



Univerza v Mariboru

Filozofska fakulteta

Oddelek za geografijo

Igor Žiberna

# Antropogene podnebne spremembe

1. del

Naravni vzroki za spreminjanje podnebja na Zemlji

1. izdaja



Maribor 2021

Igor Žiberna

Antropogene podnebne spremembe. 1. del Naravni vzroki za spreminjanje podnebja na Zemlji  
1. izdaja.

Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Mariboru.

Študijsko gradivo je namenjeno študentom kot pripomoček pri predmetu Antropogene podnebne spremembe

## KAZALO

Poglavje	Stran
Uvod	5
1. Zgodovinski razvoj preučevanja podnebnih sprememb	5
2. Naravni vzroki za spreminjanje podnebja	13
2.1 Astronomski vzroki za naravno spreminjanje podnebja	14
2.1.1 Milankovičevi cikli	14
2.1.2 Spreminjanje Sončeve aktivnosti	20
2.1.3 Padci teles na Zemljo	26
2.2 Atmosferski vzroki za naravno spreminjanje podnebja	36
2.3 Zemeljski (terestrični) vzroki za naravno spreminjanje podnebja	44



## Uvod

Podnebje na našem planetu se je spreminjalo že vse od nastanka Zemlje in pojava Zemljine atmosfere. Mehanizem vzrokov za naravne spremembe podnebja na Zemlji je zelo zapleten in ga še ne razmemo v celoti. Intenzivnejše podnebne spremembe, ki smo jim priča vse od 19. stoletja naprej in ki so se intenzivirale v zadnjih desetletjih, niso le rezultat delovanja človeka, pač pa so tudi posledica naravnih vzrokov, le njihova teža se je-če jo primerjamo z antropogenimi dejavniki-relativno (ne pa absolutno) zmanjšala. Sodobne podnebne spremembe so bistveno hitrejše in intenzivnejše od večine tistih, ki so se odvijale v geološki zgodovini Zemlje, vzrok zanje pa v čedalje večji meri tiči v različnih oblikah človekove dejavnosti. Da bi bolje razumeli celoten sistem podnebnih sprememb na Zemlji in pomen človeka pri tem, se je za uvod najprej potrebno seznaniti s celotnim spektrom naravnih vzrokov za podnebne spremembe na Zemlji. Temu je namenjen 1. del študijskega gradiva Antropogene podnebne spremembe - Naravni vzroki za spreminjanje podnebja na Zemlji, ki se bo uporabljalo pri predmetu Antropogene podnebne spremembe na Oddelku za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Mariboru.

### 1. Zgodovinski razvoj preučevanja podnebnih sprememb

Ugotovitev, da človek spreminja lokalno podnebje, predvsem na območjih večje zgoščitve prebivalstva v mestih, je stara skoraj toliko kot mesto samo. Že **Horac** in **Seneka** sta v prvem stoletju pr.n.št. ugotavljala, da je ozračje v Rimu drugačno od tistega v sosesčini.

V srednjem veku je London postal sinonim za mesto, v katerem je zrak onesnažen. Prvi ukrep o omejitvi kurjenja premoga so sprejeli že leta 1273. Kraljica Elizabeta I. je v 16.stol. pogosto prepovedovala kurjenje premoga v Londonu v času zasedanja parlamenta.

1818 je izšla prva monografija o mestni klimi, v kateri je **Luke Howard** obravnaval predvsem vidne ali zaznavne vplive urbanizacije na ozračje v mestu. Ugotovil je tudi nastanek toplotnega otoka v mestih in bistveno spremenjene vrednosti meteoroloških parametrov v primerjavi s tistimi na podeželju.

**Emilien Renou** je leta 1855 izdal monografijo, v kateri je podnebne razlike med Parizom in okolico podkrepil z meritvami in pri tem ugotovil, da je bila temperatura zraka v Parizu za okoli 1°C višja od temperature zraka v okolici. Število monografskih študij mestne klime se je konec 19.stol. povečalo.

Bolj sistematične raziskave mestne klime pa so se pojavile šele na začetku 20.stol. **Wilhelm Schmidt** je v leta 1917 objavljeni razpravi analiziral vzroke nastanka mestne klime in njene značilnosti. V dvajsetih letih 20. stol. je na primeru Dunaja kot prvi opravljal mobilne meritve meteoroloških parametrov v mestu. Vse bolj so se pojavljale tudi analize trendov meteoroloških parametrov v mestih, zlasti tam, kjer so razpolagali z daljšimi nizi meteoroloških meritev v mestu.

1824 – Francoski matematik in fizik **Jean Fourier** je ugotovil, da CO<sub>2</sub> vpliva na podnebne značilnosti na Zemlji.

1859 – Irski znanstvenik **John Tyndall** je odkril, da nekateri plini v Zemljini atmosferi nadpovprečno intenzivno absorbirajo dolgovalovno (toplotno) sevanje zemeljskega površja.

1863 – **John Tyndall** odkrije, da je vodna para (H<sub>2</sub>O) eden od pomembnih toplogrednih plinov.

1875 – **James Croll** odkrije povezavo med snežnim pokrovom, albedom in odbojem kratkovalovnega sevanja nazaj v vesolje.

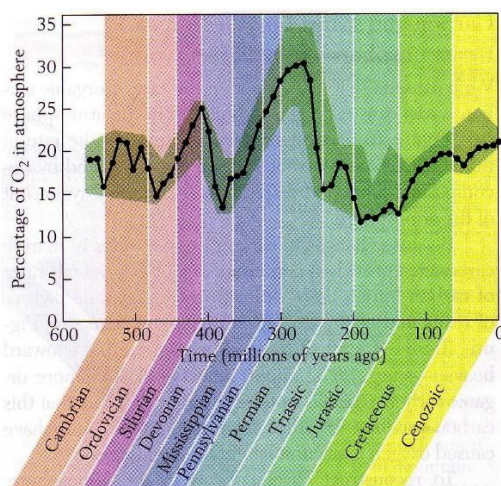
1896 – Švedski znanstvenik in Nobelov nagrajenec **Svante Arrhenius** odkrije **efekt tople grede**. Ob tem eden od prvih napove počasno segrevanje Zemljine atmosfere. Med prvimi kvantitativno dokaže povezavo med človekovimi izpusti CO<sub>2</sub> in globalnim segrevanjem.



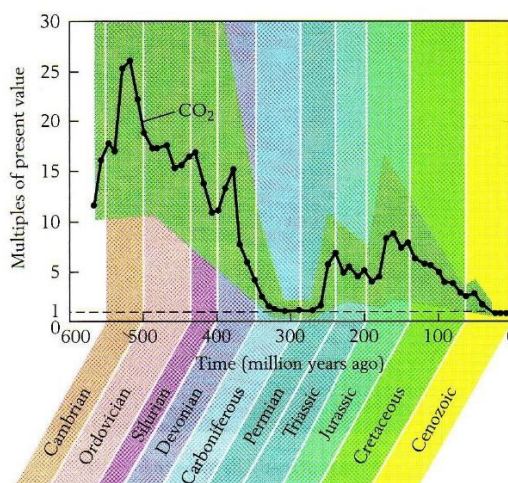
Slika 1 : Svante Arrhenius.

1897 – Britanec **Thomas Chamberlin** odkrije povezavo med pojavom ledenih dob in nihanji koncentracij CO<sub>2</sub> v atmosferi. Ugotovi, da je podnebje v času znižanih koncentracij CO<sub>2</sub> hladnejše in obratno.

O<sub>2</sub>



CO<sub>2</sub>



Slika 2: Vpliv koncentracij CO<sub>2</sub> in O<sub>2</sub> na podnebje na Zemlji. Višje koncentracije CO<sub>2</sub> (desno) povezujemo s toplejšimi obdobji, višje koncentracije O<sub>2</sub> (levo) pa s hladnejšimi obdobji.

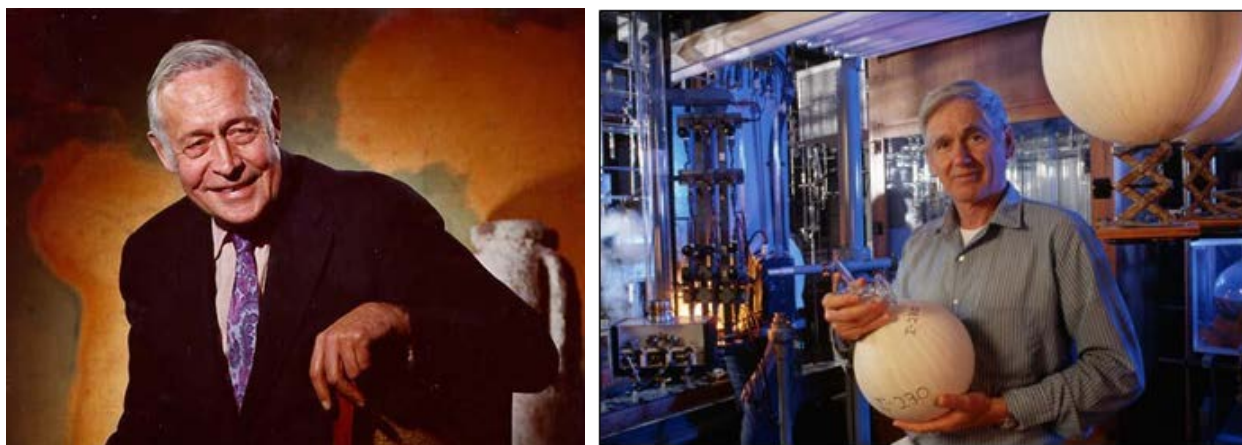
1920 do 1925 – odprejo se črpališča nafte v Perzijskem zalivu in v Texasu. S tem se odpre nova era antropogenih emisij toplogrednih plinov v atmosfero.

1924 – **Alfred Wegener** objavi izhodišča za svojo hipotezo o tektoniki plošč. Dokaže, da so se kontinenti v preteklosti premikali, kar je vplivalo na podnebje na Zemlji in morske tokove.

V obdobju med 1. in 2. svetovno vojno srbski astronom **Milutin Milanković** odkrije, da so spremembe v Zemljini orbiti v preteklosti vplivale na naravno spreminjanje podnebja. Svoje rezultate objavi leta 1941.

1950 – Američan **Charles Brooks** objavi prve informacije o domnevnem taljenju polarnega ledu in to poveže z dvigom gladine svetovnega morja.

1958 – Ameriški kemik **Charles Keeling** začne delovati na Oceanografskem inštitutu, kjer skupaj z **Rogerjem Revellom** pričneta raziskovati povezave med koncentracijami CO<sub>2</sub>, globalnim segrevanjem in morskimi tokovi. Keeling je z meritvami koncentracij CO<sub>2</sub> začel na vulkanu Mauna Loa na Havajih, daleč v stran od antropogenih virov, zato, da bi meritve prikazovale čim bolj objektivno stanje v prosti atmosferi.



Slika 3: Charles Keeling (desno) in Roger Revelle (levo) sta leta 1958 na Havajih začela s prvimi sistematičnimi meritvami koncentracij CO<sub>2</sub>, ki so pokazale, da se le te dvigujejo.

1980 – Izvolitev ameriškega republikanskega predsednika Ronalda Reagana pomeni začetek gibanja zanikovalcev podnebnih sprememb. Spremembe v okolju so po njihovem zgolj naravni ciklusi in nanje človekov potrošniški način življenja in pretirana raba naravnih virov nima pomembnega vpliva.

1984 – Hipoteza o efektu tople grede in globalnem segrevanju vseeno postaja prevladujoče in splošno sprejeto dejstvo.

1987 – Dotlej najtoplejše leto, odkar potekajo meritve na Zemlji. Na podnebni konferenci v Montrealu sprejmejo Montrealski protokol, ki prepoveduje uporabo CFC plinov z namenom zaščite ozonske plasti v stratosferi.

1988 – Pri OZN je ustanovljen Medvladni panel za podnebne spremembe (Intergovernmental panel for Climate Change – IPCC), katerega naloga je poročati o vzrokih, stanju in posledicah podnebnih sprememb ter predlagati reševanje problemov, ki pri tem nastajajo.



1992 – Podnebna konferenca v Riu de Janeiru. ZDA ignorirajo sklepe.

1997 – Na mednarodni podnebni konferenci v Kyotu sprejmejo t.i. “Kyotski protokol”, ki vse države zavezuje k zmanjšanju izpustov CO<sub>2</sub>. Toyota proizvede prvi električni hibridni avtomobil.

2005 – Kyotski protokol kaže prve lokalne učinke.

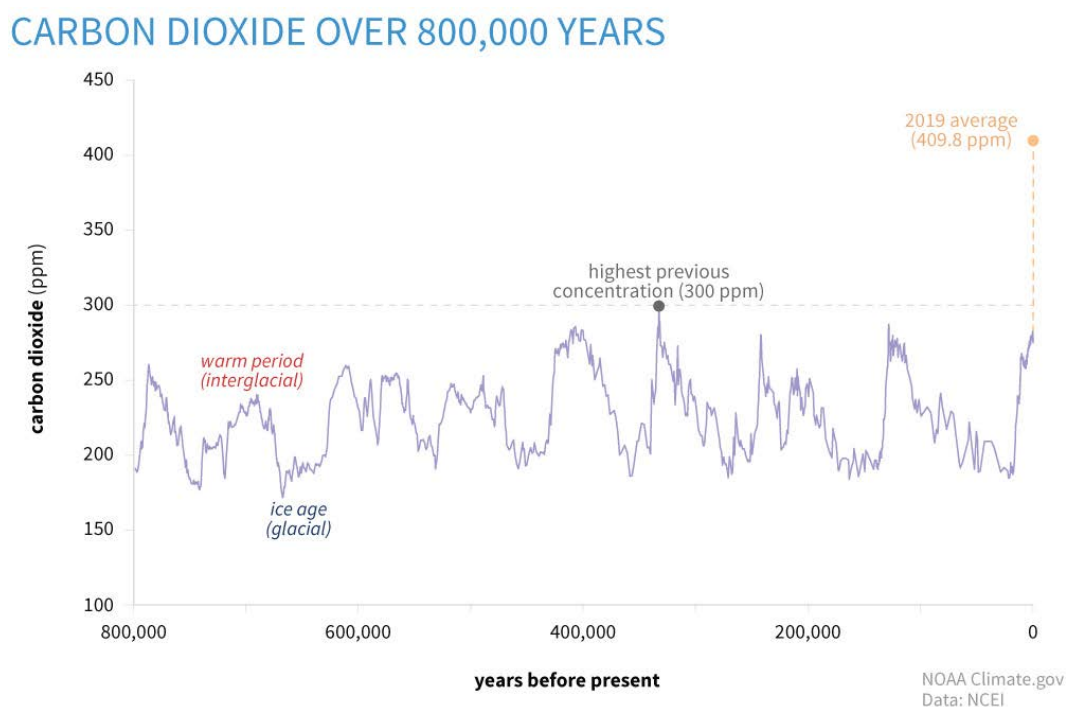
2007 – Četrto poročilo IPCC pokaže, da so vplivi človeka na globalne podnebne spremembe postali očitni. Koncentracija CO<sub>2</sub> v Zemljini atmosferi naraste na 382 ppm.

2007 – Zanikovalci antropogenih vzrokov za podnebne spremembe čedalje glasneje opozarjajo, da se podnebje ne segreva, pač pa da se celo ohlaja.

2011 – Fiziki in klimatologi z univerze v Berkeleyju objavijo v študiji BEST (Berkeley Earth Surface Temperatures) rezultate trendov 40 000 meteoroloških postaj, kar je do danes najbolj obsežna študija temperaturnih trendov. Rezultati so dokazali nedvomno segrevanje Zemlje.

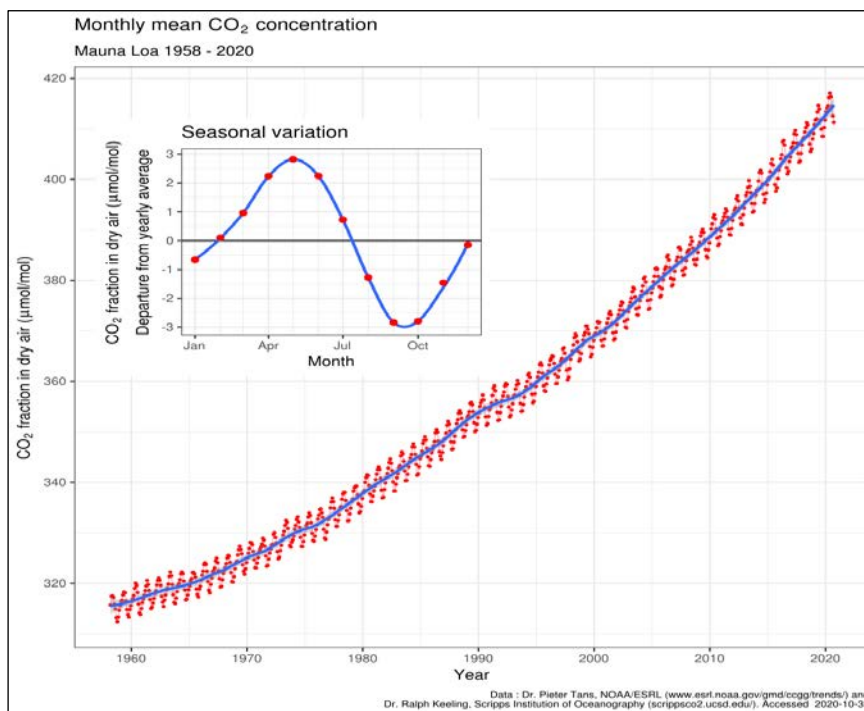
2013 – septembra Medvladni panel za podnebne spremembe pri OZN (IPCC) objavi prvi del petega poročila. Po nekaterih kazalcih so napovedi spreminjanja podnebja za človeka še slabše od tistih v četrtem poročilu.

2015 - prvič v zgodovini meritev povprečne koncentracije CO<sub>2</sub> na našem planetu dosežejo vrednosti 400 ppm.



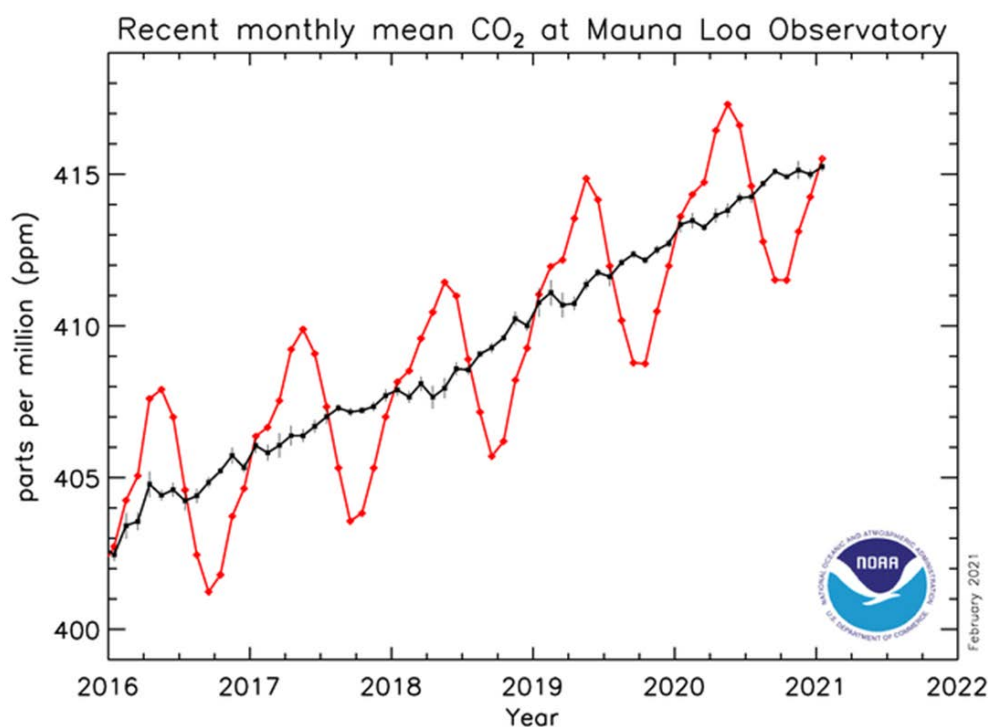
Slika 4: Spreminjanje koncentracij CO<sub>2</sub> v zadnjih 800 000 letih.





Slika 5: Spreminjanje koncentracij CO<sub>2</sub> na observatoriju Mauna Loa na Havajih do januarja 2021. Ali lahko pojasnite vzroke za letni režim koncentracij CO<sub>2</sub> (graf zgoraj levo) ?

Pojasnilo k sezonskim spremembam koncentracij CO<sub>2</sub>: globalne koncentracije CO<sub>2</sub> so najnižje v času poletja na severni poluti in najvišje v času zime na severni poluti (Slika 5).

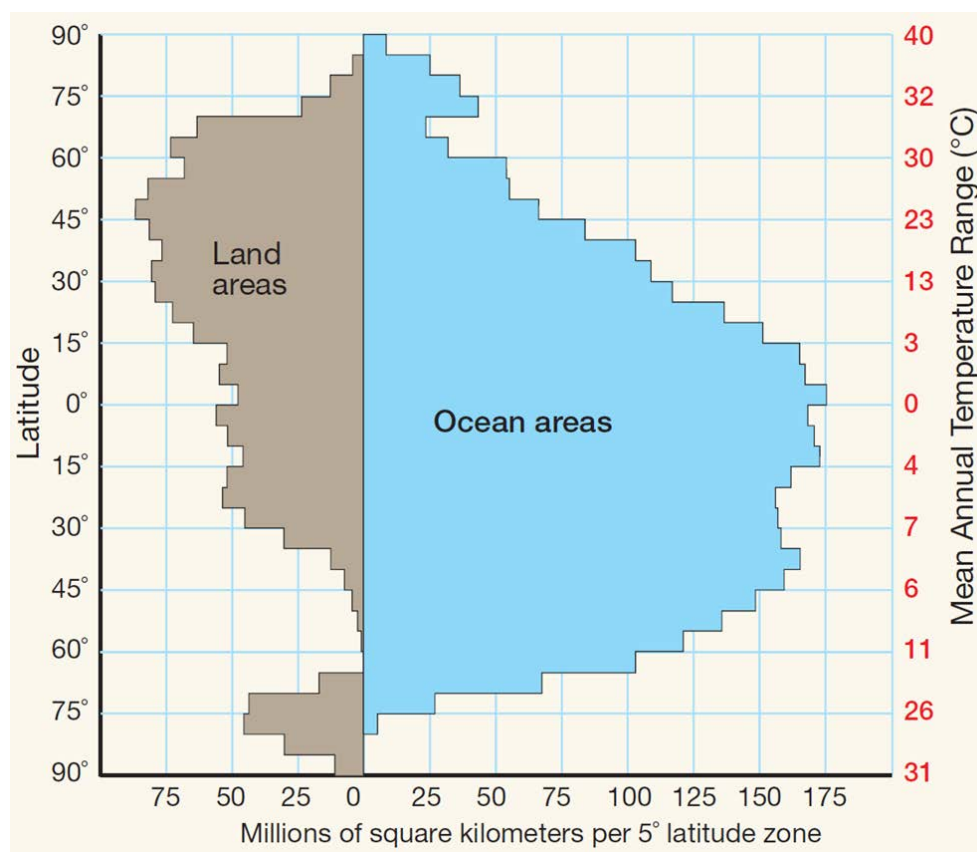


Slika 6: Sezonsko spreminjanje koncentracij CO<sub>2</sub> na observatoriju Mauna Loa na Havajih med leti 2016 in 2021.

Od 510 milj. km<sup>2</sup>, kolikor znaša površina Zemlje je kopnega sveta okoli 29%, morja pa 71%. Vendar pa je ta odnos na obeh polutah zelo neenakomeren. Medtem ko na južni poluti morje pokriva kar 81% površine, pa je ta delež na severni poluti le okoli 61%, na geografskih širinah med 45° in 70° pa celo samo 40%. Na isti geografski širini na južni poluti kopnemu pripada le 5% površja.



Slika 7: Sedanja razporeditev kopnega in morja Na Zemlji. Na severni poluti je delež kopnega sveta višji od deleža morij.

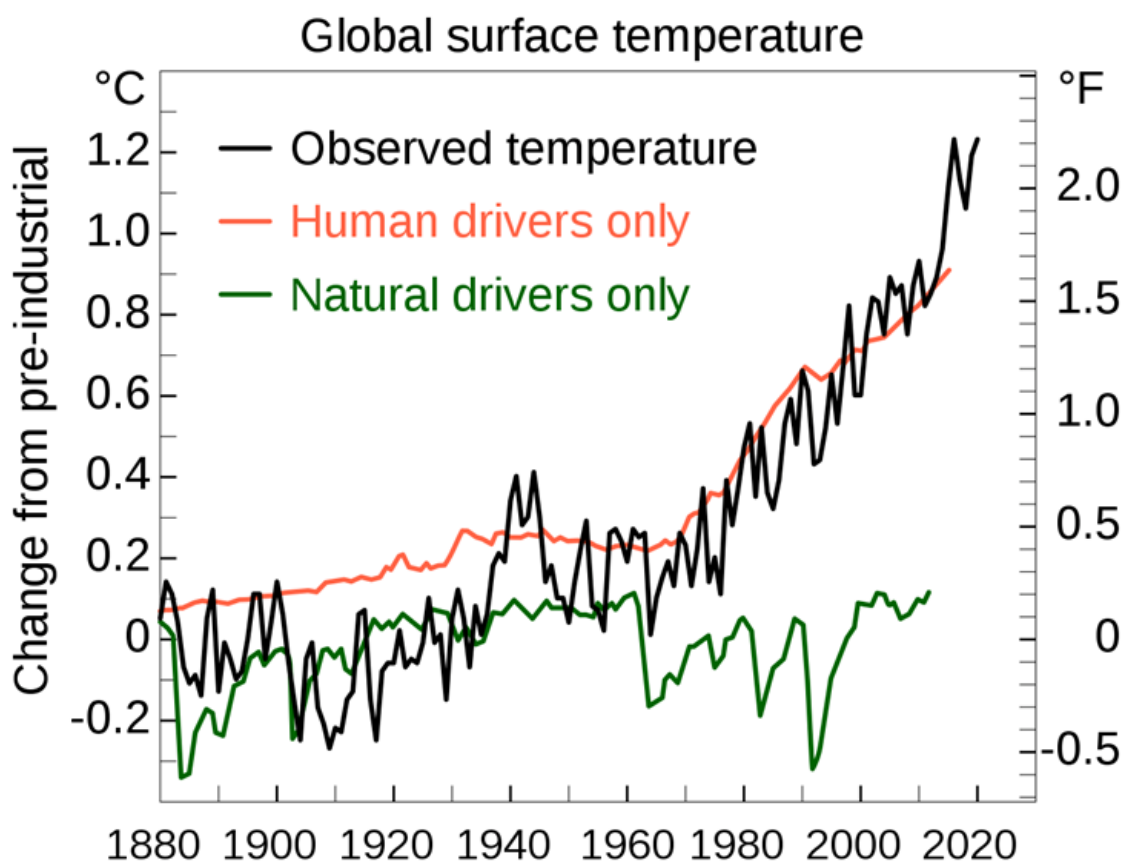


Slika 8: Neenakomerna razporeditev kopnega in morja v odvisnosti od geografske širine: delež kopnega sveta je večji na severni poluti, delež morja pa na južni poluti. To se odraža tudi na temperaturnih razmerah, predvsem na letni temperaturni amplitudi.

Ker se vegetacija, ki v procesu fotosinteze nase veže ogromne količine CO<sub>2</sub> pojavlja pretežno na kopnem in ker je proces fotosinteze intenzivnejši v topli polovici leta (vegetacijska doba), so zaradi višjih ponorov CO<sub>2</sub> v poletjih na severni poluti globalne koncentracije CO<sub>2</sub> najnižje prav takrat

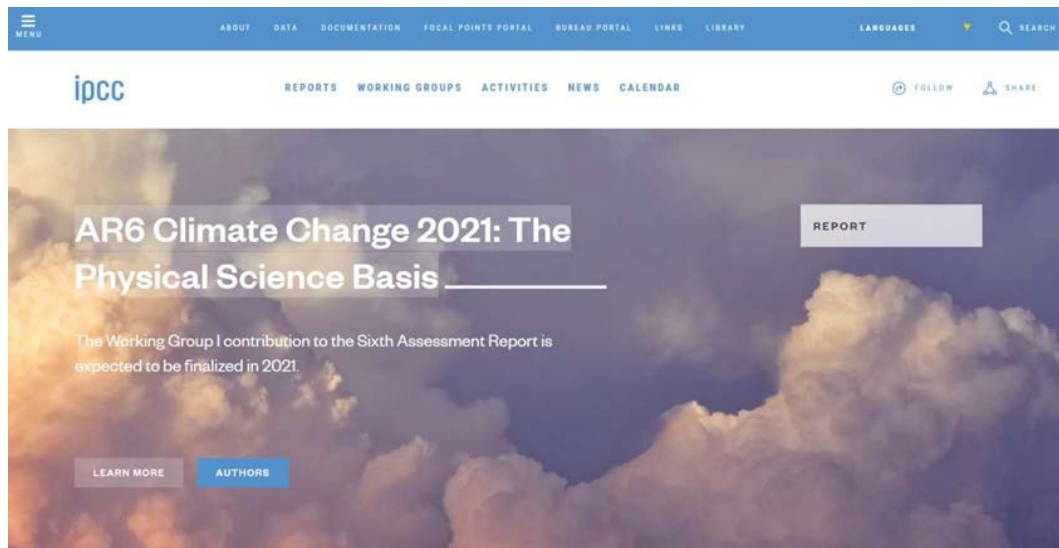
2016 – Leto z najvišjimi povprečnimi temperaturami na planetu, odkar opravljamo meritve. Najtoplejša leta, odkar trajajo meritve na našem planetu so bila: 2016 (za 1,25°C toplejše od povprečne temperature v obdobju 1881-1910), 2020, 2019, 2015, 2017 in 2018.

Januarja 2021 je koncentracija CO<sub>2</sub> na Zemlji znašala 415,24 ppm. 20. februarja 2021 je koncentracija CO<sub>2</sub> na Zemlji znašala 416,46 ppm.



Slika 9: Spremembe globalnih temperature glede na predindustrijsko dobo v odvisnosti od vzrokov (antropogeni, naravni).

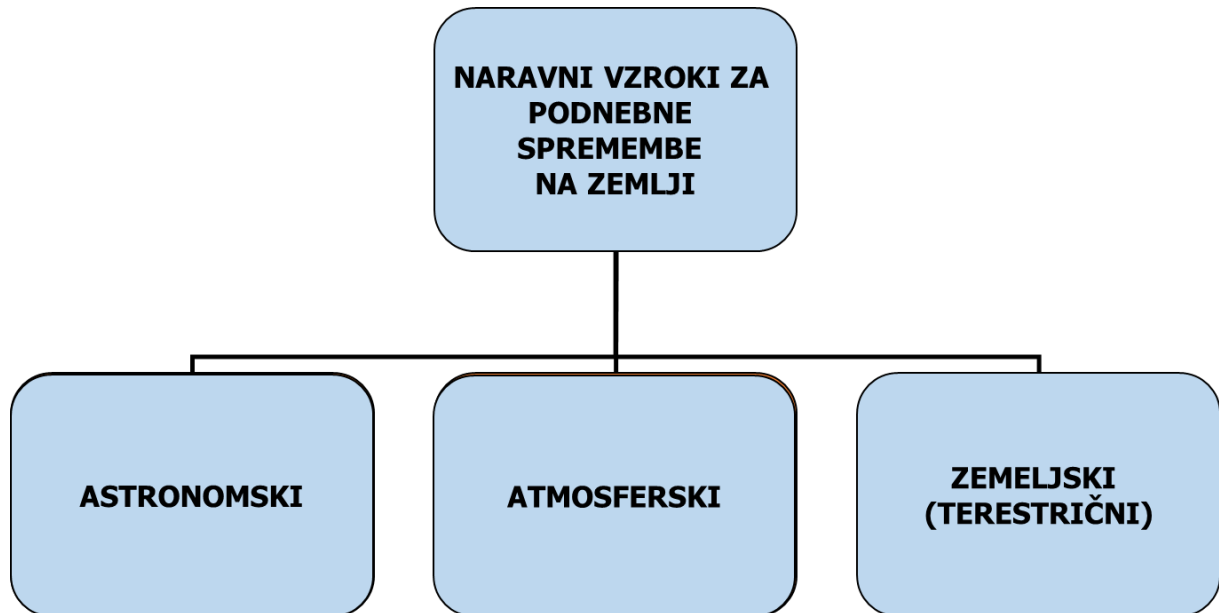
Prvi del šestega poročila Medvladnega panela za podnebne spremembe pri OZN (IPCC) je bil objavljen avgusta 2021. V poročilu je navedeno, da če bi želeli ohraniti dvig globalnih temperatur pod 1,5°C, bi emisije CO<sub>2</sub> morali prepoloviti do leta 2030 in popolnoma odpraviti do sredine 21. stoletja.



Slika 10: Prvi del 6. poročila IPCC je bil objavljen v avgustu 2021.

## 2. Naravni vzroki za spreminjanje podnebja

Podnebje se je spreminjalo že v preteklosti. Naravne vzroke za spreminjanje podnebja v preteklosti in danes bi lahko razdelili v tri velike skupine:

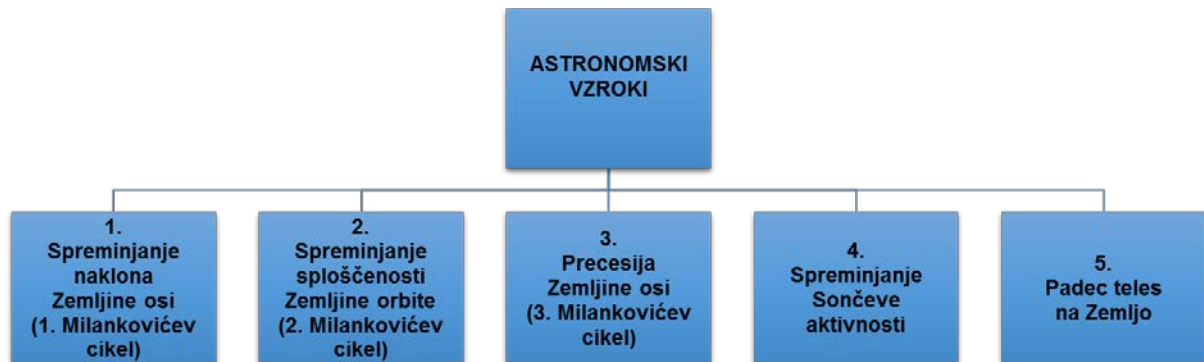


Slika 11: Naravni vzroki za podnebne spremembe na Zemlji.

Astronomski vzroki imajo svoji izvor zunaj Zemlje in se navezujejo na spreminjanje značilnosti gibanja Zemlje, spreminjanje Sončeve aktivnosti, trke Zemlje z drugimi telesi itd. Atmosferski vzroki so povezani s spremembami kemičnih in fizikalnih lastnosti atmosfere (delež toplogrednih plinov, koncentracije prašnih delcev v različnih plasteh atmosfere itd.). Ker imajo spremembe kemičnih in fizikalnih lastnosti atmosfere praviloma svoj končni vzrok na zemeljskem površju, to niso čista oblika naravnih vzrokov, pač pa so v tesni povezavi s tretjo skupino, zemeljskimi ali terestričnimi vzroki. Ti so povezani z razporeditvijo celin, razmerjem med morjem in kopnim, morskimi tokovi, gibanji zračnih mas itd.

## 2.1 Astronomski vzroki za naravno spreminjanje podnebja

Astronomskih vzrokov za naravne spremembe podnebja na Zemlji je več, med najpomembnejše sodijo naslednje:



Slika 12: Najpomembnejši astronomski vzroki za podnebne spremembe na Zemlji.

### 2.1.1 Milankovičevi cikli

O astronomskih vzrokih, ki so povezani z značilnostmi gibanja Zemlje je prvi spregovoril srbski astronom Milutin Milanković v delu "Canon of Insolation of the Earth and Its Application to the Problem of the Ice Age", ki je izšlo leta 1941. Astronomske vzroke, ki se periodično ponavljajo zato imenujemo "Milankovičevi cikli".

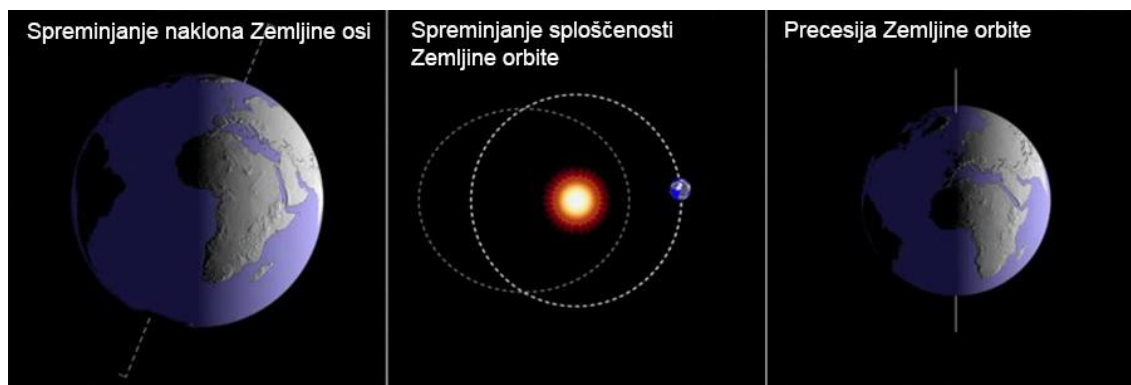


Slika 13: Milutin Milanković (1879-1958), srbski matematik, astronom in klimatolog.



Milanković je s povezovanjem paleoklimatskih podatkov in periodičnimi spremembami značilnosti gibanja Zemlje pojasnil vzroke za obdobja z visokimi temperaturami in pojavi ledenih dob na Zemlji. Ugotovil je, da na dolgodobne podnebne spremembe vplivajo predvsem:

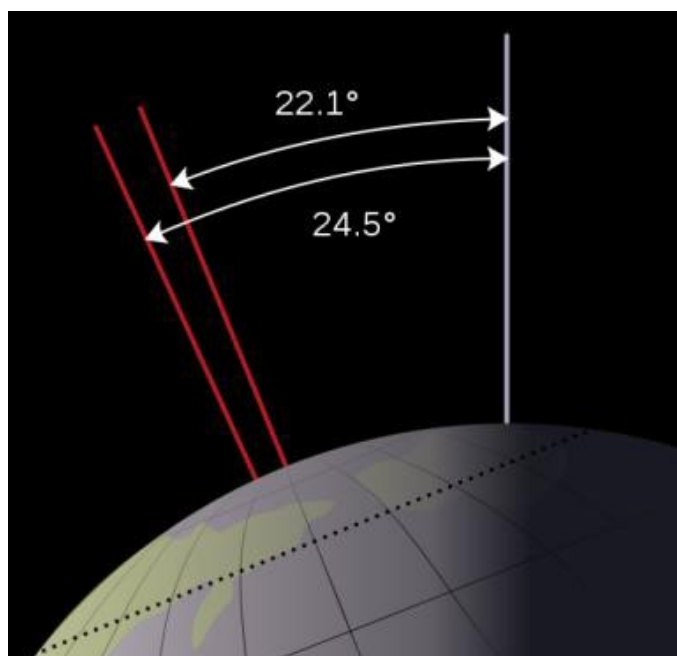
- spreminjanje naklona Zemljine osi
- spreminjanje sploščenosti Zemljine orbite okoli Sonca
- pojav precesije Zemljine osi.



Slika 14: Trije Milankovičevi cikli vplivajo na dolgodobne podnebne spremembe na Zemlji.

#### 1. Milankovičev cikel: Spreminjanje naklona Zemljine osi

Zemljina os niha med  $22,1^\circ$  in  $24,5^\circ$  glede na pravokotnico na ekliptiko. Spreminjanje naklona Zemljine osi vpliva na vpadni kot Sončevih žarkov in s tem na nihanje prejete količine Sončevega obsevanja na Zemlji. V primeru, da bi bila Zemljina os pravokotna na ekliptiko, se vpadni kot Sončevih žarkov med letom ne bi spreminjal. Temperaturna nihanja med letom bi bila precej manjša.



Slika 15: Spreminjanje naklona Zemljine osi vpliva na spremembe vpadnih kotov Sončevih žarkov med letom in posledično na energijsko bilanco planeta.



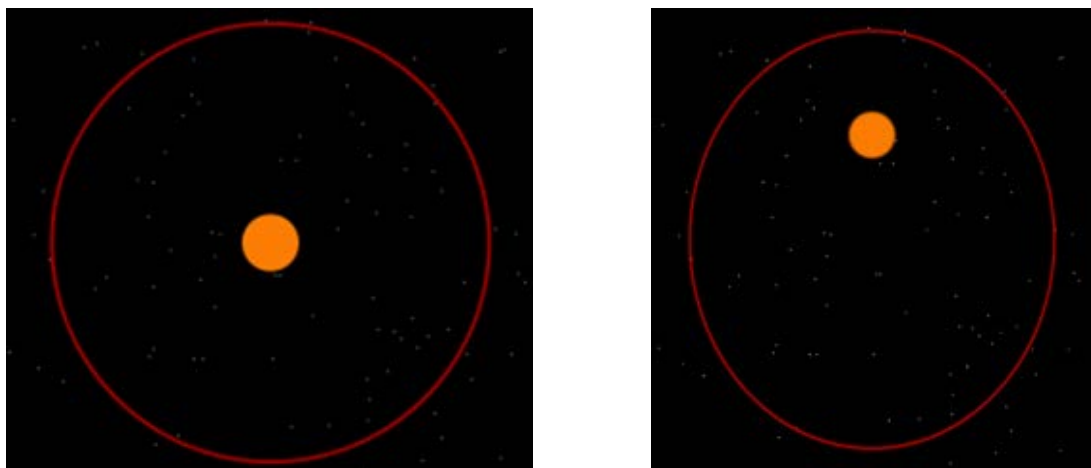
Večji naklon Zemljine osi glede na ekliptiko pa obratno poveča nihanja v vpadnem kotu Sončevih žarkov, kar za svojo posledico povzroča večja nihanja absorbiranega kratkovalovnega sevanja na zemeljskem površju in s tem povečana letna temperaturna nihanja.

Perioda nihanja naklona Zemljine osi znaša 41 000 let. Trenutno se nahajamo v srednjem položaju ( $23,44^\circ$ ) med obema skrajnostima in sicer v fazi zmanjševanja naklona. Po predvidevanjih bi naj minimalni naklon dosegli čez okoli 8000 let.

Obdobja z manjšim naklonom Zemljine osi povezujemo s pojavom ledenih dob, saj se takrat led na polih tali manj intenzivno.

## 2. Milankovičev cikel: Spreminjanje sploščenosti Zemljine orbite

Spreminjanje sploščenosti Zemljine orbite vpliva na spreminjanje razdalje Zemlje od Sonca v času enega leta. Ko je Zemljina orbita malo sploščena oziroma skoraj okrogla (Slika 16 levo), se količina prejete energije s Sonca med letom zelo malo spreminja, razlika med perihelijem in afelijem je zanemarljiva. V primeru največje sploščenosti Zemljine orbite se razlika med prejeta količina Sončevega obsevanja poveča, saj je razlika med perihelijem in afelijem največja (Slika 16 desno).



Slika 16: Spreminjanje sploščenosti Zemljine orbite vpliva na letno spreminjanje razdalje med Soncem in Zemljo in spreminjanje količine prejete energije, s tem pa posledično na letni režim energijske balance Zemlje.

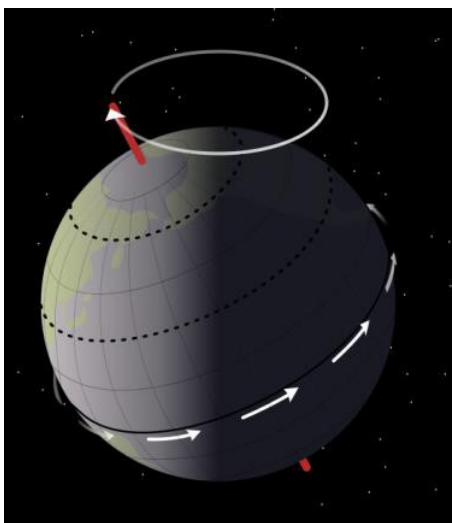
Perioda spreminjanja sploščenosti Zemljine orbite je okoli 100 000 let. V času največje ekscentričnosti letne razlike v Sončevem obsevanju na račun velike razlike v oddaljenosti od Sonca narastejo. Če je v času perihelija na ustrezni poluti poletje in v času afelija zima, se letne razlike v Sončevem obsevanju še dodatno povečajo.

Sploščenost Zemljine orbite niha med 0,058 in 0,005. Trenutno je sploščenost Zemljine orbite 0,017 (in je v fazi večanja), zato znašajo razlike v Sončevem obsevanju med perihelijem in afelijem nekaj odstotkov.

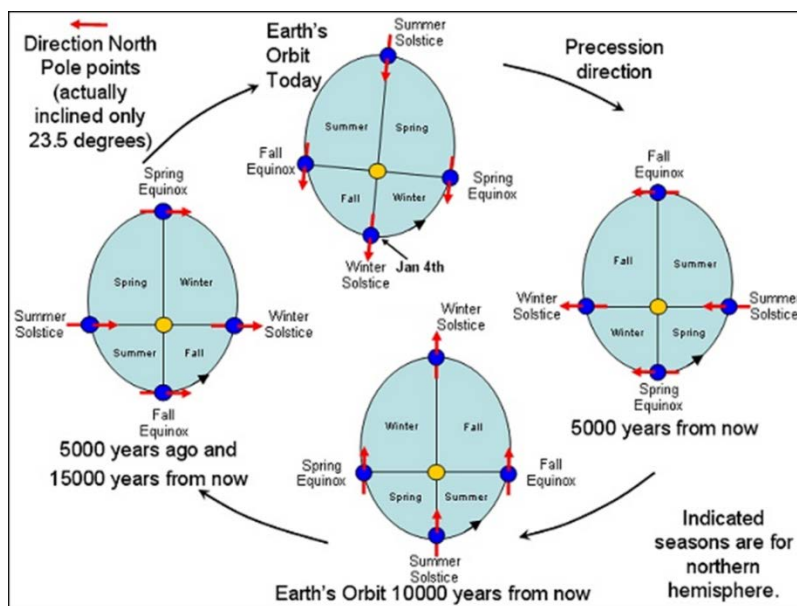
### 3. Milankovičev cikel: Precesija Zemljine osi

Precesija (opletanje) Zemljine osi v prostoru v obliki stožca se pojavlja zaradi gravitacijskega delovanja Sonca in Lune. Zaradi precesije se spreminjajo časi nastopa letnih časov. Zaradi 2. Keplerjevega zakona so letni časi neenakomerno dolgi. Trenutno jesen in zima na severni poluti trajata dobrih 89 dni, pomlad dobrih 93 dni in poletje dobrih 92 dni. Topla polovica leta je zato daljša od hladne polovice.

Perioda precesije Zemljine osi je 26 000 let. Trenutno se višek poletja na severni poluti pojavlja v mesecih julij in avgust. Zaradi precesije se bo čez 13 000 let poletje na severni poluti pojavljalo v januarju in februarju. Jesen in zima bosta takrat na severni poluti nekoliko daljši in zato hladnejši, poletja pa krajša in prav tako hladnejša.

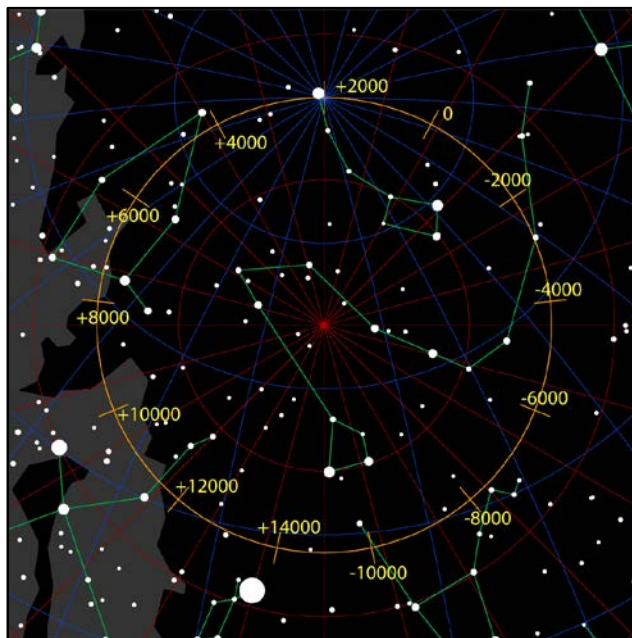


Slika 17: Precesija Zemljine osi vpliva na začetke pojavljanja letnih časov, kar predvsem v povezavi z 2. Milankovičevim ciklom vpliva na podnebne značilnosti letnih časov.



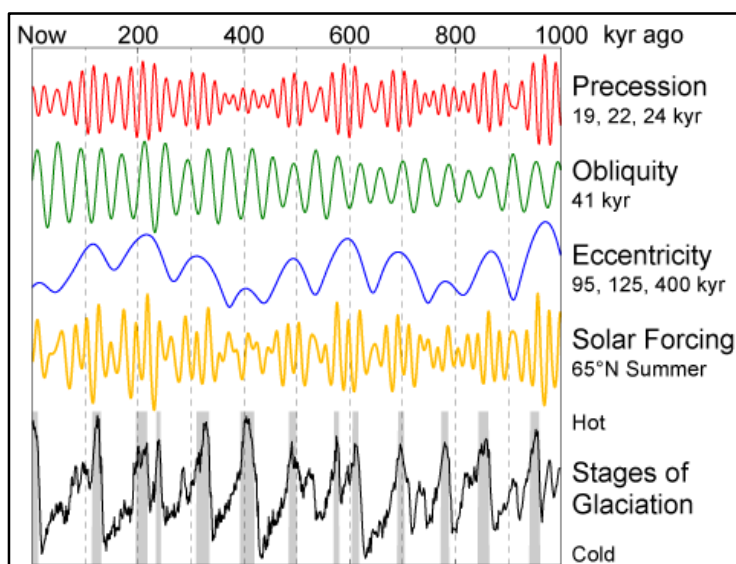
Slika 18: Spremembe začetka letnih časov kot posledica precesije pomladišča.

Ena od posledic precesije Zemljine osi, ki pa ne vpliva na naravne podnebne spremembe, pač pa bolj na orientacijo na nebu je tudi spreminjanje severnega nebesnega pola (Slika 19). Severni nebesni pol se trenutno nahaja okoli  $1^\circ$  vstran od najsvetlejše zvezde v ozvezdju Malega medveda (Severnica). Čez 12 000 let se bo severni nebesni pol nahajal blizu najsvetlejše zvezde v ozvezdju Lire (Vega).



Slika 19: Spreminjanje severnega nebesnega pola kot posledica precesije Zemljine osi.

Če poiščemo presek vseh treh period astronomskih vzrokov se pojavi jasna povezava med astronomskimi vzroki in ledenimi dobami v preteklosti.



Slika 20: Vpliv treh Milankovičevih ciklov in sprememb Sončeve aktivnosti na pojav ledenih dob na Zemlji.

Kakšne so povezave med aktualnimi podnebnimi spremembami v 19. in 20. stoletju ter Milankovičevimi cikli?

Najprej moramo ugotoviti, da so podnebne spremembe zaradi Milankovičevih ciklusov dolgodobne, medtem ko so sedanje podnebne spremembe kratke in intenzivne. V najkrajšem Milankovičevem ciklusu s periodo 26000 let temperatura narašča in pada s **trendom 0,025°C/100 let**.

Temperaturni trendi zadnjih 60 let znašajo **0,1°C/desetletje**, od 80. let 20. stoletja pa celo **0,2°C/desetletje**.

Temperature se torej v zadnjem obdobju spreminjajo **80 krat hitreje**, kot bi se, če bi nanje delovali astronomski vplivi zaradi Milankovičevega ciklusa.

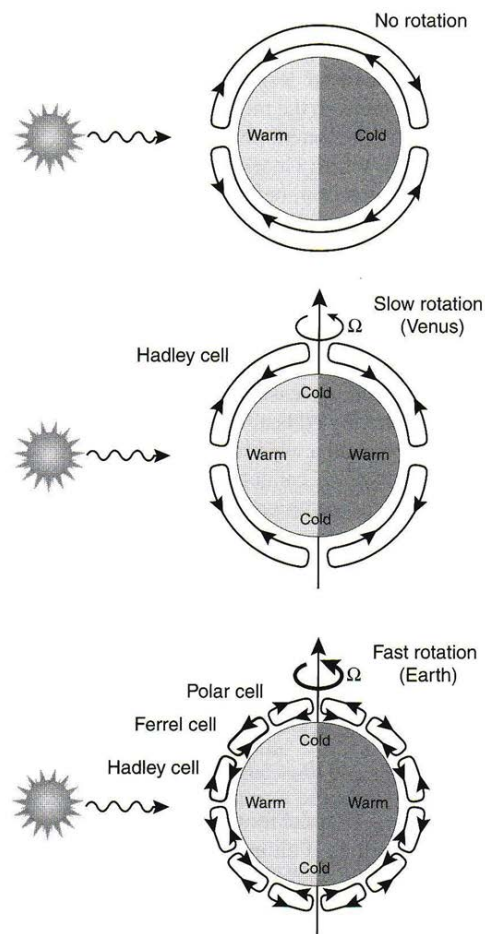
Sovpadanje vseh treh Milankovičevih ciklusov bi pomenilo nihanje temperature zraka na Zemlji za okoli 5°C, seveda v dosti daljših časovnih obdobjih.

Trenutna faza Milankovičevih ciklusov povzroča relativno visoke temperature na Zemlji. To stanje naj bi trajalo še nekaj tisočletij, nakar bi naj temperatura zraka začela padati, kar bo najverjetneje predstavljalo prehod v naslednjo ledeno dobo, če seveda ne bo prišlo do drugih modifikatorskih vplivov.

Med astronomske dejavnike bi lahko šteli tudi hitrost Zemljinega vrtenja okoli svoje osi. To je dovolj hitro, da se pojavlja odklonska ali Coriolisova sila, ki na Zemlji v sistemu globalne cirkulacije zraka oblikuje tri velike celice. V primerih manjših hitrosti vrtenja bi bil sistem globalne cirkulacije atmosfere poenostavljen, podoben tistemu na Veneri. Hitrejše vrtenje Zemlje okoli svoje osi bi cirkulacijski sistem naredilo bolj zapleten, podoben tistemu na Jupitru (Slika 22). Na planetu Jupiter, ki se okoli svoje osi zavrti enkrat v 10 urah, je cirkulacijski sistem še bolj razdrobljen in zapleten od tistega na Zemlji (Slika 21).



Slika 21: Jupiter se okoli svoje osi zavrti v slabih 10 urah, zaradi tega je cirkulacijski sistem bolj zapleten od tistega na Zemlji. Na Jupitru na vsaki poluti poznamo tri ekvatorialne, dva zmernotopla in en polarni pas.



Slika 22: Vpliv hitrosti rotacije telesa vpliva na število cirkulacijskih pasov v njegovi atmosferi: hitrejša rotacija pomeni več pasov.

### 2.1.2 Spreminjanje Sončeve aktivnosti

Spremembe Sončeve aktivnosti dodatno modificirajo količino izseva in Sončevo obsevanje na Zemeljskem površju. Sončeva aktivnost niha z 11 letnim ciklom. V letu 2008 in na prehodu iz leta 2019 v 2020 smo se nahajali v minimumu Sončeve aktivnosti, sedaj pa smo že v fazi višanja Sončeve aktivnosti, ki bo naslednji maksimum najbrž doseglo poleti leta 2025.

Zaradi spreminjanja Sončeve aktivnosti se Solarna konstanta (količina Sončevega obsevanja na vrhu atmosfere pri pogoju, da padajo Sončevi žarki pravokotno in v povprečju znaša  $1367 \text{ W/m}^2$ ) spreminja v razponu  $1,5 \text{ W/m}^2$ . Za primerjavo naj omenimo, da znaša učinek efekta tople grede na celotno energijsko bilanco  $2,45 \text{ W/m}^2$ .



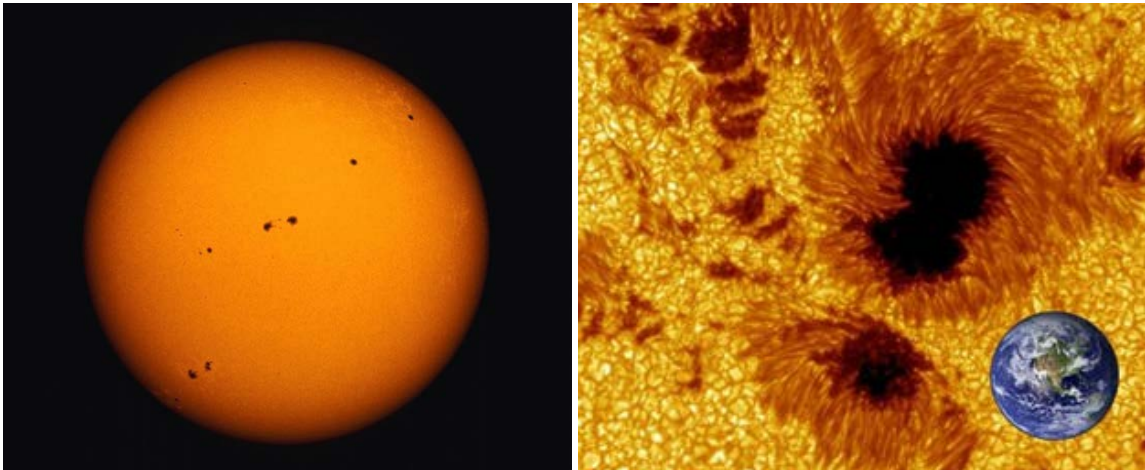
Sončeva aktivnost se navzven manifestira v številu Sončevih peg (več peg pomeni večjo aktivnost). Merimo jo z Wolfvim številom, ki ga izračunamo po formuli:

$$W = k(10s + p)$$

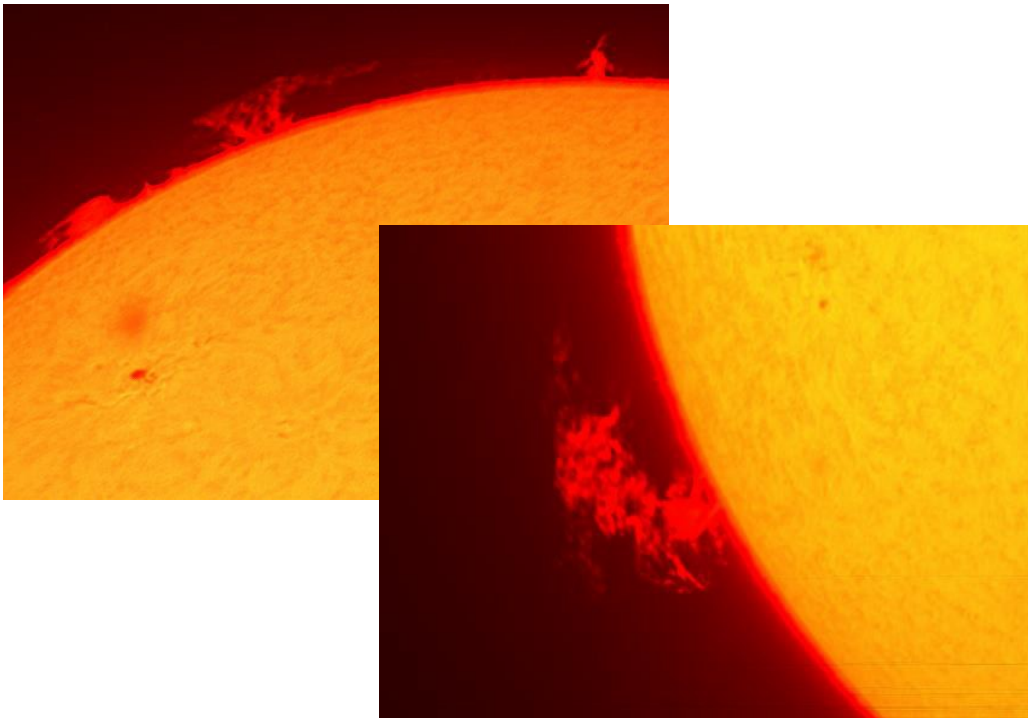
s - število skupin peg,

p - število peg

k - koeficient, odvisen od opazovalca in optične naprave.

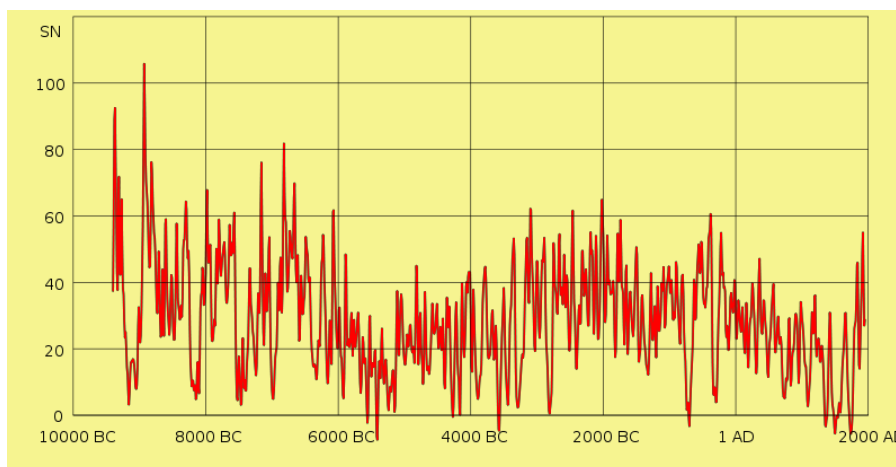


Slika 23: Pege na površju Sonca so rezultat aktivnejšega dogajanja v Soncu in se manifestirajo kot temne in hladnejše površine na površini Sonca (levo). Velikost večjih peg lahko presega velikost Zemlje (desno).



Slika 24: V času večje aktivnosti Sonca so pogostejši tudi izbruhi plazme (protuberance), ki jih lahko opazujemo skozi posebne  $H\alpha$ . To so tudi obdobja, v katerih lahko intenzivnejši curki nabitih delcev s Sonca povzročajo težave na Zemlji (izpad električnega omrežja ipd.).

S pomočjo koncentracij ogljika so skušali rekonstruirati Sončevo aktivnost v zadnjih 11 400 letih. Izkazalo se je, da je trenutna aktivnost Sonca izjemna, saj je bilo Sonce 90 % časa manj aktivno od današnjega stanja.



Slika 25: Spreminjanje aktivnosti Sonca v zadnjih 11 000 letih.

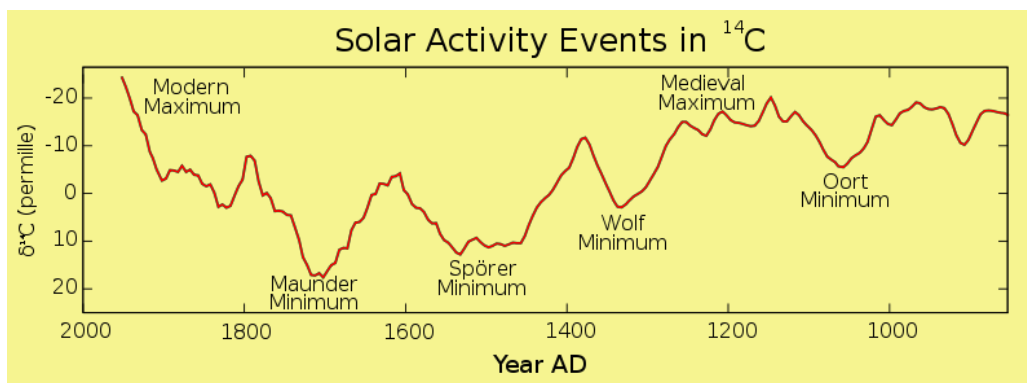
Občasne temne lise na površini Sonca, znane kot Sončeve pege, so opazili že v starodavnih časih. Vendar pa je večina le-teh premajhnih, da bi jih lahko opazovali s prostimi očmi. Šele z izumom teleskopa je bilo mogoče Sončeve pege redno in sistematično opazovati. Sončeve pege so bile reden pojav v začetku 17. stoletja, vendar pa so se kasneje v tem stoletju začele pojavljati bistveno redkeje oziroma so skoraj izginile. To obdobje, ki je trajalo do osemnajstega stoletja imenujemo Maunderjev minimum.

V začetku devetnajstega stoletja so astronomi ugotovili, da se število Sončevih peg povečuje in zmanjšuje v pravilnih periodah, ki trajajo okoli 11 let, pri čemer nekateri cikli trajajo tudi dvanajst let, drugi pa so lahko tudi krajši od 11 let. Sončeve pege nastajajo na območjih intenzivne magnetne aktivnosti v Soncu. Ta aktivna območja so tudi deli, kjer prihaja do velikih eksplozivnih sproščanj energije, kar imenujemo Sončev izbruh. Bolj ko je Sonce aktivno, več Sončevih peg se bo pojavilo na njeni površini. Astronomi so odkrili tudi, da se med vsakim ciklom Sončevo magnetno polje spremeni v primerjavi s prejšnjim ciklom. Tako magnetno polje sledi dvaindvajsetletnemu ciklu, ki ga sestavljata dva enajstletna cikla Sončevih peg.

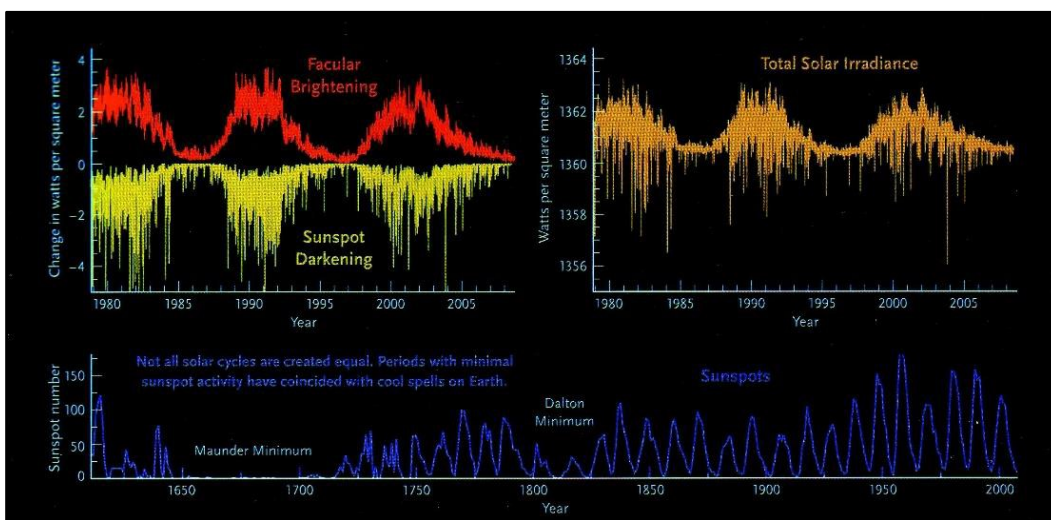
Od začetka sistematičnih opazovanj Sonca in števila Sončevih peg so astronomi ugotovili, da se energija Sonca nekoliko spreminja glede na cikel Sončevih peg. Bolj aktivno je Sonce, več je Sončevih peg, Sončev izsev pa se poveča. Ker je sončna energija glavni vir energije na Zemlji, je tudi eden od najpomembnejših generatorjev zemeljskega podnebja. Spremembe Sončevega izseva so zelo majhne, običajno manjše od 0,1 odstotkov. Majhne spremembe Sončeve aktivnosti kot posledica Sončevih ciklov ne bi smele imeti dolgoročnih vplivov na podnebje. Vendar pa lahko dlje časa trajajoča nižja aktivnost spreminja energijsko bilanco Zemlje. Zgodovinski podatki kažejo, da je med t.i Maunderjevim minimumom v 17. stoletju prišlo do znatnega premika k hladnejšemu podnebju. To obdobje z nižjimi ovprečnimi temperaturami imenujemo mala ledena doba. Izraz "mala ledena doba" različni avtorji uporabljajo različno. Mnogi ga uporabljajo za označevanje ohlajanja podnebja od približno med začetkom 14. stoletja in prvo polovico 19. stoletja, medtem ko ga drugi uporabljajo za obdobje med sredino 16. in sredino 19. stoletja. Večina sončnih astronomov verjame, da sta Maunderjev minimum in mala ledena doba povezana. Podrobne meritve Sončevega izseva segajo le približno pol stoletja nazaj. V tem času časa je bila opažena korelacija med Sončevim izsevom in povprečnim številom



sončnih peg. Zato je smiselno, da je v času Maunderjevega minimuma je bilo Sonce manj aktivno in je bila Zemlja manj obsevana kot običajno, to spremenilo energijsko bilanco Zemlje in povzročilo splošno ohladitev podnebja.

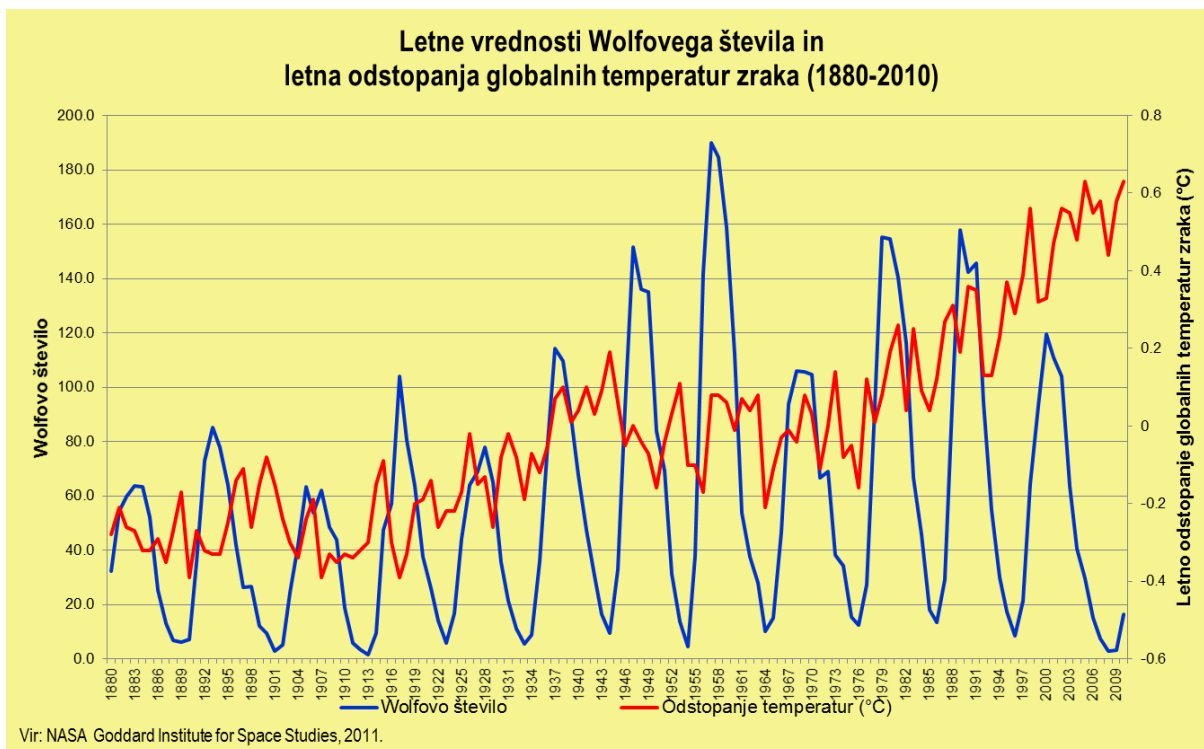


Slika 26: Spreminjanje Sončeve aktivnosti v zadnjem tisočletju. Vplivi Sončeve aktivnosti na podnebje so zanesljivo dokazani v drugem tisočletju, ko nekatere daljše faze z manjšo aktivnostjo Sonca povezujemo s hladnejšimi obdobji. Spoererjev (1450 – 1550), Maunderjev in Daltonov minimum Sončeve aktivnost so najverjetneje odločilni vzroki za t.i. “malo ledeno dobo” v času med 1400 in 1840.



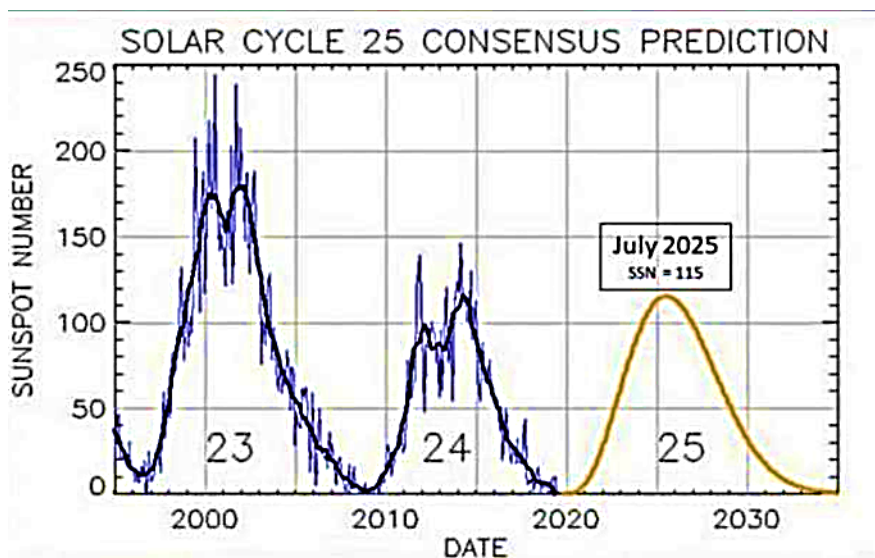
Slika 27: Primerjava Sončeve aktivnosti in odstopanj globalnih temperatur zraka na Zemlji.

V nekaj zadnjih ciklih Sončeva aktivnost pada. To obdobje sovпада z obdobjem naglega višanja globalnih temperature. S sedanjo aktivnostjo Sonca bi torej težko povezali oba pojava. Trenda Wolfovega števila in globalnih temperature kažeta nekakšne škarje: temperature naraščajo, Sončeva aktivnost v maksimumih pa pada (Slika 28).



Slika 28: Primerjava Sončeve aktivnosti in letnega odstopanja globalnih temperatur zraka na Zemlji.

Napovedi prihodnjega, 25. cikla Sončeve aktivnosti, ki bi naj vrhunec dosegel poleti leta 2025 nakazuje, da naslednji cikel ne bo intenzivnejši od predhodnega (Slika 29), na osnovi česar lahko sklepamo, da vpliv sprememb Sončeve aktivnosti na globalne podnebne spremembe ne bo šel v smeri višanja temperature zraka.



Slika 29: 23. in 24. ter napoved 25. cikla Sončeve aktivnosti.

V zgodovini raziskovanja spreminjanja aktivnosti Sonca pa so se nakazovali še drugi cikli Sončeve aktivnosti:

- 22 letni cikel (Halejev cikel)
- 87 letni cikel (Gleissbergov cikel)
- 210 letni cikel (Suessov cikel)
- 2300 letni cikel (hallstattski cikel).

## 2.1.3 Padci teles na Zemljo

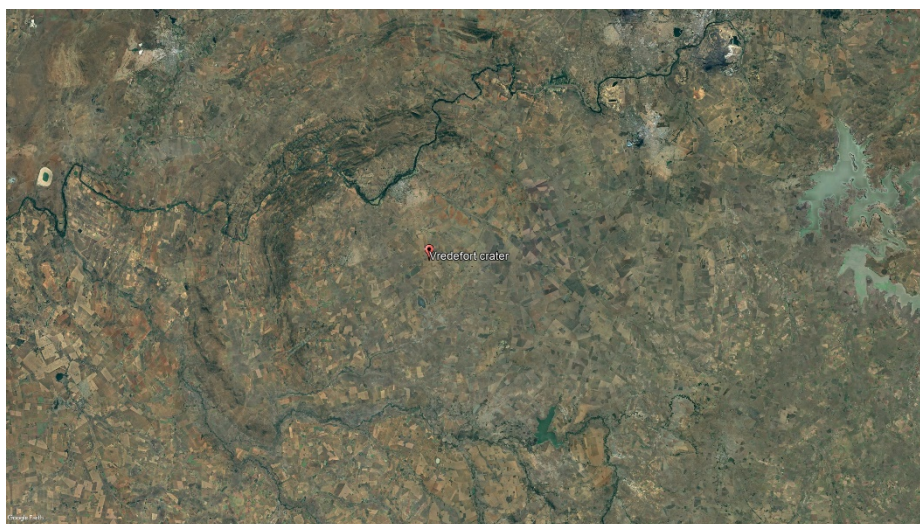
V geološki zgodovini Zemlje je dokazano, da so padci velikih teles na Zemljino površino povzročili tudi spremembe podnebja. Ocenjene povratne dobe padcev teles na Zemljo so naslednje:

- Telesa s premerom med 5 m in 10 m priletijo v Zemljino atmosfero v povprečju en krat letno, vendar tam izhlapijo oziroma razpadejo.
- Telesa s premerom med 50 m in nekaj 100 m padejo na Zemljo v povprečju en krat na 1000 let (npr. eksplozija telesa nad Tungusko v Sibiriji leta 1908).
- Telesa s premerom 1 km padejo na Zemljo vsakih 100 000 let.
- Telesa s premerom 5 km padejo na Zemljo vsakih 10 milijonov let.
- Zadnje telo s premerom 10 km je padlo na Zemljo pred 65 milijoni let in je povzročilo izumrtje velikih plazilcev.

Ostanki padcev teles so na Zemlji ponekod še danes vidni v obliki kraterjev. Ohranjenih kraterjev na Zemlji je dosti manj kot na Luni, saj večji del Zemeljskega površja pokriva morje. Po drugi strani pa so eksogene sile na Zemlji bistveno intenzivnejše kot na Luni. Na Luni sta glavna procesa preoblikovanja površja mehansko preperevanje in poljenje materiala po pobočju zaradi gravitacije. Na Zemlji nastopa poleg tega cela kopica geomorfni procesov, ki so povezani z agensi kot so voda, veter, led itd.

Preglednica 1: Seznam udarnih kraterjev na Zemlji s premerom nad 100 km.

Ime kraterja	Lokacija	Premer kraterja (km)	Starost (v milijonih let)
Vredefort	JAR	300	2020
Guarda	Portugalska	300	200
Sodbury	Ontario, Kanada	250	1850
Chicxulub	Yukatan, Mehika	180	65
Manicouagan	Quebec, Kanada	100	214
Popigai	Sibirija, Rusija	100	35.7



Slika 30: Ostanke kraterja Vredefort lahko prepoznamo tudi na satelitskih posnetkih, objavljenih na Google Earth.



Med večje padce teles bi lahko uvrstili:

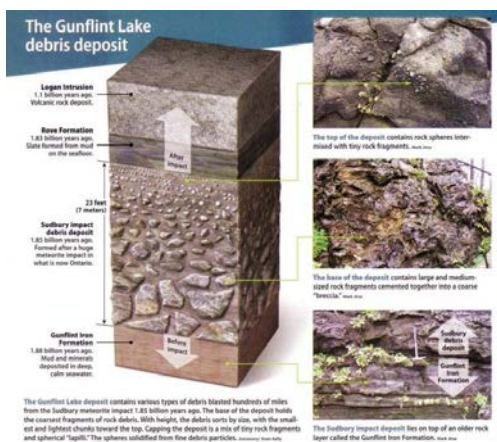
- Padec telesa pred 1,85 milijarde leti
- Padec telesa pred 251 milijoni leti, na prehodu iz perma v trias
- Padec telesa pred 65 milijoni let
- Padec telesa pred 12 900 leti.

**a. Padec asteroida pred 1,85 milijarde leti** je ustvaril krater s premerom 250 km na območju Sudburyja v Kanadi.



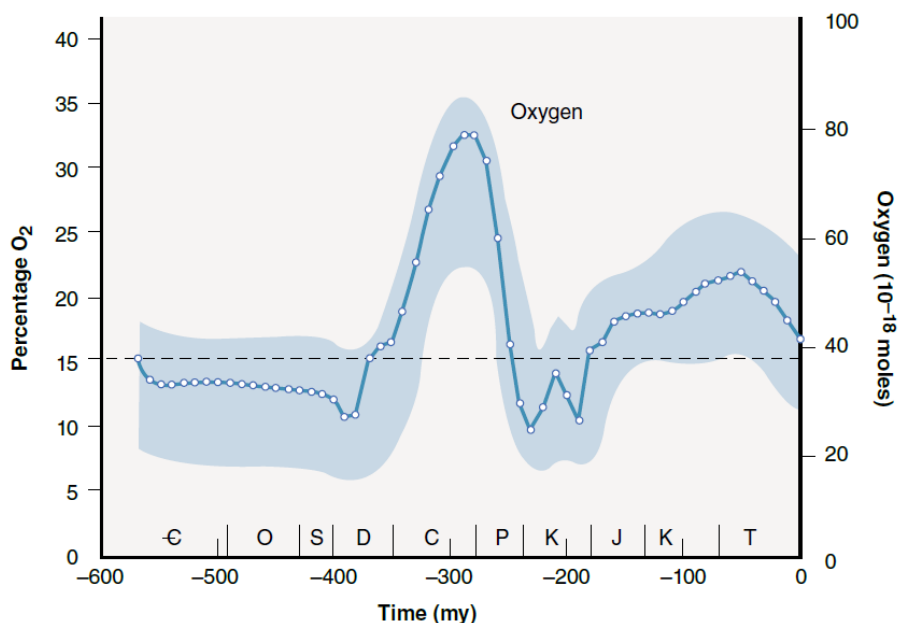
Slika 31: Območje kraterja Sudbury v Kanadi.

Velik pritisk in povišana temperatura sta povzročila lokalno metamorfozo kamnin in nastanek breče v debelini 7 m. Življenje je bilo na nižji stopnji razvoja (cianobakterije). Poleg tega živa bitja še niso „osvojila“ kopnega, zato dogodek ni imel velikega vpliva na biodiverzitetu. Kisik je bil šele v fazi nastajanja, o vplivih na podnebje pa je zaradi zabrisanih sledi mogoče zgolj domnevati.



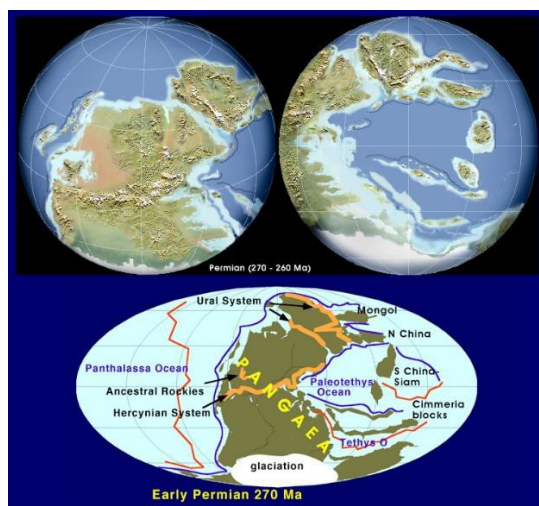
Slika 32: Zaradi izmetanega in kasneje sedimentiranega materiala ob padcu asteroida so vidne velike razlike v sedimentnih plasti.

**b. Na prehodu iz perma v trias, pred 251 milijoni leti je prišlo do največjega izumrtja živih bitij na Zemlji doslej. Izginilo bi naj kar 96 % vseh živih bitij. Mnenja o vzrokih za to so še danes deljena. Morda je šlo za trk velikega telesa, kar je povzročilo intenzivni vulkanizem, sproščanje metana iz morij ter spremembe v morskih tokovih, kar je v končni fazi vodilo do podnebnih sprememb. Zanimivo je, da se je količina kisika močno zmanjšala, najverjetneje na skoraj najnižjo stopnjo dotlej, istočasno pa se je povečala koncentracija CO<sub>2</sub>.**



Slika 33: Spreminjanje koncentracij O<sub>2</sub> v paleozoiku in mezozoiku. V permu, ki se je končal pred 250 milijoni let so se koncentracije O<sub>2</sub> znižale na le 10 %.

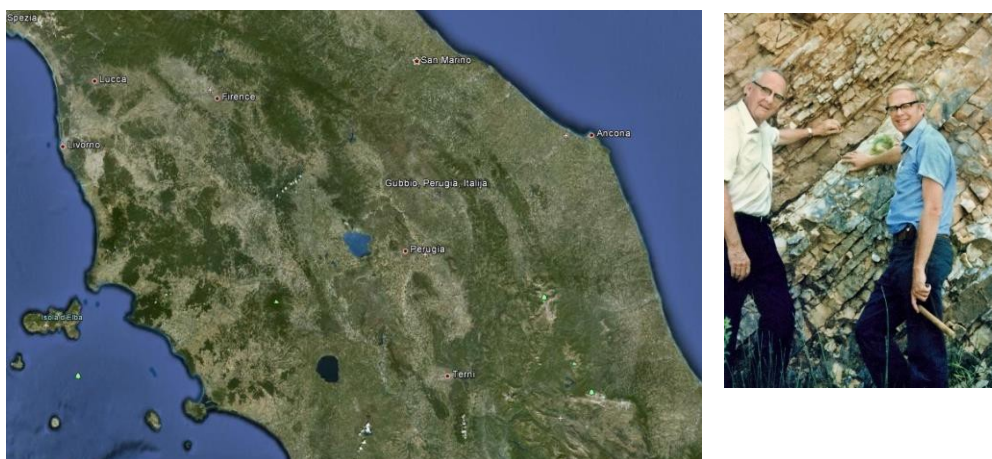
Kopno na Zemlji je predstavljal superkontinent Pangea. Kam bi naj udarilo telo ob trku je težko govoriti, saj so dokazi zabrisani. Nekateri elementi kažejo na območje današnje Avstralije ali Antarktike.



Slika 34: Zemlja v času perma: kopni svet je še vedno zaznamoval megakontinent Pangea, ki pa je že začel počasi razpadati. O pomenu oblike in koncentracije kopnega bomo več spregovorili v poglavju 2.3.

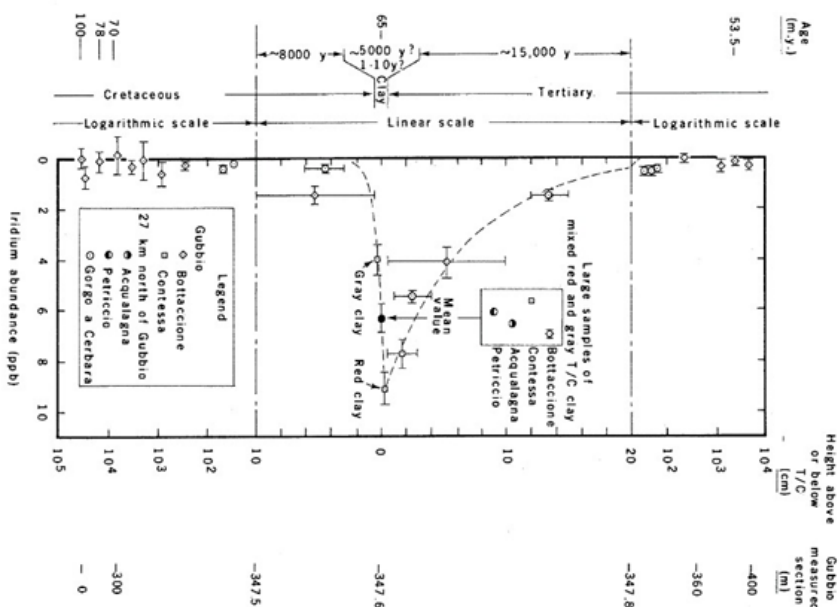
**c. Konec obdobja krede (mezozoik) pred približno 65 milijoni let** je prav tako zaznamovala burna sprememba okolja na Zemlji. Danes je prevladujoče mnenje, da je padec telesa na območje današnjega Jukatana povzročil intenzivnejši vulkanizem in zmanjšano Sončevo obsevanje na Zemlji, kar je posledično vodilo do sprememb podnebja. Izumrtje velikih plazilcev je odprlo pot razvoju drugim organizmom. Dokaz za udarec telesa so velike količine iridija, ki jih je na širšem območju udarca našel Nobelov nagrajenec fizik Luis Alvarez.

Leta 1977 je ameriški geolog Walter Alvarez z univerze v Berkeleyu proučeval sedimente v okolici naselja Gubbio v osrčju Apeninskega polotoka.



Slika 35: Walter Alvarez je z odkritjem iridijeve anomalije na Apeninskem polotoku odkril najverjetnejše vzroke za veliko izumrtje živih rganizmov na koncu krede.

Walter Alvarez je po naključju odkril ostre meje med plastmi, ki ločijo kredne plasti od mlajših terciarnih. Nenavadno je bilo tudi dejstvo, da se je na ločnici koncentracija iridija povečala za 600 krat. Iridij je v zemeljski skorji izredno redek element, saj se je v začetku razvoja Zemlje pomaknil proti jedru. Veliko iridija pa se nahaja v zunajzemeljskih telesih (asteroidih).

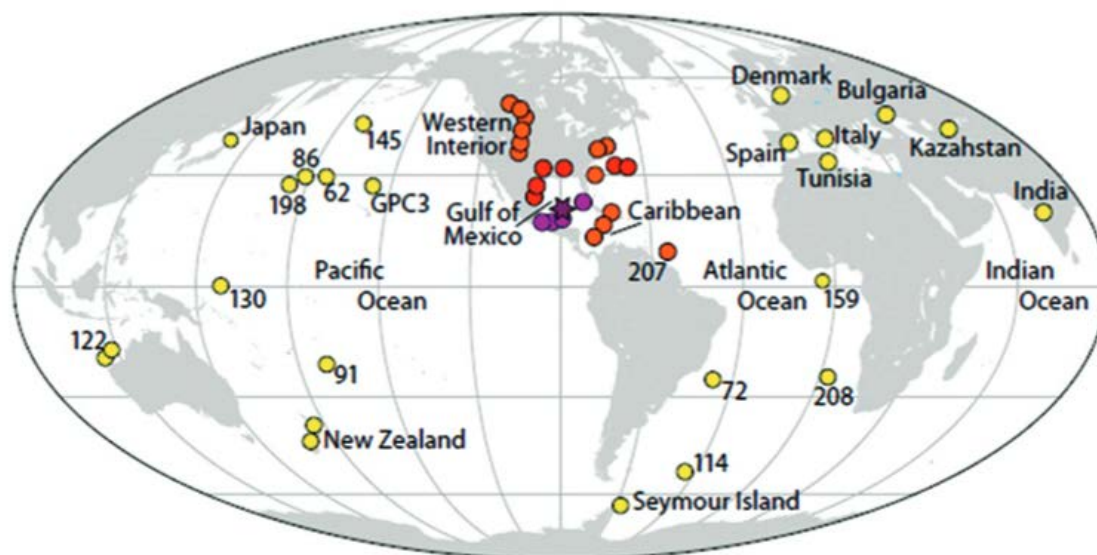


Slika 36: Spreminjanje koncentracij iridija v sedimentih. Časovna lestvica na y os ni linearna. Lahko pojasnite vzroke za počasno padanje koncentracij iridija? Te so za znižanje na prvotno raven potrebovale kar dobrih 10 000 let.



**Iridijevo anomalijo**, kot so poimenovali nenavadno visoke koncentracije tega elementa v sedimentih so kasneje odkrili in potrdili na **75 drugih lokacijah na Zemlji**. Koncentracije Iridija so bile v vseh sedimentih zelo podobne, zato je Walter Alvarez začel sklepati, da gre za skupen izvor tega elementa na Zemlji.

Plasti, v katerih je nastopala Iridijeva anomalija so bile **stare okoli 65 milijonov let** in so nastale na koncu krede, v času, ko so na Zemlji izumrli dinosavri.



Slika 37: Razporeditev najpomembnejših območij s potrjeno iridijevo anomalijo v sedimentih na prehodu iz krede v paleocen.

Natančnejše analize sedimentnih plasti, v katerih nastopa iridijeva anomalija je Walterjevega očeta, sicer jedrskega fizika in nobelovca Luisa Alvareza napeljala na hipotezo, da je visokim koncentracijam iridija botroval padec 10 km velikega telesa na Zemljo, kar je pred 65 milijoni let povzročilo eno od največjih izumrtij živih vrst na Zemlji.

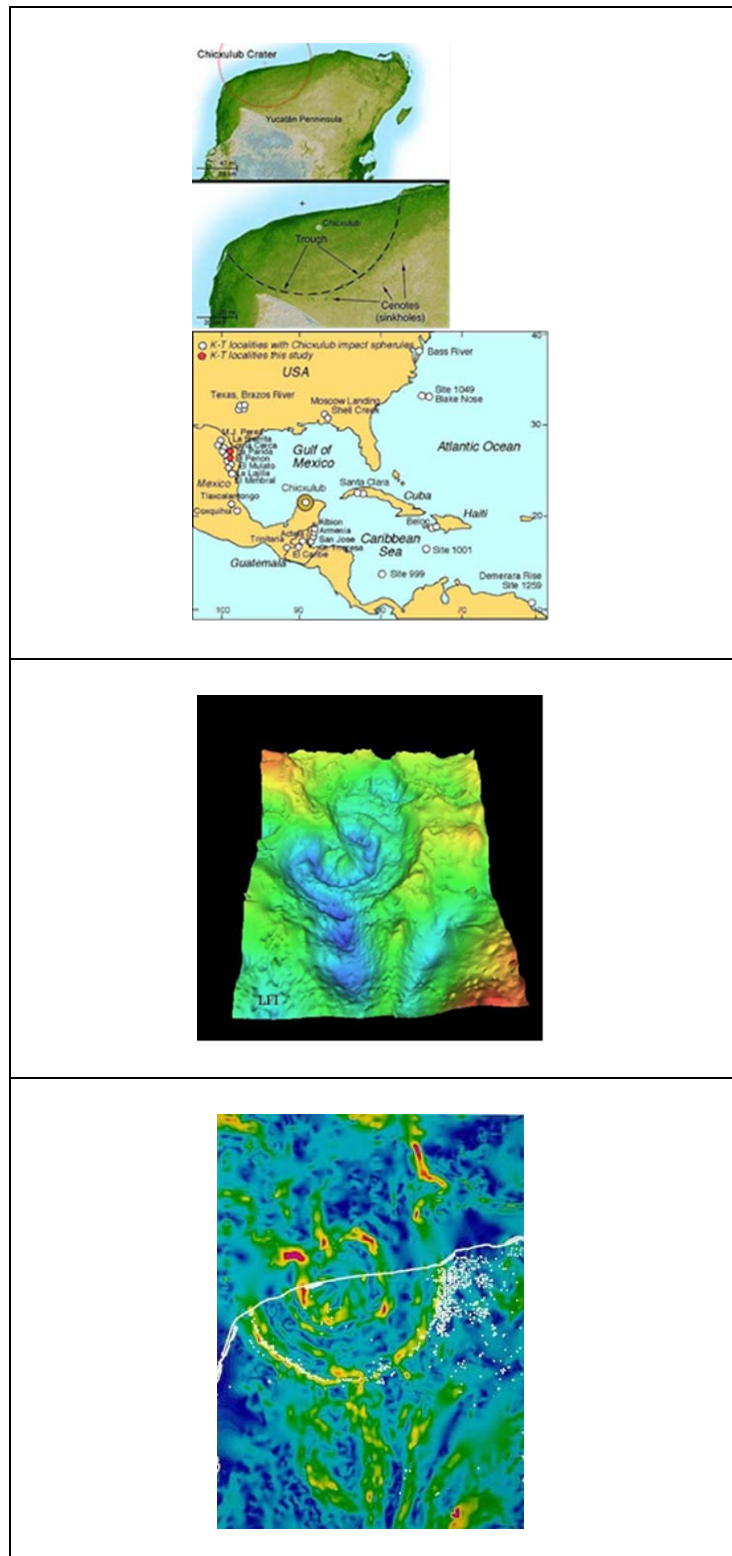
Objava članka, v kateri je skupina znanstvenikov z Univerze v Berkeleyu obelodanila svoje ugotovitve in postavila drzno hipotezo je v znanstveni srenji, ki se ukvarja z množičnimi izumrtji živih vrst povzročila pravo malo revolucijo. Odkritja v zvezi z vplivom padcev teles na Zemljo ekosisteme so si v naslednjih letih vrstili s presenetljivo naglico.

Ob trku je imel hitrost 20 km/s. Pri udarcu se je sprostil energija **100 teraton TNT ( $4,2 \times 10^{23}$ J)** ali za šest milijard atomskih bomb, ki so padle na Hirošimo. Za primerjavo: najmočnejša atomska bomba (ruski Car) je sprostil energijo **50 megaton TNT ( $2,1 \times 10^{17}$ J)**.

Ob objavi članka obeh Alvarezov primerne kandidata za krater, ki je nastal ob trku niso poznali. Potrebno ga je bilo šele poiskati.

Kljub že znani hipotezi obeh Alvarezov, pa na samem začetku nista poznala konkretnega kraterja na Zemlji, ki bi potrjeval njuno hipotezo. Povsem naključno sta geofizika **Antonio Camargo** in **Glen Penfield**, ki sta tedaj opravljala raziskave za mehiško družbo Petroleos Mexicanos v morju severno od polotoka Yukatan odkrila anomalije na morskem dnu. Rezultat nadaljnjih raziskav je bil odkritje nenavadnega kolobarja s premerom 70 km, kmalu zatem pa še koncentričnega kolobarja s premerom 180 km.

Camargo in Penfield sta kolobarje na dnu Mehiškega zaliva sicer odkrila že leta 1978, o rezultatih pa sta poročala na eni od mednarodnih konferenc geofizikov leta 1981, torej leto po objavi hipoteze Luisa in Walterja Alvareza. Po bližnjem naselju **Chicxulub** na Jukatanu v Mehiki so tudi krater poimenovali tako.



Slika 38: Lokacija kraterja Chicxulub (zgoraj), kvazi 3D prikaz podvodnega kraterja (sredina), gravitacijska anomalija na območju kraterja Chicxulub (spodaj).

Posledice trka asteroida so bile občutne:

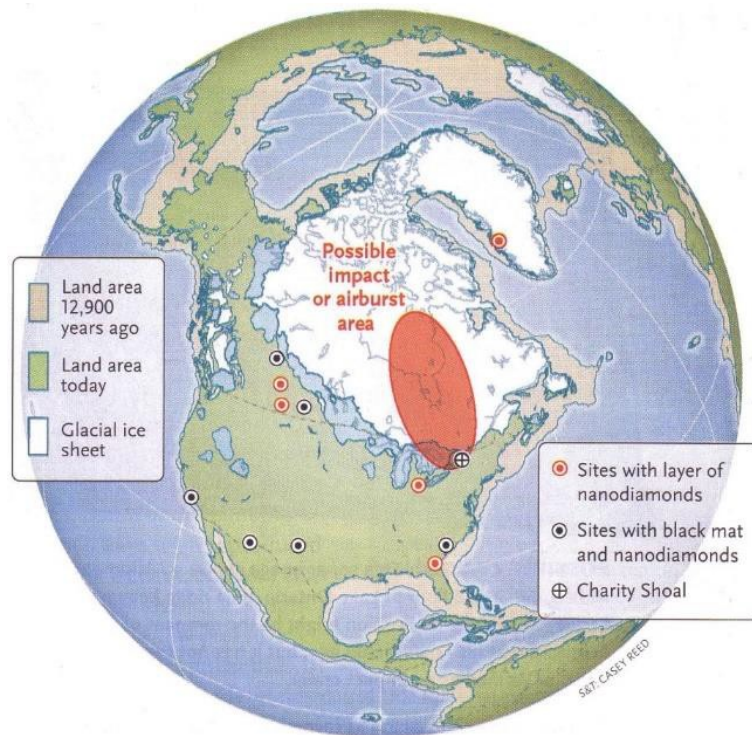
- Izmetan material, ki je v obliki drobnih delcev še dolgo lebdel v troposferi in celo v stratosferi je zmanjšal kratkovalovno sevanje Sonca za vsaj 10-20 %, zaradi česar je **fotosinteza oslabela**. Izpad neto primarne produkcije je vplival predvsem na rastlinojede živali, zaradi prehranjevalnih verig pa tudi na mesojedce.
- Izmetan material, piroklastično gradivo, ki so ga v atmosfero izvrgli vulkani, ki so se sprožili ob trku in ostali lebdeči material se je v tednih po padcu počasi usedal na Zemljo in prekril biomaso in s tem ponekod tudi za nekaj let **zmanjšal intenzivnost fotosinteze** in dostop rastlinojedcem do hrane.
- Ker je asteroid padel v vodo, se je ob padcu sprožil **tsunami**, ob katerem so valovi imeli višino nekaj 100 m (omenjajo se višine vse do 1000 m).
- Izmetana voda v atmosferi je kasneje v obliki **intenzivnih padavin** padla nazaj na Zemljo.
- Izmetan material je imel zaradi velikega pritiska ob padcu visoko temperaturo. Padanje vročega materiala nazaj na Zemljo je povzročil **požare globalnih razsežnosti**.
- Ohladitvi, ki je posledica mrča in spremenjene energijske bilance Zemlje je zaradi velike količine sproščene  $\text{CO}_2$  sledil dvig temperature kot posledica **efekta tople grede**, kar je pri živih organizmih povzročilo velik stres.
- Ob padcu je bilo v atmosfero izvrženo tudi veliko  $\text{SO}_2$  (kamnine na območju padca asteroida so vsebovale velike količine žvepla), ki se je kasneje vezal z vodo v kislino. Zaradi visokih temperatur se je tudi dušik v atmosferi vezal s kisikom in vodo. Oba procesa sta povzročila **intenziven kisli dež**.

Hipoteza obeh Alvarezov je bila uspešna in sprejeta zato, ker je uspela razložiti izumrtje plazilcev ob koncu krede mnogo bolje, kot dotlej prevladujoče hipoteze (eksplozija supernove v bližini našega Osončja, intenzivni vulkanizem).

Še danes pa kljub vsemu hipoteza o padcu asteroida pred 65 milijoni let ni edina možna hipoteza o izumrtju ob koncu krede. Omenimo še nekaj drugih:

- hipoteza o vulkanizmu na Dekanski planoti v Indiji
- hkratni padec večjega števila teles na Zemljo
- regresija morja.

d. Eden zadnjih velikih padcev teles, ki so povzročili podnebne spremembe se je zgodil **pred 12 900 leti**, ko je telo premera okoli 4 km padlo na območje današnje Kanade.



Slika 39: Možno območje padca telesa na Zemljo pred 12 900 leti.

Ostanek kraterja, ki je nastal na koncu zadnje ledene dobe in je še nekoliko podaljšal obdobje z nižjimi temperaturami.



Slika 40: Sledi padca telesa ob koncu zadnje ledene dobe so vidni tudi iz vesolja.

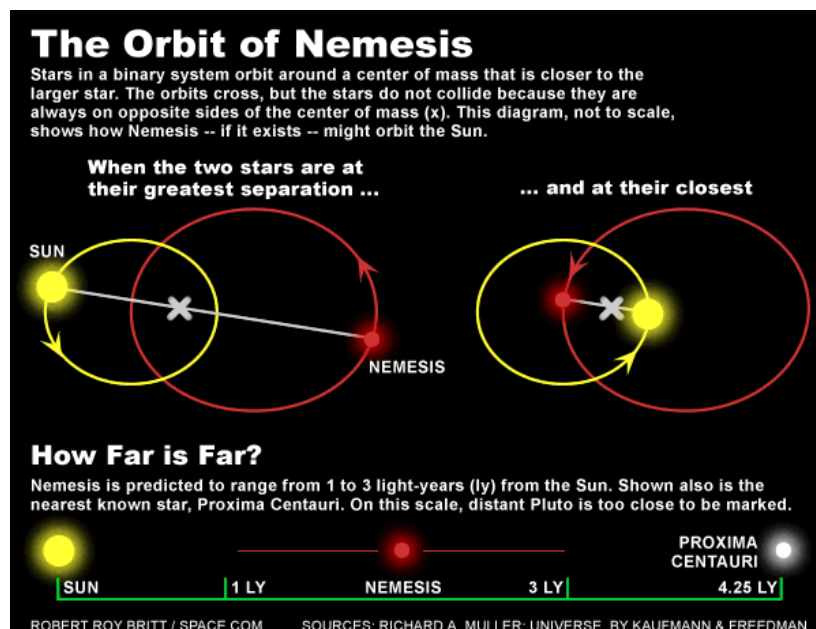
Dokaz za padec telesa je tudi pojav temnih in tankih sedimentnih plasti, ki so se pojavile prav v obdobju padca telesa na Zemljo.



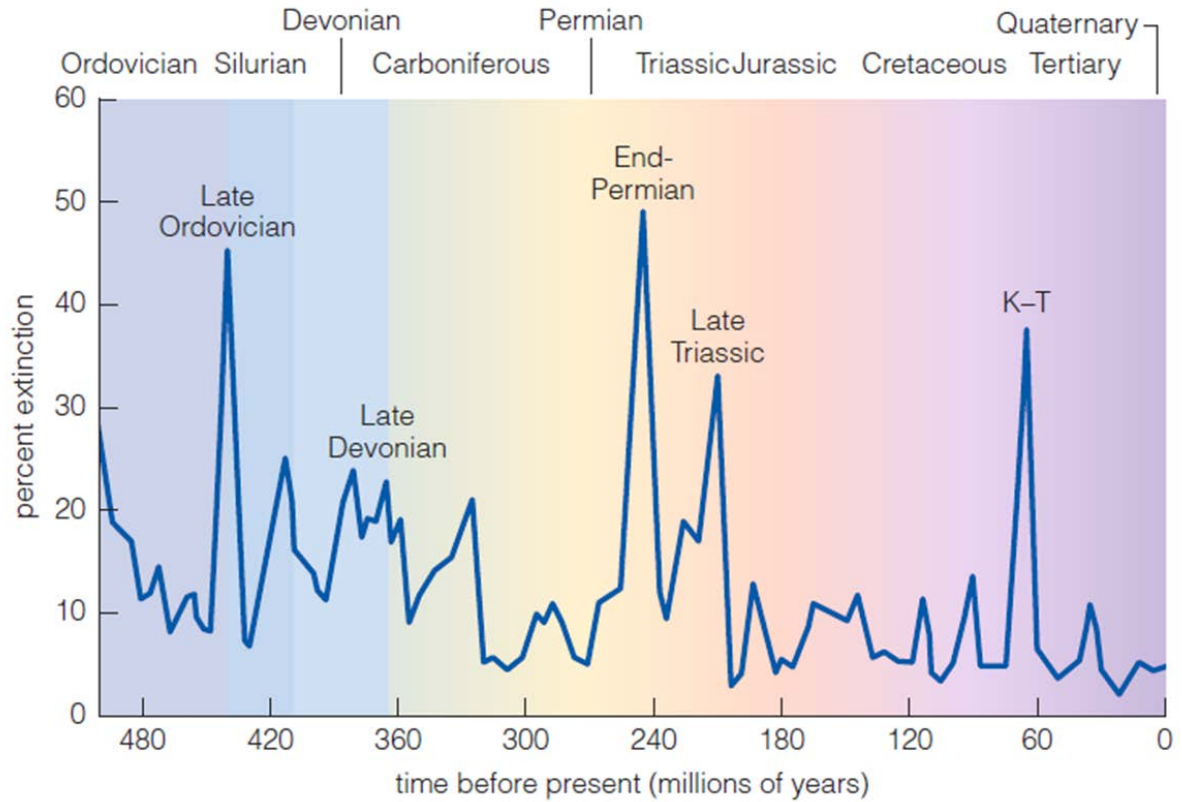


Slika 41: Podobno kot na stiku krednih in paleocenskih plasti, je podobne razlike v sedimentih, ki so posledica padca telesa na Zemljo mogoče zaznati v sedimentih, ki so nastali ob koncu zadnje ledene dobe.

Je Sončev sistem sistem dvojnih zvezd? Če je naše Osončje sestavljeno iz dvojne zvezde, potem bi lahko s tem razložili vzroke za nekatere ekstinkcije v preteklosti. Interval mimoleta "zvezde dvojčice" Nemesis (morda gre za rjavo pritlikavko) bi po tem modelu znašal okoli 26 milijonov let, kolikor je tudi nenavadno pravilna perioda večjih ekstinkcij v zadnjih 500 milijonih let.



Slika 43: Orbita hipotetične zvezde dvojčice Nemesis bi se lahko vsakih 26 000 približala Soncu, zaradi česar bi se verjetnost trkov teles, ki krožijo okoli Nemesis s telesi v Osončju znatno povečala.



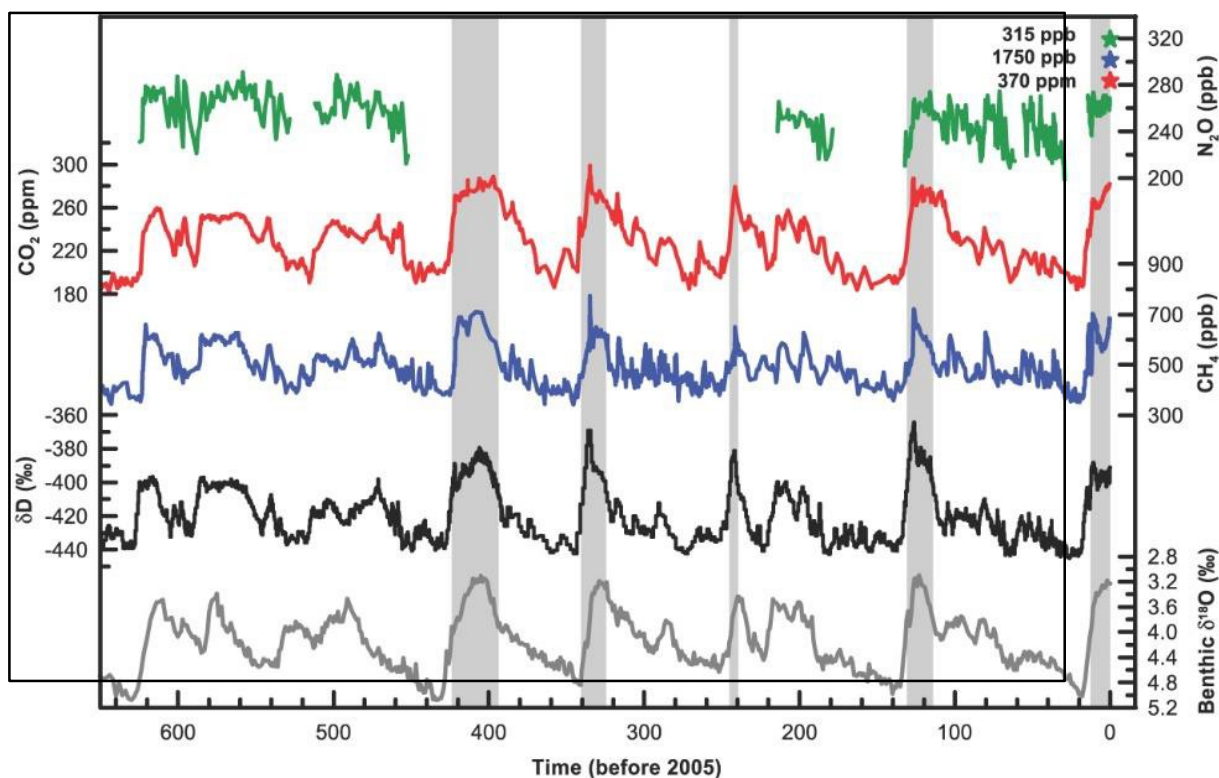
Slika 44: Monožična izumrtja (ekstinkcije) živih organizmov na Zemlji so si v zadnjih 500 milijonov let sledila z dokaj pravilno period 26 milijonov let. Je to zgolj naključje?

## 2.2 Atmosferski vzroki za naravno spreminjanje podnebja

Med glavne atmosferske vzroke za naravno spreminjanje podnebja v preteklosti lahko štejemo spreminjanje kemijske in fizikalne sestave atmosfere. To je vplivalo na različno **prosojnost atmosfere** ter na različno **vpojnost** za kratkovalovno sevanje Sonca in dolgovalovno sevanje zemeljskega površja.

Tako fizikalne kot kemijske lastnosti atmosfere so v tesni povezavi z geofizikalnimi dejavniki (tektonskimi procesi in z njimi povezanim vulkanizmom).

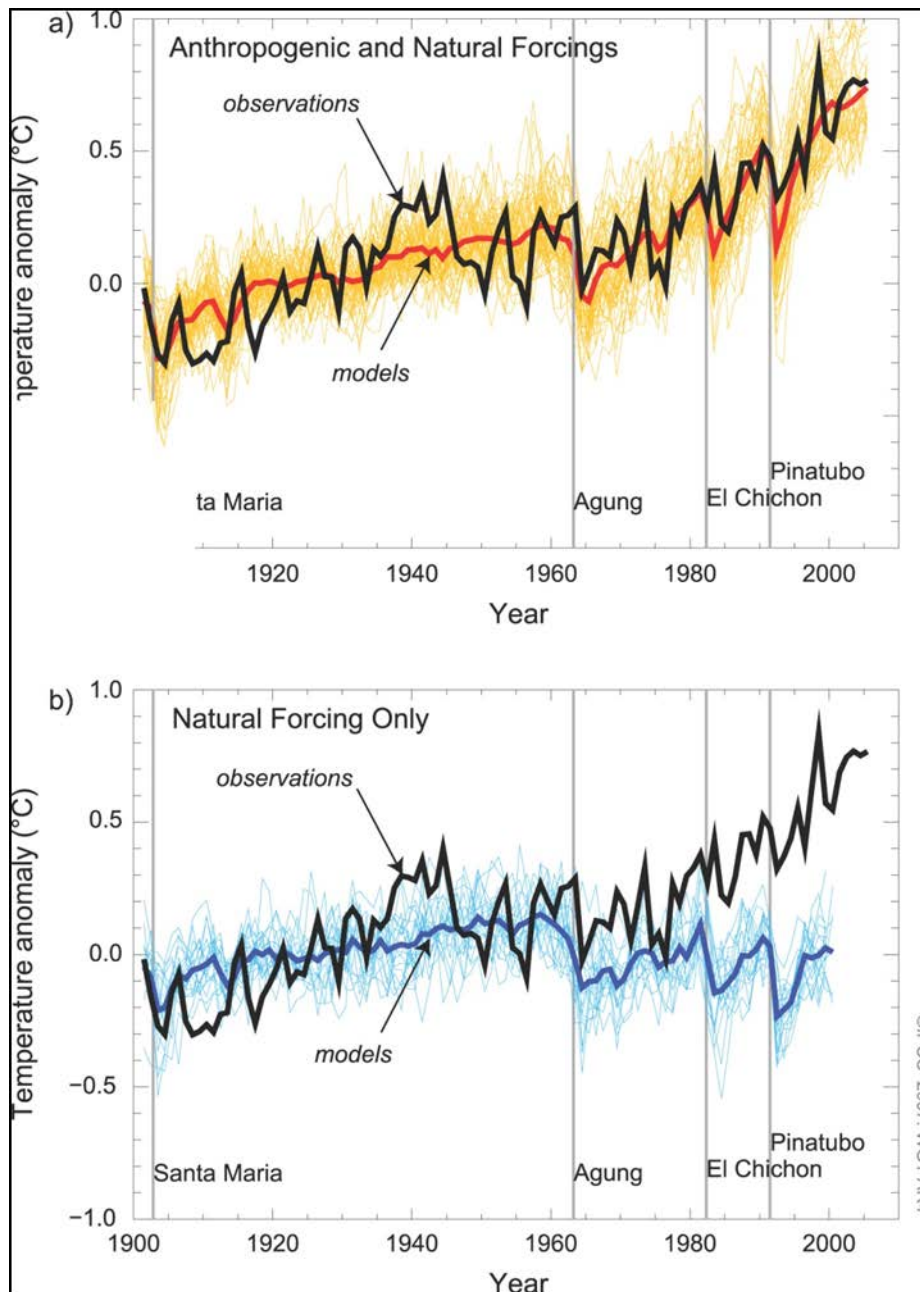
Spreminjanje koncentracije nekaterih plinov v Zemljini atmosferi je v tesni povezavi s hladnejšimi in toplejšimi obdobji ali interglacijami (označeno s sivo barvo).



Slika 45: Povezave med koncentracijami nekaterih plinov in pojavom ledenih dob (sivi stolpci). Časovna lestvica je v tisočih let.

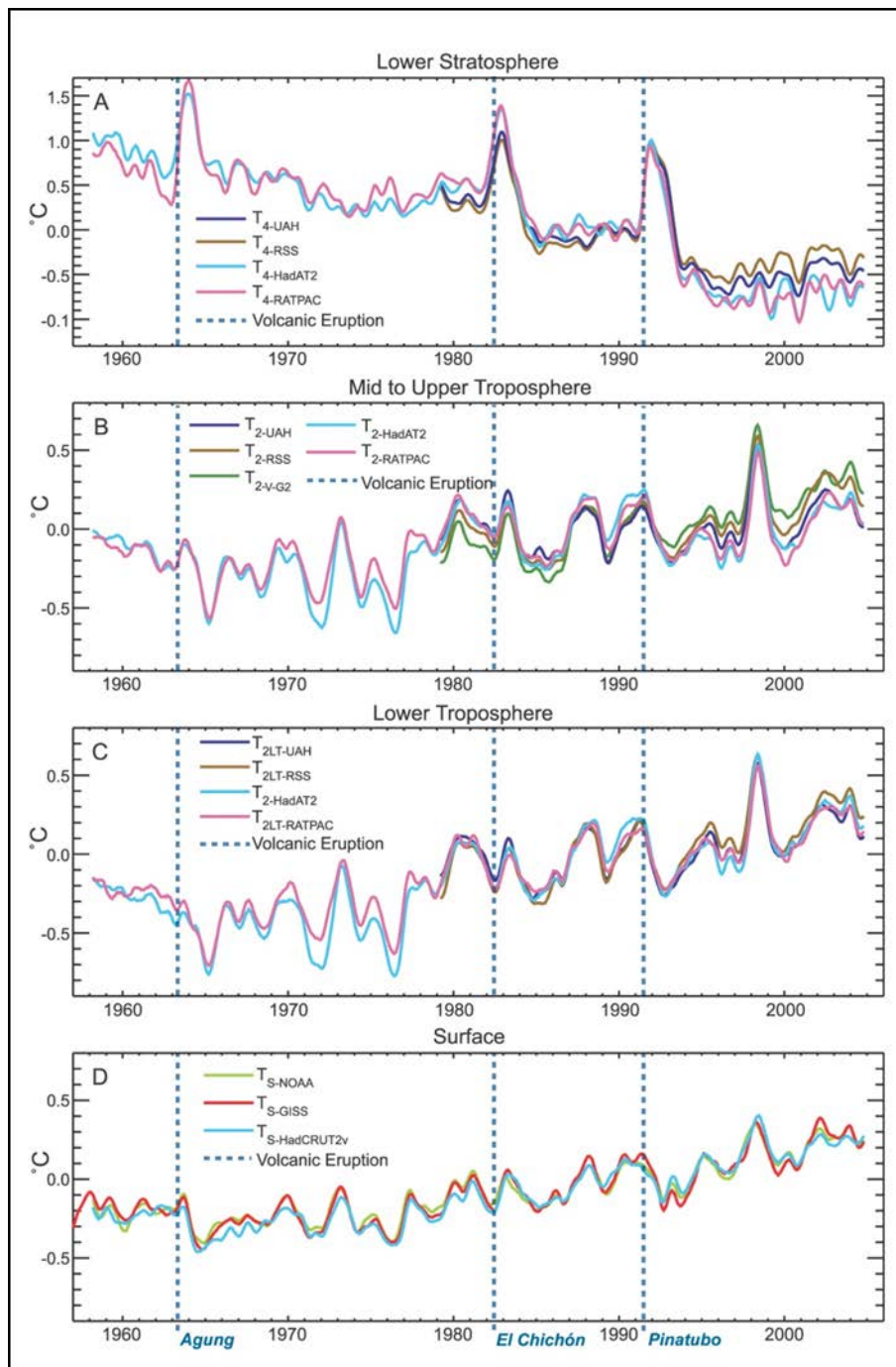
Primerjava med vplivi vulkanov in antropogenimi vplivi kaže, da so slednji občutnejši. Vseeno pa je nekaj zadnjih večjih izbruhov vulkanov, ki so v atmosfero izvrgli predvsem piroklastični material (Santa Maria, Agung, El Chichon, Pinatubo) povzročilo zmanjšanje Sončevega obsevanja in s tem padec temperature zraka v spodnjih plasteh atmosfere.





Slika 46: Primerjava naravnih (vulkanski izbruhi in z njim povezana motnosta atmosfere) in antropogenih vplivov na spremembo temperaturne anomalije v spodnji plasti atmosfere.

Spremenjena sestava atmosfere zaradi vnosa piroklastičnega materiala ob vulkanskih izbruhih in s tem povezana manjša prosojnost atmosfere sta imela z določeno zakasnitvijo vpliv celo v spodnji stratosferi. Na y osi so prikazana odstopanja od povprečnih temperatur za obdobje 1979 – 1997. Na Sliki 47 vidimo, da so zaradi večje motnosti atmosfere temperature v troposferi padle, v stratosferi pa narasle. Lahko pojasnite vzroke za te razlike?



Slika 47: Primerjava vplivov izbruhov vulkanov na temperature zraka v različnih plasteh atmosfere.

Vpliv vulkanske aktivnosti na sestavo atmosfere označujemo Indeksom vulkanske eksplozivnosti (volcanic explosivity index – VEI).

Preglednica 2: Nekaj primerov izbruhov vulkanov glede na indeks vulkanske aktivnosti.

VEI	Tipizacija	Opis / učinek	Višina erupcije	Volumen izvrženega materiala	Povratna doba	Primer
0	Hawaiian	neeksplozivni	< 100 m	< 10,000 m <sup>3</sup>	dnevno	Mauna Loa
1	Hawaiian/Strombolian	šibek	100-1000 m	> 10,000 m <sup>3</sup>	dnevno	Stromboli
2	Strombolian/Vulcanian	eksplozivni	1-5 km	> 1,000,000 m <sup>3</sup>	tedensko	Galeras (1993)
3	Vulcanian/Pelean	eksplozivni	3-15 km	> 10,000,000 m <sup>3</sup>	letno	Koryaksky
4	Pelean/Plinian	katastrofalen	10-25 km	> 0.1 km <sup>3</sup>	≥ 10 let	Soufrière Hills (1995)
5	Plinian	eksplozivni	> 25 km	> 1 km <sup>3</sup>	≥ 50 let	St. Helens (1980)
6	Plinian/Ultra-Plinian	katastrofalen	> 25 km	> 10 km <sup>3</sup>	≥ 100 let	Mount Pinatubo (1991)
7	Plinian/Ultra-Plinian	planetarni	> 25 km	> 100 km <sup>3</sup>	≥ 1000 let	Tambora (1815)
8	Ultra-Plinian	planetarni	> 25 km	> 1,000 km <sup>3</sup>	≥ 10,000 let	Toba (73,000 BP)

Izbruh vulkana Tambora na indonezijskem otoku Sumbawa 10. aprila 1815 je (razen tega, da je ubil 70 000 ljudi) zaradi velike količine izbruhanega piroklastičnega materiala v atmosfero na celotni Zemlji povzročil t.i. “leto brez poletja 1816” in najhujšo lakoto v 19. stoletju. Globalna temperatura je po izbruhu padla do 0,7 °C.

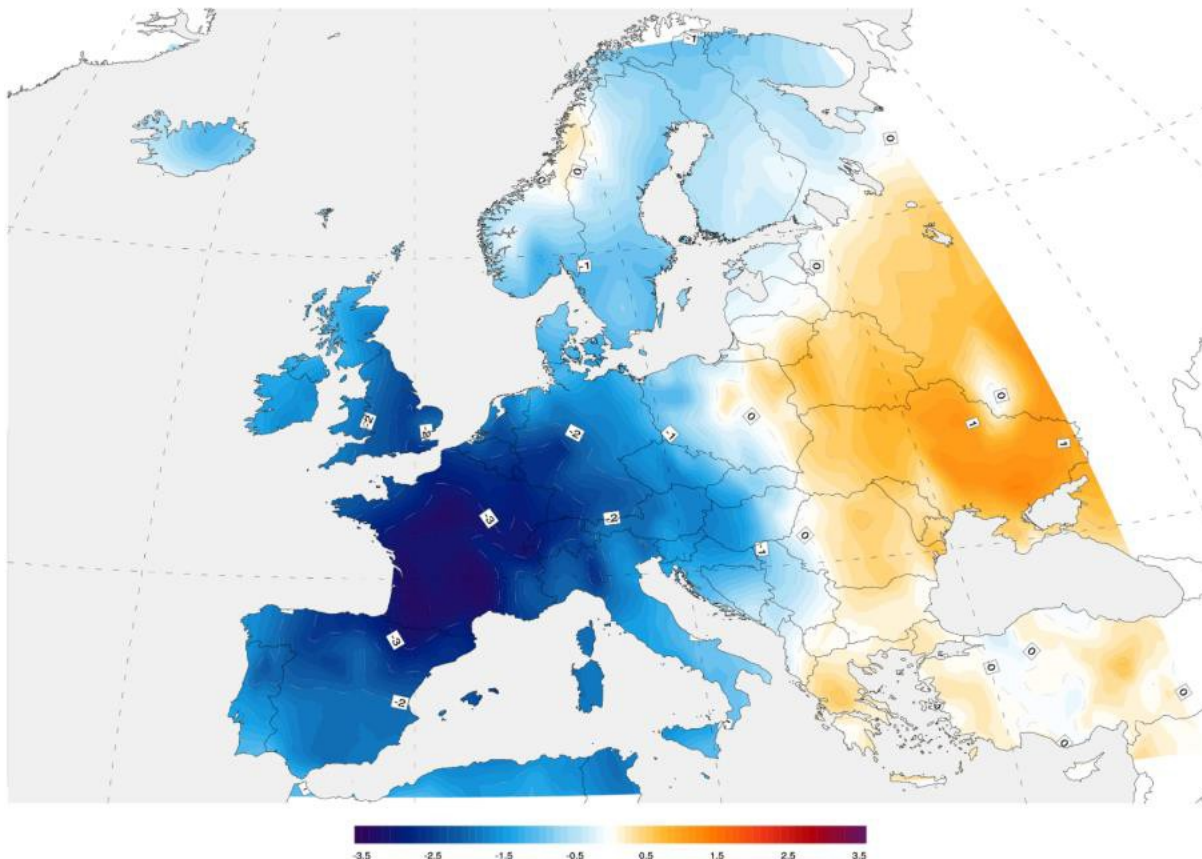


Slika 48: Satelitski posnetek vulkana Tambora.

Temperature na severovzhodu ZDA so junija leta 1816 z običajnih 20-25°C padle pod 5 °C. Mraz je pobil veliko živine, v začetku junija so v Quebecu pustošili snežni meteži, višina snežne odeje je poleti na jugovzhodu Kanade znašala 30 cm ! Cena ovs, ki je bil ključna hrana za konje (tedaj najpomembnejše transportno sredstvo), je takrat v ZDA narasla z običajnih 12 centov na 92 centov.

Temperaturne anomalije na območju Evrope v letu, ki je sledilo „letu brez poletja“. Zaradi velikega izpada pridelka je sledila najhujša lakota v Evropi v 19. stol. Za nameček je Evropa prav tem obdobju počasi okrevala po “Napoleonovih vojnah”.

### 1816 Summer Temperature Anomaly



Slika 49: Poletne temperaturne anomalije v Evropi leta 1816.

Vulkan Cracatoa (Krakatau) v Indoneziji je leta 1883 izrgel piroklastični material 30 km visoko. Pariški astronomski observatorij Montpellier je še tri leta po izbruhu beležil 10% zmanjšanje Sončevega obsevanja. Sledile so tudi ekstremno mrzle zime med leti 1884 in 1886.





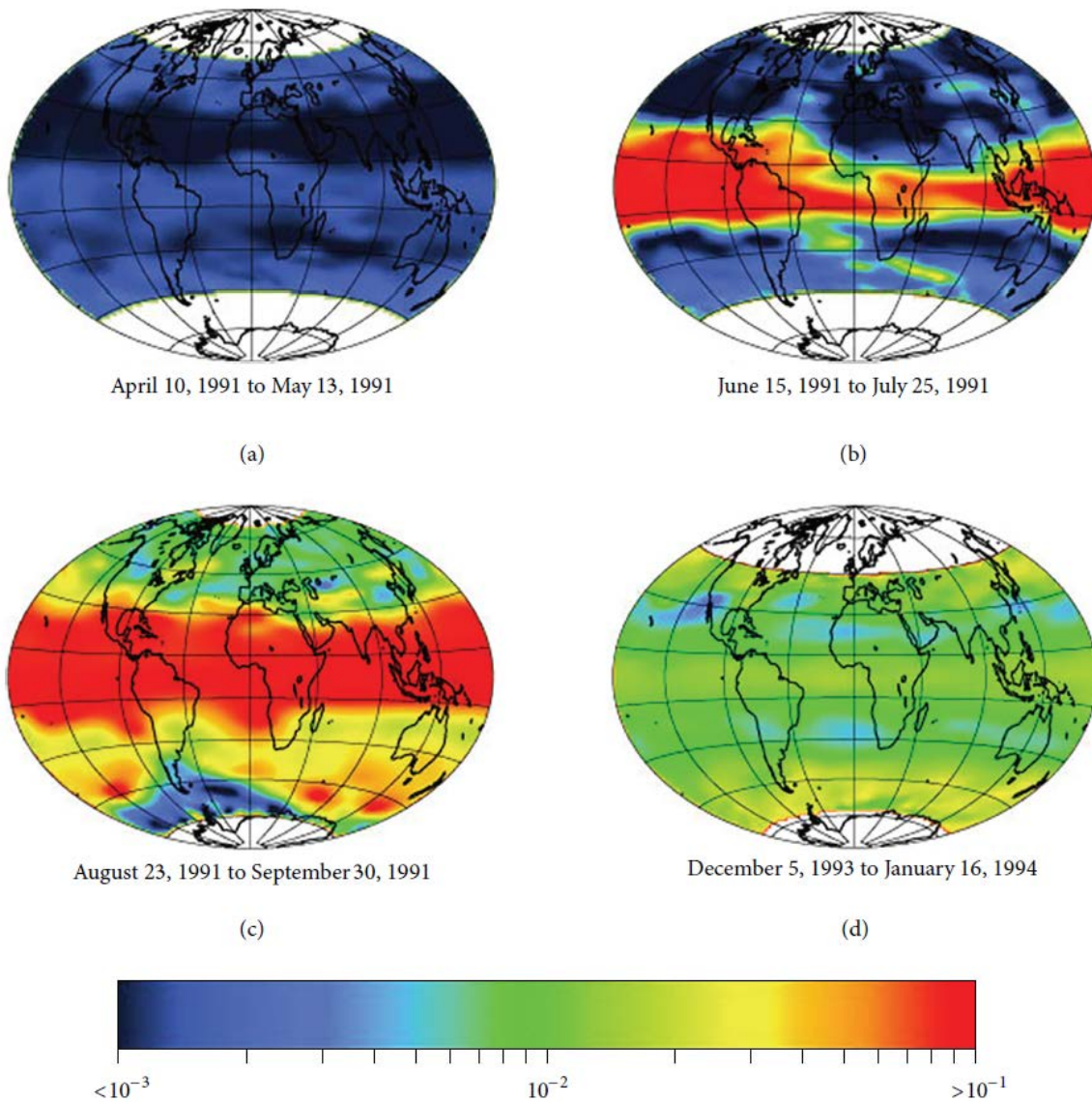
Slika 50: Vulkan Krakatau. Na levi strani je vidna kaldera vulkana, s skoraj potopljenim vrhom vulkanskega stožca.

Mehiški vulkan El Chichon je leta 1982 povzročil vnos piroklastičnega materiala in plinov v stratosfero, kjer so se ti zadržali daljši čas in v letu 1983 znižali svetovno temperaturo na Zemlji za  $0,25^{\circ}\text{C}$ .



Slika 51: Vulkan El Chichon.

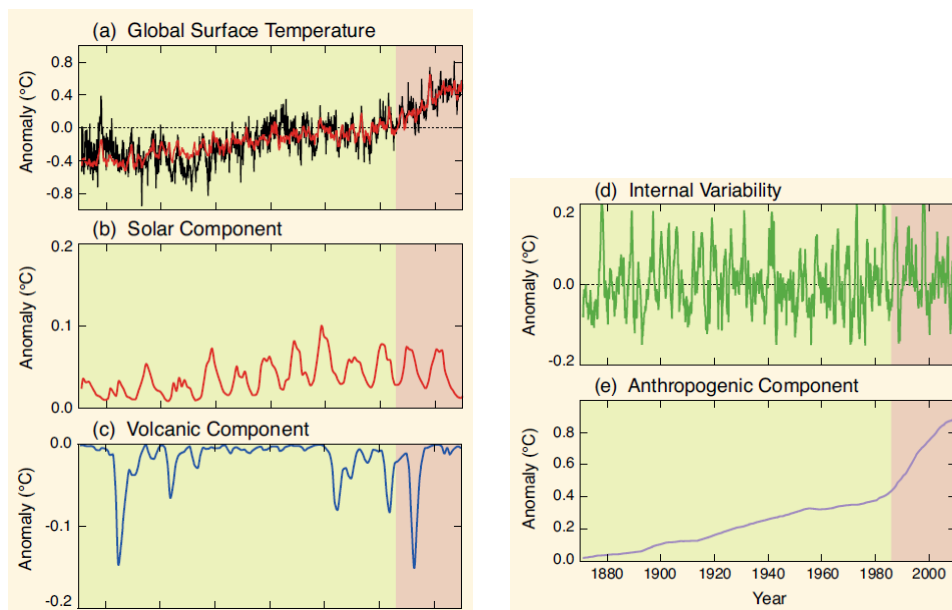
Filipinski vulkan Mt. Pinatubo je 15. junija 1991 izbruhnil kot drugi največji vulkan v 20. stoletju z indeskom vulkanske eksplozivnosti 6. Posledice izbruha leta 1991 je bilo čutiti po vsem svetu. Izvrgel je približno 10 milijard ton magme in 20 milijonov ton  $\text{SO}_2$  ter na površje Zemlje prinesel velike količine mineralov in strupenih kovin. V stratosfero je izvrgel več trdnih delcev kot kateri koli izbruh od izbruha Krakatoa leta 1883. V naslednjih mesecih so aerosoli ustvarili globalno plast, ki je znižala sončno obsevanje. Globalne temperature so se v letih 1991-1993 znižale za približno  $0,5^{\circ}\text{C}$  tanjšanje ozonske plasti pa se je začasno močno povečalo.



Slika 52: Optična debelina aerosolov v atmosferi kot posledica izbruha piroklastičnega materiala vulkana Pinatubo.

Oglejmo si še primerjava velikostnih razredov vplivov nekaterih astronomskih in atmosferskih dejavnikov na spremembe globalne temperature Zemljine atmosfere. Če naravni vzroki (Sončeva aktivnost, vulkanski izbruhi, notranji vzroki) povzročajo odklone velikostnega razreda do  $0,2^{\circ}\text{C}$ , pa antropogeni učinki vplivajo na temperaturne anomalije, ki so skoraz za velikostni razred višje (Slika 53).





Slika 53: Primerjava vpliva astronomskih, atmosferskih in antropogenih dejavnikov na globalne temperaturne spremembe.

### 2.3 Zemeljski (terestrični) vzroki za naravno spreminjanje podnebja

Teorija o tektoniki plošč je v 20. stoletju dokončno potrdila, da se razmerje med kopnim in morjem spreminja in da se oblike kopnega sveta menjavajo. Tudi današnje stanje razporeditve kopnega sveta na Zemlji je zgolj ena faza v razvoju. Oblike kopnega sveta se bodo v prihodnje še spreminjale.

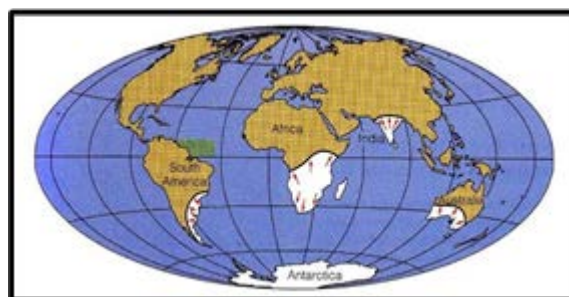
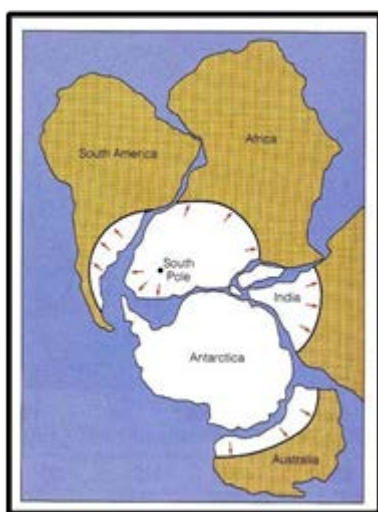
Razporeditev kopnega in morja igra pomemben vpliv na globalno razporeditev temperatur in podnebja na Zemlji nasploh. Zakaj ?

Razmerje med kopnim in morjem ter oblika in razporeditev kopnega sveta vpliva na globalne podnebne poteze z naslednjimi mehanizmi:

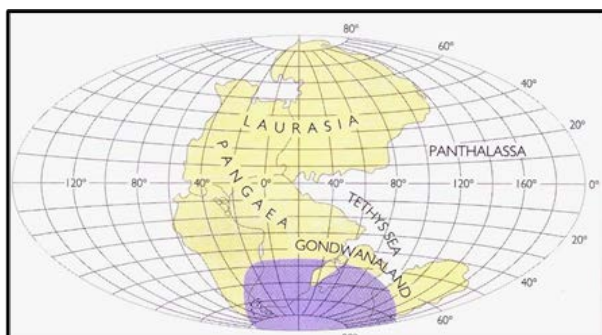
**1. Kopni svet ima manjšo toplotno kapaciteto kot morje.** Zaradi tega se hitreje segreje, vendar tudi hitreje ohlaja. Posledica tega so velika temperaturna nihanja. Vodne površine lahko skladiščijo več toplote – imajo večjo toplotno kapaciteto, vendar se počasneje segrevajo in ohlajajo kot kopno. **Morja zato blažijo pretirana segrevanja in ohlajanja.** Večje vodne površine v primerjavi s kopnimi torej pomenijo manjše temperaturne ekstreme. Razmerje med kopnim in morjem, oblika kopnega in njegova geografska razširjenost so se v geološki zgodovini spreminjale.

**2. Razporeditev kopnega glede na geografsko širino** prav tako vpliva na globalne podnebne razmere. Če je kopni svet razporejen v bližini polov, pomeni to intenzivnejše ohlajevanje polarnih območij. Če se na polih nahaja morje, se ta območja ne ohlajajo tako močno. Kopni svet v polarnih območjih povzroča tudi trajnejšo snežno odejo, zaradi česar se poveča albedo planeta, kar povzroča več odbitega kratkovalovnega Sončevega sevanja, zaradi česar se Zemlja še dodatno ohlaja.

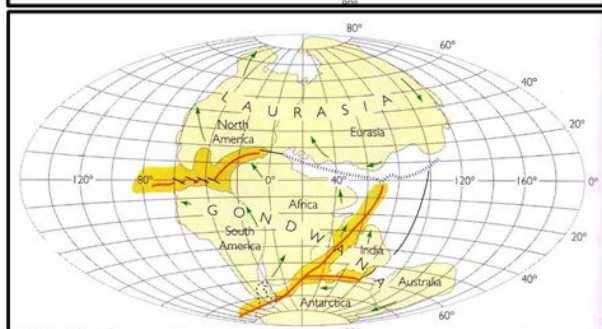
Govorimo o pozitivni povratni zanki: kopni svet na polih → intenzivnejše ohlajanje → trajna snežna odeja → večji albedo → več odbitega KV sevanja → intenzivnejše ohlajanje → še bolj trajna snežna odeja.....



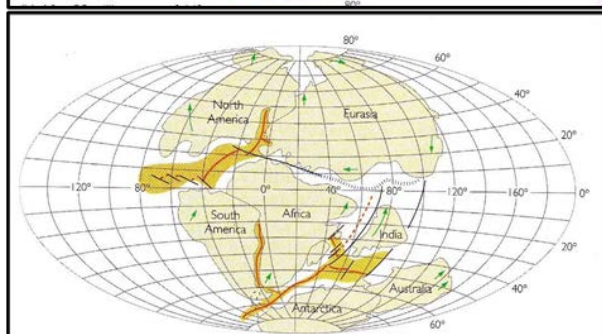
Slika 54: Selitev superkontinenta Gondvane proti južnemu polu je ob koncu paleozoika (v permu) povzročila ledeno dobo na južni poluti. Ostanki le-te so še danes vidni na območju Južne Amerike, južne Afrike in Avstralije.



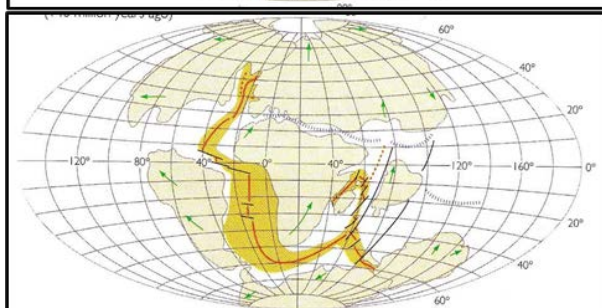
Paleozoik



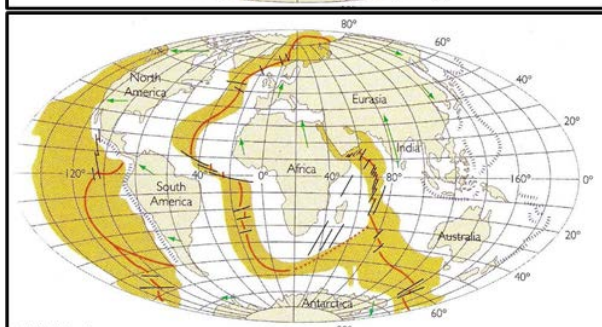
Zgodnja jura



Pozna jura



Pozna kreda



Danes

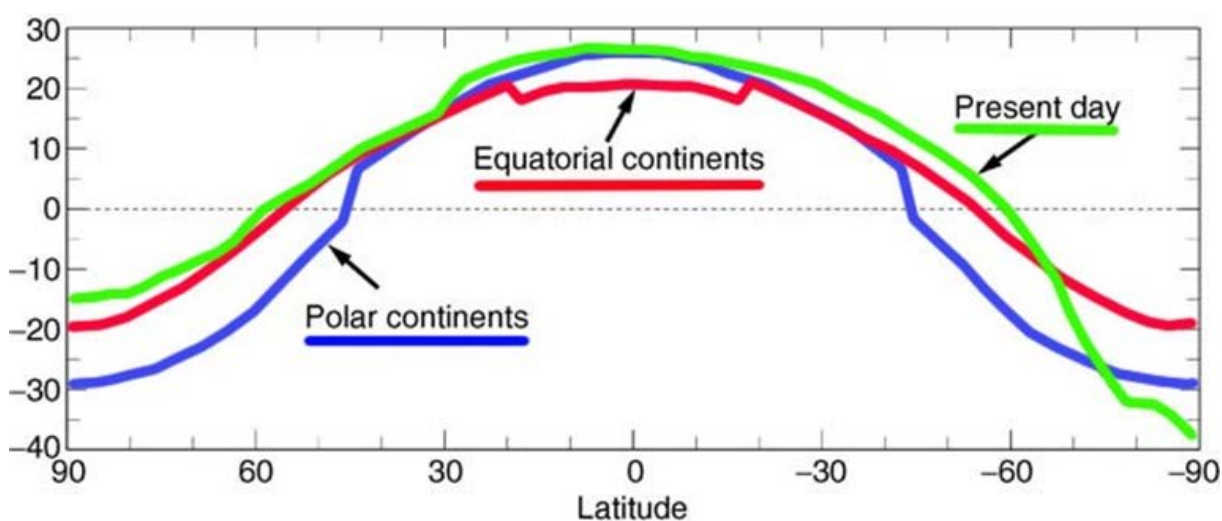
Slika 55: Spreminjanje kopnega sveta na Zemlji od paleozika do danes.

**3. Masivnost kontinentov:** v razvoju Zemljinega površja so se deli kopnega sveta nekajkrat združili v masivnejši kontinent ali superkontinent (npr. Rodinija in Pangea), zatem pa ponovno razdružili. Trenutno smo v fazi razpadanja Lavrazije in Gondvane.

Večja masivnost kopnega sveta vpliva na **povečano kontinentalnost**, katerega najpomembnejše značilnosti so večja temperaturna nihanja in **povečani podnebni ekstremi**.

Spreminjanje temperature zraka v odvisnosti od geografske širine pri treh različnih stanjih razporeditve kopnega sveta:

- današnje stanje (zeleno),
- kopno koncentrirano v ekvatorialnem pasu (rdeča),
- (rdeča),
- kopno koncentrirano v polarnem pasu (modra).

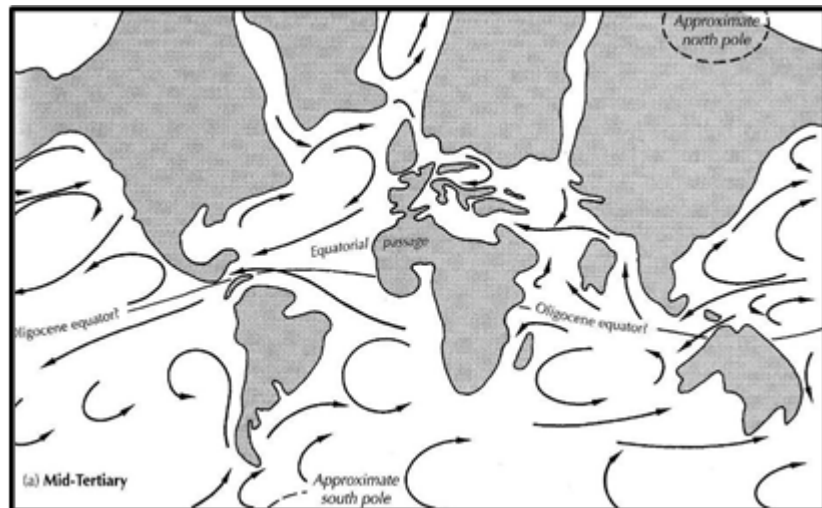


Slika 56: Spreminjanje temperature v odvisnosti od geografske širine in hipotetične razporeditve kontinentov.

**4. Razporeditev kopnega in morja vpliva na razporeditev toplih in hladnih morskih tokov** in s tem na kroženje (izmenjevanje) toplote na Zemlji. Spreminja se tudi razmerje med kopnim in vodnim svetom. Vpliv bi lahko razdelili na več manjših učinkov:

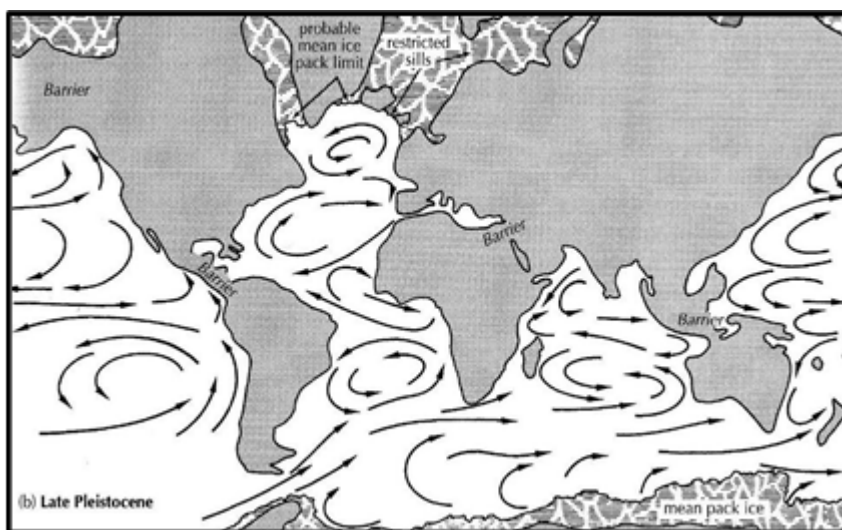
- Znižanje gladine morja vpliva na višanje deleža kopnega sveta. Po drugi strani se z zniževanjem gladine morja večja tudi absolutna višina gorovij, s tem pa delež višje ležečih območij.
- Manjši delež vodnih površin pomeni tudi slabšo možnost skladiščenja energije (voda ima veliko toplotno kapaciteto).

Vrzel med Severno in Južno Ameriko je v sredini Terciarja omogočala pretakanje tople morske vode iz Atlantskega oceana v Tih ocean. Stranska posledica je bila intenziviranje toplih in hladnih morskih tokov ob obalah vzhodne Azije, zaradi česar se je atmosfera tam labilizirala. Posledica so bila pogostejša neurja. Podnebje v Evropi je bilo hladnejše od današnjega (Slika 57).



Slika 57: Razporeditev kopnega in morsih tokov v srednjem terciarju.

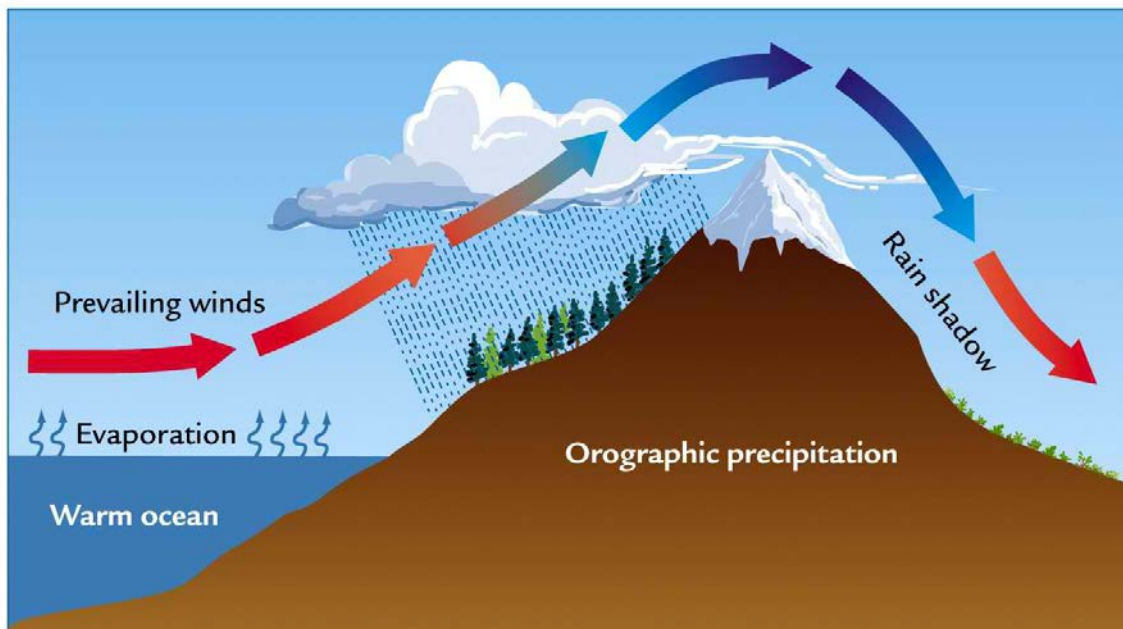
V poznem pleistocenu sta bili Severna in Južna Amerika (ponovno) združeni, zaradi česar se je topli morski tok (Zalivski tok) v novonastalem Mehiškem zalivu prisilno usmeril proti severovzhodu, torej proti zahodni obali Evrope (Severnoatlantski tok). Podnebje v Evropi je prav zato (kljub ohladitvi) bolj blágo, kot bi bilo sicer, glede na to geografski širino (Slika 58).



Slika 58: Razporeditev kopnega in morsih tokov na koncu pleistocena.



**5. Gorske verige** – še zlasti če ležijo prečno na prevladujočo smer gibanja zračnih mas – predstavljajo oviro za zračne mase. Na **privetni strani** se zato pojavlja vlažno podnebje zaradi prisilnega dviga, kondenzacije vlage in nastanka padavin. Na **odvetni strani** se zračne mase spuščajo, zato se adiabatno segrevajo, zrak se suši in segreva.



Slika 59: Gorske reliefne ovire na privetni strani povzročajo povečanje višine padavin in bolj vlažno klimo, na odvetni strani pa se zaradi adiabatnega segrevanja spuščajočega se zraka leta suši. Ker oblaki razpadajo, se višina padavin zniža (v nekaterih primerih so ta območja celo polpuščavska ali puščavska). Tam nastane t.i. "padavinska senca" (npr. Llano Estacado v ZDA).

**6. V krajših časovnih obdobjih tudi danes prihaja do podnebnih oscilacij, ki so posledica bodisi vzajemnega vpliva morskih tokov in vremena ali spremenjenega vremenskega vzorca.**

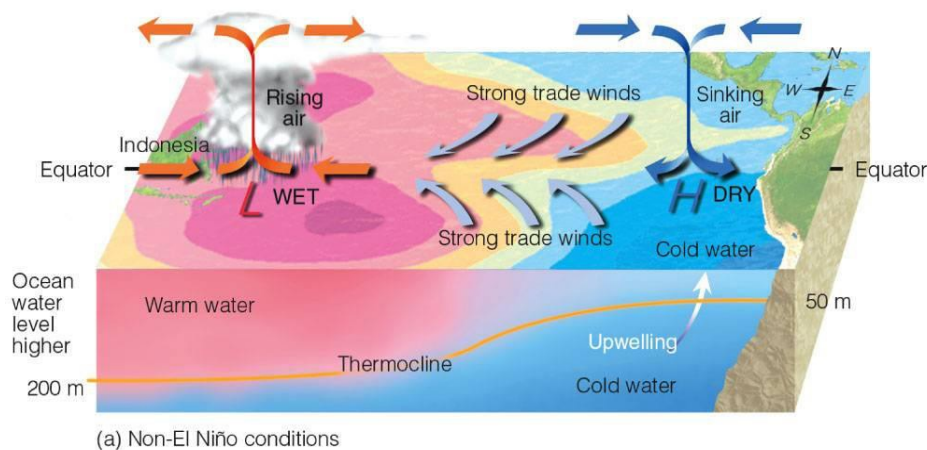
Primeri takih podnebnih oscilacij so:

- El Nino in La Nina oziroma El Nino Southern Oscillation (ENSO)
- Severnoatlantska oscilacija (North Atlantic Oscillation (NAO))
- Polarna oscilacija (PO)
- Oscilacija v Indijskem oceanu
- Pacifična dekadna oscilacija
- Benguelska oscilacija
- Zahodnosredozemska oscilacija

#### 6.1 El Nino in La Nina oziroma El Nino Southern Oscillation (ENSO)

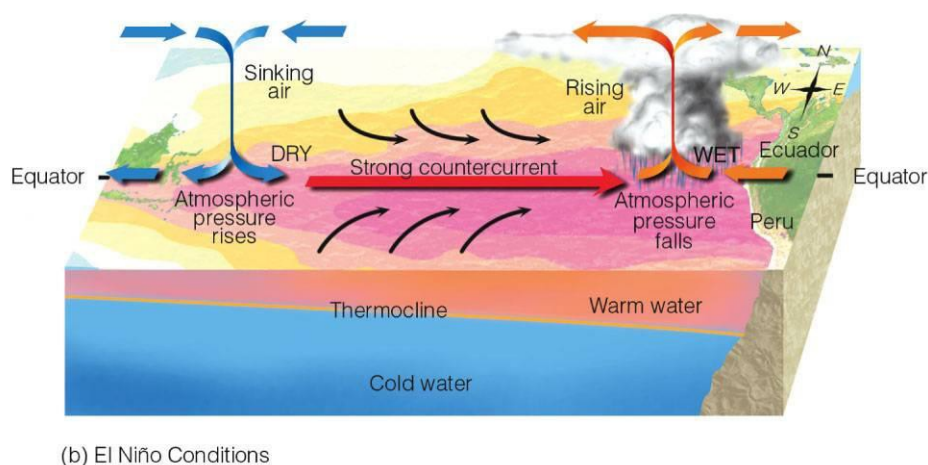
ENSO predstavlja pas toplega oceanskega ekvatorialnega toka med zahodnimi obalami Južne Amerike in jugovzhodno Azijo oziroma Avstralijo. Posledica spremenjene temperature se odraža tudi v spremenjenih značilnostih zračnih mas nad tem morskim tokom, kar vpliva na ekstremne pojave v Južni Ameriki oziroma jugovzhodni Aziji in Avstraliji. Vplive teh sprememb je mogoče zaznati tudi v Severni Ameriki, v Indijskem oceanu, Afriki, delu Atlantskega oceana, v omiljeni obliki pa občasno tudi v Evropi.

V normalnem stanju se v ekvatorialnem pasu Tihega oceana odvija morski tok od zahodnih obal Južne Amerike do jugovzhodne Azije. S kompenzacijskimi tokovi ob obalah Južne Amerike na površje doteka hladnejša voda, ki je bogata s hranilnimi snovmi in daje odlično osnovo za tamkajšnje ribištvo.



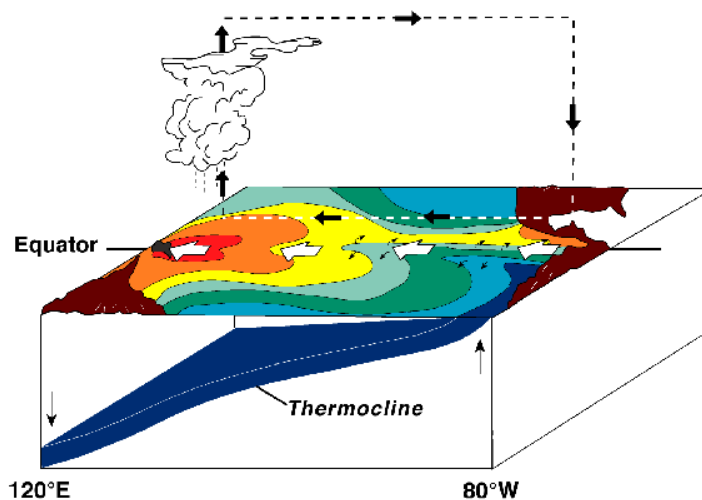
Slika 60: Običajna cirkulacija na območju Tihega oceana.

V situaciji El Nino se v osrednjem delu Tihega oceana temperatura morja dvigne za več kot 0,5 °C, zaradi česar se spremeni cirkulacijski sistem: območje nizkega zračnega tlaka v jugovzhodni Aziji (in s tem povezano konvekcijo ter obilno deževje) zamenja območje visokega zračnega tlaka (in s tem povezane visoke temperature ter suša).

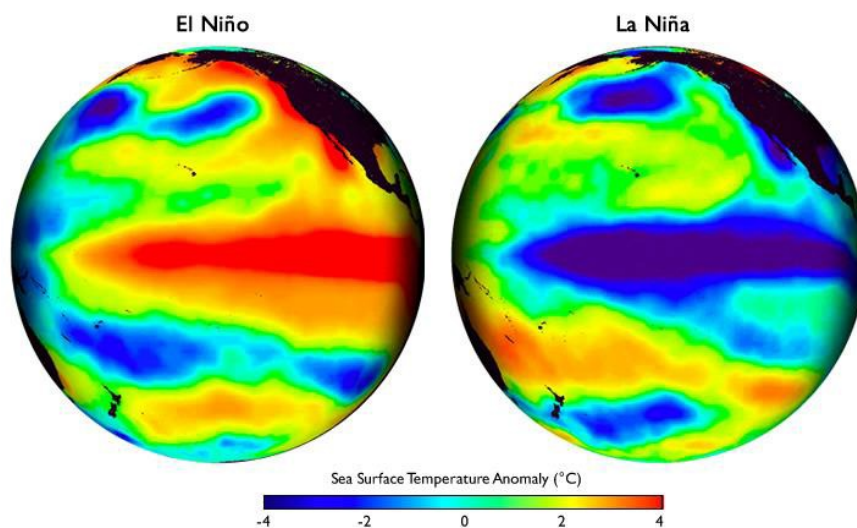


Slika 61: Cirkulacija v obdobju El Nino.

V situaciji La Nina je zgodba obratna: ob obalah Južne Amerike se nahaja območje visokega zračnega tlaka, v jugovzhodni Aziji pa se oblikuje izrazito območje nizkega zračnega tlaka. Nadpovprečno visoke temperature tam povzročajo močno konvekcijo vlažnega zraka in nadpovprečno količino padavin ter poplave.



Slika 62: Cirkulacija raka in morskih tokov v pogojih La Nina.



Slika 63: Razlike v temperaturah vodne mase med situacijami El Nino in La Nina lahko dosegajo 8 °C. Glede na vodno kapaciteto tako obsežnega morja to pomeni izrazit vpliv na temperature zraka in podnebje v širši okolici.

Anomalije El Nino se pojavljajo v nepravilnih intervalih od 2 do 12 let, trajajo pa od 9 mesecev do dveh let. Za situacije El Nino so značilni negativni indeksi južne oscilacije, situacije La Nina pa označujemo s pozitivnimi indeksi. Indekse južne oscilacije sicer izračunavamo na osnovi razlik v zračnem tlaku med otočjem Tahiti in Darwinom v Avstraliji.

Posledice epizod El Nino:

- nadpovprečno sušno obdobje v JV Aziji in v Avstraliji
- povečana količina padavin ob zahodnih obalah Južne Amerike
- vlažno obdobje v Južni Ameriki traja predvsem v obdobju april-oktober
- ob zahodnih obalah Južne Amerike je zmanjšan dotok hladne in s hranili bogate vode iz globin, zaradi česar je zmanjšan ulov rib. Take epizode so leta 1972 in 1982- 1983 močno prizadele ribištvo, ki je v nekaterih državah (Peru) pomembna gospodarska panoga.
- toplejše in sušnejše zime v Severni Ameriki se pojavljajo na severozahodu ZDA in v severnem delu srednjega zahoda.

-vlažnejše zime se pojavljajo na severozahodu Mehike, na jugozahodu ZDA in na jugu Kalifornije. Hladnejše in vlažnejše zime segajo tudi na jugovzhod ZDA.

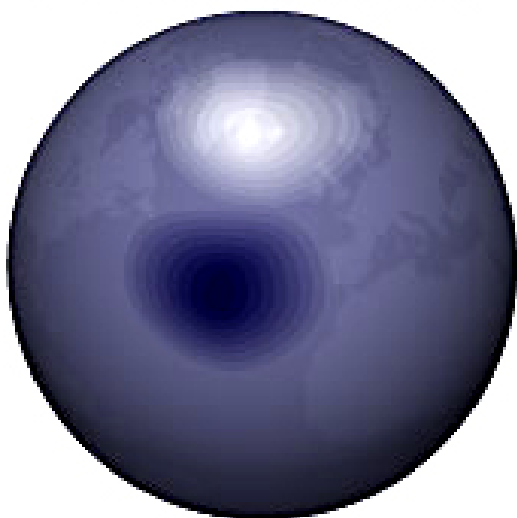
Vpliv El Nina na vreme v Evropi ni popolnoma pojasnjen, zanesljivo pa ni tako velik, kot na vreme v obeh Amerikah, v jugovzhodni Aziji in Avstraliji. Kljub temu se kažejo blage povezave med pojavi El Nina in vlažnejšimi in bolj oblačnimi zimami v severni Evropi ter blagimi in sušnejšimi zimami v Sredozemlju. Pojav El Nina je najverjetneje vplival na zelo toplo in s snegom revno zimo 2006/2007. Povezava med globalnimi podnebnimi spremembami in pogostejšimi pojavi El Nina v zadnjih desetletjih je zelo verjetna, čeprav mehanizem ni popolnoma poznan.

## 7. Severnoatlantska oscilacija (North Atlantic Oscillation – NAO)

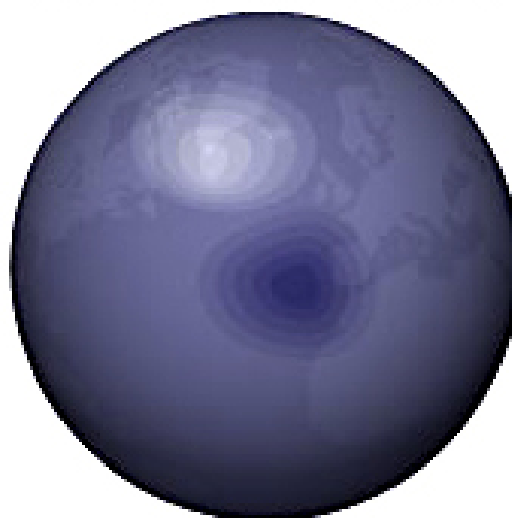
Severnoatlantska oscilacija je pojav, ki nastane zaradi razlik v zračnem tlaku med Islandijo (običajno se za referenčno meteorološko postajo uporablja Reykjavik) in Azorskim otočjem (meteorološka postaja Ponta Delgada):

- V primeru velike razlike (zelo nizek zračni tlak nad Islandijo, zelo visok zračni tlak nad Azori) je zahodna cirkulacija iz Atlantika nad Evropo okrepljena. Posledica so hladnejša poletja in milejše ter vlažnejše zime. Indeks NAO je pozitiven.
- V primeru majhnih razlik je zahodna cirkulacija oslABLJENA. Posledica tega so mrzle zime in vroča poletja. Indeks NAO je negativen.

### Pozitivni indeks NAO



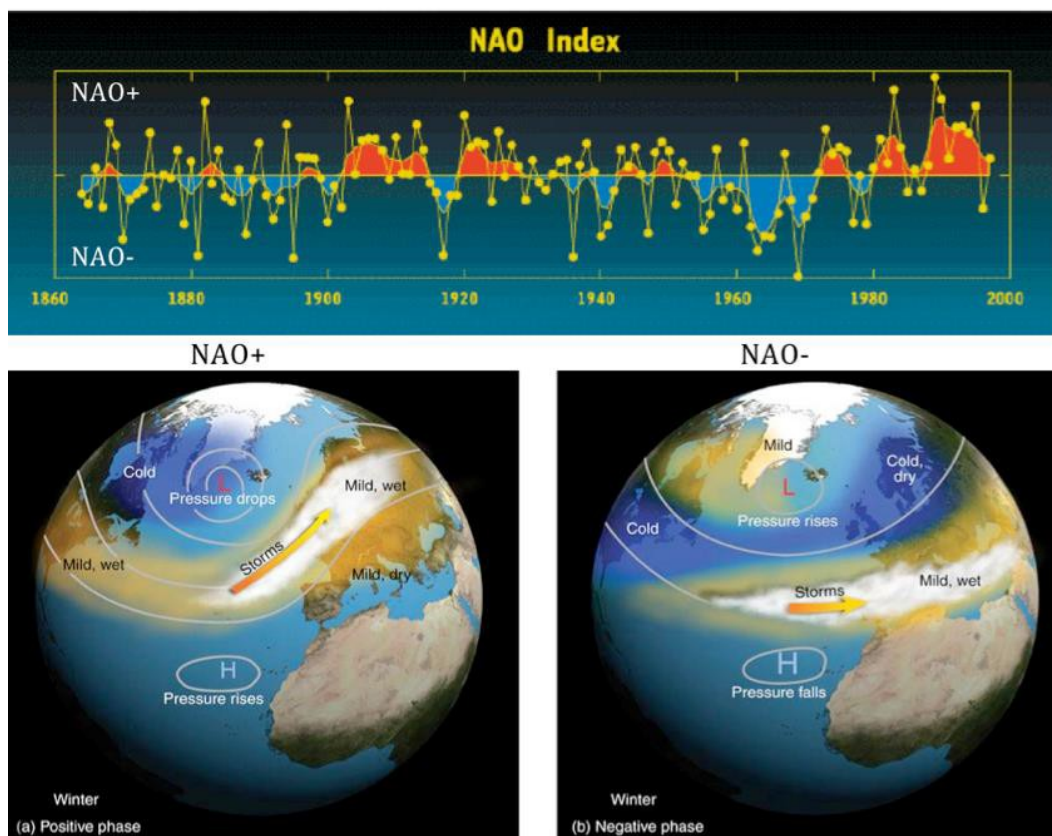
### Negativni indeks NAO



### Zračni tlak

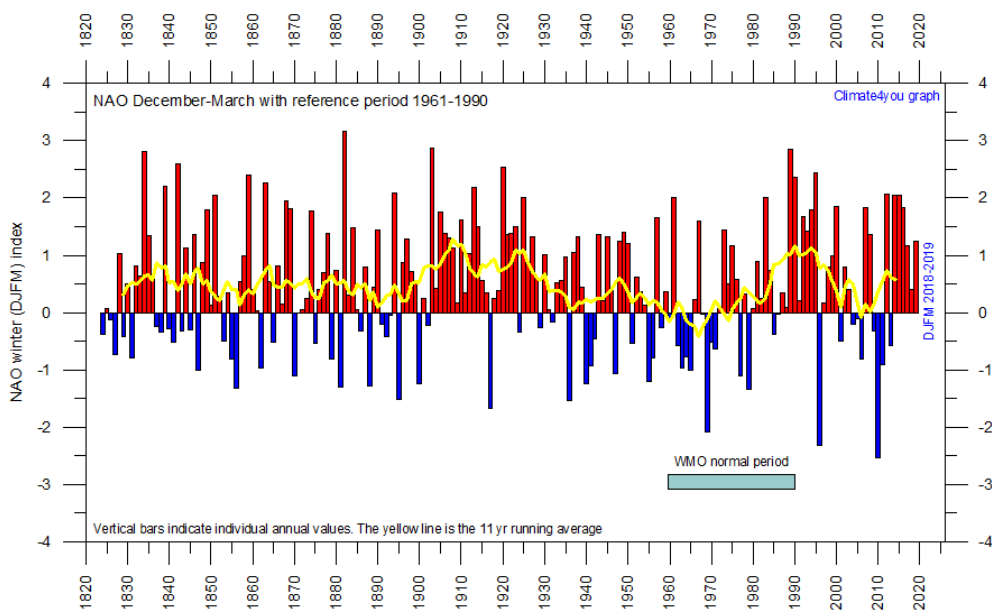


Slika 64: Predznak in vrednost indeksa Severnoatlantske oscilacije (NAO) sta odvisni od razlik v zračnem tlaku med Islandijo in Azorskim otočjem. Pozitivni indeks krepi zahodno cirkulacijo, negativni indeks jo duši.



Slika 65: Posledice pozitivnih in negativnih NAO indeksov na vreme in podnebje pozimi v Evropi.

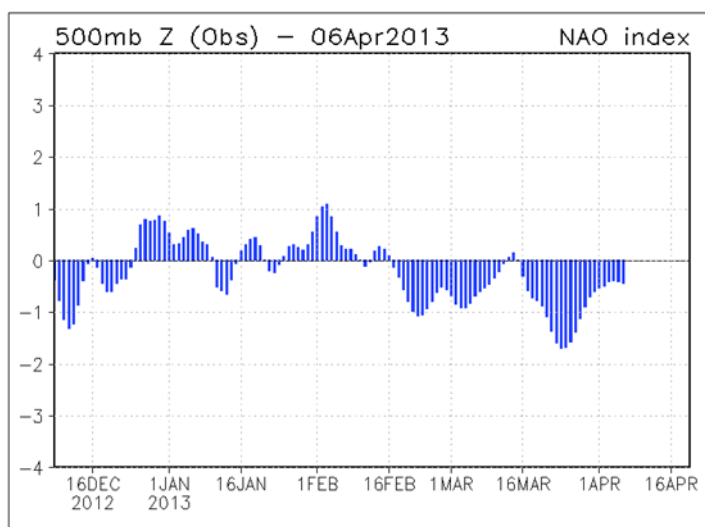
Časovna razporeditev indeksa NAO vpliva na ekstremne temperature. Mrzla zima 2009-2010 je bila v veliki meri posledica nizkega negativnega indeksa NAO, po drugi strani pa obstaja povezava med toplo in predvsem zelo suho zimo 2011-2012 in visokim pozitivnim indeksom NAO (Slika 66).



Slika 66: Vrednosti zimskih NAO indeksov po letu 1820.

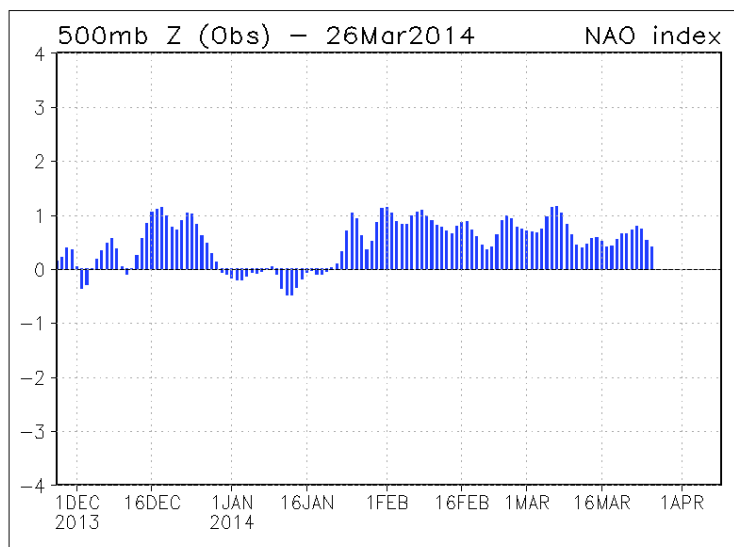


Dnevne vrednosti NAO so vplivale tudi na značilnost zime 2012-2013: očitne so bile povezave med nizkimi negativnimi vrednostmi NAO in nenavadno nizkimi temperaturami, povezanimi s snežnimi padavinami na začetku pomladi 2013. Snežna odeja je trajala vse do konca marca 2013.



Slika 67: Vpliv predznaka in vrednosti indeksa NAO na “podaljšano” zimo v marcu 2013.

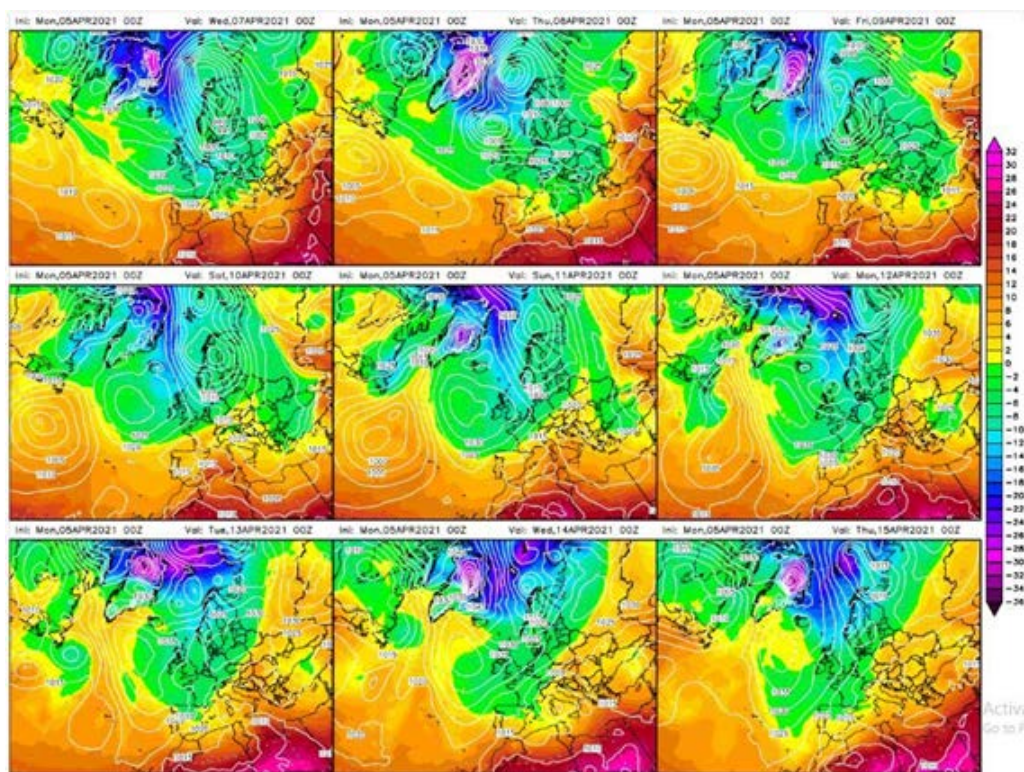
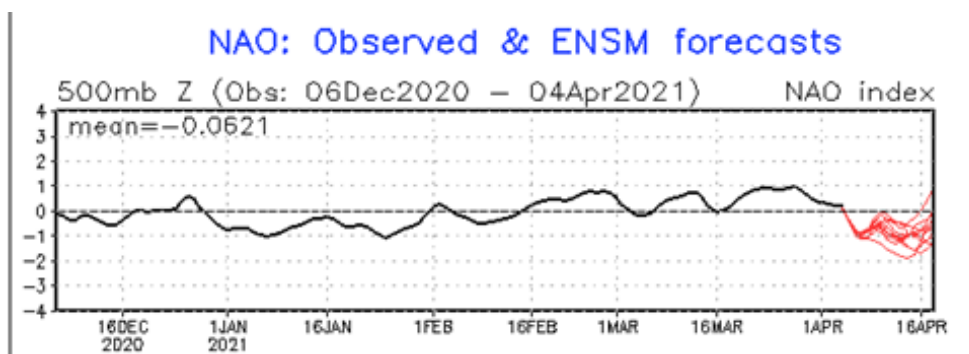
V zimi 2013-2014 smo imeli obratno situacijo. Med januarjem in marcem leta 2014 so prevladovali pozitivne vrednosti indeksa severnoatlantske oscilacije, razen v obdobju januarja. Govorili bi lahko o visoki korelaciji med temperaturami v srednji Evropi in indeksom NAO.



Slika 68: Vpliv predznaka in vrednosti indeksa NAO na toplo zimo med januarjem in marcem 2014.

Nizke ali negativne vrednosti severnoatlantske oscilacije zaradi oslabljenih zahodnih vetrov vplivajo tudi na večjo amplitudo polarne fronte in Rosbyjevih valov. V času negativnih indeksov NAO obstaja večja verjetnost, da bo polarna fronta vzalovila in z dolinami s hladnim zrakom prinašala polarni zrak v nižje geografske širine, kar lahko vpliva tudi na ekstremne pojave, kot so snežne padavine v Sredozemlju. Tak primer smo imeli tudi aprila 2021, ko je nastopilo

obdobje z izrazitim negativnim indeksom NAO in pojavom globoke doline s polarnim zrakom, ki je segala vse do severne Afrike. Taka obdobja so pri nas pomembna predvsem zaradi nevarnosti pojava pozebe v obdobju, ko je sadno drevje v fenofazi cvetenja, ali zaradi pojava sneženja v obdobju, ko je drevje že olistano, zaradi česar pride do povečane obtežbe vej in s tem povezanih snegolomov.



Slika 69: Povezava med NAO (zgoraj) in gibanjem polarne fronte v aprilu 2021 (spodaj).

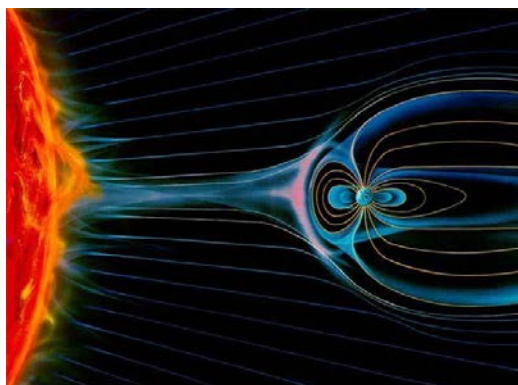
Analize Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research v Potsdamu v zadnjih letih kažejo na zanimivo povezavo med mrzlimi zimami v Srednji Evropi, ki sledijo nadpovprečno toplim "poletjem" v polarnem območju Arktike.

**Nadpovprečno intenzivno taljenje** snežnega in ledenega pokrova nad Arktiko povzroča **visoke temperature vode** v jeseni in zimi nad Arktiko, zaradi česar je **voda toplejša od zraka**. Posledica tega so **manjše razlike v tlaku med Arktiko in zmernimi geografskimi širinami** (negativni indeks polarne ali arktične oscilacije), kar **duši zahodno cirkulacijo**. V odsotnosti

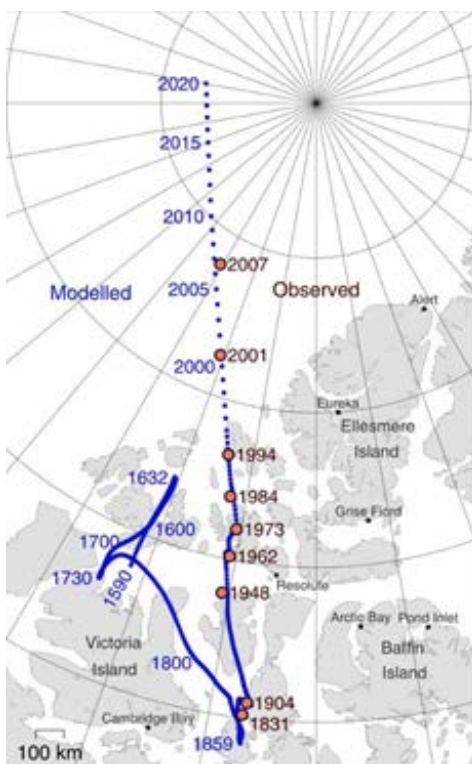
intenzivnejše zahodne cirkulacije imajo **polarne zračne mase olajšano pot v Srednjo Evropo**, zaradi česar so **zime na tem območju izrazitejše**.

### 8. Posredno lahko na podnebne značilnosti planeta vpliva tudi zemeljski magnetizem.

Zemeljsko magnetno polje obstaja zaradi konvekcije v kovinskem jedru in dovolj hitre rotacije Zemlje okoli svoje osi. Vsi planeti nimajo lastnega magnetnega polja (premajhno kovinsko jedro planeta, kovinsko jedro ni v tekočem ali poltekočem stanju, prepočasna rotacija planeta). Magnetno polje planet lahko varuje pred nevarnimi curki delcev s Sonca. Na Zemlji obstoj magnetnega polja zaznamo posredno s pomočjo uporabe kompasa ali ob pojavu polarnega sija. Magnetno polje na Zemlji ima obliko skoraj pravičnega dipola, pri čemer je os magnetnega polja glede na rotacijsko os trenutno nagnjeno za okoli  $11^\circ$ .



Slika 70 :Zemeljsko magnetno polje varuje naš planet pred škodljivim sevanjem Sonca.



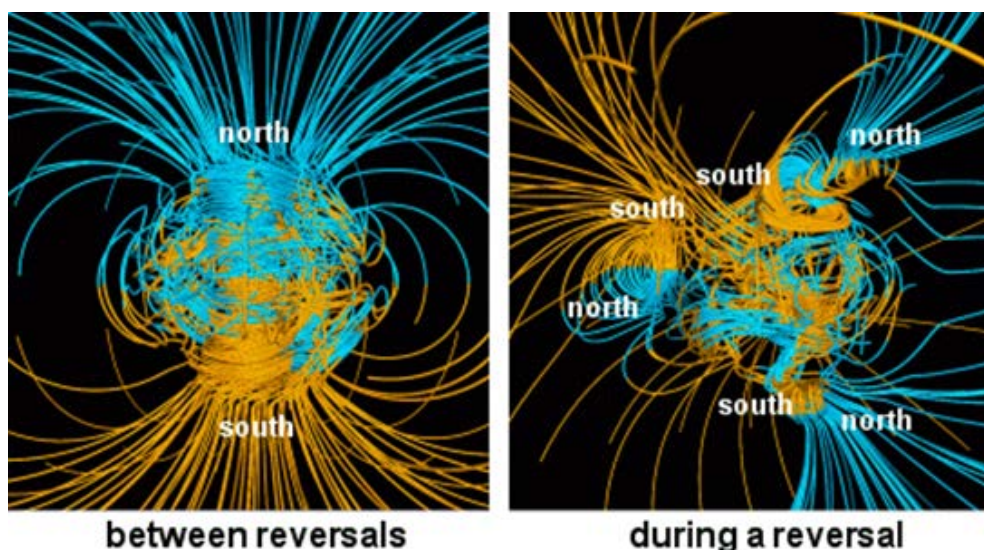
Slika 71: Os magnetnega polja ne miruje, pač pa se premika s hitrostjo okoli 40 km na leto. Na sliki so prikazane spremembe severnega magnetnega pola od 17. stoletja naprej.



V geološki zgodovini Zemlje smo bili priča obratom magnetnega polja. Obrati se pojavljajo s periodo od 100 000 let do 1 milijona let (po nekaterih avtorjih celo do 50 milijonov let). Sedanje magnetno polje v sorazmerno stabilnem položaju vztraja že zadnjih 780 000 let. Zamenjava magnetnega polja traja od 1000 do 10 000 let. Nekateri znaki kažejo, da se je pred 15 milijoni let magnetno polje obračalo s hitrostjo  $6^\circ$  na dan.

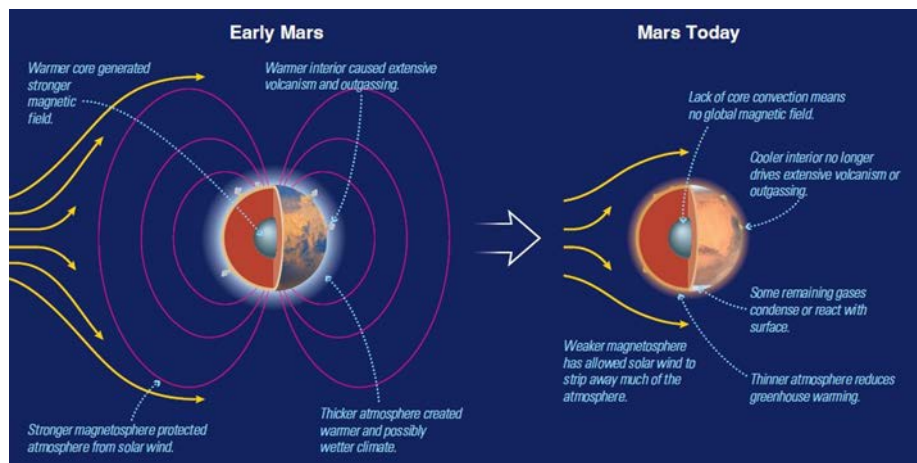
Vzroki za obrat magnetnega polja niso popolnoma znani, najbrž pa gre za posledice nastanka vozlov v zemeljskem magnetnem polju, zaradi česar se zgodi navidez paradokсна situacija, ko imamo na Zemlji več magnetnih severnih in južnih polov. Posledica tega je zamenjava polaritete. Nekateri geofiziki so mnenja, da so vzroki lahko povezani tudi s padci velikih teles na Zemljo.

Ob spremembah magnetnega polja jakost le-tega pade, kar lahko ima usodne posledice za podnebje in celo obstoj življenja na Zemlji. Zanimivo je, da se je intenzivnost zemeljskega magnetnega polja v zadnjih 150 letih zmanjšala za 10 – 15 %. Magnetno polje varuje atmosfero, predvsem ozon in vodo pred razpadom, ki bi se pojavil, če bi bile molekule izpostavljene UV sevanju.



Slika 72: Zemeljsko magnetno polje danes (leva slika) in v obdobju zamenjave magnetnih polov (desna slika). V tej fazi zemeljsko magnetno polje oslabi, pojavi pa se tudi več magnetnih severov in jugov.

Kaj bi se ob odsotnosti magnetnega polja utegnilo zgoditi na Zemlji nam kaže primer planeta Mars. Mars je pred tremi milijardami let doživel usodno spremembo: Marsovo magnetno polje je usahnilo, zaradi česar je Sončev veter uspešneje “odpihoval” atmosfero, med drugim CO<sub>2</sub> in vodo, ki sta oba toplogredna plina. Vedno bolj učinkovito UV sevanje je razbijalo molekule vode, pri čemer so prosti atomi vodika začeli uhajati v vesolje. Kisik je bil deloma odnesen v vesolje, deloma pa se je vezal v kamninah.



Slika 73: Izguba magnetnega polja na Marsu je vplivala na izginotje vode s površja Marsa.





Viri in literatura

- Houghton J., 2009 : Global Warming. The Complete Briefing. Cambridge University Press. Cambridge.
- Archer D., Rahmstorf S., 2010: The Climate Crisis, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ruddiman, W.F., 2014: Earth's Climate. Past and Future. Third edition. Macmillan Education. New York.
- Archer, D., Rahmstorf, S., 2010: The Climate Crisis. An Introductory Guide to Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Dessler, A., 2018: Introduction to Modern Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Alcamo, J., Olesen, J.E., 2012: Life in Europe Under Climate Change. Wiley-Blackwell. Chichester.
- Behringer, W., 2010: A Cultural History of Climate. Polity. Cambridge.
- Brooke, J.L., Climate Change and the Course of Global History. A Rough Journey. Cambridge University Press. Cambridge.
- Alley, R.B., 2000: The Two-mile Time Machine. Ice Cores, Abrupt Climate Change and Our Future. Princeton University Press. Woodstock.
- Washington, H., Cook, J., 2011: Climate Change Denial. Heads in the Sand. Earthscan. London.
- Cronin, T.M., 2009: Paleoclimates. Understanding Climate Change Past and Present. Columbia University Press. New York.
- AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.  
(<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>)
- Cook, J. 2010: Strokovni vodnik po dvomih o globalnem segrevanju  
([https://skepticalscience.com/docs/Guide\\_Skepticism\\_Slovenian.pdf](https://skepticalscience.com/docs/Guide_Skepticism_Slovenian.pdf))
- Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. Meteorološka opazovanja I. Urad za meteorologijo. ARSO. 2015.  
Ljubljana. <http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20I%20splet.pdf>
- Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. Meteorološka opazovanja II (A-O). Urad za meteorologijo. ARSO. 2015.  
Ljubljana. <http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20II%20A-O%20splet.pdf>
- Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. Meteorološka opazovanja II (P-Ž). Urad za meteorologijo. ARSO. 2015.  
Ljubljana. <http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20II%20P-Z%20splet.pdf>