

Projekcije sprememb temperature zraka in padavin v Sloveniji do konca 21. stoletja

Renato Bertalaníč*, Gregor Vertačnik*, Neža Lokošek*, Anže Medved*,
Živa Vlahovič*, Mojca Dolinar*

Povzetek

Projekcije sprememb temperature zraka in padavin so bile pripravljene v okviru projekta Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo do konca 21. stoletja (OPS21). Spremembe obeh spremenljivk so ocenjene za tri 30-letna obdobja v prihodnosti (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100) glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Projekcije kažejo smer in velikost sprememb ter oceno njihove zanesljivosti za tri scenarije izpustov toplogrednih plinov RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5. Temperatura zraka bo v prihodnosti še naprej rasla, velikost dviga pa je odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov in znaša od 0,8 do 6,1 °C. Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev, znatno se bo povečalo število vročih dni, vročinski valovi bodo daljši in bolj pogosti. Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po scenarijih izpustov RCP4.5 in RCP8.5 sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru scenarija izpustov RCP8.5.

Ključne besede: podnebne spremembe, spremembe temperature zraka, spremembe padavin, negotovost podnebnih projekcij

Key words: climate change, temperature change, precipitation change, uncertainty of climate projections

Uvod

Podnebje vpliva na procese v okolju in na mnoga področja človekove dejavnosti. Spreminjanje je splošna značilnost podnebja, vendar je hitrost spreminjanja v zadnjem stoletju izjemna, v zgodovini Zemlje poznamo le nekaj podobnih primerov. Na podlagi dolgoletnih meritev smo ugotovili, da se podnebje v Sloveniji spreminja nekoliko hitreje kot na svetovni ravni (Vertačnik in Bertalaníč, 2017). Posamezne panoge so se tako v preteklih desetletjih že soočale z vplivi podnebnih sprememb. Ker teh ne moremo ustaviti čez noč niti z zelo močnimi omejitvami izpustov toplogrednih plinov, bodo v prihodnosti nujni ukrepi prilagajanja. Za pripravo in izvajanje ukrepov niso dovolj podatki o že zaznanih spremembah podnebja, ampak je potrebno poznati, kako se bo to spreminjalo v prihodnosti. Kakovostni podatki so temelj za učinkovito načrtovanje ukrepov prilagajanja spremenjenim podnebnim razmeram, da se tako hitreje in učinkoviteje odzivamo na potrebe naše družbe ter prispevamo k večji varnosti in blaginji ljudi, zaščiti okolja, narave in premoženja, trajnostni oskrbi z naravnimi viri ter učinkovitejšemu gospodarstvu. Že pretekle spremembe podnebja kažejo, da lahko zaradi reliefne in podnebne pestrosti Slovenije pričakujemo različne podnebne spremembe med posameznimi območji Slovenije (Vertačnik in Bertalaníč, 2017). Teh pa iz podnebnih projekcij, ki so bile pripravljene na

* Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

ravni Evrope (EEA, 2017; Kirtman et al., 2013), zaradi nizke prostorske ločljivosti ne moremo razločiti.

Slovenija leži na prehodnem območju med Sredozemljem z velikim povečanjem izredno vročih poletnih dni in severnim ter vzhodnim delom Evrope z izrazitim popuščanjem mraza v najhladnejših zimskih dneh (Kirtman et al., 2013). Prav tako smo pri padavinah na prehodu med Sredozemljem z verjetnim zmanjšanjem letne višine padavin in pogostejšimi sušami ter severnejšimi kraji s povečanjem letne višine padavin (Kirtman et al., 2013). Zato je bila potreba po podnebnih projekcijah na lokalni ravni še toliko večja. To je bila ena glavnih motivacij, da smo leta 2016 na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) začeli obsežen projekt priprave podnebnih projekcij za Slovenijo, ki smo ga poimenovali Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo v 21. stoletju (OPS21). V okviru projekta smo ocenili spremembe najpomembnejših podnebnih spremenljivk ter vpliv teh sprememb na rastne in hidrološke razmere (Bertalanič et al., 2018). Projekt je podprlo Ministrstvo za okolje in prostor s sredstvi Sklada za podnebne spremembe.

Spremembe temperature zraka in padavin so temelj za proučevanja vplivov vseh ostalih spremenljivk. V prvem delu projekta smo analizirali spremembe teh dveh spremenljivk, njunih izjemnih vrednosti in izpeljanih podnebnih kazalnikov, rezultate pa povzemamo v nadaljevanju članka. V začetnem delu članka so predstavljeni podatki, na katerih temeljijo projekcije temperature in padavin. Sledi kratek povzetek metodologije, ki smo jo uporabljali za analizo sprememb podnebnih spremenljivk. V tem delu predstavljamo tudi metodologijo, ki smo jo razvili za prikaz zanesljivosti sprememb. Članek zaključujemo z ločenim pregledom sprememb temperaturnih in padavinskih spremenljivk.

Podatki

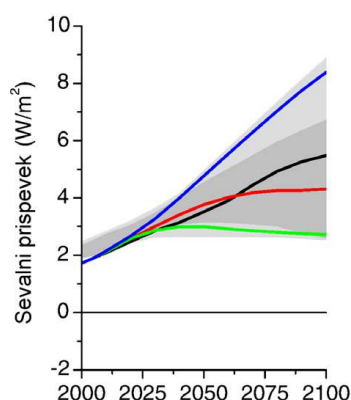
Scenariji izpustov toplogrednih plinov

Ocena podnebnih sprememb zahteva podatke o prihodnjih vsebnostih toplogrednih plinov v ozračju. Naraščanje njihove vsebnosti velja za glavni dejavnik sprememb podnebja od industrijske revolucije naprej. Vsebnost toplogrednih plinov v ozračju je močno odvisna od razvoja družbe in gospodarstva v 21. stoletju. V letih 2007–2010 je svetovna znanstvena skupnost določila štiri scenarije značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov (ang. *Representative Concentration Pathway*, RCP; Van Vuuren et al., 2011). Ti zagotavljajo dosledno rabo začetnega stanja podnebja, zgodovinskih podatkov in projekcij vsebnosti toplogrednih plinov v različnih raziskovalnih skupinah in zato omogočajo dopolnjujoče, predvsem pa primerljive rezultate raziskav prihodnjega podnebja. V nasprotju s preteklimi scenariji izpustov, ki niso ustrezno proučili možnosti, kot so blaženje podnebnih sprememb, ranljivost in prilagajanje nanje, scenariji značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov vključujejo posodobljene podatke o nedavnih izpustih in upoštevajo vpliv različnih podnebnih politik na poteke vsebnosti v 21. stoletju. Ločimo jih po številčni oznaki neto sevalnega prispevka leta 2100, ki pomeni merilo spremembe Zemljinega energetskega ravnovesja glede na predindustrijsko dobo (oziroma podnebja okrog leta 1750). To merilo je razlika energije sevanja na vrhu Zemljinega ozračja in energije, izsevane nazaj v vesolje. Scenariji izpustov skupaj obsegajo razpon možnih vrednosti sevalnega prispevka v letu 2100 od 2,6 do 8,5 W m⁻² (slika 1). Temeljijo na celotnem razponu možnih podnebnih strategij v 21. stoletju, povzetih po uporabljeni literaturi: scenarij z vključenim hitrim in izrazitim blaženjem podnebnih sprememb (RCP2.6), dva stabilizacijska scenarija (RCP4.5 in RCP6.0) in scenarij z zelo visokim izpustom toplogrednih plinov (RCP8.5).

Scenarij RCP2.6 predvideva aktivno politiko blaženja podnebnih sprememb in posledično zelo nizke izpuste toplogrednih plinov, z viškom na začetku 21. stoletja in kasnejšim znatnim upadom. Skladno s tem sevalni prispevek doseže vrh v prvi polovici 21. stoletja pri $3,0 \text{ W m}^{-2}$, do konca stoletja pa upade na $2,6 \text{ W m}^{-2}$. Za doseg te ravni sevalnega prispevka bi bilo potrebno takojšnje občutno zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov.

Stabilizacijski scenarij RCP4.5, ki na podlagi trenutnega stanja velja za zmerno optimističnega, z začetkom druge polovice 21. stoletja predvideva postopno zmanjševanje izpustov in ustalitev sevalnega prispevka kmalu po letu 2100 pri vrednosti $4,5 \text{ W m}^{-2}$. Podobno se tudi pri stabilizacijskem scenariju RCP6.0 sevalni prispevek z uporabo različnih tehnologij in strategij za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov ustali kmalu po letu 2100, ko doseže vrednost $6,0 \text{ W m}^{-2}$.

Najskrajnejši scenarij, brez predvidenega blaženja podnebnih sprememb, je RCP8.5, ki predvideva visok izpust toplogrednih plinov in posledično naraščanje njihove vsebnosti tudi po letu 2100, ob koncu stoletja pa sevalni prispevek znaša $8,5 \text{ W m}^{-2}$. Scenarij je energetsko intenziven, kar je posledica predvidene visoke rasti prebivalstva in nižje stopnje tehnološkega razvoja.



Slika 1: Značilni poteki vsebnosti toplogrednih plinov (RCP). Zelena: RCP2.6, rdeča: RCP4.5, črna: RCP6 in modra: RCP8.5. Številka izraža neto sevalni prispevek konec 21. stoletja. Scenarija RCP4.5 in RCP2.6 se stabilizirata pri označenem sevalnem prispevku po letu 2100.

Podnebne projekcije za Slovenijo smo pripravili za tri različne scenarije značilnih potekov vsebnosti, RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5, s poudarkom na zmerno optimističnem RCP4.5. Izbrani scenariji podajajo večji del možnega razpona podnebnih sprememb v Sloveniji, dejanske spremembe pa bodo odvisne od družbenogospodarskega razvoja in podnebnih politik v 21. stoletju na svetovni ravni.

Podatki modelskih simulacij

Podnebne projekcije, ki smo jih pripravili v okviru OPS21, temeljijo na simulacijah regionalnih podnebnih modelov. Zaradi negotovosti podnebnih simulacij je bilo potrebno za izdelavo podnebnih projekcij upoštevati simulacije večjega števila modelov. Zaradi sistematičnega in usklajenega pristopa k modeliranju podnebja so bili za naš namen najprimernejši podatki projekta EURO-CORDEX (ang. *Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*). EURO-CORDEX je evropska veja mednarodne pobude

CORDEX, projekta *Svetovni program za raziskave podnebja* (ang. *World Climate Research Programme*), ki naj bi organiziral mednarodno usklajeno mrežo za izračun regionalnih projekcij podnebnih sprememb za vse dele sveta. Projekt EURO-CORDEX je prostovoljen. V projektu so in še bodo izračunali ansambelske simulacije podnebja na množici dinamičnih in empirično-statističnih regionalnih podnebnih modelov, katerih vhodni podatki so izračuni globalnih podnebnih modelov (ang. *Global Climate Model* oz. *General Circulation Model*, GCM) projekta *Primerjava sklopljenih modelov, 5. stopnja* (ang. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, CMIP5) do leta 2100.

GCM oziroma modeli splošne cirkulacije so globalni numerični modeli podnebnega sistema, uporabni za proučevanje podnebnih sprememb na svetovni ravni. Opisujejo različne dele podnebnega sistema, njihove medsebojne nelinearne vplive in povratne vezi med njimi. Za izračun projekcij prihodnjega podnebja uporabljajo kot robne pogoje podatke izbranih scenarijev izpustov toplogrednih plinov, za simulacije preteklega podnebja pa v preteklosti izmerjene vrednosti meteoroloških spremenljivk. Računsko so ti modeli zelo zahtevni. Vodoravna prostorska ločljivost modelov je trenutno od 100 do 500 km, časovna ločljivost pa 6 ur. Zaradi sorazmerno grobe prostorske in časovne ločljivosti GCM niso dovolj za oceno podnebne spremenljivosti na regionalni in lokalni ravni. Za opis lokalnih posledic svetovne spremembe podnebja je potreben preračun rezultatov GCM na lokalno raven, eden od načinov je z uporabo regionalnih podnebnih modelov (ang. *Regional Climate Models*, RCM). Ti uporabljajo rezultate simulacij GCM kot vhodne podatke oziroma robne pogoje. Njihova vodoravna prostorska ločljivost je približno 10–50 km. RCM nekatere pomembne procese upoštevajo neposredno (npr. parametrizacijske sheme, prilagojene večji ločljivosti, kroženje zraka v gorah, medsebojno vplivanje kopnega in morja), zato simulirajo podrobnejše značilnosti regionalnega in lokalnega podnebja.

Projekt EURO-CORDEX še poteka. Regionalne podnebne projekcije za Evropo so ne glede na izbrani regionalni podnebni model izračunane nad enotnim območjem, v enaki modelski mreži in v dveh vodoravnih ločljivostih:

- podrobnejša EUR-11 – pravilna mreža z razmikom med računskimi točkami $0,11^\circ$ (na geografski širini Slovenije približno 12,5 km) in
- splošna EUR-44 – pravilna mreža z razmikom točk $0,44^\circ$ (na geografski širini Slovenije približno 50 km).

Podatki so predstavljeni v zavrteni geografski projekciji (ang. *rotated pole coordinate system*). Modelska mreža zajema območje približno med 27° in 72° severne geografske širine ter od 22° zahodne do 45° vzhodne geografske dolžine. Simulacije upoštevajo novejšje scenarije izpustov toplogrednih plinov RCP.

Izračuni različnih modelov v projektu EURO-CORDEX se razlikujejo predvsem zaradi razlik v parametrizacijskih shemah, ki simulirajo fizikalne procese na ravni, manjši od prostorske ločljivosti modelov (npr. kratkovalovno sevanje ter nastanek oblakov in padavin). Pomembne so tudi razlike v modelski predstavitvi Zemljinega površja (npr. digitalni model višin, modeli značilnosti površja, informacije o rabi tal itd.), številu navpičnih nivojev, numeričnih shemah reševanja diferencialnih enačb itd.

Na začetku leta 2016, ko smo začeli pripravljati podnebne projekcije za Slovenijo, je bilo na voljo po 14 simulacij za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 ter dve za scenarij RCP2.6. Simulacije za scenarij RCP6.0 niso bile na voljo. Za oceno negotovosti podnebnih projekcij smo analizirali zbirko, ansambel izračunov različnih modelov. Zaradi zahtevnosti analize velikega števila podnebnih modelov in da nesorazmerna zastopanost različnih modelov ne bi popačila rezultatov analize, smo izbrali nekaj regionalnih modelov, ki prikazujejo podoben razpon odziva podnebnega sistema kot ansambel vseh modelov, ki so bili na voljo. Pri izboru je bilo pomembno tudi to, da so se rezultati posameznih modelov

dobro ujemali z meritvami v primerjalnem obdobju 1981–2010. Od 14 kombinacij globalnih in regionalnih podnebnih modelov smo jih izbrali šest (preglednica 1). V izbranih ansamblih nastopa v različnih kombinacijah 5 globalnih in 5 regionalnih modelov.

Preglednica 1: Seznam simulacij, katerih izračune smo uporabili za pripravo projekcij. Podani so: ustanova, ki je izvedla simulacijo, ter imeni globalnega (GCM) in regionalnega (RCM) modela. Če smo simulacijo za določeni scenarij RCP uporabili pri analizi, je v ustreznem polju križec.

Ustanova	GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMcom	CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
DMI	EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-INERIS	IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
KNMI	HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
SMHI	MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

Metodologija

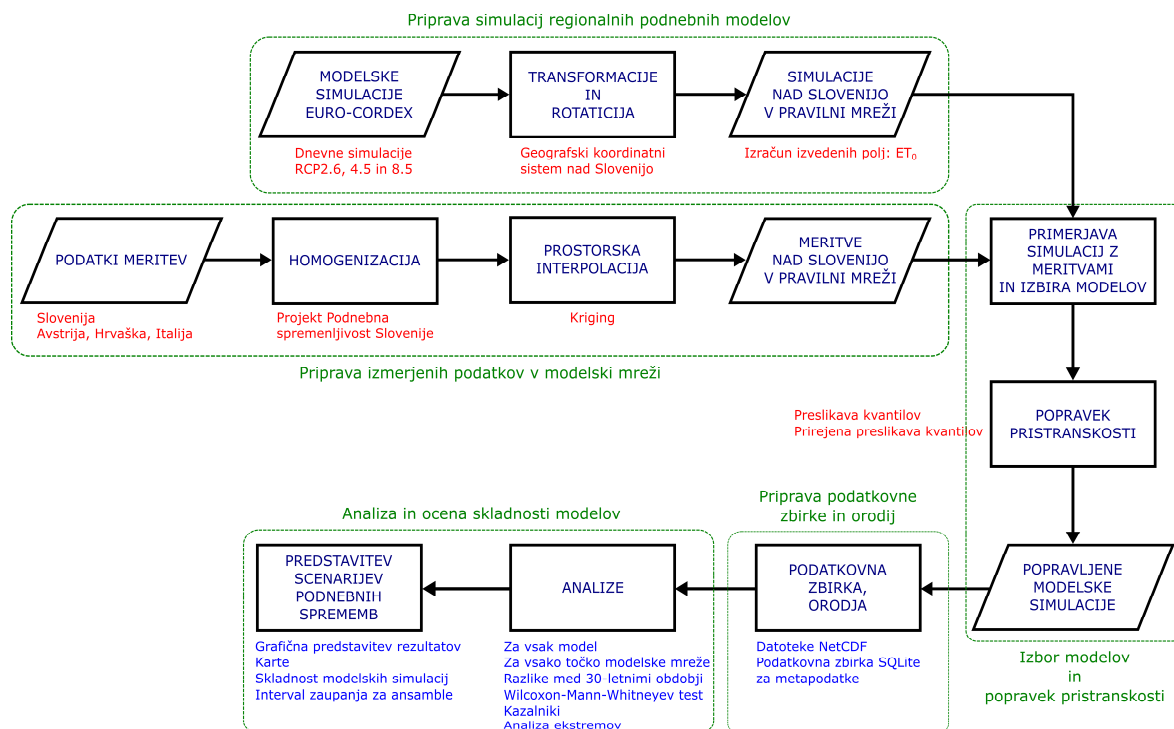
Modelske simulacije podnebja

Kot je opisano že v poglavju o podatkih, smo za pripravo projekcij uporabili ansambel simulacij podnebnih modelov, s pomočjo katerih nismo ocenili le sprememb posamezne spremenljivke, ampak tudi njeno zanesljivost. Ker smo poleg analize povprečnega podnebja želeli analizirati tudi spremembe v izjemnih vremenskih dogodkih na lokalni ravni, smo uporabili dnevne modelske podatke. V prvem koraku, še pred izborom modelov iz baze EURO-CORDEX, smo morali preveriti, kako uspešni so posamezni modeli pri simulaciji podnebja nad Slovenijo. Na podlagi teh ocen smo izbrali manjši ansambel najboljših modelov in analizirali njihove rezultate. Metodologija ocene podnebnih sprememb projekta OPS21 je bila tako sestavljena iz naslednjih korakov (slika 2):

- Priprava izmerjenih podatkov v modelski mreži (Bertalanič et al., 2018).
- Priprava izračunov simulacij regionalnih podnebnih modelov za različne scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5).
- Izbor primernih regionalnih podnebnih modelov in popravki njihovih pristranskosti (Medved in Vertačnik, 2019).
- Priprava ustrezne podatkovne zbirke podnebnih scenarijev in orodij za dostop do podatkov.
- Analiza podatkov izbranih regionalnih podnebnih modelov in ocena skladnosti ugotovljenih sprememb oz. združevanje rezultatov modelov ansambla v enotno oceno podnebnih sprememb za posamezni scenarij toplogrednih plinov.

Metodološko najzahtevnejši del je bil popravljanje pristranskosti modelov, ki je podrobno opisan v ločenem članku (Medved in Vertačnik, 2019). Popravljenе modelske simulacije smo nato analizirali za vsak model ansambla posebej in po točkah modelske mreže. Za izbran scenarij izpustov smo za vsak model in vsako točko modelske mreže ocenili spremembo v prihodnosti. Spremembo smo analizirali s primerjavo rezultatov s preteklim primerjalnim obdobjem (1981–2010) za enega od treh projekcijskih obdobj:

- *bližnjo prihodnost* (2011–2040),
- *sredino stoletja* (2041–2070) in
- *konec stoletja* (2071–2100).



Slika 2: Shematski prikaz priprave podnebnih projekcij projekta OPS21

Statistično zanesljivost spremembe povprečnih vrednosti smo ocenili s testiranjem ničelne hipoteze, da do spremembe ni prišlo. Spremembe smo ocenili na letni ravni, ker pa so pri nekaterih spremenljivkah bistvene razlike v spremembah med letnimi časi, smo jih ocenili tudi na ravni meteoroloških letnih časov. Letne čase smo opredelili kot naslednja tromesečja:

- *pomlad* (marec, april, maj),
- *poletje* (junij, julij, avgust),
- *jesen* (september, oktober, november) in
- *zimo* (december, januar, februar).

Ocena zanesljivosti sprememb

Statistične teste oz. preverjanje hipotez smo naredili po modelskih točkah za vsak model in vsak scenarij izpustov posebej. Rezultat je statistična zanesljivost ugotovljene spremembe za vsak model ansambla v vsaki točki modelske mreže. Statistično zanesljivost izračunanih sprememb smo izračunali z Mann–Whitney–Wilcoxonovim testom pri stopnji značilnosti 10 %. Rezultati v izbrani modelski točki se med modeli ansambla razlikujejo. Uporaba ansamblov podnebnih modelov lahko zato vodi do širokega razpona ocene podnebnih sprememb. Da bi zgoščili informacijo bodočih sprememb, smo uvedli skladnost ansamblske projekcije. *Skladnost* je definirana kot soglasnost modelskih simulacij bodočih sprememb, še posebej, če so te spremembe statistično značilne.

Za oceno skladnosti ansambla smo vzeli naslednje merilo: ocena ansambla je označena kot skladna, če je statistično značilna za vsaj polovico modelov ansambla, pri čemer morajo značilne spremembe imeti isti predznak. Če kažejo modeli ansambla značilno spremembo z obema predznakoma, je ocena ansambla skladna le, če je absolutna razlika

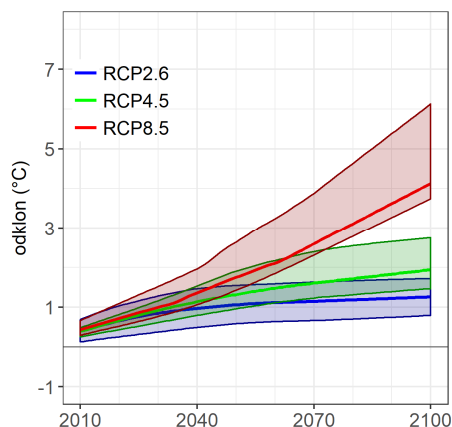
med številom modelov z značilno spremembo različnih predznakov večja ali enaka polovici modelov v ansamblu.

Na opisani način smo za posamezno spremenljivko in podnebni scenarij ocenili zanesljivost sprememb na podlagi statistične zanesljivosti za vseh šest modelov ansambla. Ločili smo med tremi vrstami zanesljivosti. Skladna ocena ansambla, kjer se večina modelov ujema v predznaku statistično značilne spremembe, je definirana kot *visoka zanesljivost spremembe*. Neskladno oceno, kjer si modeli nasprotujejo glede smeri spremembe, spremembe v obe smeri pa so statistično značilne in lahko tudi zelo velike, smo označili kot *nizko zanesljivost spremembe*. Primere, ko večina modelov ansambla kaže statistično neznačilne spremembe, pa smo označili, da so *brez spremembe*, saj so v teh primerih zaznane spremembe manjše od naravne spremenljivosti.

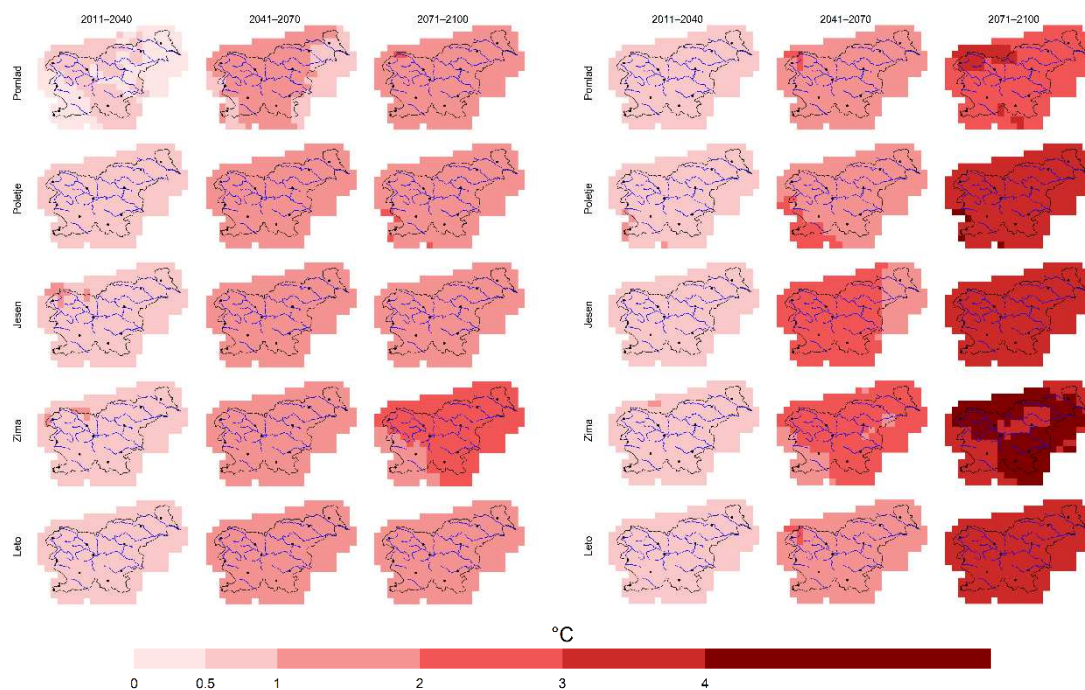
Rezultati

Spremembe temperature

Temperature zraka v Sloveniji bo skozi 21. stoletje naraščala, velikost dviga pa je zelo odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov (slika 3). V primeru optimističnega scenarija izpustov (RCP2.6) bo temperatura do konca stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 zrasla za približno 1,3 °C, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov (RCP4.5) za približno 2 °C, v primeru pesimističnega scenarija izpustov (RCP8.5) pa za približno 4,1 °C. Po prvih dveh scenarijih, ki predvidevata zmanjšanje izpustov, temperatura sprva narašča in se konec 21. stoletja ali kmalu po njem ustali, po pesimističnem scenariju pa se naraščanje temperature proti koncu stoletja stopnjuje. Proti koncu 21. stoletja se stopnjuje tudi negotovost. V bližnji prihodnosti so temperaturna odstopanja od primerjalnega obdobja med posameznimi scenariji izpustov še primerljiva, potem pa se časovni poteki ločijo.



Slika 3: Časovni potek odklona povprečne temperature zraka od primerjalnega obdobja 1981–2010 za Slovenijo na letni ravni za tri scenarije izpustov. Debele črte prikazujejo glajen signal, ovojnice pa glajen razpon negotovosti.

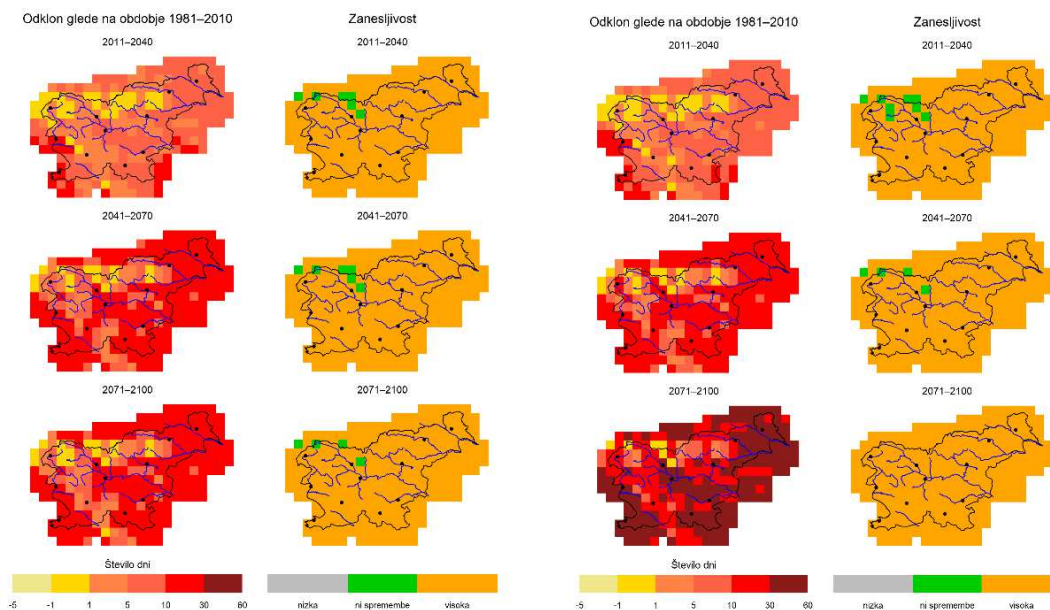


Slika 4: Srednja sprememba povprečne temperature po letnih časih in na letni ravni glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij.

Vse spremembe temperature imajo visoko stopnjo zanesljivosti (Bertalanič et al., 2018). Naraščanje temperature je prostorsko precej enakomerno, razlikuje pa po letnih časih (slika 4). Naraščanje temperature je za Slovenijo predvideno v vseh letnih časih, vendar je za zimo podnebni signal ob koncu stoletja tako na državni kot na regionalni ravni izrazitejši od povprečnega letnega podnebnega signala. Predvsem v severnem in vzhodnem delu Slovenije bo temperatura pozimi naraščala hitreje od letnega povprečja. Izrazitejša sprememba se kaže predvsem pri pesimističnem scenariju.

Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. Izjemne razmere spremljamo s temperaturnimi kazalniki, npr. kazalniki izjemne vročine ali mraza. Analiza kazalnikov kaže, da bodo spremembe povprečnih razmer spremljale spremembe v skrajnostih (vroči dnevi, ledeni dnevi ipd.). Obeta se nam veliko večje število vročih dni (z najvišjo temperaturo nad 30 °C) kot doslej (slika 5), v primeru zmerno optimističnega scenarija za približno 11 dni, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa za približno 27 dni v slovenskem povprečju. V vseh scenarijih izpustov se bo povečalo število in trajanje vročinskih valov. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov bomo imeli konec stoletja povprečno vsaj en vročinski val letno, ki bo po jakosti primerljiv ali hujši od vročinskega vala, ki smo ga imeli poleti 2003. Vroči dnevi se utegnejo pojaviti precej više kot doslej, na meji visokogorja.

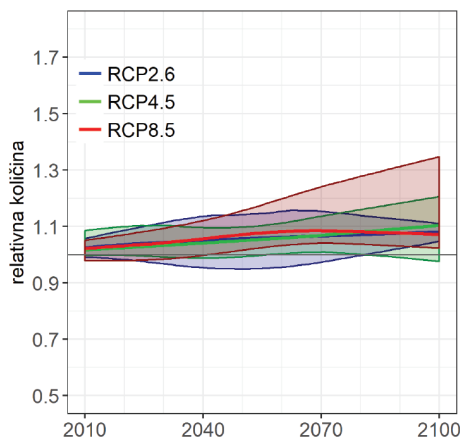
Število hladnih (dnevna najnižja temperatura pade pod 0 °C) in ledenih (dnevna najvišja temperatura ne preseže 0 °C) se bo precej zmanjšalo (Bertalanič et al., 2018). Največji upad števila ledenih oziroma hladnih dni v prihodnosti pričakujemo v visokogorju in na prehodu med Primorsko in osrednjo Slovenijo.



Slika 5: Sprememba števila vročih dni (nad 30 °C) na leto glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe števila vročih dni, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da so spremembe znotraj naravne spremenljivosti, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

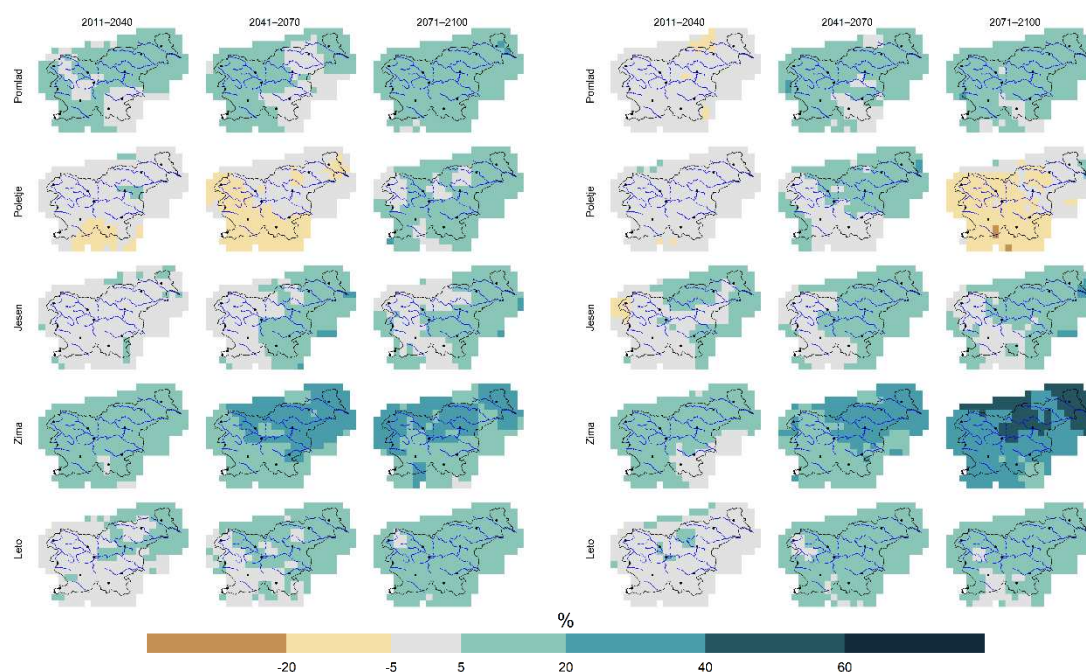
Spremembe padavin

V nasprotju s temperaturo so scenariji za spremembe padavin manj zanesljivi, saj so te časovno in prostorsko bolj raznolike. Optimistični scenarij izpustov (RCP2.6) na letni in državni ravni v nobenem obdobju ne predvideva statistično značilnih sprememb. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov (RCP4.5) višina padavin vseskozi raste, v začetnem obdobju na letni ravni so spremembe zelo majhne, vendar se signal z odmikom v prihodnost stopnjuje (slika 6). Pesimistični scenarij izpustov (RCP8.5) sprva predvideva naraščanje padavin po vsej državi, v drugi polovici 21. stoletja pa se negotovost signala močno poveča.



Slika 6: Časovni potek kazalnika višine padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za Slovenijo na letni ravni za tri scenarije. Debele črte prikazujejo glajen signal, ovojnice pa glajen razpon negotovosti.

Tudi prostorsko so projekcije manj homogene kot pri temperaturi (slika 7). Z začetkom sredine stoletja se bo območje relativnega naraščanja padavin na letni ravni začelo širiti z vzhoda na zahod, vendar je sprememba zanesljiva le na skrajnem severovzhodu. Do leta 2100 je na celotnem območju Slovenije z izjemo Julijskih Alp pričakovan porast povprečnih letnih padavin za približno 10 % glede na obdobje 1981–2010, pri čemer je sprememba bolj zanesljiva v vzhodni polovici Slovenije.



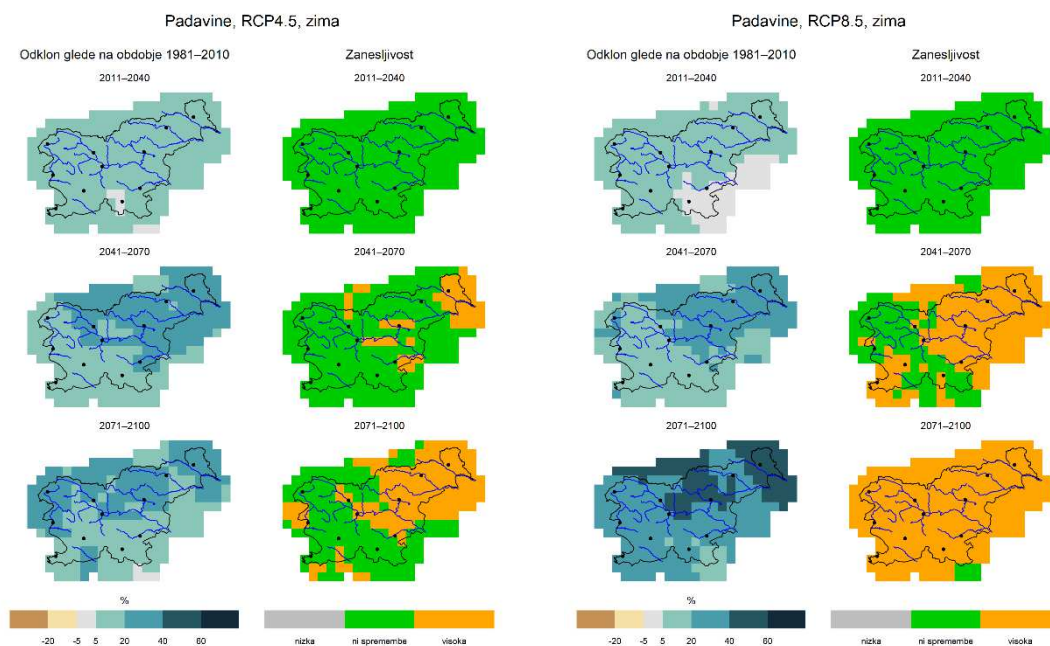
Slika 7: Srednja sprememba povprečne višine padavin po letnih časih in za obdobje celega leta v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični (levo) in pesimistični scenarij (desno). Prikazan je relativni odklon višine padavin od povprečja v primerjalnem obdobju 1981–2010.

Na sezonski ravni je signal spremembe padavin po velikosti bolj izražen. V primeru zmerno optimističnega scenarija (RCP4.5) bo naraščanje padavin najbolj izrazito pozimi, za kar je zanesljivost deloma visoka (slika 8). Spomladi in jeseni signal prav tako kaže naraščanje padavin, vendar manj zanesljivo. Poleti različni modeli kažejo bodisi majhne spremembe bodisi spremembe v različni smeri, zato je signal spremembe majhen ali negotov (slika 9).

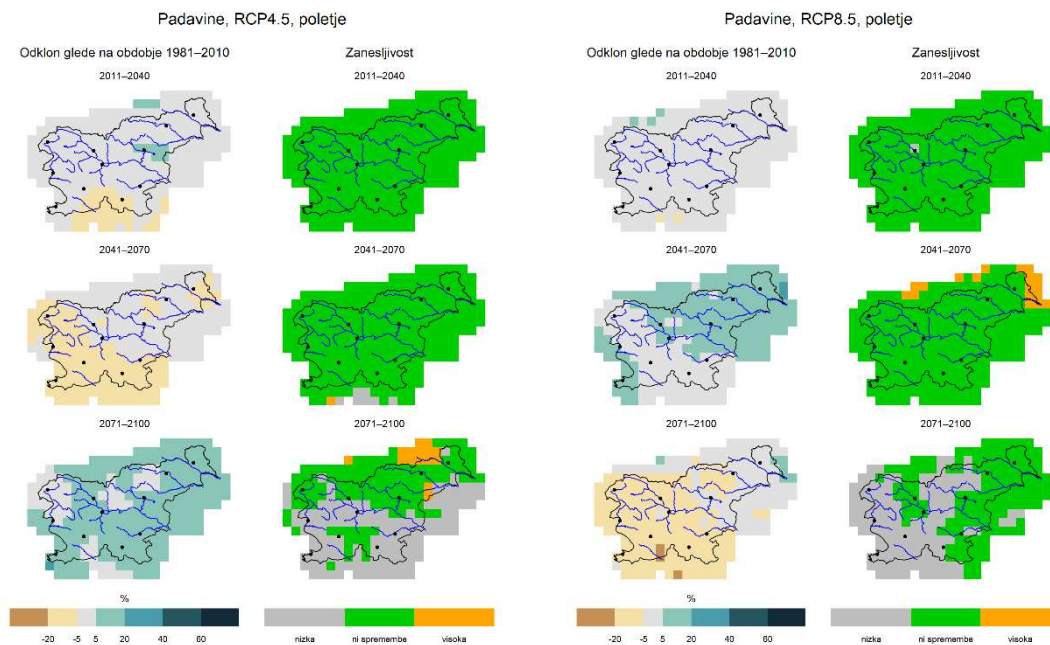
Po pesimističnem scenariju (RCP8.5) so signali sprememb za pomlad, jesen in zimo podobni kot v zmerno optimističnem scenariju, pri čemer je signal za povečanje zimskih padavin še bolj izražen in zanesljiv kot v zmerno optimističnem scenariju (slika 8). Tudi za pesimistični scenarij izpustov je podobno kot za zmerno optimistični scenarij signal spremembe padavin poleti v začetnih obdobjih zelo majhen, proti koncu stoletja pa zelo negotov (slika 9). Z izjemo poletja je v drugih letnih časih ob koncu stoletja predvidena večja višina padavin, vendar z gotovostjo lahko potrdimo le signal za zimo.

Jakost in pogostost izjemnih padavin se bosta povečali, bolj po pesimističnem scenariju (RCP8.5) (Bertalanič et al., 2018). Nalivi z danes izjemno jakostjo bodo postali običajnejši. Število padavinskih dni se bo po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5)

zmanjšalo samo sredi stoletja in to poleti, po pesimističnem scenariju pa na letni ravni že sredi stoletja, do konca stoletja pa se bo signal še stopnjeval.



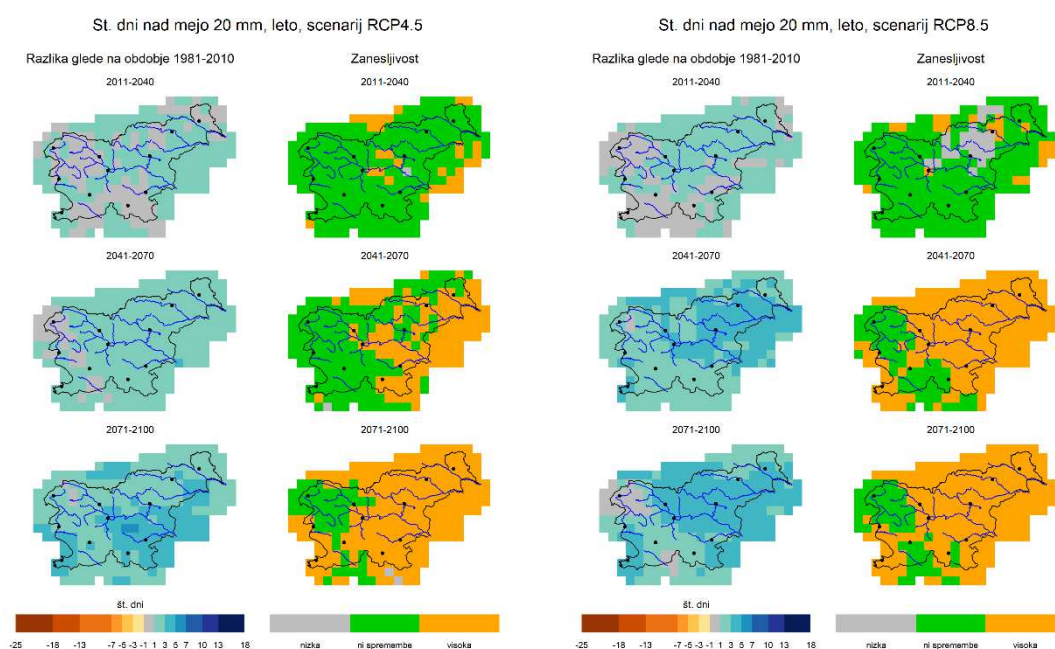
Slika 8: Sprememba višine zimskih padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe padavin, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti zimskih padavin, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.



Slika 9: Sprememba višine poletnih padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe padavin, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti poletnih padavin, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

Dnevi s srednje intenzivnimi dnevnimi padavinami (več kot 10 mm), ki so danes precej pogosti na alpsko-dinarski pregradi, bodo na vzhodu pogostejši (Bertalanč et al., 2018). Po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5) se bo njihovo število občutno povečalo šele ob koncu stoletja, medtem ko se v primeru pesimističnega scenarija (RCP8.5) občutno povečanje kaže že sredi stoletja.

Dnevi z intenzivnejšimi padavinami (nad 20 mm), ki se danes v večini Slovenije ne pojavljajo pogosto, bodo po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5) pogostejši že sredi stoletja, do konca stoletja pa se bo povečanje še stopnjevalo (slika 10, levo). Spremembe so statistično zanesljive najprej na vzhodu Slovenije, do konca stoletja pa po vsej državi, z izjemo alpsko-dinarske pregrade. Največji del povečanja takšnih dni gre na račun povečanja jeseni in pozimi. Še večje spremembe so predvidene za pesimistični scenarij (RCP8.5), ko se bo število takšnih dni povečalo sredi in konec stoletja po celotni državi, z izjemo alpsko-dinarske pregrade (slika 10, desno).



Slika 10: Sprememba števila dni na leto s padavinami nad 20 mm glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe števila dni, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti števila dni s padavinami nad 20 mm, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

Zaključki

Za pripravo strokovnih podlag za prilagajanje na podnebne spremembe v Sloveniji je ključno poznavanje pretekle podnebne spremenljivosti in ocenjevanje prihodnjih podnebnih razmer. Projekcije sprememb temperaturnih in padavinskih razmer kažejo, da se bodo te ne glede na scenarij izpustov toplogrednih plinov izrazile v tolikšni meri, da bo prilagajanje nanje nujno.

Naraščanje temperature zraka se bo v Sloveniji v 21. stoletju nadaljevalo, velikost dviga pa je odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov. Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju izpustov sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru pesimističnega scenarija izpustov.

Literatura

- Bertalanič, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., Vlahovič, Ž., Žust, A. (2018). Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo - prvi del. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 156 p.
- EEA. (2017). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg, 420 p.
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., . . . Wang, H. J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . (Ed.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge in New York, 953–1028.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31.
- Vertačnik, G., Bertalanič, R. (2017). Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011: Značilnosti podnebja v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 198 p.
- Medved, A., Vertačnik, G. (2019). Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih. Zbornik raziskave s področja geodezije in geofizike 2018, Ljubljana, 61-74.