ANALÝZA KONVEKTÍVNYCH JAVOV S VYUŽITÍM RÁDIOLOKAČNÝCH PRODUKTOV SHMÚ – VYBRANÉ PRÍPADY Z ROKU 2017 Analysis of convective phenomena by radar products of shmi – selected cases from 2017

Cyril Siman

Slovenský hydrometeorologický ústav v Bratislave, Odbor Meteorologické predpovede a výstrahy, (*cyril.siman@shmu.sk*)

Abstract

Occurence of thunderstorms during summer is typical features of weather in Slovakia. We observe them mostly from april to september and besides lightning activity, that are defined, several dangerous weather event are conected with them. In related with thunderstorms is often observed strong wind, intensive rainfall and hail. Forecast of thunderstorm is even in recent days conceted with severel issues. For understanding the possibilities to forecast them to understand the basis of genesis of thunderstorm is necessary. The best conditions for thunderstorms genesis are in environment with moist air in lower troposphere with strong vertical gradient of air temperature (0,6 °C/100 m) in middle of troposphere. However, even these conditions are present the thunderstorms have not arise. The reason is absence of important factor, which start deep convection process. For example, this may be a progressive cold front or mesoscale lines. Bigger probability of thunderstorm occurence is in mountains, where temperature of convection is reach earlier and process under thunderstorm clouds rising start often in the forenoon. In practice we know relatively good to forecast conditions that are necessary for thunderstorms arising, but we often do not know where to come from, or which area to affect. To predict organization of thunderstorm is less problematic. After formation of thunderstorm follows continuous monitoring by data from radiolocation network. As these are very dynamic processes ongoing very often in the small scale, dense network of data with necessity resolution is necessery.

In the Department of meteorological forecasts and warnings, data from up to four radar are used. The article dedicate usage of radiolocation products of SHMI network, whereas in individual analyzes are selected cases from storm season in 2017. In example of supercell in the east of Slovakia are presented typical features of supercell, that was identified in the field of radar reflectivity, but in the field of doppler velocity, too. In the next part, convective structure, that was defined by typical features in the field of radar reflectivity in bow shape, is presented. In the end, feature in the doppler velocity, that is typical for downburst occurence, that is compare with typical feature for cyclonic rotation in supercell, is presented. Radar images in the article are supply by measurements from stations network of SHMI, but by photos of Slovakia inhabitants, too.

Anotation

The aim of the thesis is the application of the theoretical knowledge from convective meteorology in the process of analysis and early warning of dangerous phenomena associated with storms. For this purpose, some cases with the occurrence of convective phenomena and associated dangerous weather event from 2017 were processed. Key words: doppler radar, mesoscale convective system, supercell, bow echo, downburst.

Anotácia

Cieľom práce je aplikácia teoretických poznatkov z oblasti konvektívnej meteorológie v procese analýzy a včasného varovania pred nebezpečnými javmi spojenými s búrkami. Pre tento účel boli spracované niektoré prípady s výskytom konvektívnych javov a s nimi spojených nebezpečných prejavov počasia z roku 2017.

Kľúčové slová: dopplerovský radar, mezoškálový konvektívny systém, supercela, bow echo, downburst.

ÚVOD

Družicové a radarové pozorovania sa radia do vedného odboru dištančných meraní. Od pozorovaní in situ (na mieste) sa líšia tým, že informácie o javoch a objektoch získavajú pomocou analýzy údajov zo zariadení, ktoré nie sú v priamom kontakte s cieľom skúmania (Jurašek a kol., 2009).

Rádiolokačné merania a prijímanie družicových údajov sa na území Slovenska začali v roku 1972 na Výskumno-vývojovom meteorologickom rádiolokačnom stredisku VMRS na Malom Javorníku.

V roku 1974 bolo v Šuranoch vybudované experimentálne pracovisko, ktoré plnilo výskumné úlohy týkajúce sa pozorovania tvaru kvapiek a pevných častíc v búrkových oblakoch a od roku 1980 sa spustilo prvé vysielanie zlúčenej rádiolokačnej informácie z dvoch rádiolokátorov Praha-Libuš a Bratislava-Malý Javorník.

Údaje z družíc a rádiolokátorov sa postupne stali bežnou súčasťou meteorologickej prevádzky nielen na Slovensku, ale takmer kdekoľvek na svete. Ich využitie v meteorológii sa v súčasnosti najviac uplatňuje pri tvorbe veľmi krátkodobej predpovede (*tzv. nowcasting*) a pri vydávaní meteorologických výstrah predovšetkým na nebezpečné prejavy počasia spojené s búrkami.

Článok analyzuje vybrané prípady s výskytom konvektívnych javov na Slovensku v letnej sezóne 2017, ktoré sme identifikovali a analyzovali s využitím základných rádiolokačných produktov. Nebezpečné prejavy počasia s nimi spojené boli potvrdené aj meraniami z našej siete staníc alebo doplnené hláseniami (fotografiami) dotknutých obyvateľov Slovenska.

MATERIÁL A METÓDY

V článku sú spracované údaje z rádiolokačných meraní na území Slovenska získané v priebehu letnej sezóny v roku 2017. Vybrané boli rádiolokačné produkty využívané na Odbore Meteorologických predpovedí a výstrah SHMÚ.

Nasleduje ich stručná charakteristika podľa (Řezáčová a kol., 2007; Caletka, 2013; Selex ES, 2015):

- PPI ("Plan Position Indicator") pole rádiolokačnej veličiny namerané pri jednom náklone (elevácii) antény
- CAPPI ("Constant Altitude Plan Position Indicator") pole rádiolokačnej veličiny v hladine konštantnej nadmorskej výšky získané interpoláciou zo susedných hladín PPI. V práci bol použitý produkt CAPPI 2 km z rádiolokačnej odrazivosti (pozn. autora).
- VIL ("Vertical Intagrated Liquid") vertikálne integrovaný obsah vody v zadefinovanej vrstve atmosféry určený za predpokladu Marshall-Palmerovho rozdelenia. Hodnota VIL [kg.m⁻²] sa stanoví pomocou nasledovných vzorcov:

$$Z = C.M^{D} \qquad M = \left(\frac{Z}{C}\right)^{\frac{1}{D}}$$
[1],

$$VIL = \int_{h}^{h} M(h). \, dh \approx A$$
 [2],

kde Z je rádiolokačná odrazivosť $[mm^6.m^{-3}]$, koeficient C = 24000, koeficient D = 1.82, M je obsah tekutej vody $[g/m^3]$, h_z je najnižšia hladina, odkiaľ sa počíta obsah vody [m] a h_t je najvyššia hladina, po ktorú sa počíta obsah vody [m], A \approx približný obsah vody v zadefinovanej vrstve. Koeficient C a D sa určuje v závislosti od typu hydrometeorov (napr. oblačné kvapky, zrážkové kvapky).

- MPPI (V) ("Multiple Plan Position Indicator Radial Velocity Field") produkt pozostávajúci z polí
 PPI radiálnej rýchlosti zo všetkých dostupných elevácií. Dopplerovské rádiolokátory merajú okrem
 rádiolokačnej odrazivosti aj zmenu frekvencie navráteného signálu prostredníctvom merania jeho fázy.
 Zo zmeny frekvencie je podľa teórie Dopplerovho efektu možné určiť radiálnu rýchlosť odrážačov
 (prevažne atmosférické zrážky a nehomogenity indexu lomu v atmosfére). Podmienkou merania
 dopplerovskej rýchlosti je výskyt radarových odrazov, predovšetkým v zrážkach a význačnej oblačnosti
 (Cumulonimbus, Nimbostratus). Z poľa radiálnych rýchlostí, nameraných pri danej elevácii, je možné
 detegovať horizontálny strih vetra a zisťovať príznaky rotácie a divergencie prúdenia.
- MPPI (ET) ("Multiple Plan Position Indicator Echo Type") produkt pozostávajúci z polí PPI typu
 rádiolokačných odrazov zo všetkých dostupných elevácií. Klasifikácia radarových odrazov prebieha
 v dvoch krokoch. V prvom kroku sa od seba odlíšia meteorologické (napr. dažďové kvapky) a
 nemeteorologické ciele (napr. biologické ciele). V druhom kroku prebieha roztriedenie samotných
 hydrometeorov (sneh, dážď, krúpy). Pri klasifikácii je použitý algoritmus NEXRAD optimalizovaný pre
 letné obdobie, do ktorého vstupuje rádiolokačná odrazivosť a dual-polarizačné veličiny korelačný
 koeficient a diferenciálna odrazivosť. Diferenciálna odrazivosť sa počíta pomocou vzorca:

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{P_H}{P_V} = Z_H - Z_V$$
 [3],

kde P_H je výkon prijatý prijímačom v horizontálnom smere, P_V je výkon prijatý prijímačom vo vertikálnom smere, Z_H je odrazivosť v horizontálnom smere, Z_V je odrazivosť vo vertikálnom smere.

VVP ("Volume Velocity Processing") – vertikálny profil vetra. Dopplerovské rádiolokátory umožňujú merať radiálnu zložku prúdenia, do ktorej sa premietajú horizontálne aj vertikálne zložky prúdenia. Vertikálny profil získame na základe výpočtov na danej elevácii v rôznych vzdialenostiach od radaru (v rôznych nadmorských výškach). Metóda je označovaná ako VAD (Velocity-Azimuth Display). Komplexnejšou metódou pre analýzu poľa vetra je metóda VVP (Volume Velocity Processing), ktorá využíva merania na viacerých eleváciách, vďaka čomu je možné vypočítať vertikálne gradienty parametrov poľa vetra. Analýzu poľa vetra prostredníctvom druhej menovanej metódy sme využili aj v predkladanom príspevku (obr. 16).

TEORETICKÁ A PRAKTICKÁ ANALÝZA KONVEKTÍVNYCH JAVOV

Základnou štrukturálnou jednotkou konvektívnych útvarov je tzv. konvektívna bunka¹ (Byers a Braham, 1949). Jej najjednoduchším, a z hľadiska geometrie javu a intenzity prejavov najslabším prípadom, je obyčajná (jednoduchá) konvektívna bunka. Je určená jedným výstupným (angl. *updraft*) a následným kompenzačným zostupným prúdom vzduchu, ktorý súvisí s vypadávaním zrážok (angl. *downdraft*). Vyvíja sa ako trojrozmerná

¹ v anglickej literatúre sa používa termín *convective cell*

cirkulácia vzduchu, ktorá umožňuje transport vlastností zo spodných troposférických hladín do hornej troposféry a spodnej stratosféry (Řezáčová a kol., 2007). V praxi si takýto príklad konvektívneho útvaru môžeme predstaviť ako silnú prehánku (alebo búrku), ktorá sa typicky vyvíja vnútri vzduchovej hmoty vplyvom denného chodu teploty vzduchu v podmienkach slabého vertikálneho strihu vetra². Aj napriek jej krátkemu trvaniu môžu byť prejavy s ňou spojené výrazné, ale väčšinou neprodukujú vysoké zrážkové úhrny (intenzita zrážok môže byť vysoká, ale zrážky majú krátke trvanie), a ani veľké krúpy (priemer zväčša do 3 cm).

Jednoduchá konvektívna bunka je zároveň základnou štrukturálnou jednotkou viacbunkového (multicelárneho) konvektívneho útvaru. Ten pozostáva z viacerých jednoduchých konvektívnych buniek, ktoré sa nachádzajú v rôznom štádiu vývoja a môžu sa navzájom ovplyvňovať. Základným mechanizmom, ktorý vyvolá vznik nových konvektívnych buniek v multicelárnom systéme je výstup teplého a vlhkého vzduchu pred chladným vzduchom vytekajúcim z konvektívnych buniek, ktoré sú v pokročilejšom štádiu svojho vývoja (štádium zrelosti) (Řezáčová a kol., 2007).

Stavbou a správaním konvektívnych útvarov (systémov) v závislosti na vertikálnom strihu vetra a vztlakovej sile (CAPE) sa podrobne zaoberali viacerí autori (Weisman a Klemp, 1982; Rotunno a kol., 1988).

Vertikálny strih vetra má významný vplyv na vývoj konvektívneho oblaku (Doswell, 1991) a v kombinácii s vtokom prúdenia v spodných hladinách troposféry ovplyvňuje proces revitalizácie konvektívneho systému, a aj dĺžku existencie downburstu (Matiašová, 2010). Je tiež kľúčový pre vznik superciel (Šinger, 2013).

Multicelárne systémy sa môžu rozvinúť až do konvektívnych útvarov s horizontálnym rozmerom rádovo 100 km (tzv. mezoškálové konvektívne systémy – ďalej MCS) a spolu so supercelami sú nositeľmi nebezpečných javov, ktoré sa v porovnaní s obyčajnými konvektívnymi bunkami prejavujú väčším rozsahom (najmä v prípade MCS), trvaním, a zvyčajne aj intenzitou.

V ďalšej časti článku sa budeme venovať vysvetleniu pojmov supercela a mezoškálový konvektívny systém. Popíšeme črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (napr. bow echo) a poli dopplerovskej rýchlosti, prostredníctvom ktorých ich môžeme identifikovať. Zameriame sa aj na niektoré nebezpečné javy s nimi spojené, prejavujúce sa na alebo blízko zemského povrchu (downburst).

Supercela

V roku 1964 predložil Browning koncepčný model, ktorý vysvetľoval štruktúru nebezpečných búrok šíriacich sa doprava od smeru prevládajúceho prúdenia (Řezáčová a kol., 2007). Tieto búrky označil termínom supercela (Browning, 1964).

Supercela vzniká v oblasti s instabilitou vzduchovej hmoty a výrazným vertikálnym strihom vetra (Brooks, 2009). Je definovaná ako konvektívna bunka tvorená silným rotujúcim výstupným prúdom (angl. *updraft*), ktorý sa na snímkach z dopplerovského rádiolokátora javí ako tzv. mezocyklóna. Mezocyklóna je oblasť rotujúceho *updraftu* s horizontálnym rozmerom 2 až 10 km (Moller a kol., 1994), ktorý rotuje okolo zvislej osi zvyčajne v rovnakom smere ako cyklóny na danej pologuli. Prítomnosť mezocyklóny je hlavným a jediným objektívnym kritériom definície supercely (Klemp, 1987). Okrem cyklonálne rotujúcimi supercelami s odklonom doprava (tzv. *right mover*) boli zaznamenané aj prípady s anticyklonálne rotujúcimi supercelami s odklonom vľavo (tzv. *left mover*) od prevládajúceho prúdenia (Řezáčová a kol., 2007). Podľa štúdií vykonaných na území USA výrazne dominujú supercely s cyklonálnou rotáciou (Kessler, 1986). Typickou

² Vertikálny strih vetra je vektor definovaný ako rozdiel medzi vetrom v dvoch hladinách (najčastejšie strih vetra medzi prízemnou vrstvou (0 až 500 m) a hladinou 6 km (Thompson a kol., 2003; Šinger, 2013)

vlastnosťou supercely je štiepenie materskej bunky na dve sekundárne, postupne sa od seba vzďaľujúce bunky, ktorých updrafty majú opačnú rotáciu (Klemp, 1987; Řezáčová a kol., 2007). Životnosť supercely dosahuje niekoľko (ojedinele aj viac ako 10) hodín (Řezáčová a kol., 2007).

Supercela má špecifické črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (Lemon, 1980):

- weak echo region (ďalej WER): oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti,
- bounded weak echo region (ďalej BWER): ohraničená oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti
- hook echo (ďalej hákovité echo): nízkohladinová črta supercely na poli rádiolokačnej odrazivosti (Burgess a Lemon, 1990).
- V-notch (ďalej V-tvar): O "V-tvare" na poli rádiolokačnej odrazivosti hovoríme, ak sa hydrometeory usporiadajú do tvaru písmena V (Šinger, 2013).

Supercela na východe Slovenska dňa 23.6.2017

V spomínaný deň postupoval cez Slovensko ďalej na východ studený front. Pred ním fúkal na východe územia v prízemnej vrstve ovzdušia ešte juhovýchodný až južný vietor, vo vyšších vrstvách troposféry už fúkal západný až severozápadný vietor a s narastajúcou výškou zrýchľoval. Zmenu smeru a rýchlosti vetra s výškou (vertikálny strih vetra) dokumentujú merania zo synoptických staníc na východe Slovenska, ale tiež aerologické meranie z Gánoviec pri Poprade (obr. 1).

Supercela bola ľahko identifikovateľná nielen na poli rádiolokačnej odrazivosti (obr. 2, obr. 3), ale aj na poli dopplerovskej rýchlosti (obr. 4). Prostredníctvom produktu CAPPI 2 km sme identifikovali radarové črty typické pre supercelu. Menovite išlo o WER, BWER, hákovité echo, V – tvar, FFD a RFD región (obr. 2, obr. 3). Na obr. 3 (vpravo) si môžeme všimnúť aj výrazný náklon konvektívnej bunky, ku ktorému dochádza vplyvom výrazného vertikálneho strihu vetra. To umožňuje separovanie výstupného a zostupného prúdu oblaku, čo vedie k dlhšej dobe života celého konvektívneho útvaru.

Na jednoznačné potvrdenie supercely je potrebné na poli dopplerovskej rýchlosti identifikovať mezocyklónu. Na obr. 4 (vpravo) si môžeme všimnúť, že na prednej strane sledovaného objektu (v čiernom kruhu) sa častice pohybovali smerom od radaru (červená farba) a na zadnej strane smerom k radaru (modrá farba), čo indikuje cyklonálnu rotáciu a objekt už definujeme ako supercela (Donaldson, 1970). Typickým znakom supercely je tiež jej štiepenie. Na obr. 5 je séria snímok, ktorá zachytáva práve tento proces, pričom výsledkom je bunka s odklonom vľavo (A) a vpravo (B) od prevládajúceho prúdenia. V súvislosti s prechodom supercely sme prostredníctvom našich staníc zaznamenali vysokú intenzitu zrážok. Napríklad na stanici Hanušovce nad Topľou spadlo za 10 minút až 33 mm zrážok (obr. 6). Vysoký obsah vody vo vzduchovom sťĺpci sme v danej lokalite, krátko pred tým ako sme namerali spomínaný úhrn zrážok, identifikovali aj prostredníctvom rádiolokačného produktu VIL (obr. 7). Len o niekoľko minút neskôr sme pozorovali pokles hodnôt obsahu vody v oblaku (obr. 8). Okrem intenzívneho dažďa sa v lokalitách, cez ktoré supercela postupovala, vyskytlo aj krupobitie. V súvislosti so supercelami sa typicky vyskytujú krúpy s priemerom 3 cm a viac. Prítomnosť krúp v oblaku sme identifikovali aj prostredníctvom produktu echo type (obr. 9). O nebezpečných prejavoch počasia, ktoré súviseli s prechodom supercely sme dostali aj hlásenia od obyvateľov dotknutých oblastí, niektorí nám poslali aj fotografie (obr. 10 a 11).

S označením supercela sú niekedy chybne spájané búrky s tými najextrémnejšími prejavmi počasia. Najmä v radoch laickej verejnosti tak niekedy vzniká mylný dojem, že supercela je určitý druh "super búrky". Tento názor je však nesprávny, pretože z hľadiska množstva zrážok, nárazov vetra a dĺžky trvania sa napríklad multicelárne systémy môžu prejavovať rovnako intenzívne (Řezáčová a kol., 2007).



Obr. 1: Údaje o počasí na jednotlivých synoptických staniciach doplnené o výstup z aerologického merania z Gánoviec pri Poprade dňa 23.6.2017 o 12:00 UTC.



Obr. 2: Radarové črty na poli rádiolokačnej odrazivosti typické pre supercelu identifikované na východe Slovenska dňa 23.6.2017 [radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km)].



Obr. 3: Radarové črty na poli rádiolokačnej odrazivosti typické pre supercelu identifikované na východe Slovenska dňa 23.6.2017. Celková situácia s naznačením vedenia vertikálneho rezu (vľavo), vertikálny rez poľom rádiolokačnej odrazivosti (vpravo) [radar Kojšovská hoľa (vľavo CAPPI 2 km)].



Obr. 4: Radarové črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo) a dopplerovskej rýchlosti (vpravo) súvisiace so supercelou identifikované na východe Slovenska dňa 23.6.2017. Čierna šípka na obrázku vľavo naznačuje smer postupu konvektívnej bunky [radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km; MPPI (V) – elevácia 2.00°].



Obr. 5: Séria snímok zobrazujúca štiepenie supercely dňa 23.6.2017 na východe Slovenska. Konkvektívna bunka s odklonom vľavo od prevládajúceho prúdenia (left mover) je na obrázku označená písmenom A, bunka s odklonom vpravo (right mover) písmenom B [radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km)].



Obr. 6: Priebeh úhrnu zrážok dňa 23.6.2017, grafický výstup zo zrážkomernej automatickej stanice SHMÚ Turany nad Ondavou.



Obr. 7: Supercela na východe Slovenska dňa 23.6.2017 o 12:25 UTC, celková situácia na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo), obsah vody v oblaku identifikovaný prostredníctvom produktu Vertical integrated liquid (vpravo)[radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km; VIL)].



Obr. 8: Supercela na východe Slovenska dňa 23.6.2017 o 12:45 UTC, celková situácia na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo), obsah vody v oblaku identifikovaný prostredníctvom produktu Vertical integrated liquid (vpravo)[radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km; VIL)].



Obr. 9: Supercela na východe Slovenska dňa 23.6.2017 o 12:05 UTC. Celková situácia na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo), typ zrážok (vpravo) [radar Kojšovská hoľa (CAPPI 2 km; MPPI(ET) elevácia 0.00°)].



Obr. 10: Nebezpečné prejavy počasia spojené s prechodom supercely - intenzívne zrážky a vietor zachytené v Bardejove dňa 23.6.2017 (fotografiu vľavo poslal Zdeno Jurčák, fotografiu vpravo poslal Peter Michalov).



Obr. 11: Supercela na východe Slovenska dňa 23.6.2017 odfotená z obce Čižatice o 15:40 LSEČ (fotografiu vľavo poslal Pavol Gombos). Hlásenie o krúpach z obce Bačík okres Vranov nad Topľou (fotografiu vpravo poslal Štefan Bačík).

Mezoškálový konvektívny systém

Mezoškálové konvektívne systémy (ďalej MCS) sú tvorené sústavou oblakov druhu Cumulonimbus, ktoré spolu vytvárajú aspoň v jednom smere súvislú zrážkovú oblasť s rozmerom 100 a viac kilometrov (Řezáčová a kol., 2007; Houze, 1993).

V počiatočnom štádiu vývoja MCS väčšinou môžeme dobre rozoznať jednotlivé konvektívne bunky, ktoré sa vyvíjajú individuálne a zväčšujú svoj objem až do štádia zrelosti. Neskôr dochádza k interakcii cirkulácie medzi jednotlivými bunkami, čo vedie k tvorbe multicelárneho (viacbunkového) systému. Ten môže v ďalšom vývoji nadobudnúť až charakteristiky typické pre MCS (horizontálne rozmery, dĺžka života, teplota hornej hranice oblačnosti a i.). Konvektívne bunky v nich môžu mať rôzne priestorové usporiadanie, vytvárajú zhluky (tzv. *clustre*), časté sú aj lineárne usporiadané štruktúry tzv. squall lines³ (ďalej SQL). SQL sú najvýraznejšie štruktúry MCS formované z viacerých samostatných konvektívnych buniek, ktoré majú na poli rádiolokačnej odrazivosti viac-menej čiarový charakter. Dlho žijúce a rýchlo sa pohybujúce SQL často produkujú škody spôsobené vetrom na veľkej ploche, príležitostne sa v súvislosti s nimi môže vytvoriť aj tornádo (Przybylinski, 1995). V našich zemepisných šírkach sa SQL najčastejšie formujú na studených frontoch a čiarach instability pri silnejšom výškovom prúdení (Matiašová, 2010).

MCS sa vyskytujú v tropických oblastiach, ale aj v miernom klimatickom pásme (Řezáčová a kol., 2007). Môžu byť aktívne aj niekoľko hodín, pričom ich dĺžka života závisí od schopnosti regenerácie konvektívnych buniek. MCS niekedy môžu prerásť až na mezoškálové konvektívne komplexy (ďalej MCC), ktoré na základe družicových pozorovaní zadefinoval Maddox (1980). MCC sú špeciálnou a pravdepodobne najintenzívnejšou formou MCS. Stredná dĺžka života MCC je okolo 15 hodín, pričom v niektorých prípadoch môžu existovať aj niekoľko dní (Řezáčová a kol., 2007).

V štádiu rozpadu MCS sa nové konvektívne bunky neformujú a v systéme prevažuje počet zanikajúcich konvektívnych buniek nad počtom buniek v štádiu zrelosti. Systém je nakoniec tvorený len stratiformnými zrážkami s vrstevnatou oblačnosťou, ktorá pochádza zo zanikajúcich konvektívnych buniek (Řezáčová a kol., 2007).

Bow Echo

Bow echo⁴ je črta na poli rádiolokačnej odrazivosti, ktorú možno charakterizovať ako úzky pás, niekedy aj viac ako 100 km dlhý, prehnutý do oblúkového tvaru, v smere postupu konvektívneho útvaru (Matiašová, 2010).

Prvá správa o pozorovaní oblúkovej konvektívnej štruktúry vyskytujúcej sa v rámci SQL bola prezentovaná Nolenom v roku 1959. Ten ju po anglicky nazval "line echo wave pattern" (Nolen, 1959). Išlo o líniovú vlnitú štruktúru, v ktorej jedna časť sa pohybovala rýchlejšie ako susediaca časť. Termín "bow echo" však zaviedol až Fujita (1978), ktorý zistil, že výskyt downburstov súvisí s usporiadaním konvektívnych útvarov do tvaru oblúka. Navrhol kinematiku a konceptuálny model jeho vývoja, ktorý je platný dodnes.

Bow echo sa môže generovať zo samostatnej mohutnej konvektívnej bunky alebo deformáciou SQL. Od toho závisia aj rozmery bow echa, ktoré sa pohybujú rádovo od desiatok do stoviek km. Deformácia útvaru do oblúka vzniká interakciou vertikálneho strihu vetra v prostredí s vertikálnymi pohybmi vzduchu v blízkosti

³ Pre lineárne usporiadanie konvektívnych buniek v MCS (tzv. squall lines) sa používa slovenský ekvivalent čiara húľav

⁴ Na Slovensku sa používa ekvivalent oblúkové echo, podľa tvaru oblúka na poli rádiolokačnej odrazivosti

čela konvektívnej línie čiarových MSC. Vývoj vírov na koncoch konvektívnej línie systému v silnom strihovom prostredí je spôsobený ohýbaním západného strihu vetra v bunkách na koncoch bow echa, kde dochádza ku generovaniu vorticity (Weisman, 1993). Na južne orientovanej strane oblúka vzniká anticyklonálna vorticita a na severnej strane cyklonálna vorticita. Cyklonálna vorticita je u rozsiahlejších oblúkových štruktúr (bow echo) podporovaná ešte Coriolisovou silou (Matiašová, 2010).

Bow echo nad západným Slovenskom dňa 10.8.2017

Dňa 10.8.2017 sa nad strednou Európou vlnil studený front. Podľa výstupu aerologického merania z Budapešti sa v oblasti nachádzala v popoludňajších hodinách pomerne vysoká energia instability (CAPE) a tiež priaznivý strih vetra. Kým v prízemnej vrstve troposféry fúkal v oblasti juhovýchodný vietor, v strednej troposfére bolo prúdenie juhozápadné (obr. 12). Boli tak vhodné podmienky pre vznik organizovaných konvektívnych útvarov väčších rozmerov (napr. MCS). V súvislosti so spomínaným studeným frontom vznikali juhozápadne až západne od nášho územia už v priebehu dňa rozsiahle búrkové systémy, ktoré boli jasne identifikovateľné z družice. Jeden z nich priniesol ešte v denných hodinách silný vietor do severného Talianska. MCS nad severným Talianskom sa pri svojom postupe ďalej na severovýchod rozpadával a inicioval vznik ďalšieho konvektívneho systému nad Slovinskom. Konvektívny systém, ktorý vznikol nad Slovinskom, postupoval ďalej na severovýchod a v podvečerných hodinách zasiahol východné Rakúsko a severozápadné Maďarsko. Synoptické stanice na rakúsko-maďarskom pohraničí hlásili v neskorých večerných hodinách prudký až búrlivý vietor (obr. 13), pričom vietor presiahol v nárazoch rýchlosť 100 km/h.

V neskorých večerných hodinách postúpil lineárny búrkový systém s radarovou štruktúrou bow echo nad juhozápadné Slovensko. Počas svojho postupu ďalej na sever až severovýchod cez územie západného Slovenska a Moravy nebolo na poli rádiolokačnej odrazivosti zreteľné, že by výrazne zoslabol (obr. 14). Výskyt bow echa je typicky sprevádzaný silným vetrom. Silné prúdenie sme v čase, keď už systém postupoval cez juhozápad Slovenska identifikovali aj na poli dopplerovskej rýchlosti. Radiálna rýchlosť častíc pohybujúcich sa k radaru (modrá farba) a od radaru (červená farba) dosiahla ojedinele 100 km/h (obr. 15). S využitým produktu vertikálny profil vetra sme vietor s rýchlosť ou viac ako 100 km/h identifikovali ešte aj vo výške 1,5 km nad zemským povrchom. Rýchlosť vetra, približne 90 km/h, sa v mieste nad radarom na Malom Javorníku vyskytovala až do výšky zhruba 3,5 km nad povrchom (obr. 16).

Z meraní z pozemných staníc bola podľa Beaufortovej stupnice sily vetra na Malom Javorníku zaznamenaná silná víchrica. Na danej stanici priemerná rýchlosť vetra počas 2 minút bola na úrovni 24,5 m/s (88,2 km/h). Maximálny náraz vetra s hodnotou 36 m/s (129,6 km/h) tu bol zaznamenaný o 20:11 h a 20:12 h UTC (obr. 17, hore). Na stanici Bratislava-letisko bola zaznamenaná víchrica, priemerná rýchlosť vetra počas 2 minút bola na úrovni 23,5 m/s (84,6 km/h), maximálny náraz mal hodnotu 27,9 m/s (100,4 km/h).

Vysoké nárazy vetra, okrem vyššie spomínaných, sa vyskytli aj na týchto staniciach:

- Jaslovské Bohunice 104 km/h (obr. 17, dole),
- Bratislava Koliba 99 km/h,
- Piešťany 98 km/h,
- Kuchyňa 93 km/h,
- Moravský Sv. Ján 92 km/h,
- Slovenský Grob 83 km/h.

Silný vietor spôsobil škody na majetku predovšetkým na juhozápade Slovenska. Išlo väčšinou o popadané stromy alebo strhnuté strechy (obr. 18). Na čele postupujúceho konvektívneho systému sa vytvoril

oblak Arcus (typ shelf cloud), ktorý je typicky spojený s oblakom druhu Cumulonimbus. Neďaleko slovenskorakúskych hraníc sa ho podarilo odfotiť Martinovi Kováčovi. Na fotografii si môžeme všimnúť prach v prízemnej vrstve ovzdušia, ktorý zvíril silný vietor (obr. 19).



Obr. 12: Výstup z aerologického merania z Budapešti zo dňa 10.8.2017 o 12:00 UTC.



Obr. 13: Údaje o počasí na jednotlivých synoptických staniciach v oblasti slovensko-rakúsko-maďarských hraníc dňa 10.8.2017 o 20:00 UTC.



Obr. 14: Séria snímok zobrazujúca postupujúci mezoškálový konvektívny systém na čele ktorého sa dňa 10.8.2017 vo večerných hodinách vytvorila výrazná konvektívna línia usporiadaná do tvaru oblúka – bow echo. Čierna šípka zobrazuje smer postupu MCS [Kompozit z viacerých radarov (CAPPI 2 km)].



Obr. 15: Črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo) a dopplerovskej rýchlosti (vpravo). Mezoškálový konvektívny systém a formujúce sa bow echo na slovensko-rakúsko-maďarských hraniciach dňa 10.8.2017 o 21:00 UTC [radar Malý Javorník (CAPPI 2 km; MPPI (V) - elevácia 0.00°)].



Obr. 16: Vertikálny profil vetra dňa 10.8.2017 vo večerných hodinách získaný z meraní radaru na Malom Javorníku.



Obr. 17: Priebeh nárazov vetra dňa 10..8.2017, grafický výstup z klimatologickej automatickej stanice SHMÚ Malý Javorník (hore) a Jaslovské Bohunice (dole).



Obr. 18: Škody spôsobené vetrom, súvisiacim s bow echom dňa 10.8.2017, na viacerých miestach juhozápadného Slovenska (zdroj/lokalita: A.) Martin Bartal, Brodské; B.) Pavol Brenner, Malacky; C.) ludiapremalacky.sk, Malacky; D.) TASR, Bratislava-Rača; E.) pravda.sk, Bratislava - hlavná stanica; F.) TASR, Bratislava-Rača).



Obr. 19: Oblak Arcus (typ shelf cloud) odfotený neďaleko slovensko-rakúskych hraníc v čase keď už bola na poli radarových odrazivostí pozorovaná črta v tvare oblúka, tzv. bow echo (autor fotografie: Martin Kováč).

Downburst

Termín "Downburst" prvýkrát predstavil Fujita (1976) a Fujita a Byers (1977). Bol definovaný ako silný zostupný prúd vzduchu, ktorý indikuje ničivý vietor na alebo blízko zemského povrchu (Fujita, 1976). Je charakteristický silne divergentným prúdením v prízemných hladinách s maximom divergencie v strede prúdu, odkiaľ sa silný nárazový vietor šíri viac-menej symetricky ako silná forma gust frontu⁵ (Řezáčová a kol., 2007). Konceptuálny model downburstu navrhol Fujita (1985) a na základe horizontálnych rozmerov rozdelil downburst na microburst a macroburst. Macroburst je downburst veľkej mierky s horizontálnym priemerom presahujúcim 4 km, pričom doba trvania silného nárazového vetra s ničivými účinkami v prízemných hladinách je od 5 do 30 minút a rýchlosť vetra môže dosiahnuť až 60 m.s⁻¹ (Fujita, 1985). Macrobursty sa vyskytujú väčšinou v spojení s mezoškálovými konvektívnymi systémami (Matiašová, 2010).

Microburst je downburst malej mierky s horizontálnym priemerom presahujúcim 4 km, dĺžka trvania silného nárazového vetra s ničivými účinkami spravidla býva 2 až 15 minút a rýchlosť vetra môže dosiahnuť niekoľko desiatok m. s⁻¹, v Severnej Amerike zaznamenali rýchlosť vetra až 75 m. s⁻¹ (Fujita, 1985).

V strednej Európe sú plošne rozsiahle downbursty spojené s organizovanými konvektívnymi systémami, s tzv. squall lines (Matiašová, 2010) a typicky sú s nimi spojené rozsiahle škody spôsobené vetrom.

Downburst v Bratislave a okolí dňa 6.6.2017

Na začiatku júna v roku 2017 sme v Bratislave a okolí zaznamenali nárazy vetra, ktoré súviseli s búrkou rýchlo sa presúvajúcou cez juhozápadnú časť Slovenska ďalej na severovýchod. Búrku inicioval studený front spojený s tlakovou nížou nad Britskými ostrovmi a Severným morom, ktorý sa presúval cez strednú Európu ďalej na východ.

Na základe analýzy snímok poľa dopplerovskej rýchlosti sme v oblasti len neďaleko radaru Malý Javorník identifikovali prejavy divergentného prúdenia. To znamená, že medzi časticami s radiálnym pohybom od radaru (kladné hodnoty - červená farba) a k radaru (záporné hodnoty - modrá farba) sa nachádzal pás nulových rýchlostí častíc kolmý na lúč vysielaný z radaru Malý Javorník (obr. 20). Detailnejšie porovnanie rozdielov medzi divergentným prúdením generovaným downburstom a cyklonálnou rotáciou mezocyklóny v supercele ponúkame na obrázku č. 21.

V súvislosti s downburstom sme najsilnejší náraz vetra zaznamenali na stanici v bratislavskej Mlynskej doline, kde dosiahol vietor rýchlosť až 101 km/h (28 m/s). Vietor spôsobil v oblasti aj škody v podobe vyvrátených stromov. Silný zostupný prúd vzduchu so zrážkami bol približne v čase identifikácie divergentného prúdenia na poli dopplerovskej rýchlosti pozorovaný aj z neďalekého Pezinka (obr. 22).

⁵ Čelo výtoku studeného vzduchu z konvektívneho oblaku



Obr. 20: Radarové črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (vľavo) a dopplerovskej rýchlosti (vpravo) súvisiace s downburstom identifikované neďaleko Bratislavy dňa 6.6.2017 o 18:15 UTC. Čierna šípka na obrázku vľavo naznačuje smer postupu konvektívnej bunky. [radar Malý Javorník (CAPPI 2 km; MPPI (V) - elevácia 0.00°)].



Obr. 21: Črty na poli dopplerovskej rýchlosti, vľavo divergentné prúdenie generované downburstom (príklad zo dňa 6.6.2017), vpravo cyklonálna rotácia prítomná v mezocyklóne supercely (príklad zo dňa 23.6.2017), (fialová šípka znázorňuje pohyb častíc od radaru, modrá k radaru, čierna priamka predstavuje oblasť nulových rýchlostí častíc, sivý kruh naznačuje polohu radaru na Malom Javorníku, sivá šípka smer približnej lokalizácie radaru Kojšovská hoľa)[radar Malý Javorník (MPPI (V) - elevácia 0.00°), radar Kojšovská hoľa (MPPI (V) - elevácia 2.00°].



Obr. 22: Silný zostupný prúd vzduchu z konvektívneho oblaku v sprievode zrážok odfotený z Pezinka dňa 6.6.2017 (fotku vľavo poslala Denisa Vaclavová Vavreková). Škody spôsobené downburstom odfotené 6.6.2017 v bratislavskej Mlynskej doline (fotku vpravo poskytol Miroslav Šinger).

DISKUSIA A ZÁVER

Prvé búrky v roku 2017 boli na našom území zaznamenané prostredníctvom siete na detekciu bleskov (LINET) ešte 17. marca. Potvrdené boli aj meraniami zo synoptických staníc SHMÚ a vyskytli sa na krajnom juhozápade Slovenska. Hlavná búrková sezóna však začala až v prvej aprílovej pentáde (1. – 5.IX), kedy bol na našom území prvýkrát pozorovaný plošne rozsiahlejší výskyt búrok, a trvala zhruba 5 mesiacov. Za jej koniec môžeme označiť prelom augusta a septembra, a to aj napriek tomu že búrky sa ojedinele vyskytli ešte aj v priebehu septembra.

Najvýraznejším rysom búrkovej sezóny 2017 bol veľký počet prípadov, kedy bola na Slovensku identifikovaná supercela. Celkovo sme zaznamenali 21 dní so supercelou aspoň niekde na Slovensku, pričom individuálnych prípadov (superciel) bolo spolu až približne 150.

Zatiaľ neexistuje dostatok literatúry, ktoré by sa venovali klimatologickému spracovaniu superciel z územia Slovenska. Napríklad Šinger (2013) spracoval na základe dát rádiolokačnej odrazivosti rádiolokátorov SHMÚ výskyt superciel na území Slovenska v období rokov 2000 – 2012. Na poli rádiolokačnej odrazivosti identifikoval na území Slovenska spolu 101 buniek vykazujúcich supercelárne črty a ich výskyt bol rozdelený do 40-tich dní.

V závere práce konštatuje, že na vyhotovenie kvalitnej klimatografie superciel na Slovensku spomínané 13 - ročné obdobie nestačilo. Aj napriek tomu, opierajúc sa aj o štatistiku z vyššie spomínanej práce (Šinger, 2013), možno povedať, že počet dní so supercelou na území Slovenska bol v roku 2017 nadpriemerný. Supercela, analyzovaná v tomto príspevku, mala typické črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (obr. 2 a 3), ale čo je dôležitejšie, aj na poli dopplerovskej rýchlosti (obr. 4).

Ďalším analyzovaným prípadom bolo bow echo, ktoré 10.8.2017 zasiahlo západné Slovensko (obr. 14). V tejto súvislosti boli na veľkej ploche spomínaného územia zaznamenané materiálne škody spôsobené vetrom. Situácia priniesla veľký ohlas v médiách, medzi laickou verejnosťou a aj v odborných kruhoch. Hlavne kvôli plošnému rozsahu škôd, ktoré zo sebou bow echo prináša, je možné práve tento konvektívny jav často považovať za nebezpečnejší ako je vyššie spomínaná supercela. Problematika prognózy bow echa vyplýva

hlavne z nelinearity jeho vývoja, kvôli čomu sa jeho predpovedanie obmedzuje takmer výlučne len na nowcasting. Pri vydávaní výstrah na dlhšie obdobie je dôležité sledovať najmä hodnotu vertikálneho strihu vetra v danej oblasti, pri ktorej sa vyskytujú konvektívne štruktúry, s ktorými je bow echo najčastejšie spojené (MCS - squall lines).

Posledným analyzovaným prípadom bol downburst, ktorý sa vyskytol v Bratislave a okolí na začiatku júna 2017. Downburst je definovaný ako silný zostupný prúd vzduchu, ktorý pri dotyku zo zemským povrchom vyvolá divergentné prúdenie s ničivými následkami (Fujita, 1976). Podstatná teda nie je ani tak nameraná rýchlosť vetra, ale spôsobené škody. V každom konvektívnom oblaku sa vyskytujú tak výstupné ako aj zostupné prúdy vzduchu. Zostupný prúd identifikujeme ľahšie ako výstupný, a to kvôli tomu, že okrem vzduchu vypadávajú z oblaku často aj zrážky. Výrazný zostupný prúd vzduchu spolu so zrážkami odfotili aj obyvatelia Bratislavy a okolia dňa 6.6.2017 vo večerných hodinách (obr. 22, vľavo). Na klimatologickej stanici v bratislavskej Mlynskej doline bol približne v tom čase nameraný náraz vetra cez 100 km/h a v oblasti boli spôsobené aj škody vetrom (obr. 22, vpravo). Tento prípad však nebol vybraný kvôli rozsiahlosti škôd alebo sile nameraného vetra, ale predovšetkým z toho dôvodu, že sa nám na poli dopplerovskej rýchlosti podarilo namerať známky divergentného prúdenia (obr. 20). V praxi je dôležité vedieť na poli dopplerovskej rýchlosti rozlíšiť známky divergentného prúdenia od cyklonálnej rotácie. V prvom prípade môže divergentné prúdenie vyvolať downburst, v prípade druhom mezocyklóna supercely (obr. 21).

Cieľom príspevku bolo na niekoľkých prípadoch z roku 2017 poukázať na možnosti detekcie nebezpečných konvektívnych javov s využitím niekoľkých základných produktov rádiolokačnej odrazivosti, ktoré sú v súčasnosti využívané na Odbore Meteorologických predpovedí a výstrah SHMÚ. Okrem základného produktu akým je napríklad CAPPI 2 km, ktorý je na webovej stránke SHMÚ k dispozícii aj pre laickú verejnosť, prezentujeme v príspevku aj ďalšie dôležité produkty, ktoré slúžia na detailnejšiu analýzu a identifikáciu nebezpečných štruktúr. Čitateľ by mal okrem hrubých teoretických vedomosti z danej problematiky získať aj potrebný prehľad o rádiolokačných produktoch, ktorý môže neskôr sám využiť v praxi, a to nielen pri analýze, ale aj pri nowcastingu konvektívnych javov.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICIKÝCH ODKAZOV

BROOKS, H. E., 2009: Proximity soundings for Europe and the United States from reanalysis data. Atmos. Res., 93, 546-553.

BROWNING, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Sci., 21, 634–639.

BURGESS, D. W., L. R: LEMON. 1990. Severe thunderstorm detection by radar. Radar in Meteorology, D. Atlas, Ed. Amer. Meteor. Soc., 619-647.

BYERS, H. R. and BRAHAM, R. R. 1949. The Thunderstorm. U. S. Government print. Office. 287 pp.

CALETKA, M. 2013. Identifikace konvektivních a stratiformních srážek na základě údajů dálkové detekce. [Diplomová práca] Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita. Brno, 2013. 97 s. DOSWELL, C. A. III, 1991. A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms. *Nat. Wea. Dig.*, 16 (1), 2-16.

FUJITA, T. T. 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of a J.F. Kennedy Airport runway. SMRP Res. Paper 137, Unniv. Of Chicago, 51 pp.

FUJITA, T. T., H. R. BYERS. 1977. Spearhead echo and downburst in the crash og an airliner. Mon. Wes. Rev., 105, 129-146.

FUJITA, T. T. 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 42 pp.

FUJITA, T. T. 1985. The downburst – microburst and macroburst. Report of Projects NIMROD and JAWS. SMRP, University of Chicago, 1985, 122 s.

HOUZE, R. 1993. Cloud Dynamics. International Geophysics Series, 53, Academic Press, 1993 JURAŠEK, M., KAŇÁK, J., KOTLÁRIKOVÁ, D. 2009. História družicových meteorologických pozorovaní v Slovenskom hydrometeorologickom ústave. s. 208-211.

KESSLER, E. 1986. ed.: *Thunderstorm morphology and Dynamics*. 2. Vydanie, Norman: Univ. Oklahoma Press., 1986, 411 s.

KLEMP, J. B., 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. Ann. Rev. Fluid Mech., 19, 369-402.

LEMON, L. R., 1980: Severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech Memo. NWS NSS FC-1, 60 pp. [NTIS PB273049].

MADDOX, R. A. 1980. Mesoscale convective complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 1980, s. 1374-1387.

MOLLER, A. R., C. A. DOSWELL III, M. P. FOSTER, G. R. WOODALL, 1994: The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea. Forecasting*, 9, 327–347.

MATIAŠOVÁ, M. 2010. Downbursty na Slovensku. [Diplomová práca]. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. 103 s.

NOLEN, R. H. 1959. A radar pattern associated with tornadoes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 40, 277-279.

PRZYBYLINSKI, R. W. 1995. The Bow Echo: Observations, Numerical Simulations, and Severe Weather Detection Methods. National Weather Service Forecast Office/NOAA, St. Loius, Missouri. s. 203-217.

ROTUNNO, R., KLEMP, J. B., WEISMAN, M. L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines. J. Atmos. Sci. 45, 1988, s. 463-485.

ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK P., KAŠPAR M., SETVÁK M. 2007. Fyzika oblaků a srážek. Academia Praha. 574 s. ISBN 978-80-200-1505-1.

SELEX ES. 2015. Software Manual Rainbow®5. Products and Algorithms. Release 5.43.0. 2015. 479 s.

ŠINGER, M. 2013. Supercely v strednej Európe. Základné črty superciel namerané rádiolokátormi SHMÚ. [Diplomová práca]. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. 149 s.

THOMPSON, R. L., R. EDWARDS, J. A. HART, K. L. ELMORE, A. P. MARKOWSKI. 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. Wea. Forecasting, 18, 1243-1261.

WEISMAN, M. L., KLEMP J. B. 1982. The dependence of numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. *Mon. Wea. Rev.* 110, 1982, s. 504-520.

WEISMAN, M. 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes, 1993, J. Atmos. Sci., 50, 1993.