

TORNÁDO V LEKÁROVCIACH 3. OKTÓBRA 2018

MIROSLAV ŠINGER^{1,2}

¹ Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, miroslav.singer@shmu.sk

² Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava

We analyze the case of a tornado F1 associated with a supercell that occurred over eastern Slovakia in Lekárovce on October 3, 2018. Observations, soundings, as well as numerical weather models are used for analysis of synoptic and mesoscale conditions. Several features typical for supercells were detected by the radar located on Kojšovská hola. By combining all the available wind measurements (soundings, meteorological stations, and radar), we reconstructed a hodograph representative of environmental conditions 1–2 hours before the event. The conditions favored right-movers as well as the occurrence of mesocyclone tornadoes. It was possible to determine the intensity, size, trajectory, and evolution of tornado via combination of measurements with a large volume of eyewitness observations and tornado damage documentation.

V práci analyzujeme prípad supercelárneho tornáda F1, ktoré sa vyskytlo na krajnom východe Slovenska, v obci Lekárovce, 3. októbra 2018. Na analýzu synoptických a mezoškálových podmienok sme využili namerané dáta z pozemných meteorologických a aerologických staníc, ako aj analýzy a krátkodobé predpovede numerických predpovedných modelov. Supercelu sme analyzovali prostredníctvom meraní rádiolokátora SHMÚ na Kojšovskej holi, ktorým sme identifikovali jej znaky ako mezocyklóna a základné radarové črty. Kombináciou všetkých dostupných meraní vetra (aerologické dáta, meteorologické stanice a radar) sme zrekonštruovali hodograf, ktorý zodpovedal podmienkam v prostredí 1–2 hodiny pred udalosťou. Podmienky favorizovali vpravo stáčajúce sa supercely, ako aj výskyt mezocyklonálneho tornáda. Vzhľadom na veľké množstvo pozorovaní tornáda, ako aj zaznamenaných škôd, bolo možné, v kombinácii s nameranými údajmi, so značnou presnosťou popísať časopriestorový vývoj tornáda, určiť jeho intenzitu, rozmer, trajektóriu a prejavy v jednotlivých oblastiach.

Key words: tornado, supercell, radar features, vertical wind shear

ÚVOD

Tornádo predstavuje jeden z najnebezpečnejších javov v atmosfére. Rýchlosť vetra v ňom bežne presahuje $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, pričom prúdenie v ňom a jeho okolí nie je len horizontálne, ale aj vertikálne, a navyše s výraznými zmenami na malom priestore. To často vedie k devastácii majetku a ohrozeniu ľudí, pričom v niektorých prípadoch dochádza aj k zraneniam, či úmrtiam. Tieto negatívne štatistiky sa však vo svete postupne darí eliminovať práve kvôli pretrvávajúcemu výskumu tornád, ako aj zlepšeniu varovného systému a ľahšej dostupnosti informácií.

Tornáda sa nevyhýbajú ani územiu Slovenska, čoho dôkazom sú viaceré prípady z minulosti. Zdokumentované prípady sú napr. Želiezovce 23.4.2014, Búč 5.6.2016, ale aj staršie napr. Budatínska Lehota 19.3.2001, Slovenská Ves 29.5.2001, či ďalšie, dostupné v databáze SHMÚ a ESWD (viac v časti Metodika). S výnimkou prvého spomínaného prípadu, kedy bolo tornádo nasnímané, identifikácia pozostávala len z dokumentácie škôd a výpovedí náhodných pozorovateľov. Žiadne tornádo doposiaľ ani nebolo preukázateľne spojené s mezocyklónou supercely (podozrenie však je v prípade tornáda v Slovenskej Vsi). Takýto prípad sa podarilo jednoznačne preukázať až 3. októbra 2018 v obci Lekárovce, ktorému sa budeme venovať v tejto prípadovej štúdii.

Tornádo zasiahlo obývané oblasti a spôsobilo tak značné škody na majetku. Existuje množstvo záznamov a výpo-

vedí o škodách, ako aj o samotnom priebehu daného javu. Vzhľadom na nedávno inovovanú sieť rádiolokátorov SHMÚ, máme z prípadu k dispozícii aj radarové merania vo vysokom rozlíšení, na základe ktorých môžeme tornádo jednoznačne priradiť ku konkrétnej konvektívnej bunke a spoľahlivo identifikovať rotáciu výstupného prúdu supercely, ako aj jej typické radarové črty. V tomto článku popíšeme aj podmienky, ktoré viedli ku vzniku supercely, tornáda a prepojíme namerané údaje so zdokumentovaným priebehom javu, čo je hlavným cieľom práce, spolu s popisom vlastností tornáda, ako je napr. trvanie, rozmer, intenzita, trajektória, prípadne ďalšie zaujímavosti a zvláštnosti prípadu.

METODIKA

Na analýzu podmienok v prostredí sme využívali globálny hydrostatický model ECMWF s rozlíšením v strednej Európe cca 8 km a lokálny hydrostatický model ALADIN SHMÚ s 4,5 km rozlíšením, výstupy z nich sme zobrazovali softvérom IBL Visual Weather. Využívali sme analýzy z 12:00 UTC a krátkodobé predpovede do 2 hodín. Z týchto modelov sme využívali najmä výškové mapy a integrálne parametre (napr. CAPE, počítanú od zemského povrchu). Pre prízemné pozorovania sme využívali predovšetkým dáta z profesionálnych meteorologických staníc. Ďalším základným zdrojom dát boli aerologické sondáže z Gánoviec a merania z rádiolokátora SHMÚ Kojšovská hola. Pri analýze podmienok sme

vychádzali z údajov 1–2 hodiny pred udalosťou, teda 12–14:00 UTC (väčšinou 12–13:00 UTC), pretože potom boli merania ovplyvnené vznikajúcou konvekciou. SYNOP uvádzame o 12:00 UTC, pretože merania z Užhorodu máme k dispozícii len každé 3 hodiny (teda 12, 15, 18 UTC...).

Hodograf bolo nutné zrekonštruovať špeciálne pre oblasť Východoslovenskej nížiny, pretože najbližšia aerologická stanica je v Gánovciach, a tá zle reprezentuje analyzovanú oblasť kvôli vysokej nadmorskej výške, ako aj špecifickej orografii v okolí Popradskej kotliny, ktorá výrazne modifikuje prúdenie v spodných hladinách. Práve spodné hladiny sú pri vzniku tornáda kľúčové, preto sme využívali merania zo staničnej siete. Využili sme stanice Vysoká nad Uhom, Orechová, Michalovce, Trebišov, Zlatá Baňa a Kojšovská hoľa. Stanica Zlatá Baňa sa nachádza pomerne ďaleko od analyzovanej oblasti, na severe Slanských vrchov, no výhodou je jej nadmorská výška 600 m, teda reprezentuje stredné polohy regiónu. V rámci vyšších polôh sme na analýzu využívali stanicu Kojšovská hoľa, ktorú s nadmorskou výškou 1250 m berieme v danej situácii ako reprezentatívnu pre prúdenie na hornej hranici vrstvy spodného kilometra. Nad úrovňou Kojšovskej hole už bolo možné využiť vertikálny profil vetra získaný z radaru, ako aj aerologickú sodnáz z Gánoviec.

Pri určovaní rýchlosti bunky sme vychádzali z postupu mezocyklóny, ktorú sme identifikovali na základe WER (vysvetlenie v časti „Radarové merania“) v jednotlivých termínoch od 13:40 do 14:40 UTC na produkte CAPPI¹ 2 km z radaru Kojšovská hoľa. Na základe presunu hook echa (Markowski, 2002a) ponad Lekárovce sme určili aj rýchlosť postupu tornáda. Presný čas výskytu tornáda sa však touto metódou dá určiť len s odchýlkou 5 minút, pretože produkt CAPPI je dostupný k časovému krokom 5 minút, keďže je počítaný z objemových dát, ktoré sú získavané meraním trvajúcim viac ako 4 minúty.

Trajektóriu tornáda sme určovali podľa škôd, ktoré zdokumentoval Martin Žec. Z týchto fotografií, ako aj z videí od náhodných pozorovateľov a priemyselných kamier, sme vychádzali pri odhadovaní rozmeru, trvania, času výskytu a intenzity tornáda.

Ďalšie informácie o škodách a tornádach z minulosti sme získavali z databáz ESWD (European Severe Weather Database), galérie SHMÚ, databázy tornád SHMÚ (<http://www.shmu.sk/sk/?page=1337>), ako aj záznamov náhodných pozorovateľov, ktorý zverejnili svoje fotografie na facebookom profile SHMÚ.

ANALÝZA SITUÁCIE

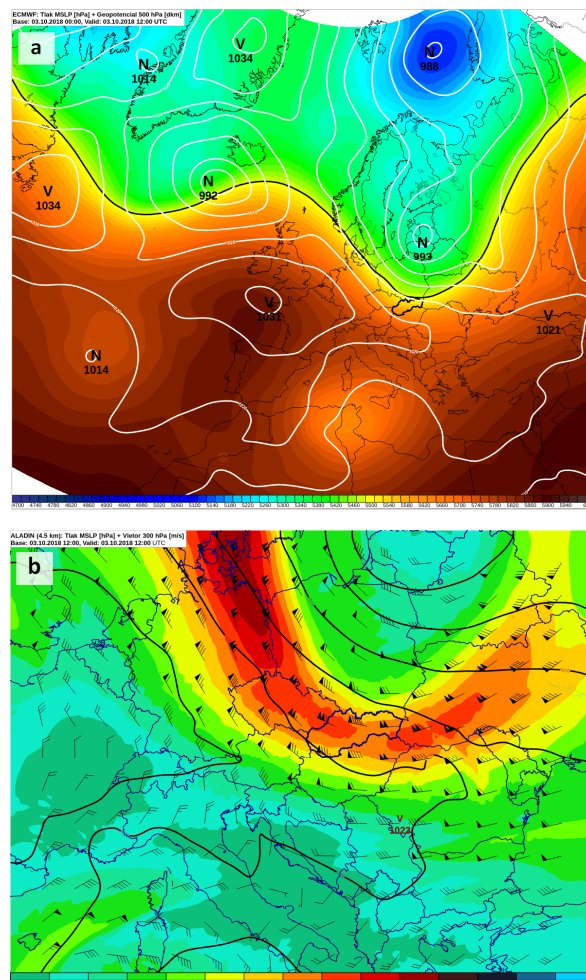
Synoptická situácia 3. 10. 2018

Územie Slovenska sa 3. októbra nachádzalo na juhovýchodnom okraji tlakovej níže, ktorej stred sa presúval z oblasti Baltského mora nad Bielorusko. Táto bola vzhľadom na pokročilú fázu svojho vývoja už vyjadrená aj vo vyšších hladinách (Obr. 1a). Po jej zadnej strane prúdil do strednej Európy od severozápadu chladný morský vzduch. Dýzové

prúdenie sa nachádzalo na periférii výškovej brázdy, cez strednú Európu od severozápadu na juhovýchod (Obr. 1b).

Obrázok 1. a – Analýza modelu ECMWF, tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (biele izočiarly) a geopotenciál 500 hPa (šedá škála); b – Analýza modelu ALADIN, tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora (čierne izočiarly) a prúdenie v hladine 300 hPa (farebná škála a symboly vetra).

Figure 1. a – Analysis of NWP model ECMWF, mean sea level pressure (isolines) and geopotential 500 hPa (grayscale), b – Analysis of NWP model ALADIN, mean sea level pressure (black isolines) and wind at 300 hPa (color scale and wind barbs).



Mezoškálové podmienky - metóda prísad

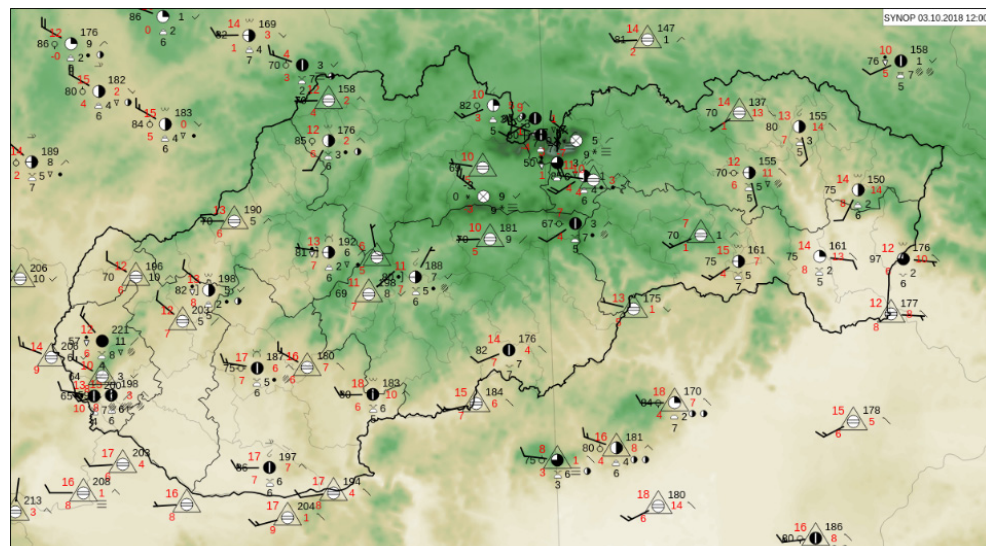
Brázda nízkeho tlaku vzduchu spojená so spomínanou tlakovou nížou popoludní prechádzala ponad východné Poľsko a Slovensko. Teplota rosného bodu bola na Východoslovenskej nížine pred výskytom supercely okolo 8 °C (Obr. 2), vertikálny teplotný gradient v strednej troposfére bol približne 7 °C.km⁻¹ (Obr. 3a) a podľa modelu ALADIN CAPE dosahovala hodnoty 300–500 J.kg⁻¹ (Obr. 3b). Vývoj hlbokéj konvekcie však prebiehal len do nadmorskej výšky približne 5 až 5,5 km, pretože sa tu nachádzala inverzná vrstva (Obr. 4a), ktorá zabráňovala mohutnejšiemu vývoju kopovitej oblačnosti.

V prízemnej vrstve cez strednú Európu prechádzali na juhovýchod jednotlivé čiary konvergencie. Jedna z nich

¹ CAPPI – Constant Altitude Plan Position Indicator – rádiolokačná odrazivosť v určitej hladine.

Obrázok 2.
SYNOP, 12:00 UTC
(o 13:00
v záujmovom
regióne podobné
podmienky).

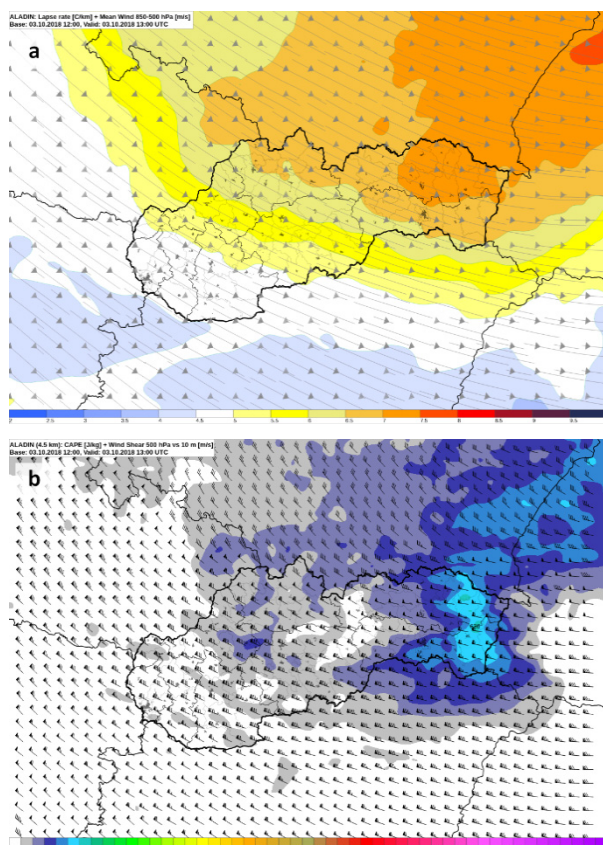
Figure 2.
SYNOP, 12:00 UTC
(at 13:00 similar
conditions
in the area).



pomaly prechádzala cez Východoslovenskú nížinu až cca 1–2 hodiny po výskyte bunky, ktorá vyprodukovala tornádo, no mohla mať vplyv na jej iniciáciu.

Obrázok 3. Krátkodobá predpoveď modelu ALADIN, 13:00 UTC; a) vertikálny teplotný gradient (farebná škála) a priemerné prúdenie vo vrstve 500–850 hPa, b) CAPE (farebná škála) a vertikálny strih vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m (symboly vetra).

Figure 3. Short-range forecast of NWP model ALADIN, 13:00 UTC; a) lapse rate (color scale) and mean wind in the layer 500–850 hPa, b) CAPE (color scale) and wind shear between 500 hPa and 10 m (wind barbs).



Mezoškálové podmienky – strih vetra

V prízemnej vrstve fúkal pred prechodom čiary konvergencie na východnom Slovensku v nižších polohách zväčša južný až juhovýchodný vietor, no vplyvom orografie boli v prúde odchýlky (Obr. 2). Na Východoslovenskej nížine fúkal podľa všetkých dostupných staníc (Michalovce, Trebišov, Orechová, Vysoká nad Uhom, Užhorod) východný vietor 2–5 m.s⁻¹. Podľa týchto meraní vetra sme v kombinácii s aerologickou sondážou z Gánoviec a údajov o vetre z radaru Kojšovská hoľa zrekonštruovali vertikálny profil prúdenia a zhotovili hodograf (Doswell, 1991) prezentovaný na obrázku 4c.

Hodograf bol v spodnom kilometri konkávne zakrivený, čo bolo spôsobené výraznou zmenou smeru vetra s rastúcou výškou z východného, cez južný, až na západný až severozápadný. Nad touto vrstvou bol hodograf takmer rovný, teda smer vetra sa takmer nemenil, no výrazne sa zvyšovala jeho rýchlosť, v nadmorskej výške 1500 m 12 m.s⁻¹, v 3 km až 25 m.s⁻¹ ². V prostredí tak bol veľmi silný vertikálny strih vetra, medzi povrchom a hladinou 3 km: 25 až 30 m.s⁻¹, čo viedlo k vzniku vpravo stáčajúcej sa supercely (Thompson a kol., 2003; Markowski a Richardson, 2010). Vzhľadom na významnú zmenu smeru vetra už v spodnom kilometri až o cca 180°, navyše s vertikálnym strihom vetra 12 m.s⁻¹, išlo o prostredie so streamwise vorticitou³ (Markowski a Richardson, 2010), čo predstavuje veľmi vhodné podmienky pre vznik supercelárneho tornáda⁴ (Coffer a Parker, 2017).

² Veľmi silný strih vetra bol aj v štandardne sledovanej vrstve medzi povrchom a hladinou 500 hPa, až cez 40 m.s⁻¹, no vzhľadom na vertikálnu mohutnosť analyzovanej bunky je vhodnejšie sledovať strih v plytšej vrstve medzi povrchom a 3 km (700 hPa).

³ Streamwise vorticity – vorticity v prostredí s konkávne zakriveným hodografom, ako napr. obr. 4c; v prostredí s rovným hodografom (napr. takom, kde s rastúcou výškou narastá len rýchlosť vetra, no smer sa nemení) hovoríme o crosswise vorticity.

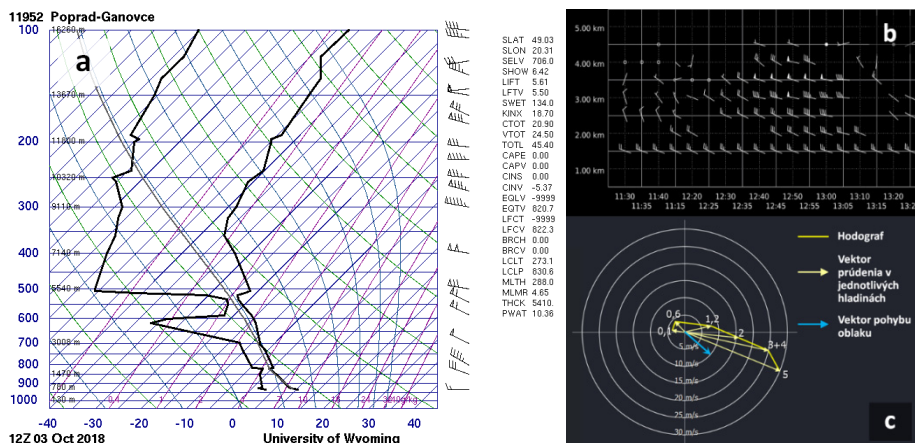
⁴ Supercely v prostredí so slabým strihom vetra v spodnom kilometri zvyčajne nevyprodukujú tornádo.

Obrázok 4.

a – Skew-T, Gánovce,
3. 10. 2018, 12:00 UTC;
b – vertikálny profil vetra
podľa radaru Kojšovská hoľa;
c – zrekonštruovaný hodograf
v oblasti tornáda (popis v texte).

Figure 4.

a – Skew-T, Gánovce,
3. 10. 2018, 12:00 UTC;
b – vertical wind profile mea-
sured by radar Kojšovská hoľa;
c – reconstructed hodograph
valid for the tornado location.

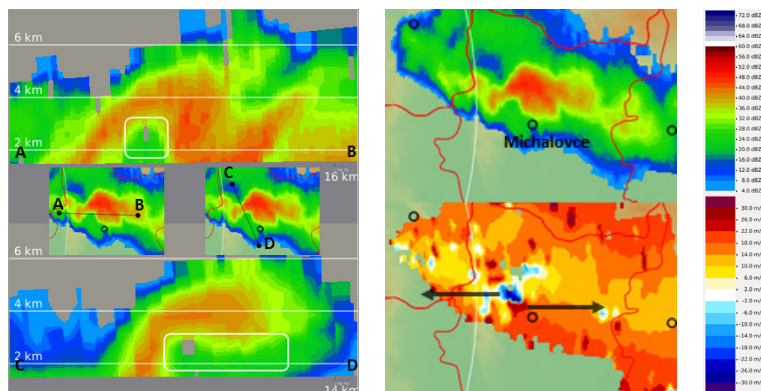


Obrázok 5. Vľavo – vertikálne rezy supercely pri Michalovciach na úsečkách AB a DC, v bielych rámkoch radarové črty WER a BWER (popis v texte); vpravo – identifikácia rotácie v supercele na elevácii 1,5°, šípky predstavujú prúdenie k radaru a od radaru; všetky obrázky v čase 13:50 UTC.

Figure 5.

Left – vertical cross-section through supercell near Michalovce. Cross-section is indicated by AB and CD segments. White rectangles indicate the location of WER and BWER features.

Right – Doppler velocities at 1.5° elevation, arrows indicate velocities towards and away from the radar. All radar images from 13:50 UTC.



Radarové merania

Prvé konvektívne bunky začali vznikať v západoseverozápadnom prúde medzi Slanskými vrchmi a Vihorlatom okolo 12:30 UTC. O 13:40 UTC sa v zhluku viacerých buniek vyvinula jedna mohutnejšia juhovýchodne od Vihorlatu nad obcami Nacina Ves, Nižný Hrušov a Lesné. Už v danom čase vykazovala supercelárne črty ako hook echo a WER⁵, v ďalšom vývoji aj BWER⁶ (Markowski a Richardson, 2010), ktoré signalizujú silný výstupný prúd supercely a na radarových snímkach tak pozorujeme len slabé hodnoty odrazivosti. Detegovali sme aj výraznejší odklon v pohybe bunky doprava oproti ostatným nesupercelárnym bunkám, čo je taktiež typický znak supercely. Prostredníctvom dualpolarizačného radaru na Kojšovskej holi sme v oblasti WER a BWER zaregistrovali aj rotáciu, čím sme objektívne identifikovali mezocyklónu supercely (Brown a Wood, 1991). Príklad spomínaných črt uvádzame na obrázku 5, rez AB predstavuje BWER, rez CD WER (v bielych rámkoch). Taktiež vidieť, že bunka siaha len do nadmorskej výšky cca 5 km.

⁵ WER – Weak Echo Region – oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti, nízkohladinová črta (zväčša do 3 km).

⁶ BWER – Bounded Weak Echo Region – ohraničená oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti, črta v stredných hladinách oblaku (zväčša 2–7 km).

VÝVOJ A DOKUMENTÁCIA TORNÁDA A ŠKÔD

Supercela po väčšinu existencie nemala veľmi nebezpečné prejavy. V Michalovciach padali krúpy s priemerom do 2 cm, vo Vyskej nad Uhom náraz vetra 13 m.s^{-1} , tornádo však vyprodukovala až v záverečnej fáze.

Tornádo vzniklo severozápadne od obce Lekárovce, na juhovýchodnom okraji hook echa⁷, čo je v rámci supercely typické miesto, kde sa vyskytujú tornáda spojené s mezocyklónou. Na obrázku 6 je vyznačená typická poloha tornáda v rámci supercely, ako aj radarové črty a jej predný a zadný zostupný prúd (RFD a FFD - Rear/Forward Flank Down-draft).

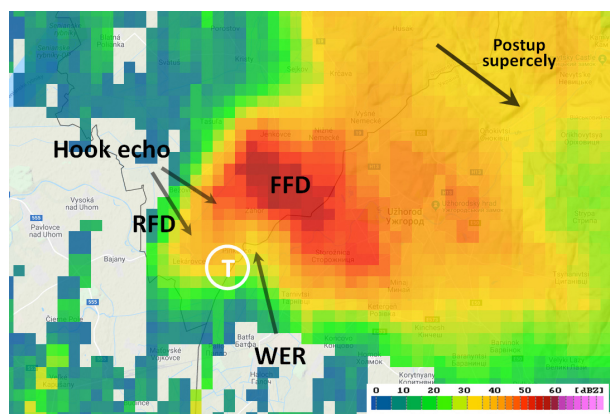
Podľa výpovedí svedkov a kamerových záznamov tornádo trvalo cca 10 minút a vzniklo severozápadne od obce Lekárovce pri rieke Uh krátko po 14:30 a zaniklo po 14:40 UTC východne od nej, v okolí hraníc s Ukrajinou. Tornádo spôsobilo rozsiahle škody na majetku najmä v južnej časti obce. Boli poškodené alebo strhnuté strechy, poškodené elektrické vedenie, polámané alebo vyvrátené stromy (aj malé stromy), spadnuté humná, poškodené steny, a pod. Škody boli zaznamenané vo veľkej časti obce, pretože tornádo postupovalo približne v smere, v akom sú orientované aj hlavné ulice južnej časti obce, teda od severozápadu na juhovýchod. Na obrázku 7 uvádzame

⁷ Hook echo nesignalizuje prítomnosť tornáda.

približnú trajektóriu tornáda spracovanú podľa zaznamenaných škôd vyznačených v obrázku. Odhadujeme, že tornádo sa pohybovalo rýchlosťou 10 m.s^{-1} a prešlo 3 až 3,5 km. Na obrázku 8 prezentujeme niekoľko fotografií, ktoré zhotovil Martin Žec 3 dni po udalosti. V rámci obce boli najvýraznejšie škody v okolí družstva (oblasť A) a v okolí pošty a kostola (oblasť B). Na základe zaznamenaných škôd a prejavov tornáda klasifikujeme ako F1 Fujitovej stupnice sily tornád (Fujita, 1971b).

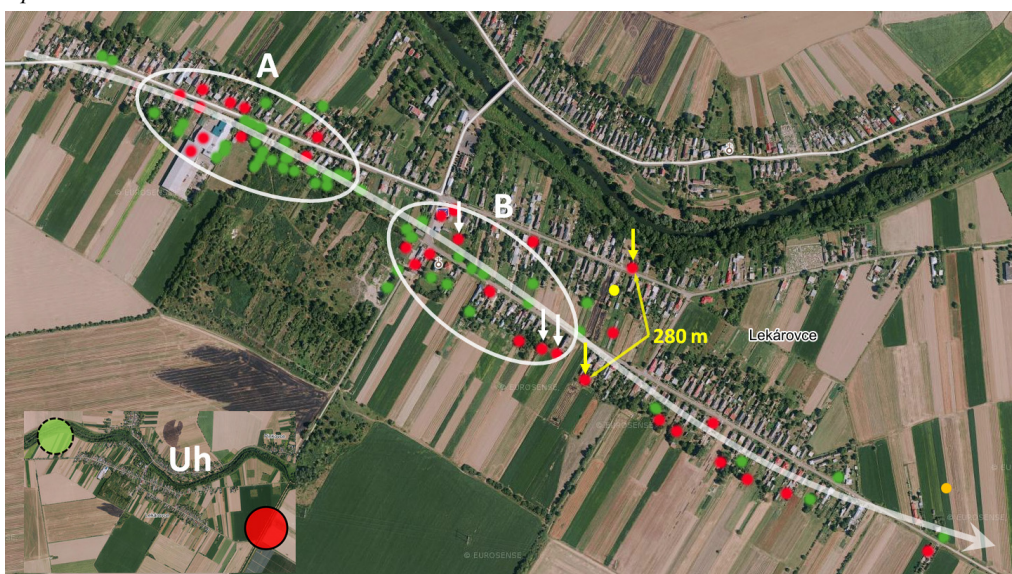
Obrázok 6. Štruktúra klasickej supercely pri prechode cez Lekárovce. Radarová snímka CAPPI 2 km na podklade google maps, 14:30 UTC.

Figure 6. Classic supercell structure on the CAPPI 2 km elevation at 14:30 UTC with google maps as a background. White circle and symbol T indicate location of the tornado.



Obrázok 7. Zaznamenané škody v Lekárovciach v mapovej forme. Veľká biela šípka je predpokladaná trasa tornáda; červené krúžky predstavujú škody na stavbách a objektoch, ako sú strechy, múry, stĺpy a pod.; zelené krúžky sú škody na vegetácii; biele zvislé šípky predstavujú spadnuté humná; elipsy A a B reprezentujú oblasti najväčších, F1, škôd; žlté šípky sú najvzdialenejšie zničené strechy (kolmo na trajektóriu tornáda); žltý krúžok reprezentuje pozorovateľa 1 (Obr. 9), oranžový pozorovateľa 2 (Obr. 10); malý obrázok vľavo dole predstavuje predpokladané miesto vzniku a zániku tornáda; podkladová mapa eurosense maps.

Figure 7. (main figure) Locations of tornadic damage locations plotted on the map of village Lekarovce. Big white arrow represents the tornado trajectory, red circles damage to man-made structures and green circles damage to vegetation. Ellipses A and B correspond to the most severe, F1, damage. White arrows pointing down indicate collapsed barns, yellow arrows point at the most distant damage points in the tornado path. Yellow and orange circles denote the location of observers, who took videos (Fig. 9 and 10). (bottom right) Green and red circles represent the beginning and the end of the tornado path. background map: eurosense maps.



Dvomi náhodným pozorovateľom sa podarilo tornádo zachytiť na videozáznam (ich poloha je vyznačená na Obr. 7). Prvému pozorovateľovi (na obr. žltý krúžok) sa pravdepodobne podarilo z veľmi malej vzdialenosti nasnímať tzv. savý vír tornáda (vír na menšej škále, ktorý obieha po orbite materského tornáda) (Fujita, 1971a) zobrazený na obrázku 9a. Savý vír typicky obieha po periférii materského tornáda a často spôsobuje veľké, no veľmi lokálne škody, bežne významnejšie ako materské tornádo. V tomto prípade došlo k strhnutiu strechy len susedného domu (Obr. 9b,c). Okolo výskytu tohto savého víru je však viacero pochybností. Z videa, z ktorého sú zhotovené aj obrázky 9, je možné určiť, že savý vír postupuje na sever, kde postupne zničí strechu. Je to však pomerne ďaleko od južného okraja obce, kde boli najvýraznejšie škody. 280 m južne boli zvalené humná (Obr. 8m,n) a strhnutá strecha a zvalená stena malého domčeka (Obr. 8s). Z toho vyplýva, že cirkulácia tornáda mohla mať v danej oblasti až takmer 300 m v priemere.

Druhý pozorovateľ zachytil okolo 14:40 UTC odchádzajúce tornádo na krajnom východe obce. Na obrázku 10 vidieť, že tornádo nebolo skondenzované, ale bolo pozorovateľné len ako rotujúci prach s dosť veľkou oblasťou rotácie. Z obrázku 10a a videozáznamu odhadujeme oblasť rotácie na minimálne 70–100 m, pričom šírka tornáda sa postupne zmenšovala (Obr. 10b).

Prechod tornáda bol zachytený aj HD kamerami na družstve, na severozápadnom okraji obce. Na obrázku 11 je niekoľko obrázkov, ktoré prezentujú, ako tornádo veľmi ľahko strháva strechy a ničí ďalší majetok (napr. letiaca strecha na Obr. 11c).

Obrázok 8. Fotografie škôd po tornáde zhotovené 6.10.2018, väčšinou zlámané alebo vyvrátené stromy a zničené strechy, b) veľkou rýchlosťou zapichnutý konár v plote; g), h) zlomené aj malé stromy; l) vyvrátený kamenný kríž; m), n) spadnuté humná; p) zvalené chrasť; s) zničená strecha popisovaná v obrázku 7; autor: Martin Žec.

Figure 8. Photos of tornado damage taken on 6. 10. 2018 showing broken and uprooted trees or damaged roofs and b) branch penetrating the fence; g), h) small trees broken; l) broken stone memorial; m), n) collapsed barns; p) flattened vegetation; s) destroyed roof described in Figure 7; author: Martin Žec.



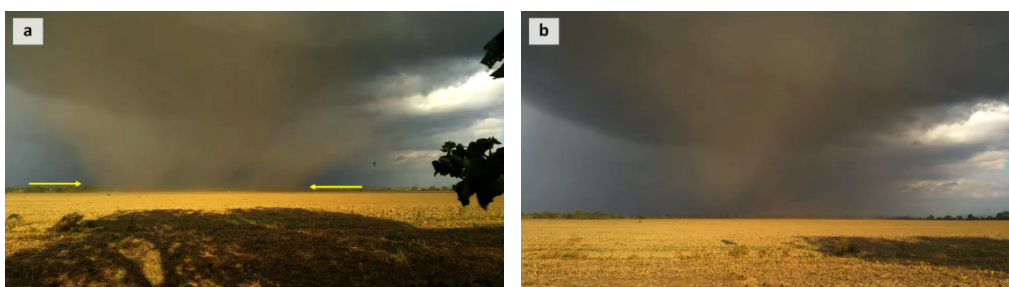
Obrázok 9.
Obrázky zhotovené z videa
cca 14:37 UTC zobrazujúce
(a) savý vír,
(b) a (c) odtrhnutie časti
strechy, poloha pozorovateľa
je na obrázku 7.;
zdroj: pravda.sk, Ján Kasarda.

Figure 9.
Screenshots from video, taken
at around 14:37 UTC showing
(a) photo of suction vortex,
(b) and (c) damage inflicted
to the roof, the location of
observer in figure 7;
source: pravda.sk, Ján Kasarda.



Obrázok 10. Obrázky z videa odchádzajúceho tornáda okolo 14:40 UTC. Časový odstup medzi obrázkami je cca 1 minúta, žlté šípky ukazujú rozmer tornáda identifikovaný na základe rotácie prachu pozorovateľnej na videu <https://www.youtube.com/watch?v=MpIYIQigJAO>, autor: Jaro Goril, poloha pozorovateľa v rámci obce je na obrázku 7.

Figure 10. Video screenshots showing departing tornado around 14:40 UTC. Time difference between individual shots is app. 1 minute. Yellow arrows indicate approximate width of tornado, author: Jaro Goril, <https://www.youtube.com/watch?v=MpIYIQigJAO>, the location of observer in figure 7.



Obrázok 11. Obrázky z HD kamier na družstve v Lekárovciach počas prechodu tornáda v čase 14:35–14:36 UTC, zábery poskytol Mgr. Peter Sudzina z firmy NOP, a. s.

Figure 11. Screenshots from HD cameras from agronomical building in Lekárovce during tornado event between 14:35 and 14:36 UTC, pictures provided Mgr. Peter Sudzina, NOP, a. s. company.



DISKUSIA A ZÁVER

Výnimočnosť tornáda v Lekárovciach spočíva predovšetkým vo veľkom množstve dokumentačného materiálu, kvalitných meraní a radarových dát, na základe ktorých bolo možné spraviť podrobnú analýzu prípadu. Tornádo spôsobilo rozsiahle škody na majetku a porastoch vo veľkej časti obce, pretože prechádzalo v smere hlavných ulíc od severozápadu na juhovýchod, no nikto nebol zranený. V práci sme na základe zdokumentovaných škôd a samotného tornáda zanalyzovali jeho trajektóriu a zistili sme, že najintenzívnejšie prejavy malo v južnej časti obce približne v prvej polovici trajektórie. Trvalo cca 10 minút, šírku malo desiatky metrov, postupne zrejme viac ako 100 m, celkovú trajektóriu sme odhadli na 3–3,5 km a rýchlosť postupu v priemere 10 m.s^{-1} .

Prípád potvrdil aj poznatky z literatúry, že vertikálny strih vetra je kľúčový parameter (Davies-Jones a kol., 2001), ktorým je možné vyhodnocovať podmienky pre vznik superciel alebo tornád. V práci sme prezentovali priam ukážkové strihové podmienky – na vznik superciel v rámci spodnej a strednej troposféry vo vrstve 0–3 km $25\text{--}30 \text{ m.s}^{-1}$, ako aj na vznik tornád v spodnej troposfére 0–1 km $10\text{--}12 \text{ m.s}^{-1}$. Pri vhodných podmienkach na vývoj hlbokkej konvekcie vznikla v prostredí so silným strihom vetra supercela, pričom v jej neskoršom štádiu vývoja došlo aj k vzniku tornáda, ktorého intenzitu sme na základe zdokumentovaných škôd stanovili na F1 Fujitovej stupnice.

Hoci vertikálny strih vetra bol veľmi silný, podmienky z hľadiska metódy ingrediencií na vývoj hlbokkej konvekcie výrazné neboli. CAPE bola podľa modelu ALADIN len $300\text{--}500 \text{ J.kg}^{-1}$, čo nie sú vysoké hodnoty, no ako ukázal aj tento prípad, v prostredí so silným strihom vetra sú dostatočné na vznik nebezpečných konvektívnych javov (prostredie v literatúre označované ako high shear low CAPE).

Pri analýze videí sme identifikovali aj ďalší malý vír pomerne ďaleko od oblasti najvýraznejších škôd. S veľkou pravdepodobnosťou šlo o savý vír, z čoho vyplýva, že cirkulácia materského tornáda bola v danom čase veľmi rozsiahla, v priemere minimálne 280 m.

Článok predstavuje prepojenie analýzy podmienok, meraní a zdokumentovaných škôd, no na úspešnosť predpovede numerických modelov, ako aj na možnosti výskumu sme sa nezameriavali. V ďalšom výskume prípadu by tak bolo vhodné porovnať namerané dáta s predpoveďou numerických modelov, prípadne sa zamerať na numerické modelovanie situácie prostredníctvom nehydrostatických

modelov schopných vyhodnotiť genézu streamwise vorticity, ktorá sa ukazuje kľúčová pri vzniku tornáda spojeného s mezocyklónou supercely.

Podakovanie

Vďaka patrí predovšetkým Martinovi Žecovi, ktorý na vlastné náklady vycestoval z Košíc do Lekároviec a zdokumentoval škody a výpovede miestnych obyvateľov, získal videozáznam z priebehu tornáda, zhotovil mapku škôd na obrázku 7 a s autorom článku konzultoval ďalšie podrobnosti ohľadne upresňovania charakteru a lokalizácie škôd v jednotlivých častiach obce. Tento dokumentačný materiál a informácie výrazne zvýšili možnosti analýzy.

Ďakujeme aj občanom Lekároviec za ochotu pri poskytovaní informácií a zdieľaní fotografií a videí o jave a vzniknutých škodách.

LITERATÚRA

- Brown, R.A.–Wood, V.T., 1991, *On the Interpretation of Single-Doppler Velocity Patterns within Severe Thunderstorms*. *Wea. Forecasting*, 6, 32–48.
- Coffer, B.E.–Parker, M.D., 2017, *Simulated Supercells in Non-tornadic and Tornadic VORTEX2 Environments*. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 149–180.
- Davies-Jones, R.R.–Trapp, J.–Bluestein, H.B., 2001, *Tornadoes and tornadic storms. Severe Local Storms, Meteor. Monogr.*, No. 50, 167–221.
- 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.
- Doswell, C.A. III–Burgess, D.W., 1993, *Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. The Tornado: Its structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr.*, No. 79. Amer. Geophys. Union, 161–172.
- Fujita, T.T., 1971a, *Proposed mechanism of suction spots accompanied by tornadoes*. Preprints, Seventh Conf. Severe Local Storms, Boston, 208–213.
- Fujita, T.T., 1971b, *Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP research paper, University of Chicago*, vol. 91, 42 pp.
- Markowski, P.A., 2002a, *Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review*. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 852–876.
- Markowski, P.–Richardson, Y., 2010, *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell, 407 pp.
- 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.