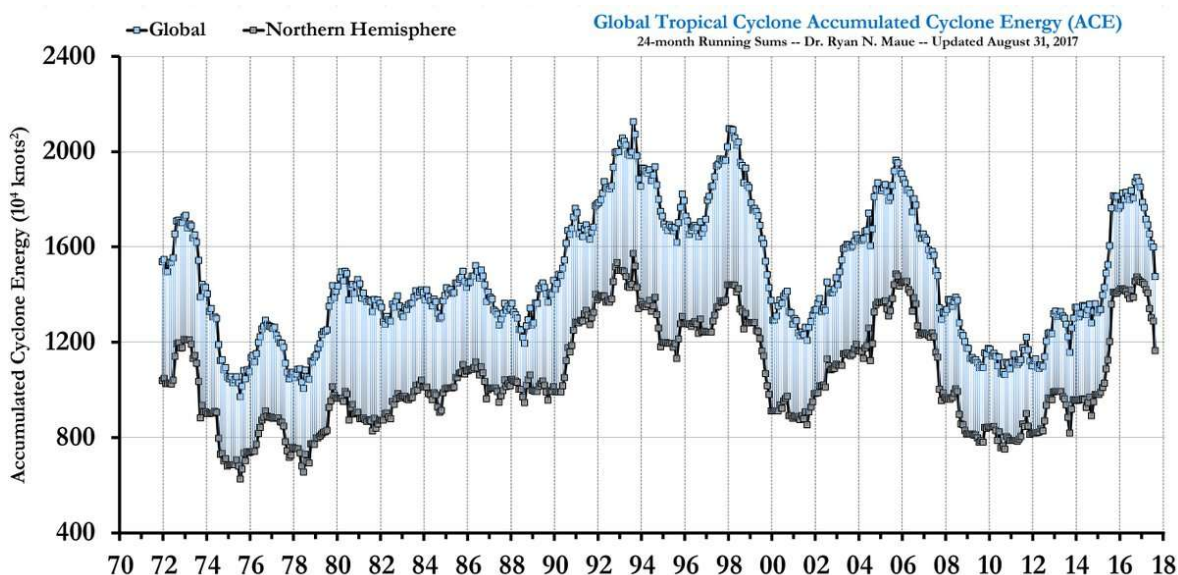
trogodišnji tekući prosjek. Veće široke špice su posljedica pojava *El Niño* (zagrijavanja Tihog oceana uz zapadnu obalu Južne Amerike oko Božića), strmi padovi su pretežno posljedica većih vulkanskih aktivnosti.



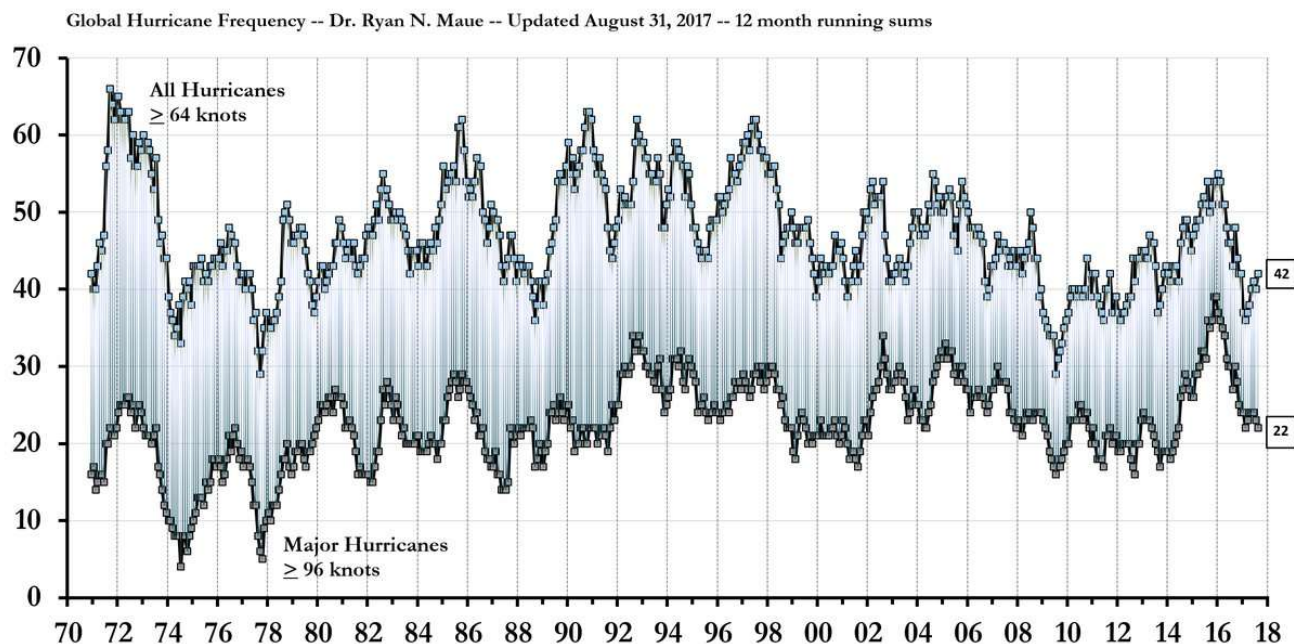
Sl.46. Globalna prosječna mjesečna temperaturna odstupanja glavnih svjetskih temperaturnih arhiva u zadnjih 45 godina.

Posljedice globalnog zagrijavanja i ekstremne vremenske pojave

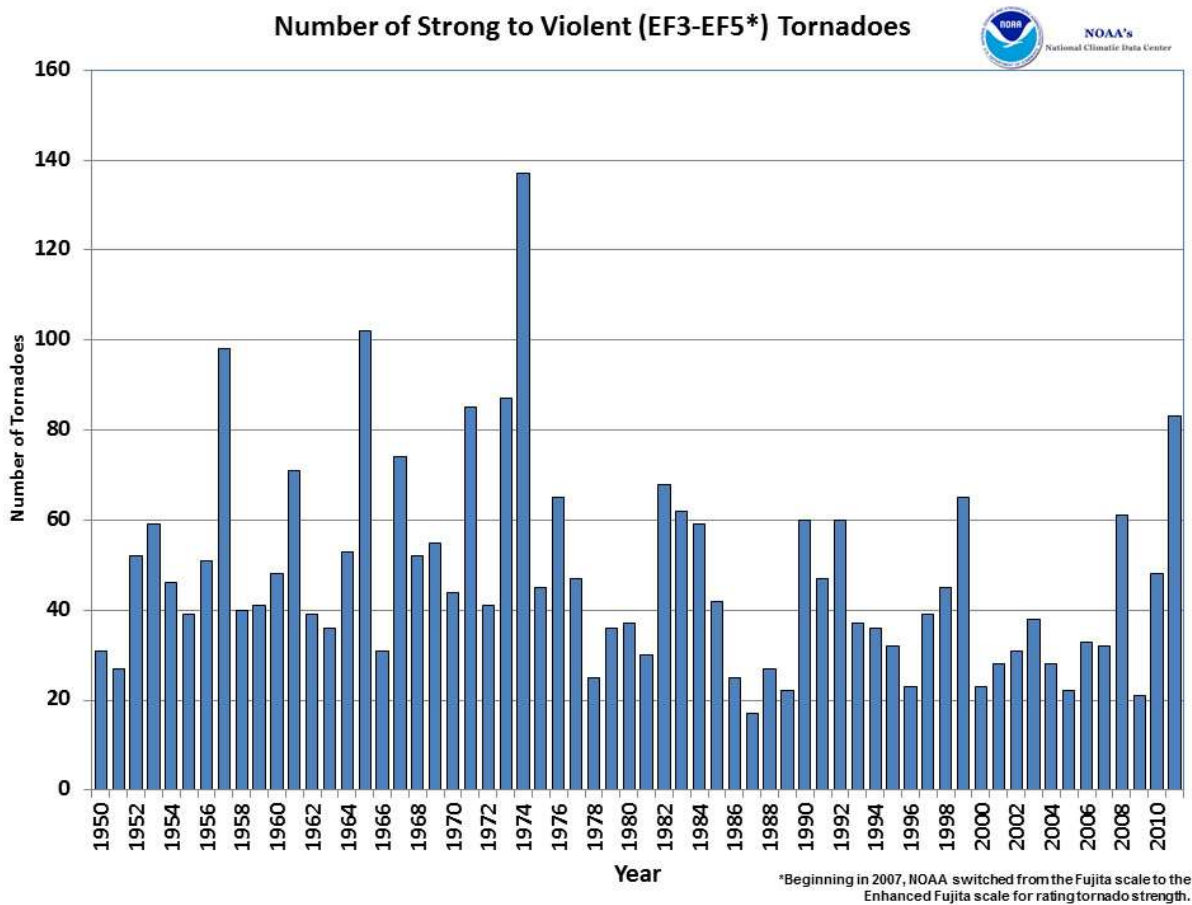
Slijedi nekoliko grafičkih prikaza podataka o pojedinim meteorološkim pojavama zabilježenim u zadnjim desetljećima ili duže. Iz tih usporedbi se vidi koliko su opravdana panična upozorenja o teškim posljedicama globalnog zagrijavanja do kraja XXI stoljeća.



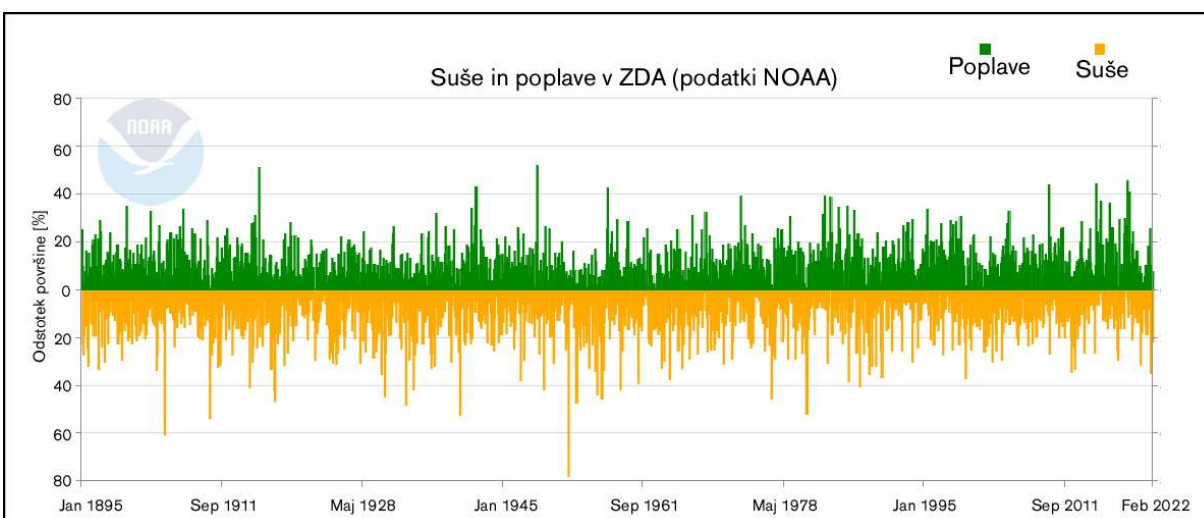
Sl.47. Trend akumuliranih energija tropskih ciklona, globalno i na sjevernoj polutki.



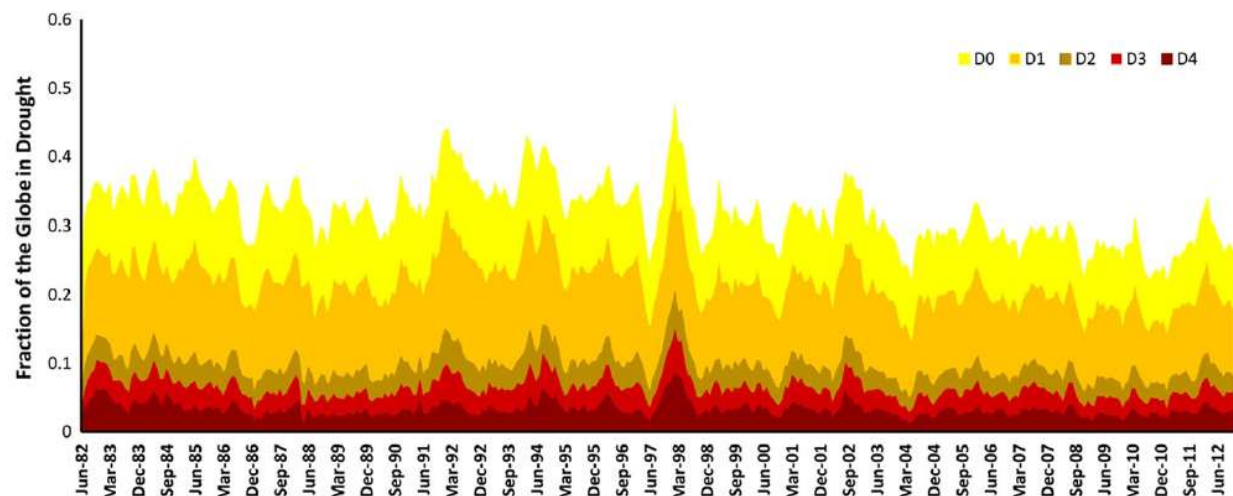
Sl.48. Trend učestalosti svih hurikana s brzinama vjetra >120 km/h, te jačih hurikana >180 km/h.



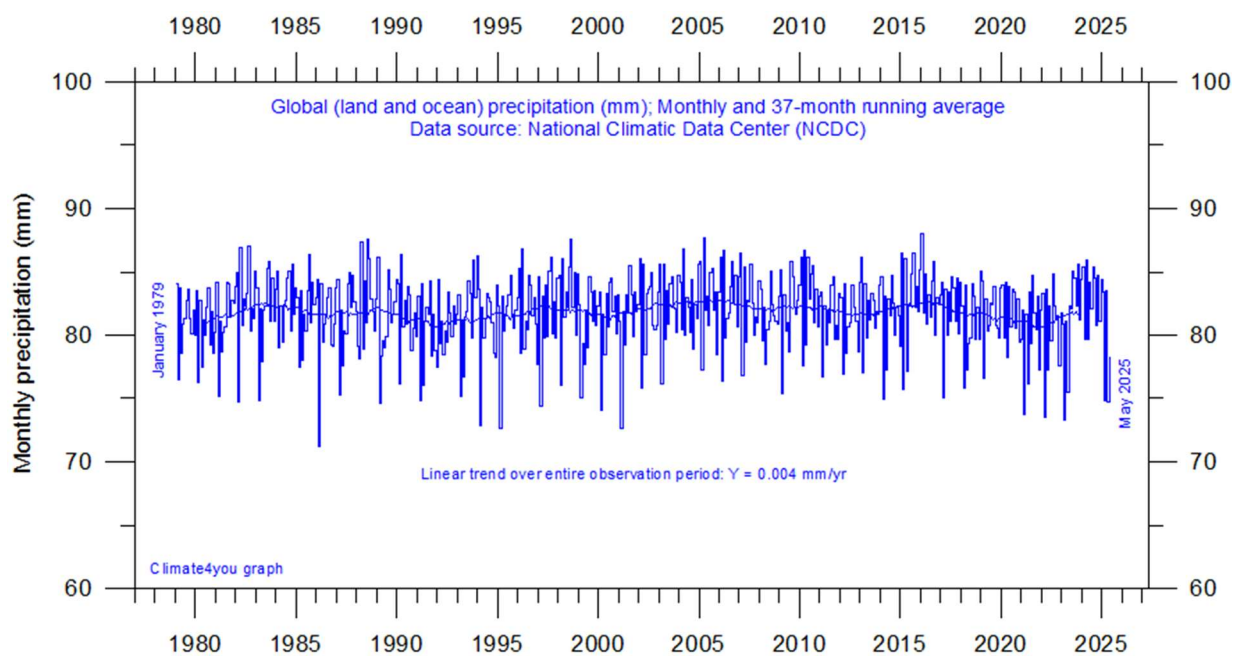
Sl.49. Trend godišnjeg broja jakih tornada po Fujita ljestvici (EF3-EF5).



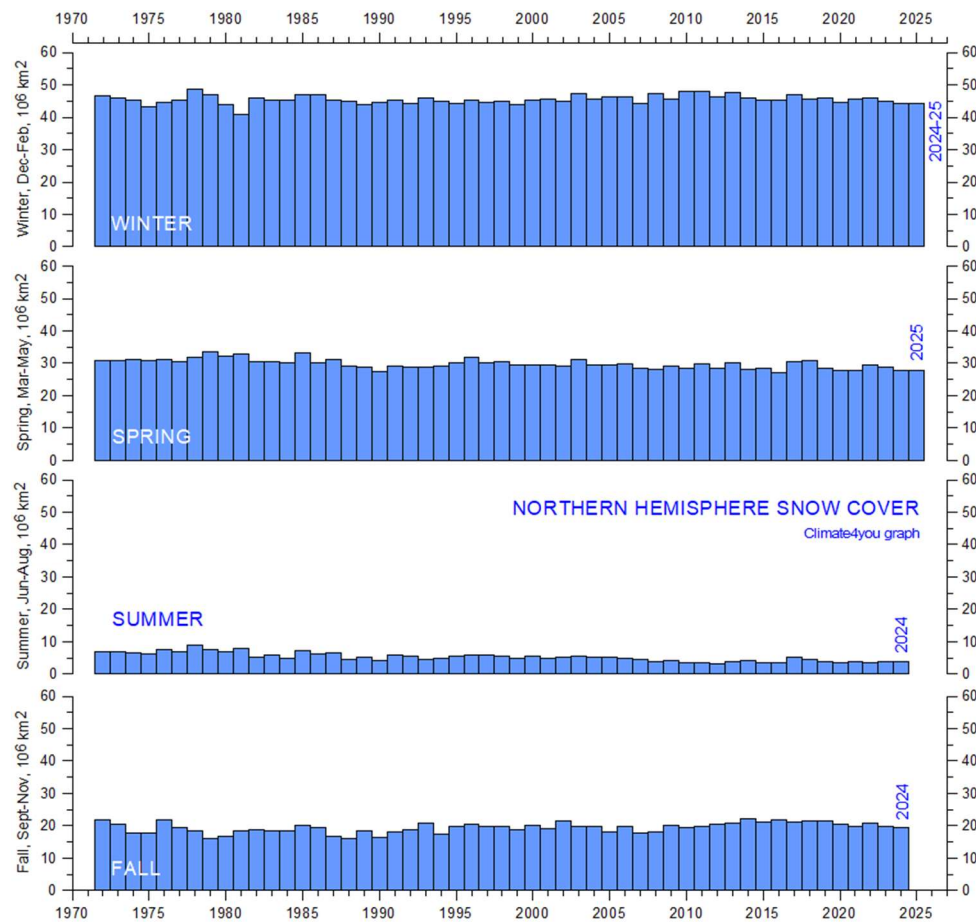
Sl.50. Trend suša i poplava u SAD zadnjih 125 godina.



Sl.51. Trend suša globalno: D0 nnormalne suše, D1 srednje, D2 jače, D3 izrazito jake, D4 iznimno jake suše.

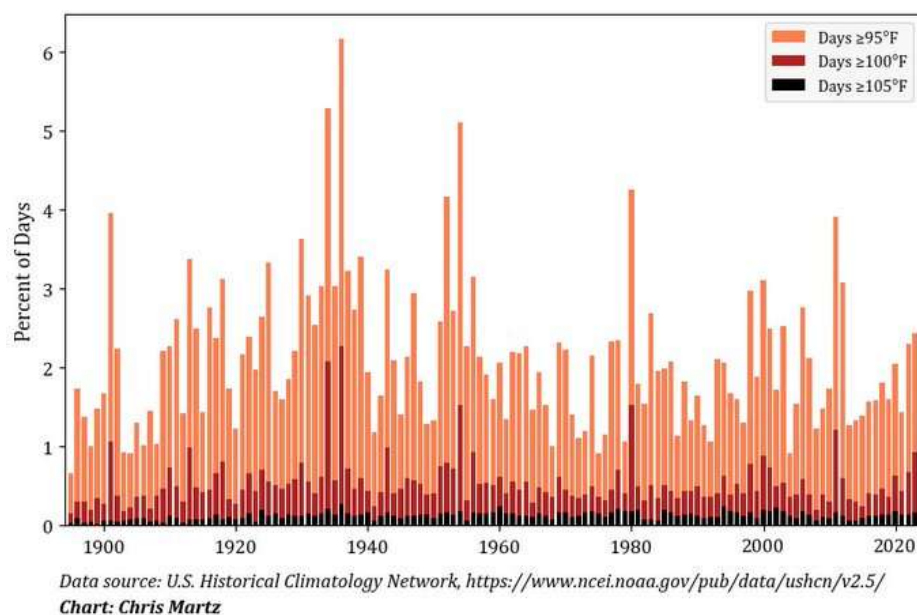


Sl.52. Globalne padavine (mm/m² mjesečno).

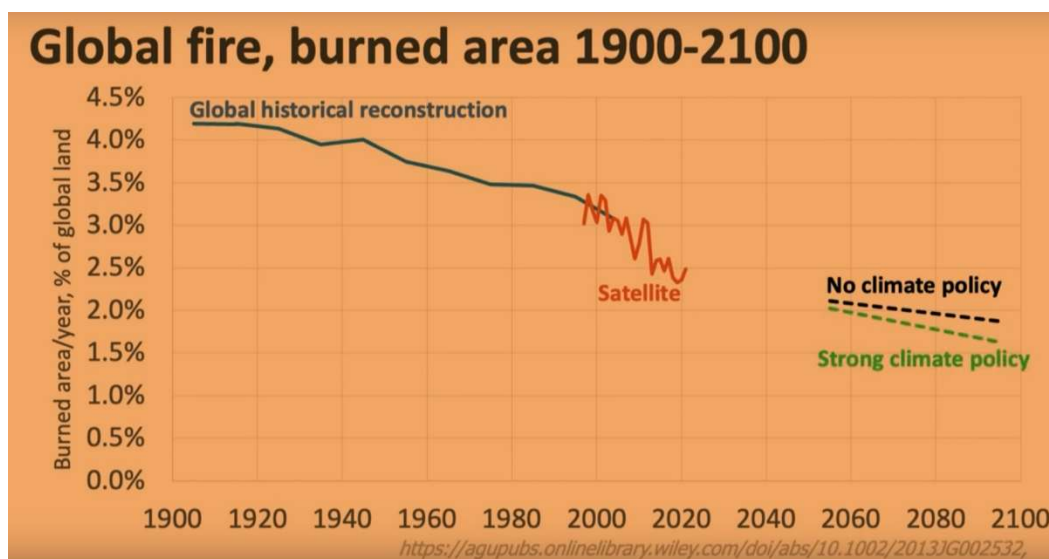


Sl.53. Površina sjeverne polutke pokrivena snijegom za pojedina godišnja doba.

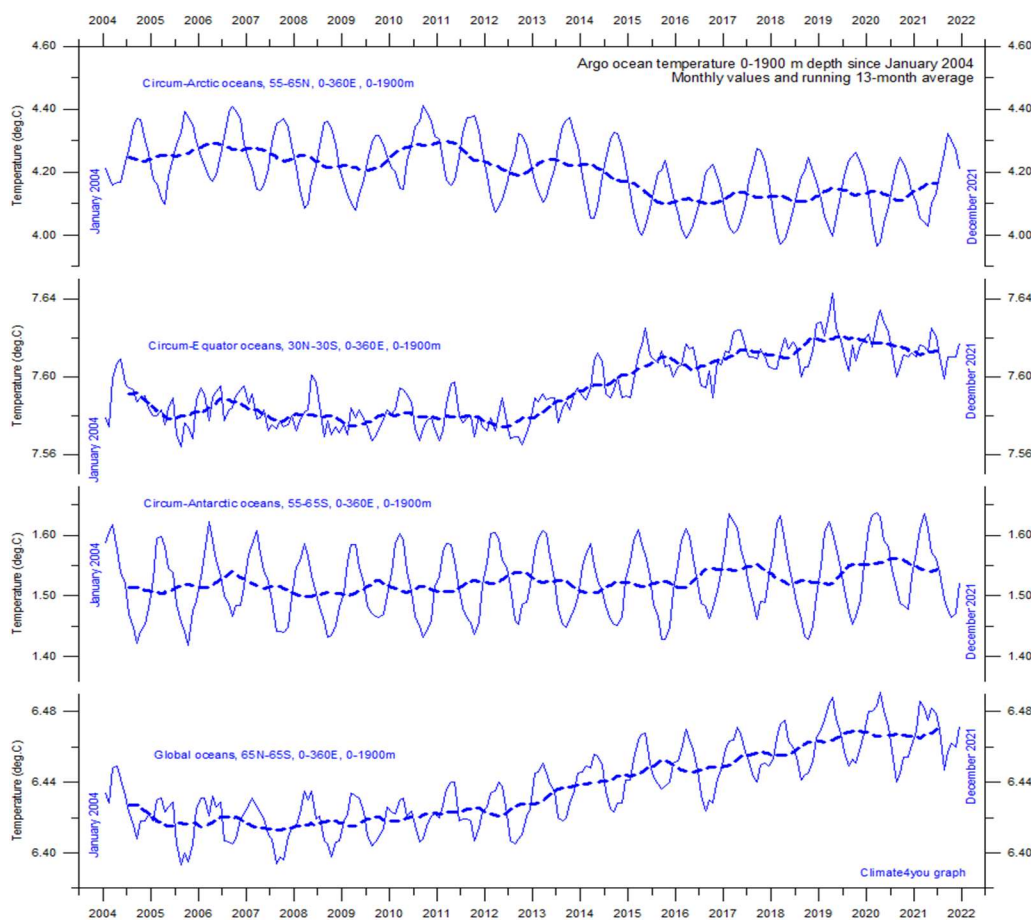
Conterminous U.S. Observed Number of Very Hot Days Per Year 1895 to 2023



Sl.54. Indeks vrućinskih valova u SAD. Još uvijek vrijede rekordne vrijednosti iz sredine 30tih godina XX st.



Sl.55. Poviršine zahvaćene požarima, globalno godišnje; povjesna rekonstrukcija, satelitska mjerenja i prognoze.



Sl.56. Prosječne mjesečne promjene temperature mora izmjerene sistemom ARGO do 1900 m dubine.

Kako vidimo iz svih prikazanih podataka, nije moguće govoriti o izrazitom trendu pogoršanja stanja, trendovi su ili neizraziti, ili blago padaju, unatoč tome da neke temperature blago rastu. Tu situaciju odražava Sl.57 s Tabelom 12.12 iz 12. poglavlja zadnjeg izvještaja IPCC AR6 (str. 1856).

Chapter 12

Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment

Table 12.12 | Emergence of CIDs in different time periods, as assessed in this section. The colour corresponds to the confidence of the region with the highest confidence: white cells indicate where evidence is lacking or the signal is not present, leading to overall *low confidence* of an emerging signal.

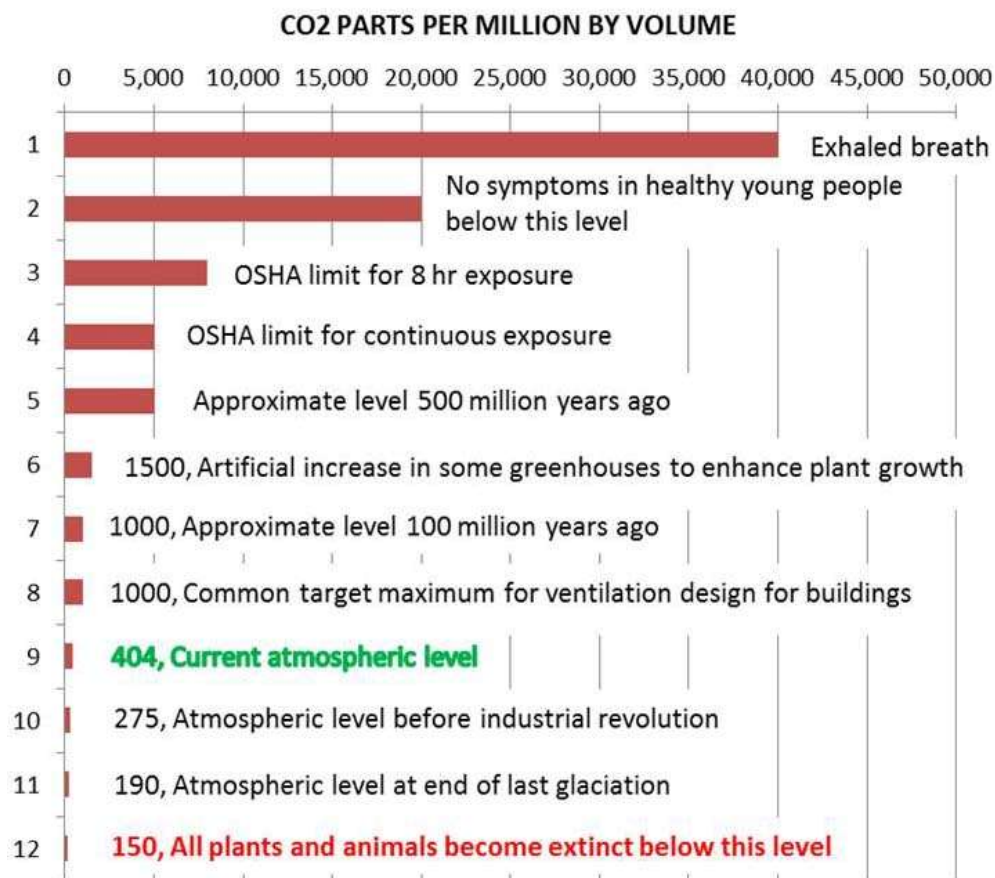
Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period	Emerging by 2050 at Least for RCP8.5/SSP5-8.5	Emerging Between 2050 and 2100 for at Least RCP8.5/SSP5-8.5
Heat and Cold	Mean air temperature	1		
	Extreme heat	2	3	
	Cold spell	4	5	
	Frost			
Wet and Dry	Mean precipitation		6 7	
	River flood			
	Heavy precipitation and pluvial flood			8
	Landslide			
	Aridity			
	Hydrological drought			
	Agricultural and ecological drought			
	Fire weather			
Wind	Mean wind speed			
	Severe wind storm			
	Tropical cyclone			
	Sand and dust storm			
Snow and ice	Snow, glacier and ice sheet		9	10
	Permafrost			
	Lake, river and sea ice	11		
	Heavy snowfall and ice storm			
	Hail			
	Snow avalanche			
Coastal	Relative sea level		12	
	Coastal flood			
	Coastal erosion			
Open Ocean	Mean ocean temperature			
	Marine heatwave			
	Ocean acidity			
	Ocean salinity	13		
	Dissolved oxygen	14		
Other	Air pollution weather			
	Atmospheric CO ₂ at surface			
	Radiation at surface			

1. *High confidence* except over a few regions (CNA and NWS) where there is *low agreement* across observation datasets.
2. *High confidence* in tropical regions where observations allow trend estimation and in most regions in the mid-latitudes, *medium confidence* elsewhere.
3. *High confidence* in all land regions.
4. Emergence in Australia, Africa and most of Northern South America where observations allow trend estimation.
5. Emergence in other regions.
6. Increase in most northern mid-latitudes, Siberia, Arctic regions by mid-century, others later in the century.
7. Decrease in the Mediterranean area, Southern Africa, South-west Australia.
8. Northern Europe, Northern Asia and East Asia under RCP8.5 and not in low-end scenarios.
9. Europe, Eastern and Western North America (snow).
10. Arctic (snow).
11. Arctic sea ice only.
12. Everywhere except WAN under RCP8.5.

Sl.57. Tabela 12.12 iz izvještaja IPCC AR6, str. 1856. Bojama su označene do sad zapažene pojave povećane ili smanjene učestalosti i/ili intenziteta (prvi stupac), te predviđanja istih (drugi i treći stupac). Većina polja je bijelih, što znači da nije zapažen izrazit trend ili da su podaci nesigurni.

Problem ispusta CO₂ i drugih spojeva

Ugljikov dioksid, CO₂, je u normalnim uvjetima plin, bez boje okusa i mirisa. Nastaje pretežno oksidacijom organskih spojeva bogatih ugljikom, kamo ubrajamo i procese spore oksidacije pri metabolizmu bioloških organizama. Sl.58 prikazuje neke njegove karakteristike i učinke u ovisnosti od koncentracije u zraku.



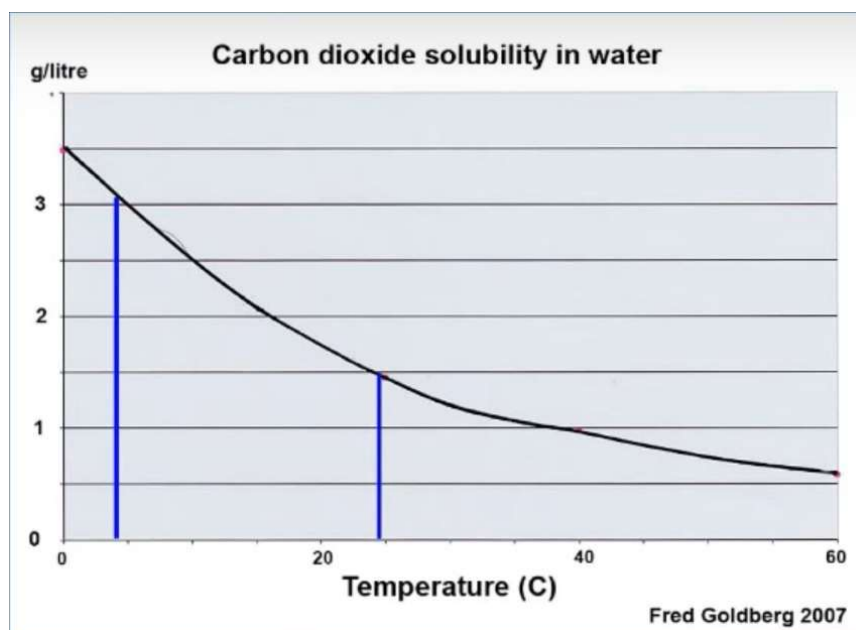
Sl.58. Neke od karakteristika CO₂ ovisno o koncentraciji u zraku.

Vidimo da je u izdahnutom zraku (1) koncentracija CO₂ oko 100× veća od one u udahnutom (9) zraku. Kolika je štetnost udisanja CO₂ u tim koncentracijama najbolje govori činjenica, da čovjeku kod kojeg je došlo do zastoja disanja možemo spasiti život davanjem umjetnog disanja po metodi "usta na usta", pri čemu je ravan kisika niža (17% umjesto 21%). Naravno, u tom slučaju se radi o kratkotrajnoj ispostavljenosti visokim koncentracijama. No kod zdravih mladih ljudi udisanje CO₂ u koncentracijama do 20.000 ppm (2%) ne ostavlja nikakvih posljedica po zdravlje.

Veći problem predstavljaju niske koncentracije: pod 150 ppm biljke ne mogu više absorbirati CO₂ iz zraka, jer je parcijalni pritisak plina u zraku prenizak, prekida se proces fotosinteze i biljke odumiru. Toj ravni smo se već opasno približili nekoliko puta u zadnjih 500.000 godina, zadnji put pred kraj ledenog doba prije 15.000 godina, kad je koncentracija iznosila samo 190 ppm. Možemo zato reći, da je CO₂ plin života, bez njega bi na Zemlji prevladavale anaerobne bakterije,

kompleksni oblici života se uopće ne bi mogle razviti, jer oksidacija omogućava efikasniji utrošak biokemijske energije.

Uzrok smanjivanju CO_2 tokom dugih geoloških razdoblja su morski mikro-organizmi, koji vrlo efikasno usrkavaju CO_2 rastopljen u morskoj vodi, iz njega stvaraju kalcijev karbonat, CaCO_3 , koji upotrebljavaju za izradu svojih zaštitnih oklopa. Kad ti organizmi odumru njihovi oklopi padaju na morsko dno i tvore naslage kalcita. Većina CO_2 iz ranijih geoloških razdoblja se danas nalazi u Dolomitima i drugim mlađim geološkim gorskim i oceanskim formacijama. Sl.59 prikazuje topnost CO_2 u morskoj vodi ovisno o temperaturi vode. Pri 25°C je topnost samo 1,5 g/l, a pri 4°C je nešto veća od 3 g/l.



Sl.59. Topnost CO_2 u morskoj vodi ovisno o temperaturi.

Usporedimo to s omjerom masa u zraku, gdje je dio mase CO_2 oko 0,09% u 1m^3 zraka, masa kojega iznosi 1,2kg, pa vidimo da je koncentracija CO_2 u hladnoj vodi gotovo $4\times$ veća nego u zraku. Topnost drugih plinova, na primjer O_2 , je također veća u hladnoj vodi.

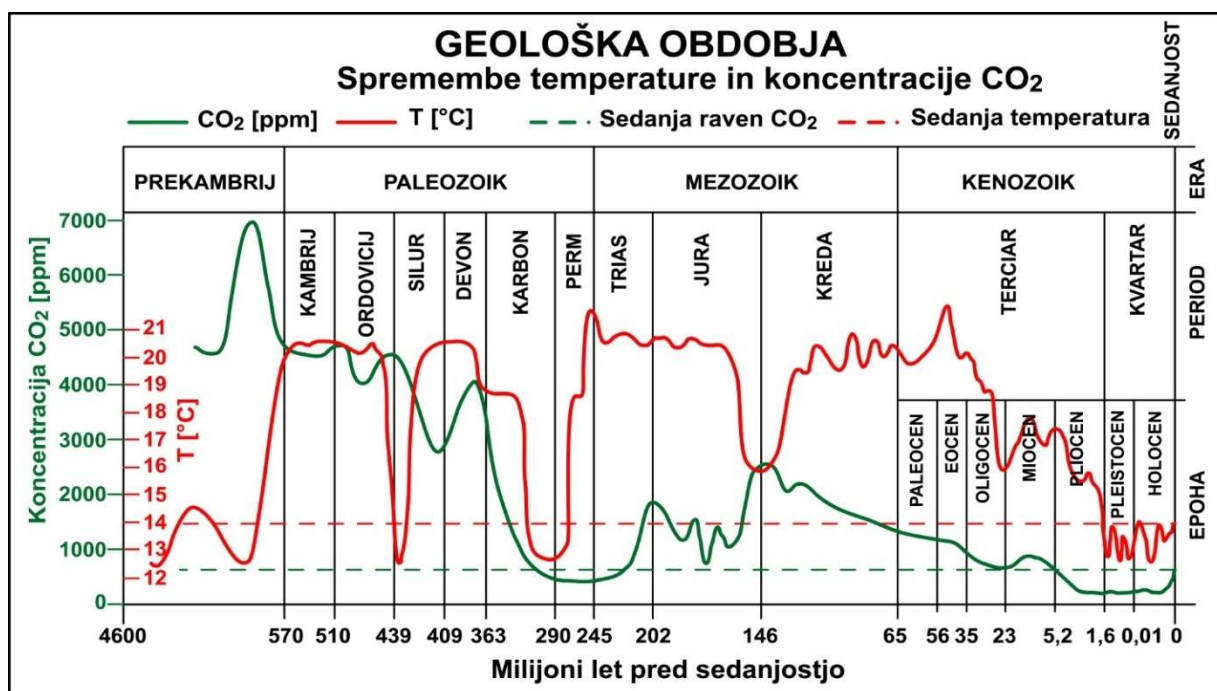
Kad se dakle površina mora zagrije, ispušta velike količine CO_2 , slično kao i otvorena Coca-Cola.

Pogledajmo najprije geološku povijest Zemlje, koja je nastala – kako možemo zaključiti iz omjera koncentracija nekih težih radioaktivnih elemenata – prije otprilike 4,6 milijardi godina. Sl.58 prikazuje temperature i koncentracije CO_2 u toku geološkog, te kasnije i biološkog razvoja na planetu. Vremenska os nije u nekom pravilnom omjeru, no novija razdoblja odgovaraju približno logaritamskoj ljestvici.

Iz Sl.60 možemo razabrati, da su se u tijeku geoloških razdoblja temperature i koncentracije CO_2 mijenjale neovisno, nekorelirano. Osim toga u ranoj povijesti Zemlje je koncentracija CO_2 bila pretežno vrlo visoka, između 7000 i 4000 ppm. Do prave eksplozije života na planetu je došlo prije nekih 600 milijona godina, dok je koncentracija CO_2 bila još uvijek visoka, $10\times$ veća od današnje.

U tom razdoblju je došlo do naglog povećanja temperature, vjerojatno zbog promjena orbite planeta, a osim toga su u istom razdoblju neki mikro-organizmi počeli ispuštati velike količine kisika, njegova koncentracija se je podigla s vrlo niskih vrijednosti na za 50% višu vrijednost od današnje. Uslijed toga su neki drugi mikro-organizmi otkrili, da im kisik i oksidativni procesi u metabolizmu omogućavaju veću energiju za gibanje, od čega je pak ovisila vjerojatnost preživljavanja.

Tako je započeo razvoj života, koji je evolucijom doveo do postanka današnjih oblika. Prije nekih 360 milijuna godina došlo je postepenog smanjivanja CO₂, a nakon toga je pala i temperatura, pa je došlo do gotovo potpunog zamrzavanja planeta, izumrle su mnoge vrste biljaka i životinja. Kasnije je ponovo došlo promjena temperature i koncentracije CO₂, no gotovo nikad te promjene nisu bile istovremene. Prosječne temperature su se mijenjale za gotovo 8°C, no unatoč svemu Zemlja nije nikad postala slična Veneri, čime nam danas prijetu podnební aktivisti i političari.



Sl.60. Promjene temperature i koncentracije CO₂ tijekom geološke povijesti planeta.
C.R. Scotese, 2002, W.F. Ruddiman, 2001, i drugi.

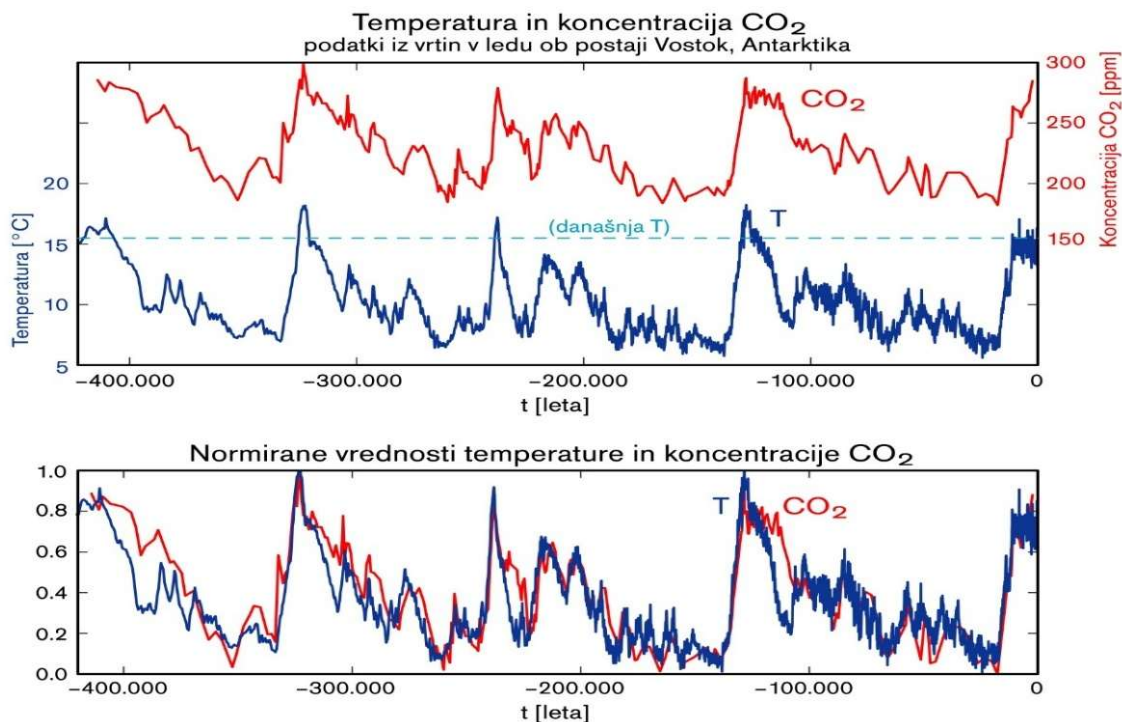
Zadnjih 500.000 godina je Zemlja u razdoblju u kojem prevladavaju ledena doba, koja se izmjenjuju s rijetkim i kratkim interglacialnim razdobljima u kakvom smo danas. U tom razdoblju smo zaspazili (prije svega analizom omjera izotopa ¹⁸O/¹²O, te ¹⁴C/¹²C u mjehurićima zraka u polarnom ledu), da su se temperature i koncentracije CO₂ mijenjale gotovo sinhrono, Sl.61 i Sl.62.

Tu činjenicu je pokušao iskoristiti Al Gore u svom znamenitom filmu *Inconvenient Truth* (Neugodna istina) kao dodatni argument za tezu, da CO₂ određuje temperaturu planeta. To zapravo nije izričito tvrdio, rekao je otprilike kako je "sve skupa jako komplicirano, ali kad god je bila koncentracija CO₂ visoka, bila je visoka i temperatura". A novinari su tu izjavu interpretirali kao implicitnu tvrdnju, da CO₂ određuje temperature.

Al Gore je bio dvaput upozoren, da podatke na Sl.61 radje ne pokazuje, dvjica njegovih savjetnika pri nastajanju filma su ga upozorila kako istina i nije baš tako neugodna, no Gore je svojeglavo ustrajao, što je kasnije postalo osnova za sudsku odluku u Velikoj Britaniji, da film treba pokazati djeci uz relativni komentar zbog više zavajajućih navoda. Na Sl.62 možemo lijepo vidjeti razloge za takvu odluku suda.



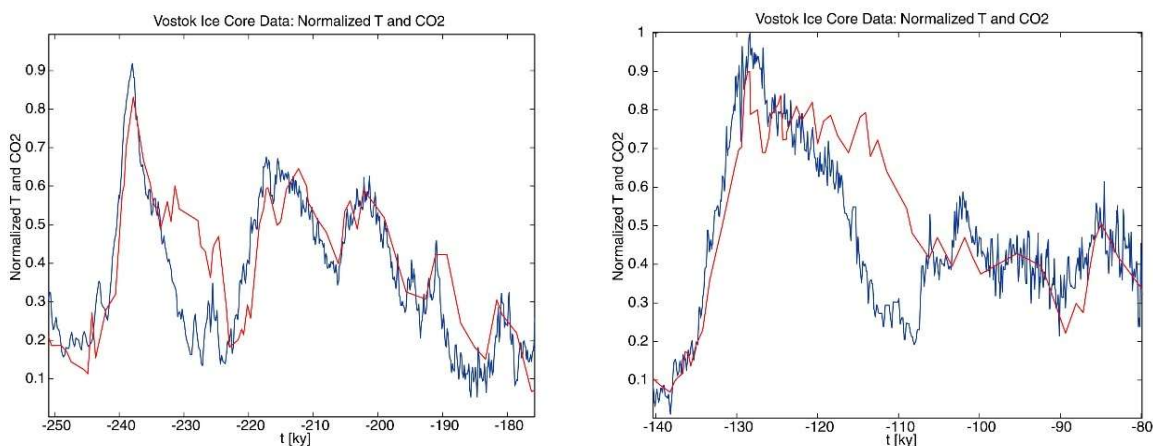
Sl.61. Al Gore u filmu *Inconvenient Truth* pokazuje korelaciju između CO_2 i temperature u zadnjih 450.000 godina.



Sl.62. Temperature su se mijenjale za oko 8°C , dok se je koncentracija CO_2 mijenjala za samo 50% (200-300 ppm). Normiran prekrivajući graf jasno pokazuje da su promjene temperature prethodile promjenama koncentracije CO_2 .

Al Gore je korektno pokazao vertikanu ljestvicu za koncentracije CO₂, no za temperaturu je zapisao samo "*Temp. in F*" (temperature u stupnjevima Fahrenheita), bez numeričkih oznaka. No iz javno dostupnih numeričkih podataka vidimo, kako je temperatura na kraju svakog ledenog doba u samo par tisuća godina porasla za cijelih 8°C ili više, a zatim, sa zakašnjenjem od prosječno nekih 800 godina, je slijedio i porast koncentracije CO₂, ali tek za oko 50% (200-300ppm).

Već smo vidjeli iz suvremenih podataka, Sl.10, da bi za udvostučenje koncentracije CO₂ teoretski očekivali u najboljem slučaju samo oko 1,1°C višu temperaturu. Isto tako smo vidjeni i što znači za topnost CO₂ u vodi, ako se temperature promijeni za 8°C, Sl.59. Oceani se zagrijavaju mnogo sporije od zraka, posebno u dubinama, pa traje nekih 800 godina da morske struje dobro promiješaju svu tu vodu. Vremenski zoom nam jasno pokaže zaostajanje promjena CO₂ za temperaturom, kako pri rastu tako i pri padu, gdje su zakašnjenja još veća, Sl.61. Iz toga je jasno, da je Al Gore namjerno prikrrio podatke o temperaturi i oba grafa prikazao odvojeno, kako se ne bi vidjelo što je uzrok a što posljedica.

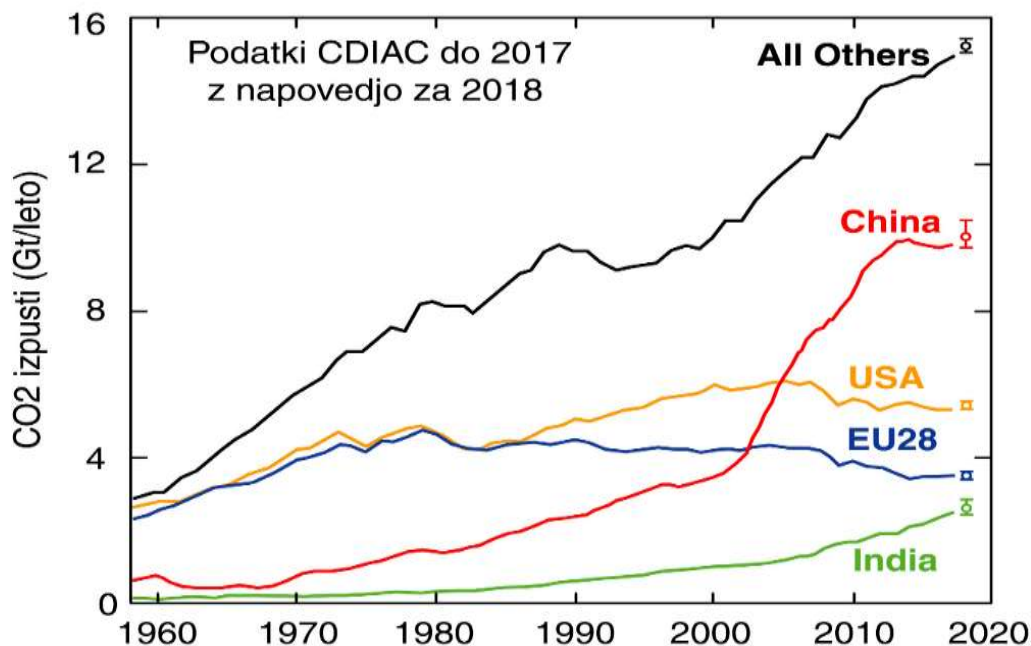


Sl.63. Detalji sa Sl.62. Jasno se vidi zaostajanje CO₂ za temperaturom.

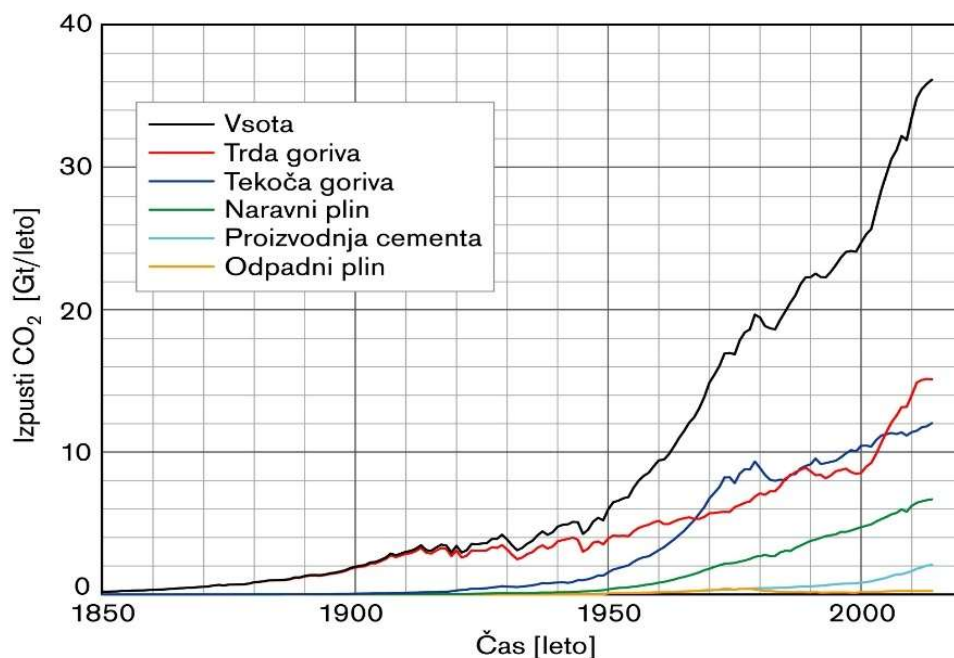
Iz navedenih podataka je jasno da CO₂ zaostaje za temperaturom, no nismo još razjasnili zašto je koncentracija CO₂ ostala najviše na oko 300 ppm. Da li to znači, da je u zadnjim desetljećima čovjekov utjecaj ipak bio dominantan?

Ne nužno. Naime, podaci koje smo dobili iz bušotina u polarnom ledu predstavljaju prosječne vrijednosti za nekih 170 godina, toliko traje da se površinski sloj leda, koji se svake godine topi i ponovo smrzava, konačno prekrije novim slojevima, pa se zahvaćeni mjehurići plinova ustale. Kraće varijacije koncentracije jednostavno ne možemo detektirati. Također, različiti plinovi imaju razlučitu difuziju kroz led i vodu, pa možemo pretpostaviti, da analizirane koncentracije predstavljaju prosječne vrijednosti, te da su varijacije mogle iznositi minimalno dodatnih $\pm 35\%$. To znači, da je sasvim moguće, da su nekadašnje koncentracije CO₂ bile vrlo slične današnjima.

Pogledajmo podatke o čovjekovim ispustima, Sl.64 i Sl.65.



Sl.64. Godišnji izpusti CO₂ u zadnjih 60tak godina po industrijaliziranim državama u milijardama tona.



Sl.65. Godišnji izpusti CO₂, ukupno i po vrstama goriva i proizvodnim aktivnostima u milijardama tona.

Desetine milijardi tona izgledaju na prvi pogled jako velike količine, pogotovo ako znamo da je debljina atmosfere samo nekih 10 km (oko 90% atmosfere je unutar te granice). No gustina atmosfere pri tlu iznosi oko 1,2 kg/m³, pa srednja gustina na nekih 5,6 km iznosi $m_s = 0,6 \text{ kg/m}^3$. Zemljin srednji polumjer iznosi oko 6371 km, a volumen kugle iznosi $(4/3)\pi R^3$. Dodamjo tome 10 km visine atmosfere, pa nam razlika obju volumena daje volumen same atmosfere:

$$V_a = (4/3) \pi [(6371 + 10)^3 - 6371^3] = 1,22 \times 10^9 \text{ km}^3$$

U jedinicama m^3 je taj broj za faktor 10^9 puta veći, dakle:

$$V_a = 1,22 \times 10^{18} \text{ m}^3$$

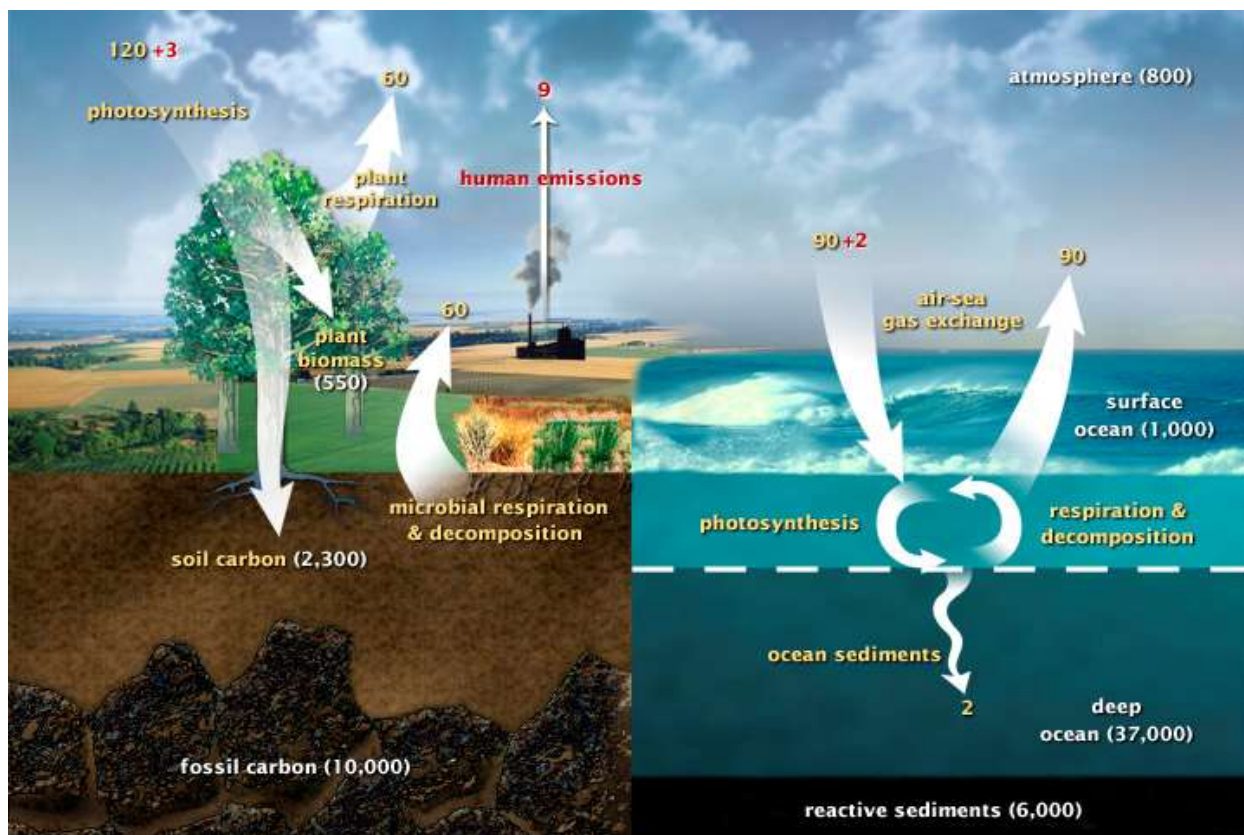
Pomnožimo to s srednjom gustnom mase atmosfere pa dobijemo ukupnu masu, ta iznosi:

$$m_s \times V_a = 0,732 \times 10^{18} \text{ kg, ili } 0,732 \times 10^{15} \text{ tona}$$

Ako to usporedimo s ukupnom godišnjom količinom ispusta je omjer

$$36 \times 10^9 / 0,732 \times 10^{15} = 8,6 \times 10^{-5}, \text{ ili oko } 0,86\%.$$

To nije mnogo, no potrebno je uzeti u obzir činjenicu, da se ispusti CO_2 za neko vrijeme akumuliraju u atmosferi, te da drugi prirodni procesi ispuštaju i absorbiraju svoje količine CO_2 . Kako bi dobili bolju sliku godišnjih protoka CO_2 radi svih procesa, pogledajmo Sl.66, koja prikazuje ocjene godišnjih protoka i uskladištenih rezervi **ugljika**, C (ne CO_2 !). Za CO_2 je potrebno navedene protoke množiti omjerom molarnih masa: $(12+2 \times 16)/12 = 3.67$.



Sl.66. Shematski prikaz ocijenjenih godišnjih protoka ugljika (ne CO_2 !) u milijardama tona. Brojčane oznake prirodnih protoka su obojene žuto, čovjekovi ispusti i absorbirane količine su obojene crveno, a oznake postojećih količina u prirodnim rezervoarima su označene bijelom bojom.

Na Sl.64 su brojke prirodnih protoka obojene žuto, čovjekovi ispusti i absorbirane količine crveno, dok su u bijelom oznake postojećih količina u pojedinim prirodnim rezervoarima. Sl.66 je nastala na osnovi podataka poznatih oko godine 2008., no današnji podaci su slični, čovjekovi ispusti su narasli s 32 na 36 milijardi tona godišnje, malo sporije zbog trgovinskog rata Kine i SAD.

Potrebno je napomenuti, da su jedini podaci, koje sa sigurnošću poznajemo čovjekovi ispusti, jer su ti vezani na potrošnju energenata od kojih ovisi cjelokupna svjetska ekonomija, pa je knjigovodstvo razlog da su te količine dobro poznate već najmanje 175 godina. Svi ostali procesi i navedene količine su samo približne ocjene, ne poznajemo ih dovoljno točno.

Unatoč tome uzmimo te brojke zdravo za gotovo i pogledajmo odnose. Čovjekovi ispusti iznose 9 milijardi tona ugljika (gigatona C, GtC). Fotosinteza biljaka i metabolizam bakterija u zemlji absorbiraju ukupno 120 GtC, te ispuštaju 2×60 GtC, pri čemu se oko 3 GtC čovjekovih ispusta dugoročno uskladišti u zemlji. Slično je i s morskim površinom, tamo godišnji protok ispusta i absorpcija iznosi oko 90 GtC, pri čemu se oko 2 GtC čovjekovih ispusta absorbira i skladišti u oceanske sedimente. Oko 4 GtC ostaje dugoročno u atmosferi, koja sadrži trenutno oko 800 GtC.

Pomalo čudno je, da su prirodni procesi tako idealno uravnoteženi, te da neravnotežu uzrokuje samo čovjek. Ako je priroda u tako idealnoj ravnoteži, kako su onda nastale ogromne količine sedimenata na morskom dnu, velika količina rastopljenog CO₂ u morskoj vodi, kao i dio ugljika uskladištenog u bio-mas, te isto tako velike zalihe ugljika u biljkama i u zemlji?

No nastavimo s pregledom takvih danih podataka. Slične podatke, samo malo manje pregledno navodi i IPCCu svojim izvještajima, pa ćemo se i dalje držati toga.

Dr. James Hansen, dugogodišnji vodeći klimatolog pri NASA/GISS je sredinom 80tih godina izračunao, da su čovjekovi ispusti pretežni razlog za povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi, kakvu mjere u Opservatoriju Mauna Loa na obronku vulkana tog Havajskog otoka, Sl.11. Pri tom je uzeo u obzir činjenicu da oko 5/9 čovjekovih ispusta absorbira priroda svake godine, a u atmosferi se dugoročno akumulira 4/9 ispusta, kao i na Sl.66. Pretpostavio je također da se ti omjeri dugoročno nisu mijenjali. Kako se to slaže s izmjerenim vrijednostima?

Slijedeći Hansenovom načinu izračunavanja, te novijim podacima o ispustima u razdoblju 1950-2025., u kojem su se ispusti povećali s 6 na 36 GtC (Sl.65), možemo pojednostavljeno uzeti da su ispusti rasli u prosjeku $(36-6)/2 = 15$ GtC godišnje. U tijeku 75 godina smo ukupno ispuštali $15 \times 75 = 1125$ GtC, od čega je 4/9 ostalo dugoročno u atmosferi, dakle oko 500 GtC. Pomnožimo to s omjerom molarnih masa CO₂/C = 3,67 pa dobijemo 1835 Gt CO₂.

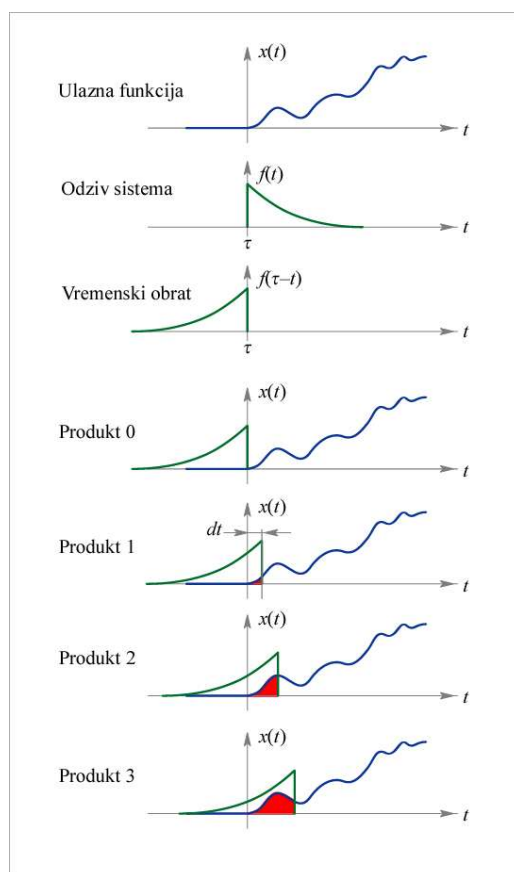
Sadašnja ukupna masa ugljika je nešto veća od onih 800 GtC na Sl.66, vjerojatno bliže 900 GtC. To daje $900 \times 3,67 = 3300$ Gt CO₂. Iz toga bi mogli zaključiti da je godine 1950. bilo u atmosferi oko $3300 - 1835 = 1465$ Gt CO₂. Prosječna gustina mase zraka je, kako smo već vidjeli, oko 0,6 kg/m³. Iz podatka o trenutnoj koncentraciji znamo da 1m³ sadrži 0,000420 volumskih dijelova CO₂. Molarna masa CO₂ iznosi $12 + 2 \times 16 = 44$ g/mol, dok prosječna molarna masa zraka s 79% dušika i 21% kisika iznosi $0,79 \times 2 \times 14 + 0,21 \times 2 \times 16 = 28,8$ g/mol. Iz toga možemo izračunati specifičnu masu CO₂, koja iznosi $0,6 \times 0,000420 \times 44 / 28,8 = 3,85 \times 10^{-4}$ kg/m³.

Omjer ukupne mase CO₂ i već prije izračunate ukupne mase zraka pomnožen omjerom molarnih masa mora biti isti, kao i omjer volumena. Dakle: $(3300 \times 10^{12} / 0,732 \times 10^{18}) \times 28.8 / 44 = 2,95 \times 10^{-3}$. Ali to je oko $7 \times$ više od volumskih dijelova CO₂ (0,000420), što naravno nije realno.

To znači da Hansenova procjena ukupnih ispusta jednostavnim zbrajanjem razlika ispusta i absorbiranih količina nije pravilna. Da bi pravilno ocijenili udio čovjekovih ispusta u današnjoj atmosferi, poslužiti ćemo se postupkom, koji se često upotrebljava u slučajevima kada se neka količina mijenja istovremenim dotokom i odtokom. Taj postupak se naziva konvolucijski integral, ili kraće konvolucija. Matematički formalizam postupka se zasniva na vremenskoj integraciji (kumulativnoj sumi) umnoška funkcije koja se mijenja i odziva sistema (dotoka i odtoka) na tu funkciju, pri čemu odziv sistema vremenski obrnemo. To zapišemo ovako:

$$y(t) = \int_{t_0}^{t_1} f(\tau - t) x(t) dt$$

U tom izrazu je $x(t)$ funkcija koja svojom vremenskom promjenom utječe na sistem, a $f(\tau - t)$ je odziv sistema na promjene, vremenski obrnut oko izabranog trenutka τ . Latinski *convolvere* znači pregib, pa dakle naziv operacije označava taj vremenski obrat. Grafički prikaz na Sl.67 objašnjava to mnogo jednostavnije od opisa i od matematičkog izraza.

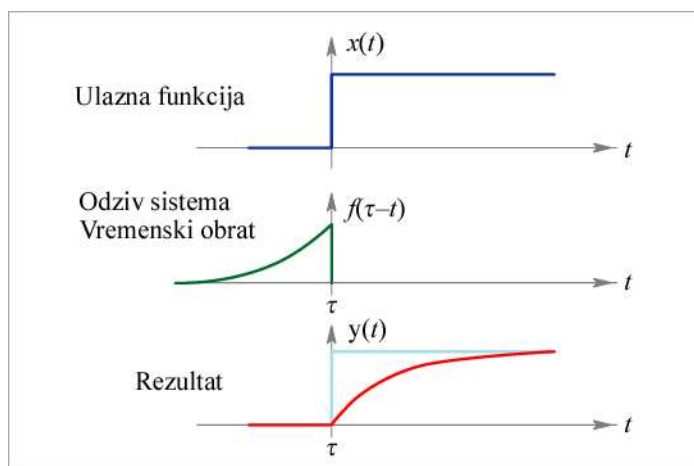


Sl.67. Postupak konvolucije. Rezultat je kumulativna suma produkta prekrivajućih se dijelova funkcija (crveno).

Nakon što smo vremenski obrnuli sistemski odziv oko trenutka τ , koji je u ovom primjeru isti kao i početni trenutak integracije t_0 , pomnožimo prekrivajuće se uzorke obju funkcija, u ovom slučaju su u trenutku t_0 obje jednake 0, pa je i umnožak jednak 0. U idućem trenutku se je vrijeme pomaklo za dt , pa je drugi uzorak rezultata jednak umnošku prekrivajućih se dijelova funkcija unutar intervala dt . Kad se vrijeme pomakne za $2dt$, prekrivaju se nešto veće površine obju funkcija, a treći uzorak rezultata je suma toga i svih prethodnih umnožaka. Kad se vrijeme pomakne za $3dt$, prekriva se još veći dio površina ispod obju funkcija, a četvrti uzorak rezultata je suma produkta 3 i svih prethodnih produkata, te tako redom sve do konačnog vremena integracije t_1 .

Analitički izračun konvolucije je često vrlo teška ili nemoguća zadaća, jer je općenito produkt dviju funkcija vrlo rijetko elementarno integrabilna funkcija. Ali zato je numerički to uvijek moguće, tada integral prelazi u običnu sumu konačno velikih uzoraka i računarski algoritam je relativno jednostavan.

Na Sl.68 je primjer konvolucije dviju vrlo jednostavnih funkcija, stepenične funkcije i eksponencijalno padajuće funkcije.



Sl.68. Primjer konvolucije stepenične funkcije i eksponencijalno padajuće funkcije.

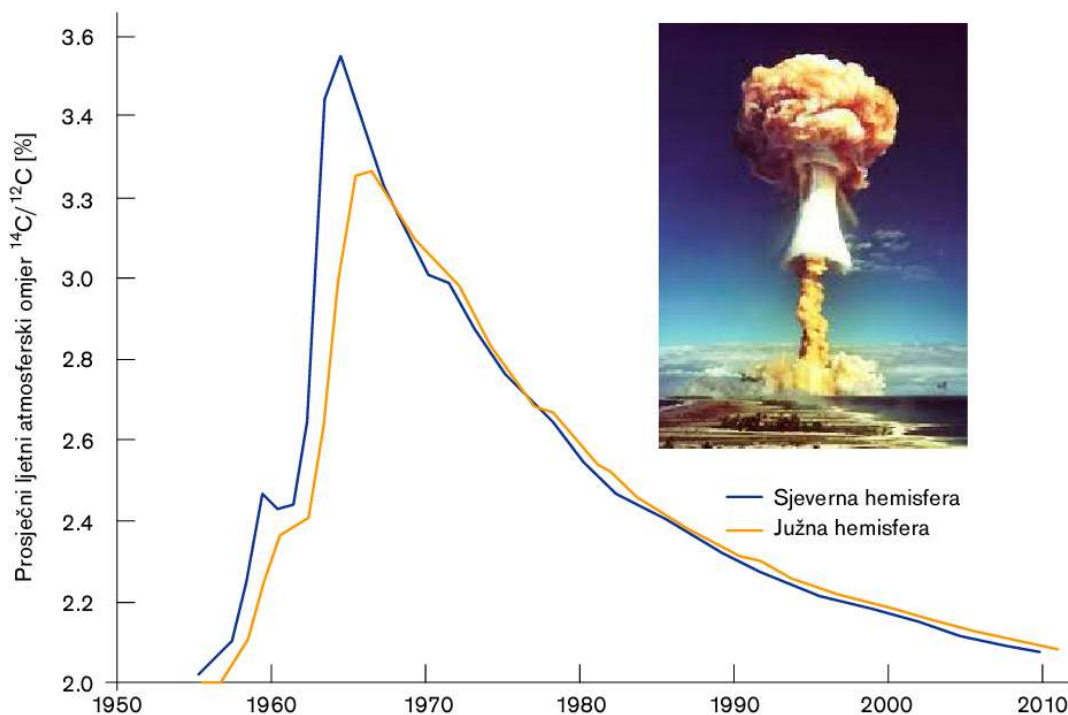
Za izračun efektivne količine CO_2 , koja je danas rezultat čovjekovij ispusta moramo dakle kao ulaznu funkciju uzeti ukupne godišnje ispuste na Sl.65. Ali kako odrediti sistemski odziv, budući da postoje mnogi prirodni izvori i ponori CO_2 , a ne poznajemo ih sve, pa niti one koje poznajemo zapravo ne poznajemo dovoljno dobro, da bi ih mogli barem približno ocijeniti. Jednostavno nemamo dovoljno podataka, jer ne pratimo i mjerimo sve što se na površini planeta događa.

Na sreću – ili bolje rečeno nesreću – smo sistemski odziv već izmjerili u "eksperimentu", koji tome uopće nije bio namijenjen.

Naime, neposredno nakon drugog svjetskog rata je Willard F. Libby (University of Chicago, Nobelovu nagradu je dobio 1960.) otkrio mogućnost datiranja organskih arheoloških uzoraka pomoću radio-izotopa ugljika ^{14}C . Taj izotop nastaje prirodnim putem u gornjim slojevima atmosfere, gdje visoko-energetske kozmičke čestice u sudaru s molekulama zraka generiraju neutrone, koji u sudaru s atomima dušika ^{14}N tvore ^{14}C , pri čemu se oslobađa jedan proton.

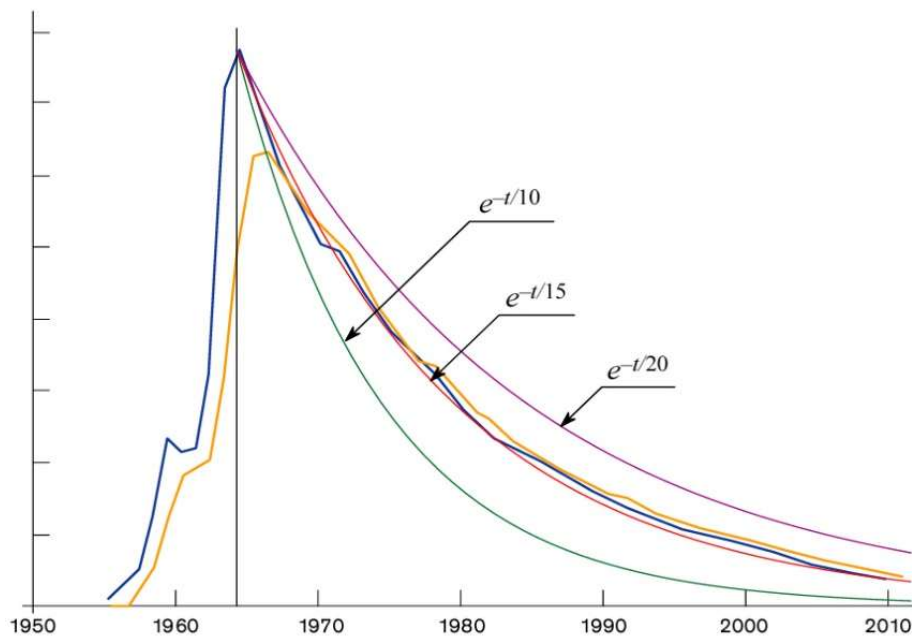
Učestalost tih pretvorbi je relativno konstantna, pa je u atmosferi uvijek neka količina atoma ^{14}C , koji s kisikom tvore CO_2 , takvih molekula je oko 1,9% svih molekula CO_2 . Biljke absorbiraju taj CO_2 jednako kao i obični CO_2 , pa se ^{14}C akumulira u organskim molekulama, a kada biljka odumre ^{14}C postepeno raspada. Slično je i sa svim ostalim organizmima, budući da se ^{14}C ugrađuje u strukturu metabolizmom. Vrijeme poluraspada iznosi oko 5730 godina, pa je analizom omjera $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ moguće određivati starost bioloških arheoloških ostataka relativno precizno do nekih 100.000 godina, te nešto manje precizno duže u prošlost.

Ali čim su prvi takvi instrumenti ušli u redovitu upotrebu, odmah se je pokazalo da uzorci tadašnjih biljaka sadrže mnogo više ^{14}C nego što se je očekivalo. A odmah je otkriven i uzrok: atomske eksplozije u atmosferi, koje su bile izvedene od 1945. dalje su gotovo udvostručile količine ^{14}C . Ta spoznaja je već 1963. dovela do sporazuma o zabrani atomskih eksplozija u atmosferi između SAD, Velike Britanije i Sovjetskog saveza. Kasnije su tom sporazumu pristupile i ostale države s atomskim naoružanjem, najkasnije Francuska i Kina. Testiranja nuklearnog oružja su se naravno ipak nastavila, ali pod zemljom. Tako od 1963. dalje sadržaj ^{14}C u atmosferi postepeno eksponencijalno pada prema normalnoj vrijednosti i danas je već praktički na toj razini, Sl.69.



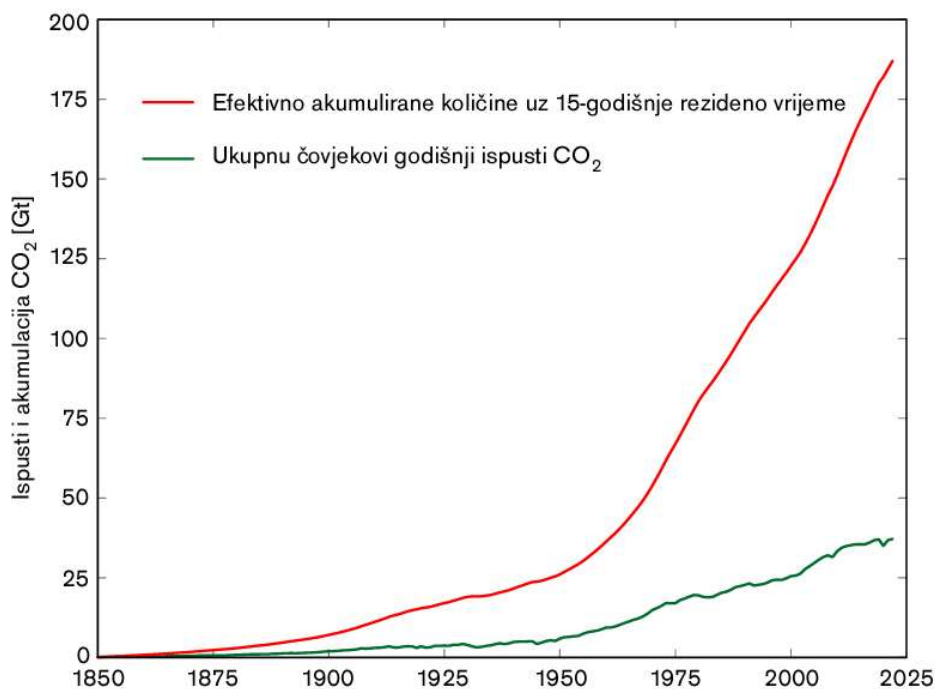
Sl.69. Povećane koncentracije ^{14}C , posljedica atomskih eksplozija u atmosferi.

Opadanje koncentracije ^{14}C nakon sporazuma o zabrani atomskih eksplozija u atmosferi nam prikladno nudi mogućnost ocjene čovjekovog udjela CO_2 u atmosferi pomoću konvolucije, jer predstavlja odziv sistema na kratkotrajne promjene. Krivulje na Sl.69 možemo normirati na jediničnu amplitudu i usporediti s eksponencijalno padajućim funkcijama za različite karakteristične vremenske konstante. Usporedbom tih lako ustanovimo da opadanje ^{14}C najbolje odgovara karakterističnoj vremenskoj konstanti od oko 15 godina, Sl.70.

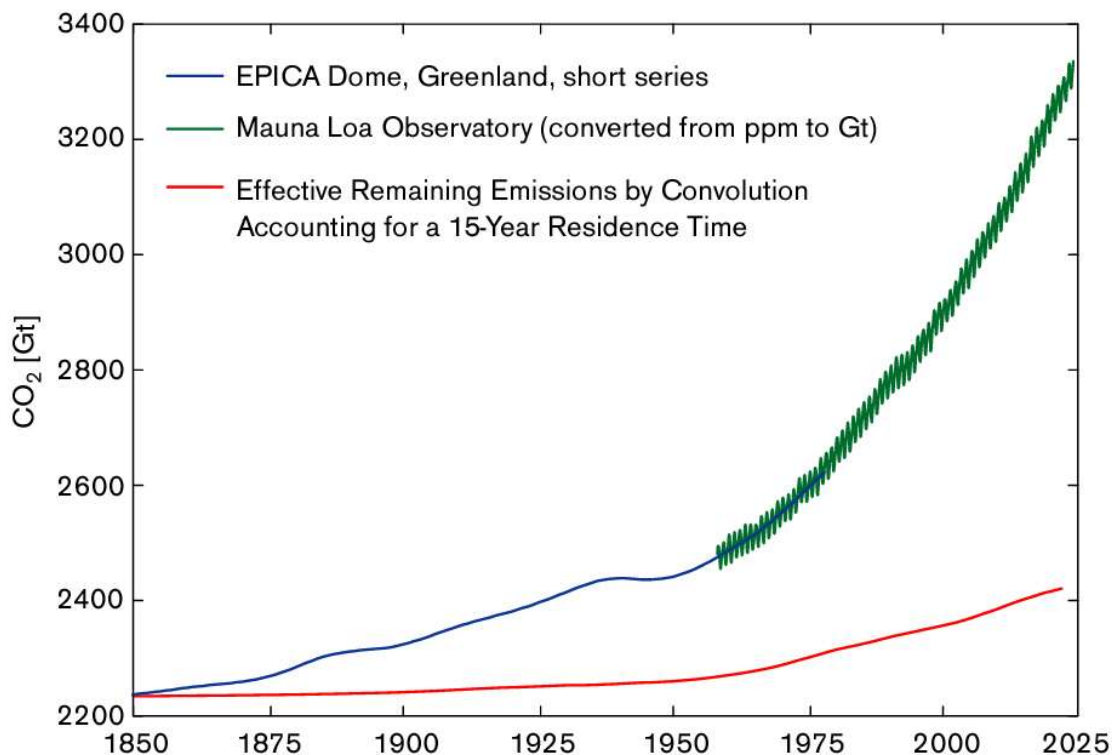


Sl.70. Usporedba opadanja ^{14}C s eksponencijalno padajućim funkcijama za tri različite vremenske konstante.

Konvolucija cjelokupnih čovjekovij ispusta (Sl.63) s eksponencijalno padajućom funkcijom s karakterističnom vremenskom konstantom od 15 godina nam daje efektivnu količinu u atmosferi zadržanih ispusta, Sl.71, što možemo usporediti s porastom koncentracije CO_2 (sa Sl.11, pretvoreno iz ppm u Gt), Sl.72.



Sl.71. Ukupni godišnji ispusti i efektivno akumulirana količina CO_2 u atmosferi uz 15-godišnje rezidentno vrijeme.



Sl.72. Usporedba izmjerenog porasta CO_2 (pretvoreno iz ppm u Gt) i efektivne akumulirane količine ispusta.

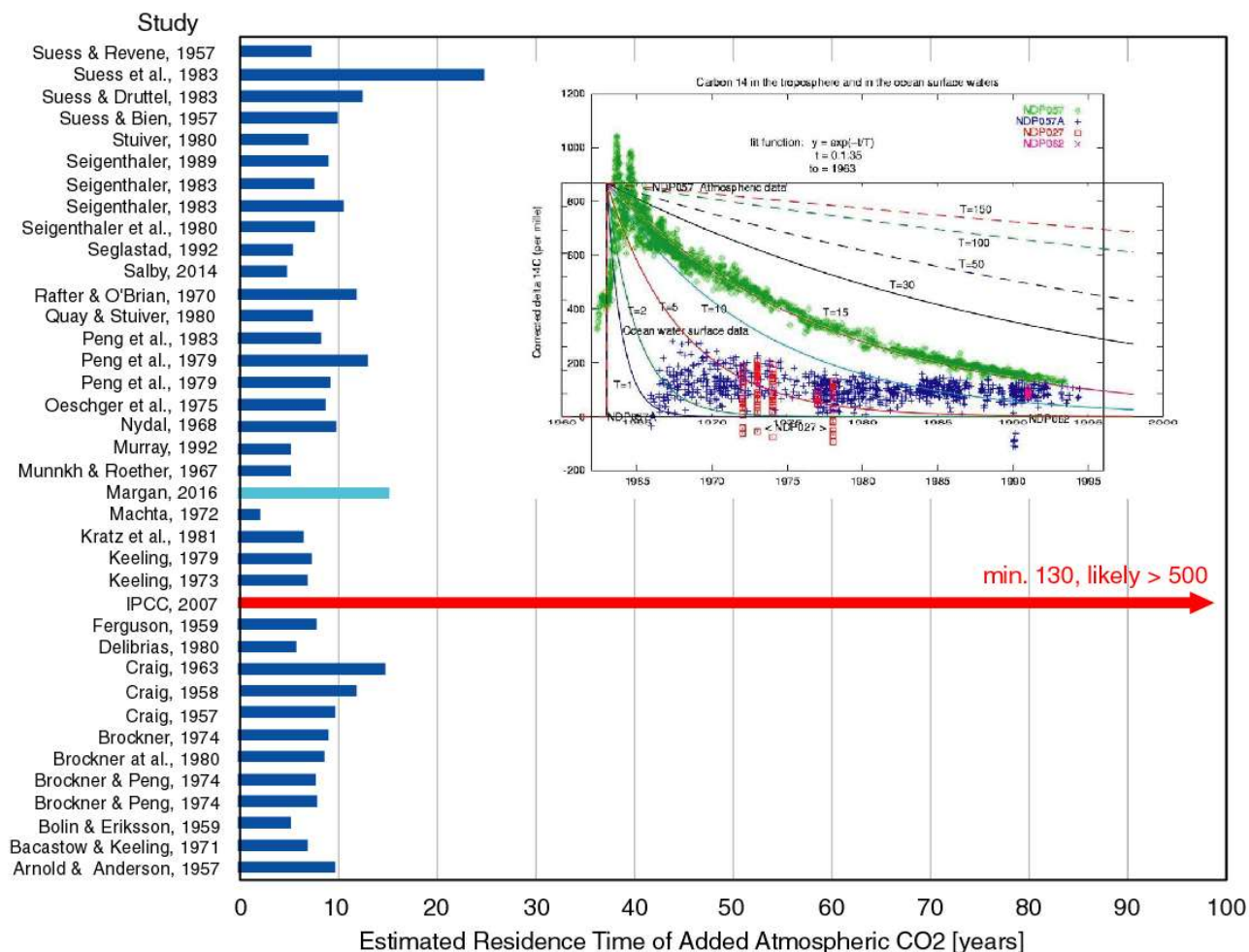
Primjećujemo, da efektivno akumulirani ispusti izračunati uz 15-godišnje rezidentno vrijeme iznose oko 18% (188 Gt) zabilježenog porasta CO_2 ($3300 - 2240 = 1060$ Gt). Preostali dio je razlika između prirodnih izvora i ponora CO_2 .

Ako je vjerovati IPCC, da CO_2 zbilja uzrokuje globalno zagrijavanje, te da to u razdoblju od 1850. do danas iznosi oko $1,1^\circ\text{C}$, tada su čovjekovi ispusti "krivi" za manje od $0,2^\circ\text{C}$.

Postavlja se pitanje koliko se možemo pouzdati u ocjenu 15-godišnjeg rezidentnog vremena CO_2 ?

Rezidentno vrijeme smo ovdje definirali kao karakterističnu vremensku konstantu eksponencijalno padajuće funkcije, koja se najbolje prilagođava izmjerenom opadanju izotopa ^{14}C u atmosferi. To vrijeme od oko 15 godina je vrijeme za koje početna količina CO_2 prirodnim putem opadne na vrijednost $1/e$, gdje je $e = 2,71828\dots$ (baza prirodnog logaritma), dakle na 0,37%. Neki istraživači određuju rezidentno vrijeme kao vrijeme za koje početna količina opadne na polovinu (50%), pa su njihovi rezultati malo drugačiji. Na žalost u literaturi rijetko nailazimo na jasnu definiciju, koju su autori upotrijebili u svojim izračunima. Osim toga su i uvjeti u kojima su bili izvedeni eksperimenti za određivanje absorpcije CO_2 (kemijskim metodama) različiti, a i okolina iz koje su uzimani uzorci nije uvijek ista. Stoga treba rezultate uzeti s određenom mjerom opreza.

Sl.73 prikazuje usporedbu rezidentnih vremena izračunatih u literaturi, studije su označene imenima autora (abecednim redom) i godištima objave.



Sl.73. Usporedba vrijednosti rezidentnog vremena navedenih u svjetskoj literaturi.

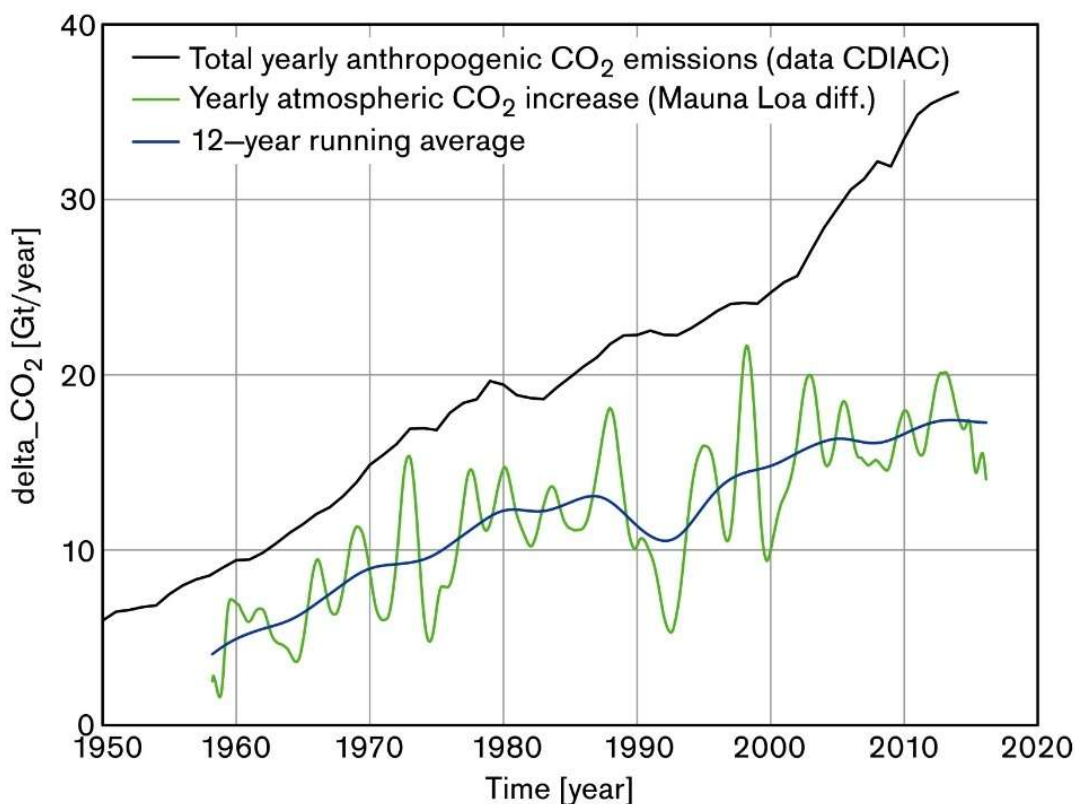
Vidimo da IPCC ocjenjuje rezidentno vrijeme na minimalno 130 godina (s vjerojatnom vrijednošću od preko 500 godina). Svi ostali autori su rezidentno vrijeme ocijenili na ispod 25 godina. Vrijednost od 15 godina, koju smo ovdje uzeli u obzir je treća po veličini i predstavlja relativno konzervativnu vrijednost. Ostale ocjene se nalaze u intervalu od 3 do 12 godina, s prosjekom od oko 7 godina. Graf unutar Sl.73 prikazuje isti 15-godišnji rezultat dobiven na drugim sličnim podacima za ^{14}C .

Jasno je, da bi za kraće rezidentno vrijeme rezultat konvolucije bio još mnogo niži. Koliko se možemo pouzdati u sve prikazane ocjene? Za usporedbu navedimo samo dva primjera:

- Keeling, C.D., (dvije studije iz 1973. i 1979.), te Bacastow & Keeling (1971.) navode vrijednosti od oko 7 godina. Keeling je inače iniciator i dugogodišnji vođa laboratorija u okviru Opservatorija Mauna Loa, gdje je 1958. godine postavio sistem za optičko mjerenje koncentracije CO_2 .
- Bolin i Eriksson (studija iz 1959.) navodi vrijednost od oko 6 godina. Bert Bolin je kasnije postao prvi predsjednik IPCC, Eriksson je tada bio njegov mentor.

Neki klimatolozi tvrde, kako je smanjivanje koncentracije ^{14}C (također i ^{13}C) posljedica izgaranja fosilnih goriva, obzirom da su fosilna goriva bila u zemlji dovoljno dugo, da u njima više nema ^{14}C , pa to uzimaju kao dokaz čovjekova utjecaja na atmosferu. No pritom zaboravljaju da je ^{13}C dugoročno stabilan, pa se u prirodnim rezervoarima, dakle i u fosilnim gorivima nalazi u približno jednakim koncentracijama, dok bi za zapaženo smanjivanje koncentracije ^{14}C morali biti ispusti zbog fosilnih goriva oko $8\times$ veći, kako bi se brzina smanjivanja uskladila s tom pretpostavkom. Zbog toga moramo zapaženo smanjivanje koncentracije ^{14}C pretežno pripisati prirodnoj izmjeni CO_2 , skladno s Sl.66.

Da prirodni izvori i ponori CO_2 imaju dominantnu ulogu u prirastu koncentracije u atmosferi možemo vidjeti i iz usporedbe godišnjih ispusta s godišnjim prirastom CO_2 . U tu svrhu moramo akumulirane vrijednosti izmjerene na Mauna Loai (gdje imamo mjesečne prosječne podatke) diferencirati i podijeliti s 12, da dobijemo godičnje podatke. Sezonske oscilacije su veoma visoke (oko 6 ppm), pa ih je potrebno filtrirati unutar tekuće periode od barem 37 mjeseci (3 godine + 1 mjesec) da do izražaja dođe vidni trend porasta. Sl.74 prikazuje usporedbu, zajedno s 12-godišnjim tekućim prosjekom.



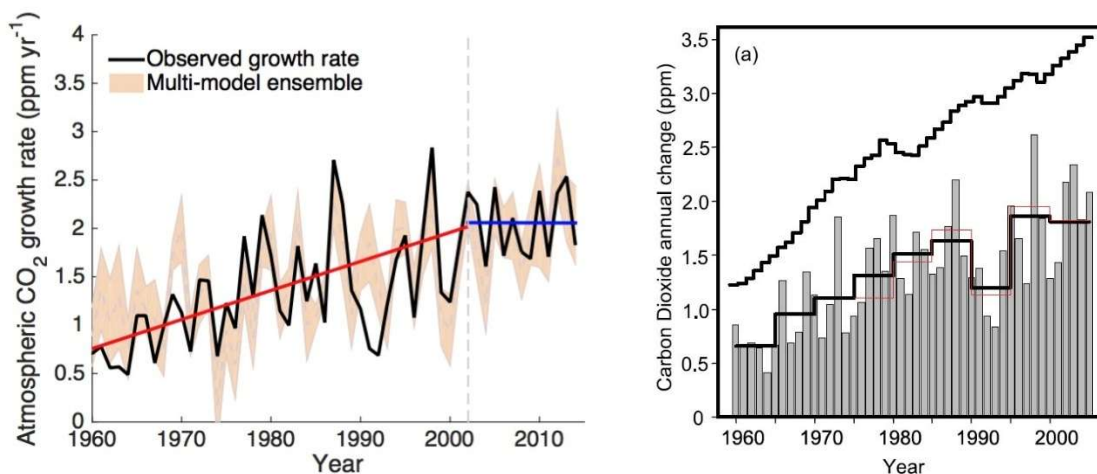
Sl.74. Usporedba godišnjih ispusta CO_2 s godišnjim izmjerenim prirastom.

Nekako do godine 2000. su ispusti rasli približno jednakom stopom kao i filtrirani diferencijal izmjerenih vrijednosti. No nakon 2000. godine su čovjekovi ispusti počeli rasti gotovo $3\times$ brže, prije svega zbog naglog razvoja Kine, Indije i još nekih država u razvoju, a porast izmerenih vrijednosti se je zaustavio pri približno 18 Gt godišnje. Dakle, otprilike do kraja stoljeća se je

moglo pretpostaviti, da čovjekovi ispusti barem djelomično utječu na porast koncentracije CO₂. No nakon toga bi svakome moralo postati jasno, da tome nije tako. U znanosti, kada imamo korelaciju (ili anti-korelaciju) između dviju količina, možemo pretpostaviti kako se radi o međusobnoj uzročno-poslijedičnoj ovisnosti, ili makar da obje količine ovise o istom, nekom trećem uzroku. Ali kada imamo u jednom periodu korelaciju, a u drugom periodu anti-korelaciju, tada je jasno da se tu o ozročno-poslijedičnim odnosima ne može govoriti, ili je pak međusobni utjecaj veoma slab, pa drugi procesi prevladavaju.

Na Sl.74 možemo primijetiti i to, da izmjerene količine skaču divlje gore-dolje, dok su varijacije godišnjih ispusta relativno male, no ipak tolike, da možemo na ispustima opaziti utjecaj svjetske ekonomije i politike, prije svega utjecaj na potrošnju nafte. Tako se lijepo vide prvi i drugi naftni šok (1973. i 1978.), pa rat u Iraku i raspad Sovjetskog saveza nakon 1990., brzi gospodarski razvoj Kine nakon 2000., te nekretninska kriza 2008. u SAD, koja je po čitavom svijetu zaustavila rast. Na nešto novijim podacima bi vidjeli i sličan pad nakon 2019. zbog epidemije covida.

U tom smislu je graf na Sl.74 jedan od najvažnijih u cijeloj priči o CO₂, njegova dokazna težina je praktično neoboriva. No da ne bi možda tko pomislio, kako si izmišljamo podatke i načine procesiranja i prikaza, ovdje su ti isti podaci uzeti iz prijašnjih izvještaja IPCC, Sl.75.



Sl.75. Isti podaci kao na Sl.72, uzeti iz prijašnjih izvještaja IPCC.

Ti podaci su postali za IPCC tako neugodni, da ih u novijim izvještajima (AR5 i AR6) prikazuju odvojeno, s nekih 70tak stranica teksta i grafova između, pa je teško odmah zapaziti opisani nesklad. A i inače, samo stručnjaci bi to odmah opazili, potrebno je dublje razumijevanje problematike.

Za kraj, iako ni izdaleka nismo iscrpili sve upitne tvrdnje u teoriji učinka staklenika, kako ju promovira IPCC, pozabavit ćemo se detaljem, kojega IPCC u potpunosti zanemaruje, odnosno njegov utjecaj minimizira. To je problem adiabatnog zagrijavanja i prijenos toplotne energije molekularnim sudarima.

Problem prijenosa toplote molekularnim sudarima

O prijenosu toplote molekularnim sudarima i podizanjem zagrijanog zraka smo djelomično već raspravljali uz Sl.22 i Sl.25, gdje je bilo govora o ocjeni prijenosa toplote za približno 80 W/m^2 . U odnosu na oko 160 W/m^2 , koliko iznosi prosječno dugoročno zagrijavanje površine Zemlje Sunčevim zračenjem, je to približno polovina. Da li je to mnogo ili malo?

Krenimo od empirijske činjenice da na površini bilo kojeg materiala u dodiru s zrakom mora vrijediti kontinuitetna enačba, dakle zrak i površina moraju imati istu temperaturu, ukoliko je sistem u termičkoj ravnoteži (nema dodatnih izvora toplote, poput Sunčeva zračenja, ili vjetrova, koji bi donosio ili odnosio određenu količinu toplote).

Uzmimo za primjer situaciju pri tlu uz globalnu prosječnu temperaturu površine $T_p = 288 \text{ K}$.

U zraku pri standardnim uvjetima vlada atmosferski pritisak $p_0 = 101325 \text{ Pa}$. (jedinica za tlak Pascal je sila jednog Newtona na m^2).

Gustina zraka u tim uvjetima je dovoljno niska da možemo za jednadžbu stanja priuzeti relaciju, koja vrijedi za idealne plinove, gdje je produkt pritiska i volumena pri određenoj temperaturi konstantan:

$$pV = nRT$$

Ovdje je p atmosferski tlak; V je jedinični volumen 1 m^3 ; n je broj molova prosječnih molekula zraka u jediničnom volumenu; univerzalna plinska konstanta je $R = 8,3145 \text{ J/(mol K)}$; T je prosječna temperatura. Iz poznatih standardnih uvjeta i sastava zraka mora biti vrijednost $n = 42,29$. Pa možemo izračunati:

$$T = pV/nR = 101325 \times 1 / (42,29 \times 8,3145) = 288.17 \text{ K}$$

Ta temperatura ($+15^\circ\text{C}$) je posljedica jednostavne činjenice da Zemlja svojim gravitacijom drži molekule zraka uz površinu planeta, čime stvara zračni tlak, što pak ima za posljedicu adijabatno zagrijavanje.

Tu nema nikakvog učinka stakleničkih plinova, niti ovisnosti o sastavu atmosfere!

Ako sunce dodatno zagrije tla, ugrije se i zrak, pa se njegov volumen poveća i topli zrak se diže u odnosu na hladniji sloj zraka iznad njega, taj pada prema tlu, gdje preuzima dio dodatne toplotne energije, dakle hladi tla. Noću se tla ohlade, pa se ohladi i zrak nad njima.

Na molekularnoj ravni pak vrijedi relacija:

$$nR = Nk$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, a N je broj molekula zraka.

Iz toga možemo izračunati broj molekula u 1 m^3 zraka:

$$N = nR/k = 42,29 \times 8,3145 / 1,381 \times 10^{-23} = 2,546 \times 10^{25}$$

Prosječnu udaljenost između molekula dobijemo s trećim korjenom inverznog broja molekula:

$$d = (1/N)^{1/3} = 3,4 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Prosječna brzina molekula je približno jednaka brzini zvuka pri tlu, $v = 340 \text{ m/s}$. Iz toga možemo dobiti prosječno vrijeme između dva sudara molekula:

$$t = d/v = 3,4 \times 10^{-9} / 340 = 10^{-11} \text{ s}$$

Obrnuto, svaka molekula u svakoj sekundi doživi oko 10^{11} sudara (sto milijardi). Tome odgovara i brzina izmjene energije među molekulama.

U takvim uvjetima se rijetko dogodi da koja molekula spontano prijeđe iz višega u niže energetska stanje emitirajući foton s frekvencijom, koja odgovara razlici energija. Isto tako molekula u višem energetska stanju ne može absorbirati foton, koji odgovara tom višem energetska stanju, jer je to stanje već zauzeto. Da bi ta molekula mogla absorbirati foton, mora se najprije osloboditi suvišne energije, bilo da emitira foton. Bilo da tu energiju izgubi prilikom točno određene energije sudara s drugom molekulom.

Za pojedinu molekulu CO_2 takvi uvjeti nastupaju tek oko $2 \times$ na sekundu. No budući da moraju isti uvjeti vrijediti i za apsorpciju i za emisiju fotona, slijedi da pojedina molekula CO_2 u prosjeku absorbira i emitira foton jednom u sekundi.

Ako je u zraku volumski dio CO_2 oko 400 molekula na milijon i ako je omjer molarnih masa zraka i CO_2 jednak 28,9/44 znači da je broj molekula CO_2 u 1 m^3 jednak:

$$N_{\text{CO}_2} = (400/10^6) \times (28,9/44) \times 2,546 \times 10^{25} = 6,689 \times 10^{21}$$

Energija fotona s valnom dužinom $\lambda = 15 \text{ }\mu\text{m}$ je po Planckovoj relaciji:

$$E = hf = hc/\lambda = 6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 15 \times 10^{-6} = 1,325 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Prosječni slobodno put takvih fotona u zraku u blizini tla je oko 22 m. Iz svega skupa slijedi, da molekule CO_2 sadržane u 1 m^3 zraka održavaju energijski protok od oko:

$$E_{\text{tot}} = E \times N_{\text{CO}_2} / x_f = 1,325 \times 10^{-20} \times 6,689 \times 10^{21} / 22 = 4,03 \text{ J}$$

Očekivani energetski protok zračenja s tla, kojega smo izračunali na osnovi prosječne globalne temperature po Stefan-Boltzmannovom zakonu, iznosi oko 390 W/m^2 . Absorpcija stakleničkih

plinova u zraku izračunata po modelu IPCC (AR6) pak iznosi 159 W/m^2 . Izračunati energetske protok zračenja E_{tot} , ki ga prenose molekule CO_2 je u usporedbi s time za oko $40\times$ premali.

Jasno je dakle, da se u nižim slojevima zraka toplota prenosi pretežno molekularnim sudarima, zračenje igra sporednu ulogu. No u višim slojevima zraka, gdje je zrak rjeđi, i temperature niske, pa stoga i brzina molekula niža i prosječni slobodni put dulji, povećava se vjerojatnost, da molekula CO_2 emitira i potom ponovo absorbira foton na svojoj karakterističnoj rezonantnoj frekvenciji. Zbog toga tek iznad visine oko 5,6 km postaje zračenje postepeno dominantni način prijenosa toplote.

Zaključak

Podnebnе promjene su postale ključna politička tema pri razpravama o skoro svim vidicima planiranja budućeg razvoja društva. Većina vladinih uredbi i zakona je podređena ciljevima postizanja ugljične neutralnosti već do godine 2050., što je nemoguće kratak rok, a u nekim postavkama upitno i na dugi rok.

Zakoni, uredbе i općenito (samo)ograničenja u potrošnji svih dobara, ne samo energenata, imaju za cilj ograničiti porast globalne prosječne temperature na manje od 2°C (preporučuje se 1,5°C) u odnosu na predindustrijsko doba, te tako ublažiti podnebnе promjene i zadržati ih u nekim pretpostavljeno podnošljivim okvirima. Na žalost već prihvaćeni zakoni i uredbе, kao i oni predviđeni ubuduće često postavljaju velika ograničenja razvoju društva, čime se prouzrokuje veća gospodarska šteta od ocjena moguće štete zbog budućih mogućih podnebnih promjena.

Već uvedeni zakoni, kao i oni tek predloženi na području ograničavanja potrošnje energije će najviše pogoditi promet i industrijsku proizvodnju. U zadnje vrijeme se raspravlja i o uvedbi oštrog ograničenja u poljoprivredi, stočarstvu, šumarstvu. To će imati ozbiljne posljedice pri opskrbi s hranom, posebno negativno će se to odraziti na samo-opskrbi na ravni države. Zato je o toj problematici nužna široka i otvorena javna rasprava.

Političari i podnebnі aktivisti nas pokušavaju uvjeriti kako je vrijeme za rasprave isteklo, te da je sada vrijeme za odlučnu akciju, inače bi nam u slučaju odlaganja prijetile ozbiljne posljedice. Ali rješavanje problema na ho-ruk, bez da bi najprije uopće ustanovili da li smo uistinu u podnebnоj krizi i kakva opasnost nam stvarno prijeti, rijetko donosi dobre rezultate. Jednako možemo reći i za pogrešno usmjerene mjere donesene na pogrešnim pretpostavkama. Još manje smisla ima na toj osnovi provođenje kampanje zastrašivanja stanovništva i uvođenja drastičnih restriktivnih mjera, koje uništavaju svjetsku ekonomiju.

Znanstveni podaci sabrani u zadnjih 75 godina ne pokazuju trend pogoršanja stanja. Na istim osnovama je moguće sumnjati u pravilnost hipoteze o dominantno čovjekovom utjecaju na klimu i na inače nesporno zabilježen rast temperature. Neke od tih spoznaja smo predstavili u ovom radu.

Time naravno ne tvrdimo kako ekoloških problema nema, no te probleme je potrebno rješavati na druge načine, prije svega tehnološkim inovacijama, a ne ograničenjima. Ako usporedimo stanje na području ekologije u razvijenim zemljama sa onim u zemljama u razvoju, mora biti svakome jasno, da je za poboljšanje stanja u svijetu neophodno pomoći zemljama u razvoju, da čim prije postignu višu tehnološku i opću civilizacijsku razinu. Siromaštvo i nedostatak razvojnih mogućnosti, slabi higijenski uvjeti, te visoka smrtnost djece u dobi do 5 godina su glavi razlozi, da većina stanovništva zemalja u razvoju u borbi za svakodnevni komad kruha nema ni vremena ni mogućnosti, da bi više pažnje posvećivali ekologiji.

Medijske objave većinom nekritično prenose alarmantna upozorenja na dolazeće opasnosti. Objektivnih prikaza znanstvenih podataka je malo, osim toga se uglavnom odnose na porast temperature i rast koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi, o ostalim vidicima te problematike se praktički uopće ne govori. Ovaj rad je pokušaj predstaviti barem neke realno osnove za civiliziranu i na podacima osnovanu javnu raspravu.

Ograđujuća izjava:

Stručni argumenti predstavljeni u ovom tekstu su oblikovani na osnovi službenih i javno dostupnih izvora klimatoloških podataka, te su kao takvi plod autorovog osobnog istraživačkog rada na tom području u slobodnom vremenu, te nisu ni na koji način povezani s autorovim radom u ustanovi u kojoj je autor zaposlen, pa zato ne izražavaju službena stajališta te ustanove, obzirom da su ti u isključivoj nadležnosti vodstva ustanove.

Literatura:

- [1] IPCC AR6 Work Group I, Full Report, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- [2] Manabe and Wetherald, Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, J. Atm. Sci., 1967
<https://climate-dynamics.org/wp-content/uploads/2016/06/manabe67.pdf>
- [3] Manabe and Bryan, Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model, J. Atm. Sci., 1969
https://journals.ametsoc.org/downloadpdf/view/journals/atsc/26/4/1520-0469_1969_026_0786_ccwaco_2_0_co_2.pdf
- [4] Kiehl and Trenberth, Earth's Annual Global Mean Energy Budget, 1997
https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/78/2/1520-0477_1997_078_0197_eagmeb_2_0_co_2.xml
- [5] Izračuni in animacije vibracijskih in rotacijskih načina molekule CO₂:
<https://www.physics.mcgill.ca/~hilke/232/232.html>
- [6] Spekrti stakleničkih plinova (Wikipedia)
https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas
- [7] Clausius-Clapeyronova relacija, Wikipedija
https://en.wikipedia.org/wiki/Clausius%E2%80%93Clapeyron_relation
- [8] Schildknecht, D., Saturation IR abs. by CO₂
<https://arXiv.org/abs/2004.00708v2>
- [9] Wijngaarden and Happer, Earth Thermal Radiation 5 Greenhouse Gases <https://arxiv.org/pdf/2006.03098.pdf>
- [10] J. Christy, Testimony Highlights, House Natural Resources Committee
<https://www.youtube.com/watch?v=Cz45fETw078>
- [11] NOAA Earth System Research Lab.
<http://climate4you.com/> (Greenhouse gases)
- [12] Kaupinen and Malmi, No Evidence for AGW, 2019
<https://arxiv.org/pdf/1907.00165.pdf>
- [13] Mauna Loa CO₂, HadCRUT5 and HadSST4
<http://climate4you.com/> (Greenhouse gases)
- [14] Margan, Žit 2023, 5 in 6: Brez panike
<https://www.tzs.si/zivljenje-in-tehnika>
- [15] Goldberg, F., Rate of increasing concentrations of CO₂
<http://ruby.fgcu.edu/courses/twimberley/envirophilo/goldberg.pdf>
- [16] Global Carbon Budget, Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_system
- [17] Margan, Žit 2019, 9 in 10: Antropogeni delež CO₂ v ozračju
<https://www.tzs.si/zivljenje-in-tehnika>
- [18] Harde, H., and Salby, M., What controls CO₂, 2021
https://www.researchgate.net/profile/Hermann-Harde/publication/373256244_What_Controls_the_Atmospheric_CO_2_Level/links/64e373a10453074fbda5183f/What-Controls-the-Atmospheric-CO-2-Level.pdf

Arhivi podataka:

- [1] Berkeley Earth, Global Monthly Average Series, Land and Ocean
https://berkeley-earth-temperature.s3.us-west-1.amazonaws.com/Global/Land_and_Ocean_complete.txt
- [2] CO₂ Emissions, Our World In Data
<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- [3] CO₂ Concentrations, Mauna Loa Observatory
https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
- [4] EPICA Dome CO₂ Paleo Data, NOAA
https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/edc-co2-noaa.txt
- [5] GISP2 Ice Core 1000 Year Ar-N₂ Isotope Temperature Reconstruction
<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/isotopes/gisp2-ar-n2-temperature2010.txt>
- [6] HadCRUT5 Global Monthly Temperature Anomaly
https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/hadcrut5/data/current/analysis/diagnostics/HadCRUT.5.0.1.0.analysis.summary_series_global.monthly.csv
- [7] Sunspot Number Reconstruction 1974-2018
http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt
- [8] Satellite Global Monthly Temperature Average, UAH
https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tlt/uahncdc_lt_6.0.txt