

VZROKI ZA SPREMINJANJE PODNEBJA

Jože Rakovec*



Povzetek

Podnebje se ves čas spreminja, velikost in hitrost teh sprememb pa sta odvisna od časovnega obdobja, v katerem spremembe obravnavamo. Celine se po Zemlji znatno premaknejo v stotinah milijonov let. Nekaj deset ali pa sto tisoč let so dolge periode načinov kroženja Zemlje okrog Sonca in njenega vrtenja okrog lastne osi. Izsev Sonca, ki je praktično edini vir energije za vsa dogajanja na Zemlji, se spreminja v tisočih, stotinah ali desetinah let, nekatere močne spremembe pa so tudi zelo kratkotrajne. Posledice močnih vulkanskih izbruhov puščajo zaznavne posledice nekaj let. Tudi človeštvo vpliva na spremembe podnebja – npr. s pospešenim kurjenjem fosilnih goriv in z nekaterimi drugimi dejavnostmi povečuje toplogredne vplive; časovna skala teh vplivov so desetine in stotine let.

Ključne besede: tektonika, premikanje celin, orbitalne spremembe, Milankovičevi cikli, aktivnost Sonca, vulkanska aktivnost, naravna topla greda, človeški vpliv na podnebje

Abstract

Climate changes all the time, the magnitude and the rate of these changes depend on the time-scale of interest. Continents considerably displace in hundred million years. Earth's orbital changes, predicted by Milutin Milankovic have periods of several ten or several hundred thousand years. The effects of relatively small changes of solar activity with major period of 11 years are in general negligible, but may have a considerable impact if some departure from the average periodicity lasts long - for several decades. Also humans affect climate, for example with intensified fossil fuels burning that increases the greenhouse effect of the atmosphere; the consequences of that may last for tens and hundreds years. Several years is a cycle of La Niña and El Niño in tropical Pacific, that has an impact also in other regions on the Earth. A couple years may last noticeable impacts on climate after strong volcanic eruptions – until the dust and smoke sediment to the ground

Key words: tectonics, plate movement, orbital changes, Milanković's cycles, Solar activity, volcanic activity, natural greenhouse effect, anthropogenic impacts on climate

* Dr. Jože Rakovec je redni profesor na Katedri za meteorologijo Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani

Uvod

Klasični opisi podnebja kakega kraja so se naslanjali predvsem na časovne poteke temperature in vlažnosti (npr. Köppen in Geiger, Thorntwaite) in na osnovi tega na prevladujočo vegetacijo v tem kraju. Temperatura zraka

v nekem kraju je odvisna od sevalne bilance v tem kraju samem (sončni obsev in infrardeči izsev) ter od tega, kako tople ali hladne zračne mase vetrovi po navadi prinašajo v ta kraj. Podobno glede vlažnosti: padavine oz. izhlapevanje v samem kraju ter dotok vodne pare z zračnimi tokovi od drugod.

Ravno razlike med kraji na Zemlji poganjajo vremenske procese in s tem oblikujejo tudi podnebje: na splošno je v krajih okrog ekvatorja sevalni presežek med okrog 50 in 90 Wm⁻² (največji v tropskem Indijskem oceanu in zahodnem Pacifiku, najmanjši v tropski vzhodni Afriki in zahodni Južni Ameriki), ob obeh tečajih pa primanjkljaj okrog – 80 Wm⁻². Presežek padavin nad izhlapevanjem v tropih je dobrih 500 mm na leto, primanjkljaj v subtropih več kot 500 mm in presežek v visokih geografskih širinah med 200 in 300 mm letno (večji na južni polobli). Zračni in morski tokovi te razlike delno izravnavajo in sicer glede toplote okrog 40 % morski tokovi in okrog 60 % zračni tokovi – pol z zaznavno toploto in pol z latentno toploto. Zato je poleg same geografske širine pomembna tudi lega: ali je kak kraj sredi kontinenta ali ob obalah oceana, in če je ob oceanu, ali ga obliva topli morski tok (kot npr. Evropo Zalivski tok), ali pa morda hladen tok (kot npr. vzhodne obale Severne Amerike Labradorski tok, zahodne obale Južne Amerike pa Humboldtov tok). Lokalno je važen še relief (prisojnost / osojnost, privetrje / zavetrje za prevladujoče vetrove) in še kaj.

Podnebje so po Meteorološkem terminološkem slovarju (Petkovšek in Leder, 1990) značilnosti vremena nad kakim območjem v daljšem obdobju. Ob taki definiciji bi lahko rekli, da se podnebje ves čas spreminja: pomladi so drugačne od zim in od poletij, jeseni so čas, ko se poletja prevešajo v zimo. Ta vsem razumljiva spremenljivost je v zmernih in visokih geografskih širinah posledica velikih razlik v energetskih bilancah posameznih krajev iz enega letnega časa v drugega. Pa ni povsod tako: ponekod, predvsem v tropskih predelih, imajo skorajda en sam letni čas, ali pa morda le dva: bolj vlažnega in bolj suhega. Takim spreminjanjem podnebja rečemo sezonske spremembe in marsikdo tega sploh ne šteje med spremenljivost podnebja. Toda medletne ali nekajletne spremembe pa so pogosto že predmet velikega zanimanja, saj imajo lahko pomembne posledice: pri nas poznamo pojem »sedem suhih let« ali pa »sedem debelih krav«, ribiči ob perujski obali pa so imeli ali bogat ulov ali pa le revnega ob izmenjevanju El Niña z La Niño v tri do sedem-letnih ciklih. Kaj povzroča te variacije, dandanes že kar dobro vemo.

Ko gremo v času na vse daljša obdobja pridemo do desetletnih in stoletnih sprememb podnebja. Za taka časovna obdobja so glavni dejavniki nenadni močni vulkanski izbruhi, obstajajo pa tudi zveze med dogajanjem v ozračju in npr. v oceanih, ki puščajo desetletne ali še dalj časa trajajoče sledi. Med stoletna dogajanja lahko štejemo tudi človeški vpliv na spreminjanje podnebja.

Za časovna obdobja tisočev in stotisočev let so zelo značilne izmenjave hladnih obdobj, morda tudi ledenih dob, s precej toplejšimi obdobji. Zelo dobro razlago vzrokov za te spremembe, ki se tudi odlično skladajo s podatki iz narave, je v času ob začetku druge svetovne vojne podal srbski matematik in astronom Milutin Milanković – žal pa ni dočakal nedvoumne potrditve z že omenjenimi podatki.

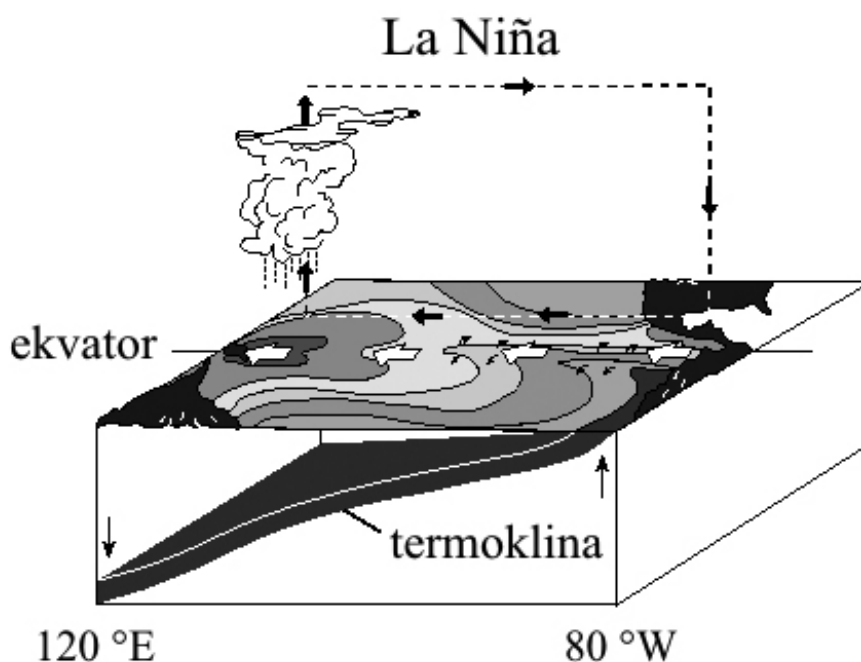
Glavni vzrok za močne spremembe podnebja v desetinah in stotinah milijonov let niso spremembe za celotno Zemljo, temveč to, da celine plavajo sem in tja po tekočem zemeljskem plašču. Kako je moralo biti šele toplo v poznem karbonu, pred 300 milijoni leti, ko je bila današnje ozemlje Švice na ekvatorju! Vzroki za spreminjane podnebja so torej zelo drugačni za spremembe v krajših obdobjih od tistih, ki morda segajo iz ene geološke dobe v drugo.

Medletne in nekajletne spremembe podnebja

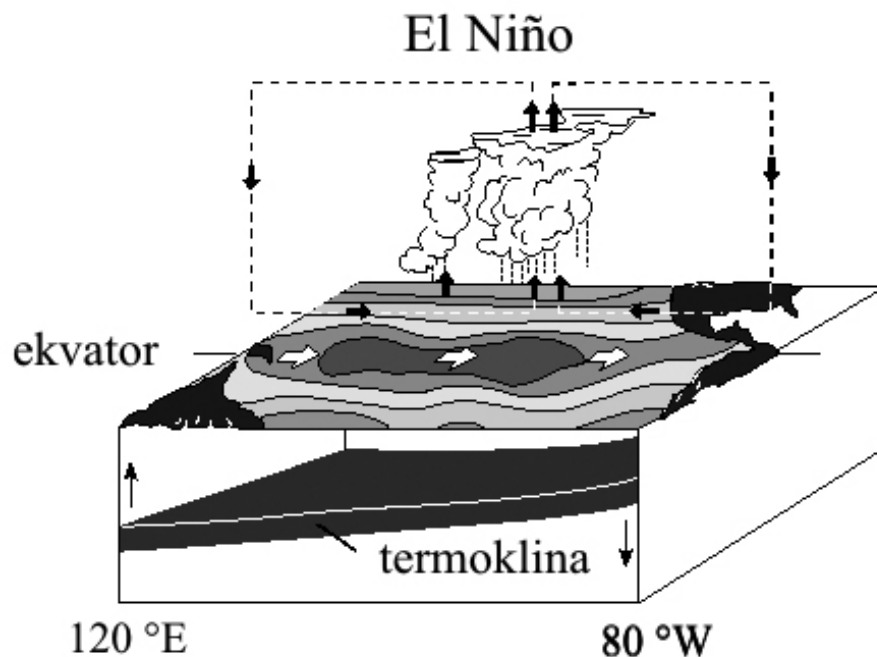
O sezonskih spremembah ne bomo posebej govorili. Na kratko pa opišimo najbolj znane medletne spremembe: posledice izmenjevanja enega prevladujočega režima La Niñe z drugim režimom - El Niñom v tropskem Pacifiku in posledice močnih vulkanskih izbruhov.

Kadar je ob La Niñi najbolj ogret zahodni in osrednji Pacifik (Slika 1, levo), je tam najmočnejše konvekcijsko dviganje z oblačnostjo; tja pri tleh zato doteka zrak iz Indijskega oceana in z druge strani od Amerike. Ta zračni tok poriva tudi površinsko morsko vodo proč od Amerike, kjer jo nadomešča s hranili bogata voda Humboldtovega toka, ki se dviga iz globin. Kadar je ta režim še posebej močan, imajo perujski ribiči še posebej dober ulov. Ta režim se v tri do sedemletnem ciklu izmenjuje z El Niñom, ko se najtoplejša pacifiška površinska voda razlije precej bolj na vzhod, bližje Ameriki (Slika 1, desno). Tedaj je najmočnejša konvekcija znatno bolj vzhodno, kar povzroči kompenzacijski tok v spodnjih plasteh ozračja iz osrednjega Pacifika proti Ameriki. Tedaj vetrovi porivajo površinsko vodo proti ameriški obali in zato tam ni dviganja s hranilnimi snovmi bogate vode iz globin – nasprotno, voda ob obali tone in to so revna leta za ribištvo. Izmenjevanju La Niñe z El Niñom rečemo tudi El Niño/La Niña-Southern Oscillation ali na kratko ENSO.

Slika 1: La Niño in El Niño



Ob La Niñi je najtoplejši zahodni Pacifik, kjer je zato močnejša konvekcija in več oblačnosti, v vzhodnem Pacifiku pa je voda hladnejša: tam se proti površju dviga voda iz globin. Vsakih tri do sedem let se pojavi El Niño (na naslednji strani), ko se območje pregrete površinske vode ter s tem konvekcije in oblačnosti pomakne bolj na vzhod, ob južnoameriške obale. Termoklina je plast v morju z močnim vertikalnim gradientom temperature, ki loči premešano površinsko vodo od vode v globinah.



(Iz NOAA, http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/diagrams/index.html, z dovoljenjem za reprodukcijo in z zahvalo NOAA/PMEL/TAO Project Office, direktor dr. Michael J. McPhaden).

Kaj povzroča te približno periodične izmenjave iz enega v drugi režim? Na temperaturo površinske vode deluje en učinek neposredno, drugi pa s časovnim zamikom. Prvi učinek je tak, da oslabljeni pasatni vetrovi omogočajo zviševanje temperature površinske morske vode v brezvetrju, kar potem še oslabi vetrove in s tem še dvigne temperaturo in tako naprej. Drugi učinek, ki je povezan z mešanjem površinske vode z vodo iz globin, pa deluje v nasprotno smer, toda tudi z nekim časovnim zamikom. Po navadi je v oceanih le vrhnjih 100 ali 200 m vode izrazito tople. Globina, do katere je oceanska voda znatneje premešana, se poveča, kar pomeni zniževanje temperature površinske vode zaradi mešanja s hladnejšo vodo iz globin. Ker pa imajo debele plasti oceanske vode tudi veliko toplotno kapaciteto, ta učinek traja še kar nekaj časa, tako da ta učinek ohlajanja prevlada potem, ko prvi neposredni učinek ogrevanja že preneha delovati – in pregretost se preobrne nazaj v hladnejši režim. Kombinacija neposrednega učinka v eno smer in zakasnelega učinka v drugo smer se izide v ponovitvah na 3-4 leta, kar je približno enako povprečni periodi izmenjevanja med El Niňom in La Niňo.

Ta dogajanja v tropskem Pacifiku se po nekem času odrazijo tudi drugod po Zemlji. Z le kratkim zaostankom ga čuti deževni monsunski režim v Indiji, ki je ob El Niňu izrazito šibkejši kot ob La Niňi. Tako npr. Maity in Kumar (2006) poročata o močni povezavi med La Niňo in padavinskimi presežkom v Indiji, Rajevan in Pai (2007) pa, da so skoraj vse hude suše in okrog polovica primanjkljajev padavin v Indiji povezani z El Niňom. Dlje od tropov in dlje od Pacifika pa se pokaže vpliv El Niňa ali La Niње manj intenzivno in z večjim zamikom (Slika 2). Morda je to izmenjevanje glavni vzrok za »sedem lepih in debelih krav« in »sedem drugih, grdih in suhih krav«, ki se pojavljajo že v 1. Mojzesovi knjigi (1-41) in ki jih dobro pozna tudi slovensko izročilo.

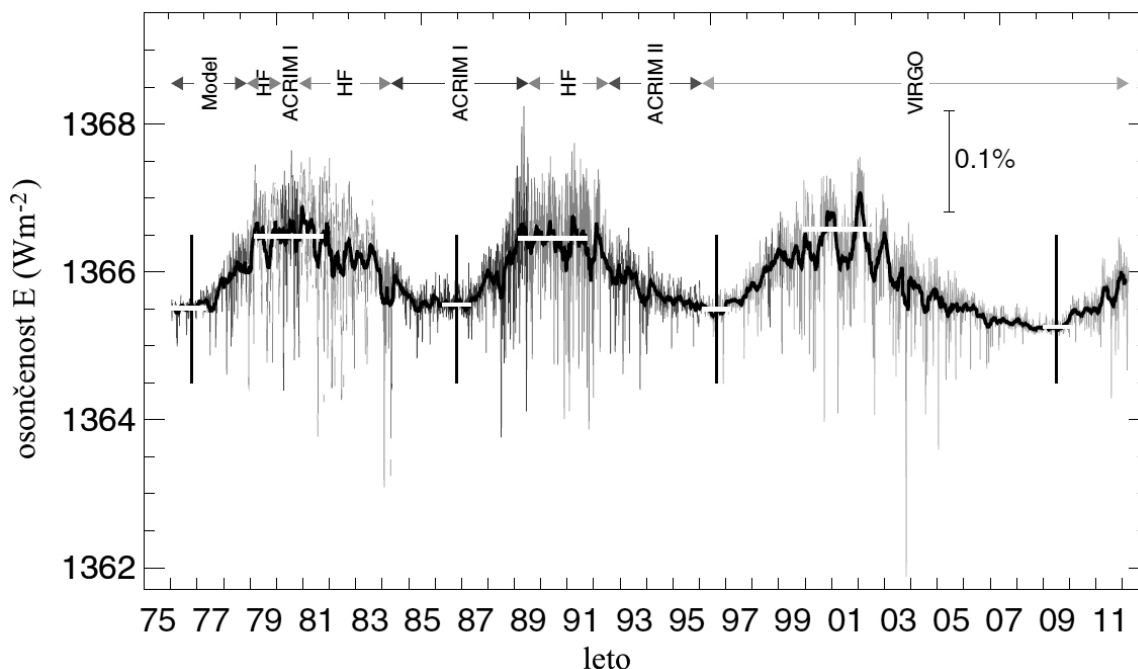
Slika 2: Korelacijski koeficienti med količino padavin in indeksom za pojav El Niño¹

Ob močnih vulkanskih izbruhih pride visoko ozračje ogromno prahu in dima - tudi do tisoč milijard ton. Vetrovi ta bolj ali manj bel prah in dim raznesejo po vsem ozračju in Zemlja tako postane nekoliko bolj svetla - od nje se odbija več sončne svetlobe, kot običajno. Willicki in sod. (2005) poročajo, da se je odbojnost Zemlje po izbruhu vulkana Pinatubo leta 1991 za dve leti toliko povečala, da je prejela za $2,5 \text{ Wm}^{-2}$ manj moči od Sonca kot običajno, kar se je potem dve leti poznalo z $0,4$ do $0,5^\circ\text{C}$ nižji temperaturi po vsej Zemlji (Rosenberg, internetni vir). Po še močnejšem izbruhu Krakataua je bilo znižanje globalne temperature še večje.

Desetletne do stoletne spremembe

Med vzroki za desetletne in stoletne spremembe podnebja precej omenjajo spremenljivo aktivnost Sonca, pa tudi nekatere notranje vzroke samega podnebnega sistema. Sem spadajo tudi sedanje podnebne spremembe, ki jih pripisujemo povečevanju količine plinov tople grede v zraku.

Sonce ne sveti ves čas enako. Četudi pravimo gostoti energijskega toka sončnega sevanja $j_0 = 1467 \text{ Wm}^{-2}$ »solarna konstanta«, se ta v resnici spreminja: najbolj znani so enajstletni cikli peg na Soncu, ki jih spremljajo precej periodične spremembe gostote energijskega toka. Velja: več peg, močnejše osončenje, manj peg - šibkejša osončenja: pri maksimumu Sončevih peg za okrog 1 Wm^{-2} več od povprečja, pri minimumu pa za okrog 1 Wm^{-2} manj od povprečja. Te spremembe - manj kot ena tisočinka solarne konstante - pa so premajhne, da bi z njimi lahko razložili npr. sedanje globalno ogrevanje Zemlje v zadnjih 150 letih!



Slika 3: Spremembe obsevanosti zemlje

Dokaj periodične so 11-letne spremembe obsevanosti Zemlje za kak $\pm 1 \text{ Wm}^{-2}$ (črna črta), medtem ko so spremembe iz dneva v dan (sive črte) lahko velike več Wm^{-2} . Bele vodoravne črte označujejo povprečja v minimumih in maksimumih, navpične črte pa razpone preko vsakega cikla. Podatki so bili dobljeni v različnih eksperimentih (ACRIM, VIRGO) ter za leti 1977 in 1978 ekstrapolirane z modelom Frölicha in Leana (1998).

(Iz Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos - World Radiation Center, <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>, z dovoljenjem za reproduciranje)

¹ Barvno karto korelacijskih koeficientov objavljamo na strani 32.

Aktivnost Sonca pa se lahko spremeni tudi za dalj časa. Precej natančna Cassinijeva opazovanja na Pariškem observatoriju so pokazala, da je bilo med približno leti 1645 in 1715 celih sedemdeset let zapored izrazito malo Sončevih peg – tudi manj kot deset letno; kako leto sploh nobene. Ob tem je bila takrat mala ledena doba – še danes jo gledamo na slikah flamskega slikarja Pietra Bruegla starejšega. Nekateri to dvoje povezujejo kot vzrok in posledico: 1 Wm^{-2} je resda samo okrog ena tisočinka solarne konstante, toda če naj bi zmanjšanje za kak Wm^{-2} trajalo celih sedemdeset let, pa bi se to morda lahko že poznalo!

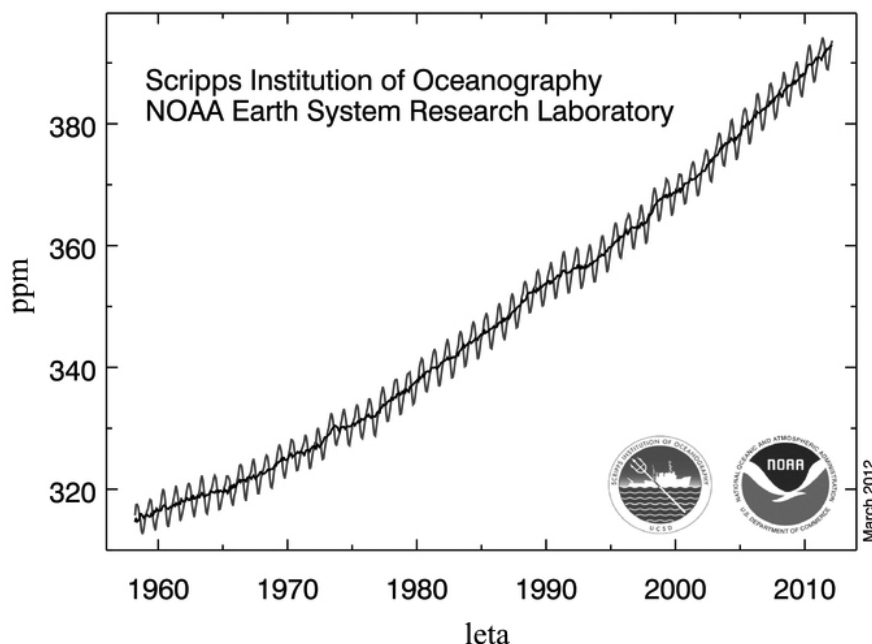
Ali se lahko oceni aktivnost Sonca še dlje v preteklost? Od Cassinijevih opazovanj dalje so za zadnjih 400 let na razpolago dokaj dobri podatki o številu peg na Soncu. Po drugi strani pa lahko pridobimo tudi podatke o izotopu ogljika ^{14}C , vgrajenega v fosilne ostanke organizmov živih bitij. Povezava naj bi bila naslednja: v spremenjenem magnetnem polju okrog Zemlje zaradi spremenjene aktivnosti Sonca nastaja v gornjih plasteh ozračja manj ^{14}C in ga potem organizmi zato tudi manj vgradijo v svoja telesa. S pomočjo primerjave za 400 let s podatki o Sončevih pegah so npr. Solanki in sod. (2005) z dendrokronološko analizo vsebnosti ^{14}C v fosilih ocenili število peg za zadnjih 11 tisoč let. Toda tudi za teh 11 tisoč let so dobili le majhne spremembe – spet samo okrog ene tisočinke solarne konstante. Zgleda, da bolj kot sama aktivnost na podnebje vpliva trajanje cikla Sončeve aktivnosti (Friis-Christensen in Lassen, 1991).

Tudi v samem zemeljskem sistemu so nekateri notranji vzroki za desetletne variacije podnebja. Npr. sprememba temperature površine oceanov se, ko se La Niña sprevača v El Niño, sicer hitro seli preko Pacifika. Toda v oceanih z visoko toplotno kapaciteto se dalj časa ohranijo in poznajo samo počasne komponente, ki potem le počasi vplivajo nazaj na ozračje in s tem na podnebje (pa tudi na počasne desetletne variacije močnejših in šibkejših sprememb ENSO).

Desetletja ali tudi stoletja so lahko časovna obdobja za sedanje podnebne spremembe zaradi spremenjenega vpliva tople grede. Te spremembe pripisujemo vplivom človeštva na toplo gredo, ki je sicer naravni pojav. Wienov zakona $I_{\text{max}} = a/T$ pove, pri kateri valovni dolžini I_{max} je maksimum sevanja teles s temperaturo T ; pri tem je $a = 2,9 \text{ mmK}$. Iz tega izvemo, da je to za telesa s temperaturo $290 \text{ K} = 17^\circ \text{C}$ pri $I_{\text{max}} = 2,9/290 \text{ mm} = 10 \text{ mm}$, kar je v infrardečem (IR) območju, (in da Sonce s temperaturo 6000 K najmočnejše pri $I_{\text{max}} = 2,9/6000 \text{ mm} = 0,48 \text{ mm}$, kar pomeni vidno svetlobo). Za vidno svetlobo so vsi plini ozračja praktično prozorni, zato ta neovirano prihaja do dal in se je del v tleh absorbira. Tla s temperaturo okrog 290 K pa sevajo infrardeče sevanje. Pri nekaterih valovnih dolžinah IR sevanje tri- in več atomni plini v ozračju dokaj močno absorbirajo – tako močno, da ga le okrog 30 % neovirano pride navzgor skozi ozračje v vesolje, okrog 70 % pa ga ozračje absorbira. Molekule, ki zmorejo absorbirati, zmorejo tudi oddajati sevanje enakih valovnih dolžin. Zato tudi ozračje seva v IR območju – navzgor in navzdol. Tisti del, ki gre navzdol torej prejmejo tla: tako IR izsev tal delno nadoknadi z IR obsevom iz ozračja. Posledica je, da je pri tleh za okrog 35°C topleje, kot bi bilo brez toplogrednega vpliva. Toplogredni vpliv je torej na splošno zaželen. Problem pa se pojavi, če ga je preveč: tedaj se Zemlja pri tleh segreva, ali pa, če ga je premalo: tedaj se Zemlja pri tleh hladi. Zadnjih 150 let se, predvsem

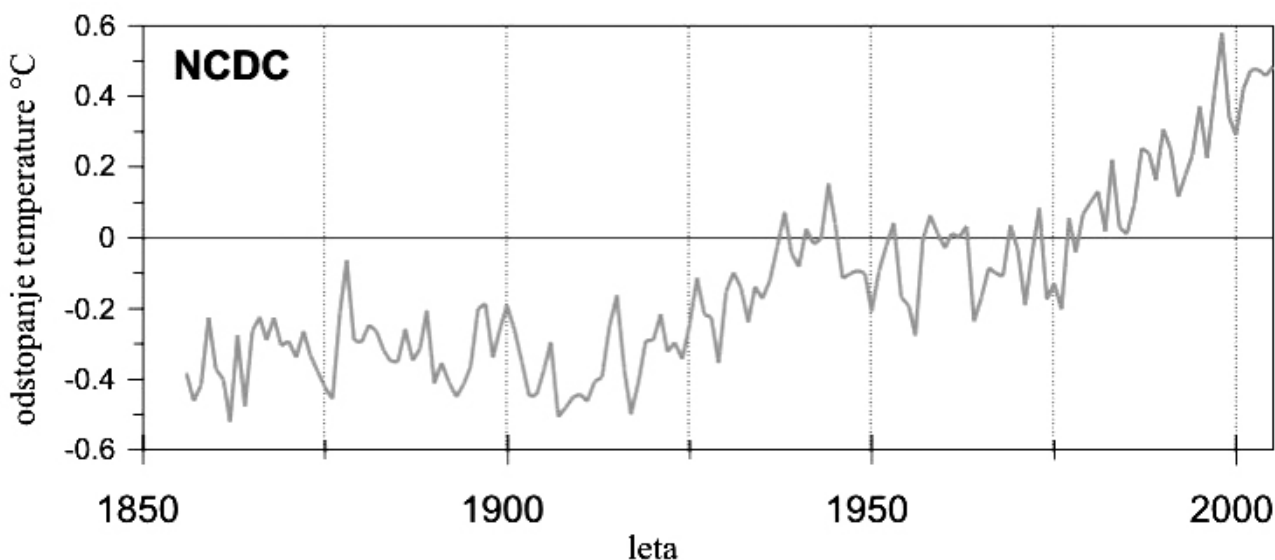
zaradi pospešenega kurjenja fosilnih goriv, ki gorijo v CO_2 in v vodno paro H_2O , povečuje koncentracija CO_2 v zraku (dodatna vodna para se v hidrološkem ciklu dokaj hitro kondenzira v padavine). Ni pa to edini vpliv: povečuje se tudi koncentracija metana CH_4 v zraku, pa koncentracija dušikovih oksidov NO_x in še nekaterih toplogrednih plinov.

Slika 4: Koncentracija CO_2 v zraku, izmerjena na Mauna Loa na Havajih



Povečevanje koncentracije ogljikovega dioksida (CO_2) v ozračju v zadnjih petdesetih letih, kot so jo izmerili na lokaciji brez kakih lokalnih vplivov.

(Iz NOAA ESRL Global Monitoring Division, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_full, z dovoljenji za reproduciranje)



Slika 5: Globalno naraščanje temperature

Globalno naraščanje temperature pri tleh, kot sledi iz vseh meritev, ki so bile opravljene s termometri pri tleh (temperaturo pri tleh pa že dalj časa merimo tudi s satelitov).

(Iz NOAA, NCDC/NESDIS, Paleoclimatology, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/instrumental.html>, z dovoljenji za reproduciranje)

Ker je plin z najmočnejšim toplogrednim vplivom vodna para (okrog 60 % vsega vpliva tople grede) in ker obstajajo tudi nekateri negativni vplivi, se temperatura pri tleh ni povečala toliko, kot bi morda kdo pričakoval glede na povečanje količine CO_2 v zraku: za eno tretjino – od okrog 300 ppm na okrog 400 ppm (ppm pomeni volumensko milijoninko »parts per milion«). Temperatura pa se nedvomno povečuje – kar se vidi na Sliki 5.

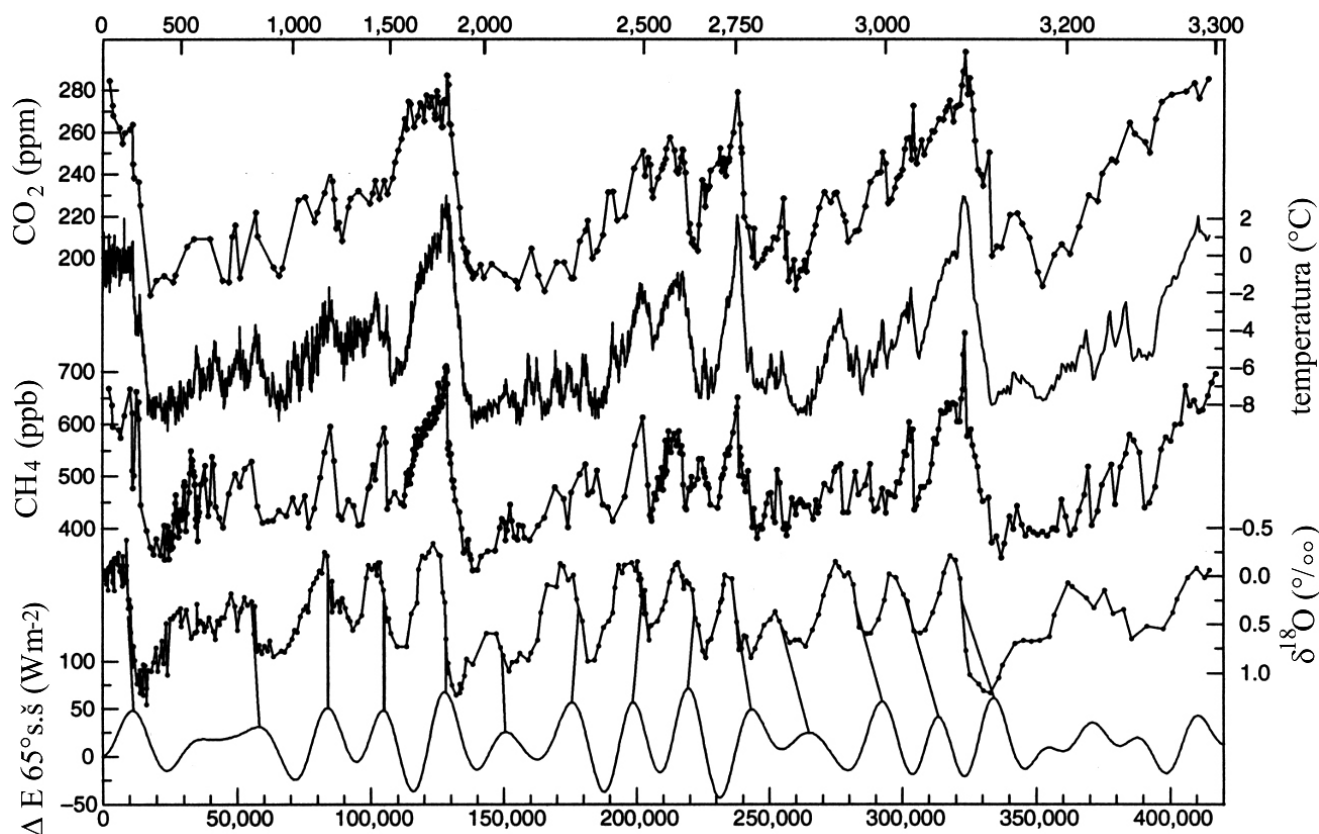
Razne sestavine zraka vremenska dogajanja dokaj hitro dodobra premešajo, zato je koncentracija toplogrednih plinov po vsem ozračju Zemlje praktično enaka. Posledice pa niso povsem enake po vsem planetu. Izračuni s klimatskimi modeli napovedujejo najmočnejše ogrevanja pri tleh v severnih polarnih predelih, najmanjše pa v območju južnih oceanov med Južno Ameriko, Afriko, Avstralijo in Antarktiko (iz IPCC, AR4). Poleg otoplitve vsega planeta pa so predvidene še druge posledice: spremenjen padavinski režim (na splošno v polarnih predelih in prav ob ekvatorju več padavin, v subtropih pa manj), dvig gladine oceanov (predvsem zaradi temperaturne razteznosti vode), taljenje permafrosta, in še glede marsikaterega dejavnika podnebja.

Tisoči in stotisoči let

Najpomembnejše spremembe podnebja v tisočih in stotisočih let imajo astronomske vzroke. Pred približno 70 leti je srbski astronom in matematik Milutin Milanković (1941) izdal obsežno knjigo o astronomskih vzrokih za bolj ali manj periodično pojavljanje ledenih dob. Ko je opazoval pomladno umikanje snežne meje vse više v hribe, je pomislil, da je morda tudi umikanje ledenega pokrova proti polom ob koncu ledene dobe posledica močnejšega osončenja. Upošteval je, da se spreminjata tako oblika oz. ekscentričnost elipse po kateri Zemlja kroži okrog Sonca (perioda okrog 100 tisoč let), kot tudi smer njenih osi (smer perihelija, perioda okrog 25 tisoč let). Poleg tega se spreminja kot nagiba Zemljine osi glede na ravnino elipse od $22,1^\circ$ do $24,5^\circ$ (s periodo okrog 41 tisoč let – sedaj je nagib $23,4^\circ$ in se zmanjšuje), pa tudi njena smer (s periodo okrog 26 tisoč let – sedaj kaže proti Severnici, pred in čez 13 tisoč let pa proti Vegi). Milanković je izračunal, da vse to in še nekatere druge orbitalne spremembe osončenosti Zemlje, npr. pri 65° severne geografske širine, spreminjajo osončenost za tja do $\pm 50 \text{ Wm}^2$, kar pa ni tako malo – okrog 10 %! To pa se lahko že močno odrazi na podnebj!

Dolgo časa ni bili nobene potrditve Milankovićeve teorije ledenih dob. Šele ko so na Antarktiki in na Grenlandiji izvrtali globoke vrtine v 600 tisoč in več let stare globoke ledene kotanje, se je pokazalo zelo dobro ujemanje med količino težkega izotopa kisika ^{18}O v ledu in med Milankovičevimi cikli osončenja. Kakšna je zveza med količino ^{18}O v ledu in podnebjem? Skoraj vsak element v naravi obstaja v različnih izotopskih oblikah. Tako je npr. razmerje med običajnim kisikom ^{16}O z atomsko maso 16 in težjim kisikom ^{18}O , ki ima v jedru dva nevtrona več, v naravi okrog 500:1 (npr. Baertschi, 1976). Največ je seveda »navadne« vode iz kisika z atomsko maso 16 in navadnega vodika. So pa tudi druge kombinacije, med njimi je v oceanih kar nekaj »težje vode« H_2^{18}O . Težje snovi pa težje izhlapevajo, zato v obdobjih, ko je bolj mraz, izhlapeva manj težje vode, ko je toplo, pa nekaj več. Ko je torej mraz, je v pari v zraku in potem v padavinah ter v ledu manj težje vode, v ocenanih ter potem v lupinicah morskih organizmov pa več. Vrtanje v led in v sedimente morskega dna torej preko deleža ^{18}O govori o toplih in hladnih obdobjih. Na dveh krivuljah na Sliki

6 se vidi, da vsakemu obdobju povečanega osončenja pri 65° severne geografske širine pripada en vrh v krivulji ^{18}O v ledu iz vrtine Vostok na Antarktiki. Poleg teh dveh krivulj so narisane še vsebnosti CO_2 in metana, ujetih v mehurčkih v ledu, pa tudi temperatura. To je dokaj zanesljiv znak, da so Milankovičeve orbitalne spremembe tiste, ki povzročajo ledene dobe na približno vsakih 100 tisoč let.



Slika 6: Primerjave med različnimi podatki iz vrtine Vostok na Antarktiki z Milankovičevimi cikli osončenja.

Spremembe povprečne osončenosti pri 65° s. g.š. so označene kot DE, ppm pomeni volumnske deleže v milijoninah, ppb pa v milijardinah, $\delta^{18}\text{O}$ pa so relativne spremembe koncentracije težkega izotopa kisika 180 glede na njegovo povprečno prisotnost v morski vodi (v promilih).

(Iz US Climate Change Science Program / US Global Change Research Program, <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/images/Vostok.jpg>, z dovoljenji za reproduciranje.)

Milijoni in stotine milijonov let

Glavni vzrok za spreminjanje nekega območja skozi geološke dobe je ta, da je bilo to območje pred sto ali več sto milijoni let morda precej drugače, kot je sedaj. Tako je bila npr. sedanja Sahara, ki je sedaj v severnih subtropih, pred 400 do 500 milijoni let na južnem tečaju. In seveda je imela sedanja Sahara takrat polarno podnebje: zato ni čudno, da poročajo o ledene pokrovi nad današnjo jugozahodno Libijo v tistem času (npr. Le Heron in Howard, 2011). Najnazornejši je animacijski prikaz premikanja celin na <http://en.wikipedia.org/wiki/File:TectonicReconstructionGlobal2.gif>. Jaz sem se tega dobro zavedel pred leti, ko sem v Luzernu v Švici obiskal majhen, a zelo poučen muzej Gletscher Garten (<http://www.gletschergarten.ch/Luzern-vor-20-Millionen-Jahren.70.0.html>), v katerem prikazujejo toplo in vlažno podnebje Švice pred dvajsetimi milijoni let. Glavni vzrok za močne spremembe podnebja v desetinah in stotinah let seveda niso spremembe za celotno Zemljo, temveč to, da celine plavajo

sem in tja po tekočem zemeljskem plašču. Kako je moralo biti šele toplo v poznem karbonu, pred 300 milijoni leti, ko je bilo današnje ozemlje Švice na ekvatorju!

Sklep

Spreminjanje podnebja je različno intenzivno za različno dolga obdobja obravnave. Pa tudi vzroki so za različno dolge časovne skale različni: od tektonike s premikanjem kontinentov, preko astronomskih vzrokov, pa človeškega vpliva na podnebje, do krajših variacij podnebja, ki pa imajo bolj ali manj notranje vzroke v samem sistemu ozračja z vremenom in s tem posledično vplivajo na podnebje.

Viri in literatura

1. Baertschi P., 1976, Absolute¹⁸O content of standard mean ocean water, Earth and Planetary Science Letters, 31, str. 341–344.
2. Friis-Christensen E. and Lassen K., 1991, Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate, Science, 254, str. 698–700.
3. Fröhlich C., and Lean J., 1998, The Sun's total irradiance: Cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties, Geophys. Res. Lett., 25, str. 4377–4380.
4. Le Heron D. P, Howard J., 2010, Evidence for Late Ordovician glaciation of Al Kufrah Basin, Libya, Journal of African Earth Sciences, 58, str. 354–364.
5. IPCC AR4. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, 104 str., http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
6. Maity R. and Kumar D. N., 2006, Bayesian dynamic modeling for monthly Indian summer monsoon rainfall using El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and Equatorial Indian Ocean Oscillation (EQUINOO), J. Geoph. Res. 111, doi:10.1029/2005JD006539
7. Milanković M., 1941, Kanon der Erbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproble. Belgrad: Königlich Serbische Akademie, XX + 633 str.
8. Petkovšek Z. in Leder Z. (ur.), 1990, Meteorološki terminološki slovar, Slovenska akademija znanosti in umetnosti in Društvo meteorologov Slovenije, Ljubljana, 125 str.
9. Rajeevan M. and Pai D.S., 2007, On the El Niño-Indian monsoon predictive relationships, Geophysical Research Letters 34, doi:10.1029/2006GL028916
10. Rosenberg M., 2012, Mount Pinatubo Eruption, The Volcanic Mount Pinatubo Eruption of 1991 that Cooled the Planet, <http://geography.about.com/od/globalproblemsandissues/a/pinatubo.htm>, (cit.: marec 2012).
11. Solanki S. K. in ost., 2005, 11,000 Year Sunspot Number Reconstruction, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2005-015. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. Dostopno na http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspots_11000_years.svg in na ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/solar_variability/solanki2004-ssn.txt
12. Wielicki B. A., Takmeng W., Loeb N., Minnis P., Priestley K., Kandel R., 2005, Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite, Science 308, DOI: 10.1126/science.1106484.