Podnebne podlage za definicijo vročinskega vala

Neža Ključevšek, Andrej Hrabar, Mojca Dolinar, Agencija Republike Slovenije za okolje, (neza.kljucevsek@gov.si)

Povzetek

V Sloveniji enotne definicije za vročinski val do sedaj nismo imeli. Zaradi hude vročine, ki v zadnjih poletjih postaja stalnica tudi v Sloveniji, se je pojavila potreba po enotni definiciji za spremljanje vročinskih valov. Na znanstvenem posvetu o vročinskih valovih smo sodelujoči ugotovili, da zaradi zelo različnih vplivov vročine na posamezne uporabniške skupine, ne moremo definirati enotnega kazalca vročine. Kljub temu je za spremljanje, predvsem pa za napovedovanje vročine splošni javnosti, potrebno definirati enoten kazalec vročinskega vala. Osnovne zahteve takega kazalca so preprostost in razumljivost splošni javnosti, sledljivost na podlagi meritev ter napovedljivost na podlagi modelskih izračunov. Na podlagi prostorsko-časovne analize temperaturnih nizov slovenskih merilnih postaj je predlagana definicija vročinskega vala, ki temelji na dnevni povprečni temperaturi z regionalno različnimi temperaturnimi pragovi.

Ključne besede: *vročinski val, vročinski kazalci*

Abstract

Until recently, no uniform definition of a heat wave has been agreed upon in Slovenia. However, due to frequent and intense hot spells during the summer, there is a need for such a definition in order to successfully monitor these periods of intense heat. A scientific council on heat waves has concluded that due to the immensely different requirements of impact studies for each specific group of subjects, no uniform heat index can be defined. Nevertheless, such an index is needed for systematic monitoring and forecasting of heat waves. For this index to be effective it has to be simple and easy to understand for the general public, should be based on the monitored meteorological variables for monitoring purposes and calculable on the basis of weather model values for forecasting purposes. The proposed heat wave index is based on daily mean temperature value, where temperature limit is regionalised, based on spatio-temporal analysis of Slovenian temperature time series

Ključne besede: *heat wave, heat index*

Uvod

Huda vročina je v zadnjih letih naša poletna stalnica. Podnebni scenariji kažejo, da se bodo temperature še naprej dvigale (npr. Russo in sod., 2014). Tudi za poletno, več dni trajajočo vročino, se kaže trend naraščanja (Clark in sod., 2005). Pogosto lahko zasledimo, da se daljše obdobje nenavadno visokih temperatur imenuje vročinski val. Zanj ni splošno sprejete definicije, predvsem zaradi velike podnebne pestrosti in različnih sposobnosti prilagajanja živih organizmov na vročino (McGregor in sod., 2015).

Kazalci, ki bi jih bilo mogoče uporabljati v slovenskem podnebju, so podrobneje predstavljeni v Ključevšek (2018), analiza različnih kazalcev, ki temelji na meritvah meteoroloških postaj po Sloveniji, pa v magistrskem delu Ključevšek (2016) in članku Ključevšek (2018).

Različne države po svetu imajo torej različno definicijo vročinskega vala. Nekatere definicije temeljijo izključno na podnebnih značilnostih posameznega območja, druge upoštevajo tudi učinke vročinsko izredno napornih dni na različne ciljne skupine. Najpogostejša definicija vročinski val opredeljuje kot dlje časa trajajoče nadpovprečno toplo obdobje. Pri tej definiciji pa ni jasno definirano, kaj pomeni dlje časa trajajoče, torej kaj pomeni "več". Tudi nadpovprečno toplo obdobje ni natančno opredeljeno, – se to nanaša na najvišje, najnižje ali povprečne izmerjene temperature? Prav zaradi tega so se po različnih državah izoblikovale različne definicije (McGregor in sod., 2015). V nekaterih delih sveta so ugotovili, da se v času vročinskih valov poveča umrljivost, še posebej v mestih, kjer se toplota še bolj nakopiči (Li, 2013; Schatz, 2015). V Sloveniji v povprečju na dan umre 55 ljudi. Ta podatek je dovolj, da lahko podvomimo o statistično značilnem vplivu vročine na umrljivost

(Ključevšek, 2016). Primerneje bi bilo opazovati povečan obisk urgenc zaradi zdravstvenih stanj, ki so povezana z vročino, vendar ti podatki za Slovenijo zaenkrat niso na voljo. Zaradi pomanjkanja podatkov ne moremo ugotavljati povezave med intenzivnostjo in trajanjem vročine na eni strani in njenimi učinki na zdravje in umrljivost na drugi strani, kar bi nas lahko pripeljalo do ustreznih meja za nastop vročinskega vala. Glede na dostopnost podatkov v Sloveniji lahko vročinski val definiramo samo na podlagi podnebnih značilnosti.

Drugi vidik, ki prav tako podpira definicijo izključno na podnebnih značilnostih, je širina uporabe. Različna živa bitja se različno odzivajo na toplotno obremenitev in imajo različno sposobnost prilagajanja. Že pri človeku težko pridemo do enotne meje, kje se začne toplotna obremenitev, saj se ta precej razlikuje med posameznimi skupinami (otroci, zdravi odrasli, ostareli, kronični bolniki ...). Še večje so razlike med različnimi živimi bitji.

Metode in podatki

Pri definiciji vročinskega vala smo sledili dvema vidikoma:

- široka uporabnost vročinskega kazalca
- enostavnost

Z upoštevanjem prvega vidika smo želeli, da nastop vročinskega vala pomeni večjo toplotno obremenitev za čim več ciljnih skupin. Z drugim vidikom smo želeli doseči, da je sama definicija razumljiva in da za izračun nastopa vročinskega vala potrebujemo čim manj podatkov, ti pa morajo biti dosegljivi za preteklost (meritve) in za prihodnost (rezultati meteoroloških modelov). Podatki za izračun vročinskega vala morajo biti tudi dovolj zanesljivi – obremenjeni s čim manjšo mersko napako oziroma negotovostjo izračuna pri modelskih spremenljivkah.

Nastanek vročinskega vala je povezan z dotokom tople zračne mase, ki je lahko morsko-tropska ali celinsko-tropska. Zračna masa mora vztrajati nad našimi kraji vsaj nekaj dni, drugače ne moremo govoriti o vročinskem valu, ampak le o prehodnem vročem dnevu ali dveh. Morsko-tropska zračna masa vsebuje več vlage, zato dnevni temperaturni hod (razlika med dnevno najnižjo in najvišjo temperaturo) ni tako izrazit, je pa ozračje bolj soparno in so nevihte lahko pogoste. Celinsko-tropska zračna masa v primerjavi z morsko-tropsko zračno maso vsebuje manj vlage, je bolj stabilna in tudi bolj vroča. Zato je dnevni temperaturni hod izrazitejši, višje so tudi dnevne najvišje temperature, vendar so noči v primerjavi z morsko-tropsko zračno maso hladnejše.

Pri enaki temperaturi zraka je toplotna obremenitev odvisna še od količine vodne pare v zraku (vlažnosti zraka), hitrosti vetra (odvajanje toplote s telesa) in sevanja (sončno sevanje in dolgovalovno sevanje – tal in neba, sevanje zgradb, prostorov, in drugih teles). Povezava vročinskega vala z dnevnimi najvišjimi temperaturami torej ni enoznačna. Poleg dnevne najvišje temperature je pomembno tudi trajanje toplotne obremenitve. V zelo suhem ozračju se ponoči prizemna plast zraka lahko močno ohladi in v taki zračni masi imamo kljub zelo visokim dnevnim najvišjim temperaturam noči sorazmerno sveže. Nasprotno pa v vlažni zračni masi temperature čez dan ne zrastejo tako visoko kot v suhi zračni masi, vendar se tudi ponoči bistveno manj spustijo in toplotna obremenitev lahko traja večji del dneva. Tako je lahko toplotna obremenitev v vlažni zračni masi bistveno večja, čeprav so zabeležene dnevne najvišje temperature nižje kot v suhi zračni masi.

Od naštetih spremenljivk, ki vplivajo na toplotno obremenitev, z najmanjšo napako izmerimo in z največjo zanesljivostjo napovemo temperaturo zraka. Vse ostale spremenljivke so obremenjene z bistveno večjo negotovostjo. Vlažnost zraka, ki je zelo pomembna za stopnjo toplotne obremenitve, je obremenjena z veliko mersko napako. Poleg tega je v primerjavi s temperaturo zraka vlaga veliko bolj odvisna od mikrolokacije. Tudi napovedi vlage so veliko manj zanesljive od napovedi temperature zraka.

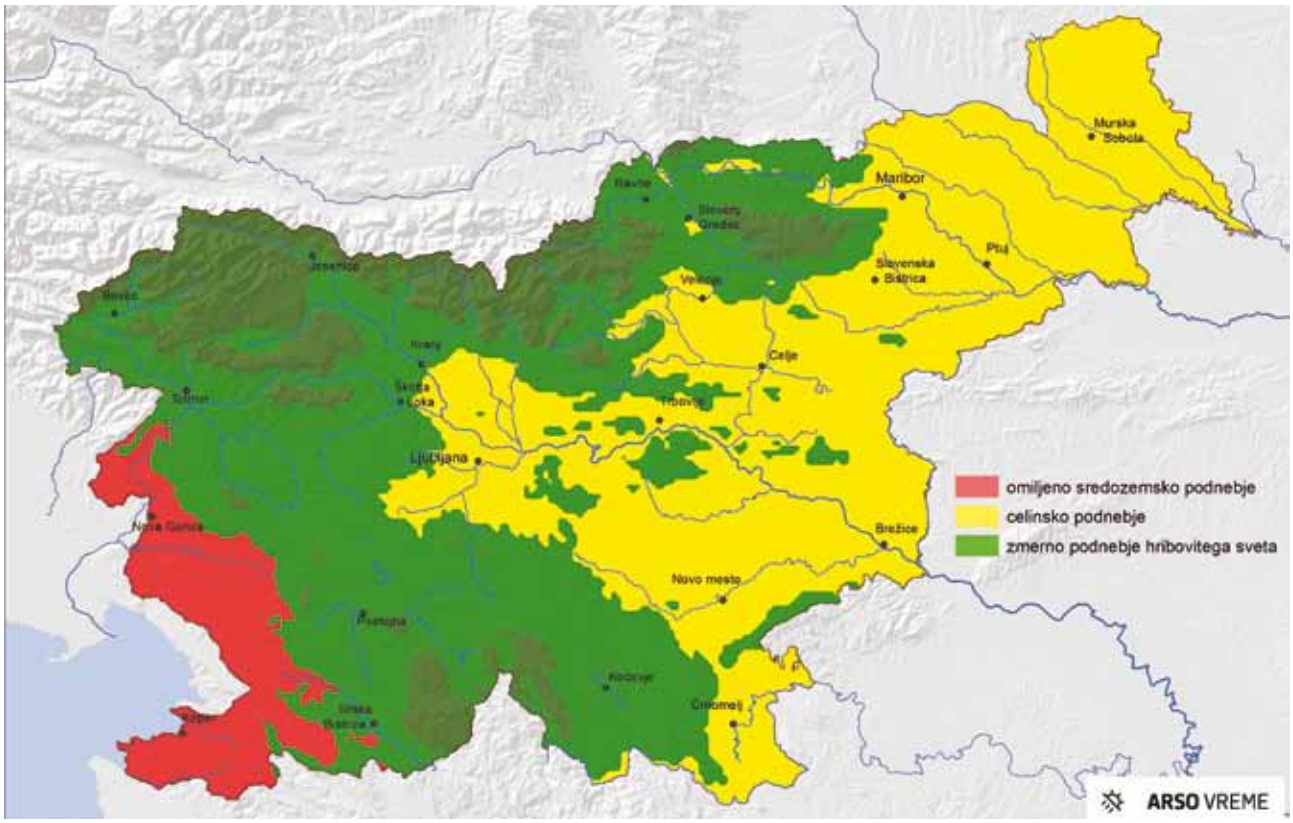
Dnevna povprečna temperatura zraka ima lastnost, da delno odraža tudi druge meteorološke spremenljivke. Predvsem je dnevna povprečna temperatura dobra mera za jakost toplotne obremenitve, saj bo približno enaka za dolgotrajno obremenitev pri nekoliko nižjih temperaturah (majhna amplituda dnevnega temperaturnega hoda v vlažni zračni masi) ali kratkotrajno obremenitev pri višjih temperaturah z vmesno osvežitvijo (velika amplituda dnevnega temperaturnega hoda v suhi zračni masi). Tako dnevna povprečna temperatura delno posredno iz dnevnega temperaturnega hoda odraža tudi vlažnost zraka. Zelo neposredno pa je dnevna povprečna temperatura povezana z jakostjo sončnega sevanja. Tako je edina spremenljivka, pomembna za energijsko bilanco živih bitij, ki je vsaj delno ne opišemo z dnevno povprečno temperaturo, veter. Čeprav je veter zelo pomembna spremenljivka za občutenje hladu ali vročine, ga pri definiciji nismo upoštevali, ker so podatki o vetru pomanjkljivi. Meritve vetra so prostorsko redke, pri čemer je podobno kot vlažnost zraka tudi veter prostorsko zelo spremenljiv in odvisen od mikrolokacije. Enako velja za napovedi, ki so ravno zaradi velike prostorske spremenljivosti obremenjene z veliko napako na lokalni ravni.

Dnevna povprečna temperatura zraka se je izkazala kot primeren kazalec za spremljanje vročine (Nairn, 2013). Poleg temperaturnih razmer z njo vsaj delno zajamemo tudi vlažnost zraka in opišemo izpostavljenost toplotni obremenitvi (jakost in trajanje).

Dnevna povprečna temperatura je enostaven kazalec, razumljiv širši javnosti in ga lahko z dokaj veliko natančnostjo izračunamo na podlagi meritev in hkrati tudi na podlagi modelskih rezultatov za prihodnost. Zaradi teh lastnosti smo vročinski val definirali na podlagi dnevne povprečne temperature. Pri tem pa se je potrebno zavedati, da za natančnejše študije vpliva toplotne obremenitve na različne skupine uporabnikov takšna definicija ne zadošča, saj je preveč splošna in ne upošteva različnih odzivov živega bitja na toplotno obremenitev. Za takšne študije je potrebno bolj natančno upoštevati vse lastnosti zračne mase in lokalnega vremena (poleg temperature tudi vlažnost, veter, sončno sevanje ...) in uporabiti kazalec, ki je prirejen za posameznega uporabnika (Ključevšek, 2018).

Slovenija je glede na velikost podnebno izjemno pestra. Temu so do neke mere prilagojeni ljudje, ostali živi svet in kulturna krajina. Zato temperaturna meja, pri kateri nastopi vročinski val, ni enotna. Pri določitvi meje je potrebno upoštevati prilagoditve, ki so odvisne od lokalnih podnebnih značilnosti. Na postajah z dolgimi nizi meritev smo analizirali vrednosti temperature za vrhnji del porazdelitve (od 95. do 99. centila) dnevne povprečne temperature zraka. Vrednost temperature zraka pri 95. centilu pomeni, da je bila dnevna povprečna temperatura zraka v 95 % vseh dni v obravnavanem obdobju nižja ali enaka, v 5 % dni pa višja od te mejne temperature. Za vsako od postavljenih meja smo analizirali pogostost vročinskih valov (vorčinski val se šteje vsak dogodek, ko vsaj tri dni zapored presegamo izbrano mejo) in porazdelitev dnevne najvišje temperature znotraj tako določenih vročinskih valov. Na podlagi te analize smo določili, pri katerem centilu bomo postavili mejo za nastop vročinskega vala. Izbrani centil bi podal temperaturo, ki jo od sedaj naprej imenujmo temperatura praga vročinskega vala.

Ena od potrebnih poenostavitev pri definiciji vročinskega vala je enotna meja za čim širše območje. Na podlagi točkovno izračunanih vrednosti temperature pri določenem mejnem centilu, smo izračunali prostorsko porazdelitev temperatur praga vročinsega vala po Sloveniji. Da smo zadostili kriteriju enostavnosti, smo zaradi velike prostorske spremenljivosti na podlagi prostorske analize meje poenotili po podnebnih regijah Slovenije (Kozjek in sod., 2016). Podnebnih regij je šest. Ker za namen definicije vročinskih valov ni potrebno upoštevati značilnosti padavin, smo podnebne regije lahko združili v tri: celinsko podnebje (osrednja, severovzhodna in jugovzhodna Slovenija), zmerno podnebje hribovitega sveta (Gorenjska, Notranjska ter dvignjen svet Štajerske in Dolenjske) in omiljeno



Slika 1. Temperaturne regije, povzete po Kozjek in sod. (2016), namenjene analizi vročinskih valov. Temno območje znotraj regije s podnebjem hribovitega sveta (zelena), predstavlja območje z gorskim podnebjem, ki ni bilo vključeno v analizo.

Figure 1. Temperature regions after Kozjek et al. (2016) which were used for heat wves analysis. Dark area within zmerno podnebje hribovitega sveta, indicates alpine climate region, that was excluded from the heat waves analysis.

sredozemsko podnebje (zahodni in jugozahodni del Primorske) (slika 1). Regije z gorskim podnebjem smo iz analize izločili zaradi zelo redke poseljenosti tega območja in nizke povprečne temperature v tej regiji.

V analizo smo vključili podatkovne nize, ki so bili v procesu homogenizacije dolgih mesečnih nizov prepoznani kot kakovostni nizi brez potrebnih večjih popravkov (Vertačnik, 2015). To namreč pomeni, da so tudi dnevni podatki (ki niso bili homogenizirani) dovolj zanesljivi za analizo. Postaj s takšnimi nizi je 19 (preglednica 1).

Rezultati

Značilnosti vročinskih valov pri različnih mejah

Za izbranih 19 postaj z dovolj dolgim in kakovostnim časovnim nizom smo izračunali vrednosti dnevne povprečne temperature pri visokih centilih, in sicer od 95. do 99. centila. Vrednost pri posameznem centilu je bila izračunana na podlagi porazdelitve dnevne povprečne temperature v treh različno dolgih časovnih obdobjih. Prvo obdobje je bilo dolgo 30 let, kot je standard v klimatologiji, nato smo postopek ponovili še za 20- in 10-letno obdobje. Da ne bi iz analize izpustili zadnjega, izjemno toplega obdobja, se vsa obravnavana obdobja zaključijo z letom 2015. Tako je v vse analize vključeno tudi leto 2013, ko smo zabeležili veliko temperaturnih rekordov. Z analizo centilov v različno dolgih obdobjih smo ocenili občutljivost tako določene meje za vročinski val na časovno spremenljivost dnevne povprečne temperature. Izračunane temperaturne vrednosti za posamezne centile in obdobja so zbrane v preglednici 1.

Vročinski val obravnavamo kot ekstremen vremenski dogodek, na katerega prebivalstvo ni prilagojeno in je nanj potrebno opozarjati. Za Slovenijo ne obstajajo študije, ki bi povezale stopnjo toplotne obremenitve s škodnimi učinki na prebivalstvo. Študija Perčičeve in sodelavk v pričujoči številki Vetrnice je pokazala, da se pri določenih občutljivih skupinah poveča stopnja umrljivosti, ko v dveh ali več soslednih dnevih psevdo-ekvivalentna temperatura zraka preseže 56 °C. To je bil edini podatek o vplivu vročine na ljudi, na katerega smo se lahko oprli pri določitvi mejne temperature vročinskega vala, ki pa ne pove nič o mejni (psevdo-ekvivalentni) temperaturi na stopnjo umrljivosti. Zato smo se pri določitvi kriterijev za vročinski val oprli tudi na izkušnje prognostične službe Agencije Republike Slovenije za okolje ob vročini v preteklih letih, pri

Preglednica 1. Vrednosti dnevne povprečne temperature (°C) pri različnih centilih, izračunane za tri različno dolga obdobja za postaje z dovolj dolgimi kakovostnimi nizi. Z mastnim tiskom so označene vrednosti, ki so bile na podlagi analize izbrane za mejno vrednost vročinskega vala.

Table 1. Mean daily temperature (in °C) for different percentiles calculated for three different time periods. The selected heat wave trashold values are indicated in bold.

	1986–2015					1996–2015					2006–2015				
centil	95.	96.	97.	98.	99.	95.	96.	97.	98.	99.	95.	96.	97.	98.	99.
Murska Sobota	23,1	23,6	**24,2**	25,0	26,0	23,5	24,0	24,5	25,2	26,4	23,9	**24,3**	25,0	25,8	27,0
Maribor	23,6	24,2	**24,8**	25,5	26,6	24,0	24,6	25,2	25,9	27,0	24,3	**24,9**	25,6	26,4	27,6
Let. Maribor	23,0	23,6	**24,1**	24,9	25,8	23,4	23,9	24,4	25,2	26,3	23,8	**24,2**	24,9	25,4	27,0
Šmartno	21,1	21,6	**22,2**	22,8	23,9	21,4	22,0	22,4	23,2	24,3	22,0	**22,4**	23,0	23,9	24,8
Celje	22,7	23,2	**23,7**	24,4	25,3	23,0	23,5	24,0	24,8	25,7	23,1	**23,6**	24,2	25,0	26,1
Novo mesto	23,4	23,9	**24,5**	25,1	26,0	23,9	24,3	24,8	25,6	26,5	24,1	**24,6**	25,3	25,9	26,8
Črnomelj	24,0	24,5	**25,1**	25,6	26,6	24,6	25,0	25,5	26,2	27,3	24,6	**25,1**	25,6	26,3	27,5
Kočevje	21,0	21,4	**21,9**	22,4	23,3	21,2	21,6	22,1	22,6	23,5	21,5	**21,9**	22,4	23,0	23,8
Postojna	21,1	21,5	**21,9**	22,7	23,6	21,5	21,9	22,5	23,1	23,9	21,9	**22,5**	23,1	23,7	24,6
Ljubljana	23,9	24,3	**24,9**	25,6	26,4	24,2	24,7	25,2	25,9	26,9	24,6	**25,1**	25,8	26,3	27,3
let. Ljubljana	22,0	22,4	**22,9**	23,5	24,5	22,1	22,6	23,0	23,6	24,6	22,6	**23,1**	23,6	24,3	25,1
Rateče	19,2	19,6	**20,1**	20,6	21,6	19,5	20,0	20,4	20,9	22,1	20,0	**20,4**	20,9	21,6	22,3
Bilje	24,5	25,0	**25,4**	25,9	26,8	24,8	25,2	25,7	26,2	27,0	25,3	**25,7**	26,1	26,6	27,2
Portorož	24,9	25,3	**25,8**	26,4	27,0	25,1	25,5	26,0	26,5	27,1	25,4	**25,9**	26,4	26,8	27,4
Starše	23,4	23,9	**24,5**	25,1	26,1	23,8	24,3	24,9	25,6	26,6	24,2	**24,7**	25,3	26,0	26,9
Veliki Dolenci	23,0	23,5	**24,2**	25,0	26,0	23,3	23,9	24,5	25,3	26,4	23,6	**24,3**	25,0	25,8	26,8
Bizeljsko	23,2	23,6	**24,1**	24,8	25,9	23,5	24,0	24,7	25,3	26,3	23,9	**24,5**	25,0	25,9	26,6
Topol pri Medvodah	21,9	22,4	**23,0**	23,7	24,9	22,1	22,6	23,1	23,9	25,1	22,7	**23,1**	23,7	24,5	25,5
Vojsko	18,6	19,0	**19,5**	20,2	21,1	18,7	19,1	19,7	20,4	21,4	19,1	**19,6**	20,3	20,9	21,8

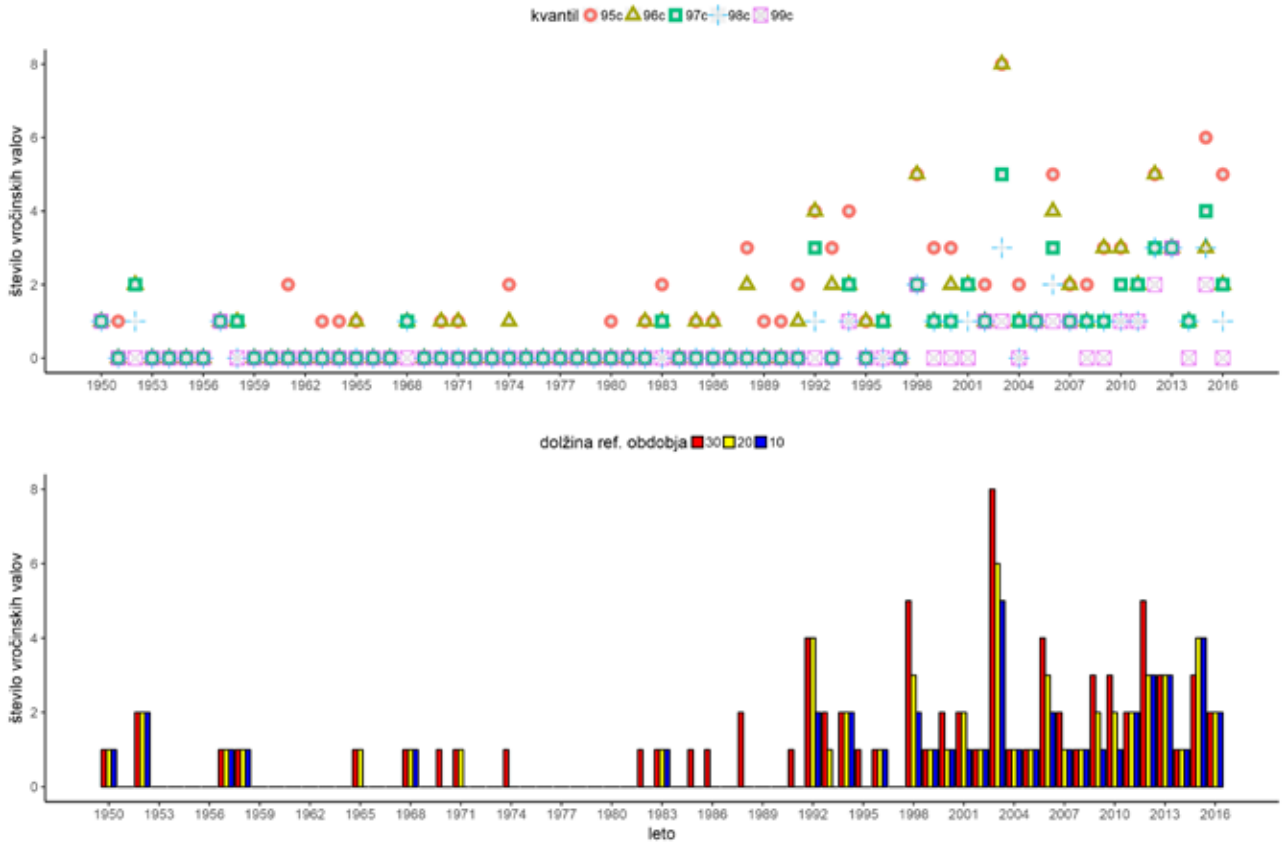
čemer smo pri postavljanju mejne temperature upoštevali pogostost vročinskih valov. Tako smo postavili dva kriterija za pogostost vročinskih valov, ki temeljita na izkušnjah prognostične službe in hkrati upoštevata zahteve za opozarjanje - dogodkov ne sme biti preveč, ker opozarjanje postane neučinkovito:

- V preteklih desetih letih smo imeli vsaj en vročinski val v letu
- V posameznem letu število vročinskih valov ne sme preseči 6

Za podporo odločitvi, kateri centil bi ustrezal za mejo nastopa vročinskega vala, smo naredili analizo pogostosti pojavljanja vročinskih valov pri različnih mejah in porazdelitev dnevne najvišje temperature ob tako določenih vročinskih valovih. Za vsako postajo smo za posamezni centil prešteli število vročinskih valov na leto, če je vročinski val definiran z izbrano mejno vrednostjo centila in vsaj tremi zaporednimi dnevi, ko dnevna povprečna temperatura presega to vrednost. Vrednosti so prikazane tako, da je v enem primeru na istem grafu prikazano število vročinskih valov glede na izbrani centil v istem referenčnem obdobju. V drugem primeru je na istem grafu za izbrani centil in različna referenčna obdobja prikazano število dogodkov na leto. Primera obeh grafov za postajo Ljubljana sta prikazana na sliki 2.

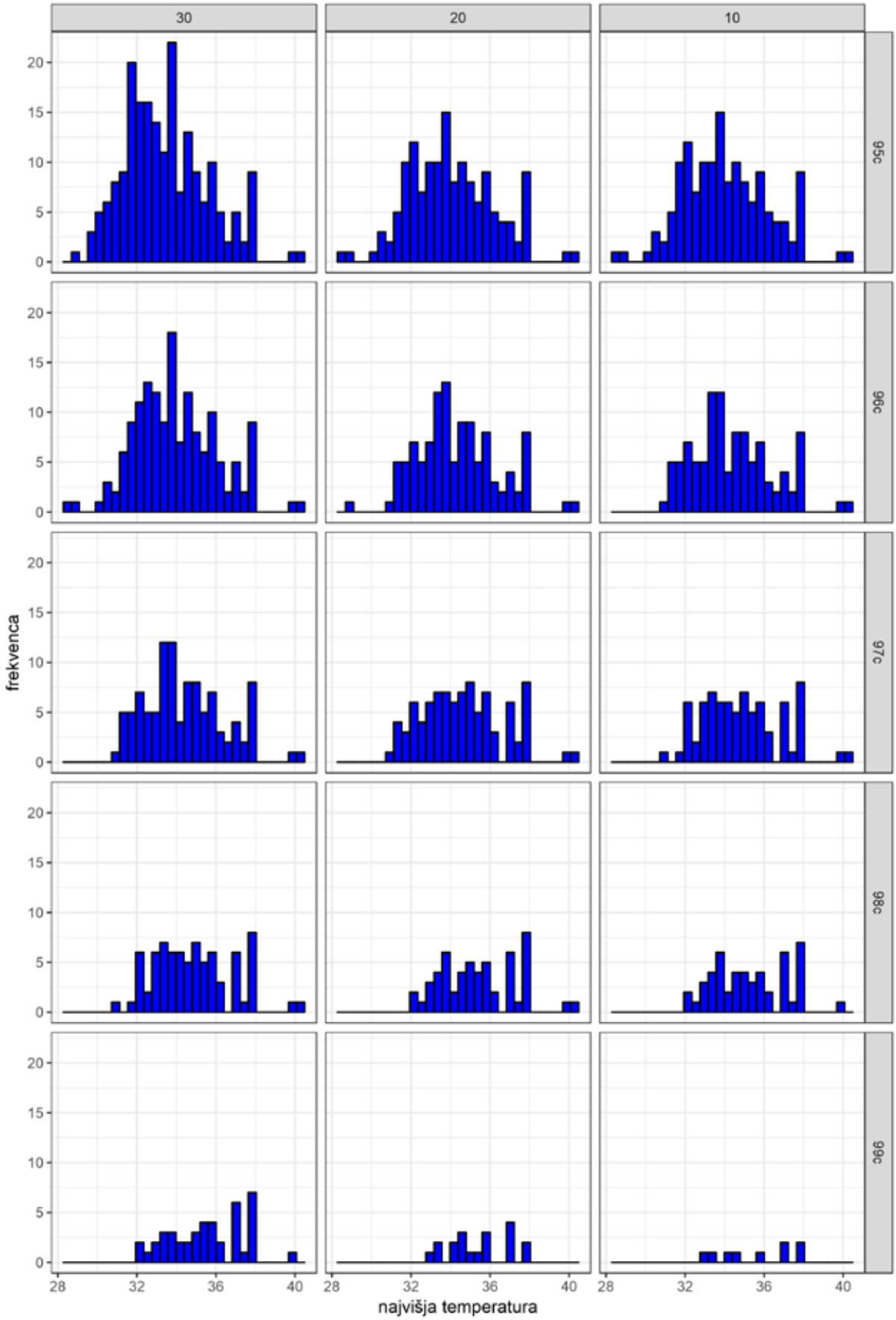
Z višanjem mejne vrednosti dobimo strožje pogoje za nastop vročinskega vala in s tem manjše število le teh. Po drugi strani lahko višja vrednost razdeli en dogodek na dva ali več krajših dogodkov. Tak primer je na sliki 2 (spodaj) v letu 2015, ko je pri višji mejni vrednosti več vročinskih valov (modri stolpec), kot pri nižji meji (rdeči stolpec). Iz rezultatov na sliki 2 opazimo, da v zadnjem desetletju praktično vsako leto beležimo vsaj en vročinski val, medtem ko je bilo takih dogodkov pred letom 1980 zelo malo.

Ob pojavu vročinskega vala je pomembno, kako visoko dnevno temperaturo dosežemo vsak dan



Slika 2. Število vročinskih valov na leto v Ljubljani v odvisnosti od izbire mejne vrednosti (zgoraj) in od izbire referenčnega obdobja (spodaj). Zgornja slika torej prikazuje število vročinskih valov za vseh pet mejnih vrednosti definiranih s centili, ki so izračunani s pomočjo najdaljšega referenčnega obdobja (1986-2015). Na spodnji sliki so prikazani rezultati za vsa tri referenčna obdobja, vendar samo za izbrani centil (96.). Zelene pike na zgornjem grafu tako predstavljajo iste vrednosti, kot rdeči stolpci na spodnjem grafu.

Figure 2. Number of heat waves per year in Ljubljana. The upper graph shows the dependence of heat wave number on the percentile temperature threshold value in the period 1986-2015). The lower graph shows the heat wave frequency when the temperature threshold value is 96. percentile in three different reference periods. Green dots on the upper graph denote the same values as red columns on the lower graph.



Slika 3. Porazdelitve dnevne najvišje temperature v času vročinskih valov na postaji v Črnomlju za vse obravnavane mejne vrednosti (različne centile in različna obdobja).

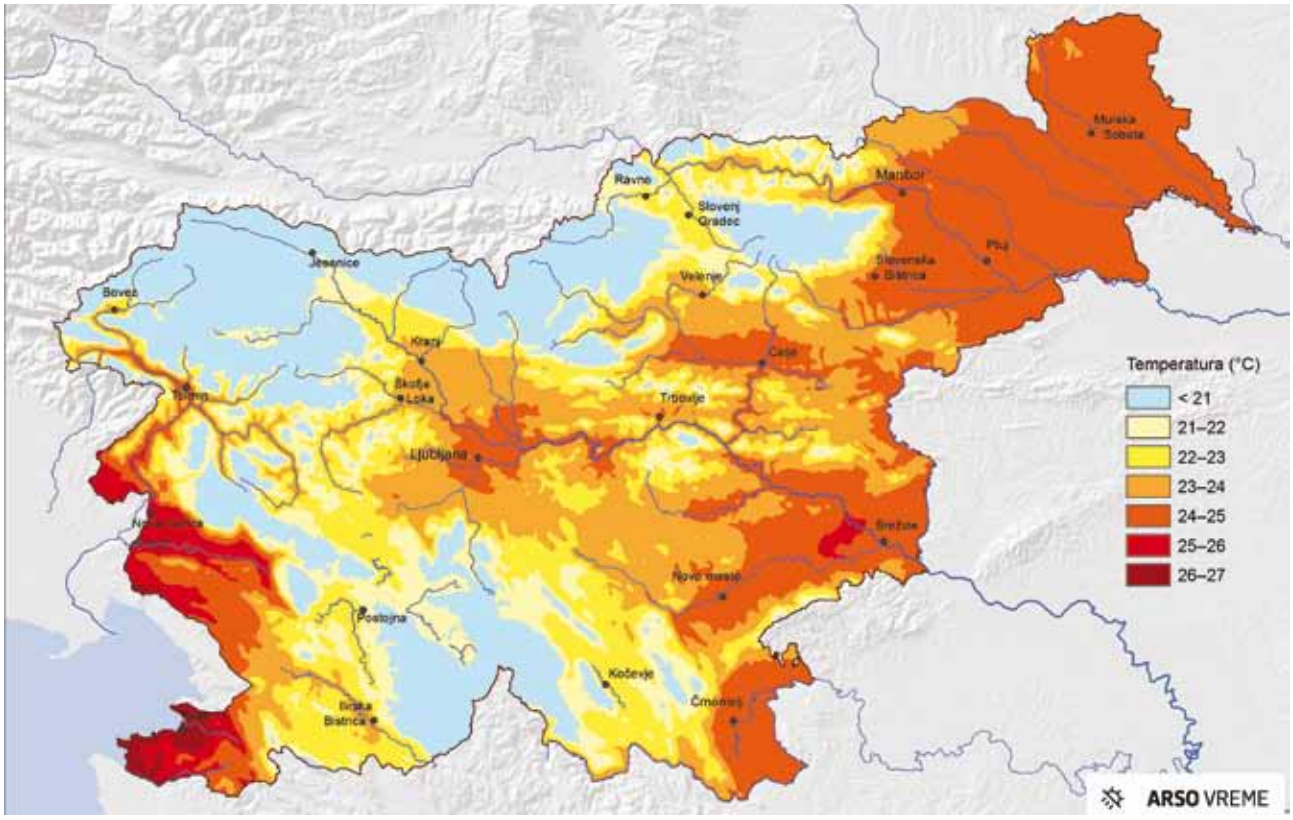
Figure 3. Daily maximum temperature distribution in heat wave episodes on measurement station Črnomelj for all different heat wave threshold temperature values (calculated for different percentiles and different reference period values).

znotraj vročinskega vala. Analizirali smo porazdelitev dnevne najvišje temperature v času vročinskih valov. Primer take analize je za postajo Črnomelj prikazan na sliki 3. Ena od definicij vročinskega vala, ki je bila v preteklosti uporabljena tudi v študijah vplivov vročinskih valov v Sloveniji, je drugi zaporedni dan, ko psevdo-ekvivalentne temperatura preseže 56 °C. Analiza dnevne najvišje temperature v tako definiranih vročinskih valovih je pokazala, da je ta le izjemoma nižja od 30 °C. Tako je bila ena od zahtev za določanje mejne temperature tudi ta, da je dnevna najvišja temperatura v dnevih z vročinskim valom v večini primerov nad 30 °C. Na podlagi porazdelitev dnevne najvišje temperature v času vročinskih valov pri različnih mejah in analize pogostosti vročinskih valov pri različnih mejah lahko iz uporabe izločimo 98. in 99. centil. To sta očitno prestrogi meji, saj s takšnima mejama zajamemo zelo majhno število zelo vročih dni (slika 2) in izpustimo veliko število dni, ko dnevna najvišja temperatura močno preseže 30 °C (slika 3). Na primeru Črnomlja, ki je predstavljen na sliki 3, vidimo, kaj pomeni prestrog pogoj za mejno vrednost. V primeru 99. centila, izračunanega na deset in dvajsetletnem obdobju, se med vročinske valove ne uvrstita dneva, ko sta bili izmerjeni dve od najvišjih temperatur na tej postaji (40,0 °C, 40,3 °C), saj povprečna temperatura v treh zaporednih dneh ni dosegala strogih pogojev (27,3 °C in 27,5 °C). Tako visoke temperature navadno izmerimo po več zelo vročih dnevih, ko vročina iz dneva v dan narašča, torej bi se pričakovalo, da se to obdobje nedvomno šteje za vročinski val. Izredno veliko dogodkov, kar ponovno kaže na manj primerno izbiro, dobimo v primeru meje pri 95. centilu (slika 2). V tem primeru med vročinske valove uvrstimo tudi veliko dni, ko dnevna najvišja temperatura ne doseže 30 °C (slika 3).

Regionalne značilnosti temperaturne meje za vročinski val

Na podlagi rezultatov, ki so bili pridobljeni z enakimi analizami kot na sliki 2 in 3 za vse obravnavane postaje, se je za najprimernejšo izbiro za definicijo vročinskega vala izkazal 96. centil na zadnjem desetletnem obdobju, oz. 97. centil na tridesetletnem obdobju. Razlike med mejnimi vrednostmi, izračunanih za oba primera iz omenjenih dveh centilov, so v 80 % postaj med 0,0 °C in 0,2 °C, največja razlika je na postaji Postojna, kjer znaša 0,6 °C. Glede na po podnebnih scenarijih predvideno rast temperature v naslednjih desetletjih, se zdi bolj smotrna izbira definicije na podlagi podatkov zadnjega desetletja (2006-2015), ki se mora v prihodnosti redno preverjati na novih podatkih. Nove temperature praga vročinskega vala bi se tako računale po sedanjih ocenah predvidoma vsakih deset let.

Za izbrano mejo dnevne povprečne temperature (96. centil na zadnjem desetletnem obdobju)



Slika 4. Prostorska porazdelitev dnevne povprečne temperature zraka pri 96. centilu v obdobju 2006–2015 (DPT96).

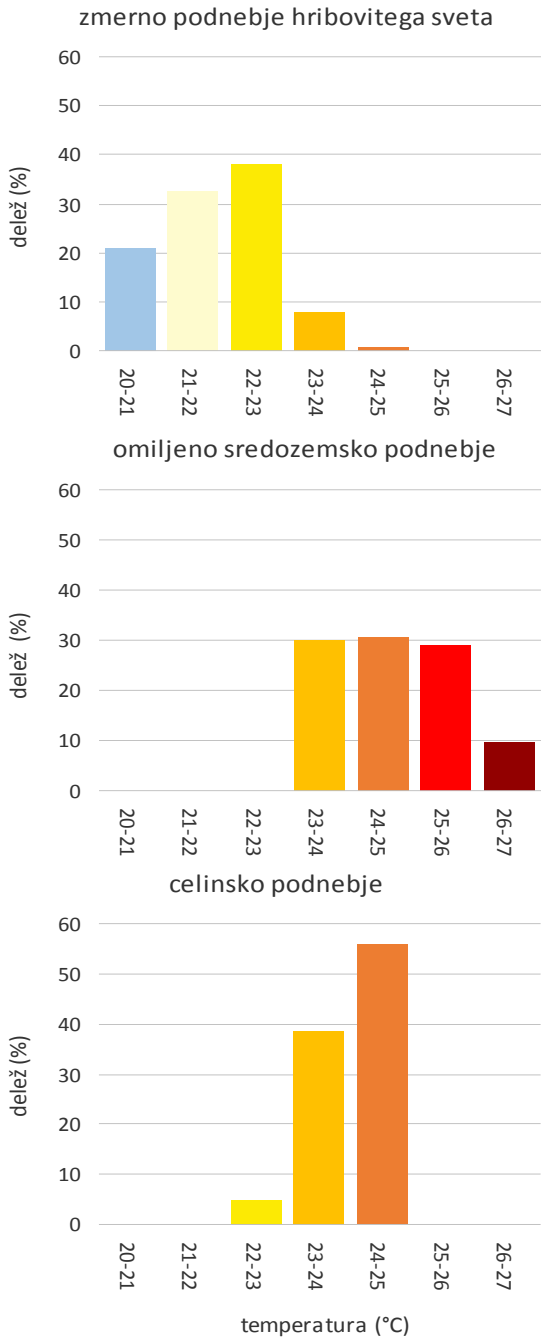
Figure 4. Spatial distribution of the 96. percentile of daily mean temperature in teh reference period 2006–2015 (DPT96).

smo naredili prostorsko analizo. Na sliki 4 je predstavljena prostorska porazdelitev dnevne povprečne temperature pri 96. centilu obdobja 2006–2015 (DPT96). Na sliki 5 je prikazana prostorska spremenljivost DPT96 znotraj posamezne podnebne regije s slike 1. Najbolj enotna je DPT96 znotraj regije s celinskim podnebjem, v večjem delu tega območja se giblje med 23 °C in 25 °C, le na zelo majhnem območju pade pod 23 °C. Na prvi pogled se zdi spremenljivost DPT96 znotraj regije z zmernim podnebjem hribovitega sveta kar precejšnja, od manj kot 20 °C pa vse do 25 °C. Izkaže se, da je DPT96 pod 21 °C vezana na najvišje predele Slovenije z gorskim podnebjem. To območje smo zaradi zelo redke poseljenosti in nizkih povprečnih temperatur že na začetku izločili iz analize, saj se na tem območju ne srečujemo s posledicami prevelike toplotne obremenitve. Če izločimo območje z gorskim podnebjem, se porazdelitev DPT96 znotraj regije z zmernim podnebjem precej skrči. Večinoma se DPT96 giblje med 21 °C in 23 °C, le na majhnem območju je tudi nekoliko višja. Največjo prostorsko spremenljivost in hkrati najvišje vrednosti DPT96 imamo tako znotraj regije z omiljenim sredozemskim podnebjem, kjer se giblje med 23 °C in 26 °C, na ozkem obalnem pasu Slovenije pa doseže tudi 27 °C.

Zgoraj naštete ugotovitve so povzete v preglednici 2, kjer je za posamezno regijo podano prostorsko povprečje DPT96 znotraj regije, ter standardni odklon, ki meri prostorsko spremenljivost DPT96 znotraj regije. Najvišje povprečje DPT96 je s 24,7 °C v regiji z omiljenim sredozemskim podnebjem, hkrati pa se v tej regij DPT96 tudi najbolj spreminja. Podobno velika prostorska spremenljivost je v regiji z zmernim podnebjem, kjer je povprečje bistveno nižje (21,8 °C). Le nekoliko nižje povprečje od regije z omiljenim sredozemskim podnebjem ima regija s celinskim podnebjem (24,0 °C) ima pa ta regija precej manjšo prostorsko spremenljivost kot ostali dve regiji.

Definicija vročinskega vala za Slovenijo

Rezultati prostorske analize so pokazali, da je spremenljivost DPT96 znotraj regij velika, v vseh primerih je interval dvakratnega standardnega odklona večji od 1 °C. To dejstvo in pa vodilo, da mora biti kazalnik čim bolj enostaven, sta nas vodila k sklepu, da mejno dnevno povprečno temperaturo zraka za nastop vročinskega vala zaokrožimo na celo stopinjo Celzija. Za določanje konkretne meje smo sledili rezultatom prostorske analize. Za vsako od podnebnih regij smo mejo za nastop vročinskega vala določili povprečno vrednost DPT96 znotraj regije, zaokroženo na celo stopinjo Celzija. Pri tem pa smo preverili tudi vrednosti DPT96 na merilnih mestih iz preglednice 1. Ker se bo v prihodnosti nastop vročinskega vala spremljal na teh merilnih mestih, DPT96 teh merilnih mest ne sme veliko odstopati od mejne vrednosti regije, v kateri ležijo. Za sprotno spremljanje vročinskih valov je težavno predvsem odstopanje DTP96 merilnega mesta od regionalnega navzdol, saj v tem primeru tvegamo, da ne bomo beležili vročinskega vala tudi v primeru, ko so v regiji



Slika 5.. Pogostost pojavljanja posameznih vrednosti DPT96 znotraj posamezne temperaturne regije. Frekvenčna porazdelitev za regijo z zmernim podnebjem hribovitega sveta je izračunana za celotno regijo, vključujoč območje z gorskim podnebjem.

Figure 5. The distribution of DPT96 for temperature regions (Figure 1). Values for region of hilliy are calculated including area with alpine climate (dark green in Figure 1).

Preglednica 2. Prostorsko povprečje in standardni odklon DPT96 znotraj posamezne temperaturne regije. Vrednosti za regijo z zmernim podnebjem so izračunane brez upoštevanja območja z gorskim podnebjem (temno zeleno na sliki 1).

Table 2. Spatial avarage and standard deviation of DPT96 for temperature regions (Figure 1). Values for region of hilliy are calculated dicarding area with alpine climate (dark green on Figure 1).

regija	povprečje (°C)	standardni odklon (°C)
zmerno podnebje hribovitega sveta	21,8	1,0
celinsko podnebje	24,0	0,6
omiljeno sredozemsko podnebje	24,7	1,1

izpolnjeni pogoji za njegov nastop. Primerjava kaže, da je na večini postaj DPT96 višji od mejne vrednosti za podnebno regijo, v kateri ležijo. To pomeni, da nevarnosti za prezrtje dni s hudo vročino ni. Izjema je postaja Celje, kjer je DPT96 za 0,4 °C nižji od meje za to regijo, zato velja biti predvsem pri napovedovanju vročinskih valov na tej postaji previden. Zelo nizka vrednost DPT96 je zabeležena tudi na postaji Rateče, vendar ta postaja leži na območju z gorskim podnebjem, ki je bilo zaradi majhnega vpliva vročine iz analize izločeno (slika 1).

Po vzoru avstralskega faktorja toplotnega presežka (Nairn in sod., 2013), kjer je vročinski val vsak dogodek, ko imamo vsaj tri dni zaporedoma visoke temperature glede na lokalne podnebne značilnosti, smo se odločili, da tudi v Sloveniji definiramo vročinski val kot obdobje najmanj treh zaporednih dni nad izbrano mejo. Tudi sicer je izbira treh zaporednih dni zelo pogosta (npr. Russo, 2015). Nekatere študije ugotavljajo, da ranljivo prebivalstvo v času hude vročine ravno po treh dneh izpostavitve začne čutiti posledice visokih temperatur (Nairn in sod., 2013). Definicija vročinskega vala za Slovenijo je povzeta v preglednici 3.

Preglednica 3. Mejne vrednosti, ki jih mora povprečna dnevna temperatura zraka doseči ali preseči vsaj tri zaporedne dni, da imamo izpolnjen pogoj za nastop vročinskega vala v posamezni podnebni regiji.

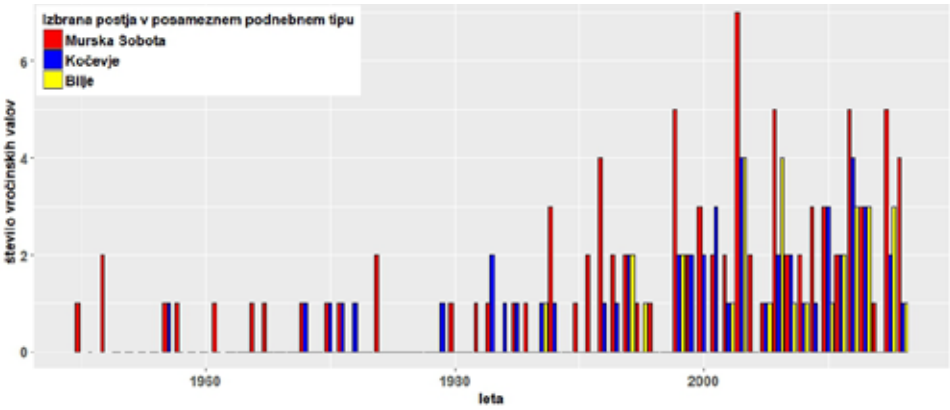
Table 3. Daily mean temperature treshold value which should be reached or exeeded for at least three conscutive days for the heat wave to occure in the respective region.

podnebni tip	temperatura (°C)
zmerno podnebje hribovitega svetao	22
celinsko podnebje	24
omiljeno sredozemsko podnebje	25

Primeri uporabe izbrane definicije vročinskega vala

Na sliki 6 je prikazano letno število vročinskih valov po zgoraj predlagani definiciji (preglednica 3) za tri postaje, ki predstavljajo posamezno temperaturno regijo. Opazen je pozitiven trend števila vročinskih valov, ki se od leta 1990 pojavljajo skoraj vsako leto. Število vročinskih valov v posameznem letu je nekoliko večje v severovzhodni Sloveniji, torej na postaji v Murski Soboti.

Da si lahko predstavljamo temperaturne razmere v dnevih, ko je po definiciji iz preglednice 2 razglašen vročinski val, je na sliki 7 prikazan potek najvišje, najnižje in povprečne temperature ter relativne vlažnosti ob koncu julija in začetku avgusta 2013 v Ljubljani. Iz grafa je razvidno, da je dnevni temperaturni razpon večji ob nižji zračni vlažnosti in manjši ob višji zračni vlagi. Tako se npr. 5. avgusta, ko vlažnost precej poraste, najvišja dnevna temperatura zniža, medtem ko se najnižja dnevna temperatura zviša. Čeprav čez dan ni bilo tako vroče kot predhodni dan (4. avgusta), je toplotna obremenitev ostala podobna zaradi večje zračne vlažnosti (bolj soparno vreme). Poleg tega se je ponoči manj osvežilo. Primer pokaže, da je dnevna povprečna temperatura primerna mera za oceno toplotne obremenitve, saj je bila enaka v obeh obravnavanih dnevih.

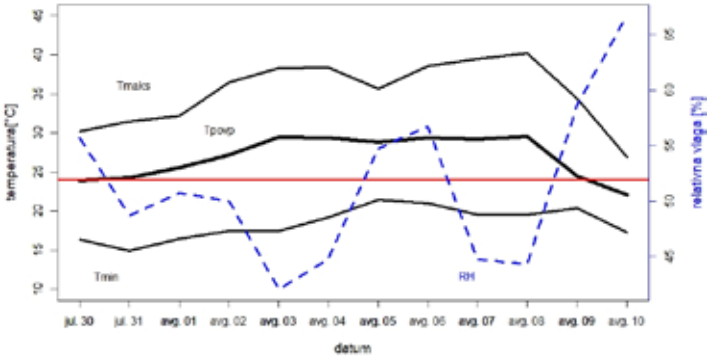


Slika 6. Število vročinskih valov na leto na postajah Murska Sobota (celinsko podnebje), Kočevje (zmerno podnebje hribovitega sveta) in Bilje (omiljeno sredozemsko podnebje).

Figure 6. Annual number of heat waves in Murska Sobota (Continental climate), Kočevje (Moderate climate of hilly region) and Bilje (Submediterranean climate)

Zaključek

V Sloveniji do sedaj nismo imeli določenih kriterijev za enotno spremljanje vročine in vročinskih valov. Z zgoraj predlagano metodologijo poskušamo to vrzel odpraviti. Na posvetu o vročini se je izkazalo, da zaradi velike pestrosti učinkov vročine na živa bitja ni mogoče najti kazalca vročine, ki bi ustrezno pokril vse zahteve različnih študij učinkov vročine na živa bitja. V marsikaterem sektorju je nujno, da upoštevamo vse lastnosti zračne mase ob vročini (od temperature in vlažnosti zraka do sevanja in vetra) in zato postanejo kazalci zelo zapleteni. V primeru komuniciranja s splošno javnostjo, predvsem v primeru spremljanja in napovedovanja vročinskih valov, pa mora biti količina, o kateri govorimo, enostavna in razumljiva. To je bilo eno od osnovnih vodil pri zasnovi zgoraj definiranega vročinskega vala. Zato se je pri uporabi tega kazalca treba zavedati, da gre za poenostavljen kazalec, ki je prvenstveno namenjen spremljanju in napovedovanju obremenjujočih vročinskih razmer za splošno javnost, manj pa poglobljenim študijam učinkov vročine na različne skupine živih bitij. Za slednje je primernejša uporaba kazalcev, ki vsebujejo informacijo o vseh lastnostih zračne mase, ki imajo lahko učinek na proučevan subjekt.



Slika 7. Potek dnevne najvišje, najnižje in povprečne temperature ter relativne vlažnosti v vročinskem valu ob koncu julija in začetku avgusta 2013 v Ljubljani. Z rdečo črto je označena mejna vrednost za vročinski val (glej preglednico 3). Dnevna povprečna temperatura je takrat mejo prekoračila kar v desetih zaporednih dneh.

Figure 7. Daily maximum, minimum and mean temperature and relative humidity course during the heat wave in July and August 2013 in Ljubljana. Read line denotes threshold daily mean temperature value for heat wave (Table 3), which was exceeded in 10 consecutive days during the hot spell.

Viri

Clark R. T., Brown S. J. in Murphy J. M., 2005. Modelling Northern Hemisphere Summer Heat Extreme Changes and Their Uncertainties Using a Physics Ensemble of Climate Sensitivity Experiments, Journal of climate Volume 19

Holton J. R., 2004. An introduction to dynamical meteorology, Elsevier Academic Press

Kozjek K., 2016. Objektivna opredelitev podnebnih regij Slovenije: magistrsko delo. Ljubljana, 85 str.

Kjučevšek N., 2016. Detekcija in vpliv vročinskih valov v Sloveniji: magistrsko delo. Ljubljana 66. str

Kjučevšek N., 2018. Pregled kazalcev za detekcijo in klimatologijo vročinskih valov v Sloveniji, Vetrnica 10 , Ljubljana

Li D. in Bou-Zeid E., 2013. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts, Journal of American Meteorological Society

McGregor G. R., Bessemoulin P., Ebi K. in Menne B., 2015. Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. World Meteorological Organization and World Health Organization. (Dostopno na http://www.who.int/globalchange/publications/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf?ua=1)

Nairn J.R. in Fawcett R., 2013: Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. Centre for Australian Weather and Climate Research

Russo S., Dosio A., Graverson R. G., Sillman J. in sod., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. Journal of Geophysical Research: Atmospheres

Russo S., Sillmann J. in Fiscger E.M., 2015. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades, Environmental Research Letters

Schatz J. in Kucharik C. J., 2015. Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA, IOP science.

Vertačnik G., 2015. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, str. 101

spletni vir: http://www.smd.v-izdelavi.si/data/upload/VABILO.pdf