

Vplyv orografie na priestorové rozloženie konvektívnych zrážok v Banskobystrickom kraji

Róbert Kvak^{1,2}

¹Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Česká republika

*²Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i., Praha, Česká republika
kvak@ufa.cas.cz*

Anotácia

Predložená práca rieši problematiku priestorovej distribúcie konvektívnych zrážok nad členitým terénom Banskobystrického kraja v strednej časti Slovenskej republiky. Prioritným cieľom práce je verifikácia vzťahu medzi plošným charakterom zrážok spôsobených hlbokou konvekciou a morfometrickými parametrami terénu v študovanej oblasti. Ďalším zámerom je identifikácia hlavných mechanizmov, ktorými orografia ovplyvňuje výskyt zrážkovej oblačnosti.

Kľúčové slová: konvektívne zrážky, komplexný terén, orografické efekty, Banskobystrický kraj

Annotation

The presented work deals with the issue of spatial distribution of convective precipitation over complex terrain in Banská Bystrica district in the middle part of the Slovak Republic. The primary aim of this research was to verify the relation between areal precipitation characteristics caused by deep convection, and morphometric terrain parameters in the study area. The next goal was to identify how the existence of terrain influences the precipitation mechanisms.

Keywords: convective precipitation, complex terrain, orographic effects, Banská Bystrica district

Abstrakt

Prítomnosť vyvýšeného reliéfu má dopad na atmosférické procesy stovky kilometrov od jeho geografickej polohy a rádovo kilometre nad úrovňou jeho najvyššieho bodu. Synoptická situácia s veľkopriestorovou cirkuláciou zvyčajne vyberá deň konvektívnej búrčkovej aktivity prostredníctvom podmienok zvrstvenia atmosféry, dostupnosti vlhkosti alebo prechodom frontálneho systému či prítomnosťou cyklonálneho charakteru počasia. Miestne faktory zato riadia čas a miesto presadenia prehánok a konvektívnych búrok, kedy členitý terén interaguje s prúdením, produkuje samostatné vertikálne pohyby, a tým iniciuje vývoj konvektívnej zrážkovej oblačnosti. Problematika vplyvu orografie na priestorové rozloženie konvektívnych zrážok v zložitom teréne naráža na niekoľko prekážok. Použitie radarovej detekcie na štúdium zrážkových oblakov v horských oblastiach predstavuje jeden z problémov, nakoľko najnižšie radarové lúče môžu byť blokované horským masívom, za ktorým je oblasť pre radary nedosiahnuteľná. Banskobystrický samosprávny kraj bol zvolený za oblasť výskumu overenia vzťahu medzi charakteristikami priestorovej distribúcie zrážok pochádzajúcich z hlbokkej konvekcie a morfometrickými parametrami georeliéfu na základe neobyčajných geografických a meteorologických predností tohto kraja. Študovaná oblasť leží v strednej Európe v centrálnej časti Slovenska. Výber plošne zrážkovo najvýraznejších dní prebiehal za pomoci krajskej vopred selektovanej siete 103 pozemných zrážkomerov SHMÚ. Študovaných bolo osem 24-h zrážkových udalostí v teplej polovici roka medzi rokmi 2005 až 2015, ktoré boli sprevádzané výskytom konvektívnych búrok alebo prehánok. Udalosti boli rozdelené do štyroch skupín svetových strán (S, W, E, N) podľa prevládajúceho ťahu zrážkovej oblačnosti. Každdej triede pripadli práve dve najvýznamnejšie udalosti v pozorovanom období. Plošné hodnoty prízemných zrážok sú produktom kombinácie meraní zrážkomerných staníc a adjustovaných radarových odhadov spracovaných modelom INCA. Priestorový vzťah medzi konvektívnymi zrážkami a topografiou je kvantifikovaný v sieti radarových pixlov 1 x 1 km a v najbližšom okolí (20 x 20 km) pozemných zrážkomerov. Región Banskobystrického kraja pokrýva 9 427 radarových pixlov, pričom využitá bola výlučne slovenská sieť dvoch rádiolokátorov. Významné udalosti s veľmi vysokými lokálnymi zrážkami neboli objektom výskumu, napriek tomu niektoré udalosti javia známky extremity v lokálnej mierke. Pri tvorbe morfometrických analýz reliéfu sme využili DMR (digitálny model reliéfu) s priestorovým rozlíšením 50 m, 1 km a 2 km. Nie každá oblasť kraja bola zasiahnutá rovnakou intenzitou a trvaním zrážkovej udalosti, preto boli lokality s najnižším úhrnom zrážok z výpočtov vyradené. V týchto lokalitách boli odhadnuté zrážky v rámci nami určenej prahovej hodnoty, ktorá zodpovedá približne desiatemu percentilu najvyšších nameraných zrážok v danom dni. Horná prahová hodnota eliminujúca výskyt slabej intenzity zrážok bola použitá pre päť prípadov. Najsilnejšie korelácie boli preukázané v prípade nadmorskej výšky. So stúpajúcou nadmorskou výškou sa vo väčšine prípadov pozoruje kontinuálny nárast

prahovej hodnoty, ktorú úhrny zrážok presahujú, zatiaľ čo najviac zrážok sa spravidla vyskytuje v podhorských oblastiach Karpát. Spearmanov korelačný koeficient okolo 0.7 zodpovedá západným a južným situáciám. Podľa súčtu úhrnov, najvyššie hodnoty denných zrážok a výskyt silného dažďa spadajú do podhorských oblastí medzi 700 až 800 m n. m., a to najmä v rámci Slovenského rudohoria. Zvyčajne najnižšie partie kraja, menovite Juhoslovenská kotlina, je reprezentovaná redukovaným množstvom zrážok v porovnaní s vyššími úhrnmi vo vyšších polohách. Vyššie hodnoty relatívnej výškovej členitosti a sklonitosti svahov sú zväčša situované v horských oblastiach, čoho dôsledkom je podobne silný vzťah so zrážkami, aký bol preukázaný v prípade nadmorskej výšky. Vzhľadom k týmto skutočnostiam, geografická poloha vyzerá byť primeranejším vysvetlením pre vyššie hodnoty zrážok v týchto malých horských oblastiach, ako je priamy vplyv členitého terénu na zrážkovú oblačnosť. Naopak, orientácia terénu nepreukazuje takmer žiadnu spojitosť s hodnotami zrážkových úhrnov. Konfigurácia svahov zohrávala významnú úlohu pri formovaní zrážkovej oblačnosti, zatiaľ čo náveterný alebo záveterný efekt nepreukázal žiadny dopad na krátkodobé zrážkové udalosti. Preukázané bolo, že konvektívne zrážkové udalosti majú veľmi dynamický priebeh na to, aby sa lokálne orografické efekty na zrážkovú oblačnosť prejavili priamo nad miestom ich vzniku. Potvrdila sa dôležitosť synoptických podmienok pri schopnosti orografických efektov presadiť sa v menšej priestorovej mierke. Najvýznamnejším mechanizmom formovania konvektívnych búrok počas zrážkových udalostí je lokálne zosilnenie konvekcie na návetrí, v závetrí a po okraji pohorí.

Voľba záujmového územia a konkrétnych zrážkových situácií spolu s metódami práce a zdrojovými údajmi priniesla na začiatok niekoľko dôležitých poznatkov, ktoré sa týkajú potenciálneho skreslenia, znehodnotenia alebo nesprávnej interpretácie výsledkov práce.

Výber študovanej oblasti ako administratívneho celku napriek výstižným fyzickogeografickým predispozíciám naráža v meteorologickom výskume na niekoľko prekážok. Prvou je fakt, že všetky študované termíny sú veľkoplošnou zrážkovou udalosťou, ktorá nie je priestorovo izolovaná v našom regióne. Oblasti s porovnateľným úhrnom zrážok často prekračujú hranicu kraja, ktorá prechádza stredovými osami horských masívov alebo po rozmedzí dvoch geomorfologických celkov. To znamená, že vzťah orografie a výšky úhrnu v tej-ktorej zrážkovej oblasti môže mať vplyvom rozdielnej charakteristiky terénu za hranicou kraja odlišné kvantitatívne vyjadrenie. Príkladom je situácia z 30. 06. 2011 a krajný západ územia (obr. 1 a 2), kedy oblasť Slovenského stredohoria zasiahla najintenzívnejšia zrážková činnosť len veľmi okrajovo a podstatná časť zrážok spadla nad západných Slovenskom. Alternatívou by bol výber územia čisto na základe plochy zrážkového poľa alebo oblasti so zrážkami nad určitou prahovou hodnotou, ktorá by nebola limitovaná fixne danými hranicami.

Ťažkosti môžu takisto nastať pri určovaní smeru prúdenia vzduchu a pohybu zrážkovej oblačnosti nad Banskobystrickým krajom podľa aerologických meraní z Popradu-Gánoviec. Aerologická stanica neďaleko Popradu nevykonáva sondážne merania priamo nad naším územím a ďalšie stanice s pravidelnými pozorovaniami sú vzdialené stovky kilometrov. Územie je navyše výrazne členité a jedno blízke alebo niekoľko vzdialených meraní nemôže reprezentovať celý región a dokonca ani pokryť zmeny atmosféry už len v priebehu niekoľkých hodín, tak ako pozoroval Hagen et al. (2011) vo Vogézach. Priemerný smer vetra je súčasne v spodných hladinách nad Popradskou kotlinou do značnej miery ovplyvnený Tatrami a Nízkymi Tatrami. Nám sa prístup z (Vasquez, 2009) o odhade pohybu oblačnosti nad Banskobystrickým krajom podľa smeru vetra v 0-6 km nad Popradskou kotlinou osvedčil. Prípadné rozdelenie na osem smerov pohybu oblačnosti by síce bolo detailnejším pohľadom na udalosti, ale pri použití totožného postupu by došlo v súbore udalostí k chybným zaradeniam do tried, keďže, ako sme odpozorovali, trasovanie konvektívnych ciel nie vždy zodpovedá presnej hodnote zo sondážnych meraní.

Ďalší problém prináša časovo-priestorové rozloženie zrážkovej činnosti, ktorá neprebíhala neprestajne nad študovaným územím v rámci 24-hodinového úseku 06:00-06:00 UTC. Jedná sa o termíny 03. 06. 2010 a 23. 06. 2009. Niektoré udalosti, najmä 19. 07. 2011, by bolo zaujímavé študovať až v 48-hodinovom, respektíve v o niečo kratšom časovom intervale. V týchto prípadoch sa ukazuje slabá stránka primárneho využitia údajov z manuálnych zrážkomerov, ktorých pozorovacie termíny nie je jednoduché napasovať do krátkodobých intenzívnych zrážok, pričom pri rannom termíne odčítania zrážkového úhrnu dochádza k časovým sklzom. Automatické zrážkomery sa v tomto smere javia ako adekvátny zdroj údajov, ktorý zároveň ponúka podrobnú informáciu o priebehu zrážok s malým časovým krokom. Pri vstupných

údajoch do systému INCA bola otázkou aktuálna funkčnosť zrážkomera a hodnovernosť nameraného úhrnu, čo v našej práci predstavovalo zásadné ťažkosti pri priestorovej reanalýze zrážok.

Počet automatických staníc musel byť často výrazne redukovaný, čím došlo k modifikácií výsledného zrážkového poľa na úkor vysokých úhrnov zrážok (23. 06. 2009). Navyše, reprezentatívnosť zrážok na stanici klesala so vzdialenosťou od miesta merania, izolovanosťou konvektívnych zrážok a členitosťou terénu. Bez spoľahlivých hodnôt o zrážkach v mieste automatickej stanice sme pozorovali rovnako ako Sokol s Řezáčovou (2006) miestami markantné podhodnotenie zrážok, ktoré sa významne líšili od meraní z manuálnych zrážkomerov. V termínoch 24. 06. 2013 a 23. 06. 2009 boli zrážky v Slovenskom rudohorí a Juhoslovenskej kotline podhodnotené až o 40 mm. V týchto regiónoch chýbala potrebná korekcia odhadnutých zrážok radarom pomocou údajov zo staníc pri zachovaní pôvodnej štruktúry zrážkového poľa radaru (Sokol a Řezáčová, 2001).

Vo veľkej vzdialenosti od radarov Malý Javorník (MJ) a Kojšovská hoľa (KH) neboli detegované ciele pod najnižšou eleváciou snímacích hladín, ktorá je pri KH okrem toho náchylná na orografické blokovanie západných radarových lúčov (obr. 1). Pokiaľ sú radarové lúče v priamom kontakte s orografiou, oblasť za horskou prekážkou je pre radar „neviditeľná“ v hladine nižšej ako je najvyšší blokovaný lúč. Radarová informácia o meteorologických podmienkach je tak z radaru KH čiastočne alebo úplne neprístupná. Narúšaná je prioritná detekčná hladina, vertikálne profily odrazivosti ako aj vzťah s intenzitou zrážok. Prípadne môžu vznikať pozadové rušivé odrazy, ktorých existencia a filtrovanie je vždy otázkou polohy radaru a spracovania signálu (Chow et. al, 2013).

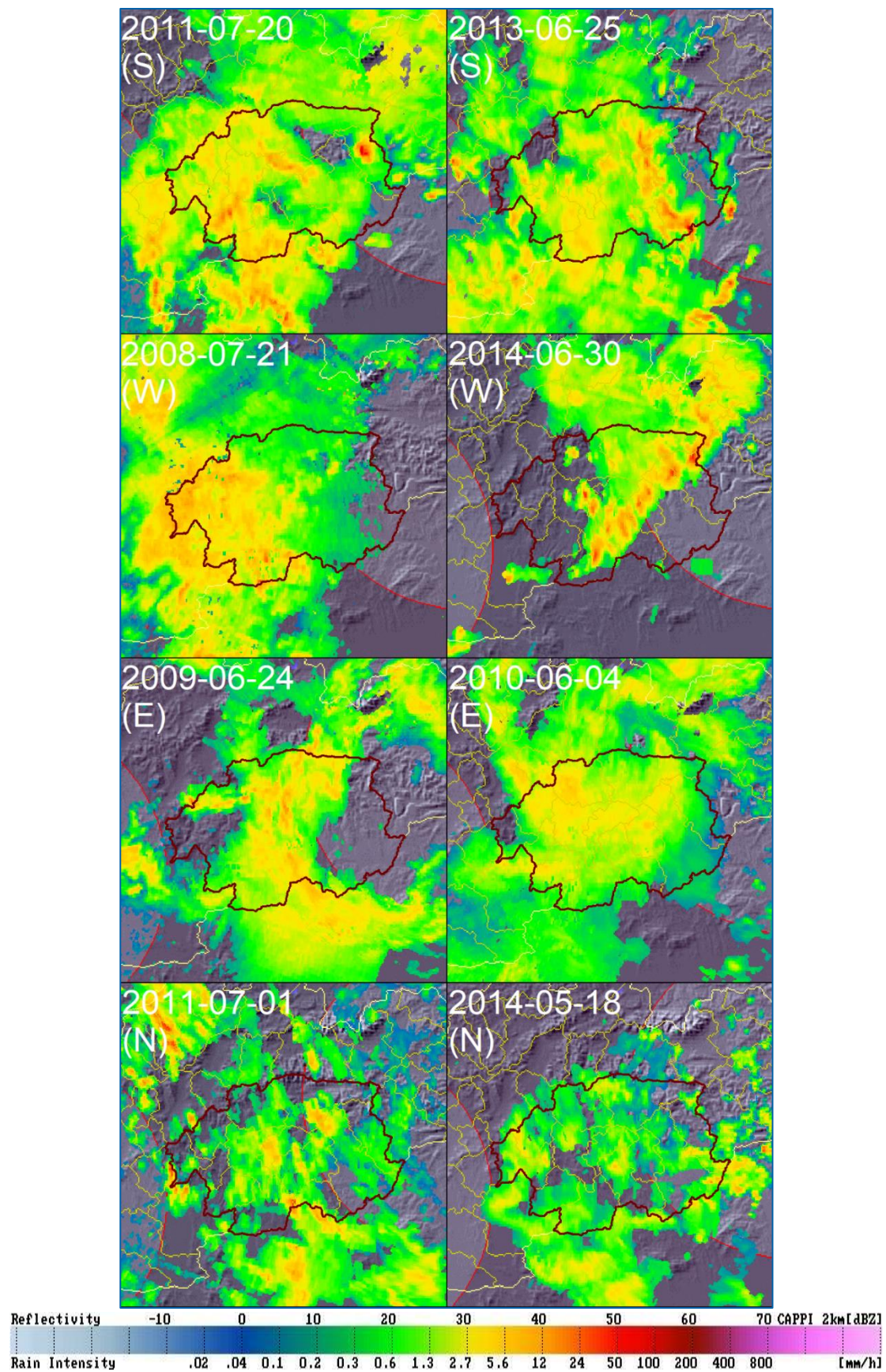
Ako aj v našom prípade, najmä vo vzdialených horských oblastiach je často pozorované podcenenie odhadu zrážok (Meischner, 2004). Tienenie najnižších snímacích elevácií a zakrivenie zemského povrchu vedú k chýbajúcim údajom v najnižšej hladine výskytu zrážkovej oblačnosti, kde sú zvyčajne hodnoty odrazivosti najvyššie. V závislosti od situácie môžu byť radarové lúče tlmené silnými zrážkami a takisto nedokážu zachytiť orografické zosilnenie zrážok (Řezáčová et al., 2007). Produkty radarovej informácie CAPPI 2 km a CMAX testované kvôli redukcií chýbajúcich údajov sa v našich termínoch ukázali ako rovnocenné, čo však nie je podľa Zacharova et al. (2004) pravidlom.

Obidva zdroje informácií, zrážkomerné stanice a radarové merania, vykazovali už vyššie spomenuté nedostatky a najväčšie rozdiely medzi zrážkovým poľom reanalýzy INCA a manuálnymi meraniami sme pozorovali v centrálnej časti Banskobystrického kraja, kde chýbal relevantný údaj z automatického zrážkomera. Prípadný budúci výskum zrážkových situácií má od jesene 2015 k dispozícii renovovanú slovenskú rádiolokačnú sieť so zmodernizovanými radarmi na MJ a KH, a novými rádiolokátormi na Kubínskej holi a Špaňom laze, ktorých cieľom je pokryť pôvodne neprístupné oblasti stredného Slovenska. Popritom sa zvyšuje kvalita údajov z automatických zrážkomerov, ako aj hustota staníc.

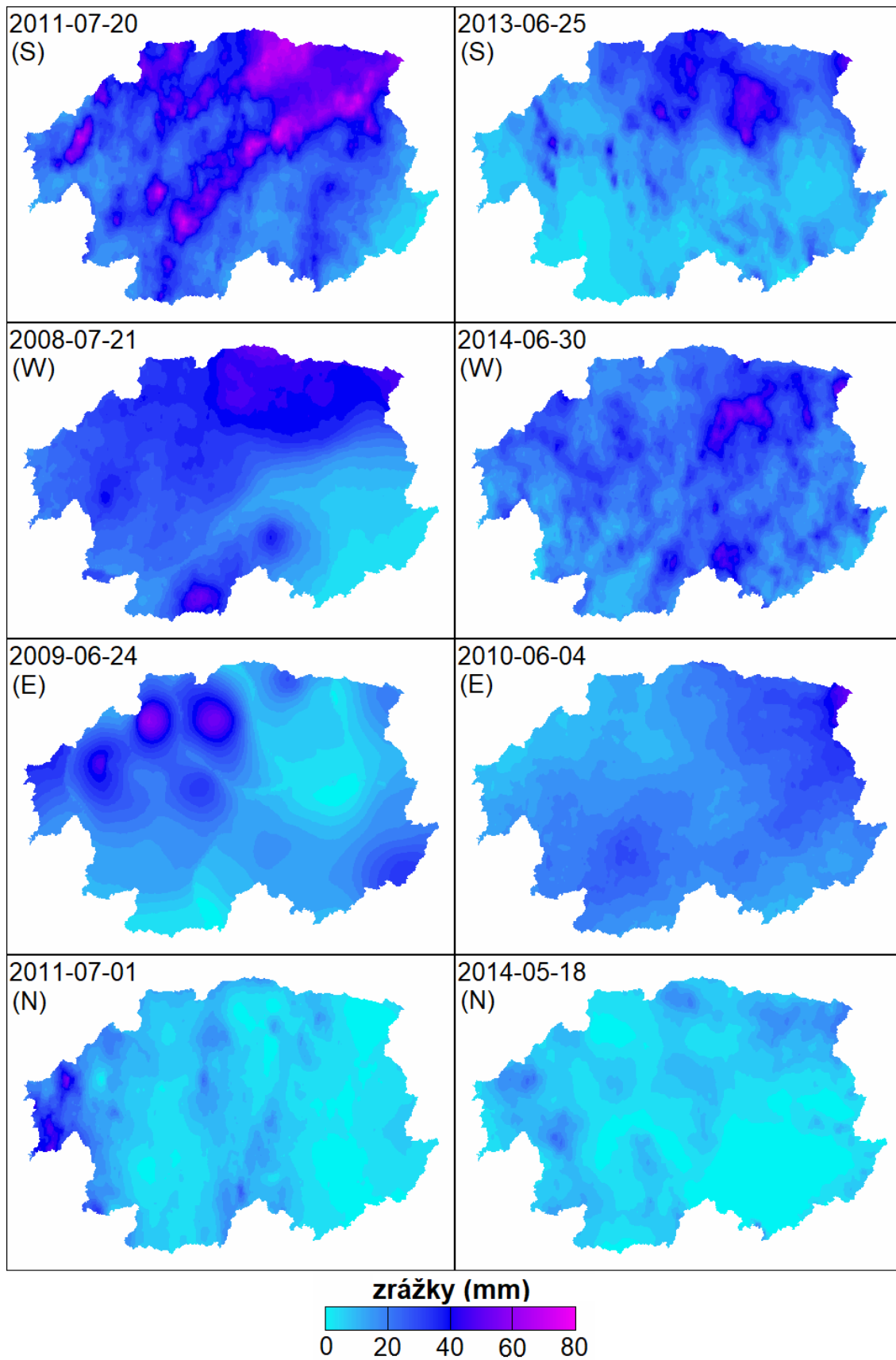
Samostatný komplex otázok tvorí reprezentatívnosť použitého priestorového rozlíšenia digitálneho modelu reliéfu jednotlivých morfometrických analýz. Ako uvádza Daly et al. (1994), použitie najpriateľnejšieho rozlíšenia záleží na konkrétnom morfometrickom parametri, charaktere územia a vlastnostiach súboru zrážok. Niektorí autori dospeli k najvyšším koreláciám vo vzťahu zrážok a nadmorskej výšky pri rozlíšení DMR 2 až 16 km. V našej práci sme z dôvodu rozlíšenia radarových pixlov (1 km) a výskumu konvektívnych zrážok uvažovali DMR s krokom 1 km, ktorý sa nakoniec uplatnil vďaka najvyššej korelácii vo vzťahu zrážok s nadmorskou výškou, relatívnou výškovou členitosťou a sklonitosťou svahov, zatiaľ čo pri svahovej orientácii sme pracovali s 2 km rozlíšením. Pri orientácii svahov s väčším súborom udalostí možno len odporučiť ešte menšie rozlíšenie DMR, ktoré by dostatočne reprezentovalo veľké formy georeliéfu s potenciálne väčším efektom na konvektívnu zrážkovú oblačnosť. Významné rozdiely medzi DMR s 50 m a 100 m rozlíšením neboli pozorované pri korelačnej analýze morfometrických charakteristík v okolí staníc so štvorcovou plochou 20 x 20 km. Avšak v tomto prípade testované 1 km rozlíšenie preukázalo najslabšie závislosti a finálne sme tak použili 50 m krok. Bankanza (2011) dospel k významným výsledkom už pri ploche 16 x 16 km so 100 m rozlíšením DMR.

Vo výslednom spracovaní zrážkových udalostí sme brali ohľad na všetky pravdepodobné nedostatky, ktoré boli s vynaloženým úsilím čo do najväčšej miery eliminované, čím sme dospeli ku korektným a zaujímavým poznatkom.

Meteorologické situácie, ktoré priniesli do Banskobystrického kraja plošne najvýdatnejšie zrážky, sú pre každý smer prúdenia jedinečné, pričom dvom termínom v každom kvadrante prináleží analogická synoptická situácia. Počas 29. 06. 2014 a 30. 06. 2011 sa potvrdilo, že pre výskyt intenzívnych konvektívnych zrážok nie je nevyhnutnou podmienkou výrazne nestabilné zvrstvenie atmosféry (Vasquez, 2009) a rovnako ani silné dynamické prúdenie v troposfére (Kirshbaum a Durran, 2005). Aj napriek podobnosti synoptických situácií pre jednotlivé smery prúdenia, celkové synoptické podmienky, vývoj počasia a konečné priestorové rozloženie zrážok sa v termínoch medzi sebou významne líšia. S prihliadnutím na priebeh konkrétnych zrážkových udalostí a s rešpektom voči malému počtu termínov, ako celok možno identifikovať geomorfologické oblasti, v ktorých prevládajú vyššie alebo nižšie úhrny zrážok (obr. 2).

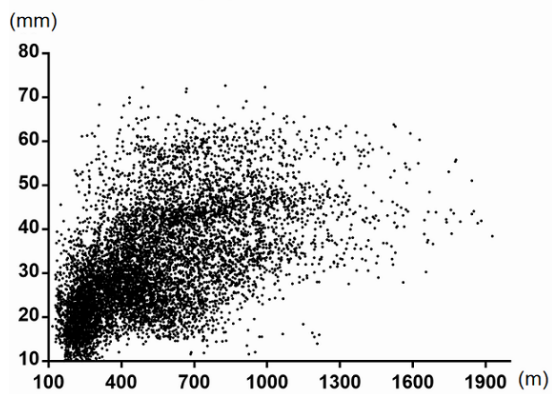


Obr. 1 Radarová odrazivosť (dBZ) a odvodená intenzita zrážok ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) nad Banskobystrickým krajom (hranica bordovou farbou).

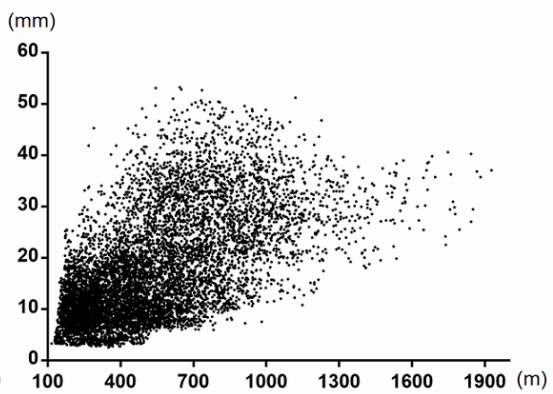


Obr. 2 Zrážková reanalýza modelu INCA (úhrn zrážok 06:00 UTC predchádzajúceho až 06:00 UTC uvedeného dňa).

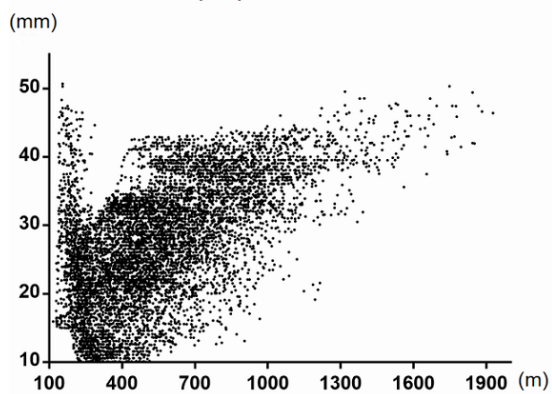
2011-07-20 (S)



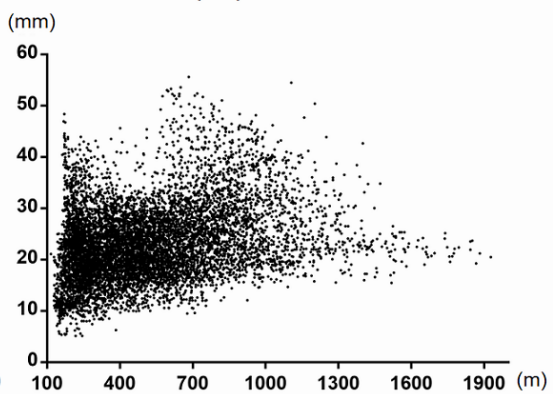
2013-06-25 (S)



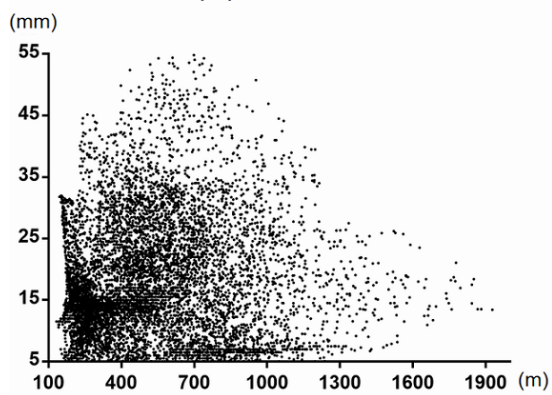
2008-07-21 (W)



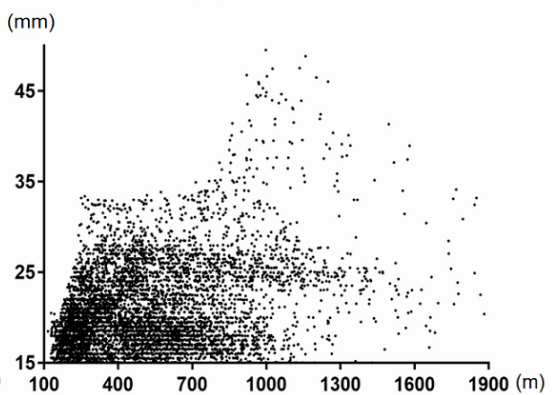
2014-06-30 (W)



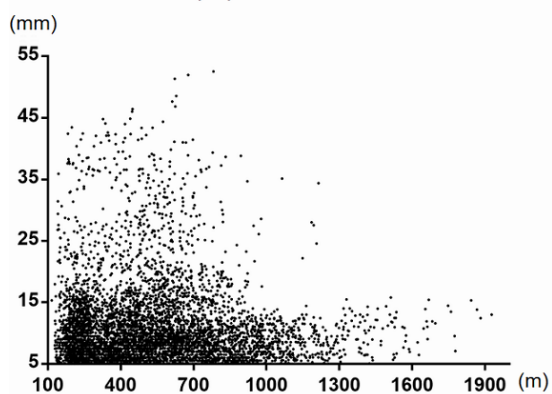
2009-06-24 (E)



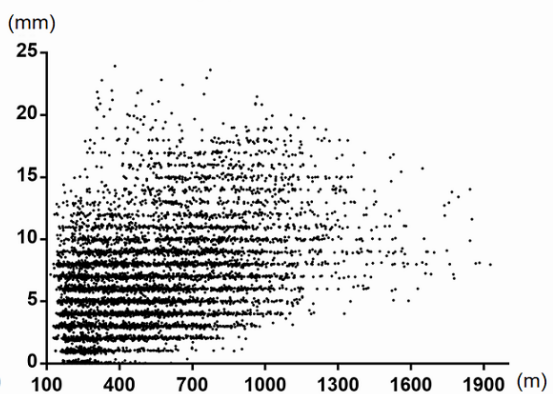
2010-06-04 (E)



2011-07-01 (N)



2014-05-18 (N)



Obr. 3 Závislosť zrážok v radarových pixloch na nadmorskej výške.

Ako majoritná oblasť s najpočetnejšou koncentráciou vysokých úhrnov zrážok vystupuje Slovenské rudohorie. V siedmych prípadoch tu boli zaznamenané najvyššie alebo jedny z najvyšších úhrnov zrážok a celková koncentrácia zrážkových ciel dosahuje najvyššej početnosti. Možno to odôvodniť postavením Slovenského rudohoria a jeho štruktúrou v južnej časti Západných Karpát v blízkosti Panónskej panvy, ktorých spojenie vytvára najpriaznivejšie atmosférické podmienky pre výskyt konvektívnych zrážok (Siedlecki, 2009). Ďalšími zrážkovo významnými oblasťami sú Nízke Tatry, v Slovenskom stredohorí najmä Kremnické vrchy a Poľana a v neposlednom rade Cerová vrchovina, v ktorej sú úhrny zrážok neraz vyššie ako v blízkom okolí. Veľa zrážok spadlo aj v Horehronskom podolí, ktoré leží medzi Slovenským rudohorím a N. Tatrami. Vďaka jeho malému pričnému rozmeru a vyššej nadmorskej výške sa tu neprejavuje pokles zrážok na rozdiel od rozľahlejších kotlín (obr. 2).

Naopak, najmenej konvektívnych zrážok prevláda v Juhoslovenskej kotline, obzvlášť v centrálnej časti Rimavskej kotliny, kde neprebíhali konvektívne vzostupy vzduchu v takej miere ako nad vyvýšeným terénom. Menšia Lučenecká kotlina a východ Ipeľskej kotliny majú zrážok relatívne veľa, nakoľko sú v blízkom kontakte s okolitými pohoriami. Vyššie úhrny sa vyskytujú na krajnom JV Juhoslovenskej kotliny, na pomedzí Cerovej vrchoviny a Bodvianskej pahorkatiny. Pomenej zrážok v rámci Slovenského rudohoria sa vyskytlo v Revúckej vrchovine a časti Stolických vrchov, čo vysvetľujeme vlastnosťou terénu, ktorý je oproti zvyšku rudohoria poklesnutý a situovaný okrajovo. Tieto celky zrážkami prevýšili Veporské vrchy a Spišsko-gemerský kras len počas východnej situácie 23. 06. 2009, ktorá bola niekoľkodňovou a v strednej Európe plošne rozsiahlou zrážkovou udalosťou.

Pliešovská, Zvolenská a Žiarska kotlina javia o niečo nižšie úhrny zrážok ako okolité pohoria. Opačná situácia v nich nastala počas 19. 07. 2011 a 29. 06. 2014, čo pripisujeme oblastiam dynamicky zosilnenej konvergencie prúdenia v závetří a na okraji pohorí (Blumen, 1990). Podobný mechanizmus spolu s iniciáciou zrážkovej oblačnosti na severe N. Tatier sa pravdepodobne uplatnil 17. 05. 2014 nad Horehronským podolím, kde bolo zaznamenané väčšie množstvo zrážok ako v susedných pohoríach. Z pohorí spadlo najmenej zrážok v Štiavnických vrchoch, na JZ Krupinskej planiny a vo Veľkej Fatre. Vo V. Fatre sa môže jednať o nedostatočnú zásobu alebo využiteľnosť dostupnej energie v atmosfére, o nižšie teploty vzduchu kvôli postaveniu v centre Z. Karpát a severozápadne od kraja alebo o nepriaznivú konfiguráciu terénu voči prúdeniu v termínoch, kedy skutočne pozorujeme odklon alebo zoslabenie konvektívnych zrážkových ciel nad pohorím. V prípade ďalších pohorí by sme mohli hypotetizovať o ich malom vertikálnom rozmere, polohe na úplnom okraji Karpát, kde prebieha len iniciácia vzniku oblačnosti alebo forme georeliéfu, ktorého povrch je výrazne denudovaný a málo sklonený.

Napriek plošne premenlivému výskytu konvektívnych zrážok naprieč kotlinami a pohoriami, je nepopierateľné, že horské oblasti pokrývajú prechody konvektívnych búrok v podstatne väčšom počte ako nižšie polohy. Vertikálne členitý terén pri priaznivej synoptickej situácii do určitej miery modifikuje vertikálne zvrstvenie ovzdušia

a lokálne ovplyvňuje alebo generuje typy instabilného zvrstvenia vzduchu, čím podnecuje konvektívne výstupy (Trapp, 2013). Prejavilo sa to najviac 19. 07. 2011.

Termíny sú charakterizované dynamickými synoptickými podmienkami, ktoré prevážili potenciálne najsilnejšie mechanizmy vplyvu orografie na zrážkovú oblačnosť, prebiehajúce v slabšom prúdení. Napriek tomu, tak ako uvádza Blumen (1990) a potvrdzuje Molinié et al. (2011) na príklade Západných Álp, synoptické predpoklady určili deň výskytu konvektívnej zrážkovej činnosti nad Banskobystrickým krajom, prítomnosť Karpát viac-menej stanovila čas a presné miesto výskytu konvektívnych búrok. Práve v závislosti na veľkopriestorových podmienkach osobitých udalostí sme pozorovali nejednotné vzťahy zrážok s orografickými charakteristikami.

V zrážkových termínoch nebola ani raz preukázaná veľmi silná závislosť výskytu konvektívnych zrážok na ktoromkoľvek z morfológických charakteristík reliéfu. Navzdory tomu stredne silné až silné kladné a štatisticky významné závislosti sledujeme pri viacerých znakoch počas niekoľkých zrážkových situácií.

Zo všetkých analyzovaných parametrov je absolútne najsilnejším prediktorom pre množstvo zrážok nadmorská výška, ktorá vykazuje najvyššiu závislosť v šiestich prípadoch (obr. 3). Pri oboch južných termínoch presahoval korelačný koeficient pre radarové pixle hodnotu 0,6, pre západnú situáciu 20. 07. 2008 hodnotu 0,55 a pre severnú situáciu 17. 05. 2014 hodnotu 0,45. Druhý severný, západný a oba východné termíny vykazovali len slabú alebo veľmi slabú závislosť. Závislosť zrážok na nadmorskej výške dosiahla 20. 07. 2008 pri staničných meraniach absolútne najvyšší koeficient 0,74, a počas druhej západnej situácie na rozdiel od radarových pixlov bola závislosť silná s koeficientom 0,48.

Vyššie menované situácie, okrem južných, sa medzi sebou výrazne líšia atmosférickými podmienkami, vývojom počasia a taktiež priestorovými zrážkami. Spoločným priestorovým znakom zrážok je výskyt najvyšších úhrnov vo Veporských vrchoch, Spišsko-gemerskom kráse, v Horehronskom podolí a N. Tatrách. Analogický mechanizmus, ktorým by orografia priamo ovplyvnila zrážkovú činnosť, je zvýraznenie konvekcie na náveterných svahoch pohorí, nad ktorými sa kvôli silnému prúdeniu nevyskytujú najvyššie úhrny, ale sú presunuté po prúdení. Azda práve kvôli tomu pozorujeme najvyššiu, no stále pomerne nízku hodnotu korelačného koeficientu 0,13 medzi zrážkami a orientáciou svahov počas severnej situácie 17. 05. 2014, kedy bolo prúdenie najslabšie a presun sponad svahov orientovaných bližšie k severu nebol natoľko rýchly.

Zrážky sa v horských a vysokohorských polohách vyskytli v každom termíne, ale ukazuje sa, že v termínoch najsilnejšieho vzťahu s nadmorskou výškou je spodný prah spadnutých zrážok limitovaný výškou územia, čo by vysvetľovalo vysoké hodnoty korelácie. Tento jav je zreteľný najmä 20. 07. 2008 a naopak nie je vôbec pozorovateľný za oboch východných situácií a severnej situácie 30. 06. 2011, kedy bolo hlavné zrážkové pásmo presunuté nad západné Slovensko (obr. 3).

Hoci prahová hodnota spodného výskytu zrážok s nadmorskou výškou väčšinou rastie, hodnoty najvyšších úhrnov nie. Najčastejšie sa absolútne maximá vyskytujú v polohách okolo 700 až 800 m n.m., pričom 03. 06. 2010 sú presunuté do stredných horských polôh a 20. 07. 2008 sa vyskytli v kotlinách ako aj na vrchole N. Tatier. Silný vzťah medzi konvektívnymi zrážkami a výškou reliéfu pravdepodobne platí len pri analýze rozľahlého územia a neplatí by pre geomorfologické oblasti alebo menšie celky (vizuálne zhodnotenie), kedy rozdiel nadmorskej výšky nehrá pri distribúcii zrážok rolu, ako ukázal výskum zrážok v Z. Tatrách od Holka et al. (2014).

Pri uplatnení vyššej prahovej hodnoty zrážok (30 mm), závislosť vzťahu medzi úhrnmi a nadmorskou výškou rapídne klesá. Veľmi silné zrážky sa teda vyskytujú aj v najnižších polohách, ale s rastúcou výškou, aspoň po stredohorskej oblasti, je doba opakovania podstatne menšia. Rozdiel medzi hodnotou najvyššieho a najnižšieho úhrnu vo vysokohorskom prostredí oproti nižším výškovým stupňom je vo všetkých termínoch najmenší, zatiaľ čo najväčšie rozdiely sú v triedach 500-800 a 800-1 100 m n.m. Iniciácia konvektívnej zrážkovej oblačnosti v našich prípadoch prebiehala nad úpäťami pohorí, na okraji kotlin alebo nad nižšími pohoriami, od ktorých bola vždy presunutá do centrálnej až severnej časti kraja s prevahou horských oblastí, kde konvektívne cely dosiahli svoju maximálnu zrážkovú účinnosť. Je to aj prípad Horehronského podolia počas 17. 05. 2014, kedy sa v jeho oblasti vyskytli vyššie zrážky ako v okolitých pohoriach, ale vďaka relatívne vysokej nadmorskej výške podolia nie je tento fakt v korelačnej analýze viditeľne obsiahnutý a lepšie by ho vyjadrili napríklad korelačné mapy.

Po testovaní závislosti medzi sumou zrážok za všetky termíny v radarových pixloch a morfometrickými charakteristikami sa ukazuje, že sila závislosti dosahuje vyššie hodnoty pre celý súbor ako v osobitných termínoch. Aj keď nie je tento prístup zrovna relevantný, z časti sa potvrdil záver Sokola a Bližňáka (2009), ktorí evidujú závislosť konvektívnych zrážok na nadmorskej výške až po kumulácii hodinových súm zrážok v radarových pixloch nad Českou republikou. Takisto, použité prahové hodnoty v ich práci do značnej miery prítomnosť akejkoľvek závislosti eliminujú. Autori však uvažujú veľký súbor zrážkových udalostí a ako v našom prípade, Ebtehaj a Georgiou (2010) potvrdili silný priestorový vzťah medzi intenzitou konvektívnych zrážkových ciel vybranej udalosti a nadmorskou výškou Apalačských vrchov.

Sila závislosti zrážok na výškových charakteristikách reliéfu v okolí staníc je často spojená s hodnotou koeficientu nadmorskej výšky priamo na stanici, ale v niektorých termínoch pozorujeme rozdiely. 17. 05. 2014 siaha koeficient vzťahu s priemernou nadmorskou výškou v severnom kvadrante až na hodnotu 0,49, zatiaľ čo pri nadmorskej výške priamo na stanici na 0,38. Priemerná nadmorská výška v kvadrantoch staníc proti smeru prúdenia vychádza ako najsilnejší prediktor, v podstatne rovnocenný s výškou na stanici. Za ním nasleduje minimálna a maximálna nadmorská výška, pričom minimálna výška sa dominantne presadila 24. 06. 2013 a 29. 06. 2014, dokonca so silným štatisticky významným koeficientom korelácie 0,45 zotrvala nad prahovou hodnotou 30 mm počas 29. 06. 2014 a 03. 06. 2010.

Z analýzy ďalej vyplýva, že najslabšou a takmer nepodstatnou vlastnosťou reliéfu okolia staníc je skutočnosť, či nadmorská výška terénu v smere od stanice proti smeru prúdenia klesá alebo stúpa. 03. 06. 2010 vyšiel ako jediný termín s korelačných koeficientom 0,33 pre rozdiel výšky na stanici a proti smeru prúdenia. Čím bol kladný rozdiel medzi výškou stanice a okolia vyšší (terén stúpa ku stanici), tým bol na stanici zaznamenaný vyšší úhrn. Bakanza (2011), ktorý pracoval so súčtom letných zrážok v Českej republike s rozdelením okolia staníc na osem častí podľa svetových strán, vysledoval najvyššiu závislosť konvektívnych zrážok na maximálnej nadmorskej výške v SZ úseku a na minimálnej nadmorskej výške v blízkom okolí stanice.

Morfometrické charakteristiky relatívna výšková členitosť a sklonitosť svahov sa obvykle vyskytujú v oblastiach vysokej nadmorskej výšky, a preto prejavujú v závislostiach so zrážkami obdobné výsledky ako samotná nadmorská výška, ktorej hodnota korelačného koeficientu bola iba v jednom prípade, 30. 06. 2011, nepatrne prevýšená hodnotou koeficientu amplitúdy reliéfu a sklonu svahov. Dôvodom je výskyt najvyšších úhrnov nad prielomovou dolinou Hrona medzi Vtáčnikom a Štiavnickými vrchmi, kde sa nachádzajú pomerne strmé svahy s vyššou výškovou členitosťou. Rovnako ako pri nadmorskej výške aj pri amplitúde reliéfu a sklone svahov sa dá odsledovať rast spodného prahu zrážok so stúpajúcimi hodnotami obidvoch parametroch, ale celkový vzťah so zrážkami badať pomenej a rozdiel extrémnych hodnôt je naprieč kategóriami vyrovnanejší. Pri najvyšších kategóriách sa zachováva vlastnosť najmenšieho rozdielu minimálnych a maximálnych zrážok s najvyššie postaveným mediánom, k čomu v prípade svahov dopomáha obsah malého počtu radarových pixlov. Najvyššie hodnoty korelačného koeficientu medzi zrážkami a amplitúdou reliéfu boli dosiahnuté za južných situácií, 0,44 a 0,52. Medzi zrážkami a sklonitosťou svahov to bolo takisto v južnom prúdení, s koeficientami 0,38 a 0,42. Najslabšie vzťahy vychádzajú 29. 06. 2014, 23. 06. 2009 a 30. 06. 2011, čo zodpovedá nadmorskej výške.

V západných kvadrantoch staníc signifikantne najsilnejšie vychádzajú koeficienty svahovitosti počas západných situácií, až do 0,59, na rozdiel od výsledkov Bakanzu (2011), ktorý identifikoval sklonitosť ako najvýznamnejšiu vo V a SV úseku okolia staníc. V radarových pixloch ako aj na staniciach nad druhou prahovou hodnotou 30 mm koeficienty klesajú a významné sú len 19. 07. 2011 a 20. 07. 2008. Z výsledkov vyplýva, že absolútne najvyššie zrážky sa vyskytujú v každom termíne okrem 20. 07. 2008 medzi amplitúdami reliéfu 200 a 400 m, ktoré pokrývajú až 53 % územia kraja. Najnižšie zrážky sa koncentrujú v spodných 200 m. Tu je potrebné upozorniť, že nižšiu výškovú členitosť majú aj zarovnané centrálné oblasti niektorých pohorí, napríklad Štiavnických vrchov a Krupinskej planiny, ktoré z pohorí vykazujú najnižšie úhrny.

Najsilnejšie zrážky sa v našich termínoch sústreďujú nad svahy so sklonom 0° až 10° , ktoré sú situované aj vo vyšších nadmorských výškach, napríklad na planinách Slovenského rudohoria. Maximálne úhrny sú v tomto intervale sklonitosti vcelku vyrovnané s ďalším poklesom do vyššej stupňovitosti. To zodpovedá tvrdeniam Alperta (1985), ktorý vo vysokých pohoriach sveta zistil, že v prípade priameho

zapojenia najstrmších svahov do iniciácie konvektívnej zrážkovej oblačnosti, najvyššie úhrny zrážok sú kvôli malým horizontálnym rozmerom strmých svahov takmer vždy presunuté nad mierne sklonené svahy blízkeho okolia. Najstrmšie svahy Banskobystrického kraja ležia v Spišsko-gemerskom kráse, N. Tatrách a V. Fatre, a v konečnom dôsledku pravidelná najvyššia stredná hodnota množstva zrážok je zapríčinená skôr geografickou polohou ako samotným tvarom reliéfu, nad ktorým prevažujú veľkopriestorové faktory. Weisse a Bois (2000) podobne identifikovali vo francúzskych Alpách strmosť svahov len ako lokálny faktor, nad ktorým primárne prevyšuje vzdialenosť územia od Stredozemného mora.

Orientácia svahov voči smeru prúdenia vzduchu sa prejavu ako najmenej významný prediktor pri priestorovej distribúcii konvektívnych zrážok. Štatisticky významné veľmi slabé závislosti sú spôsobené vysokým počtom pixlov, kdežto pri staniách je väčšina vzťahov nevýznamných. Najsilnejšia štatisticky významná a záporná korelácia - 0,15 bola preukázaná pri západnej situácii 29. 06. 2014, kedy sa najintenzívnejšie zrážky > 30 mm vyskytli prevažne nad západnými svahmi. Zrážkové cely sa formovali už pred hranicami kraja a ponad územie postupovali s konštantnou odrazivosťou. Prúdenie vzduchu a pohyb najintenzívnejších zrážkových ciel v tomto prípade smerovali takmer ideálne k východu, čo mohlo potenciálne prispieť k zvýrazneniu náveterného efektu. Holko et al. (2014) však pozorujú v Z. Tatrách zrážkové rozdiely medzi náveternými a záveternými svahmi až pri mesačných úhrnoch. Počas termínov s veľmi slabou závislosťou zrážok na orientácii svahov sme odpozorovali dominantnejšiu úlohu náveterných svahov pri priestorovej distribúcii zrážok, a to tvorbu zrážkovej oblačnosti, ktorá sa primárne, no nie nepretržite, tvorí priamo nad rozľahlými náveternými svahmi. Zrážková oblačnosť sa často objavuje až v určitej vzdialenosti od náveterných svahov po smere prúdenia (Houze, 2012). Je dôležité podotknúť, že radary detekujú len zrážkovú oblačnosť, ktorá mohla ešte ako nezrážková vzniknúť nad iným miestom.

Práve tu by mohlo ležať odôvodnenie signifikantnejších výsledkov pri orientácii svahov v staničných kvadrantoch proti smeru prúdenia. Stredne silné hodnoty korelácie vyšli pri južnom prúdení 24. 06. 2013 (- 0,39), pri západnom prúdení 20. 07. 2008 (- 0,31), a naopak najviac zrážok na záveterných svahoch spadlo počas severnej situácie 30. 06. 2011 s koeficientom 0,33, k čomu dopomohla najmenšia rozloha severných svahov a fakt, že hlavné zrážkové pásmo ponad tieto územia neprechádzalo. Tu sa potvrdzuje, že veľkú úlohu zohráva aj zastúpenie jednotlivých kategórií morfometrických charakteristík v kraji. Naproti našim zisteniam, Bakanza (2011) určil ako významný prediktor severnú a západnú orientáciu svahov.

Termíny, v ktorých sme odpozorovali najväčší vplyv orografie ako celku na priestorové rozloženie konvektívnych zrážok v Banskobystrickom kraji, sú podľa sily závislostí a vizuálneho zhodnotenia zoradené nasledovne: 20. 07. 2008 (W), 19. 07. 2011 (S), 29. 06. 2014 (S), 24. 06. 2013 (W), 17. 05. 2014 (N), 03. 06. 2010 (E), 23. 06. 2009 (E) a 30. 06. 2011 (N). Pritom v posledných dvoch termínoch je významnosť morfometrie pri výskyte zrážok zjavne absolútne bezpredmetná. Za príčinu to dávame hlavne lokalizácii najintenzívnejších zrážkových pásiem na okraj územia a silnému

vplyvu synoptických podmienok, ktoré nad strednou Európou prevážili miestne topografické faktory. Najlepšie je vplyv orografie vyjadrený pre južné smery prúdenia, po nich pre západné, severné a s veľkým odstupom pre východné, pri ktorých je vplyv orografie v podstate zanedbateľný.

Výsledky prisudzujeme predovšetkým konfigurácii terénu Banskobystrického kraja náchylného na zosilnenie zrážok pri južných situáciách a veľkopriestorovým podmienkam v atmosfére za východných situácií, ktoré riadili plošný tok vlhkosti na severnom okraji plytkej cyklóny nad Jadranským morom, kedy boli rozsiahlejšie zrážkové polia generované bez naviazanosti na terénny podklad a ovplyvňovali územie Slovenska niekoľko dní. Zabránené tak bolo presadeniu mechanizmov vzniku orograficky podmienenej konvektívnej zrážkovej oblačnosti, ktoré zároveň boli kvôli postaveniu a morfometrii Karpát úplne zahladené.

Použitá literatúra

- Alpert, P., 1985: Mesoscale indexing of the distribution of orographic precipitation over high mountains. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **25**, s. 532-545. ISSN 1558-8424.
- Bankanza, J. C. M., 2011: Time variation of the effect of geographical factors on spatial distribution of summer precipitation over the Czech Republic. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. **115**, No. 1-2, s. 51-70. ISSN 0324-6329.
- Blumen, W. (ed.), 1990: Atmospheric processes over complex terrain. *Meteorological Monographs*. Vol. **23**, No. 46., American Meteorological Society. ISBN 1-878220-01-2. 323 s. ISSN 0065-9401.
- Daly, Ch., Neilson, R. P., Phillips, D. L., 1993: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountains terrain. *Journal of Applied Meteorology*. **33**, s. 140-158. ISSN 0894-8763.
- Ebtehaj, M., Foufoula-Georgiou, E., 2010: Orographic signature on multiscale statics of extreme rainfall: A storm-scale study. *Journal of Geophysical Research*. **115**, D23112. ISSN 0148-0227.
- Hagen, M., J. van Baelen, Richard, E., 2011: Influence of the wind profile on the initiation of convection in mountainous terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. **137**, s. 224-235. ISSN 1477-870X.
- Holko, L., Hlavco, J., Danko, M., Kostka, Z., 2014: Spatial variability of precipitation and hydrological response of a mountain catchment. *Die Bodenkultur*. **65**, 3-4, s. 15-21. ISSN 0006-5471.
- Houze, R. A., Jr., 2012: Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*. **50**, RG1001/2012, 47 s. ISSN 8755-1209.
- Chow, F. K., De Wekker, S. F. J., Snyder, B. J., 2013: Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges. Springer. ISBN 978-94-007-4097-6. 750 s.

- Kirshbaum, D. J., Durran, D. R., 2005: Observations and modeling of banded orographic convection. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **62**, 2005, s. 1463-1479. ISSN 1558-8424.
- Meischner, P. (Ed.), 2004: Weather Radar-Principles and Advanced Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-05561-4. 337 s.
- Molinié, G., Ceresetti, D., Anquetin, S., Creutin, J. D., Boudevillain, B., 2011: Rainfall regime of a mountainous Mediterranean Region: Statistical analysis at short time steps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **51**, s. 429-448. ISSN 1558-8424.
- Řezáčová, D., Novák, P., Kašpar, M., Setvák, M., 2007: Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. ISBN 978-80-200-1505-1. 576 s.
- Siedlecki, M., 2009: Selected instability indices in Europe. *Theoretical and Applied Climatology*. **96**, s. 85-94. ISSN: 0177-798X.
- Sokol, Z., Bližňák, V., 2009: Areal distribution and precipitation-altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year. *Atmospheric Research*. **94**, s. 652-662. ISSN 0169-8095.
- Sokol, Z., Řezáčová, D., 2001: Statistická korekce denních srážkových úhrnů stanovených radarem s využitím klasifikované regrese. *Meteorologické zprávy*. roč. **54**-2001-č. 2, s. 46-56. ISSN 0026-1173.
- Sokol, Z., Řezáčová, D., 2006: Asimilace radarové odrazivosti do numerického modelu předpovědi počasí s vysokým rozlišením. *Meteorologické zprávy*. roč. **59**-2006-č. 1, s. 18-29. ISSN 0026-1173.
- Trapp, R. J., 2013: Mesoscale-convective processes in the atmosphere. Cambridge University Press, New York, USA. ISBN 978-0-521-88942-1. 346 s.
- Vasquez, T., 2009: Severe Storm Forecasting. 5th edition. Weather Graphics Technologies. ISBN 0-9706840-9-6. 266 s.
- Weisse, A. K., Bois, P., 2000: Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps. *Journal of Applied Meteorology*. **40**, s. 720-740. ISSN 0894-8763.
- Zacharov, P., Šálek, M., Novák, P., 2004: Porovnání různých metod využívajících radarová a srážkoměrná měření pro odhad srážek. *Meteorologické zprávy*. roč. **57**-2004-č. 6, s. 157-167. ISSN 0026-1173.