

KAKŠNO BO PODNEBJE V SLOVENIJI V TEM STOLETJU?

What Might the Climate of Slovenia Look Like in This Century?

Lučka Kajfež - Bogataj*, Klemen Bergant** UDK 551.581(497.4)"20"

Povzetek Abstract

Globalno ogrevanje našega planeta je fizikalno izmerjeno dejstvo. Mnenje klimatologov je, da se bodo spremembe podnebja nadaljevale še izraziteje, saj bo prišlo do sprememb v celotnem podnebnem sistemu. Za oblikovanje strategij prilagoditev predvidenim podnebnim spremembam potrebujemo scenarije podnebja, kakršno naj bi bilo v prihodnosti, v regionalni skali. Lokalne podnebne razmere so običajno predvsem odvisne od procesov, ki potekajo v manjši skali, kot je prostorska ločljivost globalnih modelov splošne cirkulacije (MSC), ki so orodje za preučevanje odziva podnebnega sistema na spremembe sestave ozračja. Prikazano je, kako premostimo prepad med obsežno prostorsko in regionalno skalo oz. empirično zmanjševanje skale. Za povezavo podnebnih spremenljivk v regionalni oziroma lokalni skali s podnebnimi spremenljivkami v obsežni skali smo uporabili matematične modele, ki temeljijo na izmerjenih vrednostih v preteklosti. Te smo uporabili za projiciranje rezultatov simulacij petih MSC. V obdobju 2001 do 2030 se bodo v Sloveniji temperature zraka povečale za 0,5 °C do 2,5 °C, v obdobju od 2031 do 2060 za 1 °C do 3,5 °C in v obdobju od 2061 do 2090 za 1,5 °C do 6 °C. Več težav je z empiričnimi modeli za ocenjevanje letne količine padavin, saj je kakovost modelov zadovoljiva le za mesece hladne polovice leta. Obstaja verjetnost, da bo podnebje Slovenije postalo toplejše in bolj sušno.

Global warming is no longer just a theory or a distant threat. The overwhelming agreement among the world's preeminent climate scientists is that its impact can already be seen today and may grow worse in the future. This global warming is expected to significantly disrupt the climate system. As a result, regional temperatures and precipitation patterns will shift across the globe, affecting nearly every aspect of society. Changes in Slovenia's climate are dependent on changes in the global climate and on local phenomena. There are as yet no reliable predictions on how Slovenia's climate might change as the result of a change in the world's climate. However, regional scenarios can be derived from global climate models. These are not predictions per se, as they only provide an impression of the extent to which global climate change might affect Slovenia's climate. Such regional scenarios are need for adaptation strategies. The results of the simulations with general circulation models (GCM) are the basis for future climate change and impact studies. In the case of Slovenia, the results of simulations with five GCM were used. These were projected for 5 locations in Slovenia (Ljubljana, Novo mesto, Murska Sobota, Rateče and Bilje) by using the empirical downscaling method. The projections for air temperature changes are more reliable than for the amount of precipitation, especially for the warm half of the year. From what we know at present, the following tendency is also plausible: the climate of Slovenia will become warmer and drier.

Uvod

Globalno ogrevanje našega planeta postaja fizikalno izmerjeno dejstvo. Mnenje klimatologov je, da se bodo spremembe podnebja nadaljevale še izraziteje, saj bo prišlo do sprememb v celotnem podnebnem sistemu, ki ga sestavljajo poleg atmosfere še hidrosfera, kriosfera, biosfera in njihove interakcije (Kajfež - Bogataj, 2001).

Spremenjene temperaturne razmere in razporeditev padavin ter spremembe drugih meteoroloških spremenljivk bodo vplivale na vsa področja človekovega delovanja. Spremenljivosti podnebja v veliki meri botruje človek. Različni družbenogospodarski kazalci tudi v prihodnje predvidevajo pomembno vlogo človeka pri spremenljivosti podnebja, zato se zdijo dokaj izrazite spremembe podnebja skoraj neizbežne (Metz in sod., 2001). Da podnebnih sprememb ne bomo pričakali nepripravljeni, potrebujemo strategije prilagoditev predvidenim podnebnim spremembam oziroma strategije blažitve njihovega negativnega vpliva. Podlaga takšnih strategij so scenariji

* Prof. dr., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Jamnikarjeva ulica 101, Ljubljana, lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

** Asist. dr., Politehnika Nova Gorica, Vipavska cesta 13, Nova Gorica.

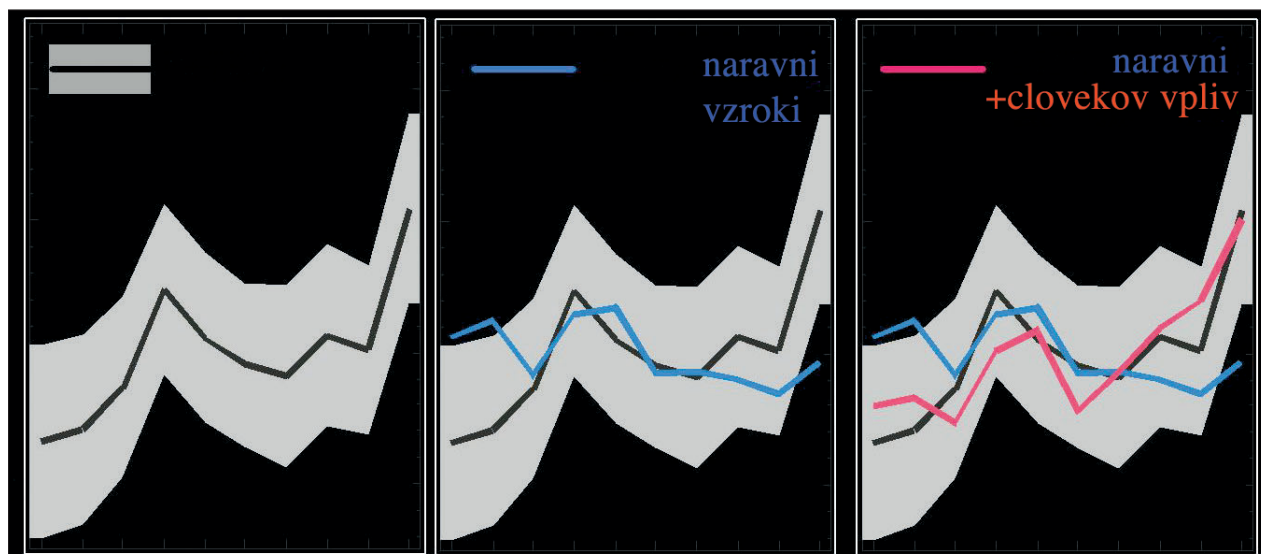
podnebnih sprememb, ki so opredeljeni kot verjeten in pogosto poenostavljen opis morebitnega poteka prihodnosti, ki temelji na razumljivih in smiselnih predpostavkah o ključnih povezavah in dejavnikih (Houghton in sod., 2001). Podnebne scenarije najpogosteje dobimo kot rezultat tridimenzionalnih numeričnih modelov splošne cirkulacije ozračja (MSC), ki računajo odziv podnebnega sistema na spremembe sestave ozračja. MSC dobro opišejo procese v globalni prostorski skali, njihovi rezultati pa zaradi slabe prostorske ločljivosti niso uporabni v regionalni skali. Za oblikovanje regionalnih podnebnih scenarijev moramo razviti metode, ki premostijo prepad med globalno in regionalno skalo (Mitchell in sod., 2002). Eden takih načinov je empirično zmanjševanje skale, ki smo ga uporabili pri pripravi scenarijev podnebnih sprememb za Slovenijo.

Vpliv človeka na spremembe podnebja

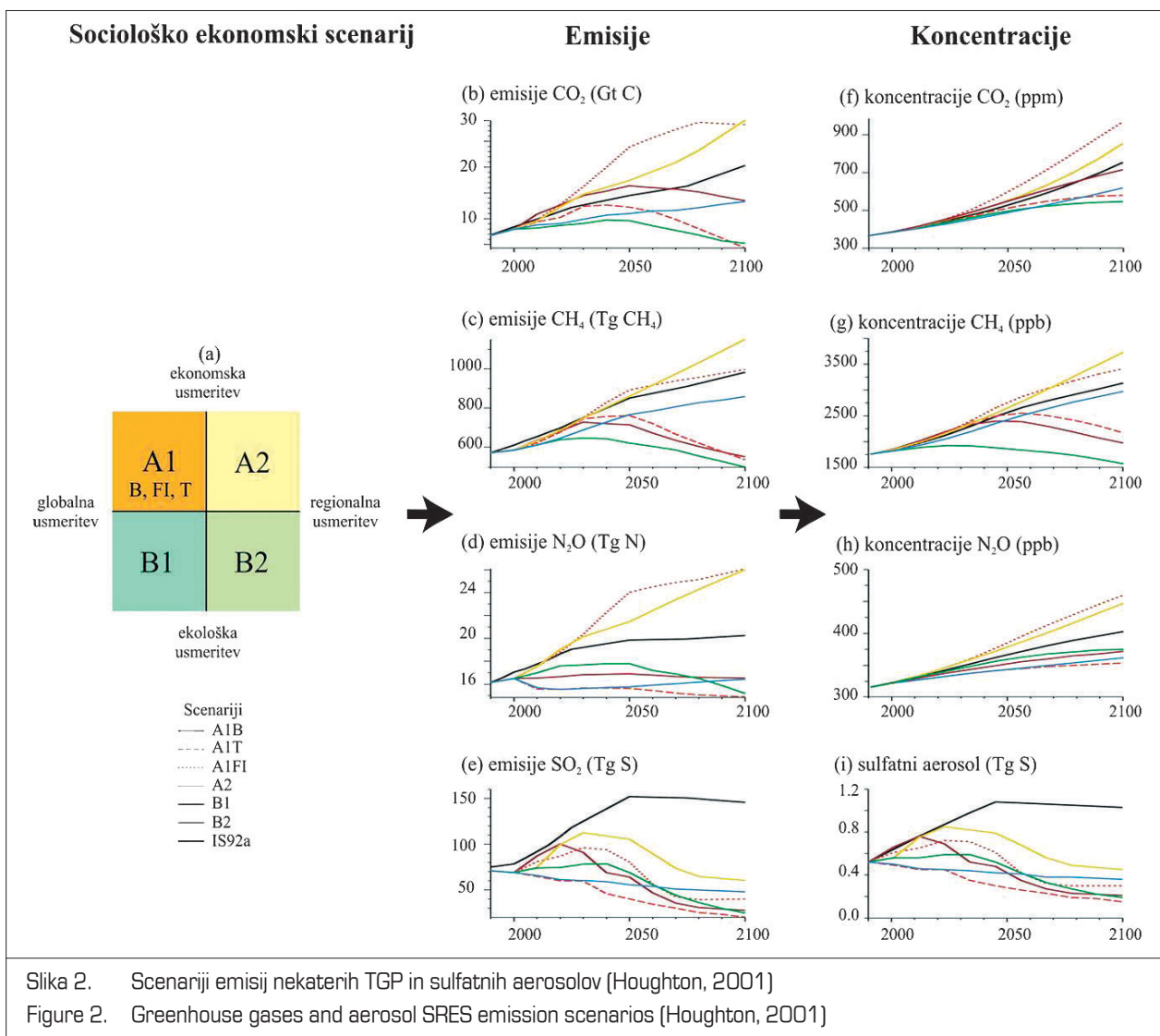
Vzroki za spremembe podnebja so lahko različni. Kadar se dejavniki podnebja spremenijo brez posredovanja človeka, govorimo o **naravni spremenljivosti podnebja**. V zadnjem času se vse večja vloga pri spremembah podnebja pripisuje človeku. Pri tem govorimo o **človeško pogojeni spremenljivosti podnebja**. Oceno, koliko naj bi k spremembi temperature površja in s tem tudi temperature zraka ob površju od začetka industrijske dobe do danes prispeval človek in koliko naravni dejavniki, prikazuje na primeru Evrope slika 1. Pri modeliranih vrednostih so upoštevani spremembe vsebnosti TGP in sulfatnih aerosolov v ozračju glede na naravne vzroke (slika 1 – modra črta) ter še skupen vpliv naravnih vzrokov in človeka (desno – rdeča črta). Očitno je, da je izrazitemu dvigu temperature v zadnjih nekaj desetletjih botroval predvsem človek z emisijami toplogrednih plinov (TGP: CO₂, CH₄, N₂O, O₃, ...) in aerosolov, ki so spremenili

sestavo ozračja. Glavni vir omenjenih tri- in večatomnih plinov in aerosolov je uporaba fosilnih goriv, ki naraščajo vse od začetka industrijske dobe do danes (EEA, 2004).

Modeli splošne cirkulacije (MSC) so najpogosteje uporabljeno orodje za preučevanje odziva podnebnega sistema na antropogene spremembe sestave ozračja. V njih so z diferenčnimi enačbami zajeti glavni fizikalni, kemični in biološki procesi v ozračju, oceanih, ledu in na zemeljskem površju ter njihova medsebojna odvisnost. Ključni vhodni podatek za MSC pri preučevanju odziva podnebnega sistema na spremenjeno sestavo ozračja so scenariji emisij in posledična vsebnost TGP in aerosolov v ozračju v prihodnosti. Mednarodni forum za podnebne spremembe (IPCC) predlaga uporabo različnih scenarijev emisij, katerih uresničitev je v prihodnosti enako verjetna. V grobem jih razdelimo v štiri skupine (A1, A2, B1 in B2), ki se razlikujejo v družbenogospodarskem razvoju v prihodnosti. Emisije, ki jih ti scenariji predvidevajo, in posledične vsebnosti TGP in aerosolov v ozračju so prikazane na sliki 2. Skupina scenarijev A1 pomeni hiter in globalen gospodarski razvoj, scenariji A2 predvidevajo raznolik svet s hitro rastjo prebivalstva. Skupina scenarijev B1 pomeni hiter preobrat v gospodarskih strukturah v smeri oskrbovalnega in informacijskega gospodarstva, manjše porabe surovin ter vpeljave čistejših in učinkovitejših tehnologij. Pri scenarijih B2 so v ospredju lokalne rešitve za zmerno gospodarsko rast, socialno enakost in okoljsko trajnost. Čeprav naj bi bili scenariji enako verjetni, se zdi danes svet veliko bolj na poti scenarijev A1, kot da bi se trezno usmerjal k scenarijem B2. Najpogosteje analizirana sta predstavnika dveh skupin scenarijev – A2 in B2. Časovni poteki spremembe globalnega povprečja temperature površja ter količine padavin, ki temeljijo na scenarijih A2 in B2, so prikazani na sliki 3. Različni MSC se na spremembe sestave ozračja odzovejo različno, kar kaže na negotovost projekcij podnebnih sprememb za prihodnost.



Slika 1. Izmerjena (črna črta) in modelirana spremenljivost (sivo območje) temperature površja v Evropi
Figure 1. Measured (black line) and modelled (gray area) temperature rise in Europe

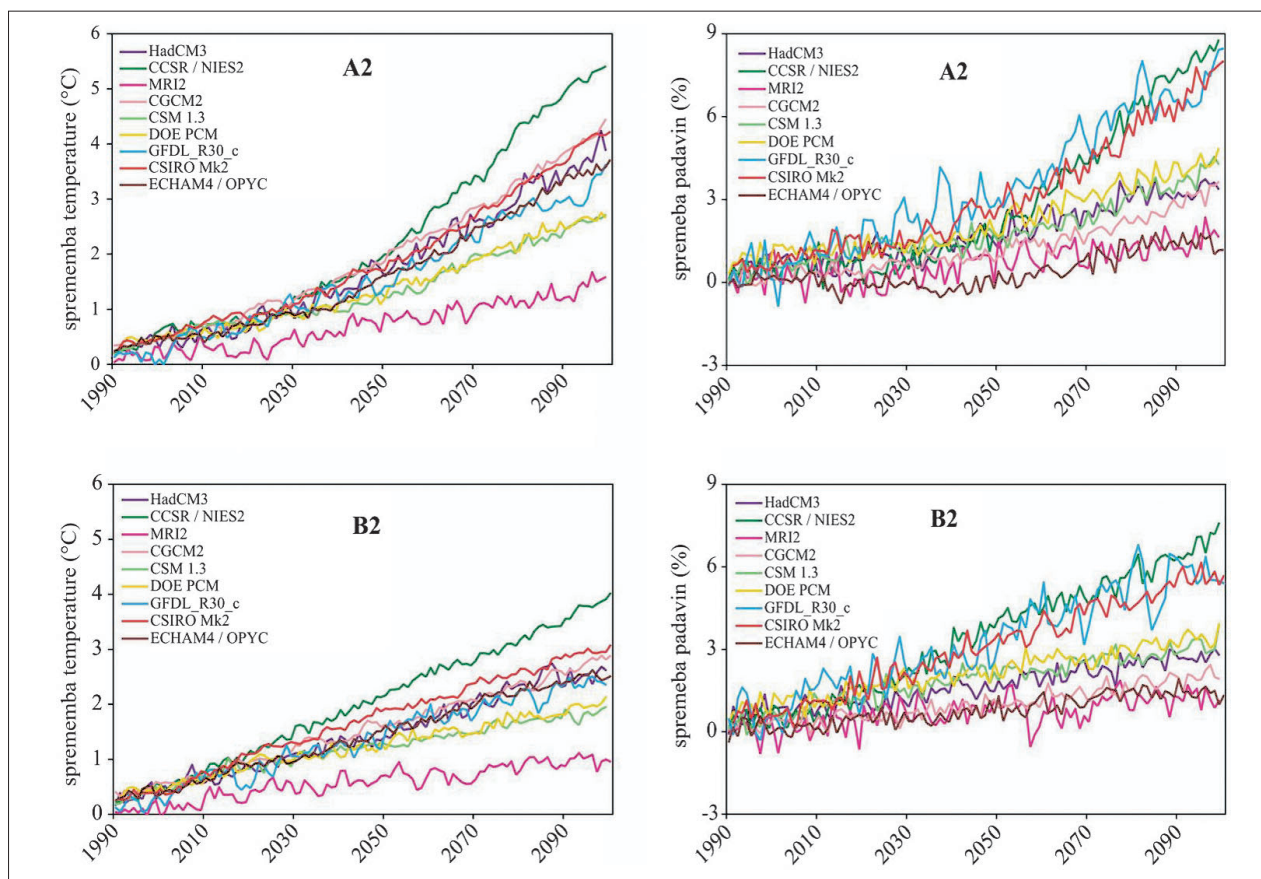


Empirično zmanjševanje prostorske skale

Simulacije z MSC so dober vir informacije o predvideni spremenljivosti podnebnih razmer v prihodnosti v globalni skali. Zaradi slabe prostorske ločljivosti pa neposredna uporaba rezultatov simulacij z MSC v lokalnih in regionalnih študijah vpliva podnebnih sprememb na podnebno pogojene dejavnosti ni primerna. Mogoč način premostitve prepada med obsežno in regionalno skalo je empirično zmanjševanje skale, ki je podrobno opisano v Bergantovem delu (2003), tu pa ga na kratko opišimo. Za povezavo podnebnih spremenljivk v regionalni oziroma lokalni skali s podnebnimi spremenljivkami v obsežni skali uporabimo matematične zveze, ki temeljijo na izmerjenih vrednostih v preteklosti, in jih nato uporabimo za projiciranje rezultatov simulacij z MSC. Pri tem predpostavimo, da bo v spremenjenih podnebnih razmerah matematični opis odvisnosti med lokalno podnebno spremenljivko in podnebno spremenljivko v globalni skali še vedno veljaven. Ob uporabi dolgih časovnih vrst podatkov pri izdelavi modela predpostavimo, da te vsebujejo številne različne

vremenske oz. podnebne situacije, tudi tiste, ki bodo pogostejše ali izrazitejše v spremenjenih podnebnih razmerah.

Empirični modeli temeljijo na izmerjenih oziroma rekonstruiranih vrednostih podnebnih spremenljivk v obsežni skali – prediktorjih in podnebnih spremenljivk v lokalni skali – prediktandih (Benestad, 2001). V vlogi prediktorjev smo uporabili temperaturo zraka ob površju ter zračni tlak na nivoju morja za preteklo obdobje 1951–2002. Polja prediktorjev smo z empiričnimi modeli povezali z vrednostmi temperature zraka in količine padavin, ki temeljijo na meritvah na slovenskih meteoroloških postajah: Ljubljana Bežigrad, Novo mesto, Murska Sobota, Rateče in Bilje (Bergant in Kajfež - Bogataj, 2004). Lokacije so izbrane kot predstavnice različnih podnebnih pasov, ki se prepletajo na območju Slovenije. Vir podatkov o meritvah na izbranih lokacijah je bil arhiv Agencije RS za okolje. Za ocenjevanje podnebnih sprememb v prihodnosti smo uporabili rezultate simulacij s 5 MSC, ki so javno dostopni in v katerih sta bila upoštevana scenarija emisij SRES A2 in B2. Ti modeli so NCEP/NCAR in DOE-NCAR/PCM, oba iz ZDA, CSIRO/Mk2 iz Avstralije ter UKMO/HadCM3 iz Velike Britanije.



Slika 3. Simulirane spremembe globalnega povprečja temperature površja (levo) in količine padavin (desno) v primerjavi z obdobjem 1961–1990 z različnimi modeli splošne cirkulacije za scenarija emisij A2 (zgoraj) in B2 (spodaj) (Houghton in sod., 2001)

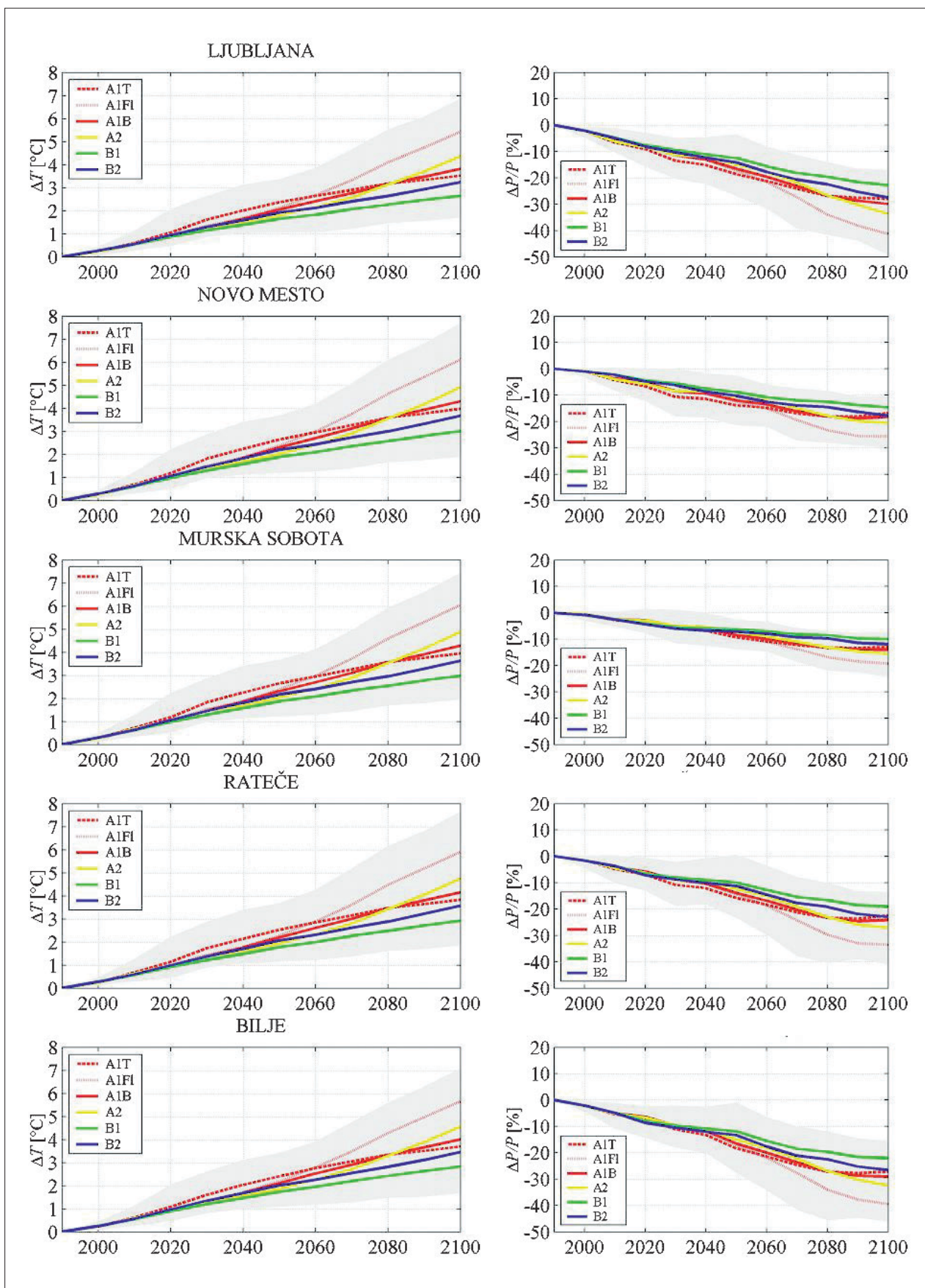
Figure 3. Simulated changes of surface temperature (left) and relative precipitation amount (right) in comparison to baseline 1961–1990 obtained by different general circulation models for A2 (top) and B2 (bottom) SRES scenarios (Houghton in sod, 2001).

Predvidene spremembe temperature zraka in količine padavin

Delež spremenljivosti temperature zraka na izbranih lokacijah v Sloveniji, ki ga pojasnimo z empiričnimi modeli, večinoma presega 75 %, kar pomeni, da so izdelani modeli uporabni za ocenjevanje temperature zraka v Sloveniji. Projekcije sprememb temperature zraka v 21. stoletju so za izbranih pet lokacij prikazane na sliki 4. Spremembe so prikazane glede na primerjalno obdobje 1961–1990 kot 30-letna povprečja s korakom 10 let. Raznobarvne črte pomenijo projekcije, ki ustrezajo enemu od predstavnikov scenarijev, a so povprečene prek vseh MSC. Sivo območje ustreza razponu prek vseh scenarijev in vseh uporabljenih MSC. Izbrane lokacije pomenijo različna območja Slovenije – osrednjo, JV, SV, SZ in JZ Slovenijo.

Ob predvidenem povečanju vsebnosti toplogrednih plinov in sulfatnih aerosolov se bo dvignila temperatura zraka na celotnem območju Slovenije. Pri tem ni opaziti izrazitih razlik med posameznimi območji Slovenije. Velikost

temperaturnih sprememb je zelo odvisna od izbranega scenarija emisij. V obdobju 2001 do 2030 se bodo v Sloveniji temperature zraka predvidoma povečale za 0,5 °C do 2,5 °C, v obdobju od 2031 do 2060 za 1 °C do 3,5 °C in v obdobju od 2061 do 2090 za 1,5 °C do 6,5 °C. Več težav je pri ocenjevanju količine padavin, saj je kakovost modelov zadovoljiva pri večini meteoroloških postaj le za mesece hladne polovice leta. Za postaje z zmernim celinskim podnebjem in podnebjem nižjega gorskega sveta JZ od dinarsko-alpske gorske pregrade (Ljubljana, Novo mesto, Rateče) delež pojasnjene spremenljivosti z empiričnimi modeli večinoma presega 50 %. Učinek dinarsko-alpske gorske pregrade je opazen na slabši kakovosti modelov za Mursko Soboto. Napovedi za postajo Bilje so bolj negotove kot za celinske postaje JZ od dinarsko-alpske gorske pregrade, a boljše kot za celinske postaje SV od pregrade. V vseh primerih je delež pojasnjene spremenljivosti izrazito majhen v topli polovici leta, še posebej v poletnih mesecih. Delež pojasnjene spremenljivosti za poletne mesece le z redkimi izjemami preseže 40 %. Pogosto se zgodi, da z izbrano metodologijo v poletnih mesecih ne najdemo nikakršne povezave med količino padavin na izbrani lokaciji in cirkulacijskimi ter temperaturnimi vzorci nad zahodno in osrednjo Evropo. V takih primerih dolgoletno povprečje za primerjalno



Slika 4. Predviden dvig temperature zraka (ΔT v $^{\circ}\text{C}$) v Ljubljani, Novem mestu, Murski Soboti, Ratečah in Bilju (levi del) ter relativna sprememba količine padavin ($\Delta P/P$ v %) v istih krajih (desni del) do leta 2100

Figure 4. Simulated temperature rise (ΔT in $^{\circ}\text{C}$) in Ljubljana, Novo mesto, Murska Sobota, Rateče and Bilje (left) and relative change in precipitation amount ($\Delta P/P$ in %) at same locations (right) until 2100

obdobje pomeni najboljšo možno oceno vrednosti v prihodnosti. Slovenija leži na razgibanem prepletu alpskega, sredozemskega in panonskega vpliva, kjer je raznolikost podnebnih razmer na majhnem območju izredna. Lokalni vplivi, še posebej na padavinske spremenljivke, pogosto prevladajo nad situacijo v obsežni skali, kar onemogoča izdelavo kakovostnih empiričnih modelov za ocenjevanje padavinskih spremenljivk še posebej v topli polovici leta. Kakovost empiričnih modelov je predvsem odvisna tudi od kakovosti podatkov, na katerih so bili modeli izdelani (Bergant in Kajfež - Bogataj, 2005). Ob tako majhnem deležu pojasnjene spremenljivosti za količino padavin tvegamo, da z modelom nismo zajeli pomembnega dela dinamike spremenljivke, ki bi lahko spremenil predznak in velikost predvidenih sprememb. Pri razlagi projekcij padavin z izdelanimi empiričnimi modeli moramo biti zelo previdni.

Sklepne misli

Prikazane projekcije rezultatov izbranih MSC so podlaga za izdelavo scenarijev podnebnih sprememb za različna podnebna območja Slovenije. Projekcije sprememb temperature zraka so dokaj zanesljive, projekcije sprememb količine padavin pa pri razlagi zahtevajo večjo previdnost. Velikost padavinsko zelo raznolike Slovenije je primerljiva z velikostjo ene same mrežne točke v MSC. Poleg tega sta pojav in količina padavin največja težava pri modeliranju vremenskih procesov v ozračju, še posebej ko gre za konvektivne padavine, ki pogosto nastanejo lokalno.

Pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb naletimo na številne negotovosti. Negotovosti so povezane že s samo izbiro družbenoekonomskih scenarijev razvoja prebivalstva in gospodarstva na Zemlji v prihodnosti. Poleg negotovosti pri scenarijih emisij je tu še vprašanje kakovosti izbranega modela. Kakovost modela in izbran scenarij lahko občutno vplivata na končne rezultate simulacije in izračune, ki temeljijo na njihovih vrednostih. Take rezultate in izračune nato uporabimo pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb in njihovega vpliva, kjer se še dodatno pojavi negotovost v povezavi s projekcijo rezultatov na regionalni ravni in njihovo razlago. Zato moramo biti pri ocenjevanju sprememb podnebja in njihovega vpliva v prihodnosti previdni. Uporabiti moramo rezultate simulacij z različnimi podnebnimi modeli ob upoštevanju

različnih scenarijev emisij TGP in aerosolov in zajeti širok spekter mogočega razvoja podnebja v prihodnosti. Zato scenarijev spremembe podnebja v Sloveniji ne smemo jemati strogo kot napovedi za prihodnost. Pomenijo le mogoč razvoj ob morebitni uresničitvi enega od uporabljenih scenarijev emisij v prihodnosti.

Viri in literatura

1. Benestad, R. E., 2001. A comparison between two empirical downscaling strategies. *Int. Jour. of Climatology*, 21: 371–387.
2. Bergant, K., 2003. Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, 170 str.
3. Bergant, K., Kajfež - Bogataj, L., 2004. Nekatere metode za pripravo regionalnih scenarijev podnebnih sprememb. *Acta agric. slov.*, 2004, vol. 83, št. 2, str. 273–287.
4. Bergant, K., Kajfež - Bogataj, L., 2005. N-PLS regression as empirical downscaling tool in climate change studies. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol. 81 [1-2]: str. 11–23.
5. EEA, 2004. Impacts of Europe changing climate. An indicator-based assessment. European Environment Agency, Copenhagen [Denmark], Report 2/2004, Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 107 str., <http://www.eea.eu.int>
6. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A., 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge, Cambridge Univ. Press: 752 str., HYPERLINK "http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm" http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm
7. Kajfež - Bogataj, L., 2001. Kakšna bo klima 21. stoletja? Zbornik Biotehniške fakultete, Univerza v Ljubljani, *Kmet.*, 77-2, str. 309–318.
8. Metz, C., Davidson, O., Swart, R., Pam, J., 2001. *Climate change 2001: Mitigation*. Cambridge Univ. Press: 881 str., HYPERLINK "http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm" http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm
9. Mitchell, T. D., Hulme, M., New, M., 2002. *Climate data for political areas*. *Area* 34: 109–112.