

# **PRESEK**

**List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje**

ISSN 0351-6652

Letnik **28** (2000/2001)

Številka 6

Strani 332-340, XXII

Tomaž Vrhovec:

## **UČINEK TOPLE GREDE IN VROČE POLETJE**

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/28/1458-Vrhovec.pdf>

© 2001 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.



Vsakodnevno pridobivanje toplogrednih plinov na Celovški cesti v Ljubljani.



Svoj delež toplogrednih plinov prispeva v ozračje tudi živinoreja.

## UČINEK TOPLE GREDE IN VROČE POLETJE

Vroči dnevi poletja 1998<sup>1</sup> so bili pogosto vzrok za razmišljanje o tem, zakaj je bilo tedaj tako vroče. Modno je bilo trditi, da je poletje vroče zaradi t.i. učinka tople grede. Poleti 1998 je bilo v Ljubljani namerjeno rekordno veliko število vročih dni. Kar 33 dni (en dan več kot v, do tedaj, rekordnem letu 1994) se je najvišja dnevna temperatura dvignila nad 30 stopinj Celzija.

Kako pride do učinka tople grede in kakšne so njegove posledice? Rastlinjaki in tople grede so namenjeni gojenju vrtnin in rož, ki so občutljive na mraz. Zakaj je v toplih gredah topleje kot na polju?

Podnevi se zrak pri tleh segreva zaradi sončnega sevanja. Sončni žarki prodrejo skozi atmosfero in segrejejo tla, od tal se segreje tudi zrak pri tleh. Če nad poljem zapiha veter, odnese topli zrak stran od tal in temperatura spet pade. Kako pa je v topli gredi? Sončno sevanje prodre tudi v rastlinjak in v njem segreje tla ter zrak nad njimi. Ker topli zrak ne more iz rastlinjaka, je temperatura zraka v njem višja kot nad odprtim poljem. (Podobno močno se segreje tudi zrak v avtomobilu, ki stoji na soncu.) Tople grede in rastlinjake vrtnarji najpogosteje uporabljajo spomladi in jeseni. Tedaj so noči lahko hladne in na polju bi rastline pozeble. Poleti tople grede zračijo, da se rastline ne pregrejejo in ne ovenejo.

Ponoči se tla ohlajajo zaradi infrardečega sevanja, ob hladnih tleh se ohlaja tudi zrak. V rastlinjaku ponoči seva steklena streha, na njeni spodnji strani se ohlaja tudi v rastlinjaku zaprti zrak (steklena streha se tedaj pogosto orosi). Če je rastlinjak narejen iz stekla, potem pride do izraza tudi zmanjšanje energijskih izgub zaradi sevanja. Steklo namreč slabo prepušča infrardeče sevanje, samo pa seva, vendar pri nižji temperaturi kot tla. Hladni zrak se v rastlinjaku spušča in polagoma se ohladi ves zrak v njem. Temperatura zraka v rastlinjaku pa ponoči ne pade tako nizko kot nad poljem, saj je izhodiščna večerna temperatura v rastlinjaku višja, v njem ne piha veter, pa tudi ohlajanje zaradi sevanja skozi streho je manj učinkovito kot ohlajanje polja v jasni noči. V toplih gredah, ki so pokrite s polietilenskimi folijami, je topleje le zaradi zadrževanja toplega zraka, saj te folije prepuščajo infrardeče sevanje.

Kakšen pa je učinek tople grede v ozračju?

Ker imajo tla, ozračje in oblaki temperaturo blizu ledišča, oddajajo po Planckovem zakonu toploto pretežno kot infrardečo svetlobo. Obenem so površje trdne Zemlje, vodne površine, zasnežene in ledene površine v

<sup>1</sup> Prispevek smo od avtorja prejeli pred dvema letoma.

infrardečem delu spektra skoraj povsem črna telesa (to pomeni, da skoraj vso vpadlo infrardečo svetlobo absorbirajo). Za dele ozračja so lastnosti, ki vplivajo na prenos energije z infrardečim sevanjem, bistveno odvisne od koncentracije vode ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ozona ( $\text{O}_3$ ) in ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Količina triatomnega plina  $\text{CO}_2$  je v ozračju precej stalna in ta plin je v zraku dobro pomešan z dvoatomnima kisikom in dušikom, ki prepuščata infrardeče sevanje. Bistveno bolj spremenljiva je količina vodne pare: zelo vlažni deli ozračja, še posebej oblaki, v katerih je vodna para nasičena, so v infrardečem delu spektra skoraj črni, jasno in suho ozračje pa del infrardečega sevanja prepušča. Vodna para je v infrardečem delu spektra najpomembnejši sevalec, saj prispeva kar 70% vsega infrardečega sevanja, ki pride iz ozračja. Poleg vodne pare je pomemben sevalec v infrardečem delu spektra tudi  $\text{CO}_2$ .

Poglejmo si vpliv sevanja vodne pare in ogljikovega dioksida najprej v jasni noči s suhim zrakom. Tla tedaj sevajo v infrardečem delu spektra in sevanje potuje skozi atmosfero. Del tega sevanja se absorbira v  $\text{CO}_2$ , hkrati pa tudi  $\text{CO}_2$  sam infrardeče seva. Polovica tega sevanja gre naprej v vesolje, polovica se ga vrne nazaj proti tlem. Tla infrardeče sevanje  $\text{CO}_2$  prestrežejo in se zaradi tega dotoka energije manj ohlajajo, kot bi se v primeru, če v atmosferi ne bi bilo sevajočega  $\text{CO}_2$ .

Kako je v oblačnih nočeh? Če je v atmosferi tudi vodna para (in te je v oblakih obilo, oblaki pa so sestavljeni iz drobnih kapljic), potem sevajo v atmosferi ogljikov dioksid, vodna para in oblačne kapljice. Količina sevanja, ki jo izseva atmosfera in katere del prejmejo tla, je zato bistveno večja kot v jasni noči, saj smo povedali, da vodna para prispeva kar dvakrat več infrardečega sevanja kot  $\text{CO}_2$ . V oblačni noči se zato zrak pri tleh dosti manj ohladi. Sevanje triatomnih plinov iz atmosfere pa seveda tla prejema tudi podnevi, le da je tedaj sončno sevanje daleč najmočnejše.

Podnevi skozi atmosfero prodira tudi sončno sevanje. Triatomni plini ne vplivajo na prehod vidnega dela tega sevanja, pač pa absorbirajo dele infrardečega sončnega sevanja. Ta absorpcija je razlog za direktno segrevanje posameznih plasti ozračja. Poleg ogljikovega dioksida in vode so v ozračju občasno v različnih koncentracijah prisotni tudi drugi tri- in večatomni plini, npr.  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , ki večinoma nastajajo zaradi človekove dejavnosti. Tudi ti plini prispevajo k sevalni bilanci.

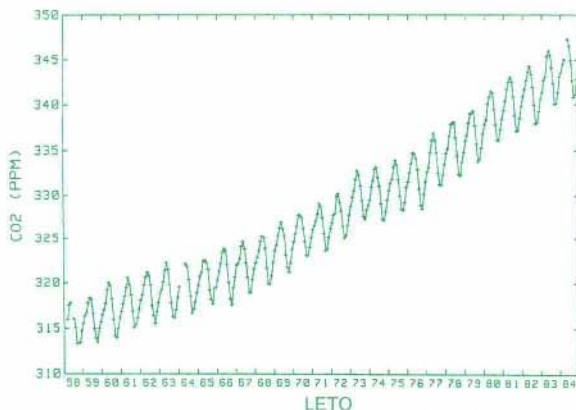
Sevanje oblakov, vodne pare, ogljikovega dioksida in drugih triatomnih plinov v atmosferi zmanjšuje ohlajanje površja tal. Zaradi tega je atmosfera pri tleh toplejša, kot bi bila, če teh plinov ne bi bilo. Vidna svetloba pride do tal in tla podnevi segreva, infrardeče sevanje tal pa se absorbira in emitira v atmosferi. Infrardeče sevanje se vrne iz atmosfere

k tlom in tako je ohlajanje tal nekoliko manj izrazito. Količina ponovno izsevane infrardeče svetlobe je odvisna od koncentracije triatomnih plinov. Večje so koncentracije, manjše je ohlajanje, temperatura tal in atmosfere se zato dvigne. Učinku triatomnih plinov na ravnovesje tokov infrardečega sevanja popularno rečemo “učinek tople grede”, plinom, ki povzročajo ta učinek, pa “plini tople grede”.

Vidimo, da je razlog za segrevanje zraka v rastlinjaku različen od razloga za zmanjševanje ohlajanja Zemlje zaradi sevanja triatomnih plinov. Izraz “učinek tople grede” pa se je v vsakodnevem pisanju kar dobro prijel in nesmiselno bi ga bilo odpravljati.

Zaradi človeških aktivnosti se koncentracije  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  in še nekaterih drugih plinov v Zemljini atmosferi povečujejo. Od predindustrijskega časa do konca 20. stoletja se je povprečna koncentracija  $\text{CO}_2$  v vsej Zemljini atmosferi povečala z 280 ppm na 360 ppm (za 28%). (1 ppm je en masni del primesi, npr.  $\text{CO}_2$ , na milijon masnih delov zraka.) Večja koncentracija  $\text{CO}_2$  vpliva na emisivnost atmosfere in tako na gostoto energijskega toka v atmosferi izsevanega infrardečega sevanja. Ob povečanju koncentracije ogljikovega dioksida prejmejo tla več atmosferskega infrardečega sevanja.

Z modelskimi izračuni so ugotovili, da bi se pri podvojitvi koncentracije  $\text{CO}_2$  s 300 ppm na 600 ppm morala povprečna temperatura na Zemlji dvigniti za 2 do 4 K. Ti izračuni so seveda precej nenatančni, saj na energijsko bilanco Zemlje ne vplivajo samo sevalne razmere. Povejmo še, da so se v klimatski zgodovini Zemlje koncentracije plinov tople grede precej spreminjale, spreminjala se je tudi njena povprečna temperatura.



Slika 1. Koncentracije  $\text{CO}_2$  v ozračju v zadnjih desetletjih, kot so jih namerili v observatoriju na Mauna loa (Havaji) (Bulletin WMO).

Povprečno temperaturo Zemlje lahko preprosto izračunamo. Energijsko bilanco Zemlje kot planeta najprej zapišemo tako, da vzamemo trdno zemljo, oceane in atmosfero kot eno samo telo. V tem primeru sta pomembna predvsem dva energijska tokova:

- Sončevo obsevanje  $j_0$  (Sonce obseva polovico zemeljske oble, pri čemer je razporeditev absorbirane moči po površini osvetljene polovice odvisna od albeda<sup>2</sup>  $a$  in od kota med normalo na površje in smerjo sončnih žarkov.)
- Sevanje Zemlje, ki izhaja iz vse zemeljske površine. (Zemlja seva skoraj kot črno telo, v infrardečem delu spektra je emisivnost<sup>3</sup>  $\varepsilon \approx 1$ .)

Iz Zemljine notranjosti sicer teče proti površini nekaj toplotnega toka, ker je notranjost Zemlje vroča, vendar je ta toplotni tok mnogo manjši od sevalnih tokov, tako da ga lahko zanemarimo. Tla in morja tudi shranjujejo in oddajajo toploto v dnevnem in letnem ciklu. Če vzamemo dovolj dolg časovni interval, lahko stanje obravnavamo kot stacionarno, da torej za Zemljo kot celoto velja, da se energija sevanja, ki jo prejme Zemlja od Sonca, izenači z energijo, ki jo Zemlja izseva v vesolje:

$$(1 - a)j_0 \cdot \pi R^2 = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2.$$

( $R$  je polmer Zemlje.)

Od tod izračunamo povprečno temperaturo Zemlje

$$T = \left( \frac{(1 - a)j_0}{4\sigma} \right)^{1/4}.$$

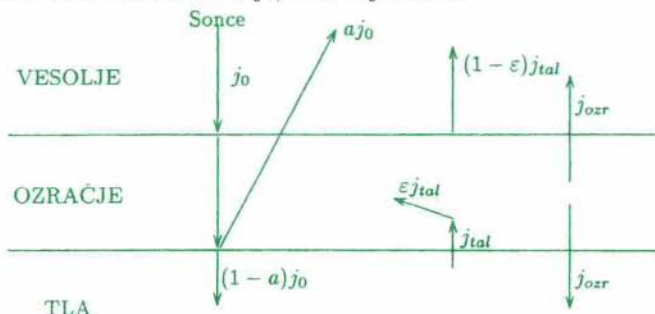
Če vzamemo, da je povprečni albedo Zemlje  $a = 0.35$  in  $j_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ , dobimo za povprečno temperaturo Zemlje  $250 \text{ K}$  ( $-23^\circ\text{C}$ ), kar ustreza temperaturi v zgornji tretjini troposfere. Dejanska temperatura površja Zemlje je višja zaradi učinkov plinov tople grede. Takšno temperaturo, kot smo jo izračunali zgoraj, bi imela Zemlja v primeru, če ne bi imela sevajočega ozračja.

Da bi ilustrirali učinek atmosferske tople grede na temperaturo na Zemlji, naredimo še drugo, manj poenostavljeno oceno. Dobimo jo, če

<sup>2</sup> Albedo (odbojnost) je lastnost površine telesa, ki nam pove, kolikšen del svetlobnega toka se na površini odbije.

<sup>3</sup> Tudi emisivnost je lastnost površine telesa in nam pove, kolikšno je pri posamezni valovni dolžini razmerje med sevanjem sivega in črnega telesa enakih površin. Večina teles je sivih, kar pomeni, da telo del sevanja odbije.

poleg trdne Zemlje in vesolja upoštevamo še ozračje. V približku predpostavimo, da ozračje povsem prepušča sončno sevanje, tako da se sončno sevanje absorbira le na tleh. Atmosfera pa naj delno absorbira in emitira dolgovalovno infrardeče sevanje, ki izhaja iz tal.



Slika 2. Triplastni model: vesolje, ozračje, tla. Prikazani so sevalni tokovi, absorptivnosti in emisivnosti.

Če označimo sevanje atmosfere z  $j_{\text{ozr}}$  in sevanje tal z  $j_{\text{tal}}$ , opišemo ravnotežje gostot energijskih tokov na meji med ozračjem in vesoljem (slika 2) z enačbo

$$j_0(1-a) = 4((1-\varepsilon)j_{\text{ozr}} + j_{\text{tal}}).$$

Faktor 4 na desni strani enačbe dobimo, ker Zemljo obseva Sonce le po eni strani, sama pa seva z vse površine. V vesolje seva ozračje, deloma pa pride v vesolje tudi sevanje s tal.

Ozračje sprejme del dolgovalovnega sevanja tal in ga v enakih delih izseva navzgor in navzdol:

$$\varepsilon j_{\text{tal}} = 2j_{\text{ozr}},$$

na meji med ozračjem in tlemi pa velja energijsko ravnotežje

$$(1-a)j_0 + 4j_{\text{ozr}} = 4j_{\text{tal}}.$$

Tla absorbirajo del sončnega sevanja, prejmejo pol sevanja atmosfere in sama sevajo. Z upoštevanjem Stefanovega zakona za sivo telo (ozračje) dobimo iz prve zveze

$$\varepsilon \sigma T_{\text{tal}}^4 = 2\varepsilon \sigma T_{\text{ozr}}^4$$

oz.

$$T_{\text{tal}} \approx 1.19 T_{\text{ozr}}.$$

Iz energijske bilance ozračja dobimo, spet z upoštevanjem Stefanovega zakona, še eno zvezo med  $T_{\text{tal}}$  in  $T_{\text{ozr}}$ , od koder lahko določimo obe temperaturi. Pri albedu  $a = 0.35$  in emisivnosti  $\varepsilon = 0.7$  dobimo za temperaturo ozračja 234 K in za temperaturo tal 279 K, kar veliko bolj ustreza dejanskim razmeram na Zemlji pri tleh kot rezultat prejšnjega izračuna.

Infrardeče sevanje iz atmosfere je torej razlog, da je povprečna temperatura Zemlje nad lediščem in da je zato na Zemlji možno življenje v sedanji obliki. Kljub približnosti je mogoče na osnovi gornjih enačb oceniti, kaj bi se zgodilo s temperaturo tal in atmosfere ob spremembi koncentracije  $\text{CO}_2$ . Zaradi te spremembe se spremeni emisivnost  $\varepsilon$ . Če pri tem ostane albedo nespremenjen, se temperaturi tal in zraka spremenita, kot kaže tabela 1.

emisivnost	0.60	0.65	<b>0.70</b>	0.75	0.80	1.0
T ozračja	230	232	<b>234</b>	236	239	250
T tal	273	276	<b>279</b>	281	284	297

Tabela 1. Spremembe temperature zraka in tal (v K) ob spremembah emisivnosti ozračja pri albedu 0.35.

Zadnji stolpec tabele 1 je namenjen le ilustraciji tega, kaj bi se zgodilo s temperaturo na Zemlji, če bi ozračje absorbiralo vse infrardeče sevanje. V tem primeru bi bila povprečna temperatura tal kar 297 K ( $24^\circ\text{C}$ ) v primerjavi s sedanjimi 279 K ( $6^\circ\text{C}$ ). Takšne sevalne razmere vladajo na Veneri, le da je tam gostota vpadlega energijskega toka dosti večja kot na Zemlji in je temu primerno višja tudi temperatura v "Venerini topli gredi".

Poleg direktnega vpliva povečanega infrardečega sevanja na temperaturo zraka in tal, vplivajo na energijsko bilanco še drugi učinki. Naj navedemo le nekatere:

1. Zaradi povečane temperature se poveča izhlapevanje, zaradi večje količine vlage pride do večje oblačnosti in zato do povečanja albeda Zemlje. Albedo močno vpliva (glej zgornje enačbe) na temperaturo ozračja in Zemlje, saj je od albeda odvisna energija sončnega sevanja, ki sploh pride v ozračje. Zaradi povečanega albeda se temperaturi znižata (tabela 2).

albedo	0.25	0.30	<b>0.35</b>	0.40	0.45	0.5
T ozračja	243	238	<b>234</b>	230	225	219
T tal	289	283	<b>279</b>	273	267	261

Tabela 2. Spremembe temperature zraka in tal (v K) ob spremembah albeda, pri emisivnosti 0.7. Debelo je zapisano sedanje stanje.



Na albedo Zemlje ne vplivajo le oblaki, pač pa tudi aerosol (droben lebeč prah), ki v ozračje prihaja iz naravnih virov (vulkani, puščave, morja, vegetacija) in antropogenih virov (industrija, kmetijstvo, promet). Povečanje koncentracije aerosola povečuje albedo Zemlje.

2. Zemlja se na spremembe v energijski bilanci, npr. zaradi povečanja infrardečega sevanja atmosfere, ne odziva takoj, pač pa s precejšnjim časovnim zaostankom, saj je toplotna kapaciteta trdne Zemlje in oceanov velika. Če privzamemo, da je toplotna kapaciteta ozračja 1 enota (vse ozračje nad enim kvadratnim metrom zemeljske površine tehta 10 000 kg, specifična toplotna kapaciteta zraka je okoli  $1000 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), je toplotna kapaciteta prvih 10 (globinskih) metrov trdnih tal okoli 2.4 enote (gostota tal je okoli  $4000 \text{ kg/m}^3$ , specifična toplotna kapaciteta pa okoli  $2000 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , trdna tla pokrivajo 30% Zemlje) in toplotna kapacitete prvih 50 (globinskih) metrov oceana približno 15 enot (voda se lahko meša in zato se segrevajo in ohlajajo debele plasti; gostota je  $1000 \text{ kg/m}^3$ , specifična toplotna kapaciteta  $4200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , ocean pokriva 70% Zemlje). Za segrevanje tal in oceana je torej potrebno dosti več toplote kot za segrevanje vsega ozračja.

Opomba. Pri izračunu razmerja toplotnih kapacitet za celotno Zemljo

$$\text{ozračje} : \text{trdna tla} : \text{ocean} = 1 : 2.4 : 15$$

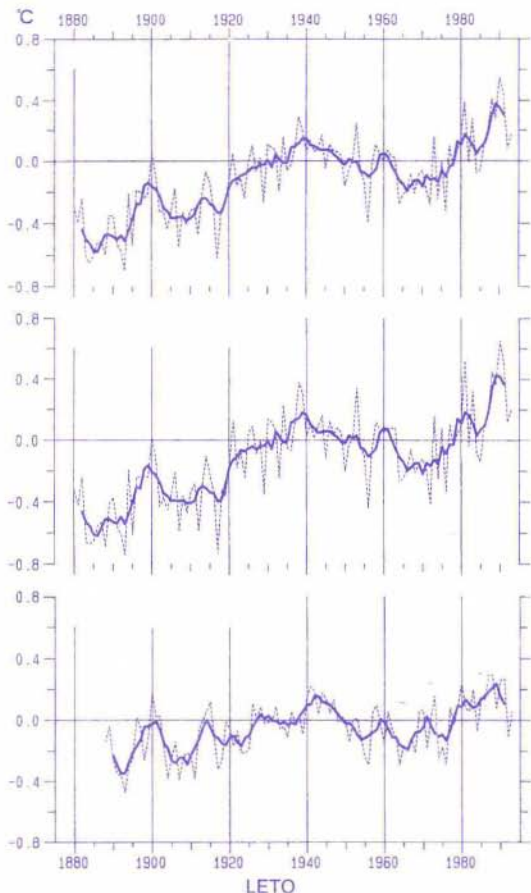
smo upoštevali, da se segreva ali ohlaja le zgornja plast morske vode, v resnici pa se v nekaj stoletnem časovnem intervalu postopoma segreva tudi globoka oceanska voda.

3. Po površju Zemlje je količina vpadlega sončnega sevanja neenakomerno razporejena zaradi razlik v zenitnem kotu Sonca med ekvatorialnimi in polarnimi kraji in zaradi nagnjenosti zemeljske osi (letni časi). Zaradi razlik v segrevanju prihaja do razlik v zračnem pritisku po Zemlji in zaradi tega do vetrov in vremenskih sprememb. Vetrovi prenašajo toploto iz toplejših tropskih krajev proti hladnejšim polarnim. Podobno velja za morske tokove, ki jih delno poganjajo vetrovi, delno pa razlike v temperaturi in slanosti morske vode. Zaradi teh transportov so spremembe temperature ozračja, nastale zaradi učinka tople grede, zabrisane.

Zaradi povišane temperature in povečane vlažnosti prihaja do pogostejšega razvoja konvektivnih oblakov in do nastanka slojastih oblakov ter s tem do mehanskega transporta toplega zraka v višje plasti ozračja, s čimer se poveča tudi infrardeče sevanje v vesolje.

4. Spremembe koncentracije  $\text{CO}_2$  in spremembe temperature bistveno vplivajo na rastline na kopnem in v morju. Rastline večinoma pri fotosintezi porabljajo  $\text{CO}_2$  za izdelavo sladkorjev; pri tem se sprošča kisik. Povečana temperatura praviloma ugodno vpliva na učinkovitost fotosinteze rastlin, s tem se poveča absorpcija  $\text{CO}_2$  iz ozračja. S krivulje na sliki 1, ki kaže spremembe  $\text{CO}_2$  na Zemlji, lahko razločno razberemo letni hod koncentracij  $\text{CO}_2$ . Minimum koncentracije ustreza pomladi na severni polobli, saj tedaj tam rastline najbolj bohotno rastejo in se zato koncentracija  $\text{CO}_2$  zmanjša. Po drugi strani pa rastline pri višjih temperaturah tudi močneje dihaajo in zato oddajajo več  $\text{CO}_2$ .
5. Daleč najpomembnejši sevalec v infrardečem delu spektra in zato najpomembnejši plin tople grede je vodna para; k infrardečemu sevanju prispeva tudi sevanje oblakov v ozračju. Skupaj prispeva voda kar 70% vsega učinka tople grede. Zaradi povečane količine vlage v zraku, ki je posledica povečanega izhlapevanja zaradi višje temperature, bi se moralo povečati tudi sevanje vodne pare. Vendar je količina vlage v zraku zelo spremenljiva (včasih je jasno, drugič pa oblačno, pri vodi ves čas prihaja tudi do vtekočinjanja in izhlapevanja, do sublimacije in depozicije), tako da je, globalno gledano, vpliv vodne pare na učinek tople grede ves čas približno enak.

Pri dosedanjem razmišljanju smo se omejili na vodno paro in na ogljikov dioksid v ozračju. Količina  $\text{CO}_2$ , ki v naravnem ravnotežju kroži med ozračjem, tlemi, oceani in rastlinstvom, je zelo velika, človeška aktivnost (predvsem sežiganje premoga, nafte in plina) pa k temu prispeva le majhen, a pomemben neuravnoteženi del. Podobno kot  $\text{CO}_2$  vplivajo na spremembe infrardečega sevanja tudi metan (sprošča se iz močvirij, riževih polj in iz gnoja), amonijak (iz umetnih in naravnih gnojil) in ozon (nastaja kot posledica onesnaževanja z dušikovimi oksidi iz izpušnih plinov). Kot smo že omenili, se je koncentracija ogljikovega dioksida, pa tudi drugih plinov tople grede v zadnjih desetletjih dvigala. Iz primerjave med sliko 3 in sliko 1 pa lahko vidimo, da se je povprečna temperatura ozračja dvigala in padala kljub stalnem naraščanju koncentracije toplogrednih plinov. S slike 3 tudi lahko razberemo, da se je povprečna temperatura na Zemlji v zadnjih 100 letih dvignila za okoli 0.8 K. Spremenljivost in kaotičnost dogajanja v ozračju je namreč tako velika, da je odraz povečane koncentracije toplogrednih plinov zaenkrat še slabo določljiv.



Slika 3. Potek temperature zraka na Zemlji v nekaj zadnjih desetletjih. Črtkana črta predstavlja odstopanje letne povprečne temperature na Zemlji od povprečja za obdobje 1961–1990, debela črta pa drseče petletno povprečje (povzeto po Bulletin WMO).

Odgovor na uvodno vprašanje, ali je bilo poletje 1998 v Sloveniji vroče zaradi učinka tople grede, je torej takle:

**DA, VENDAR NE ZARADI POVEČEVANJA KONCENTRACIJE PLINOV TOPLE GREDE.** Od leta 1997 do leta 1998 se je koncentracija  $\text{CO}_2$  povečala le malenkostno, povprečna temperatura ozračja pa kar precej. Nihanja v povprečni letni temperaturi ozračja na Zemlji so, kot vidimo s slike 3, kar pogosta.

*Tomaž Vrhovc*