

Analiza trajektorij območij s točo in modelskih indikatorjev toče na območju Slovenije

Gregor Skok^{*}, Jože Rakovec^{*}, Benedikt Strajnar^{**}

Povzetek

Z uporabo daljinskega zaznavanja radarske odbojnosti z meteorološkim radarjem je bila izvedena analiza trajektorij območij s točo, ki je pokazala, da največ dogodkov s točo traja le kratek čas, obstajajo pa tudi več ur dolgi dogodki, ki lahko v svojem življenjskem ciklu prepotujejo dolge razdalje – tudi več kot sto kilometrov. Območja s točo se gibajo v vseh smereh, vendar prevladuje gibanje proti vzhodu. Izvedena je bila tudi analiza modelskih indikatorjev toče, z namenom preveriti ali se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, pri katerih se toča ni pojavila. Ugotovljeno je bilo, da ni statistično značilnih razlik med indikatorji ob dogodkih z močno konvekcijo s točo in brez nje ni. Pri interpretaciji in uporabi rezultatov je potrebno paziti na inherentno negotovost pri identifikaciji območij s točo in močne konvekcije.

Ključne besede: toča, detekcija toče, sledenje toče, močna konvekcija, meteorološki radar
Keywords: hail, hail detection, hail tracking, strong convection, meteorological radar

Uvod

Toča so ledena zrna, ki nastajajo v razvitih konvektivnih oblakih z dovolj močnim vzgornikom in ki včasih padajo na tla (Divjak s sod., 2004). Meritve toče se v meteorologiji klasično izvajajo na meteoroloških postajah s človeškim opazovalcem ali samodejno s pomočjo točemerov – množice preprostih stiropornih plošč, v katerega zrna toče odtisnejo vdolbine.

Alternativo tem relativno dragim meritvam v zadnjem desetletju predstavlja meteorološki radar, ki s precejšnjo časovno in prostorsko ločljivostjo določa odbojnost iz atmosfere v mikrovalovnem delu spektra elektor-magnetnega valovanja ter s tem prisotnost in količino oziroma velikost padavinskih elementov v zraku.

Na podlagi radarske odbojnosti je že bila izdelana karta pogostosti toče nad Slovenijo (Klemenčič s sod., 2008, 2009, 2012). Analiza je zajemala časovno obdobje devetih let (2002-2010), od maja do avgusta. Pri identifikaciji področij s točo iz radarskih podatkov je bila uporabljena kombinacija dveh metod, t.i. »Waldvoglove« metode (Waldvogel s sod., 1979) in metode, ki jo je razvila avstrijska meteorološka služba (ZAMG, 2007). Obe metodi detekcije temeljita na iskanju močnih radarskih odbojev nad izotermo 0°C. Višje nad lediščem se pojavijo izraziti odboji, večja je verjetnost za prisotnost velikih ledenih zrn – toče.

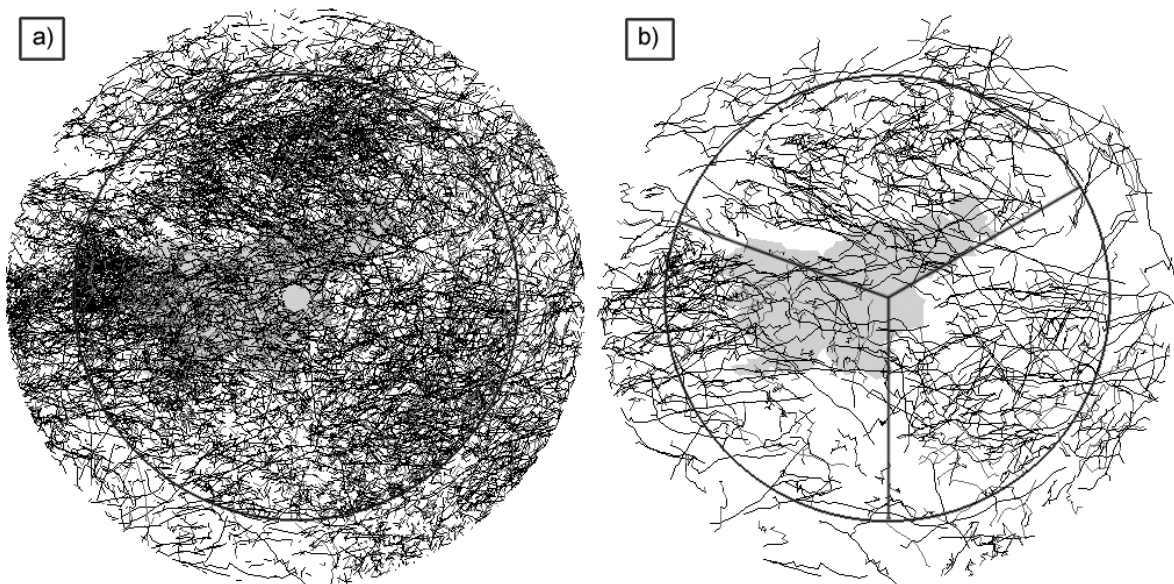
Navedeni metodi detekcije toče in rezultati analize pogostosti toče so podrobneje predstavljeni v Klemenčič s sod. (2012). V tem prispevku pa so predstavljeni rezultati dveh dodatnih analiz, povezanih z navedeno raziskavo. V prvem poglavju je predstavljena analiza trajektorij točenosnih oblakov, v drugem poglavju pa analiza modelskih indikatorjev toče.

^{*} Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani, Center odličnosti Vesolje-SI

^{**} Agencija RS za okolje, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje

Analiza trajektorij toče

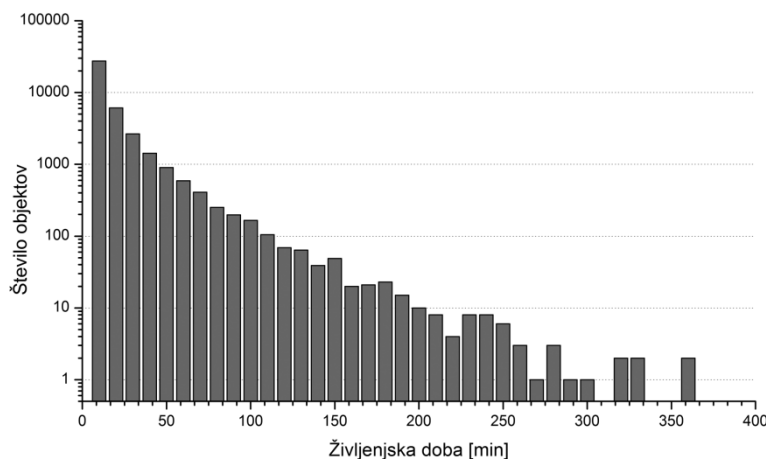
Meteorološki radar na Lisci vsakih 10 minut premeri ozračje v svoji okolici. Na podlagi teh podatkov je z uporabo Waldvoglove in ZAMG metode mogoče določiti območja, kjer v tem 10-minutnem obdobju na tleh najverjetneje pada toča. Če se enak postopek ponovi tudi za naslednje 10-minutne časovne intervale, dobimo zaporedje “slik”, na katerih so označena območja s točo. Vsaka “slika” je geolocirano dvodimenzionalno polje z binarnimi vrednostmi – npr. vrednost 0, če na lokaciji v tem 10-minutnem časovnem intervalu ni padala toča, in 1, če je toča padala. Območja z vrednostmi 1 si je možno predstavljati kot področja s točo, ki se s časom premikajo in spreminjajo. Za sledenje področjem s točo je bila uporabljena modificirana metoda, predstavljena v Skok s sod. (2009, 2010), ki temelji na definiranju in sledenju objektov v zaporedju dvodimenzionalnih polj. Originalna metoda je bila prilagojena analizi območij s točo, ki so specifičen problem – predvsem ker so razmeroma majhna in se hitro gibljejo. Problem je bil rešen tako, da so bila območja s točo umetno povečana za 2 km. S tem se je prekrivanje območij s točo v zaporednih časovnih intervalih izboljšalo, kar je omogočilo sledenje področjem s točo.



Slika 1: Trajektorije območij s točo v obdobju maj-avgust 2002-2010. Črna barva trajektorij pomeni premik proti vzhodu, siva pa premik proti zahodu. a) Vse trajektorije, b) trajektorije, ki so daljše od 150 minut. Črni krog in ravne črte prikazujejo meje med tremi območji analize.

Slika 1 prikazuje trajektorije območij s točo. Območje zunaj kroga predstavlja oddaljenost od radarja pri kateri je negotovost pri identifikaciji toče zelo velika. Glavni razlogi za povečano negotovost so trije: slabša horizontalna ločljivost, razmeroma visok najnižji radarski snop ter zmanjšana vertikalna ločljivost (zgornji radarski snopi so pri veliki oddaljenosti že nad troposfero in tako se je treba zanašati le na podatke iz nižjih snopov, ki pa so tam že precej široki). V samem središču območja je videti manjše prazno območje brez trajektorij, ki se pojavi zaradi tega, ker radar dela ozračja nad seboj ne premeri in tam ni mogoče zaznavati toče.

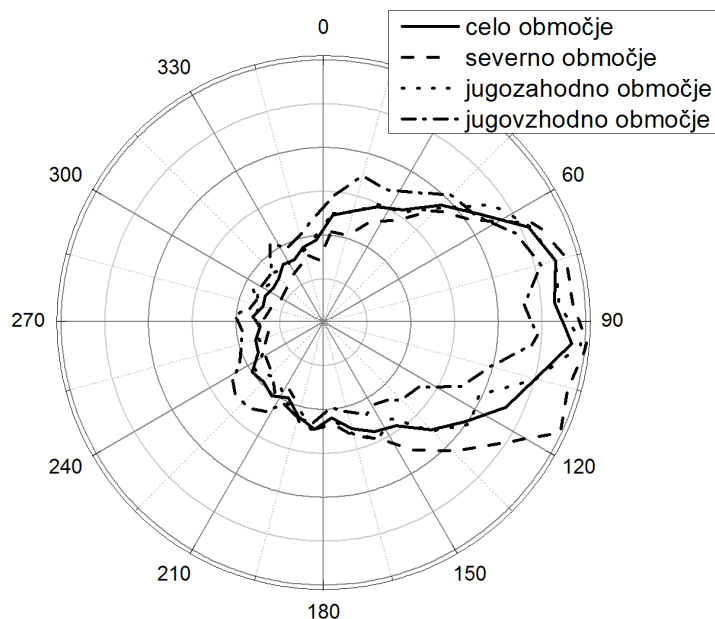
Trajektorije se pojavljajo na celotnem območju, njihova gostota pa se s krajem spreminja. Glede na subjektivno vizualno analizo je videti tudi, da je črnih trajektorij več kot sivih. To pomeni, da se območja s točo bolj pogosto premikajo proti vzhodu kot proti zahodu. Na desni strani slike 1, kjer so prikazane samo trajektorije s trajanjem vsaj 150 minut, se vidi, da lahko v tem času prepotujejo velike razdalje, nekatere tudi več kot polovico analiziranega območja.



Slika 2: Število trajektorij glede na njihovo življenjsko dobo.

Slika 2 prikazuje porazdelitev števila trajektorij glede na njihovo življenjsko dobo. Največ je kratkih trajektorij dolžine 10 minut (okoli 30000), z daljšo življenjsko dobo pa njihovo število pada. Zelo dolgih trajektorij je malo. Trajektorij daljših od 300 minut je šest.

Slika 3 prikazuje porazdelitev območij s točo glede na smer njihovega gibanja. Sicer prihaja do gibanja v vseh smereh, vendar je gibanje proti vzhodu najbolj pogosto. Do nekaterih razlik prihaja tudi v gibanju v različnih območjih, predstavljenih na desni strani slike 1. Tako v jugovzhodnem območju (ki zavzema predvsem del Hrvaške in Bosne in Hercegovine) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki pa je nekoliko odklonjeno proti severu, medtem ko v severnem območju (ki zavzema severno Slovenijo in del Avstrije) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki je nekoliko odklonjeno proti jugu. V zahodnem območju (ki vsebuje zahodno in južno Slovenijo, del Italije in zahodni del Hrvaške) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki je prav tako nekoliko odklonjeno proti severu, vendar manj kot v jugovzhodnem območju.



Slika 3: Relativna pogostost smeri gibanja (azimut) območij s točo na različnih območjih. Razsežnosti območij so označene na Sliki 1 desno.

Analiza modelskih indikatorjev toče

Napovedovanje močne konvekcije je za numerične meteorološke modele, ki se danes uporabljajo pri operativnem napovedovanju vremena, še vedno zelo velik izziv. Pri njihovi tvorbi ter življenjskem ciklu sodelujejo kompleksni dinamično-fizikalni procesi, ki v modelu ponavadi niso dovolj natančno opisani. Poleg tega je konvekcija pogosto manjše dimenzije od efektivne ločljivosti modelske računske mreže in je njen vpliv na meteorološke spremenljivke v modelskih točkah potrebno opisati s pomočjo parametrizacij. Pravilna napoved časa in kraja nastanka konvekcije je pogojena še z natančnostjo začetnih pogojev - stanja ozračja ob začetku modelske napovedi. Zaradi zgoraj naštetih omejitev je na možnost za nastanek izrazitih konvektivnih procesov in njihove pričakovane lastnosti pogosto lažje sklepati posredno s pomočjo indikatorjev konvekcije. Ti opisujejo značilnosti ozračja nad širšim območjem, njegovo statično nestabilnost, vlažnost, vetrovne karakteristike in podobno.

Močne konvektivne padavinske tvorbe pogosto spremlja tudi toča. Osnovni namen tega dela raziskave je preveriti, če se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, kjer se toča ni pojavila. Za analizo smo izbrali 28 dni med leti 2007 in 2010. V teh dnevih se je na radarskih slikah meteorološkega radarja na Lisci pojavilo veliko število močnih radarskih odbojev. V mrežnih celicah velikosti 1 krat 1 km je bilo v posameznem dnevu zaznanih 250-700 odbojev nad 51 dBZ. Uporabljene so bile maksimalne vrednosti radarskega odboja v vertikalnem stolpcu nad določeno točko.

Za tako izbrane datume je bila izdelana numerična vremenska napoved z meteorološkim modelom ALADIN-SI, s horizontalno ločljivostjo 4,4 km in s 43 vertikalnimi nivoji, ki se za operativno prognozo vremena uporablja na Agenciji RS za okolje. Ker se je večina konvektivnih dogodkov zgodila v popoldanskem času, je bila modelska napoved pognana na podlagi analize vremena prejšnjega dne ob 12 UTC. To pomeni, da je bila napoved v

poprečju malo več kot 24-urna. Na ta način se lahko preiskuje možnost napovedovanja toče s pomočjo indikatorjev močne konvekcije en dan vnaprej.

Na podlagi modelskih napovedi so bile nad območji z najmočnejšimi radarskimi odboji izračunane vrednosti različnih indikatorjev konvekcije. Uporabljene konvektivne indekse, njihov pomen in tipične vrednosti iz literature zelo na kratko predstavlja tabela 1. V tabeli 2 so zbrani rezultati analize za izbrane dneve. Označeno je tudi, ali je bil zabeležen pojav toče. Pri ugotavljanju, ali se je toča pojavila, smo uporabili podatke mreže meteoroloških postaj ARSO in dnevne biltene o izrednih dogodkih Centra za obveščanje Republike Slovenije (CORS), kjer so opisane tudi intervencije zaradi vremenskih nevšečnosti. Izmed 28 obravnavanih situacij je bila toča 23-krat zabeležena, 5-krat pa se toča ni pojavila.

V skoraj vseh obravnavanih situacijah so vrednosti indeksov takšne (v primerjavi z mejnimi vrednostmi iz literature), da je mogoče predvideti močno konvekcijo. V tabeli 2 so spodaj navedena tudi povprečja indikatorjev konvekcije posebej za dogodke z in brez toče. Vidimo lahko da je pri dogodkih s točo v povprečju na voljo nekaj več potencialne energije (CAPE je večji za okoli 400 J/kgK). Nekaj manjši je tudi Showalterjev indeks (za 1 K), ki je tudi mera za nestabilnost ozračja. Razliko je možno opaziti tudi pri vertikalnem striženju vetra z višino, ki je pri dogodkih brez toče za okoli 4 m/s večje. To nakazuje, da ob prevelikem vetrovnem striženju (in s tem večinoma hitrejšem potovanju neviht) do pogojev za točo prihaja manjkrat. Vendar pa se primeri brez zabeležene toče od ostalih ne razlikujejo bistveno. Iz pregleda lahko zaključimo, da na podlagi izračunanih indikatorjev učinkovito ločevanje med konvektivnimi dogodki s točo in brez nje ni mogoče, oziroma, drugače povedano, izrazite konvektivne dogodke z močnimi radarskimi odboji vedno lahko spremlja tudi pojav toče.

Preglednica 1: Kratka predstavitev uporabljenih indikatorjev konvekcije in tipičnih vrednosti ob močnih nevihtah.

konvektivni indeks	enota	kaj opisuje	okvirne vrednosti ob močnih nevihtah
CAPE (most unstable)	J/kg	energija, ki je na razpolago za konvekcijo	več kot 1000
850 hPa ekvivalentna potencialna temperatura	K	temperatura in vlažnost zraka	nad 330
vertikalna gibanja na 700 hPa	m/s	sinoptična dviganja in razločena konvekcija	majhne ali negativne vrednosti
striženje vetra med 1 in 6 km	m/s	ločevanje območij vzgornikov in vzdolžnikov	več kot 10
striženje vetra med 0 in 1 km	m/s	striženje pri tleh, (pomembno za nastanek tornadov)	več kot 5
padec temperature med 2 in 4 km	K/km	statična (ne)stabilnost ozračja	več kot 7
razlika ekvivalentne potencialne temperature: tla minus minimum srednje troposfere	K	indikacija močnosti močnih vzdolžnikov, nevihtnega piša (downburst)	več kot 20
Showalterjev indeks	K	statična stabilnost atmosfere pri 850 hPa	manj kot -1

datum	ura	CAPE	850 hPa ekvivalentna potencialna temperatura	vertikalna gibanja na 700 hPa	striženje vetra med 1 in 6 km	striženje vetra med 0 in 1 km	padec temperature med 2 in 4 km	razlika ekviv. pot. temperature pri tleh in v srednji troposferi	Showalterjev indeks	kraj, regija	toča
2006-06-29	15:00:00	2500	334	-0,8	20,8	6,6	5,8	7,6	-0,6	Kranj, Litija, Celje, Šentjur, Maribor	da
2007-05-23	15:00:00	1600	327	1,4	8,4	8,7	6,6	7,0	-1,3	Velenje, Krško, Brežice	da
2007-05-27	15:00:00	2100	330	1,0	15,0	7,6	7,3	11,9	-0,7	Krško polje	da
2007-06-23	3:00:00	1500	329	0,0	46,0	8,7	6,3	10,0	0,4	Gorenjska	ne
2007-07-24	18:00:00	1500	333	-0,2	16,0	8,0	7,7	16,0	-3,0	Jesenice, Novo mesto, Suha krajina	da
2007-08-17	00:00:00	1800	338	0,3	16,8	4,9	6,3	16,2	-2,3	Šenčur, Kamnik, Braslovče	da
2007-08-23	15:00:00	1000	333	-0,3	29,0	8,4	5,8	5,7	1,0	osrednja Slovenija	ne
2008-06-17	15:00:00	1500	325	-0,8	18,0	11,0	6,0	4,3	0,6	Krško, Brežice, Središče ob Dravi	da
2008-06-24	18:00:00	3070	342	0,2	18,7	3,5	6,6	18,1	-2,0	Goričko	da
2008-06-27	18:00:00	2100	332	1,0	14,0	3,7	5,9	7,7	-0,9	Ljubljana	da
2008-07-04	15:00:00	2600	334	0,0	19,0	4,0	5,6	8,4	0,5	Brežice, Ljutomer	da
2008-07-06	18:00:00	1800	337	0,1	14,0	7,0	6,0	12,0	-0,6	Goriška, Gorenjska	ne
2008-07-07	18:00:00	1900	332	0,3	23,0	10,0	6,1	7,3	-1,0	Koper, Komen, Krško	da
2008-07-13	15:00:00	2600	338	1,3	16,0	7,4	6,5	20,0	-4,0	Kamnik, Savinjska, Mariborska	da
2008-07-14	00:00:00	980	329	2,2	26,0	6,0	6,4	7,8	-0,5	Koroška	da
2008-08-02	14:00:00	2400	337	0,2	9,2	1,8	6,0	13,0	-0,7	Žužemberk	da
2008-08-08	16:00:00	1800	336	0,8	13,0	8,2	4,7	15,0	-0,5	Ljubljana, Ilirska Bistrica, Sevnica	da
2008-08-15	21:00:00	1800	333	-0,3	29,0	3,0	6,0	7,1	-2,6	Dolenjska, Ptuj	da
2008-08-23	15:00:00	1000	328	-0,7	19,0	6,3	6,5	8,8	-0,4	Ljubno ob Savinji	da
2009-05-22	16:00:00	2100	344	0,2	20,0	4,0	6,0	30,0	-3,5	Podravje	da
2009-05-24	18:00:00	1500	345	0,6	11,8	5,9	7,9	25,7	0,0	Ljubljana	ne
2009-05-26	18:00:00	3200	339	0,3	11,0	4,0	7,0	21,0	-1,4	Koroška, Podravje	da
2009-07-15	21:00:00	2200	346	-0,1	7,1	1,1	6,2	20,7	-3,0	Goričko	ne
2009-08-03	18:00:00	2600	336	-1,9	17,0	4,0	6,5	17,0	-1,9	Ljubljana, Koroška	da
2009-08-03	15:00:00	1400	343	0,0	13,1	5,0	6,5	31,0	0,0	Krško	da
2009-08-10	22:00:00	1300	330	0,4	7,4	5,9	6,3	10,4	-1,0	Sežana	da
2009-08-29	12:00:00	1800	331	-0,2	16,6	2,4	5,6	8,5	-1,7	Žužemberk	da
2010-07-13	15:00:00	3000	346	-0,2	7,0	4,0	6,0	16,9	-1,0	Podravje, Koroška	da
povprečje toča		2028	335	0,19	16,3	5,7	6,2	13,5	-1,3		da
povprečje brez toče		1600	338	0,1	22,6	6,2	6,4	14,8	-0,4		ne

Tabela 2: Seznam obravnavanih konvektivnih dogodkov in vrednosti indeksov močne konvekcije iz modela ALADIN-SI. Navedena so območja z najintenzivnejšimi dogodki in pojav toče pri tleh (vir: CORS, postaje ARSO). Spodaj so dodane še povprečne vrednosti indikatorjev ob dogodkih z zabeleženo toče in brez toče.

Zaključki

Radarske meritve atmosfere predstavljajo alternativni vir podatkov o pojavljanju toče. Njihova prednost je predvsem dobra prostorska in časovna ločljivost. Na podlagi radarskih meritev je že bila izdelana karta pogostosti toče nad Slovenijo (Klemenčič in sod., 2009). Prispevek opisuje še dve analizi povezani z omenjeno raziskavo: analizo trajektorij območij s točo in analizo modelskih indikatorjev za pojav močnih neviht s točo.

Analiza trajektorij območij s točo je pokazala, da največ dogodkov s točo traja le kratek čas, obstajajo pa tudi več ur dolgi dogodki, ki lahko v svojem življenjskem ciklu prepotujejo dolge razdalje – tudi več kot sto kilometrov. Analiza gibanja območij s točo je pokazala, da pride do gibanja v vseh smereh, vendar je gibanje proti vzhodu najbolj pogosto, do nekaterih razlik pa prihaja tudi v gibanju nad različnimi geografskimi območji.

V drugem delu je predstavljena analiza modelskih indikatorjev toče, s čimer smo želeli preveriti, ali se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, pri katerih se toča ni pojavila. Uporabljeni so bili nekateri pogosto uporabljeni indikatorji konvekcije. Analiza 28 situacij z močno konvekcijo (23 s točo in 5 brez toče) z meteorološkim modelom ALADIN-SI, ločljivosti 4,4 km, je pokazala, da v 24-urni napovedi ni statistično značilnih razlik med primeri močne konvekcije s točo in brez nje.

Pri interpretaciji in uporabi rezultatov obeh analiz je potrebno paziti na inherentno negotovost pri identifikaciji območij s točo (ali močne konvekcije) z uporabo radarskih podatkov. V neposredni bližini radarja identifikacija toče ni možna, na veliki oddaljenosti od radarja pa je negotovost pri identifikaciji precejšnja. Analize so tudi omejene na poletne mesece, ko se pojavi največ dogodkov s točo, kar pomeni, da niso zajeti vsi dogodki.

Literatura

- DIVJAK, Marjan, ROŠKAR, Jožef, CEGNAR, Tanja, GREGORČIČ, Branko, RAKOVEC, Jože, KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Toča in obramba pred njo = Hail and hail protection. Meseč. bilt. (Agencija Rep. Slov. okolje, Tisk. izd.). [Tiskana izd.], maj 2004, let. 11, št. 5, str. 38-45.
- KLEMENČIČ, Stane, ROZMAN, Črtomir, STRAJNAR, Benedikt, ŽAGAR, Mark, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava. Upravljanje s tveganjem zaradi toče v SV Sloveniji = Hail risk management in North East Slovenia. V: ČEH, Tatjana (ur.), KAPUN, Stanko (ur.), VERBIČ, Jože (ur.), KRAMBERGER, Branko (ur.), STEINGASS, Herbert (ur.), STEINWIDDER, Andreas (ur.), ŠPUR, Marjan (ur.). Zbornik predavanj - 17. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali : [tudi] Zdravčevi-Erjavčevi dnevi = Zdravec-Erjavec Days, Radenci, 13. in 14. november 2008. Murska Sobota: Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod, 2008, str. 219-231
- KLEMENČIČ, Stane, ŽAGAR, Mark, ROZMAN, Črtomir, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava, STRAJNAR, Benedikt. *Analiza upravljanja s tveganjem zaradi toče z uporabo atmosferskih modelov in dreves odločanja*. Maribor: Kmetijsko gozdarski zavod, 2009. 84 str., ilustr. ISBN 978-961-6488-14-3.
- KLEMENČIČ, Stane, RAKOVEC, Jože, ROZMAN, Črtomir, SKOK, Gregor, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava. Upravljanje s tveganjem zaradi toče v Sloveniji = Hail risk management in Slovenia. V: ČEH, Tatjana (ur.). Zbornik predavanj : [being] Zdravec-Erjavec Days 2012, Radenci, November 8th and 9th, 2012. Murska Sobota: Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod, 2012, str. 163-168.
- SKOK, Gregor, TRIBBIA, Joe, RAKOVEC, Jože, BROWN, Barbara. Object-based analysis of satellite-derived precipitation systems over the low-and midlatitude Pacific Ocean. *Mon. weather rev.*, 2009, vol. 137, str. 3196-3218, doi: 10.1175/2009MWR2900.1

- SKOK, Gregor, TRIBBIA, Joe, RAKOVEC, Jože. Object-based analysis and verification of WRF model precipitation in the low- and Midlatitude Pacific Ocean. *Mon. weather rev.*, 2010, vol. 138, no. 12, str. 4561-4575, doi: 10.1175/2010MWR3472.1.
- ZAMG. Automatic radar nowcasting at ZAMG. Presentation at ICEED nowcasting workshop, 19 - 20 February 2007, Vienna, Austria.
- Waldvogel A., B. Federer and P. Grimm, 1979: Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteorol.*, 18(12), 1521–1525.