

PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA MEZOCYKLONÁLNEHO TORNÁDA V GEMERSKEJ VSI

MIROSLAV ŠINGER

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava
Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

An F1 tornado occurred on 5 October 2020 in the village of Gemerská Ves. Due to the large number of observations from local residents, media and civil protection, it was possible to describe the development of events. The tornado caused damage in a quite small area. The radar confirmed the association of the tornado with the supercell's mesocyclone. It formed on the convergence line in the environment of moderate instability and strong vertical wind shear. It formed in moderate instability in strongly vertical wind shear environment on the convergence line. Vertical wind shear in the lower troposphere was also affected by local orography, which could be another factor contributing to the tornadogenesis. The high-resolution NWP model was used for more detailed analysis.

Na juhu stredného Slovenska sa v obci Gemerská Ves vyskytlo 5. októbra 2020 tornádo F1. Vďaka veľkému množstvu záznamov od miestnych obyvateľov, médií, ako aj štátnych zložiek, bolo možné dostatočne presne popísať vývoj udalosti. Tornádo spôsobilo málo rozsiahle škody. Rádiolokátorom bol potvrdený súvis tornáda s mezocyklónou supercely. Sformovalo sa pri miernej instabilite v prostredí so silným vertikálnym strihom vetra na čiare konvergencie. Vertikálny strih vetra bol v dolnej troposfére ovplyvnený aj miestnou orografiou, čo mohol byť ďalší z faktorov podporujúci tornádogenezu. Pre podrobnejšiu analýzu sme využili numerický model ALADIN s vysokým rozlíšením.

Key words: tornado, supercell, vertical wind shear, orography, convergence line, high-resolution NWP modelling

ÚVOD

Tornádo je lokálny, krátkotrvajúci, a na Slovensku aj mimoriadne zriedkavý jav. Doposiaľ existuje len niekoľko zdokumentovaných prípadov z územia Slovenska. Pred októbrom 2020 sa naposledy vyskytlo 3. 10. 2018 v obci Lekárovce s intenzitou F1 (Šinger, 2018). V tomto prípade bol vôbec prvý raz na Slovensku potvrdený súvis tornáda s mezocyklónou supercely. V oblasti došlo k lokálnemu zvýšeniu vertikálneho strihu vetra a helicity predovšetkým v spodných hladinách troposféry, čo mohlo byť dôsledkom práve interakcie miestnej orografie s prúdením (Šinger a Púčík, 2020).

Takmer presne po dvoch rokoch sa situácia s mezocyklonálnym tornádom na Slovensku zopakovala. 5. októbra 2020 bolo krátko po 14:00 UTC pozorované tornádo v obci Gemerská Ves, kde spôsobilo lokálne škody na majetkoch a porastoch. Škody však boli rozsahom menšie v porovnaní s tornádom v Lekárovciach, pretože zasiahnutá obývaná časť bola podstatne menšia. K zraneniam obyvateľov nedošlo.

Podmienky, ktoré viedli k vzniku mezocyklonálneho tornáda, boli vzhľadom na ročnú dobu mimoriadne, pričom boli zvýraznené aj vplyvom orografie. Podmienkam je venovaná prvá časť článku, druhá popisuje vývoj a spôsobené škody.

V analyzovaný deň sme nad územím Slovenska a v okolí zaznamenali oblasti s ešte vyššou instabilitou ako na Gemeri a súčasne aj so silným vertikálnym strihom vetra. To viedlo k nebezpečným konvektívnym javom aj inde ako na Gemeri. Približne v čase výskytu tornáda v Gemerskej Vsi vzniklo na Zemplíne niekoľko silných superce-

lárnych búrok. Jedna z nich v obci Jasenovce priniesla mimoriadne veľké krúpy s priemerom až 7 cm (Šinger, 2020). Výskyt takto veľkých krúp je na Slovensku v jesennom období veľmi vzácny, ich početnosť je dokonca nižšia ako výskyt tornád, keďže v chladnom polroku sa vyskytli vôbec prvý raz za posledných 14 rokov (Šinger a Dlhóš, 2019), no tornáda sú začiatkom októbra známe už dve.

METODIKA

Pri analýze podmienok sme vychádzali zo staničnej siete profesionálnych staníc a rádiolokátorov SHMÚ (Slovenský hydrometeorologický ústav) Španí laz v nadmorskej výške 619 m n.m. (SL) a Kojšovská hoľa v nadmorskej výške 1240 m n.m. (KH), využili sme aj aerologickú sondáž Budapešť. Merania zo staničnej siete sme vyhodnocovali jednotlivo, aj hromadne prostredníctvom analýz INCA (Haiden a kol., 2011).

Na dokumentáciu tornáda sme využili fotografie a videá z médií, od náhodných pozorovateľov a snímky z viacerých dronov (Ministerstvo vnútra SR, noviny.sk, rimava.sk).

Pri ďalšej analýze sme využívali numerické modely systému ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement InterNational) SHMÚ. Pre popis situácie na synoptickej škále sme používali operatívne dostupný hydrostatický model (Termonia a kol., 2018; Derková a kol., 2017) s horizontálnym rozlíšením 4,5 km (v článku ozn. ALA4). Pre menšiu škálu sme využili experimentálny nehydrostatický model s horizontálnym rozlíšením 1 km (ALA1) nastavený podľa Brožková a kol. (2019). Ďalšie podrobnosti uvádzame v Tab. 1, domény výpočtu modelov sú na Obr. 1.

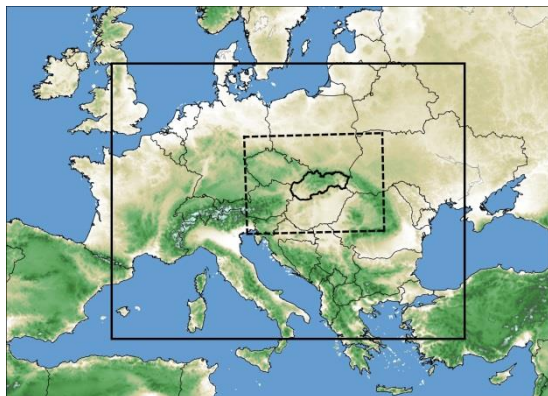
Tabuľka 1.
Popis numerických
predpovedných modelov
systému ALADIN, SHMÚ.

Table 1.
Description of numerical
weather prediction models,
ALADIN, SHMÚ.

Popis	Operatívny model (ALA4)	Experimentálny model (ALA1)
Horizontálne rozlíšenie	4.5 km	1 km
Počet gridových bodov	625 x 576	1000 x 720
Spektrálne rozlíšenie	312 x 278 (linear truncation)	499 x 359 (linear truncation)
Počet ver. hladín	63	73
Dynamika	Hydrostatická	Nehydrostatická
Fyzika	ALARO-1vB	ALARO-1vB
Mikrofyzika	Lopez (2002)	Lopez (2002)
Hlboká konvekcia	3MT (Gerard, 2009)	3MT (Gerard, 2009)
Časový krok	180 s	50 s
Coupling model	ARPEGE	ALA4
Coupling frequency	3 h	1 h
Asimilácia	Upper-air spectral blending s CANARI a asimilácia povrchu	Dynamical downscaling
Beh modelu	5.10.2020, 06:00 UTC	5.10.2020, 06:00 UTC
Dĺžka predpovede	72 h	12 h

Obrázok 1. Domény modelov ALADIN: operatívny
s horizontálnym rozlíšením 4,5 km (čierny obdĺžnik,
ALA4), experimentálny s horizontálnym rozlíšením
1 km (čierny prerušovaný obdĺžnik (ALA1).

Figure 1. Model domains, ALADIN: operational ALA4
(black rectangle), experimental ALA1 (black dashed
rectangle).



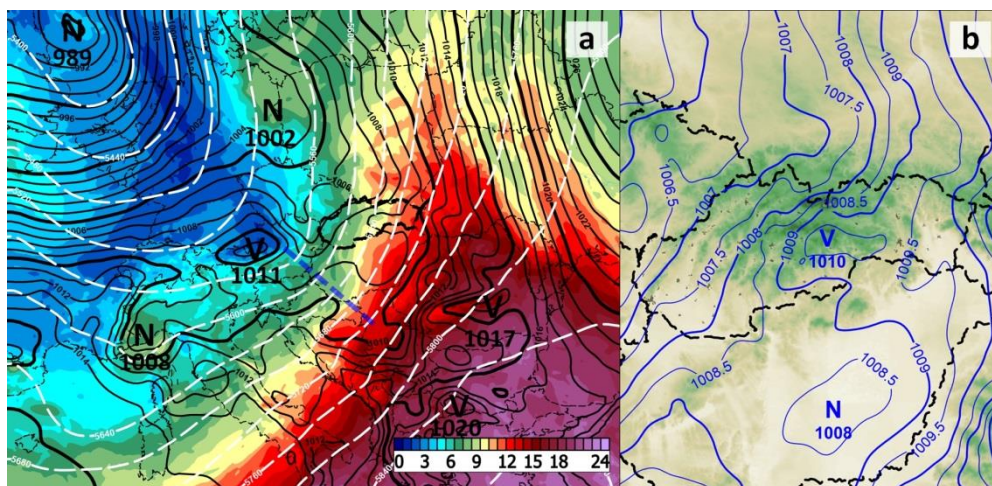
ANALÝZA SITUÁCIE 5. 10. 2020

Cez Slovensko nad Karpaty, západnú Ukrajinu a Pobaltie prešiel 4. októbra 2020 od juhozápadu studený front spojený s rozsiahlou tlakovou nížou so stredom nad Anglickom. V oblasti sa udržiaval aj 5. októbra a územie Slovenska sa súčasne stále nachádzalo na prednej strane tejto rozsiahlej tlakovej níže. Zároveň popoludní prechádzala ponad Panónsku panvu a Karpaty ďalej na sever výšková brázda zasahujúca do oblasti od severozápadu, na ktorej prednej strane sa vlnil studený front (Obr. 2).

V priebehu dňa postupne zosilnelo južné prúdenie a v Banskobystrickom kraji a na východe Slovenska sme v spodných hladinách troposféry zaznamenali veľmi silnú advekciu vlhkého vzduchu. Teplota rosného bodu stúpala z ranných 7–12 °C na popoludňajších 14–20 °C (Obr. 3 a 4). S advekciou vlhkého vzduchu popoludní vzrástla aj instabilita. CAPE (Convective Available Potential Energy) dosahovala hodnoty 500 až 1200 J·kg⁻¹, na Zemplíne lokálne až okolo 2000 J·kg⁻¹ (Obr. 5). Neskôr popoludní sa vzduch od juhozápadu opäť vysušoval, najvýraznejšie práve na Gemeri, kadiaľ súčasne prešlo aj rozhranie identifikované v prúde (Obr. 3 a 4).

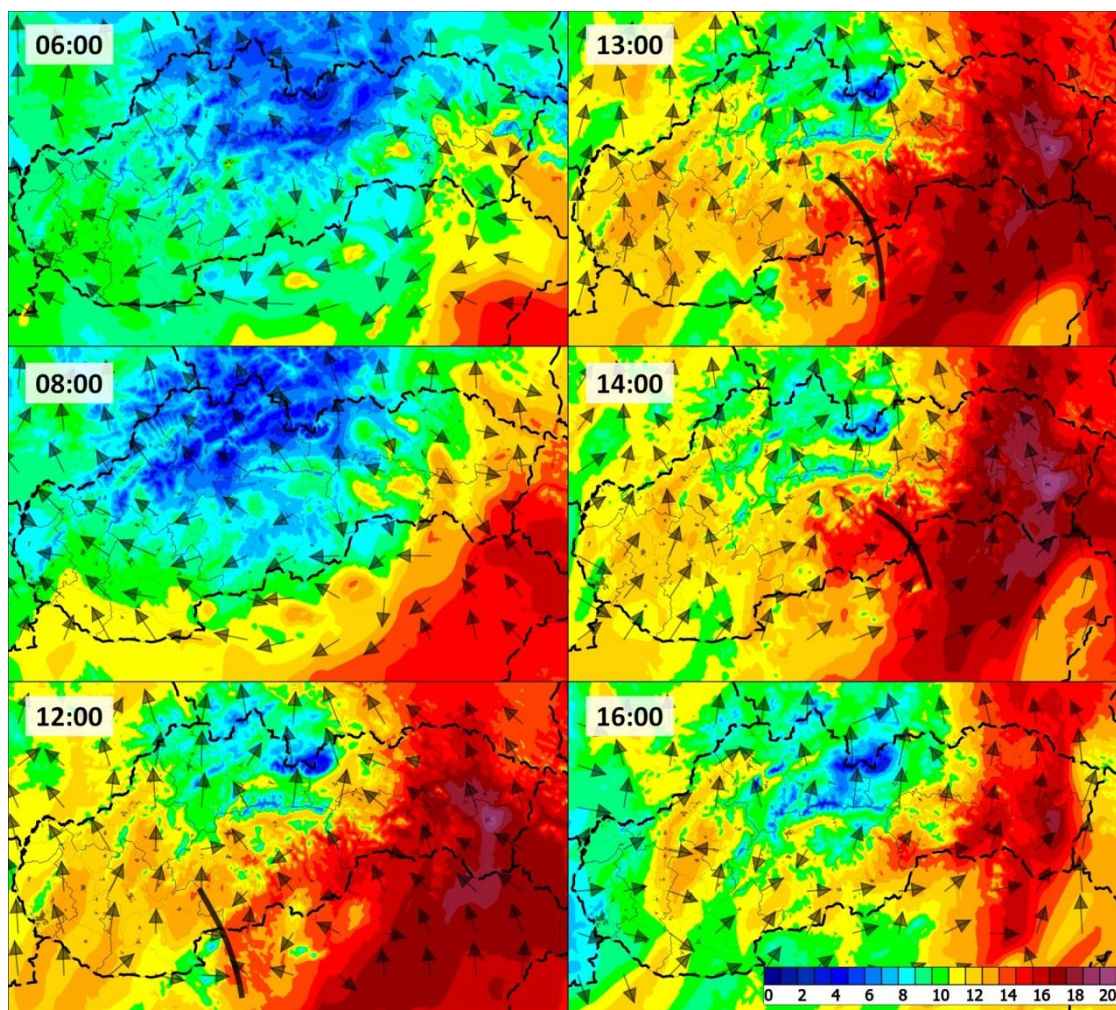
Obrázok 2. (a) Tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (čiernie izobary, krok 1 hPa), geopotenciálna výška hladiny 500 hPa
(biele prerušované izočary, krok 40 gpm), teplota v hladine 850 hPa (farebná škála, °C), ALA4, 5.10.2020, beh 06:00 UTC,
predpoveď 12:00 UTC, zvýraznená os brázdy v 500 hPa (modrá prerušovaná čiara), (b) tlak vzduchu prepočítaný na hladinu
mora (krok 0,5 hPa), ALA1, 5.10.2020, beh 06:00 UTC, predpoveď 12:00 UTC.

Figure 2.(a) Mean sea-level pressure (black isolines, step 1 hPa) and geopotential height of 500 hPa (white dashed isolines, step
40 gpm), temperature at 850 hPa (colour scale, °C), ALA4, 5.10.2020, run 06:00 UTC, forecast 12:00 UTC, trough axis 500 hPa
highlighted by blue dashed line, (b) Mean sea-level pressure (step 0.5 hPa), ALA1, 5.10.2020, run 06:00 UTC, forecast 12:00 UTC.



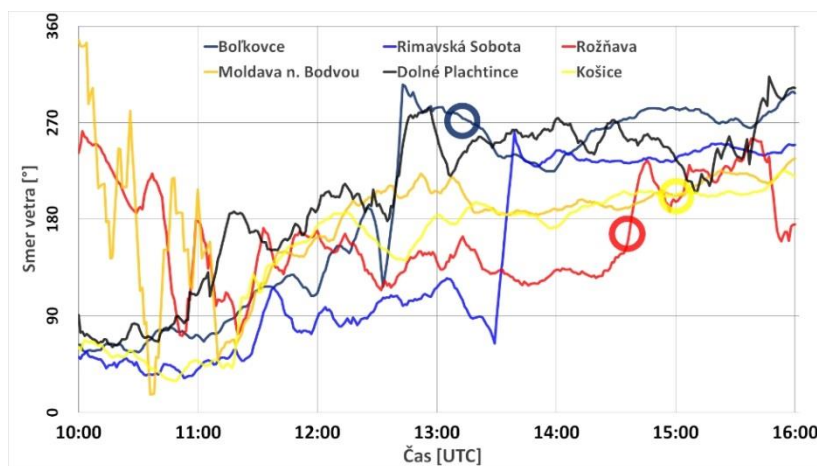
Obrázok 3. Teplota rosného bodu vo výške 2 m nad povrchom (farebná škála, °C), vietor vo výške 10 m (šípky), INCA, 5.10.2020, čas v obrázku uvedený v UTC. Advekcia vlhkého vzduchu od juhovýchodu (06–12:00 UTC), postup čiary konvergenzie na východ až severovýchod cez Juhoslovenskú kotlinu a okolie (čierna čiara), za ňou pokles vlhkosti (13–16:00 UTC).

Figure 3. Dew-point temperature at 2 m (colour scale, °C), wind at 10 m (arrows), INCA, 5.10.2020, time marked in the figure in UTC. Advection of moist air from the southeast (06–12:00 UTC), progress of the convergence line through Juhoslovenská basin to east-northeast (black line), drop of moisture behind the line (13–16:00 UTC).



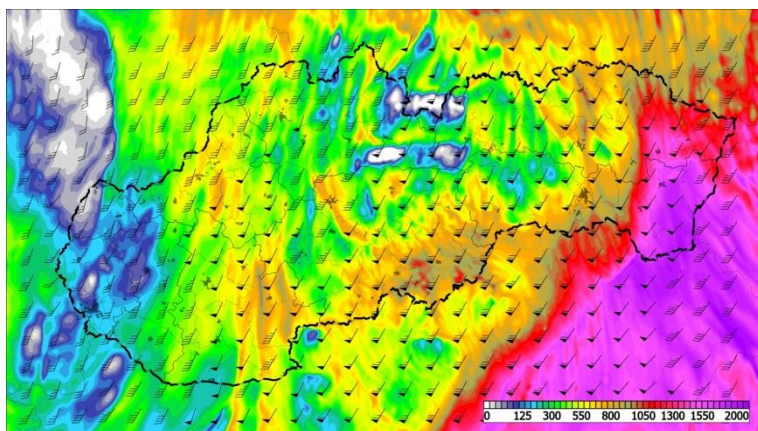
Obrázok 4. Časový vývoj smeru vetra (farebné čiary). Zmena smeru vetra po prechode rozhrania (Obr. 3) identifikovaná na staniciach Dolné Plachtince a Boľkovce (po 12:30 UTC), Rimavská Sobota (13:30 UTC) a Rožňava (po 14:30 UTC), stanice Moldava n. Bodvou a Košice zmenu smeru vetra nezaznamenali, začiatok vzostupu tlaku vzduchu vyznačený krúžkami.

Figure 4.
The change in wind direction after crossing the convergence line (Fig. 3) identified at stations Dolné Plachtince and Boľkovce (after 12:30 UTC), Rimavská Sobota (13:30 UTC) and Rožňava (after 14:30 UTC), stations Moldava n. Bodvou and Košice did not notice a change in wind direction. The beginning of the increase of air pressure (rings) marked by rings.



Obrázok 5. Vertikálny strih vetra vo vrstve 500 hPa – 10 m nad povrchom (symboly vetra) a CAPE (farebná škála, $J \cdot kg^{-1}$), ALA1, 5.10.2020, beh 06:00 UTC, predpoveď na 12:00 UTC.

Figure 5. Deep layer shear (windbarbs) and CAPE (colour scale, $J \cdot kg^{-1}$), ALA1, 5.10.2020, run 06:00 UTC, forecast 12:00 UTC.



Popoludní prechádzala cez Slovensko na sever aj plytká tlaková níž identifikovaná vo východnom Maďarsku (Obr. 2b). Rozhranie v Banskobystrickom kraji s ňou však pravdepodobne nesúviselo, pretože začiatok vzostupu tlaku vzduchu po prechode níže sa na dostupných stanicích v oblasti nezhodoval so systematickou zmenou smeru vetra po prechode rozhrania (Boľkovce), alebo sme žiadnu zmenu smeru vetra nezaznamenali (Košice). Zhodu sme identifikovali len na stanici Rožňava (Obr. 4). Aj časový vývoj vetra v priebehu dňa naznačuje, že vplyv plytkej tlakovej níže na vychýlenie smeru vetra na Gemeri na východný bol zanedbateľný. Už pred približujúcou sa plytkou tlakovou nížou sa vietor na celom území Slovenska stáčil zo severovýchodného až juhovýchodného na južný až juhozápadný vietor (Obr. 3), čo je opačne v porovnaní so štandardnou cirkuláciou v okolí tlakových níží (Bluestein, 1993).

V prostredí prevládal silný vertikálny strih vetra vo vrstve od 10 m nad povrchom do hladiny 500 hPa (ďalej strih), na Gemeri až s mimoriadnymi hodnotami, okolo $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 5). Takéto prostredie umožňuje vznik superciel (Thompson a kol., 2003), pričom sú pravdepodobné aj nebezpečné prejavy počasia ako veľké krúpy a silný nárazový vietor (Púčik a kol., 2015). Najsilnejší strih sme identifikovali v čase pred prechodom výškovej brázd postupujúcej cez Slovensko a okolie na sever, pričom na Gemeri bol podporený aj pretrvávajúcim východným prúdením v spodných hladinách (Obr. 3, 12:00 UTC; Obr. 4). Rozdielny smer vetra v tomto regióne môžeme pripísať aj vplyvu orografie (McCauley a Sturman, 1999; Kljun a kol., 2001; Gaberšek a Durran, 2006), keďže na ostatnom území Slovenska sa vplyvom vývoja tlakového poľa v priebehu dňa vietor v prízemnej vrstve väčšinou zmenil z východného na južný (Obr. 6).

Bica a kol. (2007) uvádzajú, že napr. v Alpách dochádza pri južnom prúdení k vzostupu tlaku vzduchu na ich náveternej strane, pričom v spodných hladinách sa smer vetra stáča až na východný (Obr. 7a). Keďže pohoria na Slovensku sú menej rozsiahle a nižšie ako Alpy, efekt môže

byť nevýraznejší, a preto ho ľahšie identifikujeme prostredníctvom meraní vetra, s využitím numerických modelov aj v tlakovom poli¹. Príklady ďalších dvoch situácií, v ktorých pri južnom až juhozápadnom prúdení došlo k popísanej deformácii tlakového poľa s východným vetrom v Banskobystrickom kraji a následným vznikom superciel, uvádzame na Obr. 7b (Šinger, 2017). Súčasne vplyvom južného prúdenia dochádza v závetrí hôr k poklesu tlaku vzduchu (Buzzi a kol., 2020; McGinley, 1982), čo pri južnom prúdení na Slovensku pozorujeme v južnom Poľsku. Popísané náveterné a záveterné efekty tak vedú k deformáciám tlakového poľa a prúdenia, ktoré sme identifikovali aj v analyzovanej situácii (Obr. 2).

Podľa predpovedaných aerologických sondáží ALA1 popoludní na Gemeri postupne zanikla stabilná vrstva identifikovaná v čase 10:00 UTC v okolí hladiny 900 hPa

(Obr. 8). Tým sa, spolu s advekciou vlhkého vzduchu v spodných hladinách, zlepšili podmienky na vývoj hlbokjej konvekcie. Sondáž z Budapešti potvrdzuje výskyt tejto stabilnej vrstvy aj v čase 12:00 UTC, čo môže naznačovať, že sondáž nebola dostatočne reprezentatívna pre oblasť Gemera. V porovnaní s meraním v Budapešti vidíme rozdiely aj vo vetre v spodných hladinách, ktoré boli dôležité pre vývoj tornáda v Gemerskej Vsi.

Mierny až silný vertikálny strih vetra s hodnotami viac ako $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bol podľa ALA1 aj vo vrstve 0–1 km nad povrchom s čiastočným slabnutím neskôr popoludní. Coffey a Parker (2017) uvádzajú, že pre tornádogenézu je najvhodnejšie, ak je čo najviac helicity vo vrstve najspodnejších 500 m. Z vertikálneho profilu vetra ALA1 vyplýva, že vorticita mala orientáciu aj po smere vtoku vzduchu do bunky. Z toho vyplýva, že helicity bola v prostredí ALA1 prítomná práve kvôli juhovýchodnému vetru v prízemnej vrstve, s miernym popoludňajším poklesom zo 110 na cca $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (Obr. 8). Merania vetra čiastočne potvrdzujú predpovedaný profil ALA1, no vidíme určité rozdiely. Pri povrchu fúkal východný vietor až do času prechodu rozhrania (Obr. 3 a 4), čo mohlo helicitu oproti ALA1 ešte zvýšiť. Hodograj ALA1 tak považujeme za reprezentatívnejší ako sondáž z Budapešti, podľa ktorej v spodných hladinách fúkal juhozápadný vietor, no stále nedostatočne reprezentatívny pre oblasť Gemera, pretože v nej absentuje nameraná východná zložka vetra. Súčasne podľa radaru Špani laz v nadmorskej výške 1 km fúkal juhozápadný až západný vietor $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, čo však mohlo byť ovplyvnené

¹ Využitie staničnej siete meraní je veľmi obtiažne, pretože stanic s meraním tlaku vzduchu je príliš málo na spoľahlivú identifikáciu nevýrazných tlakových útvarov v okolí pohorí. Taktiež sa nachádzajú aj vo vyšších nadmorských výškach, čo ovplyvňuje prepočet na hladinu mora, pričom sme identifikovali aj rozdiel medzi automatickými a stanicami s manuálnym meraním. Výsledná interpretácia takto zostaveného tlakového poľa tak v požadovanom rozlíšení nebola možná.

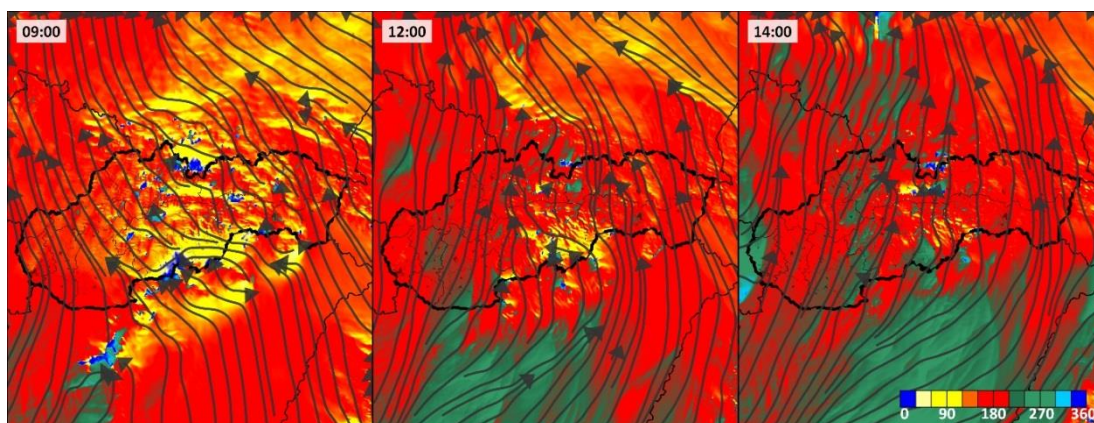
aj zrážkovým pásmom, ktoré sa presúvalo cez západné Slovensko a krajinú západnú časť Banskobystrického kraja ďalej na sever. Pre oblasť výskytu tornáda je v hladine okolo 1 km n. m. skôr reprezentatívnejšie meranie vetra z radaru Kojšovská hoľa. V oblasti KH sa zrážky nevyskytli a v najspodnejšej hladine fúkal celú dobu juho-juhozápadný vietor $15\text{--}17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo v porovnaní s východným vetrom na Gemerí naznačuje možný silný vertikálny strih vetra v najspodnejšom kilometri nad $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vzniku tornáda mohlo pomôcť aj rozhranie postupujúce cez Juhoslovenskú kotlinu. Markowski a kol. (1998) uvádzajú, že čiary konvergencie hrajú významnú úlohu pri

formovaní tornád, vrátane supercelárnych. Okrem konvergencie vlhkosti a podpore výstupných pohybov sú aj ďalším zdrojom vorticity. Čiary konvergencie boli registrované aj v prípade tornáda v Lekárovciach (Šinger, 2018). Podľa meraní vetra (Obr. 4) sme identifikovali, že tornádo v Gemerskej Vsi sa vyskytlo presne na rozhraní postupujúcom cez Juhoslovenskú kotlinu na severovýchod. Rozhranie bolo v oblasti výraznejšie práve vplyvom východnej zložky vetra, ktorá bola pred rozhraním najvýraznejšia na Gemerí, no v Above sme ju nepozorovali vôbec. Tento rozdiel pripisujeme vplyvom orografie, ktorá tak nepriamo mohla ovplyvniť proces tornádogenézy.

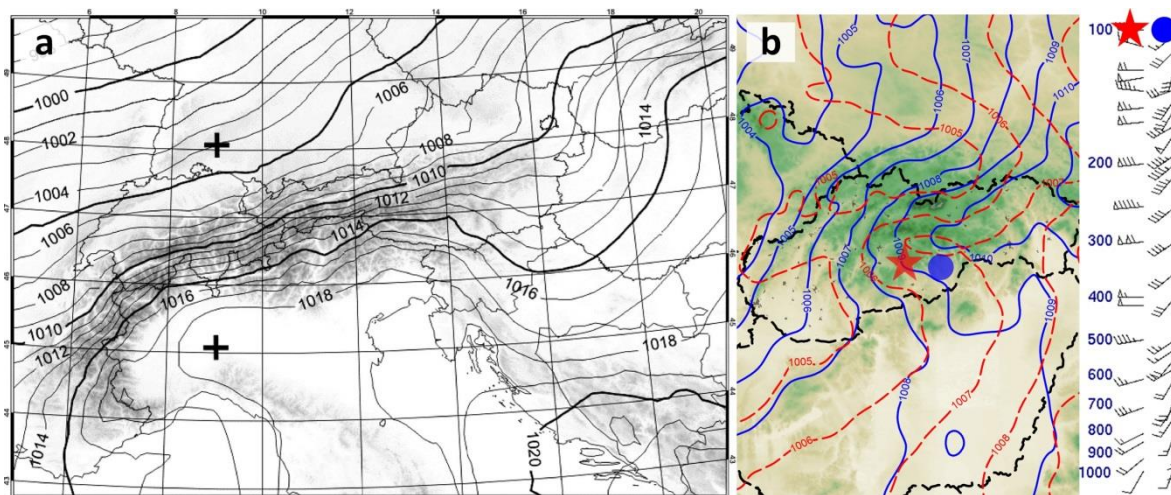
Obrázok 6. Prúdnice vo výške 10 m nad povrchom, farebne zobrazený smer vetra, ALA1, 5.10.2020, beh 06:00 UTC, čas predpovede uvedený v obrázku.

Figure 6. Streamlines at level of 10 m above the surface, wind direction highlighted by colour scale, ALA1, 5.10.2020, run 06:00 UTC, forecast time shown in the figure.



Obrázok 7. (a) Priemer tlaku vzduchu prepočítaného na hladinu mora (hPa), 67 situácií pri južnom prúdení v alpskej oblasti (Bica a kol., 2007), (b) tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (hPa), ALA1, 6.6.2017, beh 06:00 UTC, predpoveď 14:00 UTC (modré izočiary), modrý kruh označuje miesto vzniku supercely a vertikálny profil vetra zo stanice Budapešť (12:00 UTC); 12.5.2017, beh 06:00 UTC, predpoveď 12:00 UTC (červené prerušované izočiary), červená hviezda označuje miesto vzniku supercely a vertikálny profil vetra zo stanice Budapešť (12:00 UTC).

Figure 7. (a) Average of Mean Sea-Level Pressure (hPa), 67 situations at southern flow in the Alpine region (Bica et al., 2007), (b) Mean Sea-Level Pressure (hPa), ALA1, 6.6.2017, run 06:00 UTC, forecast 14:00 UTC (blue isolines), the place of supercell's origin and vertical wind profile from Budapest sounding (12:00 UTC) highlighted by blue circle; ALA1 12.5.2017, run 06:00 UTC, forecast 12:00 UTC (red dashed isolines), the place of supercell's origin and vertical wind profile from Budapest sounding (12:00 UTC) highlighted by red star.



Obrázok 8. Aerologické a simulované sondáže, profily vetra a vybrané indexy, podľa merania v Budapešti a ALA1 pre Gemerskú Ves; miesto a čas (UTC) farebne vyznačené. Hodografy z ALA1 5.10.2020, výškové hladiny označené v km. Veterné profily namerané radarmi Špani laz (SL) a Kojšovská hoľa (KH) vpravo dolu. Vertikálny strih vetra (WS) a relatívna helicitu (SRH) vo vrstve spodného kilometra, SBCAPE – Surface-Based Convective Available Potential Energy, CIN – Convective Inhibition.

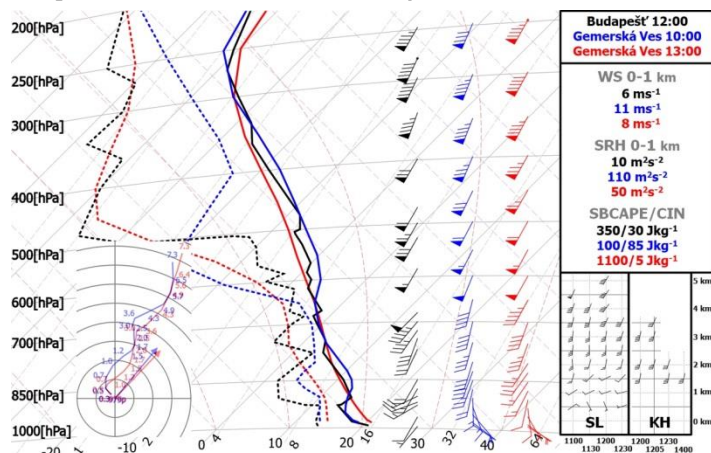


Figure 8. Soundings, wind profiles and selected indices, measurement in Budapest and ALA1 for Gemerská Ves, place and time (UTC) shown in the figure in color. Hodographs from ALA1 5.10.2020, altitude levels marked in km (at the bottom left). Wind profiles measured by radars Špani laz (SL) and Kojšovská hoľa (KH) (at the bottom right). Vertical wind shear (WS) and Storm to Relative Helicity (SRH) in 0 – 1 km, SBCAPE – Surface-Based Convective Available Potential Energy, CIN – Convective Inhibition.

VÝVOJ SUPERCELY A TORNÁDA

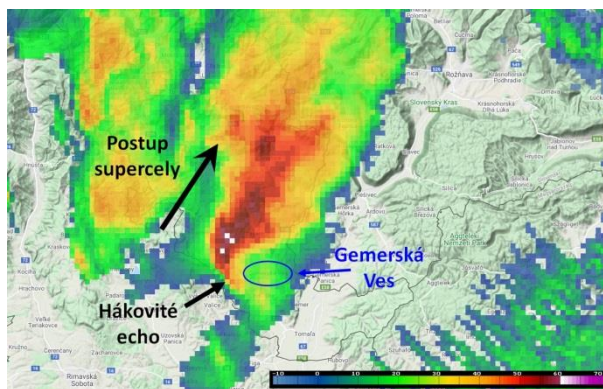
Búrka, ktorá vyprodukovala tornádo, vznikla po 13:00 UTC v oblasti Rimavskej Soboty priamo na postupujúcom rozhraní. V silnom prúde postupovala smerom na sever až severovýchod, pričom v okolí Teplého vrchu sa začala odkláňať smerom na východ oproti pôvodnému smeru. Súčasne sme identifikovali viaceré supercelárne črty, ako inflow notch² a hákovité echo (Obr. 9). Potenciál najsilnejších tornád, ako aj najväčšia pravdepodobnosť vzniku tornád v rámci superciel, je na rozhraní hákovitého echa a vtoku vzduchu do búrky (Makorowski, 2002a), čo sme pozorovali aj v tomto prípade. Okraj hákovitého echa prechádzal krátko po 14:00 UTC ponad obec Gemerská Ves a v súvislosti s ním obyvatelia obce zdokumentovali rotujúci wallcloud supercely, clear slot (Lemon a Doswell, 1979), tornádo a zaniakajúci funnel cloud (Obr. 10). Supercela postupovala ďalej na severovýchod a zanikla až nad pohorím Branisko, no tornádo a škody boli zaznamenané len v obci Gemerská Ves.

VLASTNOSTI TORNÁDA A DOKUMENTÁCIA ŠKÔD

Väčšie škody na majetku boli zaznamenané len v Gemerskej Vsi, časť Šankovce. Mimo tejto časti škody nie sú známe. Podľa záznamu škôd, ako aj vývoja situácie popísaného v predošlej kapitole, môžeme presnejšie určiť trajektóriu tornáda (Obr. 11). Škody sme zaznamenali na vzdialenosti približne 200 m so šírkou maximálne 70 m, čomu môže odpovedať aj šírka samotného tornáda. Keďže tornádo postupovalo od juhozápadu priečne vzhľadom na ulicu, škody boli výraznejšie len v malej oblasti. Z tohto dôvodu bez ďalších záznamov nie je možné presne určiť, kde a kedy vzniklo a zaniklo, preto to v analýze neuvádzame. Podľa výpovedí obyvateľov tornádo trvalo niekoľko minút. Jeho rýchlosť postupu odhadujeme podľa rýchlosti pohybu hákovitého echa supercely na cca 17 m/s, čo sa zhoduje aj s vypočítaným vektorom pohybu (Obr. 8).

Obrázok 9. Radarové črty supercely, CAPPI 2 km³, radar Kojšovská hoľa, 5.10.2020, 14:05 UTC.

Figure 9. Radar supercell features, CAPPI 2 km, radar Kojšovská hoľa, 5.10.2020, 14:05 UTC.



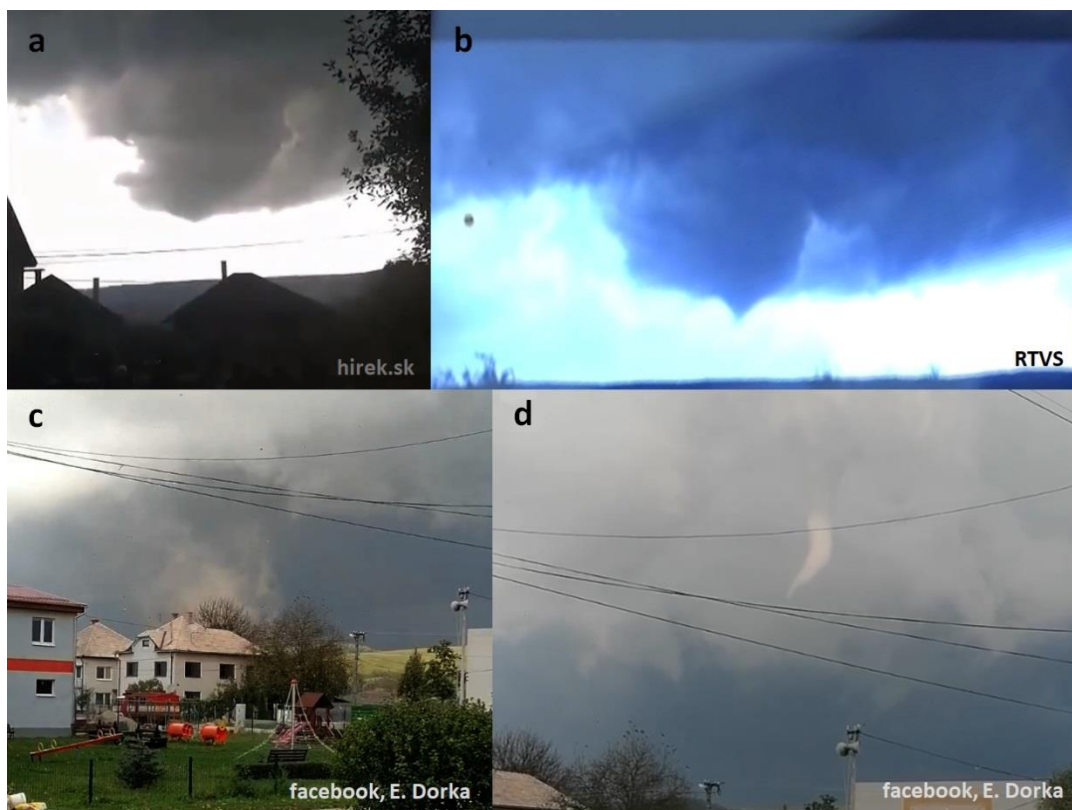
Tornádo spôsobilo škody (Obr. 12 – 14) na strechách 9 rodinných domov, na ďalších menších objektoch v blízkosti domov poškodilo alebo úplne zničilo strechy a poškodilo rozvody. Došlo k poškodeniu elektrického vedenia, pri jednom rodinnom dome zvalilo plot aj s betónovými stĺpmi, poškodené boli aj úle v blízkom lesíku. Bola zaznamenaná aj škody na vegetácii. Tornádo vyvrátilo alebo vylomilo niekoľko väčších stromov (jeden z nich spadol veľmi blízko rodinného domu, na Obr. 12 v zelenej elipse pri dome 3), menšie stromy a vegetácia boli väčšinou len poškodené. Vplyvom lietajúcich trosiek došlo aj k ďalším škodám, ktoré tu neuvádzame – poškodené automobily, okná, záhrady, a pod. Za povšimnutie stojí výrazné rozhranie medzi veľkými škodami, a takmer žiadnymi, ktoré na Obr. 12 vidieť medzi domami označeným 1 a 2. Vzhľadom na to, že ani v areáli domu 1 nedošlo k škodám na iných objektoch, možno to prisúdiť skôr objektívnym príčinám vyplývajúcim z výrazného horizontálneho gradientu rýchlosti vetra v tornáde, nie vlastnostiam budov.

² Vtokový región v spodných hladinách supercely.

³ CAPPI – Constant Altitude Plan Position Indicator – rádiolokačná odrazivosť v určitej hladine.

Obrázok 10. Supercela v obci Gemerská Ves, 5.10.2020, (a)(b), pohľad z Gemerskej Vsi (časť Šankovce) smerom na juhozápad na prichádzajúci wall cloud supercely a vznikajúce tornádo, (c)(d) pohľad na sever až severovýchod z južnej časti obce v čase prechodu (c) a zániku (d) tornáda.

Figure 10. Supercell over Gemerská Ves village, 5.10.2020, (a)(b), view towards the southwest on the incoming wall cloud and emerging tornado from the village Gemerská Ves, part of Šankovce, (c)(d) view towards the north-northeast from the southern part of the village, at the time of the transition (c) and extinction (d) of the tornado.



Obrázok 11. Fotografia Gemerskej Vsi, časť Šankovce. Odhadovaná trajektória tornáda podľa zaznamenaných škôd (biela šípka); poškodené strechy domov (červené krúžky), poškodené alebo úplne zničené strechy ďalších objektov (žlté krúžky), poškodené elektrické vedenie/stĺpy (tmavomodré krúžky), vyvrátený plot (modrý krúžok), vyvrátené veľké stromy (zelené krúžky), zlámané, vyvrátené a poškodené stromy v lese (zelená elipsa), poškodené úle (biely krúžok). Vyznačené údaje nemusia byť kompletne. Foto: ministerstvo vnútra SR, HaZZ, 7.10.2020.

Figure 11. Photo of Gemerská Ves, part of Šankovce. Estimated tornado's trajectory (white arrow) according to recorded damage; damaged roofs of houses (red circles), damaged or completely destroyed roofs of other objects (yellow circles), damaged power lines/poles (dark blue circles), collapsed fence (blue circle), uprooted large trees (green circles), broken, uprooted and damaged trees in the forest (green ellipse), damaged hives (white circle). The marked data may not be complete. Photo: Slovak government, 7.10.2020.



Obrázok 12. Škody v Gemerskej Vsi, časť Šankovce, fotografie zaznamenané z dronu v deň výskytu tornáda a deň po ňom (dátumy vyznačené v jednotlivých obrázkoch). Označené: domy (čísla), zvalený plot (modrá elipsa), zvalený strom (zelená elipsa), poškodené stromy v blízkom lese (zelená prerušovaná elipsa), postup tornáda z perspektívy jednotlivých obrázkov (šípky). Zdroj: 5.10.2020 TV JOJ, 6.10.2020 rimava.sk.

Figure 12. Damage in Gemerská Ves, part of Šankovce, photos taken from a drone on the tornado day and the day after (date marked in individual pictures). Marked: houses (numbers), collapsed fence (blue ellipse), collapsed tree (green ellipse), damaged trees in the nearby forest (green dashed ellipse), tornado progress from the perspective of individual images highlighted by arrows. Source: 5.10.2020 TV JOJ, 6.10.2020 rimava.sk.



Obrázok 13. Škody v Gemerskej Vsi, časť Šankovce. Číslovanie domov rovnaké ako na Obr. 12, spadnutý plot označený modrou elipsou rovnako ako na Obr. 11 a 12, čierna šípka ukazuje odtrhnutú strechu garáže medzi domami 2 a 3. Zdroj: rimava.sk, minv.sk, noviny.sk, RTVS.

Figure 13. Damage in Gemerská Ves, part of Šankovce. The numbering of the houses is the same as in Fig. 12, a collapsed fence marked with a blue ellipse as in Fig. 11 a 12, the black arrow shows completely destroyed roof of the garage between houses 2 and 3. Source: rimava.sk, minv.sk, noviny.sk, RTVS.



Obrázok 14. Škody v Gemerskej Vsi, časť Šankovce. Spadnutý strom vľavo hore je na Obr. 11 vyznačený zeleným krúžkom na juhozápade oblasti škôd, ostatné obrázky prislúchajú lesu na okraji obce (na Obr. 11 zelená elipsa). Zdroj: rimava.sk, minv.sk, noviny.sk.

Figure 14. Damage in Gemerská Ves, part of Šankovce. The fallen tree at the top left is in Fig. 11 marked with a green circle in the southwest of the damage area, the other pictures belong to the forest on the edge of the village (green ellipse in Fig. 11). Source: rimava.sk, minv.sk, noviny.sk.



DISKUSIA A ZÁVER

5. októbra 2020 sa v obci Gemerská Ves krátko po 14:00 UTC vyskytlo tornádo priamo spojené s mezocyklónou supercely. Zasiahlo obývanú oblasť, v ktorej spôsobilo škody na majetku, no k zraneniam obyvateľov nedošlo. Podľa zdokumentovaných škôd, výpovedí obyvateľov a záchraných zložiek tornádo klasifikujeme ako F1 na medzinárodnej Fujitovej stupnici sily tornád (ESSL, 2018).

Tornádo v Gemerskej Vsi predstavuje druhý prípad tornáda za posledné dva roky na území Slovenska. Pred takmer presne dvomi rokmi (3.10.2018) sa vyskytlo tornádo v Lekárovciach (Šinger a Púčik, 2020). Aj vtedy tornádo zasiahlo obývanú oblasť, no vidíme tu niekoľko rozdielov. V Gemerskej Vsi malo tornádo zrejme kratšiu životnosť, aj dráhu. Odhadujeme, že trvalo len niekoľko desiatok sekúnd, nanajvýš pár minút a prešlo len niekoľko sto metrov, so šírkou rotácie maximálne 70 m. Postupovalo priečne vzhľadom na ulicu, čo tiež zapríčinilo, že škody neboli rozsiahle. V Lekárovciach tornádo existovalo približne 10 minút, prešlo viac ako 3 km, šírka rotácie dosahovala minimálne 280 m a postupovalo pozdĺž najdlhšej ulice v obci, čoho dôsledkom boli rozsiahlejšie škody.

Vznik tornáda v Gemerskej Vsi bol ovplyvnený viacerými faktormi. Silné strihové prostredie s miernou instabilitou predstavovalo vhodné podmienky pre vznik superciel, najmä vo východnej polovici územia Slovenska. Práve supercely majú potenciál pre genézu silnejších a cirkulačne stabilnejších tornád (Davies-Jones a kol., 2001). Súčasne sme v spodných hladinách identifikovali východné prúdenie v oblasti Gemera, pričom na ostatnom území už prevládalo južné prúdenie. Východné prúdenie na Ge-

meri zvýraznilo rozhranie postupujúce cez Juhoslovenskú kotlinu od juhozápadu ďalej na severovýchod. V Above sme však už východné prúdenie popoludní nezaznamenali, ani žiadnu výraznú zmenu vo vývoji smeru vetra, čím nebolo možné identifikovať ani toto rozhranie. Práve rozdiel v prúdení v rámci týchto oblastí, ktorý sa navyše vyskytol aj v ďalších podobných situáciách, pripisujeme vplyvom orografie na mezo- β škále (Orlanski, 1975).

Z popísaných parametrov vyplýva, že väčšina podmienok pre tornádogenézu bola splnená (Davies-Jones a kol., 2001). Pri predpovedi tornád sa štandardne sleduje aj výška kondenzačnej hladiny, ktorá bola v tomto prípade pomerne vysoko, až okolo 1500 m n. m. Táto hodnota je vyššia než typická výška základne pri mezocyklonálnych tornádach a menej vhodná pre proces tornádogenézy (Craven a Brooks, 2004). Výraznejší vplyv na tornádogenézu mohlo mať práve rozhranie v oblasti, no na preukázanie parciálneho vplyvu jednotlivých faktorov by boli nutné idealizované numerické simulácie s ešte vyšším rozlíšením ako 1 km. Zároveň prípady tornáda v Gemerskej Vsi a v Lekárovciach potvrdzujú, že CAPE nie je vhodný prediktor výskytu a intenzity tornád, keďže sa vyskytli pri slabej až miernej instabilite.

Vplyvom orografie na vývoj hlbkej konvekcie sa venujeme aj v ďalšom výskume. Plánujeme v ňom zahrnúť dlhý rad meraní vetra zo staničnej siete SHMÚ, ktorý ukáže ďalšie systematické rozdiely v prúdení v rámci územia Slovenska pri rôznych situáciách, čím sa jednoznačnejšie preukáže lokálne odchýlky od prevládajúceho prúdenia.

Tornádo v Gemerskej Vsi sa podarilo zachytiť aj na video, možno ho nájsť v stručnej analýze na webstránke SHMÚ (Šinger, 2020).

LITERATÚRA

- Bica, B.–Knabl, T.–Steinacker, R.–Ratheiser, M.–Dorninger, M. – Lotteraner, C., Schneider, S., Chimani, B., Gepp, W.–Tschannett, S., 2007, Thermally and Dynamically Induced Pressure Features over Complex Terrain from High-Resolution Analyses, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(1), 50–65.
- Bluestein, H.B., 1993, *Synoptic-Dynamic Meteorology in Mid-latitudes. Vol. II: Observations and Theory of Weather Systems*. Oxford University Press, 594 pp.
- Brožková, R.–Bučánek, A.–Mašek, J.–Smolíková, P.–Trojáková, A., 2019, Nová provozní konfigurace modelu Aladin ve vysokém rozlišení. *Meteorol. Zprávy*, 72, 129–139.
- Buzzi, A.–Davolio, S.–Fantini, M., 2020, Cyclogenesis in the lee of the Alps: a review of theories. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*. 1. 1–25.
- Coffer, B.E.–Parker, M.D., 2017, Simulated Supercells in Non-tornadic and Tornadic VORTEX2 Environments. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 149–180.
- Craven, J.P.–Brooks, H., 2004, Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig.*, 28, 13–24.
- Davies-Jones, R.R.J. Trapp–Bluestein, H.B., 2001, Tornadoes and tornadic storms. *Severe Local Storms, Meteor. Monogr.*, No. 50, 167–221.
- Derková, M.–Vivoda, J.–Belluš, M.–Španiel, O.–Dian, M.–Neštiak, M.–Zehnal, R., 2017, Recent improvements in the ALADIN/SHMU operational system. *Meteorol. J.*, 20, 45–52.
- European Severe Storms Laboratory (ESSL), 2018, The International Fujita (IF) Scale. https://www.essl.org/media/publications/IF-scale_v0.10.pdf.
- Gaberšek, S.–Durrán, D.R., 2006, Gap Flows through Idealized Topography. Part II: Effects of Rotation and Surface Friction. *Journal of the Atmospheric Sciences* 63, 11, 2720–2739.
- Gerard, L.–Piriou, J.-M.–Brožková, R.–Geleyn, J.-F.–Banciu, D., 2009, Cloud and precipitation parameterization in a meso-gammascale operational weather prediction model. *Mon. Weather Rev.*, 137, 3960–3977.
- Haiden, T.–Kann, A.–Wittmann, C.–Pistotnik, G.–Bica, B.–Gruber, C., 2011, The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region, *Weather and Forecasting*, 26(2), 166–183.
- Kljun, N.–Sprenger, M.–Schär, C., 2001, Frontal modification and lee cyclogenesis in the Alps: A case study using the ALPEx reanalysis data set. *Meteorol Atmos Phys* 78, 89–105.
- Lopez, P., 2002, Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data assimilation purposes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2002, 128, 229–257.
- Markowski, P.M.–Rasmussen, E.N.–Straka, J.M., 1998, The Occurrence of Tornadoes in Supercells Interacting with Boundaries during VORTEX-95, *Weather and Forecasting*, 13(3), 852–859.
- Markowski, P. A., 2002a, Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 852–876.
- McCauley, M.–Sturman, A., 1999, A Study of Orographic Blocking and Barrier Wind Development Upstream of the Southern Alps, New Zealand. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 70. 121–131.
- McGinley, J., 1982, A Diagnosis of Alpine Lee Cyclogenesis. *Monthly Weather Review* 110, 9, 1271–1287.
- Lemon, L.R.–Doswell, C.A., 1979, Severe Thunderstorm Evolution and Mesocyclone Structure as Related to Tornadoogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1184–1197.
- Lopez, P., 2002, Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data assimilation purposes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 128, 229–257.
- Orlanski, I., 1975, A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527–530.
- Púčik, T.–Groenemeijer, P.–Rýva, D.–Kolář, M., 2015, Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 4805–4821.
- Šinger, M., 2017, Supercela 5. mája 2017, aktualita SHMÚ <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=829>.
- Šinger, M., 2018, Tornádo v Lekárovciach 3. októbra 2018. *Meteorologický časopis*, 21/2018, 109–116.
- Šinger, M.–Dlhoš, Š., 2019, Výskyt veľkých krúp na Slovensku v rokoch 2007–2019, *Meteorologický časopis*, 22/2019, 105–114.
- Šinger, M.–Púčik, T., 2020, A Challenging Tornado Forecast in Slovakia. *Atmosphere*, 11 (8), 821.
- Šinger, M., 2020, Tornádo v Gemerskej Vsi a obrovské krúpy na Zemplíne, aktualita SHMÚ. <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1079>.
- Termonia, P.–Fischer, C.–Bazile, E.–Bouysse, F.–Brožková, R.–Bénard, P.–Bochenek, B.–Degrauwe, D.–Derková, M.–El Khatib, R.–Hamdi, R.–Mašek, J.–Pottier, P.–Pristov, N.–Seity, Y.–Smolíková, P.–Španiel, O.–Tudor, M.–Wang, Y.–Wittmann, C.–Joly, A., 2018, The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geosci. Model Dev.*, 11, 257–281.
- Thompson, R.–Edwards, R.–Hart, J.–Elmore, K.–Markowski, P., 2003, Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243–1261.