

PODNEBNE SPREMEMBE V PRIHODNOSTI IN NEGOTOVOST NJIHOVIH NAPOVEDI

Klemen Bergant*



Povzetek

Podnebne napovedi temeljijo na izračunih podnebnih modelov, pri katerih so upoštevani različni možni scenariji izpustov toplogrednih plinov in delcev. Modeli splošne cirkulacije omogočajo izračune prihodnjih stanj podnebja za celotno zemeljsko oblo in dobro opišejo splošne lastnosti podnebja na obsežnejših območjih. Vendar je prostorska natančnost izračunov s takšnimi modeli običajno premajhna, da bi bili njihovi rezultati uporabni v študijah vpliva podnebnih sprememb. Takrat si pomagamo z različnimi pristopi prehoda na višjo ločljivost, ki nam omogočijo prostorsko natančnejšo informacijo o predvidenih podnebnih spremembah. V članku so prikazani primeri podnebnih napovedi ob uporabi modelov splošne cirkulacije in dinamičnega prehoda na višjo ločljivost, s katerimi so bile narejene ocene podnebnih sprememb za Slovenijo. Takšne podnebne napovedi spremljajo številne negotovosti, ki se jih moramo pri njihovi razlagi zavedati.

Ključne besede: podnebne spremembe, napovedi, negotovost

Abstract

Climate predictions are based on climate model calculations that take into account different emission scenarios for greenhouse gasses and aerosols. Global circulation models provide useful information on future climate for the entire globe and reliably describe climate variability in large scale. On the other hand, their results are often not useful in climate impact studies, due to their low spatial resolution. In such cases, downscaling to higher resolution is needed to obtain the needed climate information. The paper present some examples of the use of global circulation models, and dynamical downscaling that can provide information on expected climate change for Slovenia. Such climate predictions are accompanied by a large amount of uncertainty that we need to be aware of when interpreting the results of climate models.

Key words: climate change, predictions, uncertainty

* Doc. dr. Klemen Bergant, Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za meteorologijo, Ljubljana
Univerza v Novi Gorici, Center za raziskave atmosfere, Nova Gorica
Klemen.Bergant@gov.si

COBISS: 1.02

Uvod

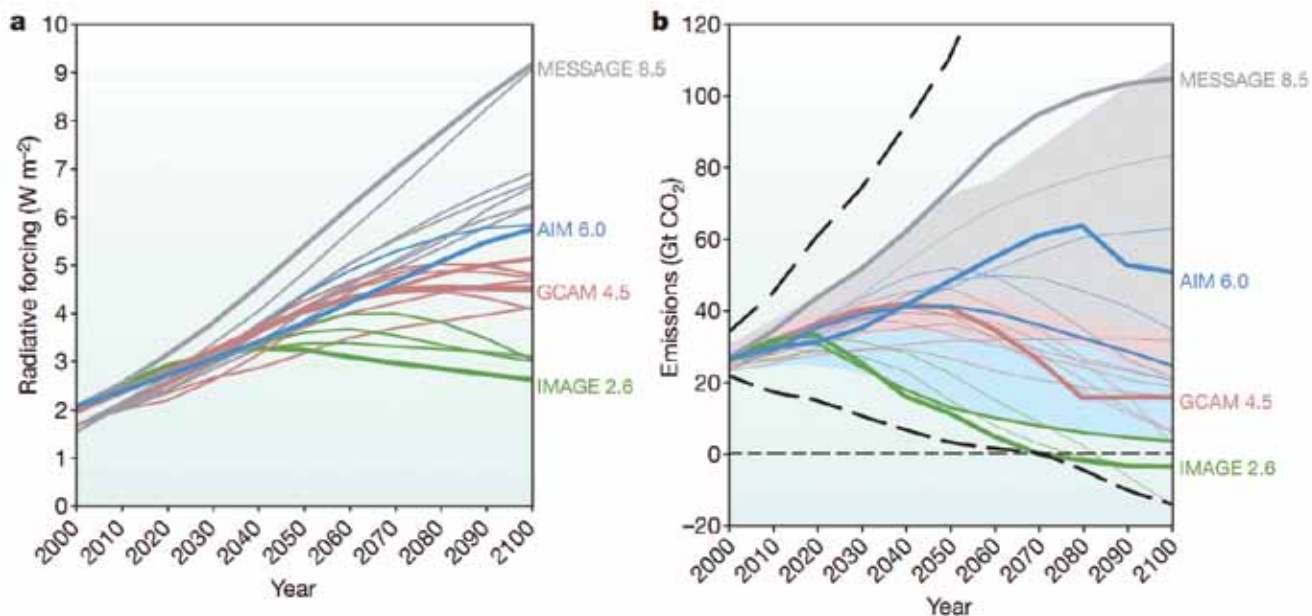
Razvoj znanosti in opazovanj na področju podnebnih sprememb nam omogoča boljše razumevanje spremenljivosti podnebja na Zemlji in odziva podnebnega sistema na naravne in človeške dejavnike (Moss in sod., 2010). Dejavniki, ki povzročajo podnebne spremembe, imajo raznoliko

Scenariji izpustov toplogrednih plinov in delcev

časovno skalo. Za pojav ledenih dob, ki se ponavljajo približno vsakih 120.000 let, so krive predvsem ponavljajoče se spremembe poti kroženja Zemlje okrog Sonca, nagiba osi vrtenja Zemlje glede na ravnino kroženja ter usmerjenosti te osi (npr. Hartman, 1994). Ti dejavniki vplivajo na sončno energijo, ki prispe do Zemlje, in njeno razporeditev po geografskih širinah. Po drugi strani pa hitrim podnebnim spremembam v zadnjih 150 letih botruje predvsem človek (Solomon in sod., 2007). Z izpusti toplogrednih plinov in trdnih delcev človeštvo spreminja lastnosti ozračja, z naseljevanjem in obdelovanjem lastnosti zemeljskega površja. Oba človeška dejavnika vplivata na energijsko bilanco površja in s tem na segrevanje kopnega in oceanov ter na vzorce kroženja oceanov in ozračja.

Posledice podnebnih sprememb na okolje in družbo ne bodo odvisne le od odziva zemeljskega sistema na spremenjeno energijsko bilanco, temveč tudi od odziva človeštva prek sprememb v tehnologiji, gospodarstvu, življenjskih navadah in politiki (Moss in sod., 2010). Upoštevajoč takšne spremembe lahko izdelamo različne možne scenarije izpustov toplogrednih plinov in delcev, ki nam služijo za oceno predvidenega vpliva človeštva na podnebje v prihodnosti. Spremenjena vsebnost toplogrednih plinov in delcev v ozračju pomeni ključni vhodni podatek za podnebne modele, s katerimi ocenjujemo spremembe v energijski bilanci Zemlje, in posledičen odziv podnebnega sistema. K spremembam podnebja pa ne pripomore zgolj spremenjena energijska bilanca, temveč tudi sama notranja spremenljivost podnebnega sistema. In prav scenariji izpustov toplogrednih plinov in delcev, podnebni modeli in notranja spremenljivost podnebnega sistema pomenijo tri osnovne vire negotovosti v podnebnih napovedih (Hawkins in Sutton, 2009, 2011; Yip in sod., 2011).

Za potrebe petega poročila Medvladnega foruma za podnebne spremembe (angl. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), katerega izdaja je predvidena za leto 2013, so bili pripravljene novi scenariji izpustov toplogrednih plinov in delcev. Razdeljeni so v štiri osnovne skupine, katerih oznake kažejo na prispevek povišanih vsebnosti toplogrednih plinov k energijski bilanci površja Zemlje ob koncu 21. stoletja (Slika 1). V primeru RCP8.5/MESSAGE bo ta prispevek večji od $8,5 \text{ W/m}^2$, v primeru RCP6.0/AIM bo znašal približno 6 W/m^2 in se po letu 2100 ustalil, v primeru RCP4.5/GCAM približno $4,5 \text{ W/m}^2$, v primeru RCP2.6/IMAGE pa naj bi bil največji prispevek povišanih vsebnosti toplogrednih plinov dosežen že pred letom 2100 in bi znašal približno 3 W/m^2 ter se nato postopoma zmanjševal in leta 2100 dosegel približno $2,6 \text{ W/m}^2$ (Moss in sod., 2010). Pri tem je dobro poudariti, da bi se glede na predindustrijsko dobo povprečne temperature zemeljskega površja do konca 21. stoletja povečale za manj kot dve stopinji Celzija samo ob uresničitvi najbolj optimističnega scenarija izpustov toplogrednih plinov in delcev RCP2.6/IMAGE, ki predvideva hitro zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov že po letu 2020. Če se bo uresničil kateri koli od preostalih skupin scenarijev, bo meja dveh stopinj presežena, pri najbolj črnem scenariju RCP8.5/MESSAGE s stalno rastjo izpustov toplogrednih plinov že pred letom 2020 (Furevik in Jansen, 2011). Prag 2° C se namreč šteje kot meja, do katere naj bi bile razmere na Zemlji še varne za človeštvo z vidika negativnih posledic podnebnih sprememb (Rockström in sod., 2009).



Slika 1: Spremenjena globalna energijska bilanca površja zaradi povečanih vsebnosti toplogrednih plinov in delcev glede na predindustrijsko dobo (a) in predvideni izpusti ogljikovega dioksida iz energije in industrije (b). Odebeljene črte pomenijo izbrane scenarije štirih ključnih skupin, tanke črte pa posamezne predstavnike teh skupin

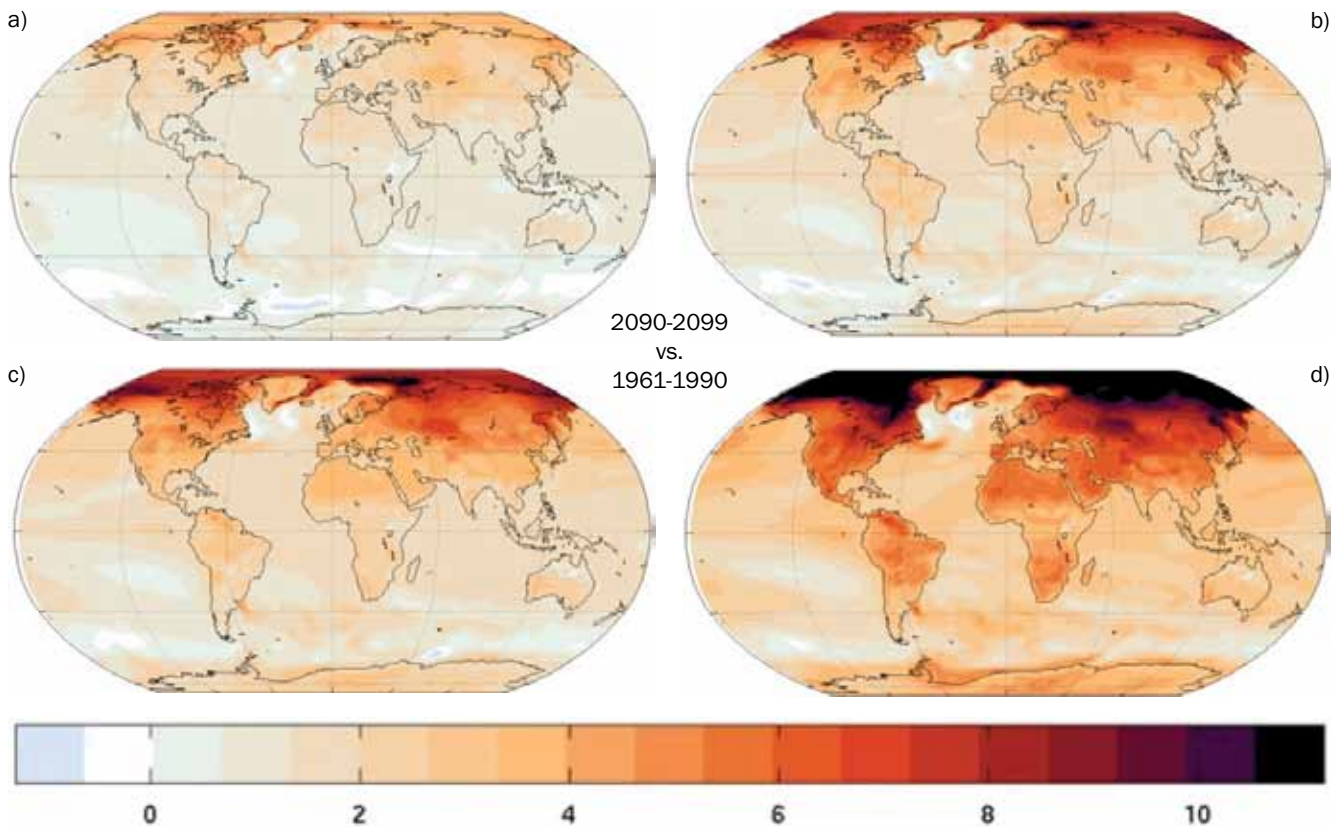
(Moss in sod., 2010).

Napovedi podnebnih sprememb

Podnebje je sicer kaotičen sistem, ki mu ne moremo leta vnaprej natančno napovedati stanja (Lorenz, 1963). Ob predpostavkah o razvoju družbe, posledičnih izpustih toplogrednih plinov in delcev pa lahko ocenimo, kako bo človeštvo vplivalo na lastnosti ozračja in kako se bo to odražalo na podnebju (Benestad, 2003). Pri tem si pomagamo z različnimi podnebnimi modeli.

Ocene prihodnjih podnebnih razmer za celotno zemeljsko oblo običajno temeljijo na izračunih sklopljenih modelov splošne cirkulacije. Gre za tri-dimenzionalne numerične modele, ki vključujejo opise glavnih fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov v ozračju, oceanih, ledu in na zemeljskem površju ter njihovo medsebojno odvisnost (McGuffie in Handerson-Sellers, 1997). Primer izračunov sprememb temperature zemeljskega površja ob koncu 21. stoletja v primerjavi z obdobjem 1961–1990 s sklopljenim modelom splošne cirkulacije je ob uresničitvi različnih scenarijev izpustov toplogrednih plinov in delcev prikazan na sliki 2 (Furevik in Jansen, 2011). Ne glede na scenarij izpustov lahko opazimo podobne prostorske vzorce spremembe temperature, in sicer močnejše ogrevanje kopnega od oceanov ter še posebej izrazito ogrevanje visokih severnih geografskih širin. Izračuni istega modela tudi kažejo (Furevik in Jansen, 2011), da bo na večjem delu kopnega dvig temperature, ne glede na scenarij, v nekaj desetletjih presegel 2°C glede na predindustrijsko dobo.

Nezadostna prostorska natančnost rezultatov splošne cirkulacije ostaja ena glavnih slabosti z njimi pridobljenih podnebnih napovedi. Kljub temu da se z razvojem računalnikov in vse bolj podrobnim opisom podnebnih procesov prostorska ločljivost modelov splošne cirkulacije povečuje, njihovi rezultati dovolj dobro opišejo podnebje in njegovo spremenljivost nad obsežnimi geografskimi območji. V študijah vpliva pa pogosto potre-



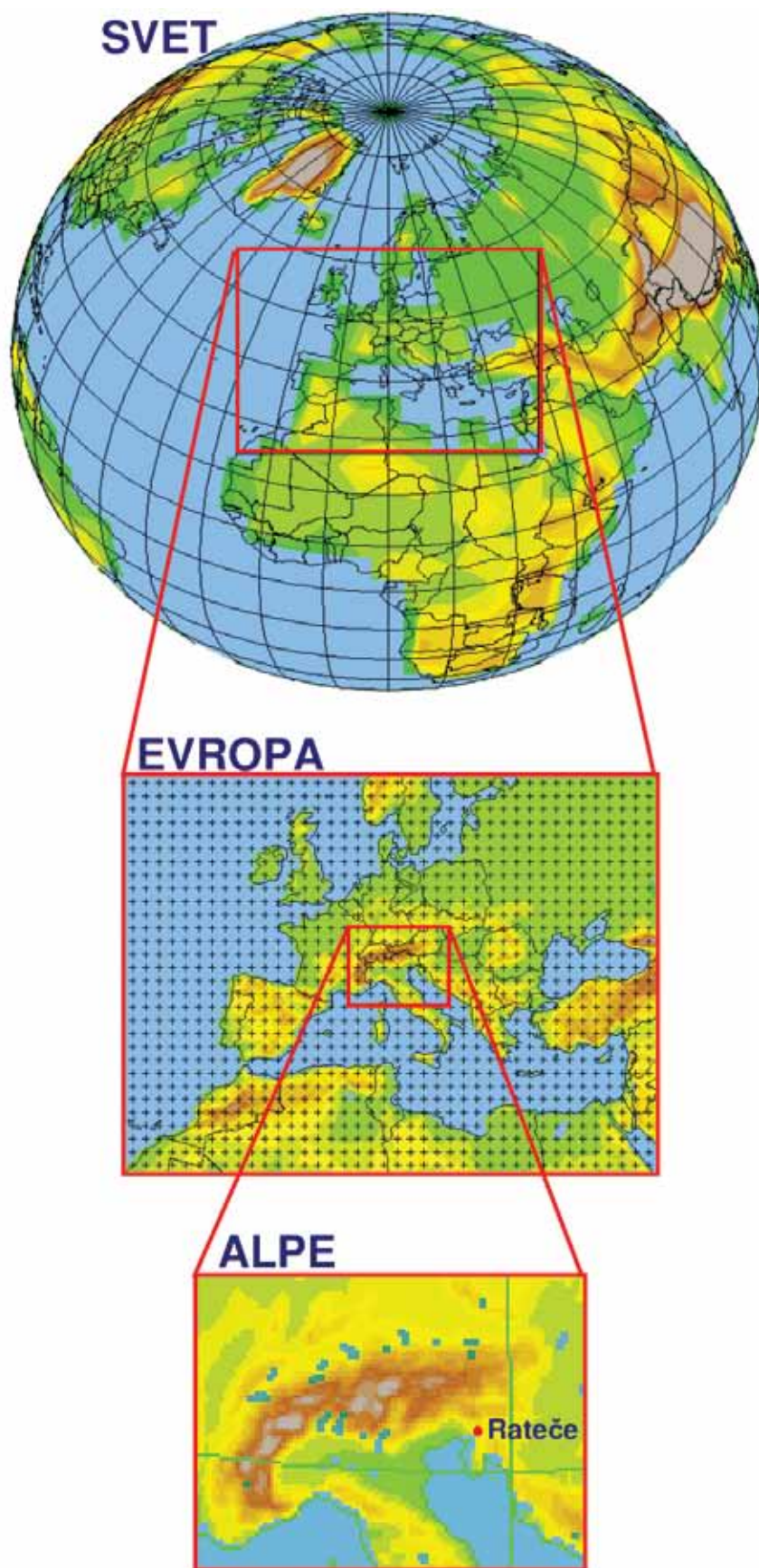
Slika 2: Predvidene spremembe temperature zemeljskega površja (v °C) ob uresničitvi različni scenarijev izpustov toplogrednih plinov in delcev:
a) RCP2.6/IMAGE,
b) RCP4.5/GCAM,
c) RCP6.0/AIM,
d) RCP8.5/MESSAGE.

Izračuni so bili narejeni na Bjerknesevem centru za podnebne raziskave (www.bjerknes.uib.no) (Furevik in Jansen, 2011).

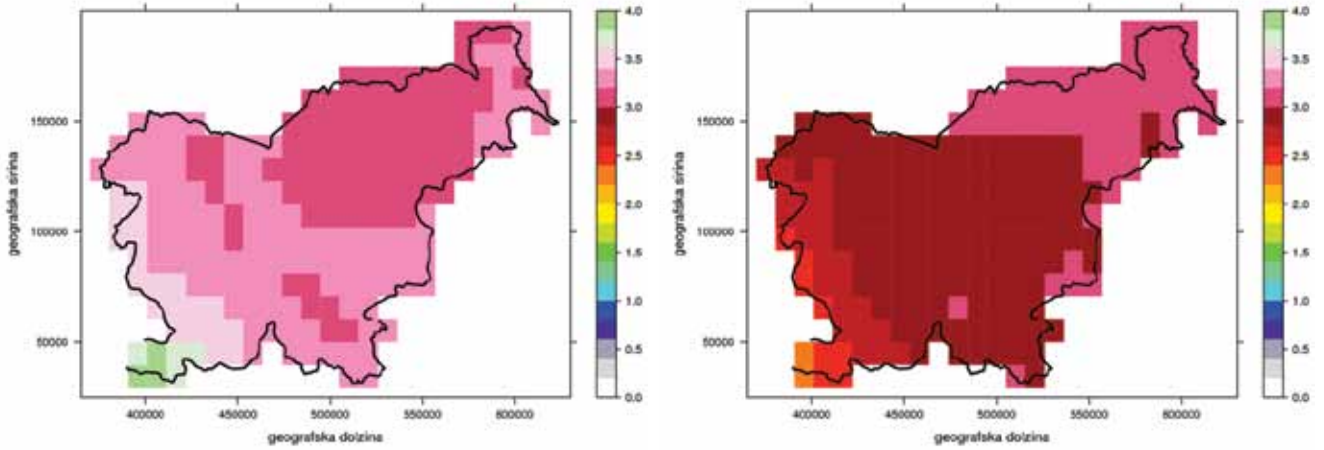
bujemo ocene podnebnih sprememb za posamezne lokacije ali manjša geografska območja, kjer izvajamo dejavnost, ki je izrazito odvisna od podnebja. Takrat si pomagamo s *prehodom na višjo ločljivost*, pri čemer sta uveljavljena dva pristopa. Pri prvem prostorsko natančnejše napovedi pridobimo s pomočjo gnezdenja regionalnih podnebnih modelov, čemur pravimo *dinamični prehod na višjo ločljivost*, (npr. Giorgi in Mearns, 1999; Wang s sod., 2004). Drugi pristop pa temelji na empirični oceni odziva podnebja nekega manjšega geografskega območja ali posamezne lokacije na spremenljivost podnebnih vzorcev nad obsežnejšim geografskih območjem. Temu načinu pravimo *empirični prehod na višjo ločljivost* (npr. Zorita in Storch, 1999; Crane s sod., 2002).

Dinamični prehod na višjo ločljivost je na primeru modelskega reliefa ob dvakratnem gnezdenju regionalnega podnebnega modela v model splošne cirkulacije shematično prikazan na sliki 3. Na takšen način so bile na Karlovi univerzi v Pragi narejene tudi podnebne napovedi za 21. stoletje, kjer so na območju osrednje Evrope v globalni model splošne cirkulacije ECHAM5 z ločljivostjo 110 km dvakrat gnezdili regionalni podnebni model RegCM3, najprej z ločljivostjo 25 nato še 10 km (Muri, 2009). Kot vhodni podatek v ECHAM5 je bil uporabljen srednji scenarij izpustov toplogrednih plinov in delcev iz drugega poročila IPCC (Nakičenović in Swart, 2000). Primeri rezultatov za območje Slovenije so prikazani na slikah 4 do 6. Iz rezultatov je razvidno, da naj bi se do konca 21. stoletja poletja ogrela bistveno bolj kot zime (slika 4). Prav tako lahko pričakujemo bolj sušna poletja in bolj mokre zime (slika 5), pri čemer bodo ob predvidenem dvigu temperature prevladovala tekoče padavine. Zanimivo je tudi, da naj bi se kljub manjši povprečni poletni količini padavin (slika 5, levo) in daljših poletnih obdobjih brez padavin (slika 6, levo) povečale največje enodnevnne količine padavin (slika 6, desno). To pomeni, da bi ob uresničitvi teh

Slika 3: Shematični prikaz večplastnega prehoda na višjo ločljivost modelskih napovedi podnebja (prirejeno po Giorgi, 2008). Osnovno predstavljajo izračuni modela splošne cirkulacije in potreba po oceni podnebja in njegovih sprememb na lokaciji Rateče. Z dvakratnim gnezdenjem regionalnega podnebne modela, najprej na območju celotne Evrope in dodatno še na območju Alp, rezultate o prihodnjem podnebju z vidika prostorske ločljivosti toliko izboljšamo, da opišejo posebnosti podnebja Rateč in njihove okolice.

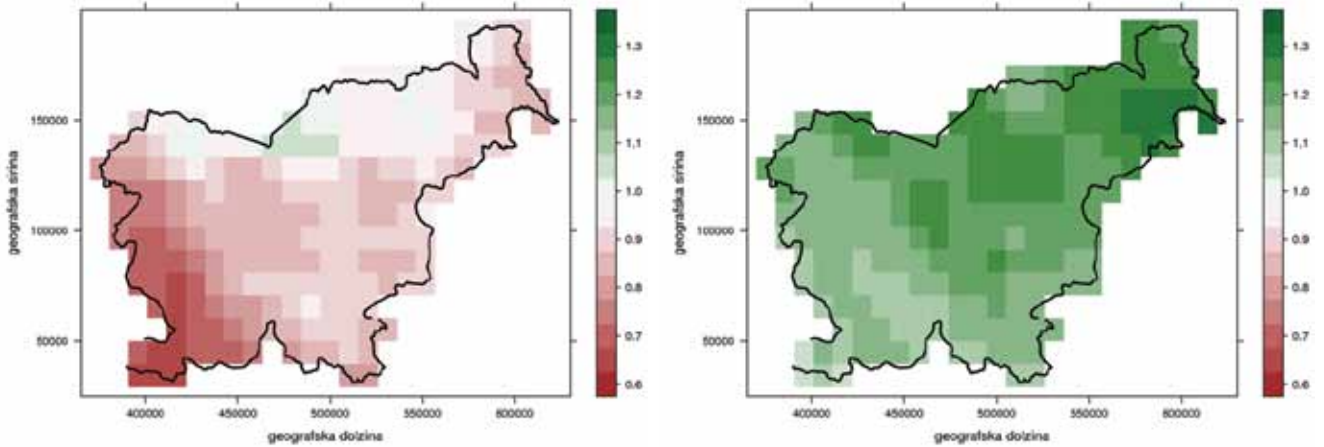


napovedi kljub pogostejšim in intenzivnejšim sušam v poletnem obdobju lahko bili priča tudi pogostejšim hudourniškim poplavam, saj naj bi bile padavine manj pogoste, a takrat bolj intenzivne.



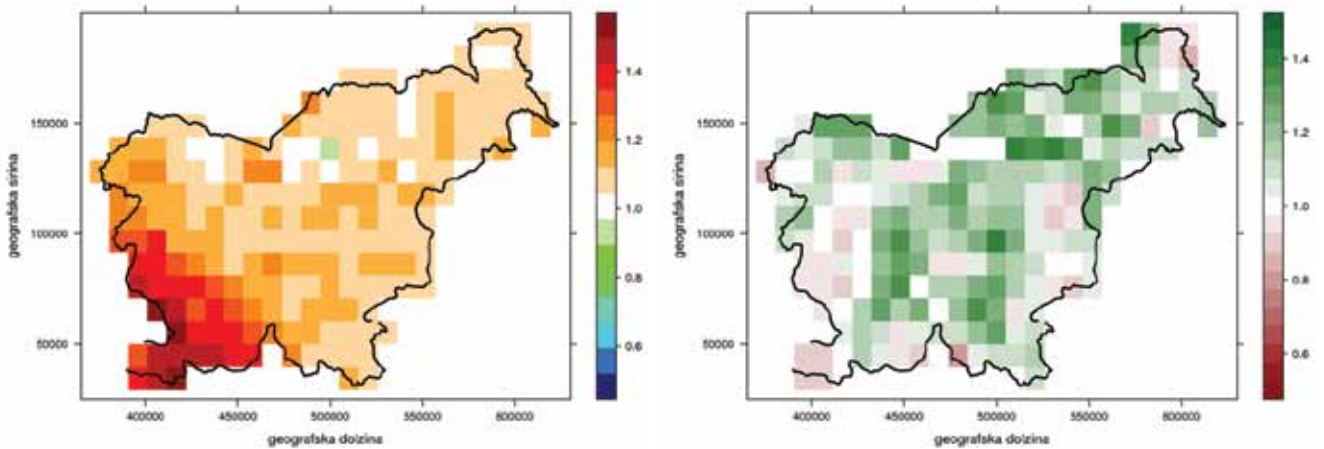
Slika 4: Ocenjene spremembe povprečne temperature zraka ($v^{\circ}C$) poleti (levo) in pozimi (desno) ob primerjavi obdobj 2071-2100 in 1961-1990

(Muri, 2009)



Slika 5: Ocenjeno razmerje povprečne poletne (levo) in zimske (desno) količine padavin ob primerjavi obdobj 2071-2100 in 1961-1990

(Muri, 2009)



Slika 6: Ocenjeno razmerje dolžine trajanja najdaljšega poletnega obdobja brez padavin (levo) in največje poletne enodnevne količine padavin (desno) ob primerjavi obdobj 2071-2100 in 1961-1990

(Muri, 2009)

Izračuni, prikazani na slikah 4 in 5 okvirno sovpadajo s predhodnimi izračuni ob uporabi empiričnega prehoda na višjo ločljivost za izbrane kraje v Sloveniji (Bergant, 2007). Kljub temu se je pri njihovi razlagi treba zavedati, da gre za izračune z enim samim modelom, upoštevajoč en sam scenarij izpustov in da ima uporabljeni model določene pomanjkljivosti že pri opisu preteklih podnebnih razmer (Muri, 2009). V splošnem podnebne napovedi, ki temeljijo na modelskih izračunih, spremljajo številne negotovosti, ki jih moramo ob njihovi uporabi ustrezno upoštevati.

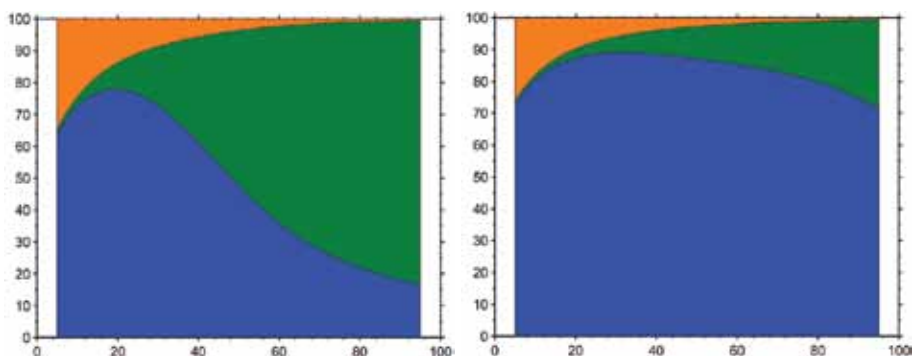
Negotovosti v podnebnih napovedih

Negotovosti v podnebnih napovedih izhajajo iz treh osnovnih virov (Hawkins in Sutton, 2009, 2011; Yip in sod., 2011). Prvi vir je notranja spremenljivost podnebnega sistema, ki je prisotna, tudi če nimamo sprememb v energijski bilanci zemeljskega površja. Gre za naključni del spremenljivosti podnebja, ki je posledica tega, da je podnebni sistem kaotičen (Lorenz, 1963).

Drugi vir negotovosti so sami podnebni modeli, saj se različni modeli odzivajo nekoliko različno na enake spremembe sevalne bilance. Modeli, ki jih uporabljamo za podnebne napovedi, so poenostavljen opis podnebnega sistema. Zanesljivost izračunov s podnebnimi modeli je tako odvisna od teoretičnega poznavanja procesov, ki jih vključuje model in od natančnosti njihovega zapisa v modelu, od natančnosti poznavanja začetnih razmer, s katerimi zaženemo model in od robnih razmer, s katerimi model omejimo pri izračunavanju prihodnjih stanj podnebja.

Enega ključnih robnih razmer predstavljajo scenariji izpustov toplogrednih plinov in delcev, ki so tretji vir negotovosti v podnebnih napovedih. Kako se bo razvijala družba in kakšni bodo zaradi tega izpusti toplogrednih plinov in delcev ter posledične vsebnosti v ozračju, lahko le sklepamo glede na sedanje trende, nimamo pa vpogleda v dejansko prihodnost. Zato se pri podnebnih napovedih uporablja različne scenarije izpustov (Moss in sod., 2010; Nakićenović in Swart, 2000), ki privedejo do različnih ocen podnebnih sprememb, predvsem kar zadeva njihovo izrazitost.

Slika 7: Pomembnost posameznih virov negotovosti (v %) (scenariji izpustov, modelska negotovost, notranja spremenljivost podnebja) v globalnih podnebnih napovedih temperature površja (levo – Hawkins in Sutton, 2009) in količine padavin (desno – Hawkins in Sutton, 2010) za 21. stoletje (časovna skala je odmik od leta 2000)



K negotovosti ocen globalne temperature površja (slika 7 – levo) za prvih nekaj desetletij največ prispeva modelska negotovost in najmanj scenariji, saj pri teh bistvene razlike nastanejo šele po letu 2020. Podobno je tudi pri napovedih sprememb globalne količine padavin (slika 7 – desno). Ker se negotovost zaradi notranje spremenljivosti podnebnega sistema s

časom ne povečuje, se njen prispevek k skupni negotovosti v relativnem smislu s časom zmanjšuje. Se pa s časom povečuje relativni prispevek k negotovosti zaradi scenarijev izpustov, saj po letu 2020 postajajo razlike med njimi vse večje. Če primerjamo globalne projekcije temperature površja in količine padavin, lahko opazimo, da je pri padavinah prispevek modelske negotovosti pomembnejši kot pri temperaturi, kar kaže na zahtevnost modeliranja padavinskih procesov. Ob prehodu z globalnega na regionalni nivo pa se izrazito poveča relativni prispevek zaradi notranje spremenljivosti podnebja (Moss in sod., 2010).

Sklep Podnebne napovedi večinoma temeljijo na izračunih podnebnih modelov, tako globalnih kot regionalnih. Te izračune spremljajo številne negotovosti, saj ne poznamo do potankosti podnebnega sistema, niti ne njegovega odziva na spremenjeno sestavo ozračja in na druge spremembe podnebnih dejavnikov. In tudi če bi do potankosti poznali odvisnost odziva podnebnega sistema na spremenjeno sestavo ozračja, lahko podnebje modeliramo le z omejeno prostorsko natančnostjo, ki ne zajame vseh regionalnih in lokalnih posebnosti izbranega območja. Slovenija je temu še posebej izpostavljena, saj leži na prepletu alpskega, sredozemskega in panonskega podnebnega vpliva, zaradi česar je ob veliki razgibanosti njenega površja raznolikost podnebnih razmer na njenem območju izredna. Kljub navedenim omejitvam pa so podnebni modeli trenutno najboljše razpoložljivo orodje za vpogled v našo podnebno prihodnost.

Viri in literatura

1. Benestad, R. E., 2003, What can present climate models tell us about climate change? *Climatic Change*, 59, 311–331.
2. Bergant, K., 2007, Projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo, *Podnebne spremembe: vpliv na gozd in gozdarstvo*, Studia forestalia Slovenica, 130, 67–86.
3. Crane, R. G., Yarnal, B., Barron, E. J., Hewitson, B., 2002, Scale interactions and regional climate: examples from Susquehanna river basin, *Human and Ecological Risk Assessment*, 8 (1), 147–158.
4. Furevik, T., Jansen, E., 2011, New Climate Projection Submitted to IPCC AR6. *Presentation during COP 17*, Bjerknes Centre for Climate Research (dostopno na spletu 5. 4. 2012).
5. http://www.uib.no/People/ngfhd/EarthClim/Div/COP17_NorESM-out.pdf
6. Giorgi, F., Mearns, L. O., 1999, Introduction to special section: Regional climate modeling revisited, *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335–6352.
7. Giorgi, F., 2008, Uncertainties in regional climate change projections, Predstavitev na konferenci »Bridging the Gap«, Portorož, 15. maj 2008 (dostopno na spletu 5. 4. 2012).
8. <http://www.bridgingthegap.si/pdf/Adapation%20to%20climate%20change/Filippo%20Giorgi%20UNCERTAINTIES%20IN%20REGIONAL%20CLIMATE%20CHANGE%20PROJECTIONS.pdf>.
9. Hawkins, E., Sutton, R. T., 2009, The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90 (8), 1095–1107.
10. Hawkins, E., Sutton, R. T., 2011, The Potential to Narrow Uncertainty in Projections of Regional Precipitation Change, *Climate Dynamics*, 37 (1–2), 407–418.

11. Lorenz, E., 1967. *The nature and theory of general circulation of the atmosphere*. WMO Publication 218, 59–96.
12. Moss, R.H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic N., Raihi, K., Smith, S. J., Stoufer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., Wilbanks, T. J., 2010, The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment, *Nature*, 463, 747–756.
13. Muri, B., 2009, *Projekcije podnebnih sprememb na območju Slovenije z modelom RegCM3*. Diplomsko delo, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 60 str. + CD.
14. Nakićenović, N., Swart, R., 2000, *IPCC Special Report: Emission Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 570 str.
15. Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, M. , Scheffer, M. , Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B. , de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U. , Falkenmark, M. , Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D. , Richardson, K. , Crutzen, P., Foley, J.A., 2009, A safe operating space for humanity, *Nature*, 461, 472–475, doi:10.1038/461472a.
16. Solomon, S., Qin, M. Manning, D., Chen Z., Marquis M., Averyt, K. B., Tignor M., Miller H. L., 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 str.
17. Yip, S., Ferro, C. A. T., Stephenson, D. B., Hawkins, E., 2011, A Simple, Coherent Framework for Partitioning Uncertainty in Climate Predictions, *Journal of Climate*, 24, 463–472.
18. Wang, Y., Leung, L. R., McGregor, J. L., Lee, D.-K., Wang, W.-C., Ding, J., Kimura, F., 2004, Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82 (6), 1599–1628.
19. Zorita, E., Storch von, H, 1999, The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods, *Journal of Climate*, 12, 2474–2489.