Vybrané případy supercelárních bouří za roky 2018 a 2019 pohledem dopplerovských polarimetrických radarů

Selected cases of supercell storms in 2018 and 2019 as seen with Doppler dual polarisation weather radars

David Rýva
Český hydrometeorologický ústav
Odbor distančních měření a informací
Generála Šišky 942, 143 00 Praha 4
david.ryva@chmi.cz

Supercell convective storms, simply supercells, are one of several types of convective storm spectrum based on cellular structure of the convective system. Despite their name, these storms are not larger in dimensions then the other storm types. For their longevity, severity and isolation, they can also be very useful for testing broad variety of radar and lightning based algorithms. We would like to present some typical aspects of supercell behaviour observed for the first time in the Czech Republic but we mainly want to present some new results of storm updraft detection algorithm which is based on dual polarisation radar data. It could be very helpful for nowcasting to know the position and characteristics of updrafts. This product is under development at the Department of Remote Sensing and Information of CHMI.

KLÍČOVÁ SLOVA: bouře konvektivní – supercela – radar meteorologický – CZRAD – ZDR sloupec – proud konvektivní vzestupný – databáze supercel – amatérská meteorologie – ESWD databáze

KEYWORDS: convective storm – supercell – weather radar – CZRAD – ZDR column – updraft – database of supercells – amateur meteorology – ESWD database

1. Úvod

Po letech 2016 a 2017, kdy jsme zaznamenali velké množství pravděpodobných supercelárních bouří (Rýva 2018), následoval slabší rok 2018 a rok 2019, kdy byla četnost výskytu supercel opět velmi vysoká. Oba roky však přinesly několik velmi zajímavých situací, a to jak z pohledu nebezpečných projevů některých bouří, tak jejich vývoje a vnitřní struktury z pohledu radarových měření sítě CZRAD. Některé případy tak byly vybrány pro další zpracování a výzkumné účely v rámci programu Dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace, do kterého je zapojen Odbor distančních měření a informací ČHMÚ. Opět se také ukázala nezastupitelná role spolupráce s amatérskými pozorovateli silných bouří, ale i s širší veřejností, např. prostřednictvím sociálních sítí. U několika případů supercel jsme tak získali velmi cenné informace o lokalizaci výskytu krupobití, velikosti krup, ale i škodách jimi způsobených.

Už ručně kreslená archivní radarová data z Prahy-Libuše z první poloviny 70. let minulého století ukazují osamocené konvektivní buňky s dlouhým trváním, ale rovněž s velmi zajímavých tvarem a chováním. Můžeme jen odhadovat, že skutečně mohlo jít o supercely. I tak byl tento typ bouří u nás poprvé zmíněn zřejmě až při extrémním krupobití z 18. srpna 1986 (Pavlík et al. 1988). Autoři tehdy naprosto jasně poukázali na možnou supercelární povahu některých z bouří ve zmíněný den. Silná krupobití s výskytem někdy až extrémně velkých krup totiž patří k častým projevům tohoto typu bouří. Kroupami přitom mnohdy bývá zasažen dlouhý pás území, někdy v délce až stovek km. Může tedy docházet ke značným škodám na porostech, zemědělských plodinách, ale i majetku. Dlouhou dobu však byl tento typ bouří u nás považován za velmi zřídka se vyskytující a první nesporný důkaz o supercelární povaze bouře v ČR poskytl až podrobný rozbor radarových dat ze situace s výskytem supercel doprovázených tornády 31. května 2001 (Setvák et al. 2004). Následné postupné systematické sledování jejich výskytu, zpočátku zejména ze strany amatérských pozorovatelů konvektivních bouří (Drahokoupil et al. 2018), však ukázalo, že zřejmě nepůjde ani u nás o tak zřídkavý jev, jak se dříve soudilo. V posledních letech jsou supercelární bouře cíleně dohledávány a katalogizovány do databáze v rámci výzkumné činnosti ČHMÚ. Stále se to však děje za velmi významné externí podpory a spolupráce s amatérskými pozorovateli počasí, jejichž role je v této oblasti naprosto klíčová. S ohledem na častou izolovanost, výrazné projevy a rovněž dlouhou dobu trvání supercel jde o ideální objekty pro testování různých algoritmů detekujících riziko nebezpečných projevů kumulonimbů.

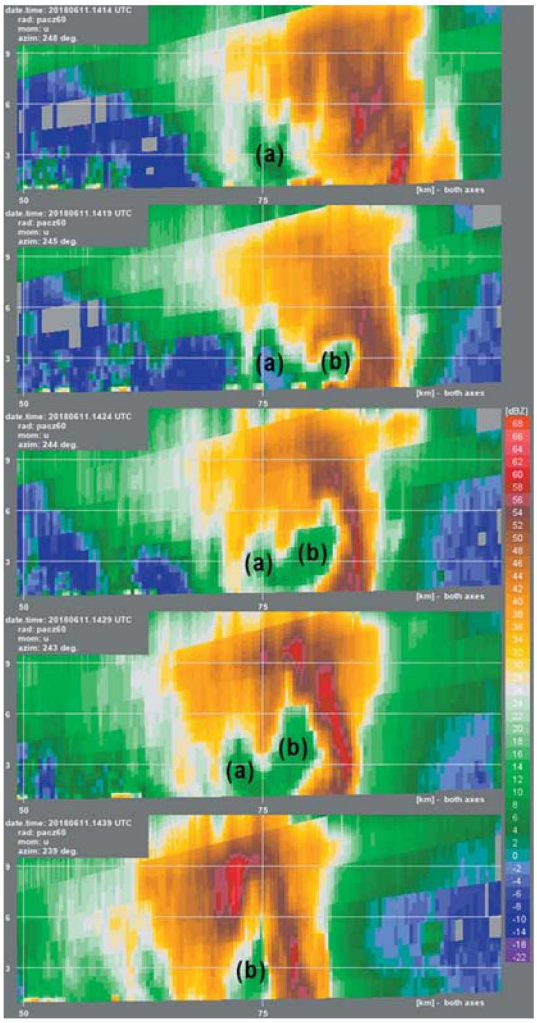
V současnosti je aktuální větší využití polarimetrických dat, která nám nové radary poskytují, a to mimo jiné pro účely detekce výstupných pohybů vzduchu v konvektivních buňkách (dále updrafů). Znalost polohy, intenzity a rozsahu updraftů jednotlivých konvektivních jader by mohla významně napomoct odhadu jejich dalšího vývoje. V neposlední řadě může jít o další významnou informaci, např. pro zabezpečení letového provozu, kdy velmi silné a rozsáhlé updrafty mohou být spojeny nejen se silnou turbulencí, náhlým prudkým stoupáním, ale i s výskytem velkých krup dokonce i ve velkých výškách.

Zároveň i pochopení podmínek, jež u nás vedou k výskytu tohoto typu konvektivních bouří, může výrazně napomoct

zlepšit výstražné informace. Současný výzkum a vývoj nových produktů v ČHMÚ tak přímo využívá data situací z dané databáze, ale jeho součástí je i další rozšiřování a průběžné doplňování této databáze pro případné navazující budoucí studie.

2. Databáze supercelárních bouří

Databáze supercel v ČR vznikla původně jako jeden z pozorovacích projektů sdružení Amatérská meteorologická společnost (dále jen AMS z. s.) s cílem zmapovat jejich výskyt v ČR. Potvrzení supercelární povahy bouří však bylo bez potřebných dat často velmi problematické, a tak v databázi byly zpočátku jen opravdu výrazné případy, kde byla pravděpodobná povaha bouře zřejmá již podle veřejně dostupných radarových dat, ale i vizuální struktury zachycené fotograficky nasvědčovaly možnému supercelárnímu charakteru bouře. Výrazné zlepšení situace nastalo po poslední modernizaci radarové sítě CZRAD, odkdy pracujeme na vývoji softwaru s novými možnostmi zpracování radarových dat. Jemnější zobrazení objemových a dopplerovských měření totiž umožnilo analyzovat situaci mnohem detailněji, a tak identifikovat i jevy dříve přehlížené. Tento typ dat ovšem není veřejně dostupný mimo ČHMÚ a hlavní slovo ve vyhodnocování případů supercel tak přešlo právě na Radarové oddělení ČHMÚ. V současnosti probíhá příprava nové struktury databáze, jež byla v původních amatérských podmínkách AMS z. s. vedena formou tabulky v Excelu. Takové řešení je však s ohledem na další rozšiřování databáze nevyhovující, a to jak kvůli velkému množství případů, tak i možnosti následného dalšího zpracování obsahu do map, statistik apod.



Obr. 1 Pseudo-RHI řez konvektivní buňkou ukazuje postupný zánik původního BWER (a) a vytvoření nového (b).
Fig. 1. Pseudo-RHI convective cell cross section shows that while the old BWER (a) was disappearing, the new one started to develop (b).

3. Supercely v roce 2018

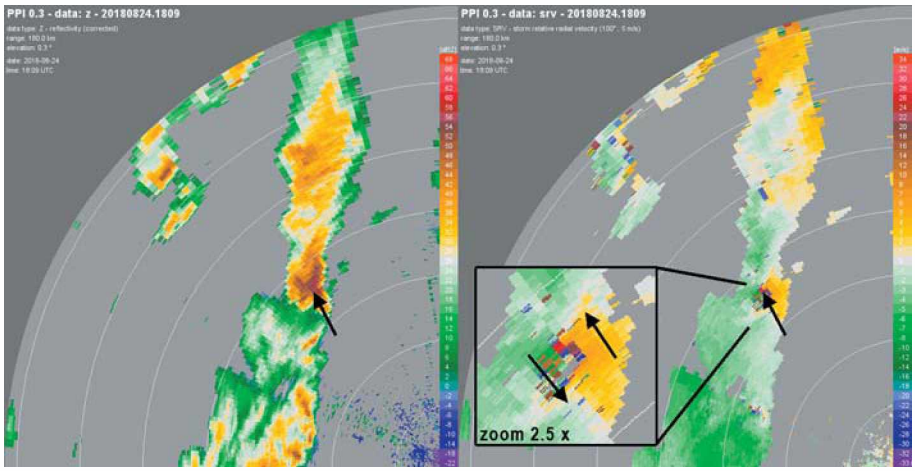
Tab. 1 Přehled dnů roku 2018 s výskytem pravděpodobných supercel a počet pravděpodobně supercelárních buněk v daný den.
Table 1. Overview of days in 2018 with probable supercells detected and with a number of probable supercells in particular days.

Datum	Počet buněk
23. 4.	1
3. 5.	1
11. 6.	4
24. 8.	1

Jak už bylo zmíněno výše, rok 2018 nebyl na supercely rokem příliš bohatým (tab. 1), a to i z důvodu menší četnosti výskytu konvektivních bouří obecně. Přesto se však vyskytla situace, která stojí za podrobnější analýzu, a to 11. červen s výskytem extrémního krupobití na hranicích Bavorska a Čech v oblasti hraničního přechodu Folmava. Situace byla zdokumentována fotografiemi a videem jak od členů AMS z. s. (Opalecký et al. 2018), tak i Czech Thunderstorm Reserach Association. Už jen vizuální struktura bouře zachycená fotograficky ukazuje na velmi pravděpodobný supercelární charakter dané bouře a radarová data vykazují znaky, jež jsou typické pro supercelární bouře (např. Markovski, Richardson 2012). Vertikální i horizontální radarové řezy bouří (obr. 1) ukazují výrazné ohraničené oblasti snížené odrazivosti (dále BWER), hákovité echo (oblast vyšší radarové odrazivosti ve tvaru háku) v horizontálních řezech bouří v nejnižších hladinách a v některých termínech i výraznou rotaci bouře patrnou na datech radiálních dopplerovských rychlosti. To je v dobrém souladu se skutečností, že šlo o bouři výrazné intenzity. Kroupy zde dosahovaly průměru až přes 6 cm a způsobily značné škody jak na porostech, tak na automobilech, ale i viditelné škody na budovách. Původcem tohoto krupobití byla supercela, která vznikla už před polednem světového času na území Německa a postupovala dále k východu a postupně v českým Pošumaví až téměř k jihovýchodu. Bouře nakonec zanikla kolem 17:00 UTC na Prachaticku. Oproti jiným případům bylo u této bouře možné na vertikálních radarových řezech pozorovat i „cyklování“ supercely. Jde o případy, kdy jeden updraft a s ním spojená uzavřená oblast snížené odrazivosti slábne, zatímco je průběžně nahrazována nově vzniklou, a to stále v rámci jedné konvektivní buňky.

V rámci jihozápadu Čech se v ten den vyskytly celkem 4 bouře s patrným supercelárním charakterem, ale zbylé 3 byly bez výrazných projevů, jaké byly pozorovány u popsané bouře.

Druhou situací roku 2018, jež krátce zmíníme, byla supercela ve východních Čechách 24. srpna. Na výskyt možné supercelární bouře upozornily fotografie a hlášení od amatérského meteorologa z Pardubicka (Michálek, Rýva 2018). Jde tak o velmi pěkný případ, kdy právě pozorování amatérů upozorní na jev, který bychom mohli jinak přehlédnout. K dispozici nejsou žádné informace o tom, že by tato bouře způsobila nějaké výrazné škody v zasažené oblasti. Zajímavé ale je, že ač bouře měla vizuálně výrazné supercelární



Obr. 2 Výřez z dopplerovského PPI scanu s dosahem 180 km. Radar Skalky je v pravém dolním rohu každého z obrázků a kružnice vzdálenosti jsou po 25 km. Levý obrázek ukazuje data korigované odrazivosti v dBZ, pravý obrázek pak data radiální rychlosti přepočtené relativně k pohybu bouře. Černou šipkou je vyznačena poloha středu rotace mezocyklony bouře a smysl rotace ve zvětšeném výřezu. Bouře v poli odrazivosti nejeví typické supercelární znaky.
Fig. 2. Zoomed PPI data from Doppler radar scan with a range of 180 km. The Skalky radar site is situated in the right bottom corner of each of the images and distance indicating circles are plotted every 25 km. Left image shows radar reflectivity and right image is a plot of storm relative radial velocity. Black arrow indicates the centre of rotation of the storm and the same location in the field of reflectivity where the storm doesn't show typical supercell characteristics.

vzezření, a dokonce i dopplerovská radarová měření ukazují déle trvající a poměrně výraznou mezocyklonu (obr. 2), tak vertikální ani horizontální řezy touto buňkou nenaznačují žádné výrazné supercelární znaky a v některých fázích vývoje se bouře jevila spíše multicelárně. To samo o sobě svědčí o jisté problematičnost naší snahy o jednoznačné odlišení multicel od supercel v podobě jakéhosi „škatulkování“, které mnohdy tak úplně nezapadá do reálné přírody, s jejím často spojitým „spektrem“ různých jevů. I jednoznačně prokázané supercely mohou vykazovat mnohé multicelární znaky, jen nahrazování nových buněk starými se děje v podstatě kontinuálně.

4. Supercely v roce 2019

Co do četnosti výskytu supercel měl rok 2019 značně odlišný charakter než rok 2018. Zaznamenali jsme mnohem více dnů se zdokumentovaným výskytem pravděpodobných supercel (tab. 2), ale celkově i jejich mnohonásobně větší množství. To je dáno samozřejmě i tím, že v některých dnech došlo opět na velmi četný výskyt bouří se supercelárním charakterem.

Tab. 2 Přehled dnů roku 2019 s výskytem pravděpodobných supercel a počet pravděpodobně supercelárních buněk v daný den.
Table 2. Overview of days in 2019 with probable supercells detected and with a number of probable supercells in particular days.

Datum	Počet buněk	Datum	Počet buněk
10. 6.	4	21. 7.	5
12. 6.	4	6. 8.	4
13. 6.	15	7. 8.	1
15. 6.	1	12. 8.	1
21. 6.	3	20. 8.	4
1. 7.	10		

4.1 Epizoda z 10.–13. června

Červen 2019 byl na našem území nejen výrazně teplotně nadprůměrný, ale zároveň přinesl více zajímavých bouřkových situací. Vrcholem celého měsíce, a mnohde i celého roku 2019, byla právě epizoda 4 dnů s bouřkami počínaje večerem 10. června (Džugan et al. 2019). Na naše území tehdy od jihozápadu dorazil konvektivní systém, který vznikl spojením více bouří už na území Bavorska. Jednou ze zárodečných bouří tohoto systému byla supercela, která o několik hodin dříve způsobila extrémní krupobití v dlouhém pásu táhnoucím se přes Mnichov a jeho okolí. Mnohé z krup dosahovaly průměru kolem 5 cm.

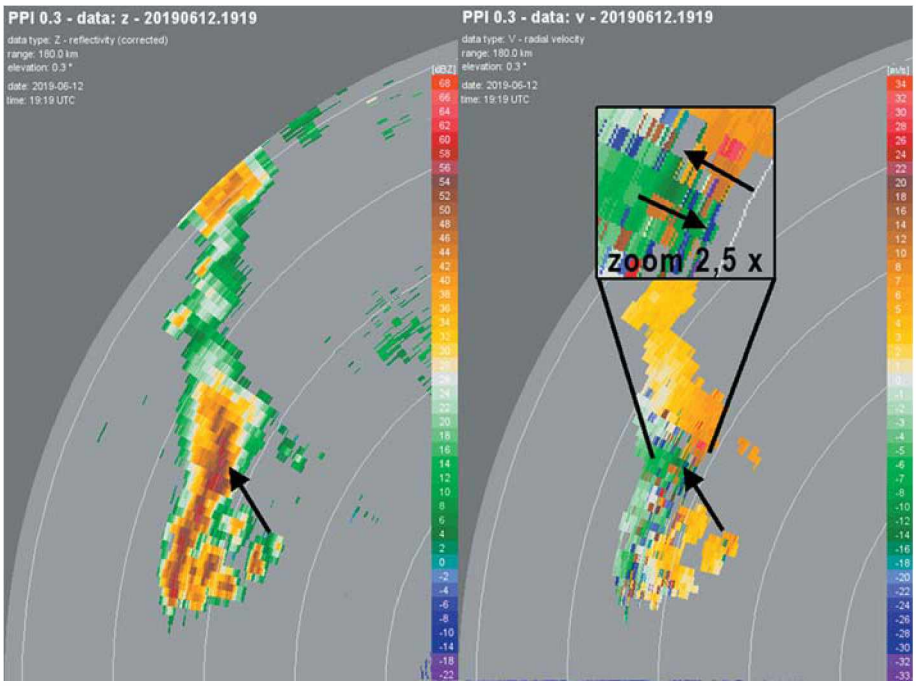
Následující den se bouře přesunuly do prostoru severně od Krušných hor a vyskytla se i jedna bouře s náznaky možného supercelárního chování i na západě Čech (Džugan et al. 2019).

Mnohem zajímavější bouře přinesl 12. červen, kdy intenzivní projevy v podobě silných krupobití zasáhly hlavně střední Čechy a jedna ze supercel doprovázená krupobitím přešla přímo přes Prahu. Severovýchodně od Prahy v ní pak byl hlášen dokonce výskyt velkých krup, kde hlavně v okolí Lysé nad Labem dosahoval průměr krup až kolem 4 cm. Další supercela, na kterou se v tomto rozboru zaměříme podrobněji, vznikla v oblasti Benešova a následně přešla Kolín jako součást většího konvektivního celku. Tato bouře, ač byla vizuální strukturou velmi působivá a s jasně patrnou výraznou mezocyklonou na dopplerovských radarových datech (obr. 3), se na vertikálních i horizontálních řezech neprojevila téměř žádnými znaky supercelárního charakteru bouře.

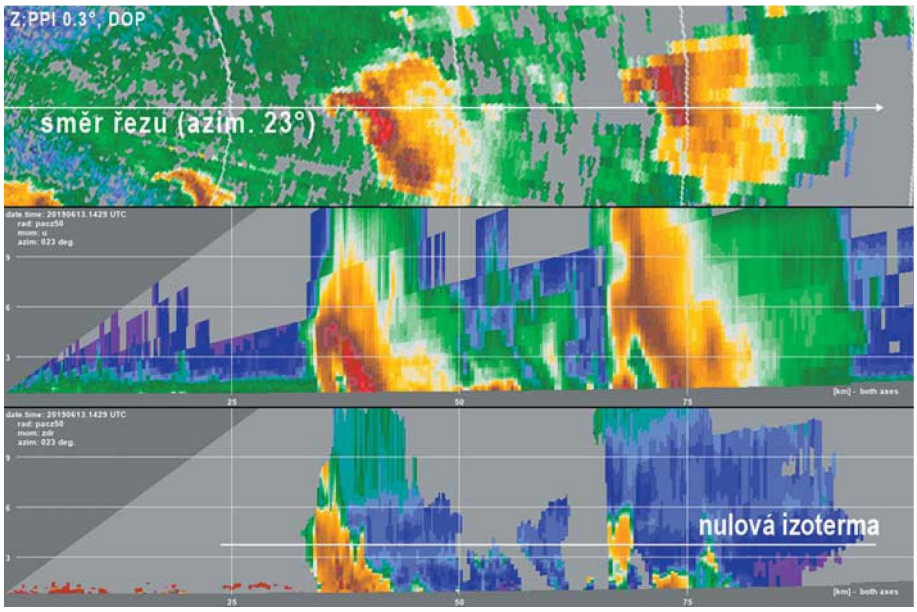
Tato konvektivní bouře přinesla do zasažené oblasti krupobití, ale bez hlášených velkých krup a byla doprovázena velmi intenzivní elektrickou aktivitou a přívalovými srážkami. Z pohledu četnosti blesků šlo o nejsilnější bouřku toho dne na území Česka.

Poslední den této epizody, 13. červen, přinesl největší počet bouří se supercelárními znaky za celý rok 2019, a to zejména v pásu Břeclav – Vyškov – Zábřeh – Jeseník (Geryk et al. 2019). Několik supercel ale během následující noci zasáhlo ještě jižní Čechy a Vysočinu. Bouří s pravděpodobným supercelárním charakterem se celkem vyskytlo 15 a u dalších 4 je určení nejisté, kdy sice vykazují některé supercelární znaky, ale v mnoha jiných ohledech se chovají spíše multicelárně. U většího množství buněk lze pozorovat vznik typického hákovitého echa a BWER (obr. 4) aniž by došlo na viditelné štěpení (rozdělení jedné buňky ve dvě opačně rotující bouře).

Takové chování nastává obvykle v prostředí se silným střihem větru ve směru, což se projevuje silně zakřiveným hodografem. To však neodpovídá hodografu z polední sondáže v Prostějově, kdy dynamika prostředí je jen mírná a zakřivení hodografu zejména v přízemní vrstvě není příliš příznivé. Bouře přesto



Obr. 3 Pohled z radaru Skalky ukazuje supercelu vnořenou v multicelárním systému přibližně v oblasti Kolína. Levý snímek je opět odrazivost a pravý je radiální rychlost vůči radaru Skalky. Poloha středu rotace je opět vyznačena černou šipkou.
Fig. 3. Supercell storm embedded in multicellular system located near Kolín (Central Bohemia). The left image shows reflectivity and the right one shows radial velocity relative to the Skalky radar site. Center of rotation is indicated with black arrow.



Obr. 4 Vertikální řez dvěma supercelami z pohledu radaru Skalky. Horní PPI obrázek radarové odrazivosti naznačuje směr vedení řezu, prostřední obrázek je odrazivost a spodní je polarimetrická veličina ZDR. Ta nabývá kladných hodnot směrem od bílé do teplých barev, záporných hodnot pak směrem do chladných barev. Výrazně kladné hodnoty jsou obvykle spojeny s velkými kapkami, jež mají větší horizontální průměr než vertikální. Zde jsou zjevně velké kapky vyneseny silným výstupným proudem do výšek až několik km nad nulovou izotermu.
Fig. 4. Vertical cross section of two supercells as seen with the Skalky radar. The upper PPI image shows the direction of the vertical cross section, image in the middle represents radar reflectivity and bottom image shows ZDR values. Warm colours of ZDR indicate positive values (associated usually with large water droplets having horizontal diameter larger than vertical), cold colours represent negative values. It is evident that larger water droplets were transported with the strong updraft of the storms up to several kilometres above a freezing level.

způsobily četná silná krupobití, kdy největší hlášené průměry krup dosahovaly až kolem 6 cm. Rovněž došlo na lokální škody větrem a četné případy lokálního zatopení v důsledku přívalových srážek. Popisovat zde však chování všech supercel z daného dne je nad rámec tohoto článku.

4.2 Další zajímavé situace

a) Četný výskyt supercel 1. července

Dalším dnem s výskytem silných bouří a zároveň i četných supercel byl 1. červenec, kdy máme potvrzených 10 pravděpodobných supercel na území ČR a v blízkém okolí (zejména v Polsku severně od Klodska). Z mnoha míst Čech i Moravy přišla hlášení o výskytu silných krupobití, a to hlavně z okolí Č. Budějovic a poté z okolí Olomouce (Prouza et al. 2019). Oba pásy zřejmě souvisí s postupem supercel. Zejména pak ze střední Moravy jsou i hlášení o silné húlavě, doprovázející přechod bouřkového systému. Rozsahem však zdaleka nedošlo k naplnění kritérií pro označení větrné události termínem derecho (viz např. Rýva 2016, nebo eMS 2020).

b) Supercely 21. července

Pět pravděpodobných supercel v dosahu sítě CZRAD přinesl i 21. červenec. Supercela s nejvýraznějšími radarovými příznaky opět jevila znaky cykličnosti, podobně jako supercela z 11. června 2018 a stejně jako ta se vyskytla opět na jihozápadě Čech. Opět došlo i na výskyt velkých krup (Švarc et al. 2019).

c) Lokální škody větrem a supercely 20. srpna

Poslední den roku 2019 s potvrzeným výskytem pravděpodobně supercelárních bouří byl 20. srpen, kdy Vysočinou a Moravou prošly 4 takové bouře. Nejzajímavější z nich byla ta, jež vznikla kolem 18:40 UTC v oblasti Týna nad Vltavou a postupovala během dalších hodin přes Jihlavu až do cca 23:00 UTC kdy zanikla v oblasti Budišova nad Budišovkou. V oblasti Moravičan a Uničova došlo v rámci této bouře ke vzniku značných lokálních škod větrem a spekulovalo se o výskytu tornáda, což se nepotvr-

dilo. Velmi pravděpodobně šlo o intenzivní microburst, nebo více microburstů. To by odpovídalo i velmi vysoké radarové odrazivosti až přes 68 dBZ zjištěné v dané bouři v zasažené lokalitě.

d) Podezření na výskyt tornáda na Litoměřicku 7. srpna

Tuto situaci jsme si nechali až na závěr, a porušili tak jinak předchozí chronologické řazení situací v tomto článku. Jde totiž o supercelu, na které se mohlo vyskytnout tornádo. Bouře opět z pohledu radaru jevila znaky cyklování s velmi dobře patrným hákovitým echem a mezocyklonou na dopplerovských měřeních. V čase a místě možného výskytu tornáda však vše vypadá spíše na výskyt downburstu, čemuž nasvědčuje i následný pozemní průzkum škod. I tato bouře byla bohatě zdokumentována větším počtem lovců bouřek (Novotný et al. 2019).

5. Radarová detekce updraftů bouří

5.1 Produkt ZDR column height (ZDRCH)

Pořízení polarimetrických radarů v roce 2015 znamenalo možnost začít testovat různá využití polarimetrických radarových veličin pro rozličné účely, od zlepšení filtrace nemeteorologických cílů z radarových dat až po produkty určující skupenství a další vlastnosti srážkových částic. Jednou z často využívaných polarimetrických veličin je ZDR, někdy označovaná jako rozdílová odrazivost. Ta umožňuje odhad poměru horizontálního a vertikálního poloměru srážkových částic. Například pro velké kapky vody, které jsou mírně zploštělé, dosahuje ZDR kladných hodnot v řádu jednotek dBZ, pro sníh a kroupy obvykle nabývá hodnot kolem nula dBZ a např. pro velké kroupy, které mnohdy padají orientované větším průměrem na výšku, nabývá ZDR záporných hodnot někdy až několik dBZ.

Jelikož v updraftech konvektivních bouří je vzduch často znatelně teplejší než jeho okolí a zároveň kapky vody se mohou udržet kapalné až do teplot výrazně pod bodem mrazu, lze usuzovat na skutečnost, že se zde mohou vyskytovat vodní kapky i ve výškách, kde je v okolí voda již zmrzlá a tvoří ledové krystalky. To se ale nutně musí projevit právě na hodnotách ZDR, kdy v oblasti updraftů bouří se výrazné kladné hodnoty ZDR objeví ve výšce někdy až několik kilometrů nad hladinou nulové izotermy. Tyto kladné hodnoty ZDR mají charakter jakýchsi sloupců (obr. 4, dolní část), jež lze snadno detekovat při zpracování objemových radarových dat. Takový produkt pak můžeme využít na lokalizaci a odhad síly updraftu dané konvektivní buňky (Snyder et al. 2015).

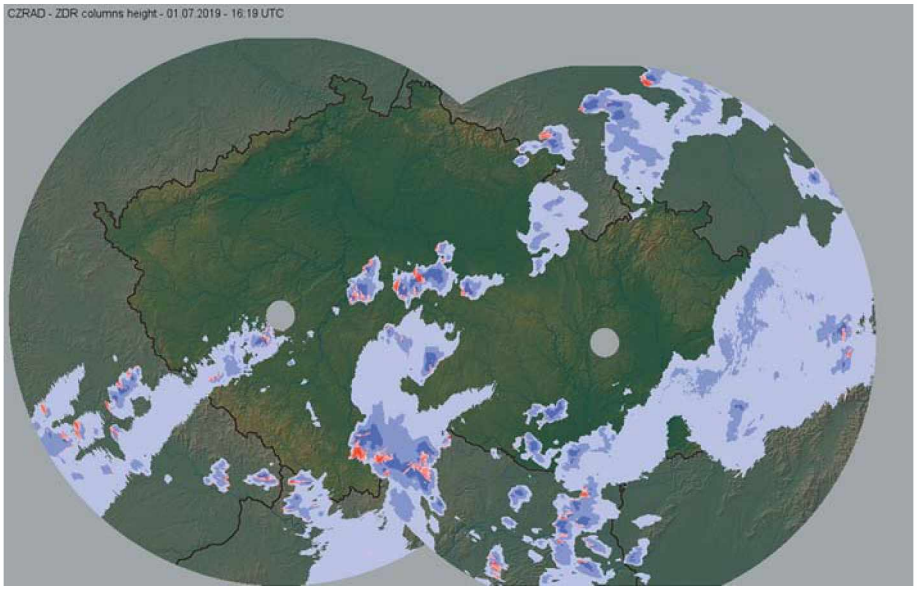
5.2 Zpracování dat

Použití samotné veličiny ZDR je ovšem často problematické, a to i pro vizuální interpretaci. Důvodem je velká variabilita hodnot ZDR zejména v oblastech s velmi nízkými hodnotami odrazivosti v okrajových částech srážkové oblačnosti. Z tohoto důvodu je vhodné použít i data samotné odrazivosti k filtraci dat ZDR a zamaskovat veškerá data pro odrazivosti nižší než nastavený práh. Po ozkoušení různých prahových hodnot se nejlépe osvědčila hodnota 16 dBZ. Výrazně se tak zlepší nejen čitelnost samotných dat ZDR pro vizuální interpretaci, ale i použitelnost pro automatickou detekci updraftů výše popsaným způsobem.

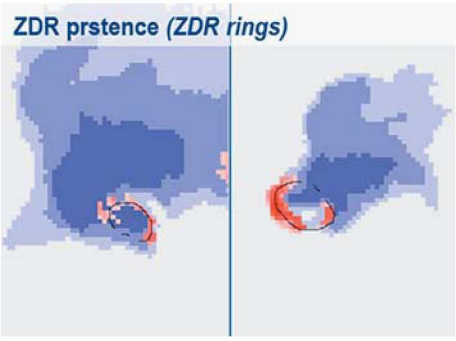
Další testování ale ukázala ještě na jednu komplikaci, se kterou se bylo nutno vyrovnat, a to chybné detekce updraftu v oblasti tzv. hail spike (celým názvem three body scatter spike). Jde o falešné odrazy, které vznikají za konvektivní buňkou ve směru od radaru tak, že mikrovlny vysílané radarem se od krup částečně odrazí i k zemskému povrchu, odtud se odrazí zpět na kroupy, které část signálu nakonec odrazí opět směrem k radaru (např. Markovski, Richardson 2012). Signál je radarem zpracován a jeví je jako falešný odraz v podobě jakési špičky za konvektivní buňkou (např. obr. 7).

Naštěstí se našlo efektivní a jednoduché řešení, jak tyto falešné detekce eliminovat. Pro srážky detekované radarem jsou typické vysoké hodnoty korelačního koeficientu mezi odrazivostí v horizontální a vertikální polarizaci. Pro nemeteorologické cíle jsou tyto hodnoty obvykle výrazně nižší, a jelikož dochází při vzniku hail spikes i k odrazu od zemského povrchu, tak právě zde by měly rovněž být nižší hodnoty korelačního koeficientu, který tak lze využít jako další pomocnou veličinu pro filtrování dat ke zpracování.

Výsledné zpracování pak probíhá interpolací dat všech tří radarových veličin nejprve do hladiny CAPPI ve výšce 500 metrů nad nulovou izotermou s rozlišením 500 metrů na pixel. Tam, kde i přes použitou filtraci jsou detekovány hodnoty ZDR nad



Obr. 5 Ukázka pokrytí Česka kompozitem z obou radarů a v modro-červeném testovacím zobrazení ZDRCH (červeně) v kombinaci se zjednodušeným zobrazením odrazivosti (modře).
Fig. 5. Example of composite visualization from both Czech weather radars. Red colours represent ZDRCH test image (darker red means higher ZDR column) and blue shades represent simplified image of field of reflectivity (darker colour means higher reflectivity).



Obr. 6 Ukázka několika ZDR prstenců, které se občas objevují zejména u supercelárních bouří. Modře jsou zobrazeny radarové odrazivosti podle intenzity srážek (nad 16, 30 a 44 dBZ v hladině 500 metrů nad nulovou izotermou) a červeně pak detekované updrafty bouře.
Fig. 6. Example of several ZDR rings which can be connected with mostly supercell storms. Blue shades are values of reflectivity higher than 16, 30 and 44 dBZ at a level of 500 meters above the zero isotherm, and the detected storm updrafts are shown in red.

prahovou hodnotou, jsou postupně počítány tyto hodnoty i pro větší výšky v kroku 250 metrů do té doby, než hodnota ZDR poklesne pod prahovou hodnotu detekce. Rozdíl takto nalezené výšky oproti výšce nulové izotermy je pak považován za výšku ZDR sloupce (hodnota ZDRCH). Dosah zpracování je pro data z obou radarů uměle limitován na 180 km. Důvodem je velká šířka paprsku radaru ve větších vzdálenostech a s tím související mnohem větší množství falešných detekcí v podobě šumu. Dalším důvodem proč právě 180 km je skutečnost, že speciální nízkohladinová dopplerovská měření mají dosah právě oněch 180 km a těsně pokrývají celé území ČR.

5.3 Zobrazování výsledných dat

Pro operativní použití bude potřeba nalézt vhodné zobrazování dat detekce updraftů přes data odrazivosti, případně vhodné kombinace několika radarových produktů v jednom zobrazení. Pro účely prvotního posouzení vývoje během zájmové situace, ale i pro prezentaci v tomto článku jsme použili zjednodušené modro-červené zobrazení (obr. 5). Různými odstíny modré barvy jsou naznačeny hodnoty odrazivosti v hladině 500 metrů nad nulovou izotermou a to postupně nad 16, 30 a 44 dBZ s tím, že čím tmavší, tím vyšší hodnota. Podobně je tomu s detekovanou výškou ZDR sloupků s tím rozdílem, že je použita červená barva. Světle růžová představuje výšku ZDR sloupce nad 0,5 km, sytě červená pak až nad 4 km.

6. Ukázky chování vybraných bouří pohledem produktu ZDRCH

6.1 ZDR prstence a ZDR oblouky

U supercelárních bouří se občas stává, že oblast ZDR sloupce se v místě rotující mezocyklony zformuje do tvaru prstence nebo části prstence. To se projeví prstencovou strukturou i na produktu detekce updraftů (ZDRCH). V angličtině se tato signatura označuje jako ZDR-ring, tedy ZDR prstenec (obr. 6). Někdy updraft vytvoří podobné struktury na rozhraní se sestupným proudem supercely a ty mají pak spíše tvar oblouku. V takovém případě hovoříme o tzv. ZDR-arc, neboli ZDR oblouku.

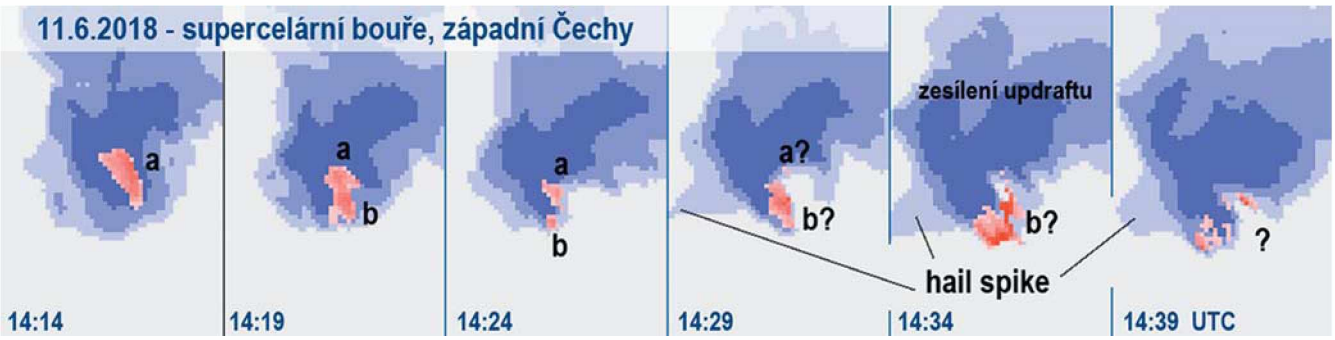
6.2 Cyklická supercela

Oblasti updraftu detekované s využitím produktu ZDRCH (obr. 7) nejsou dokonale totožné s odhadnutým rozsahem updraftu podle dohledání BWER ve vertikálních řezech (obr. 1). I tak lze ale vysledovat jistou paralelu v chování updraftu bouře mezi oběma způsoby detekce. Obě zobrazení ukazují na cyklické chování sledované supercelární bouře z 11. června 2018, kdy jeden pulz updraftu je plynule nahrazován jiným (obr. 7). Jde asi o první takto detailně zmapovaný příklad pozorování cyklické supercely na území ČR. Velmi podobné chování pak vykazovala i supercela z 21. července 2019, opět na jihozápadě Čech, a to navzdory tomu, že byla výrazně menší a slabší a lze ho dohledat i u některých dalších bouří.

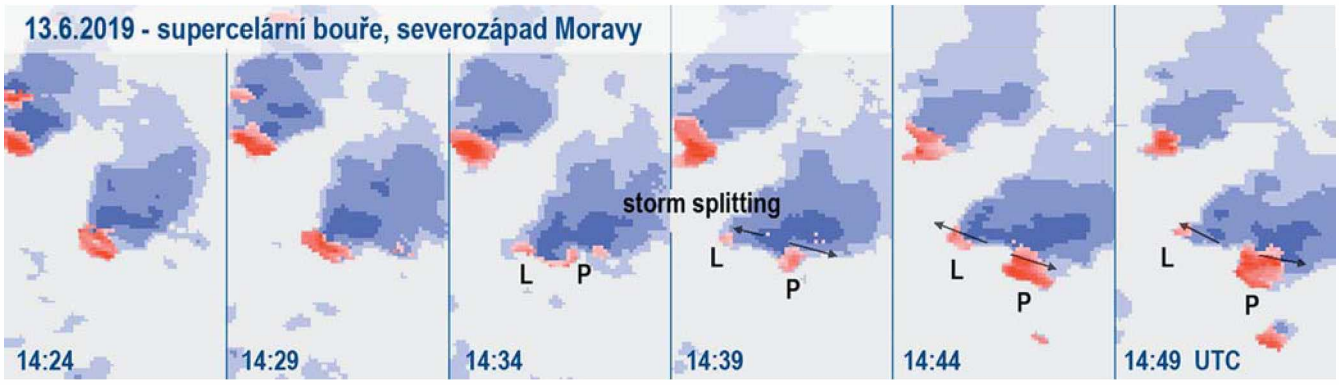
6.3 Štěpení bouře a dělení updraftu

Štěpení konvektivní bouře je obvykle spojováno hlavně se vznikem supercel, ale může se objevovat opakovaně po dobu existence supercelárních bouří. Velmi dobře je to patrné na sérii snímků bouře z 13. června 2019 (obr. 8), která už jako existující supercela prošla štěpením, kdy došlo nejprve k protažení a rozdělení updraftu bouře na dva samostatné updrafty a následně samostatný vývoj levostáčivé(L) a pravostáčivé(P) bouře. Na severní polokouli poté mívá větší intenzitu obvykle pravostáčivá bouře, což se stalo i v tomto případě.

Klasickou ukázkou štěpení je pak např. případ z 1. července 2019 (obr. 9), kdy došlo ke vzniku konvektivní buňky na severní straně Krkonoš. Při jejím postupu dále k východu následovalo její rozštěpení na dvě samostatné buňky, kdy obě jsou pohledem radarových dat podobné intenzity.



Obr. 7 Testovací zobrazení produktu ZDRCH zobrazující tutéž bouři a tentýž vývoj jako na obrázku 1.
Fig. 7. The same storm as in Fig. 1 as presented by the ZDRCH product test image.

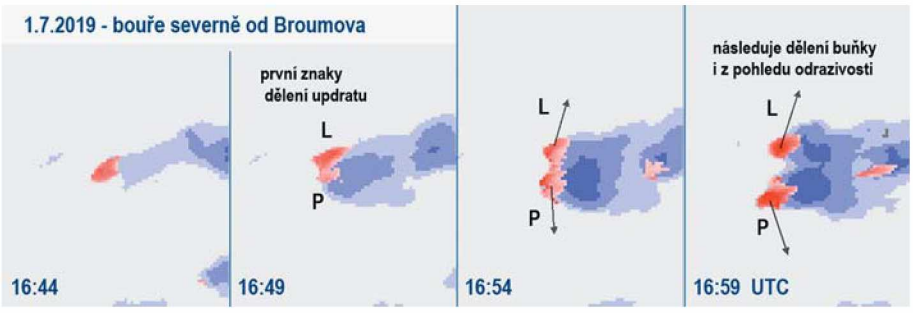


Obr. 8 Stejný způsob zobrazení produktu ZDRCH na pozadí radarové odrazivosti. Obrázek ukazuje velmi zajímavý vývoj bouře uprostřed obrázku, která byla supercelou (pravá bouře z obr. 4).
Fig. 8. The same storm as in Fig. 4 (at right) as presented by the ZDRCH product test image. The time sequence clearly shows the storm splitting an already existing supercell.

6.4 Kolísání intenzity updraftu vs. projevy bouře

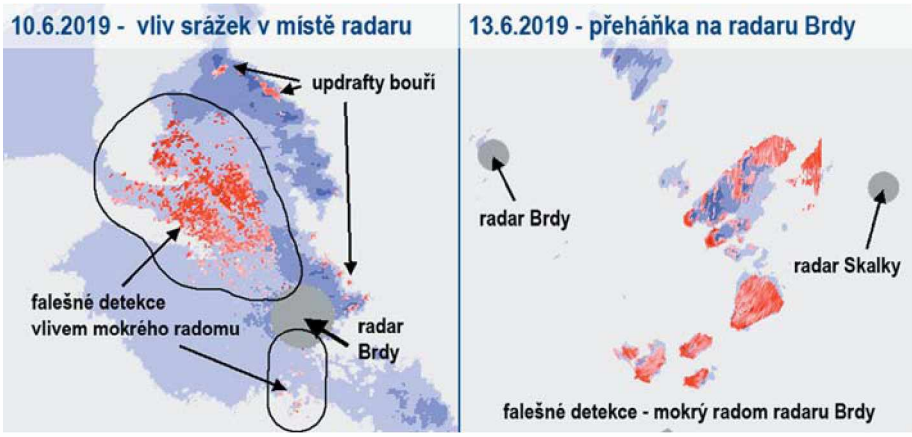
Všechna pozorování supercel ukazují, že jejich updrafty nejsou tak jednoduché, stabilní a neměnné, jak se může z učebnic zdát. Dobře to ukázal už příklad cyklické supercely a plynulý vznik nového hlavního updraftu na úkor staršího. I každý jednotlivý updraft supercely vykazuje značné kolísání intenzity v podobě pulzů, přechodných zesílení a zase oslabení, což se může opakovat mnohokrát během životního cyklu takové bouře. Zajímavá může být souvislost mezi náhlými a prudkými pulzy updraftu a následným výskytem krupobití, kterou naznačuje už i naše prvotní testování na několika případech z léta 2017. Nejde o nic nečekaného, právě naopak. Stejně tak i případy interakcí multicel naznačují, že když dochází ke splynutí více bouří s různým směrem nebo rychlostí pohybu, lze často detekovat přechodné zesílení updraftů a výrazné zvětšení jejich plošného rozsahu. S největší pravděpodobností jde o následek nuceného výstupu vzduchu mezi bouřemi, jenž je vyzdvižen čely jejich chladnějších výtoků. Následuje přechodné zintenzivnění projevů, často v podobě přechodně silného krupobití. Velmi názorným případem takového chování konvekce je situace z 16. června 2019 v oblasti Vyškovska (obr. 10).

U některých sledovaných případů bouří došlo k nejintenzivnějším projevům až v době, kdy došlo ke konečnému zeslábnutí déletrvajícího silnému updraftu. Intenzivní projevy obvykle následovaly během následujících cca 5–15 min. To je případ jak supercely na Litoměřicku ze 7. srpna 2019, tak i zmíněného pravděpodobného microburstu v okolí Mohelnice 20. srpna 2019.

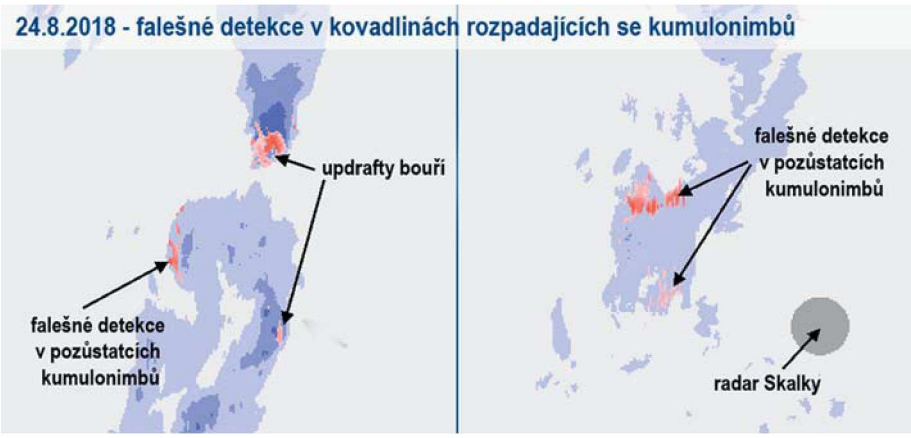


Obr. 9 Další ukázka štěpení konvektivní bouře pohledem detekce updraftů.
Fig. 9. Another example of a convective storm splitting as seen through updraft detection.

Obr. 10 Spojení dvou bouří provázená zesílením updraftů a následným silným krupobitím.
Fig. 10. Merging of two storms which led to intensification of updrafts of the storms and local severe hail storm.



Obr. 11 Vliv srážek v místě radarové stanice na detekci updraftů.
Fig. 11. An example of false detection caused by a wet radome during rain at the radar site.



Obr. 12 Falešné detekce v rozpadajících se kumulonimbech.
Fig. 12. Another type of false detections typical for dissipating remnants of cumulonimbus clouds.

7. Omezení produktu ZDRCH

Veškeré měřící a detekční metody vždy mají i svá omezení a nedostatky, které ztěžují jejich plně automatickou interpretaci. U produktu ZDRCH lze takových omezení vytušit více už jen z fyzikální podstaty věci. Výrazné zploštění tekutých vodních kapek se projevuje zejména u kapiček větších rozměrů a tam, kde jsou updrafty bouří vyplněné jen drobnými kapkami, nemusíme touto metodou updraft vidět, případně můžeme podcenit jeho intenzitu nebo rozsah. Může to být i případ výše zmíněných BWER v supercelách, kde v jádru updraftu dochází někdy ke značnému snížení odrazivosti, a to dokonce i pod námi používaný limit filtrování dat pro zpracování. Dalším problémem mohou být různé útlumy signálu v případech, kdy se mezi sledovanou bouří a radarem nachází jiná, velmi intenzivní bouře.

Velmi nepříjemným problémem je pak vliv stékající vody po radomu (ochranné kupoli) radaru při srážkách v místě radarové stanice. Vlivem vertikálního odtoku vody z radomu dojde k většímu útlumu právě ve vertikální polarizaci, a signál s horizontální polarizací se tak jeví relativně silnější (Frech 2009). To vede ke zvýšení zobrazené hodnoty ZDR někdy až o 1 dBZ oproti realitě, a tak falešnému detekování ZDR sloupců tam, kde žádné nejsou, a to třeba i na velkých plochách (obr. 11).

Další důvod falešných detekcí updraftu, který se občas objevuje na okrajích již starších zanikajících kovadlin konvektivních bouří (obr. 12), by podle nás mohl být způsoben mikrofyzikou oblačnosti (Melnikov 2013). V těchto oblastech lze totiž nalézt výrazně kladné hodnoty veličiny ZDR, které svědčí o převládající horizontální orientaci částic. Nehodláme se zde pouštět do spekulací o tom, proč tomu tak je, ale je dobré i tento typ falešných detekcí zmínit.

8. Závěr

Podrobnější rozbor významných bouřkových situací z let 2018 a 2019 opět potvrdil, jak obtížná je mnohdy snaha o odlišení supercelárních a multicelárních bouří. Z uvedených případů je zřejmé, že některé bouře nelze naprosto jednoznačně zařadit do učebnicově vymezené „škatulky“. Mnohé supercely s jasně patrnou rotací v poli dopplerovských radiálních rychlostí změřených radarem (navíc s vizuálně učebnicovou strukturou oblačné základny typickou pro supercely) mohou ve vertikálních i horizontálních řezech radarové odrazivosti jevit multicelární strukturu. Rovněž platí, že supercely mohou být součástí většího multicelárního celku. Dále se na několika případech ukázalo, že i u nás v Česku se vyskytují cyklické supercely u kterých lze pozorovat plynulé nahrazování staršího hlavního updraftu jiným. Bohužel však lze jen málokdy sledovat slábnutí původní rotace a tvorbu a zesilování nové. Limitujícím faktorem je kvalita a schéma dopplerovských měření pole radiální rychlosti, která jsou velmi omezena na úkor nároků na hlavní objemové měření. Dalším často pozorovaných problémem dopplerovských měření u C-pásmových radarů je sama kvalita dopplerovských měření s využitím dual-PRF scanování. Často dochází ke vzniku velkého množství artefaktů právě v datech z oblasti konvektivních jader, která jsou při signálním zpracování mnohdy částečně vymazána, nebo jsou silně zašuměná. To vše vede mnohdy ke značnému zhoršení, nebo i znemožnění čitelnosti dat radiálních rychlostí právě v kritických oblastech.

Dalším neméně důležitým zjištěním je opětovné potvrzení poznatků z let 2016 a 2017 týkající se četnosti výskytu supercel na území České republiky. Supercelární bouře u nás totiž opravdu nejsou výjimečným jevem s opakováním jen jednou za několik let, jak se předpokládalo ještě před desetiletím, a i u nás je s nimi potřeba počítat jako s rizikovým jevem při některých situacích, kdy mohou působit velmi významné škody na majetku. Po letech 2016 a 2017 došlo i v roce 2019 ke dvěma situacím, kdy jsme zaznamenali 10 a více supercel za

jediný den. Některé z těchto bouří byly doprovázeny výskytem velkých krup a silným větrem působícím škody.

Ucelené zpracování většího množství situací nám pak poskytlo poměrně dobrý prvotní přehled o celkovém chování, využitelnosti, ale i o slabinách lokalizace updraftu bouří na základě detekce ZDR sloupců. Pozitivními zjištěními je např. schopnost detekovat nové updrafty v multicelárních bouřích, detekovat rozštěpení updraftu mnohdy ještě před viditelným štěpením buňky při štěpení bouře v poli odrazivosti, ale i plynulé obnovování updraftu v rámci cyklických supercel. Velmi hodnotným poznatkem se zdá být zesilování updraftů při spojování několika konvektivních systémů s odlišným vektorem pohybu a jejich občasný následný útlum, což může vést např. k přechodnému a lokálně silnému krupobití, ale i dalším projevům, jako jsou silné downbursty či lokálně intenzivní přívalové srážky v prostředí jinak vhodném spíše pro rychlý postup konvektivních jader se silným větrem jako hlavním rizikem.

Ačkoli jsme se v tomto článku zaměřili výhradně na situace z let 2018 a 2019, tak do zpracování a posuzování tohoto produktu už byly zahrnuty i vybrané situace z let 2016 a 2017 a rovněž i některé situace z roku 2020. Ze zpracovaného souboru situací tak plyne předběžné zjištění, že schopnost detekce se zdá být lepší při vyšších výškách nulové izotermy, tedy v teplejších vzduchových hmotách, kde je možné detekovat i updrafty zdánlivě slabších konvektivních buněk. Naopak v chladnějším prostředí se i u výrazných konvektivních jader s výskytem krup nemusí vyskytovat nijak rozsáhlé a silné updrafty (alespoň dle odhadu produktem ZDRCH). Tento poznatek nám naznačuje, že snaha o automatické vyhodnocování produktu ZDRCH na základě absolutních hodnot výšky ZDR sloupců, ale i jejich plošného rozsahu nebo objemu, může narazit na nemalé obtíže. Už sama znalost relativní polohy updraftu v konvektivní buňce a jejich chování v čase a prostoru ale může výrazně pomoci při odhadu dalšího vývoje konvektivních bouří. Stejně tak může jít o další velmi důležitou informaci např. pro zabezpečení letového provozu. Silné updrafty totiž mohou být spojeny s výskytem velkých krup i ve velkých nadmořských výškách, popř. mohou jejich tvorbu předem indikovat.

Pro širší a objektivnější využití produktu ZDRCH v operativním provozu však bude nutná další práce na verifikaci, a to nejen kvalitativně, ale i kvantitativně a na dostatečném množství dostatečně různorodých situací.

Poděkování:

Děkuji všem amatérským pozorovatelům bouřek, díky nimž je u nás k dispozici naprosto fantastická terénní dokumentace velkého množství případů silných konvektivních bouří, často s nebezpečnými projevy a následně i dokumentace škod jimi způsobených. Velké poděkování pak patří oběma recenzentům, jejichž připomínky a podněty pomohly ke zpřehlednění a zkvalitnění tohoto textu, ale rovněž byly podnětem pro další směřování výzkumných aktivit v oblasti využití polarimetrických radarových dat.

Literatura:

DRAHOKOUPIL, J., NOVOTNÝ, T., RÝVA, D., Databáze supercel [online], Amatérská meteorologická společnost z. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/projekt-databaze-supercel/.

FRECH, M., 2009. The effect of a wet radome on dualpol data quality. Extended abstract [online]. 34th Conference on Radar Meteorology [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/155405.pdf.

DŽUGAN, J., OPALECKÝ, L., ERBAN, D., MÜLLEROVÁ, D., DRAHOKOUPIL, J., NOVOTNÝ, T., TUHÁČEK, L., JANOUŠEK, M., 2019. Silné bouřky v JZ Čechách 10. 6. 2019 [online]. Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/silne-bourky-v-jz-cechach-10-6-2019.

DŽUGAN, J., OPALECKÝ, L., MÜLLEROVÁ, D., DRAHOKOUPIL, J., 2019. Bouřka vzhledově připomínající LP supercelu s trombami 11. 6. 2019 [online]. Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/bourka-vzhledove-pripominajici-lp-supercelu-s-trombami-11-6-2019/.

eMS, 2020. Elektronický meteorologický slovník [online], Česká meteorologická společnost [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné na WWW: http://slovnik.cmes.cz/.

GERYK, M., ŠVARC, J., ZÁHORCOVÁ, M., ČERNOCH, Z., VĚTŘÍŠEK, L., 2019. Bouřky a supercely na Moravě 13. června 2019 [online]. Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/bourky-a-supercely-na-morave-13-cervna-2019/.

MARKOVSKI, P., RICHARDSON, Y., 2012. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes, Royal Meteorological Society. ISBN 978-0-470-74213-6.

MELNIKOV, V., 2013. Wet ice cloud particles at subfreezing temperatures? Extendex abstract [online]. 36th Conference on Radar Meteorology [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://ams.confex.com/ams/36Radar/webprogram/Manuscript/Paper228616/WetIcePartcles.pdf.

MICHÁLEK, T., RÝVA, D., 2018. Bouřky na východě Čech 24. 8. 2018 [online]. Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/bourky-na-vychode-cech-24-8-2018/.

NOVOTNÝ, T., TUHÁČEK, L., KOUŘIL, J., 2019. Supercela na Lounsku 7. 8. 2019 [online]. Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/supercela-na-lounsku-7-8-2019/.

OPALECKÝ, L., DŽUGAN, J., ČÁSLAVA, R., ZÁHORCOVÁ, M., ŠVARC, J., 2018. Supercelární bouře v JZ Čechách 11. 6. a bouřky na Moravě 12. 6. 2018 [online], Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/supercelarni-boure-v-jz-cechach-11-6-a-bourky-na-morave-12-6-2018/.

PAVLÍK, J., KAKOS, V., STRACHOTA, J., 1988. Ničivé krupobití a húlavy na území ČSR dne 18. 8. 1986. *Práce a studie*, č. **14**, Praha: ČHMÚ.

PROUZA, T., ŠVARC, J., ZÁHORCOVÁ, M., ČERNOCH, Z., BOHÁČ, O., GERYK, M., KAŇOVSKÝ, J., 2019. Silné bouřky a kroupová smršť 1. 7. 2019 [online], Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/silne-bourky-a-kroupova-smrst-1-7-2019/.

RÝVA, D., 2018. Mimořádná četnost supercelárních bouří a derech v Česku v roce 2017. *Meteorologické zprávy*, roč. **71**, č. 6, s. 170–178. ISSN 0026-1173.

SETVÁK, M., NOVÁK, P., ŠÁLEK, M., 2004. Tornáda 31. května 2001 na území České republiky. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 4, s. 101–112. ISSN 0026-1173.

SNYDER, J. C., RYZHKOV, A. V., KUMJIAN, M. R., KHIAN, A. P., PICCA, J., 2015. A ZDR Column Detection Algorithm to Examine Convective Storm Updrafts. *Weather and Forecasting*, Vol. **30**, Issue 6, s. 1819–1844. doi: https://doi.org/10.1175/WAF-D-15-0068.1.

ŠVARC, J., ZÁHORCOVÁ, M., ČERNOCH, Z., 2019. Supercelární překvapení 21. 7. 2019 [online], Amatérská meteorologická společnost o. s. [cit. 9. 7. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.bourky.cz/supercelarni-prekvapeni-21-7-2019/.

Lektoři (Reviewers):
RNDr. Petr Zacharov, CSc.,
RNDr. Jan Sulan