

RAZGLEDI**VZROKI SPREMINJANJA PODNEBJA**

AVTOR

Jože Rakovec

Naziv: dr., univerzitetni diplomirani meteorolog, redni profesor

Naslov: Katedra za meteorologijo, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, Jadranska ulica 19, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: joze.rakovec@fmf.uni-lj.si

UDK: 551.5

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Vzroki spreminjanja podnebja

Podan je pregled vzrokov za podnebje in njegovo spreminjanje. Na primeru preproste energijske bilance Zemlje kot celote so obravnavane možne posledice ob morebitnem drugačnem dotoku energije s Sonca, drugačni odbojnosti Zemlje za sončno sevanje ali drugačni absorptivnosti/emisivnosti ozračja za infrardeče sevanje. Astronomski vzroki za spreminjanje podnebja po Milankoviču in z njimi povezana periodična ponavljanja ledenih dob se dobro skladajo z izotopsko sestavo ledu v globokih vrtnah, kar omogoča oceno podnebja za zadnjih 400.000 let. Zapletene vzročne in povratne povezave med količino toplogrednih plinov v ozračju in temperaturo planeta ne omogočajo nedvoumnih sklepov o tem, kaj je bil v geološki zgodovini vzrok in kaj posledica sprememb podnebja.

KLJUČNE BESEDE

podnebje, Milankovičevi orbitalni cikli, vrtime v ledu, plini tople grede

ABSTRACT

Causes of climate changes

Causes of climate and climate changes are discussed. Using the case of simplified energy balance of the Earth foreseen consequences of possible changes in insolation, Earth's albedo, and absorptivity/emissivity of the atmosphere for infrared radiation are considered. Milankovic's orbital cycles and ice ages appearances are well correlated with isotopic structure of the ice in deep cores, enabling researchers to speculate on the climate over the last 400,000 years. Complicated interrelations between greenhouse gases concentrations and planet temperatures do not allow unambiguous conclusions to be made about what in the geological climatic history of our planet a cause and what a consequence of climatic changes was.

KEYWORDS

climate, Milankovic's orbital cycles, deep ice cores, greenhouse gases

Uredništvo je prispevek prejelo 22. marca 2004.

1 Uvod

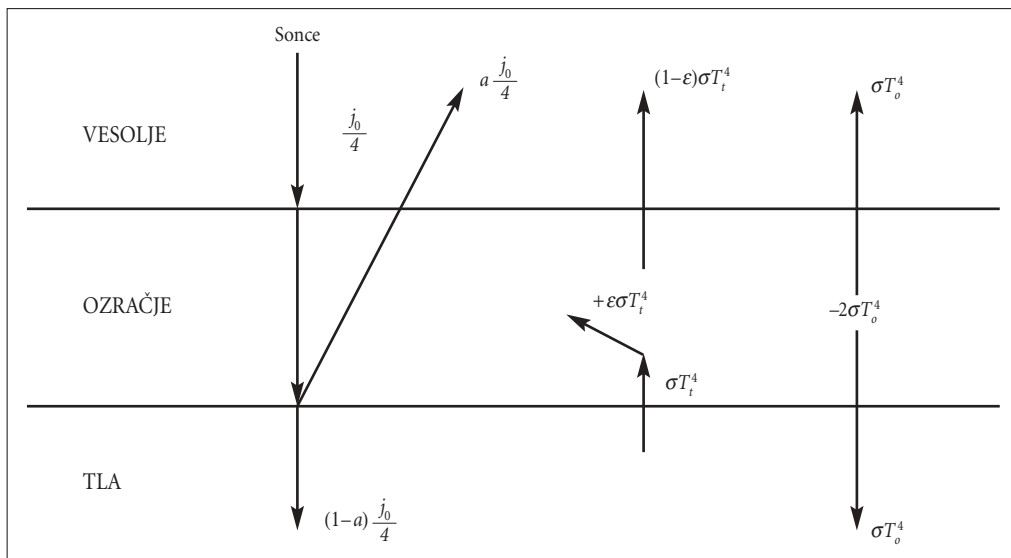
Dandanes se o spreminjanju podnebja veliko piše in govori. Vzrok za veliko zanimanje je predvsem povečevanje količine ogljikovega dioksida CO_2 in drugih toplogrednih plinov v ozračju. Delež CO_2 v ozračju se je v industrijski dobi povečal za okrog tretjino: od okrog 280 milijonink na skoraj 380 milijonink. Precej zanesljivo je glavni razlog za hitro povečevanje koncentracije CO_2 v ozračju poraba fosilnih goriv.

Ogljikov dioksid, podobno kot drugi triatomni plini v ozračju, pomembno absorbira infrardeče sevanje, ki ga oddajajo telesa na Zemlji s temperaturo nekako med 250 in 300 K (med približno -25 in $+25^\circ\text{C}$). Zato je povečevanje njegove koncentracije v ozračju takoj vzbudilo pozornost, saj naj bi se zaradi te absorpcije ozračje pri tleh nekoliko otoplilo. Res: v zadnjem stoletju se je temperatura pri tleh, v povprečju po vsej Zemlji, zvišala za nekaj manj kot stopinjo, v Evropi pa celo za več kot stopinjo. Spreminjanje temperature ima lahko zelo pomembne posledice, o čemer pripovedujejo drugi prispevki v tej številki Geografskega vestnika.

V tem prispevku se omejujemo predvsem na obravnavo naravnih vzrokov za spreminjanje podnebja. Čeprav je neverjetno hitro povečevanje koncentracije ogljikovega dioksida in še nekaterih primesi v zraku zaradi človekovih vplivov ter hkratno spreminjanje temperature seveda vredno vse pozornosti in primerne ukrepanja, pa je za popolno sliko o vzrokih za spremembo podnebja in o posledicah treba poudariti tudi to, da se je na Zemlji podnebje že mnogokrat močno spremenilo, tudi brez kakega neposrednega človeškega vpliva. Podnebje je namreč po naravi spremenljivo: v geološki zgodovini je bilo že velikokrat bistveno bolj toplo, kot je sedaj, pa tudi že velikokrat bistveno bolj hladno. Zato v prispevku obravnavamo naravne spremembe podnebja v geološki dobi.

2 Vzroki za spreminjanje podnebja

Podnebje posameznih predelov Zemlje opredeljujejo mnogi dejavniki, povezanimi z dovajanjem in odvajanjem energije (toplote) in vlažnosti na ta območja: različno sončno obsevanje posameznih območij zaradi različne geografske širine, reliefa in povprečne oblačnosti, prenos energije z vetrovi



Slika 1: Shematska razlaga energijske bilance celotne Zemlje

in morskimi tokovi, lokalno pogojeni presežki ali primanjkljaji energije ali vlage, lega ob morju na zahodnih ali vzhodnih predelih kontinentov, lastnosti tal in drugi dejavniki (Rakovec in Vrhovec 2000, 248–256).

Zemljo lahko obravnavamo tudi kot celoto. V tem primeru opiše vzroke za podnebje celotne Zemlje le njena energijska izmenjava z vesoljem: dotok s sončnim obsevanjem Zemlje in oddajanje infrardečega sevanja v vesolje (Rakovec in Vrhovec 2000, 136–139 in 251); prikazuje jo slika 1, ki z dvema enačbama v grobem razloži tako imenovani »vpliv tople grede«.

Sonce obseva Zemljo z gostoto energijskega toka $j_0 \approx 1380 \text{ Wm}^{-2}$. Tej vrednosti rečemo solarna konstanta. Ker ni hkrati obsevana vsa površina Zemlje, upoštevamo, da je osvetljen le presek Zemlje. Del sončnega obsevanja se zaradi odbojnosti ali albeda našega planeta $a \approx 0,31$ odbije od tal, oblakov in ozračja. Zato pri dotoku sončne energije upoštevamo, da se absorbira le delež $\frac{1}{4}(1-a)j_0$. Tla s temperaturo T_t oddajajo infrardeče sevanje po Stefanovem zakonu: σT_t^4 ($\sigma = 5,679 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Ozračje s svojimi »plini tople grede« ima za infrardeče sevanje emisivnost oziroma absorptivnost $\varepsilon \approx 0,7$. Zato gre neovirano v vesolje le del infrardečega sevanja, ki ga sevajo tla: $(1-\varepsilon)\sigma T_t^4$, delež $\varepsilon\sigma T_t^4$ pa absorbira ozračje. Ozračje s temperaturo T_o tudi samo seva: navzgor v vesolje in navzdol proti tlu, v vsako smer z gostoto izsevanega toka $\varepsilon\sigma T_o^4$. Iz izenačenosti dotokov in odtokov energije posebej za tla, posebej za ozračje in posebej glede na vesolje dobimo za temperaturi tal in ozračja dve enačbi:

$$T_t = \sqrt[4]{\frac{(1-a)j_0}{\sigma(4-2\varepsilon)}} \quad \text{in} \quad T_o = \sqrt[4]{2} T_t \approx 1,19 T_t$$

Ti dve enačbi razložita bistvo temperaturnih razmer na Zemlji in bistvo »tople grede«. Temperatura tal T_t je višja kot temperatura ozračja T_o . Kolikšni sta obe temperaturi, pa je po tem poenostavljenem modelu odvisno od treh dejavnikov:

- od gostote toka sončne energije pri Zemlji j_0 : na Zemlji je topleje, če Sonce močnejše obseva Zemljo – čim večji je j_0 ;
- od odbojnosti (albeda) Zemlje a : čim manj se sončne energije od Zemlje odbije – čim manjša je odbojnost a oziroma čim večji je izraz $(1-a)$, tem topleje je,
- od absorptivnosti ozračja ε : temperatura je višja, čim večja je absorptivnost.

Solarna konstanta v resnici ni konstanta, temveč se spreminja. Tudi sedanja vrednost $j_0 \approx 1376 \text{ Wm}^{-2}$ ni konstantna, temveč so kratkodobne spremembe (tedni, meseci) velike nekaj desetink odstotka, v daljših obdobjih (na primer v povezavi s ciklom sončnih peg) pa tja do odstotka. Tudi položaj Zemlje glede na Sonce ni vedno enak, kar je najverjetnejši vzrok za bolj ali manj periodično izmenjavo hladnih in toplih obdobj.

Od Zemlje se veliko sončne svetlobe odbija: od ledu na polarnih območjih, od oblakov, od rdečkaste ga peska puščav, od zelenja tropskih gozdov, od modrih oceanov; nekaj tudi od ozračja in prahu v ozračju (odtod modrikasti odtенок vsepovsod po Zemlji). Odbojnost ali albedo se spreminja. Bolj je Zemlja mrzla, več bo ledu in večji bo delež beline, torej večja odbojnost. Podobno je z oblaki: več jih je, bolj je Zemlja bela in zato se več sončne svetlobe od nje odbije (negativni povratni vpliv). Ker oblaki absorbirajo tudi infrardeče sevanje (pozitivni povratni vpliv), se negativni in pozitivni povratni vpliv precej izravnata.

Absorptivnost oziroma emisivnost ozračja, ki zagotavlja »vpliv tople grede«, je naravna lastnost ozračja: Zemlja ima »toplo grede« že milijarde let. Absorptivnost je tem večja, čim več je v ozračju tistih plinov, ki absorbirajo infrardeče sevanje, tako imenovanih plinov tople grede. Med temi ima največji delež vodna para, okrog 60 %, in njen delež je v ozračju približno stalen. Ogljikov dioksid prispeva k naravni topli gredi okrog 26 %, okrog 8 % ozon in okrog 6 % skupaj metan ter didušikov oksid.

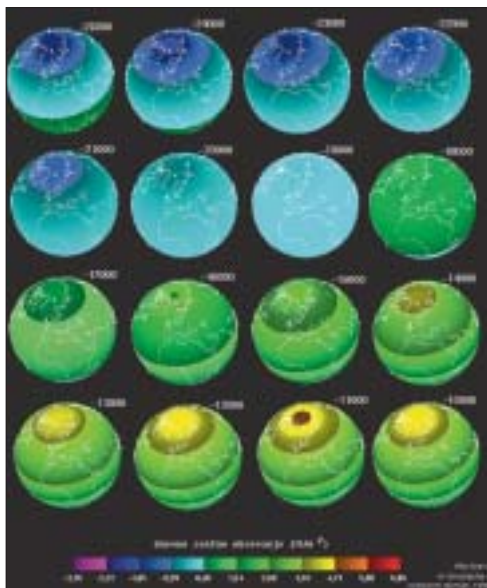
Ker se je v industrijski dobi povečala koncentracija ogljikovega dioksida in še nekaterih drugih plinov tople grede, je človeštvo povečalo vpliv tople grede.

3 Periodično pojavljanje ledenih dob

Zemlja je nastala pred približno 4,6 milijarde let in pred približno 2 milijardama let je že imela podobno ozračje kot sedaj. V ordoviciju, pred približno 450 milijoni let, je bila večina kontinentov združena v Gondvano, ki je bila skoraj v celoti na južni zemeljski polobli. Antarktika je bila približno na ekvatorju, Sahara pa skoraj na južnem zemeljskem tečaju. Velik delež sprememb podnebja, o katerih pričajo geološke plasti, lahko pripišemo »potovanju« kontinentov po Zemlji. Tropsko podnebje Švice pred več sto milijoni let, ne pomeni, da je bilo tedaj na vsej Zemlji tropsko toplo, temveč da je ozemlje Švice ležalo blizu ekvatorja.

Tudi podnebje Zemlje kot celote se je spreminjalo. Morda najzanimivejše so spremembe, ki so posledica sprememb pri vrtenju Zemlje in pri njenem kroženju okrog Sonca. Sredi 20. stoletja je na te vzroke pokazal srbski matematik Milutin Milanković (1941). Ko je opazoval zasnežene hribe in izginjanje snega na njih ob vse močnejšem pomladnem osončenju, mu je prišlo na misel, da se podobno obnašata tudi polarni ledeni kapi: včasih sta obsežni in njun led sega ob ledenih dobah daleč »navzdol« proti nizkim geografskim širinam, drugič, ob toplih obdobjih, pa led pokriva le oba pola. Izračunal je, kako se spreminja osončenje Zemlje zaradi večje ali manjše sploščenosti elipse, po kateri kroži Zemlja okrog Sonca, kako se spreminja nagib osi kroženja Zemlje glede na ravnino te elipse, in kako Zemlja »opleta« podobno kot vrtavka. Ugotovil je, da se te spremembe ponavljajo približno na vsakih 100.000, 40.000 in 20.000 let. Ko je upošteval vse tri vzroke skupaj, je ugotovil, da je bila severna polobla minimalno obsevana ravno ob zadnji poleditvi te poloble pred približno 20.000 leti. Postavil je svojo teorijo, po kateri se ledene dobe periodično ponavljajo zaradi omenjenih astronomskih vzrokov.

Dolgo je bila Milankovićeve teorija skoraj pozabljena. Potem pa so z vrtnji v globoke plasti ledu na Antarktiki in na Grenlandiji ugotovili, da se podatki o količinah nekaterih izotopov v ledu iz teh vrtnin presenetljivo dobro skladajo z Milankovičevimi cikli. Za kaj gre? V naravi se večina kemijskih elementov pojavlja v več izotopskih oblikah. Tako je na primer večina vode iz kisika in vodika. Vendar je v naravi tudi nekaj kisika z enim ali dvema nevtronoma več, pa tudi vodika z enim nevtronom več v jedru. Tako obstajata v naravi »navadna« in »težja« voda. Težje snovi težje izhlapevajo, zato je za njihovo izhlapevanje potrebno več energije, toplejše podnebje. V hladnih predelih je v padavinah relativno



Slika 2: Šibkejša in močnejša dnevno osončenje severne zemeljske poloble ob junijskem enakonočju v zadnjih 25.000 letih glede na sedanje povprečne razmere (ASU 1996). Če upoštevamo, da kraji ob ekvatorju dnevno prejema med 30 in 35 MJ m⁻² energije, vidimo, da astronomski dejavniki povzročajo spremembe za okrog ± 10 do 15 %.

manj »težkega« kisika ^{18}O , v toplih predelih pa ga je več. Manjša odstopanja so med drugim posledica tega, da je vlaga izhlapela v zrak in so jo vetrovi zanesli daleč proč od vira, preden se je spet vrnila na tla.

Padavine se v hladnih območjih nabirajo v debele pasti ledu. Vsaka plast je ostanek preteklega obdobja. V 3,6 km globoki vrtini na Antarktiki so zbrali vzorce ledu, ki so nastali v zadnjih 420.000 letih. Izotopi in primesi v ledu so zapis o tem, ali je bilo tedaj toplo ali hladno. Podatki, ki so na voljo tudi na internetu (Petit in sodelavci 1999), se osupljivo ujemajo z Milankovičevimi cikli.

4 Vzroki in posledice

Podnebje določa veliko dejavnikov, ki so med seboj povezani in med njimi obstajajo pozitivne in negativne povratne zveze. Skoraj nobena od povratnih zvez ni samo pozitivna ali negativna, temveč so skoraj vse zapleteno prepletene. Zato je zelo težko zagotovo trditi, kaj se bo na daljši rok zgodilo, če se Zemlja začne segrevati, na primer zaradi močnejšega osonečenja. Nekateri vzroki kažejo na neposredne in bolj ali manj pričakovane posledice, na primer v naslednjem zaporedju: več toplogrednih plinov > več absorpcije infrardečega sevanja v ozračju > višja temperatura ozračja. Lahko pa se zgodi, da neki vzroki povzročijo povsem nepričakovane posledice, prav nasprotne pričakovanjem. Navedimo nekaj primerov.

Ob koncu prejšnjega stoletja so se začeli pojavljati članki o morebitni ledeni dobi zaradi hitrega ogrevanja Zemlje. Na prvi pogled nenavadna posledica: višja temperatura > ledena doba. Kaj se skriva v tej navidezni nelogičnosti? Stocker in Schmittner (1997) sta ugotovila, da se Zalivski tok lahko zaustavi. Kako je Zalivski tok pomemben za podnebje Evrope, pove primerjava, da pozimi Britanskemu otočju ta tok prinese več toplote, kot sončno obsevanje. Če bi se ob močnem segretju na Grenlandiji stalilo veliko ledu, bi v severni Atlantik priteklo veliko sladke vode. Sladka voda je manj gosta od slane in zato »plava« na gostejši, bolj slani vodi. Velike količine sladke vode v površinskih plasteh severnega Atlantika bi lahko »zaprl« pot toplemu Zalivskemu toku proti Evropi. Jean Lynch-Stieglitz s sodelavci (1999) je v plasteh na dnu oceana odkril informacijo o tem, da je bil ob koncu zadnje ledene dobe Zalivski tok kar za tretjino šibkejši, kot je danes. Konec leta 2001 sta vzbudila pozornost tudi članka Rinda in sodelavcev (Rind in sodelavci 2001a in 2001b) o tem, da sladka voda Zalivskega toka ne bi povsem zaustavila, saj tega toka ne poganjajo samo razlike v gostoti vode temveč tudi vetrovi, toda njegova učinkovitost prenašanja toplote proti zahodnim obalam Evrope in Grenlandije bi se lahko približno razpolovila. V tem primeru bi se lahko Grenlandija ohladila za kakih 10°C . Mogoče bodo že sedanje generacije dočakale tak dramatičen preobrat!

Vzroki in posledice pri medsebojno tako prepletenih dogajanjih, kot so vremenska in oceanska, nikakor niso preprosto povezani. Lahko se zgodi, da kako dogajanje »prestopi nek prag«, za katerim so posledice povsem nepredvidljive. Zato je za krajša obdobja (na primer tri desetletja) vnaprej dokaj zanesljivo, da se bo temperatura našega planeta še naprej dvigala zaradi toplogrednih vplivov. Za dlje vnaprej pa napovedi za ves planet, še manj pa za posamezne predele, niso več zanesljive.

Spremembe osonečenja po Milankovičevih ciklih skoraj zagotovo povzročajo topla in hladna obdobja. Toda, ali so toplogredni plini, katerih količina se je približno ob koncu zadnje ledene dobe skoraj podvojila, vzrok za končanje ledenih dob, ali pa so morda posledica otoplitev, ki so jih povzročili kaki drugi vzroki? Fischer in sodelavci (1999) pravijo, da se je ob koncu zadnjih treh ledenih dob najverjetneje najprej ogrelo in šele potem se je količina ogljikovega dioksida povečala. Tudi ob močnih znižanjih temperature, ki vodijo v ledene dobe, se količina ogljikovega dioksida v ozračju ohranja še tisoče let. Ugotovitve potrjujejo tudi novejši rezultati (Caillon in sodelavci 2003). Kaj je torej v geološki zgodovini uravnavalo količino toplogrednih plinov? Z mnenji o tem, da CO_2 v geološki zgodovini morda ni bil vzrok temveč posledica temperaturnih sprememb, prednjačijo kritiki ideje o neposrednem vplivu CO_2 na podnebje. Toda obstajajo tudi resni in močno podprti argumenti za to. Naštejmo samo dva – toliko, da pokažemo na prepletenost vzrokov in posledic.

Termodinamika in naše vsakdanje izkušnje povedo, da se v hladnejših tekočinah plini bolje raztapljajo. Vsak je že opazil, da se mehurčki iz mineralne vode močneje izločajo, ko je topla. To je lahko

tudi ena od razlag, da so v geološki zgodovini temperaturne razmere vplivale na količino toplogrednih plinov in ne obratno. Ko je bilo toplo, se je ogljikov dioksid slabše raztapljal v oceanih, zato se je njegova koncentracija v ozračju povečevala, ko pa je bilo bolj hladno, se je ta plin bolje topil v oceanih in njegova koncentracija v ozračju je zato spet upadla.

Takšna razlaga opozarja na pomembno vlogo oceanov v globalni bilanci CO₂. Oceani so daleč največji rezervoar ogljika na Zemlji, ozračje in vsa biosfera pomenita »... *le majhen dodatek k mnogo večjim zalogam v oceanih*...« (Warneck 1988). Z biološko-kemičnimi procesi vsrkajo oceani ogromno količino CO₂. Vsako leto si z ozračjem izmenjajo več kot 90 Gt ogljika. Za primerjavo: skupne emisije zaradi kurjenja fosilnih goriv in izkrčenega tropskega gozda dosegajo 7 Gt ogljika na leto (Warneck 1988; Hough ton 2002). McPhaden in Zhang (2002) opozarjata na možno posredno negativno povezavo med temperaturo in količino CO₂ v ozračju. Pravita namreč takole: »... *upočasneni oceanski tokovi pomenijo tudi šibkejšo dviganje hladne vode iz globin, to pa povzroča hkrati višjo temperaturo površine oceanov in hkrati manjši transport CO₂ iz globin oceanov v ozračje*...«.

Nenadne močne klimatske spremembe v zgodovini Zemlje nekateri povezujejo tudi s prelomnimi, kataklizmičnimi dogodki. Na primer za izumrtje številnih rastlinskih in živalskih vrst pred okrog 250 milijoni let in za izumrtje dinozavrov pred 65 milijoni let bi bil lahko vzrok tudi trk kakega asteroida z Zemljo (Basi s sodelavci 2003). Drugi ta izumrtja razlagajo tudi drugače, na primer z močno vulkansko aktivnostjo.

Za sodobno dogajanje lahko z veliko zanesljivostjo trdimo:

- da je povečanje količin toplogrednih plinov v ozračju v zadnjih dveh stoletjih povzročilo človeštvo s kurjenjem fosilnih goriv,
- da je bilo to povečanje zelo hitro: v dveh stoletjih se je količina ogljikovega dioksida v ozračju povečala za tretjino,
- da se je temperatura pri tleh na Zemlji v tem času zvišala skoraj za stopinjo, verjetno zaradi povečane koncentracije toplogrednih plinov v ozračju.

Za dogajanja v geoloških dobah so možne razne razlage, kaj so bili vzroki in kaj posledice. Kaže, da je količina toplogrednih plinov v ozračju stalno kolebala, vendar počasneje, kot v zadnjih dveh stoletjih. Na Zemlji, vsaj odkar ima ozračje in klimo v današnjem smislu teh pojmov, so bila dogajanja večinoma bolj počasna, razen ob omenjenih kataklizmičnih dogodkih. O vzrokih in posledicah v teh starih obdobjih še ne vemo dovolj, da bi bile naše trditve neizpodbitne.

5 Sklep

Na podnebje Zemlje kot celote vpliva njena energijska bilanca z vesoljem, na podnebje posameznih predelov pa še mnogi drugi dejavniki. Milanković je ugotovil, da astronomsko povzročene spremembe dotoka sončne energije pojasnjujejo periodične spremembe podnebja in pojavljanje ledenih dob. Njegove domneve so potrdili podatki iz globokih vrtin skozi kilometre polarnega ledu, ki so za zadnjih 400.000 let pokazali usklajenost med astronomskimi dejavniki, prevladujočo temperaturo na Zemlji in količino nekaterih toplogrednih plinov v ozračju. Kljub temu ni mogoče z gotovostjo trditi, kaj je bilo v geološki klimatski zgodovini vzrok in kaj posledica. Součinkovanja med vzroki in posledicami so namreč tako zapletena, da za dokončne odgovore še ne vemo dovolj.

6 Viri in literatura

ASU 1996: Arizona State University, Departments of Geography & Computer Science. <http://www.ldeo.columbia.edu/edu/dees/ees/climate/slides/milan16a.gif>

Basu, A. R., Petaev, M. I., Poreda, R. J., Jacobsen S. B., Becker, L. 2003: Chondritic meteorite fragments associated with the Permian-Triassic boundary in Antarctica. *Science* 302.

- Caillon, N., Severinghaus, J. P., Jouzel, J., Barnola, J. M., Kang, J. C., Lipenkov, V. Y. 2003: Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across termination III. *Science* 299.
- Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D., Deck, B. 1999: Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Science* 283.
- GNIP 2004: GNIP Maps and Animations. <http://isohis.iaea.org/userupdate/Waterloo/index.html>
- Lynch-Stieglitz, J., Curry, W. B., Slowey, N. 1999: Weaker Gulf Stream in the Florida Straits during the Last Glacial Maximum. *Nature* 402.
- McPhaden, M. J., Zhang, D. X. 2002: Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature* 415.
- Milanković, M. 1941: Kanon der Erbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrad.
- NSSDC 2004, NASA Goddard Space Flight Center. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photogallery-earth.html
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delayque, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M. 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399. (podatki o ¹⁸O na http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok_isotope.html)
- Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000: Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Matematika–fizika 39). Ljubljana.
- Rind, D., Russell, G., Schmidt, G., Sheth, S., Collins, D., deMenocal, P in Teller, J, 2001b: Effects of glacial meltwater in the GISS coupled atmosphere-ocean model 2. A bipolar seesaw in Atlantic Deep Water production. *Journal of geophysics* 106. Berlin, Heidelberg.
- Rind, D., deMenocal, P., Russell, G., Sheth, S., Collins, D., Schmidt, G., Teller, J. 2001a: Effects of glacial meltwater in the GISS coupled atmosphere-ocean model 1. North Atlantic Deep Water response. *Journal of geophysics* 106. Berlin, Heidelberg.
- Stocker, T. F., Schmittner, A. 1997. Influence of carbon dioxide emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature* 388.

7 Summary: Causes of climate change

(translated by the author)

Energy balance of the Earth and Space influences on Earth climate are taken into consideration. Milankovic's findings from 1940 that orbital cycles and ice ages appearances are well correlated with isotopic structure of the ice in deep cores which enable researchers to speculate on the over the last 400,000 years were recently verified by analyzing samples from deep wells in the polar ice. Complicated interrelations between greenhouse gases concentrations and planet temperatures do not allow firm conclusions on past climate conditions. It is a hard task to find out what in geological climatic history of our planet a cause and what a consequence of climatic changes was. But there is certain that temperatures and concentration of greenhouse gases on the Earth are in significant correlation.

