ALTERNATOR
Misliti znanost.

Razumeti podnebne spremembe

20. 2. 2020

Številka: 04/2020

Avtor:

- Žiga Zaplotnik



Foto: Arne Hodalič

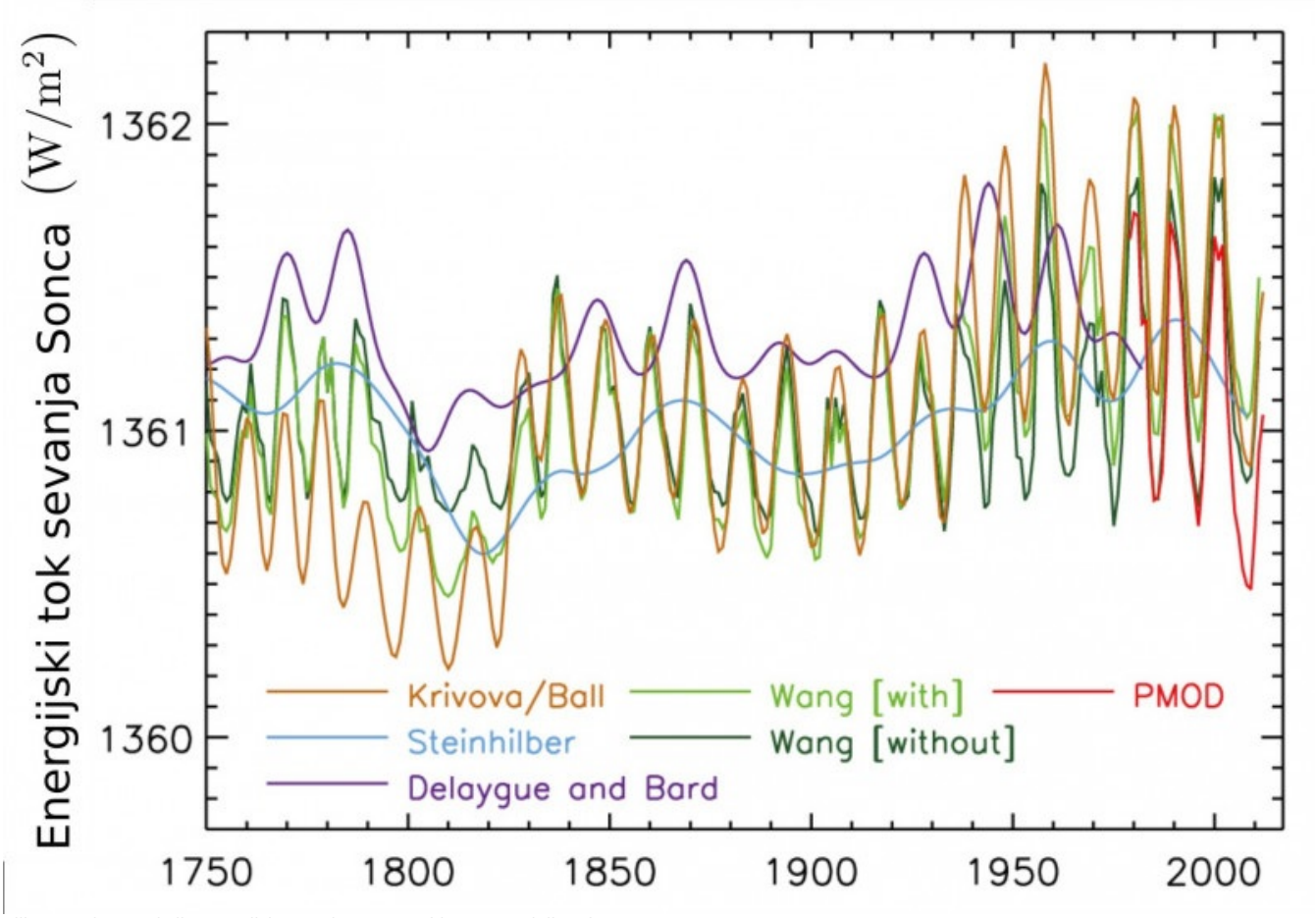
Zemljino ozračje je izjemno tanko v primerjavi z njenim premerom – približno tako kot list papirja napram debelini lubenice. Že na višini 5 km je gostota zraka le nekaj večja kot polovica gostote zraka na gladini morja – območju do te višine pravimo *pas življenja*. Že prvi raziskovalci ozračja, med njimi francoski matematik Joseph Fourier in švedski kemik, nobelovec Svante Arrhenius, so se zato zavedali, da smo ljudje zmožni spremeniti sestavo Zemljinega ozračja, preoblikovati njeno površje ter s tem spremeniti podnebje.

Dandanes je raziskovanje ozračja pravi čustveni vrtiljak. Dnevno analiziranje podatkov o trenutnem stanju podnebja ter o nemilih napovedih prihodnosti seveda poteši radovednost, četudi poznavanje vzrokov podnebnih sprememb in védenje, da smo trenutno zanje odgovorni le mi, ljudje, nenehno vzbuja občutek krivde. Dolgoletno zatiskanje oči odločevalcev ali celo zanikanje problema in trenutno odlašanje pri sprejemanju konkretnih, s strani znanosti večkrat predlaganih ukrepov za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov pa navdaja z gnevom. Trenutno nam ostane torej le, da kot tisti, ki zaradi podnebnih sprememb pozivamo h korenitim spremembam življenjskega sloga, z zgledom vodimo prav sami.

V sestavku bomo na kratko predstavili najpomembnejše in dobro raziskane vzroke za spremembe podnebja v zadnjih 150 letih ter tudi tiste pomembne komponente klimatskega sistema, ki so še vedno precej nedoločene. Hkrati upamo, da bomo prenekateremu bralcu odgrnili tančico pri razumevanju vzrokov za podnebne spremembe.

Sevalna bilanca Zemlje in toplogredni učinek

Daleč najpomembnejši vir energije na Zemlji je Sonce. Njegov energijski tok na oddaljenosti približno 150 milijonov km, kjer se nahaja Zemlja, je okrog 1361,5 W/m^2. Ta vrednost, t. i. solarna konstanta, niha z 11-letno periodo in z amplitudo 0,5 W/m^2 (prikaz na sliki spodaj). Za primerjavo – vsi ostali viri energije, npr. tok iz Zemljine notranjosti navzven, kozmično sevanje ter vpliv Lune (odboj Sončeve svetlobe in sevalni izsev) skupaj prispevajo manj kot 0,01 % Sončeve energije. Energija Sonca torej »poganja« klimatski sistem. Solarna konstanta je časovno spremenljiva – npr. v obdobju Daltonovega minimuma (1800–1820) je bila v povprečju za skoraj 1 W/m^2 nižja kot danes. Zadnjih 40 let se vrednost solarne konstante rahlo znižuje.

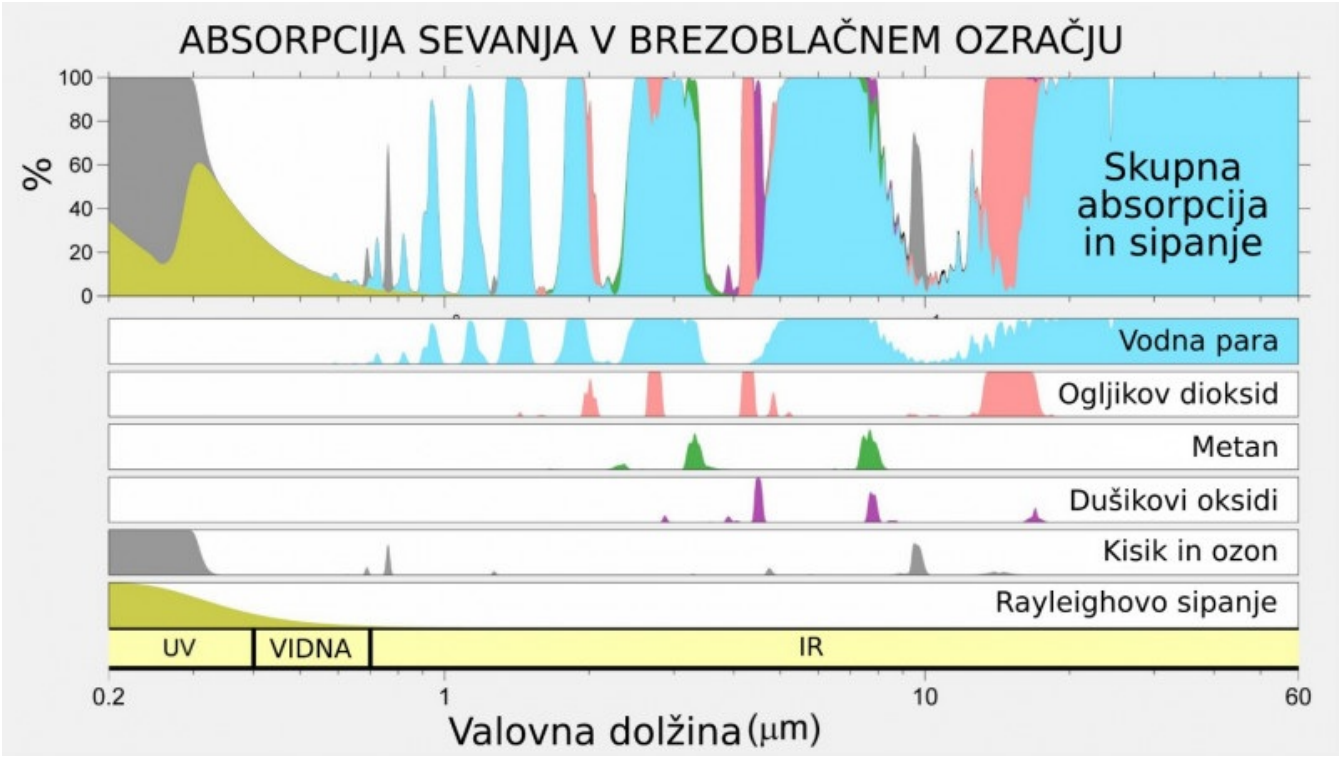


Slika 1: Rekonstrukcije energijskega toka Sonca od leta 1745 dalje. Vir: IPCC AR5.

Sončevo sevanje naenkrat obseva le polovico planeta pri različnem vpadnem kotu, zato efektivno Zemlja prejme le četrtino vrednosti solarne konstante. Od tega 30 % odbijejo (http://www.cgd.ucar.edu/staff/trenbert/trenberth.papers/BAMSmarTrenberth.pdf) nazaj v vesolje oblaki, plini v ozračju in tla. Zemlja torej v povprečju prek celega leta od Sonca prejme energijski tok ~240 W/m^2, se pri tem greje in tudi sama seva. V toplotnem ravnovesju, torej če se temperatura s časom ne spreminja, Zemlja izseva toliko energije, kot jo prejme. Če ne bi imela ozračja, bi bila njena ravnovesna temperatura površja -18 °C.

Razlika med to pričakovano ravnovesno temperaturo in dejansko povprečno temperaturo zraka blizu tal (15 °C) je vznemirjala že prve raziskovalce ozračja. Joseph Fourier je tako leta 1824 kot prvi omenil učinek tople grede, ki ga povzroča ozračje in ki preprečuje pomembnemu delu sevanja, da bi neovirano prešlo v vesolje. Učinek je nato leta 1859 dokazal irski fizik John Tyndall z merjenjem absorptivnosti posameznih plinov pri različnih valovnih dolžinah svetlobe. Pokazal je, da sta plina dušik (N_2) in kisik (O_2), katerih koncentracija je v ozračju največja, za Zemljino dolgovalovno (infrardeče, IR) sevanje prepustna. Nekateri drugi plini, katerih koncentracija pa je relativno nizka, npr. vodna para (H_2O), ogljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4), ozon (O_3) in dušikov dioksid (N_2O) pa IR sevanje učinkovito absorbirajo – posledično jih imenujemo toplogredni plini.

Bistvena lastnost toplogrednih plinov je torej, da interagirajo z IR sevanjem – elektromagnetnim valovanjem (EMV). Če se naboj v molekuli lahko prerazporedi (molekula efektivno postane električni dipol (https://www.researchgate.net/profile/Rudolf_Podgornik/publication/265237219_Elektromagnetno_polje/links/5413053a0cf2fa878ad3cf83/Elektromagnetno-polje.pdf?origin=publication_detail)), lahko nihajoče električno polje povzroči nihanje oz. vibriranje molekule (rečemo, da je molekula IR aktivna). Pri tem se energija sevanja prenese na molekulo – molekula sevanje absorbira. Posamezna molekula ima več vibracijskih načinov s točno določenimi frekvencami, zato jo lahko vzbudi le sevanje pri teh frekvencah (valovnih dolžinah) oz. v njihovi bližnji okolici (prikaz na sliki spodaj). V največjem delu spektra sevanja je najpomembnejši absorber vodna para. CO_2 najpomembneje absorbira sevanje z valovno dolžino okoli 15 µm, torej blizu maksimuma Zemljinega izseva pri 10 µm. Pri 15 µm vodna para še prepušča sevanje oz. spektralni pas še ni absorpcijsko nasičen, zato je CO_2 tam pomemben absorber. Pomembno je poudariti še, da prikaz na spodnji sliki velja pri povprečni koncentraciji vodne pare v atmosferskem stolpcu, čeprav ta močno variira v času in prostoru – manj kot je vodne pare, večji relativni vpliv ima CO_2.

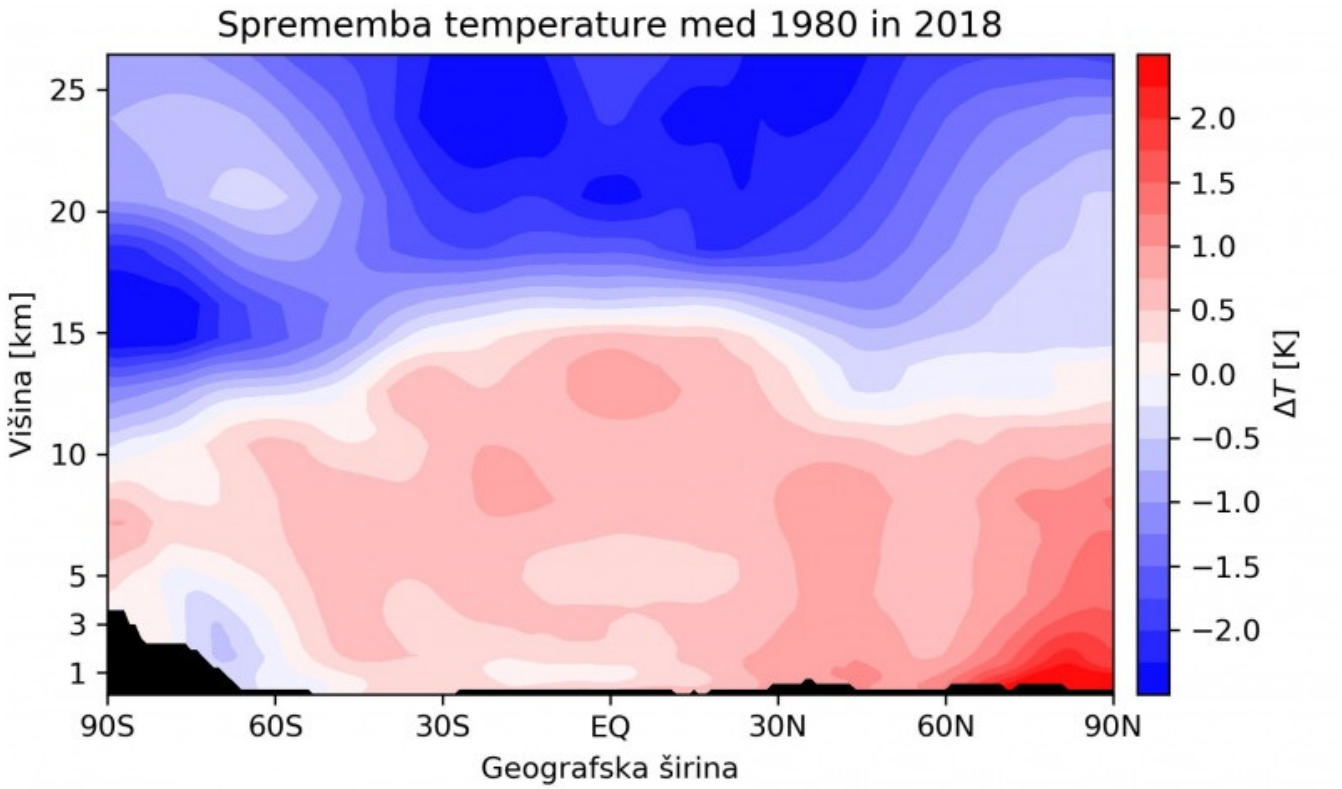


Slika 2: Prepustnost brezoblačnega ozračja za sevanje različnih valovnih dolžin za vse toplogredne pline skupaj in za vsakega posebej. Prirejeno po: dr. Robert Rohde, Berkeley Earth.

Ko molekula sevanje absorbira, se lahko zgodi dvoje: 1) vzbujena molekula prenese vibracijsko energijo (toploto) drugi molekuli ob »trku« z njo ali 2) molekula emitira sevanje (lahko v katerokoli smer) z enako energijo in valovno dolžino, kot je bilo prejeto sevanje. V spodnjem, gostejšem delu ozračja je povprečni čas med dvema trkoma molekul krajši od povprečnega časa, v katerem se energija izseva, zato se pogosteje zgodi prvo. V višjem, redkejšem delu ozračja pa se verjetneje zgodi drugo. Če se spuščamo skozi ozračje navzdol, je gostota zraka vedno večja, hkrati pa se sorazmerno povečuje tudi gostota posameznih toplogrednih plinov, zato je tudi absorpcija Zemljinega IR sevanja vse močnejša. Posledično je večji tudi tok sevanja navzdol proti tlom in tudi navzgor, vse višja pa je tudi temperatura.

Čeprav ozračje skupno pri neki valovni dolžini ne prepušča sevanja (oz. je absorpcijsko nasičeno, kot je prikazano na zgornji sliki), pa posamezne plasti ozračja niso nujno nasičene. Posledično bo toplogredni efekt pri naraščajoči koncentraciji toplogrednih plinov še vedno naraščal, vendar vedno počasneje, približno logaritemsko (https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wea.2072) . Pri trenutni koncentraciji CO_2 bi zato njena podvojitev pomenila dvig temperature le za 1 °C. Posledično se zviša tudi največja količina vodne pare (https://en.wikipedia.org/wiki/Clausius%E2%80%93Clapeyron_relation) , ki je lahko v zraku. Zaradi močnejšega izhlapevanja količina vodne pare naraste (https://zaplotnik.github.io/posts/2020/01/increase_spec_hum/) , še posebej v spodnji troposferi na območju ekvatorja, kjer je vodne pare tudi sicer največ. Vodna para je najmočnejši toplogredni plin, zato temperatura še dodatno naraste, v zraku je tako lahko še več vodne pare in tako naprej. Vodna para pri podvojitvi koncentracije CO_2 več kot podvoji (https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL035333) toplogredni učinek CO_2. Opisan efekt je najmočnejša povratna zanka v našem ozračju. Še ena pomembna povratna zanka, ki dodatno krepi ogrevanje, je sprememba porazdelitve oblačnosti (https://www.nature.com/articles/nature18273) : oblaki se zaradi ogrevanja in razširitve troposfere nahajajo višje, zaradi razširitve tropske (Hadleyeve) cirkulacije pa se je njihova povprečna porazdelitev premaknila bližje poloma.

Toplogredni plini dvignejo temperature blizu površja kar za 33 °C, torej ni presenetljivo, da povišanje njihove koncentracije še dodatno segreje ozračje. Globalna povprečna temperature se je zvišala že za več kot 1 °C glede na predindustrijsko dobo (https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-16-0007.1) . Ogrevanje je najmočnejše v severnih polarnih predelih, v zmernih širinah in v zgornji troposferi na območju ekvatorja (prikaz na spodnji sliki). Medtem ko se je spodnji del ozračja (troposfera) ogrel, so se višje plasti (npr. stratosfera) začasno ohladile (https://www.earth-syst-dynam.net/7/697/2016/esd-7-697-2016.pdf) . Trenutno Zemlja izseva v vesolje 0,5–1 W/m^2 manj sevanja (https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JCLI-D-13-00294.1) , kot ga prejme od Sonca.



Slika 3: Sprememba povprečne letne temperature med 1980 in 2018 kot funkcija geografske širine in nadmorske višine. Izračunano na podlagi reanaliz ERA5, ki jih izračunava ECMWF.

Klimatski modeli in njihove pomanjkljivosti

Modelske projekcije prihodnjega podnebja temeljijo na 1) računalniških simulacijah podnebnega sistema s sklopljenimi numeričnimi modeli ozračja, oceanov, tal in 2) predvidevanjih o prihodnjih izpustih CO_2, ostalih toplogrednih plinov ter drugih faktorjev, ki vplivajo na podnebje (sončevi cikli, raba tal itd.). To pomeni, da so tudi projekcije najboljših fizikalnih modelov ozračja nenatančne, če so netočni vhodni podatki o izpustih toplogrednih plinov.

Primerjava z meritvami kaže, da so klimatski modeli različnih kompleksnosti v preteklih petih desetletjih natančno napovedali (https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL085378) spremembe povprečne temperature na površju Zemlje, še posebej, če so bili tudi vhodni podatki, torej projekcije koncentracij toplogrednih plinov, natančno napovedani.

Relevantno vprašanje je, kako lahko napovemo podnebje čez nekaj desetletij, če lahko dandanes stanje vremena uspešno napovemo le za dober teden (https://www.nature.com/articles/nature14956) vnaprej (pridobimo sicer en dan uporabne napovedi na desetletje). Četudi bi imeli popoln model ozračja in skoraj popolno oceno začetnega stanja, bi se zaradi nelinearnosti procesov v ozračju naša napoved vremena sčasoma razlikovala od dejanskega stanja (https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(1963)020%3c0130:DNF%3e2.0.CO;2) . Ta pojav je slikovito opisal ameriški matematik in meteorolog Edward Norton Lorenz, pionir teorije kaosa: »Zamah metuljevih kril v Braziliji lahko povzroči tornado v Teksasu.« Ključno je torej razlikovati med *vremenom* in *podnebjem* – vreme je trenutno stanje ozračja, podnebje pa je (strogo matematično gledano) verjetnostna porazdelitev stanj vremena preko daljšega časovnega obdobja, ki jo opišemo z znanimi statističnimi pojmi – s povprečjem spremenljivk (temperature, tlaka, vetra, vlažnosti, padavin), njihovimi odkloni in ekstremi.

S klimatskimi modeli simuliramo razvoj vremena, stanja oceanov in tal, vendar nas ne zanima, kakšne bodo dejansko razmere npr. 1. januarja 2080 (teoretično tega niti ne moremo točno napovedati), temveč nas zanima, kakšna bo verjetnostna porazdelitev stanj vremena v nekem prihodnjem desetletju, kar pa ob dobrem poznavanju fizikalnih procesov v klimatskem sistemu lahko napovemo. Spremenjena sevalna bilanca zaradi naraščajoče koncentracije toplogrednih plinov namreč spremeni porazdelitev vremenskih stanj.

Prej opisani glavni dejavniki dviga globalne povprečne temperature so znani, jasni in slonijo na nedvoumnih fizikalnih principih. Čeprav je »pahljača« napovedi klimatskih modelov precej široka, pa vsi modeli v skladu z osnovno fiziko kažejo pomemben dvig temperature. Vseeno imajo klimatski modeli še mnoge pomanjkljivosti (https://www.pnas.org/content/116/49/24390) , o katerih pa izven znanstvenih srečanj le redko govorimo. Razlog je utemeljen: »Politična situacija, v kateri nekateri vplivni ljudje in institucije napačno predstavljajo dvom o nečem, da bi spodbudili dvom o vsem, vsekakor prispeva k našemu odklanjanju, da bi bili bolj odkrito kritični do klimatskih modelov« (Tim Palmer, Bjorn Stevens).

Zaradi računske zahtevnosti so klimatski modeli nizkoločljivostni (razdalja med sosednjimi računskimi točkami je tipično večja od 100 km), kar pomeni, da lokalnih značilnosti sprememb podnebja ne morejo realistično simulirati. Precej nedoločen je še vedno vpliv različnih vrst aerosolov na sevalno bilanco. Da bi te vplive bolje razumeli, bo Evropska vesoljska agencija (ESA (https://www.esa.int/)) v letu 2021 izstrelila satelit EarthCARE (https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/BAMS-D-12-00227.1?mobileUi=0) , pridobljene meritve aerosolov pa bi lahko uporabljali tudi za druge namene, npr. za boljšo določitev polja vetra (https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3743#.Xhxxocn5Iwl.twitter) v začetnem pogoju za numerično napoved vremena.

Klimatski modeli pomanjkljivo napovedujejo naravno variabilnost, npr. noben model ni predvidel stagnacije globalne povprečne temperature med 2001 in 2012. Za slednje je bila kriva okrepitev pasatov (https://www.nature.com/articles/nclimate2106) in ekvatorialnih vzhodnikov in posledično dviganje hladne oceanske vode iz globin na površje v osrednjem in vzhodnem Pacifiku (podobno kot ob pojavu, imenovanem *La Niña*). Hladnejša voda je na širšem območju tropov ohlajala tudi ozračje.

Primerjava sklopljenih modelov 5. generacije (CMIP5) razkrije (https://www.pnas.org/content/pnas/116/49/24390/F1.large.jpg) , da se različne modelske simulacije globalne povprečne temperature blizu tal razlikujejo med seboj za več kot dvakrat toliko, kot je magnituda ogrevanja, hkrati pa tudi precej več od 0,5 °C, kolikor znaša ocenjena negotovost meritev temperature. Vsi modeli skladno z osnovno fiziko predvidevajo ogrevanje, kar pomeni, da smer trenda ni negotova, temveč da med 40 različnimi klimatskimi modeli dvajsetih različnih raziskovalnih skupin (institucij) kar nekaj modelov ni na zadostno visoki ravni, da bi njihovi rezultati lahko prispevali k zanesljivi statistični oceni negotovosti napovedi dviga globalne povprečne temperature.

Kako naprej?

Namesto porasta nizkoločljivostnih klimatskih modelov bi bilo smiselneje združiti (vsaj) evropske napore in simulirati klimo z manj modeli, ki pa bi imeli manjše regionalne sistematske napake, tekli pa bi na višji ločljivosti, primerljivi z najboljšimi numeričnimi modeli za napovedovanje vremena. Manjša nedoločenost napovedi bi hkrati povečala zaupanje javnosti v klimatske modele.

Vroče področje raziskovanja v klimatski znanosti je, kako se bodo zaradi ogrevajoče se troposfere spremenili vremenski vzorci. Zaradi zmanjšanja temperaturnih razlik med arktičnimi polarnimi predeli in severnimi zmernimi geografskimi širinami je že oslabel arktični polarni vrtinec, polarna fronta pa se je na severni polobli premaknila proti severu. Naši preliminarni rezultati kažejo celo, da se bo povečala energija v tistih planetarnih (Rossbyjevih) valovih, ki vodijo do atmosferskih blokad, t. j. situacij, ko nad nekim območjem dlje časa vztraja isti tip vremena, kar pogosteje vodi v ekstreme.

V zvezi s segrevanjem ozračja kroži tudi v širši znanstveni skupnosti mnogo mitov. Eden takih je, da bi lahko prišlo v Evropi do občutne ohladitve, če bi zaradi taljenja grenlandskega ledu oslabel Zalivski tok. To ne drži, saj sta glavna vzroka za relativno visoke temperature v zahodni in severozahodni Evropi stalen prenos toplote (http://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/gs/pubs/Seager_etal_QJ_2002.pdf) z Z in JZ vetrovi, ki so posledica orografskega Rossbyjevega vala, ki nastane v zavetrju Skalnega gorovja, ter sezonsko shranjevanje toplote v Atlantskem oceanu poleti in oddajanje v zrak pozimi.

Trenutno že prihajajo prvi rezultati simulacij sklopljenih klimatskih modelov 6. generacije (CMIP6 (https://www.nature.com/articles/s41558-019-0599-1)). Rezultati so skrb vzbujajoči – napovedana ravnovesna občutljivost (https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_sensitivity) klimatskega sistema pri podvojitvi koncentracije CO_2 v zraku je pri tretjini končanih simulacij višja od 4,7 °C (https://www.nature.com/articles/s41558-019-0660-0) , kar je približno 1 °C več kot pri starih (CMIP5) modelskih simulacijah, predvsem na račun močnejše povratne zanke oblačnosti (https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL085782) na sevalno bilanco. Klimatski sistem je torej najverjetneje še bolj občutljiv na podvojitev koncentracije CO_2 v zraku, kot so predvidevale pretekle ocene. Slednje še bolj odločno poudarja nujnost takojšnjega sprejetja ukrepov (https://nextcloud.fmf.uni-lj.si/s/4M4JaMeXM8dKWtr#pdfviewer) za blaženje podnebnih sprememb in prilagajanje nanje.