

Detekcia gust frontov pomocou lidarů

Pavol Nechaj

pavol.nechaj@fmph.uniba.sk (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave)

pavol.nechaj@microstep-mis.com (MicroStep-MIS, Bratislava)

Abstract

The aim of this paper is demonstration of gust front case study monitored and detected using the lidar radial wind speed data. The lidar data are processed by the qualitative method of radial wind field visualization, which is supplemented by outputs from the proposed algorithm for wind shear detection.

The first chapter introduces the lidar technology and its use in aviation meteorology, especially for wind shear detection. The second chapter explains gust front phenomenon. In the third chapter, there is description of method used for gust front detection and monitoring including the proposed procedure of algorithm for wind shear detection. The fourth chapter demonstrates this method by case study of gust front at Bratislava Airport on 2nd of September 2018. The fifth and sixth chapter contains conclusions and list of references.

The paper shows that the lidar is suitable technology for monitoring of gust fronts and other phenomena accompanied by wind shear. The method of visualization of radial wind field from lidar, supplemented by outputs from the wind shear detection algorithm, presents useful tool for aviation meteorologists to timely detect wind shear in the airport area, which is illustrated also on the case study of gust front at Bratislava Airport.

Anotácia

Lidar v leteckej meteorológii slúži predovšetkým na detekciu nebezpečného nízkohladinového strihu vetra. Gust fronty sú jedným z javov, ktoré takéto strihy vetra generujú. Tento článok predstavuje jednu z metód na detekciu gust frontov a demonštruje jej použitie na prípadovej štúdiu gust frontu na bratislavskom letisku 2. septembra 2018.

Kľúčové slová: lidar, strih vetra, gust front

Annotation

In aviation meteorology, a lidar is used mainly for detection of dangerous low level wind shear. Gust fronts are one among the phenomena generating such wind shear. This paper introduces one of the methods used for detection of gust fronts and demonstrates it by case study of gust front at Bratislava Airport on 2nd of September 2018.

Key words: lidar, wind shear, gust front

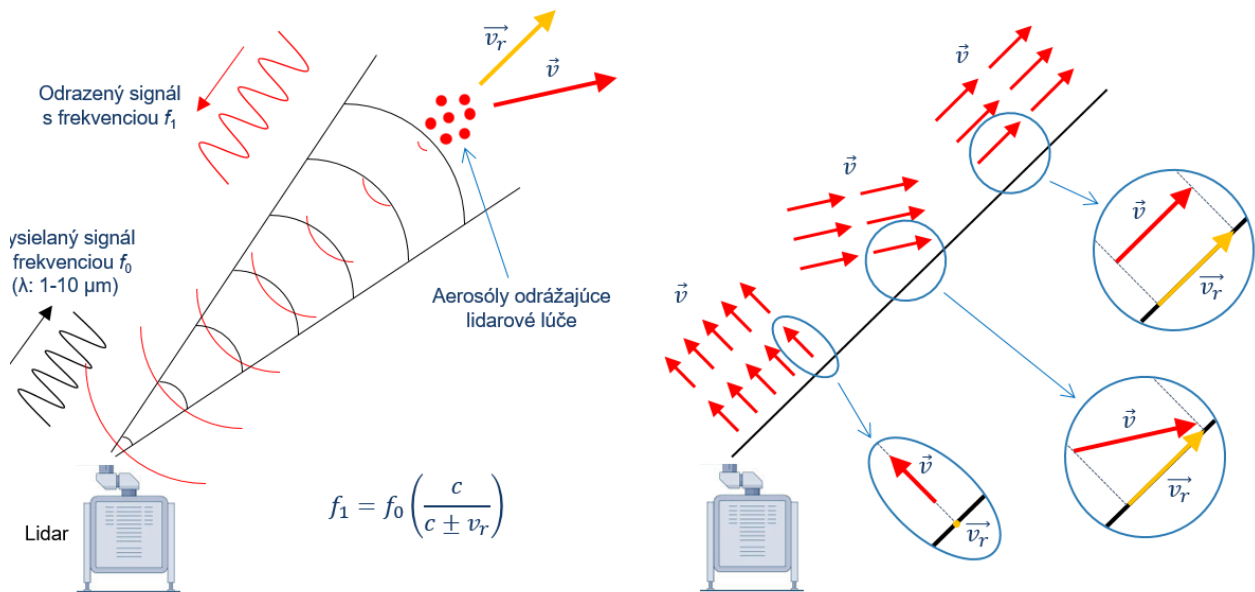
1 Lidar v leteckej meteorológii

Technológia lidar (Laser Imaging Detection and Ranging) má široké využitie aj mimo leteckej meteorológie. V rámci leteckej meteorológie však slúži predovšetkým na detekciu nebezpečného nízkoohľadového strihu vetra. Okrem detekcie strihu vetra sa lidar používa aj na výstrahy a predpoveď výraznej turbulencie (zvlášť za bezoblačného počasia), detekciu tzv. wake vorticies – vírov vznikajúcich za veľkými lietadlami, ktoré môžu byť nebezpečné pre za nimi nasledujúce lietadlá s malým časovým odstupom, výpočet poľa vetra pre účely numerických modelov ako aj na monitorovanie výšky zmiešavacej, resp. hraničnej vrstvy, v ktorej dochádza k turbulentnému prenosu častíc od zemského povrchu a má vplyv na kvalitu ovzdušia.

Lidar pracuje na rovnakom princípe ako dopplerovský radar – t. j. emituje elektromagnetické žiarenie (v infračervenej časti spektra v rozmedzí 1 – 10 μm) a na základe zmeny frekvencie odrazeného lúča od pohybujúcich sa aerosólov umožňuje určiť radiálnu rýchlosť vetra (Obr. 1), keďže môžeme predpokladať, že pohyb mikročastíc prirodzeného a antropogénneho aerosólu ako prach, popol, kvapôčky vody v oblakoch atď. kopíruje pole vetra. Pokiaľ lidar neemituje iba jeden pulz, ale niekoľko pulzov za zvolený časový interval nazývaný akumulácia doba (tzv. pulzný lidar), je možné určovať radiálnu rýchlosť vetra simultánne v rozdielnych vzdialenostiach od lidar.

Lidar teda umožňuje detegovať nebezpečný strih vetra najmä v spodnej časti troposféry s optimálnou koncentráciou aerosólov. Takú predstavuje zaprášená alebo zahmlená atmosféra. Naopak, veľmi čistá atmosféra s výbornou viditeľnosťou neumožňuje odrazenie vyžarovaného signálu a príliš nízka viditeľnosť alebo prítomnosť zrážok spôsobuje pohlcovanie lidarového signálu.

Aby merania lidarom mohli naozaj slúžiť na detekciu strihu vetra, je potrebné zvoliť vhodnú skenovaciu stratégiu, aby s dostatočným časovým a priestorovým rozlíšením dokázali pokryť záujmovú oblasť.



Obr. 1: Princíp merania dopplerovského lidar.

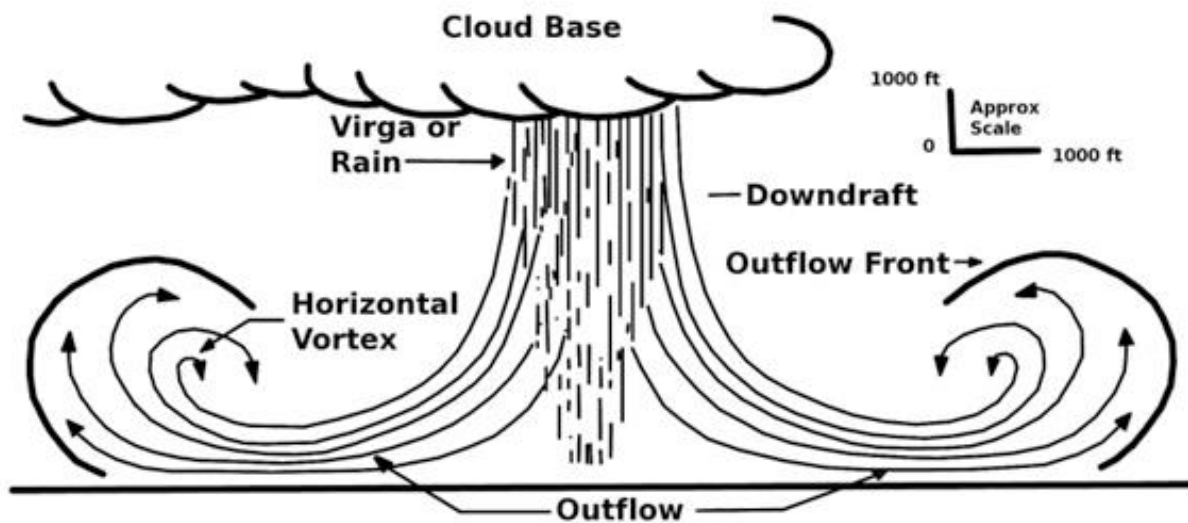
2 Gust front

Osobitnou kategóriou javov so silným strihom vetra sú downbursty pri búrkach (Fujita, 1985). Ide o intenzívny zostupný pohyb studeného vzduchu pod búrkovým oblakom, zväčša spojený aj so zrážkami (mokrý downburst), ale existujú aj tzv. suché downbursty, kedy zrážky nedosahujú zemský povrch. Po dopade na zemský povrch sa tento šíri do strán, pričom na jeho čele vzniká vír s horizontálnou osou (Obr.

2). Okraj tohto divergentného prúdenia sa nazýva gust front vzhľadom na podobnosť s atmosférickými frontami, keďže je tu oblasť nižšieho tlaku a veľkého gradientu viacerých meteorologických prvkov (teplota, vlhkosť atď.).

Všetky tieto javy sú spojené s náhlymi a intenzívnymi zmenami smeru a rýchlosti vetra. Vzhľadom na ich mimoriadnu intenzitu (nárazy vetra aj viac ako 100 km/h), krátke trvanie (rádovo niekoľko minút) a relatívne malý horizontálny (rádovo stovky metrov) a vertikálny (rádovo desiatky až stovky metrov nad zemou) rozsah predstavujú najväčšie nebezpečenstvo pre letectvo a viackrát boli hlavnou, prípadne druhotnou príčinou leteckých nešťastí.

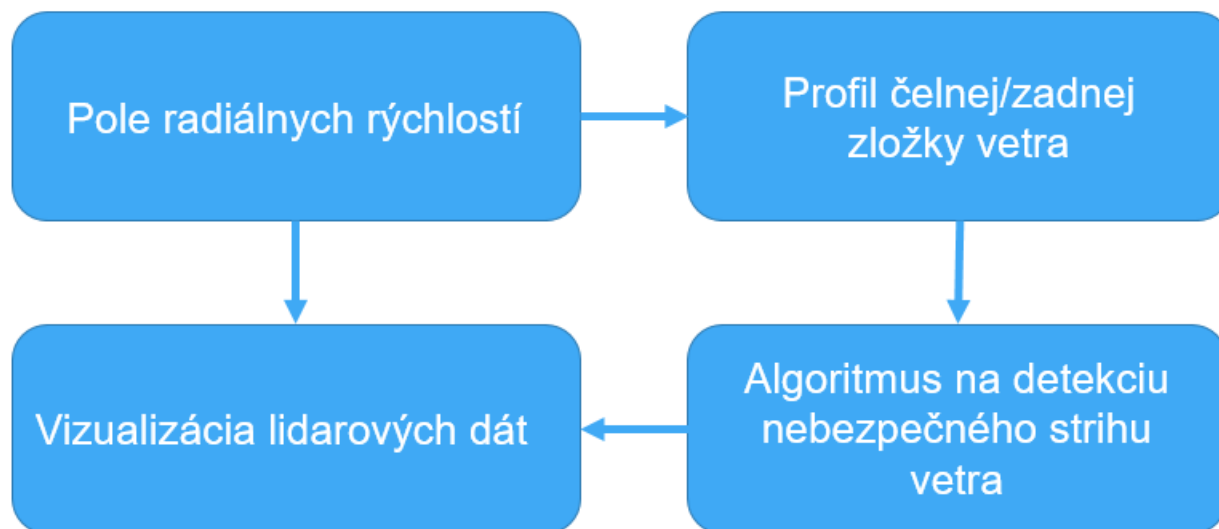
Aj z tohto dôvodu sme vybrali gust front ako ukážkovú situáciu detekcie strihu vetra pomocou lidar (viď kapitola 4).



Obr. 2: Schéma downburstu a gust frontu (na obr. nazvaný ako outflow front). Zdroj: www.wunderground.com

3 Metóda detekcie gust frontov

Existuje viacero metód na detekciu strihu vetra, vrátane gust frontov (Shun a Chan, 2008; Weipert et al, 2014). Tento článok popisuje kvalitatívnu detekciu strihu vetra pomocou vizualizácie poľa radiálnej rýchlosti, čo umožňuje vyhľadávať znaky typické pre strih vetra (Brown a Wood, 2007). Táto metóda je doplnená o vizualizáciu výstupov z nami navrhnutého algoritmu na detekciu nebezpečného strihu vetra (Obr. 3). V nasledovných odstavoch sú podrobnejšie informácie k jednotlivým krokom tejto metódy.



Obr. 3 Schéma použitej metódy na detekciu strihu vetra, vrátane gust frontov

Pole radiálnych rýchlostí

Pole radiálnych rýchlostí z lidarů závisí od zvolenej skenovacej stratégie. Základným skenovacím módom, ktorý sme použili na lidare umiestnenom na bratislavskom letisku, je Plan Position Indicator (PPI) s eleváciou 3 stupne, čo zodpovedá uhlu pod ktorým zvyčajne pristávajú lietadlá. Pri PPI skene je uhol elevácie fixný a mení sa azimut. Pri zvolenej uhlovej rýchlosti 3°/s a akumuláčnom čase 1s tak lidar urobí kompletný sken za 2 minúty. Jedná sa o kužeľovú plochu, ktorá je premietnutá do roviny (na obrazovku) ako kruh. Rozlíšenie meraní pozdĺž jednotlivých lúčů je 100 m.

Profil čelnej/zadnej zložky vetra

Čelná/zadná zložka vetra je relatívnou zložkou vektora vetra vzhľadom na letovú dráhu lietadla orientovanú v smere letovej dráhy (zadná zložka vetra), resp. proti smeru letovej dráhy (čelná zložka vetra). Zmena čelnej/zadnej zložky vektora vetra v smere pristávacej/vzletovej dráhy má priamy vplyv na hlavné sily pôsobiace na lietadlo.

Keďže lietadlá pristávajú spravidla pod uhlom 3 stupne, tak sme spravili nasledovné zjednodušenie: radiálne rýchlosti vetra z lidarového skenu PPI pri elevácii 3 stupne sú stotožnené s čelnou/zadnou zložkou vetra pôsobiacou na pristávajúce lietadlo.

Algoritmus na detekciu nebezpečného strihu vetra

Algoritmus na detekciu nebezpečného strihu vetra vychádza z definície Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO). Keďže najkritickejšími fázami letu je vzlet a pristávanie, ICAO stanovilo hranicu 500 m, resp. 1600 stôp, pre výskyt nebezpečného strihu vetra, ktorý preto označujeme ako nízkohladinový strih vetra. Intenzitu nebezpečného strihu vetra preto ICAO definuje ako zmenu čelnej/zadnej zložky vektora vetra o 15 a viac uzlov (cca 7,5 m/s) na vzdialenosti max. 4 km pozdĺž pristávacej, resp. vzletovej dráhy (ICAO, 2005). Algoritmus analyzuje každý lidarový lúč zvlášť (t. j. nielen lúče v smere pristávacích dráh letiska) a v rámci lúča sa každé meranie (tzv. gate) posudzuje samostatne. Algoritmus pozostáva zo 7 krokov:

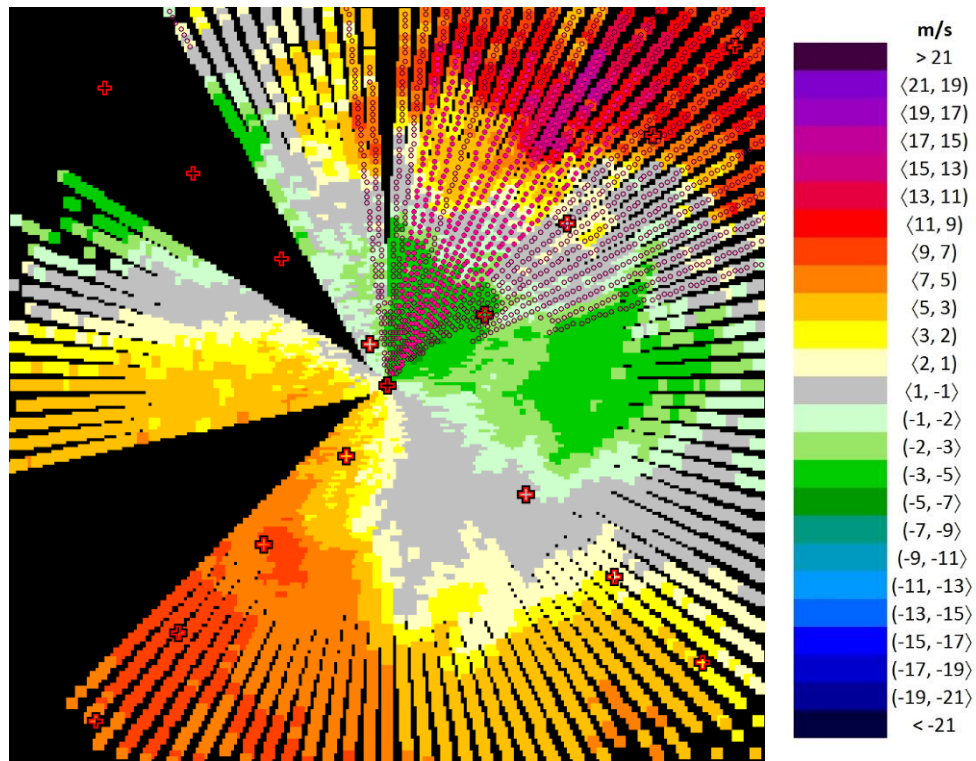
1. Vyhľadáme najvzdialenejšiu hodnotu čelnej zložky vetra¹ z vybraného lidarového lúča. Označujeme tento gate ako A_1 , a čelnú rýchlosť vetra v tomto bode ako v_{A1} .
2. Vyhľadáme ďalšiu nameranú hodnotu čelnej zložky vetra na tom istom lidarovom lúči (smerom bližšie k lidarom). Označujeme tento gate ako B_1 , a čelnú rýchlosť vetra v tomto bode ako v_{B1} .
3. Vzďialenosť medzi týmito dvomi bodmi označíme d a zmenu čelnej zložky vetra $\Delta v = v_{B1} - v_{A1}$.
4. Pokiaľ d je menšie ako 4 km a Δv je väčšie alebo rovné ako 15 uzlov, tak segment A_1B_1 je označený ako segment so strihom vetra (zobrazený ako prázdne purpurové kruhy, Obr. 4). V prípade, že Δv je väčšie ako 30 uzlov, segment je označený ako segment s mikroburstom (zobrazený ako plné purpurové kruhy, Obr. 4).
5. Pre ten istý gate A_1 vyhľadáme ďalšie namerané hodnoty čelnej zložky vetra B_2, B_3 až B_{N-1} (N – počet všetkých nameraných hodnôt čelnej zložky vetra na danom lidarovom lúči).
6. Zopakujeme kroky 3 a 4 $N-1$ -krát pre merania B_2, B_3 až B_{N-1} . Takto získame množinu segmentov so strihom vetra (ktoré sa môžu navzájom prekrývať), prípadne mikroburstom pre gate A_1 . Ich zjednotenie označujeme ako A_1B_{WS1} .
7. Zopakujeme kroky 1 – 6 postupne pre všetky hodnoty čelnej zložky vetra na danom lidarovom lúči (gate $A_2, A_3, \dots A_{N-1}$). Takýmto spôsobom získame segmenty so strihom vetra $A_2B_{WS2}, A_3B_{WS3}, \dots A_{N-1}B_{WSN-1}$ (ktoré sa môžu taktiež navzájom prekrývať), ktoré sa následne zobrazujú na poli radiálnych rýchlostí (Obr. 4).

Vizualizácia lidarových dát

Navrhnutý softvér na vizualizáciu lidarových dát kombinuje pole radiálnej rýchlosti (priamo namerané lidarom) a výstupy algoritmu na detekciu nebezpečného strihu vetra. Na výslednom produkte (Obr. 4) majú radiálne rýchlosti smerom k lidarom kladnú hodnotu. Prázdne purpurové kruhy zobrazujú úseky lidarových lúčov so zmenou čelnej zložky vetra medzi 15 a 30 uzlami, plné purpurové kruhy zobrazujú úseky lidarových lúčov so zmenou čelnej zložky vetra nad 30 uzlov.

Na obrázku (Obr. 4) môžeme vidieť v strede krížikom vyznačenú polohu lidarom. Ostatné krížiky označujú prah dráh a význačné body tzv. ARENA (Area Noted for Attention), čo je priestor s dĺžkou 3 námorné míle (NM) na pristávacom koridore, 2 NM na vzletovom koridore a šírkou 1 NM vycentrovanej podľa osí dráh, v rámci ktorého sa reportuje pilotom strih vetra.

¹ Zadná zložka vetra sa dá interpretovať ako záporná hodnota čelnej zložky. Podľa vyššie uvedeného zjednodušenia je profil čelnej zložky vetra stotožnený s nameranou radiálnou rýchlosťou vetra pozdĺž daného lidarového lúča.



Obr. 4 Vizualizácia lidarových dát: pole radiálnej rýchlosti (priamo namerané lidarom) a výstupy algoritmu na detekciu nebezpečného strihu vetra (purpurové kruhy)

4 Gust front na bratislavskom letisku

V tejto kapitole demonštrujeme použitie vyššie popísanej metódy (kapitola 3) na prípadovej štúdií gust frontu na bratislavskom letisku. Jedná sa o výraznú situáciu, ktorá sa odohrala za veľmi krátke časové obdobie (prakticky v priebehu 20 minút) vo večerných hodinách 2. septembra 2018.

Na začiatku septembra 2018 bol v Strednej Európe, a zvlášť v Bratislave, veľmi turbulentný vývoj počasia. V dôsledku prechodu studeného frontu sa 1. septembra vo večerných hodinách vyskytlo v Bratislave viacero intenzívnych dažďových preháňok za sebou. Predpoveď počasia na nasledujúci deň očakávala podobný vývoj počasia s preháňkami a búrkami a SHMÚ vydal výstrahu najvyššieho 3. stupňa pred intenzívnym dažďom (s úhrnom nad 90 mm) a nárazmi vetra 16 – 20 m/s v Bratislave a priľahlom okolí.

Obr. 5 znázorňuje priebeh tejto synoptickéj situácie s gust frontom na poli radiálnych rýchlostí (nameraných lidarom) doplnených o výstupy algoritmu na detekciu nebezpečného strihu vetra, ktoré zvýrazňujú oblasti, kde dochádzalo k výraznému strihu vetra v dôsledku gust frontu. Obr. 5 obsahuje všetky PPI skeny z časového intervalu 21:00 – 21:20 UTC (s dvojinútovým časovým krokom), kedy sa gust front prehnal priestorom bratislavského letiska.

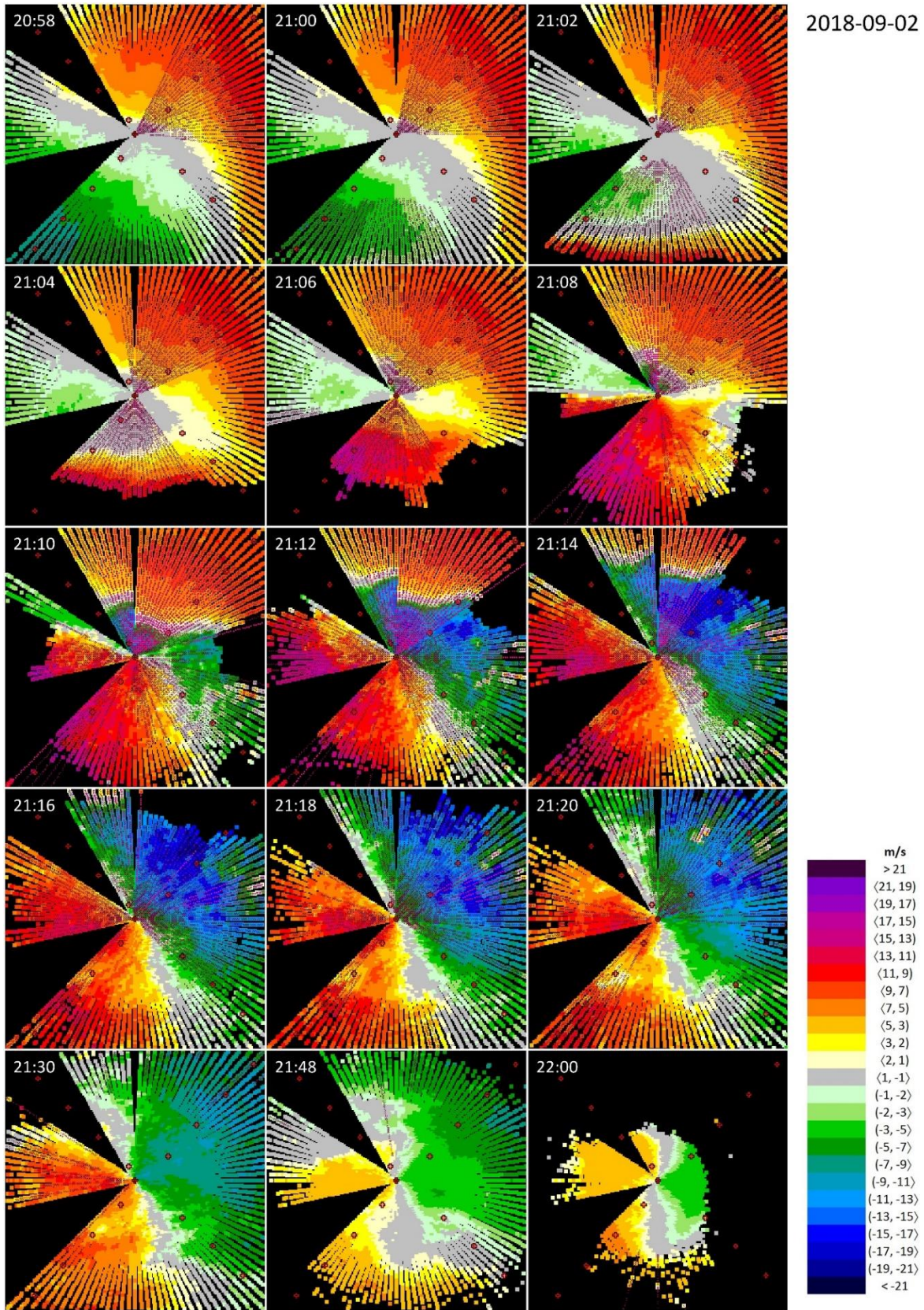
Na začiatku tejto udalosti o 21:00 UTC nameraný anemometer na letisku slabý premenlivý vietor s rýchlosťou 2 m/s. Na lidarovom snímku z tohto času však môžeme vidieť výrazný pohyb vzduchu od severovýchodu (kladné hodnoty radiálnej rýchlosti smerom k lidarom), ktorý vo výške okolo 400 m nad povrchom dosahuje rýchlosť 11 m/s, čo generuje podmienky so strihom vetra zobrazené purpurovými kruhmi na lidarových lúčoch v severovýchodných až východných azimutoch a tiež v južných až juhozápadných azimutoch.

O 21:02 UTC už môžeme pozorovať gust front, ktorý sa objavil juhozápadne od lidarom a postupoval veľmi rýchlo na sever (Obr. 5). Tento gust front sa vytvoril na okraji downburstu pochádzajúceho z búrkového jadra, ktoré sa nachádzalo 10 – 15 km juhozápadne od okraja dráhy 04-22. Toto jadro môžeme vidieť na radarovej snímke z 21:00 UTC (Obr. 6), avšak samotný gust front na radarovej snímke nie je detegovaný. Prítom rýchlosť vetra na gust fronte presahovala 17 m/s, čo už predstavuje naozaj nebezpečný strih vetra pre pristávajúce či vzlietajúce lietadlá (berúc do úvahy, že na letisku v tom čase fúkal slabý premenlivý vietor).

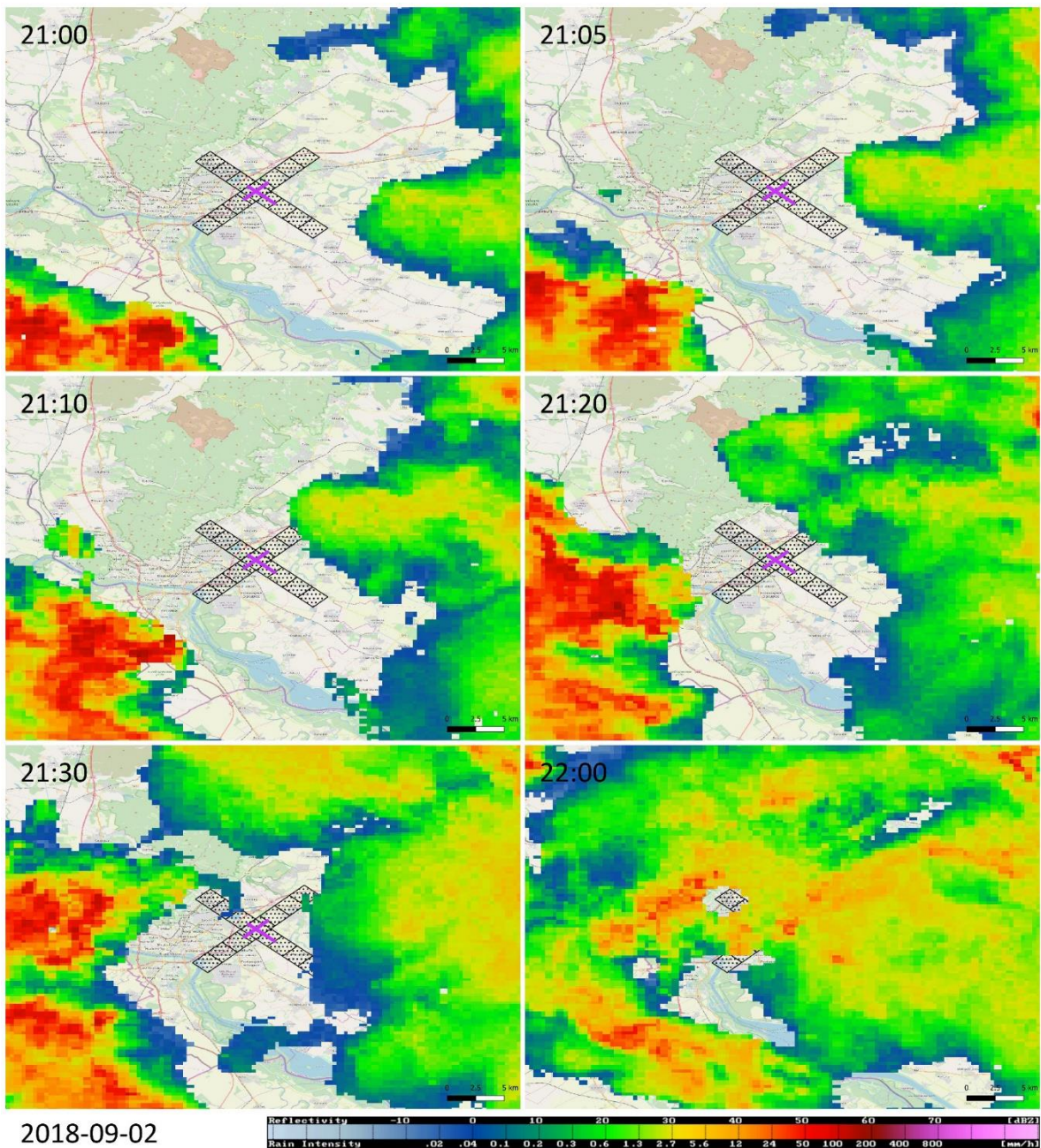
Ako gust front postupoval na sever, jeho čelná strana dosiahla pozíciu lidarom o 21:08 UTC a bod 2 NM od okraja dráhy 22 o 21:14 UTC (Obr. 5), z čoho môžeme odhadnúť rýchlosť gust frontu nad 10 m/s (35 – 40 km/h). K podobnému záveru môžeme prísť z pozorovania pohybu búrkového jadra medzi 21:00 – 21:30 UTC na radarových snímkach. Medzi 21:08 – 21:14 UTC môžeme pozorovať rozsiahly sektor s podmienkami strihu vetra prekračujúcimi limit pre mikrobust (plné purpurové kruhy na Obr. 5) na lidarových lúčoch v severných až severovýchodných azimutoch. Okolo 21:14 UTC došlo aj k najvýraznejšej hodnote strihu vetra počas celej tejto situácie (zmena čelnej zložky vetra o 27 m/s, čiže takmer 100 km/h) v dôsledku stretu gust frontu, ktorý postupoval na sever s rýchlosťou vetra až do 17 m/s a pôvodného poľa vetra, kde vo výške fúkal vietor s rýchlosťou 11 m/s zo severu (teda presne v opačnom smere voči postupu gust frontu). V tomto čase sa na bratislavskom letisku (v priestore ARENA) ešte nevyskytovali žiadne zrážky (viď Obr. 6).

Po prechode gust frontu približne o 21:30 UTC sa situácia stabilizovala, pričom fúkal juhozápadný vietor s rýchlosťou 11 m/s. O 22:00 UTC sa vietor zmiernil a smerom k povrchu sa stočil do západného smeru. V tomto čase zasiahli letisko aj zrážky (Obr. 6), čo môžeme vidieť aj na evidentnom útlme lidarového signálu (Obr. 5).

2018-09-02



Obr. 5 Radiálna rýchlosť vetra z lidar a výstupy algoritmu na detekciu strihu vetra (purpurové kruhy) pri prechode gust frontu 2. septembra 2018 medzi 20:58 a 22:00 UTC na bratislavskom letisku



Obr. 6 Rádiolokačná odrazivosť (CAPPI 1.5 km) v okolí bratislavského letiska 2. septembra 2018 medzi 21:00 a 22:00 UTC. Zdroj: SHMÚ

5 Záver

Lidar je vhodným nástrojom na monitorovanie gust frontov aj iných javov sprevádzaných nízko hladinovým strihom vetra v podmienkach bez zrážok, s optimálnou koncentráciou aerosólov v atmosfére. Vizualizácia radiálnych rýchlostí vetra doplnená o výstupy algoritmu na detekciu nebezpečného strihu vetra predstavuje užitočný nástroj pre leteckých meteorológov na včasnú detekciu tohto nebezpečného javu v okolí letiska. Prípadová štúdia gust frontu na bratislavskom letisku z 2. septembra 2018 vhodne ilustruje použitie tejto metódy spracovania údajov z lidar na detekciu nebezpečného strihu vetra.

6 Referencie

Brown R. A.; Wood V. T., 2007: *A Guide for Interpreting Doppler Velocity Patterns: Northern Hemisphere Edition*; 2nd Ed. National Oceanic and Atmospheric Administration/National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA; 2007, 61 pp.

Fujita T.T., 1985: *The Downburst, Microburst and Macrobust*; SMRP Research Paper; University of Chicago: Chicago, IL, USA, 1985; Volume 210. 122 pp

International Civil Aviation Organization (ICAO), 2005: *Manual on Low Level Wind Shear and Turbulence*, 1st ed.; ICAO Doc: Montreal, QC, Canada, 2005; 213 pp.

Shun C.M.; Chan P.W., 2008: *Applications of an infrared Doppler LIDAR in detection of wind shear*. In *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, Vol. 25, Issue 5, pp. 637-655. doi:10.1175/2007JTECHA1057.1.

Weipert A., Kauczok S., Hannesen R., Ernsdorf T., Stiller B., 2014: *Wind shear detection using radar and lidar at Frankfurt and Munich airports*. 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1-5 September 2014, 16 pp