

Vyhodnocení radarových produktů pravděpodobnosti výskytu krup a jejich využití v ČHMÚ

Evaluation of radar products estimating probability of hail occurrence and their use in CHMI

Hana Kyznarová

Český hydrometeorologický ústav
radarové oddělení
Generála Šišky 1/942, 143 00 Praha 412-Kamýk
✉ hana.kyznarova@chmi.cz

Petr Novák

Český hydrometeorologický ústav
radarové oddělení
Generála Šišky 1/942, 143 00 Praha 412-Kamýk

Radar measurements are one of the key data sources for detection and nowcasting of convective storms and accompanying severe phenomena. Radar algorithm estimating probability of hail occurrence was first implemented in the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) in 2004. Development of new radar products estimating probability of severe hail occurrence and their visualization has taken place in the CHMI in recent years. This article describes evaluation of radar products which, combined with temperature sounding measurements, determine probability of hail occurrence and provide estimates of maximum hail size. These products are operationally produced in CHMI and visualized in a new JSMeteoView2 application which serves as the main tool for visualization of radar data and other remote sensing data in combination with detailed geographical layers. The article discusses performance of radar hail products tested on a large set of data and their operational usability when estimating hail presence.

KLÍČOVÁ SLOVA: radar meteorologický – produkt radarový – kroupy – verifikace – odhad pravděpodobnosti výskytu krup

KEYWORDS: meteorological radar – radar product – hail – verification – estimation of probability of hail occurrence

1. Úvod

Radarová měření jsou jedním z klíčových nástrojů pro detekci a nowcasting konvektivních bouří. V rámci výzkumných a vývojových aktivit radarového oddělení Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) došlo v posledních letech k rozvoji radarových produktů i k jejich následnému využití v nowcastingových a vizualizačních aplikacích. Mezi nejdůležitější no-

vinky patří provozní implementace nových radarových produktů pro odhad pravděpodobnosti výskytu nebezpečných krup a odhadu jejich maximální velikosti, dále rozvoj nowcastingové metody CELLTRACK a vývoj nové webové zobrazovací aplikace JSMeteoView2, do které byly jak nové radarové produkty, tak i výstupy z modernizované metody CELLTRACK, implementovány.

Přestože primárním radarovým produktem pro detekci a sledování konvektivních bouří je rozložení radarové odrazivosti (nejčastěji ve formě maximálních odrazivosti s bočními průměty, popř. rozložení odrazivosti v konstantních výškových hladinách PseudoCAPPI), existují i další velmi užitečné odvozené produkty. Mezi ně patří produkty pro odhad pravděpodobnosti výskytu krup (vzhledem k délce tohoto termínu jsou pro účely tohoto článku dále používány zkráceně produkty detekce krup nebo (pokud je kontext jasný) pouze produkty), popř. odhadu jejich maximální velikosti, které jsou obecně založeny na analýze vysoké radarové odrazivosti v hladinách nad nulovou izotermou. První produkt detekce krup POH (Probability of Hail) byl v ČHMÚ implementován v rámci interně vyvíjeného softwarového balíku RVD/RPD (Novák et al. 2007), pro uživatele byl operativně dostupný v interní síti ČHMÚ v rámci webové zobrazovací aplikace JSMeteoView od roku 2004. Od roku 2013 je pak tento produkt využíván ve výstražné aplikaci JSWarnView (Novák, Kyznarová 2013). Produkt POH je založen na Waldvogelově metodě a jak píše např. Witt (1998), jeho výstupem je vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu krup bez ohledu na jejich velikost, tedy není optimalizovaný pro vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu nebezpečných krup. V rámci rozvoje zpracování radarových dat tak byly v roce 2019 do operativního provozu implementovány další produkty POSH (Probability of Severe Hail) a MEHS (Maximum Estimated Hail Size), které se zaměřují na vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu nebezpečných krup a na odhad jejich maximálních očekávaných velikostí. Tyto produkty byly uživatelům zpřístupněny prostřednictvím nové webové zobrazovací aplikace JSMeteoView2. Po modernizaci české radarové sítě v roce 2015 (Novák, Kyznarová 2016) umožňují nové dopplerovské polarimetrické radary Vaisala WRM 200 provádět také klasifikaci detekovaných radarových cílů pomocí produktu HydroClass, kde jednou z vyhodnocovaných kategorií jsou i kroupy. Z něj vycházející produkt DPOLH není v současnosti využíván v operativním provozu, je však interně testován. POH, POSH, MEHS a DPOLH jsou podrobněji popsány v kapitole 2.

Při používání produktů detekce krup je limitujícím faktorem skutečnost, že jejich verifikace je s ohledem na velmi malý prostorový i časový rozsah kroupových událostí velmi obtížná.

Z těchto důvodů je k dispozici pouze omezené množství verifikačních studií, a navíc ne všechny jejich výsledky jsou přímo použitelné v podmínkách Česka pro potřeby předpovědní a výstražné služby. Využitelnost Waldvogelovy metody pro detekci krup byla prokázána například v práci Liškové (2006) pro území Slovenska, v práci Hollemana (2001) pro území Holandska nebo v práci Betscharta a Heringa (2012) pro území Švýcarska. Pro území Česka provedla vyhodnocení Skripniková (2013), Skripniková a Řezáčová (2014) nebo Skripniková et al. (2017), ta se však primárně zaměřila na modifikované algoritmy a její výsledky tak jsou pouze omezeně využitelné. Výše uvedené verifikační studie kromě práce Betscharta a Heringa (2012) provádí prostorové a časové přiřazení radarových produktů ke kroupovým událostem poměrně volně např. pomocí hodinových časových oken nebo i denních maxim a přiřazování hodnot jednotlivým kroupovým událostem z okolí o hraně i 10 km a více. Pro podporu širšího využívání radarových produktů detekce krup v předpovědní a výstražné službě ČHMÚ jsme se zaměřili na jejich verifikaci za použití co nejpřesnějšího prostorového a časového přiřazení k jednotlivým kroupovým událostem, k čemuž jsme využili záznamy o kroupových událostech z evropské databáze nebezpečných meteorologických jevů ESWD (European Severe Weather Database) a také měření na profesionálních stanicích v Česku získané z databáze ČHMÚ CLIDATA.

V následujících kapitolách budou stručně popsány jednotlivé produkty detekce krup, bude popsána metodika použitá pro jejich verifikaci a prezentovány její výsledky. Dále budou představeny vizualizace modernizované nowcastingové metody CELLTRACK a nová webová zobrazovací aplikace JSMeteoView2, ve kterých jsou produkty detekce krup využívány.

2. Radarové produkty pro odhad pravděpodobnosti výskytu krup

2.1 Popis jednotlivých produktů

Radarová data na území Česka jsou primárně získávána z měření radarů Brdy a Skalky české meteorologické radarové sítě CZRAD, provozované Českým hydrometeorologickým ústavem, které celé území Česka pokrývají (Novák, Kyznarová 2016). Mimo tato data jsou v ČHMÚ k dispozici i měření z radarů sousedních zemí, která zasahují na území Česka. Data z těchto radarů slouží k tvorbě rozšířené sloučené informace pokrývající větší území za hranicemi Česka než radary sítě CZRAD, ale jsou též využívána k doplňování standardní české sloučené informace v případě výpadku nebo servisní odstávky jednoho z radarů sítě CZRAD (Novák et al. 2012; Novák, Kyznarová 2016). Doplňování sloučené radarové informace se nicméně v současnosti provádí pouze pro základní produkty odrazivosti (maximální odrazivost a PseudoCAPPI 2 km), nikoliv pro produkty detekce krup, které popisujeme dále.

V operativním provozu sítě CZRAD jsou v prvním kroku z naměřených objemových radarových dat vytvářeny jednotlivé produkty zvlášť pro každý radar. Ty jsou následně spojovány do sloučené informace pokrývající celé území Česka a blízké okolí. U všech produktů detekce krup je v současnosti toto slučování prováděno tak, že v místech, kde jsou dostupné produkty z obou radarů, je do sloučené informace zařazena vyšší hodnota.

Následující odstavce stručně popisují produkty POH, POSH, DPOLH a MEHS.

Produkt POH (v minulosti v ČHMÚ též označován jako HAIL_PROB), vychází z tzv. Waldvogelova algoritmu (Waldvogel et al. 1979) upraveného dle Witta et al. (1998) v rámci jím popsaného algoritmu HDA (Hail Detection Algorithm), kdy pravděpodobnost výskytu krup je odvozena od maximální výšky výskytu radarové odrazivosti alespoň 45 dBZ nad nulovou izotermou. Výška nulové izotermy se v rámci operativního zpracování získává ze sondážních dat. Konkrétně pravděpodobnost výskytu krup 10 % získáváme při výskytu odrazivosti větší nebo rovné 45 dBZ alespoň 1,625 km nad nulovou izotermou, pravděpodobnost s výškou roste a 100 % dosahuje při výskytu odrazivosti větší nebo rovné 45 dBZ ve výšce 5,5 km nad nulovou izotermou. Waldvogelův algoritmus je zřejmě nejrozšířenější metodou pro vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu veškerých krup bez ohledu na jejich velikost (a tedy nebezpečnost). Menší rozdíly můžeme v některých případech nalézt u přepočtu výšky na pravděpodobnost krup např. v článku Hollemana (2001) nebo Betscharta a Heringa (2012). Tento algoritmus však již není nejvhodnější pro vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu velkých krup (s velikostí větší než cca 15–20 mm). Jednou z možných metod je použít obdobný algoritmus, avšak hledat maximální výšku výskytu vyšší hodnoty odrazivosti než 45 dBZ, což je jedna z metod testovaných v práci Skripnikové et al. (2017), kdy byla použita hodnota 54 dBZ. Jako vhodnější se nicméně jeví komplexnější algoritmy vyvinuté primárně pro detekci nebezpečných krup.

V ČHMÚ byly pro tento účel implementovány i další části algoritmu HDA vyvinutého v USA Wittem et al. (1998). V rámci nich je nejdříve počítán produkt SHI (Severe Hail Index), což je vertikálně integrovaná veličina, kdy mezi hladinou nulové izotermy a horní hranicí bouře je integrována teplotně vážená kinetická energie krup vyjádřená pomocí radarové odrazivosti. Z produktu SHI jsou následně vypočteny produkty POSH a MEHS. Stejně jako POH udává také POSH pravděpodobnost výskytu nebezpečných krup v procentech. MEHS udává odhad maximální velikosti krup v milimetrech. Detaily výpočtu produktů SHI, POSH i MEHS je možné nalézt v článku Witta et al. (1998).

Posledním produktem využívaným pro odhad pravděpodobnosti výskytu krup je polarimetrický produkt DPOLH vzniklý zpracováním výstupů z klasifikačního algoritmu HydroClass, které jsou součástí dat měřených současnými radary sítě CZRAD. Klasifikační algoritmus HydroClass vyvinula firma Vaisala (Vaisala Oy 2016), která vycházela z algoritmů již dříve vyvinutých v USA, založených na specifických hodnotách či průbězích jednotlivých polarimetrických radarových veličin pro jednotlivé typy hydrometeorů a nemeteorologické cíle. V algoritmu je využívána horizontální odrazivost ZH, rozdílová odrazivost ZDR, korelační koeficient ρ_{HV} , odchylka od klouzavého průměru ZH, odchylka od klouzavého průměru rozdílu fází horizontálního a vertikálního pulzu ϕ_{DP} , KDP a výška. Je definováno několik funkcí příslušnosti (anglicky membership functions) výše uvedených veličin. Jednotlivé typy radarových cílů jsou pak určeny na základě hodnot, kterých tyto funkce nabývají. Algoritmus HydroClass vychází zejména z prací Schuura et al. (2003), Liu a Chandrasekara (2000), Lima et al. (2005) a Ryzhkova a et al. (2005). V nastavení, které je používáno v ČHMÚ umožňuje algoritmus HydroClass rozlišit radarové cíle na následujících 6 typů s přiřazenými číselnými hodnotami v závorkách: nemeteorologické cíle (hodnota 1), déšť (2), mokrý sníh (3), sníh (4), krupky (5) a kroupy (6). Do produktu

DPOLH jsou dosazovány hodnoty HydroClass z nejnižší měřené hladiny PPI 0,1°.

Vzhledem ke způsobu slučování produktů z jednotlivých radarů pro produkt DPOLH platí, že pokud alespoň jeden z radarů vyhodnotí v daném místě kroupy, jsou ve výsledném sloučeném produktu pro dané místo uvedeny kroupy.

Výška nulové izotermy, případně dalších izoterem (izoterma -20 °C pro výpočet SHI, POSH, MEHS) je v praxi získávána z aerologických sondáží ze stanice Praha-Libuš z výstupu ve 12:00 UTC. Sondážní měření v 18:00 UTC ovšem není vždy prováděno, za nejbližší vhodný čas sondáže je proto považován použitý čas 12:00 UTC. Takto získané hodnoty jsou pouhou aproximací.

Při využívání radarových dat a odvozených produktů je třeba počítat s jejich nepřesnostmi a nejistotami. V úvahu je třeba brát neviditelnost spodních hladin atmosféry s rostoucí vzdáleností od radaru, což je důležité zejména pro produkt DPOLH. Ostatní produkty vyhodnocují odrazivost ve vyšších hladinách a zde je proto důležitější brát v úvahu omezení plynoucí z vertikálního rozlišení dat a velikosti objemu radarového pulzu v těchto vyšších hladinách. Omezený počet měřených vertikálních hladin v kombinaci rozšiřujícím se radarovým pulzem s rostoucí vzdáleností způsobují nepřesnosti určení výšky radarového echa. Rozšiřování radarového pulzu dále zvyšuje pravděpodobnost pouze částečného zaplnění radarového pulzu, a tedy podhodnocování maximálních hodnot odrazivosti vlivem průměrování odrazů z většího objemu. Možnými nejistotami a nepřesnostmi vertikálních profilů odrazivosti se zabývají např. Delobbe a Holleman (2006). Kvalitou radarových produktů včetně POH a POSH se zabývá studie Nováka a Kyznarové (2020).

2.2 Metodika vyhodnocení jednotlivých produktů

Radarová měření umožňují při znalosti výšky některých významných izoterem počítání odvozených radarových produktů, které souvisí s výskytem krup v konvektivních bouřích. Zmíněné radarové produkty většinou jsou odvozené od přítomnosti vysokých hodnot radarové odrazivosti v hladinách nad nulovou izotermou. To ve výsledku znamená, že kroupový potenciál je detekován v době, kdy kroupy ještě nepadají na povrch země, a v čase, kdy začnou padat na povrch země, může být již hodnota produktu nižší a daná konvektivní bouře se již většinou nachází na jiném místě než v čase dosažení jeho nejvyšších hodnot. Z těchto důvodů jsme se snažili zvolit vhodný způsob vyhodnocení produktů detekce krup tak, aby vyhodnocení poskytlo co nejužitečnější výsledky pro možnosti jejich použití v operativě. Databáze nebezpečných jevů ESWD použitá pro verifikaci obsahuje významné případy kroupových událostí, tj. byly zaznamenány kroupy o velikosti alespoň 2 cm, případně byla zaznamenána souvislá vrstva krup 2 cm a vyšší. Měření na profesionálních stanicích v Česku získané z databáze ČHMÚ CLIDATA pak obsahují záznamy výskytu krup bez ohledu na jejich velikost. Při zpracování dat z databáze CLIDATA jsme se zaměřili mimo jiné na méně častý způsob verifikace, který v podmínkách ČR chybí, a to chybné radarové detekce kroupových událostí, které ve skutečnosti nenastaly. To do jisté míry umožňují měření na profesionálních stanicích ČHMÚ s přítomností pozorovatele, kdy v případě, že není zaznamenán jev kroupy v přítomnosti pozorovatele, lze předpokládat, že skutečně nenastal.

Ze záznamů databáze ESWD byly vybrány pouze záznamy z území Česka s kontrolou kvality 1 (tzn. ověřená důvěryhod-

ným zdrojem) a vyšší. Z těchto záznamů byly použity zeměpisné souřadnice (šířka, délka) výskytu události, čas jejího výskytu, přesnost času výskytu a informace o maximální velikosti krup, pokud byla uvedena. Z databáze ČHMÚ CLIDATA byly získány záznamy z profesionálních synoptických stanic a pro jednotlivé kroupové události byly použity informace o zeměpisných souřadnicích dané stanice, časovém období události a dále údaj o velikosti krup, pokud byl dostupný.

Krupobití je v čase a prostoru velmi omezeným jevem, a tudíž veškeré časové a prostorové nepřesnosti či nejistoty mají větší vliv na vyhodnocení než v případě prostorové a časové rozsáhlejších jevů. Snažili jsme se proto použít co nejpřesnější způsob přiřazování vyhodnocovaných veličin a pozemních měření tak, abychom co nejvíce omezili nejistotu v jejich vzájemném porovnání, a tedy aby získané výsledky co nejvíce reflektovaly pouze nejistoty či nepřesnosti produktů detekce krup, nikoliv dodatečné nepřesnosti způsobené jejich přiřazením. Stručný přehled časového a prostorového rozsahu krupobití se nachází v práci Skripnikové (2013) nebo podrobně v článku Changnona (1970), který pojednává o prostorových a časových charakteristikách krupobití. Changnon uvádí, že 80 % zaznamenaných krupobití mělo rozlohu < 41 km² což odpovídá čtverci o straně 6,4 km, a tedy okolí 3,2 km. Medián rozlohy krupobití je 20,5 km² (čtverec se stranou 4,5 km). Podle Changnona byla průměrná vzdálenost mezi jednotlivými případy krupobití 24 km, což ale znamená, že mnoho případů má tuto vzájemnou vzdálenost menší. Proto, aby se zabránilo chybnému přiřazování událostí, je vhodné vyhodnocovat produkty detekce krup v oblastech výrazně menších než uvedená průměrná vzdálenost.

Changnon dále udává typický čas pádu krup z oblasti ve vyšších hladinách bouře, kde docházelo k jejich růstu, na zem na 5–10 minut. Toto hraje roli při gridovém vyhodnocení, kdy radarové produkty odhadu pravděpodobnosti krup nabývají maxima právě v době, kdy jsou kroupy v oblastech růstu ve vyšších hladinách atmosféry. Vzhledem k tomu je potřeba zahrnout do zpracování kroupové události i časy 5–10 min před zaznamenaným výskytem, kdy se ovšem konvektivní bouře s ohledem na svůj pohyb nachází na jiném místě, než je místo detekce krup.

Podle interních vyhodnocení v ČHMÚ týkajících se pohybu konvektivních jader určených algoritmem CELLTRACK (Kyznarová, Novák 2008; Kyznarová, Novák 2009), který identifikuje a sleduje jádra odrazivosti rovné a vyšší než 44 dBZ, má 90% kvantil velikosti vektorů rychlosti jader s dobou života delší než 60 minut hodnotu 81,6 km·h⁻¹, medián pak hodnotu 37,8 km·h⁻¹. To potvrzuje i článek Waplerové (2021), kde pro oblast Německa do limitu 80 km·h⁻¹ spadá cca 95 % identifikovaných bouří, do limitu 40 km·h⁻¹ spadá 40–50 % bouří v závislosti na jejich době života.

Pokud tedy zahrneme prostorový rozsah krupobití aproximovaný čtvercovým okolím velikosti 3 km, dobu pádu krup na zem a velikosti rychlostí konvektivních jader, vidíme, že v okamžiku, kdy kroupy začínají svůj pád z vyšších výškových hladin, může být konvektivní bouře mimo aproximovanou oblast krupobití. Za účelem zahrnutí pohybu konvektivních bouří bychom tedy museli čtyřnásobně zvětšit okolí zaznamenané kroupové události na 13,5 km (pro 90% kvantil rychlosti pohybu bouří). Zvětšení plochy okolí kroupové události by pak bylo šestnáctinásobné, což by již vneslo do vyhodnocení produktů detekce krup nezanedbatelné nepřesnosti. Z tohoto důvodu byl použit algoritmus COTREC (Novák et al. 2007) pro extrapolaci radarových produktů POH, POSH, MEHS, DPOLH

na 5 min a 10 min tak, aby se kompenzoval vliv pohybu konvektivních bouří. Vektorové pole rychlostí použité pro extrapolaci produktů detekce krup bylo získáno z dat maximální odrazivosti. Při použití algoritmu COTREC můžeme tedy zůstat u použití 3 km okolí detekovaných kroupových událostí a výše zmíněným nepřesnostem ve vyhodnocení se vyhnout. Přesto je nutné konstatovat, že není možné zvolit univerzálně vhodné okolí kroupové události pro porovnání pozemních dat s radarovými produkty.

Vyhodnocení gridových produktů detekce krup bylo provedeno tak, že pro jednotlivé zaznamenané události byla vybrána informace časově z doby trvání události a dále z doby 5 a 10 minut před počátkem události posunutá algoritmem COTREC, prostorově pak z čtvercového okolí ± 3 km kolem gridového bodu, do kterého spadala daná zaznamenaná událost.

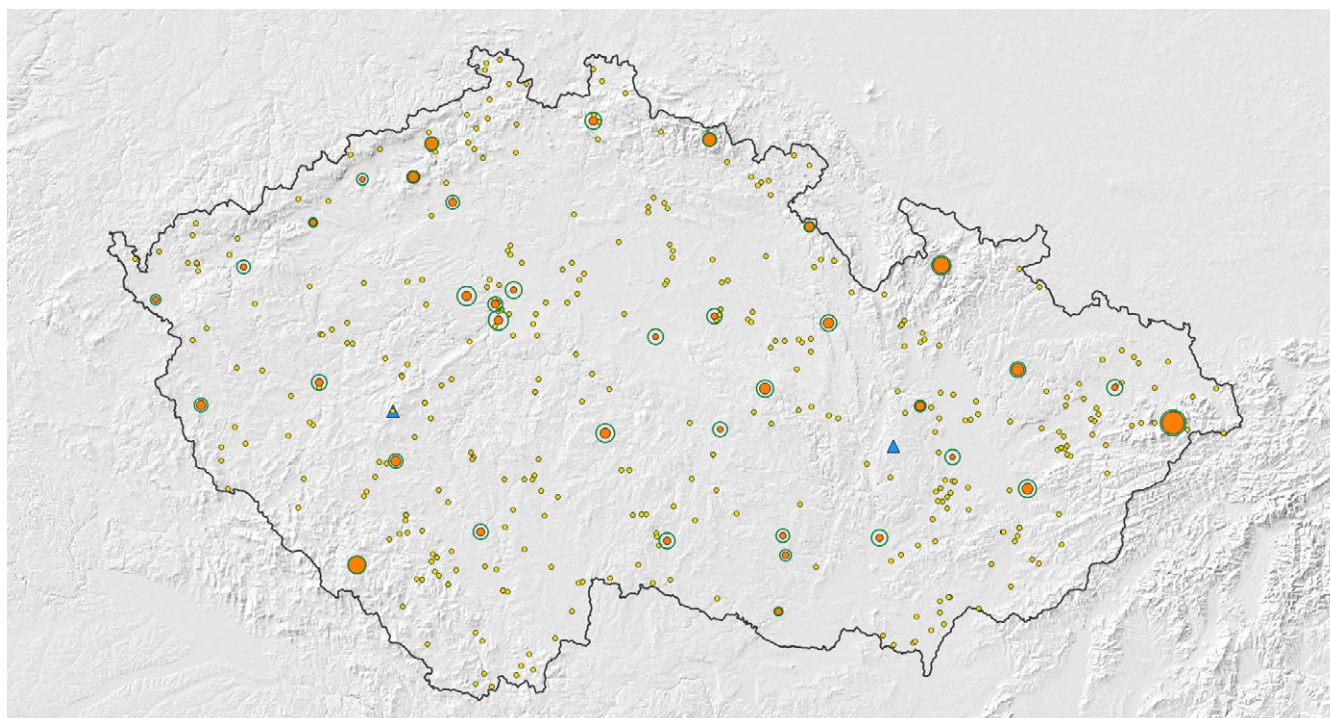
Aby bylo vyhodnocení jednotlivých produktů co nejucelenější, pokusili jsme se na datech z profesionálních stanic vyhodnotit také míru nadhodnocování výskytu krup. Vycházeli jsme z toho, že v době mezi 06:00–15:00 a 17:00–20:00 UTC je na profesionální stanici přítomna

obsluha, a tedy pokud nebyl v této době zaznamenán výskyt krup, předpokládáme, že žádné kroupy se nevyskytly. Po konzultaci s oddělením profesionální staniční sítě ČHMÚ byly zařazeny i termíny 15:00–17:00 UTC, kdy pozorovatelé mají přestávku v měření, nicméně obvykle jsou na stanici přítomni a významné jevy zaznamenávají. Pro vyhodnocení byly tedy vybrány události z časů 06:00–20:00 UTC. Aby nebylo nutné počítat vyhodnocované produkty pro celé níže definované jedenáctileté období, byly na základě staničních dat vybrány pouze ty termíny, kdy množství zaznamenaných srážek

Tab. 1 Počty případů kroupových událostí vybraných z databáze ESWD a z databáze CLIDATA. Sloupec CLIDATA (45 dBZ) udává podvýběr z případů CLIDATA, kde zároveň byla dosažena hodnota maximální radarové odrazivosti ≥ 45 dBZ. Další dva sloupce udávají počty případů, kdy byla zaznamenána velikost krup bez omezení a s omezením minimální dosažené odrazivosti hodnotou 45 dBZ. Poslední sloupec CLIDATA (45 dBZ) (bez krup) udává počty událostí na profesionálních stanicích v zadaném období, kdy 10 min sumy srážek odpovídaly radarové odrazivosti ≥ 45 dBZ a nebyly zaznamenány kroupy.

Table 1. Number of hail events processed from ESWD and CLIDATA databases. Column CLIDATA (45 dBZ) shows selection of CLIDATA events where maximum reflectivity reached values ≥ 45 dBZ, next two columns show events with recorded maximum hail size without a limit and with lower reflectivity limit of 45 dBZ. Last column CLIDATA (45 dBZ) (without hail) shows events on professional stations in investigated time period with 10 min precipitation sums corresponding to reflectivity ≥ 45 dBZ and with no recorded hail event.

	ESWD	CLIDATA	CLIDATA (45 dBZ)	CLIDATA (s velikostí krup)	CLIDATA (45 dBZ) (s velikostí krup)	CLIDATA (45 dBZ) (bez krup)
Vybrané případy celkem	370	434	354	257	217	949
Vybrané případy 2016–2021	282	224	188	131	103	502



Obr. 1 Případy kroupových událostí vybraných z databáze ESWD (žlutá) a z databáze CLIDATA (oranžová). Zelené kružnice znázorňují počet silných srážek na profesionálních stanicích v databázi CLIDATA s odpovídající odrazivostí ≥ 45 dBZ bez zaznamenaných krup. Velikost značek u databáze CLIDATA je úměrná počtu zaznamenaných událostí na dané profesionální stanici. Modré trojúhelníky znázorňují polohy radarů.

Fig. 1. Hail events selected from the ESWD database (yellow) and from the CLIDATA database (orange). Green circles show strong rain events on professional stations with corresponding reflectivity ≥ 45 dBZ and with no recorded hail events. Mark size for the CLIDATA database corresponds to the number of events observed at a given professional station. Blue triangles show CZRAD weather radar positions.

na profesionální stanici bylo ≥ 4 mm za 10 min (což odpovídá hodnotě radarové odrazivosti 45,09 dBZ, s ohledem na přesnost uložení radarových dat 0,5 dBZ tedy zaokrouhleně hodnotě 45 dBZ). Důvodem pro tento výběr je způsob výpočtu produktu POH, kde se berou v úvahu pouze hodnoty 45 dBZ a vyšší. Vzhledem k tomu, že vztah odrazivosti ke srážkám na zemi není přesný, je tento výběr orientační, nicméně pro naše účely ho shledáváme dostačujícím. Kromě těchto termínů byly do zpracování zahrnuty také termíny předcházející o 5 min a 10 min.

2.3 Vyhodnocení produktů

Vyhodnocení bylo provedeno na datech z databázi ESWD a CLIDATA z měsíců květen až září z let 2010–2014, 2016–2021, produkt DPOLH byl vyhodnocen jen na datech z let 2016–2021, kdy již byla dostupná polarimetrická radarová měření. Rok 2015 byl z vyhodnocení vynechán, neboť v tomto roce byly po řadě provedeny modernizace obou radarů Brdy a Skalky, a tedy v rozsáhlých časových úsecích nebyla síť CZRAD měřena radarová data v požadované kvalitě.

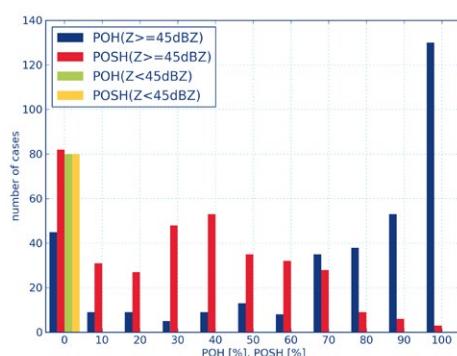
V tabulce 1 jsou uvedeny počty zpracovaných událostí z databáze ESWD a databáze CLIDATA, pro které byly vypočteny radarové produkty detekce krup. V případě ESWD se jedná o případy zaznamenané nad územím Česka. V případě databáze CLIDATA byly použity pouze záznamy z profesionálních stanic s přítomností pozorovatele. Obrázek 1 znázorňuje rozložení vyhodnocovaných případů z obou databází.

2.3.1 Kroupové události z databáze CLIDATA

Pro vyhodnocení produktů byly použity scatter ploty a rozložení četností, které jsou prezentovány v následujících odstavcích. Obrázek 2 znázorňuje rozložení četností pravděpodobnosti výskytu krup počítané pro produkt POH a POSH v případech zaznamenaných krup v databázi CLIDATA. Z grafu je patrný velmi vysoký počet POH a POSH rovných 0. Po prozkoumání maximálních odrazivostí dosažených v průběhu jednotlivých událostí jsme zjistili, že u 80 případů z celkového počtu 434 nebyl během celého průběhu události dosažen práh odrazivosti 45 dBZ. Vzhledem ke způsobu výpočtu POH na základě této hodnoty minimální odrazivosti je zřejmé, že hodnota POH je

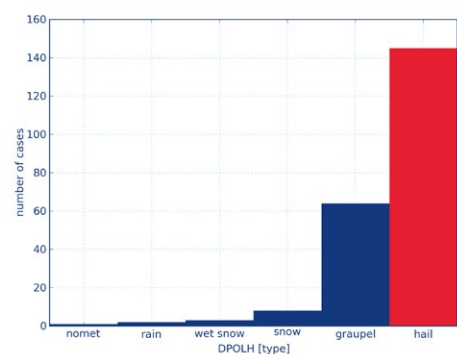
v těchto případech nulová. Při vyhodnocení produktu DPOLH jsme v obr. 3 zanesli do grafu rozložení četností podle šesti typů, kterých produkt DPOLH může nabývat. Vidíme, že ve většině případů výskytu krup nabývá hodnoty „kroupy“, případně „kroupy“. Ostatní typy hydrometeorů, případně typ „nomet“ byly produktem DPOLH identifikovány pouze okrajově.

Obrázek 4 znázorňuje rozložení četností produktů POH a POSH, ale tentokrát pro případy, kdy byly detekovány vysoké srážky, které odpovídaly radarové odrazivosti ≥ 45 dBZ, ale nebyl zaznamenán výskyt krup. Naprostá většina hodnot POH a POSH byla v těchto případech rovna nule. Z rozložení četností produktu DPOLH na obr. 5 vidíme, že převažují typy „sníh“ a „kroupy“, přestože se jedná o zpracování měsíců květen až září. Ukazuje se zde vliv nadmořské výšky na typ hydrometeorů a způsobu slučování produktu z jednotlivých



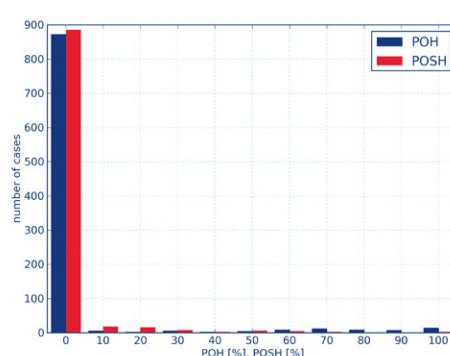
Obr. 2 Rozložení četností hodnot POH a POSH vypočítaných pro kroupové události zaznamenané na profesionálních stanicích v databázi CLIDATA. Žlutou a zelenou barvou jsou znázorněny počty případů, kdy odrazivost nedosáhla 45 dBZ.

Fig. 2. Frequency distribution of POH and POSH values for hail events on professional stations selected from the CLIDATA database. Yellow and green colours show events when radar reflectivity didn't reach minimum value of 45 dBZ.



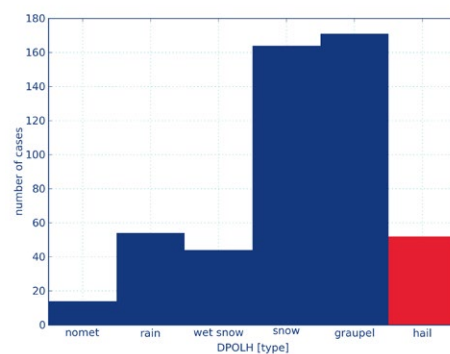
Obr. 3 Rozložení četností pro produkt DPOLH vypočítaných pro kroupové události na profesionálních stanicích zaznamenané v databázi CLIDATA.

Fig. 3. Frequency distribution of DPOLH product for hail events at professional stations selected from the CLIDATA database.



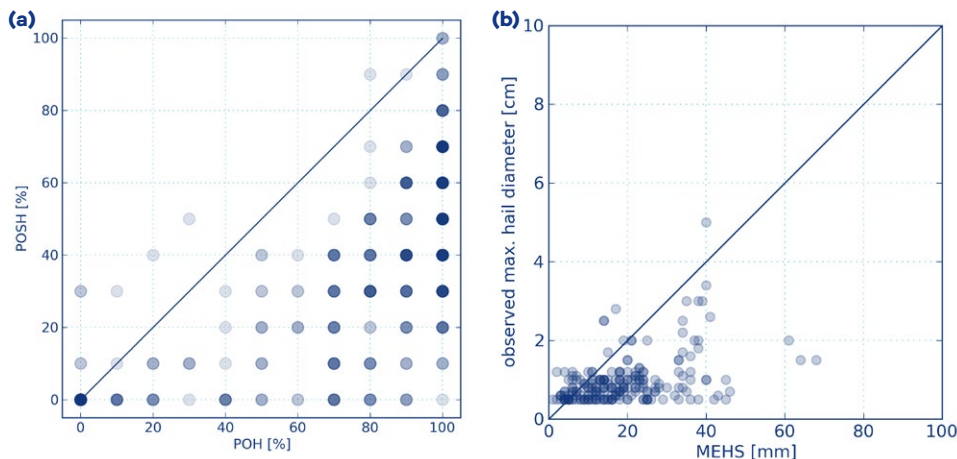
Obr. 4 Rozložení četností hodnot POH a POSH vypočítaných pro události na profesionálních stanicích se silnými srážkami odpovídajícími odrazivosti ≥ 45 dBZ bez výskytu krup zaznamenané v databázi CLIDATA.

Fig. 4. Frequency distribution of POH and POSH values for rain events without hail at professional stations selected from the CLIDATA database corresponding to reflectivity ≥ 45 dBZ.



Obr. 5 Rozložení četností kategorií DPOLH vypočítaných pro události na profesionálních stanicích se silnými srážkami odpovídajícími odrazivosti ≥ 45 dBZ bez výskytu krup zaznamenané v databázi CLIDATA.

Fig. 5. Frequency distribution of DPOLH category for rain events without hail at professional stations selected from the CLIDATA database corresponding to reflectivity ≥ 45 dBZ.



Obr. 6 (a) Scatter plot pro kroupové události na profesionálních stanicích zaznamenané v databázi CLIDATA pro produkty POH a POSH. (b) Scatter plot pro produkt MEHS a skutečně změřené maximální velikosti krup. Intenzita modré barvy ve scatter plotech odpovídá počtu případů.

Fig. 6. (a) Scatter plot of POH and POSH products for hail events selected from the CLIDATA database. (b) Scatter plot of MEHS product and measured maximum hail size. Intensity of blue colour in scatter plots corresponds to the number of events.

vých radarů. Jak je popsáno v kapitole 2.1, do slučovaného produktu je vybírán vždy typ hydrometeorů definovaný nejvyšší hodnotou v daném místě. Při slučování produktů z nejnižší PPI hladiny jednotlivých radarů mohou být vyšší hodnoty DPOL důsledkem větší vzdálenosti od radaru (a tedy větší nadmořské výšky PPI hladiny).

Obrázek 6(a) zobrazuje scatter plot hodnot POH a POSH. Vzhledem ke způsobu výpočtu by produkt POSH měl nabývat spíše nižších hodnot než POH. Ve shodě s očekáváním vidíme, že v naprosté většině případů je POSH nižší než POH. Obrázek 6(b) zobrazuje scatter plot hodnot produktu MEHS a skutečně měřených maximálních velikostí krup. Ze scatter plotu je patrné, že pro kroupové události zaznamenané v databázi CLIDATA produkt MEHS přeceňuje maximální velikosti krup.

V dalším kroku jsme provedli vyhodnocení pomocí veličin CSI (Critical Success Index), FAR (False Alarm Rate) a POD (Probability of Detection). CSI, FAR a POD jsou po řadě kategoričké míry celkové úspěšnosti předpovědi či odhadu výskytu jevu, míry chybně předpovězených výskytů jevu a pravděpodobnosti detekce výskytu jevu. Jsou vypočítány na základě tří kategorií odhadu výskytu a skutečného výskytu jevu. Kategorie YY znamená, že jev byl předpovězen a vyskytl se, kategorie NY značí jevy, které nebyly předpovězeny a vyskytly se, a kategorie YN značí jevy, které byly předpovězeny a nevyšly se. Na základě výše uvedeného platí následující vzorce: $CSI = YY / (YY + NY + YN)$, $FAR = YN / (YN + YY)$, $POD = YY / (YY + NY)$ podrobněji popsané např. v článku Roebbera (2009). Pro výpočet CSI, FAR a POD bylo použito několik sad dat. Jednak se jednalo o všechny výskyty krup, dále všechny výskyty krup, kdy byla zároveň dosažena odrazivost 45 dBZ a více. Z této sady byly poté vybrány čtyři sady dat, kdy navíc byly změřeny maximální velikosti krup a dosahovaly hodnot ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 15 mm a ≥ 20 mm. Grafické znázornění hodnot CSI, FAR, POD pro uvedených šest sad dat je znázorněno na grafech (a)–(f) v obrázku 7. Obrázky 7(a) a (b) znázorňují CSI, FAR a POD pro kroupové události bez ohledu na velikost krup. Z grafů je patrné podhodnocování výskytu krup pro-

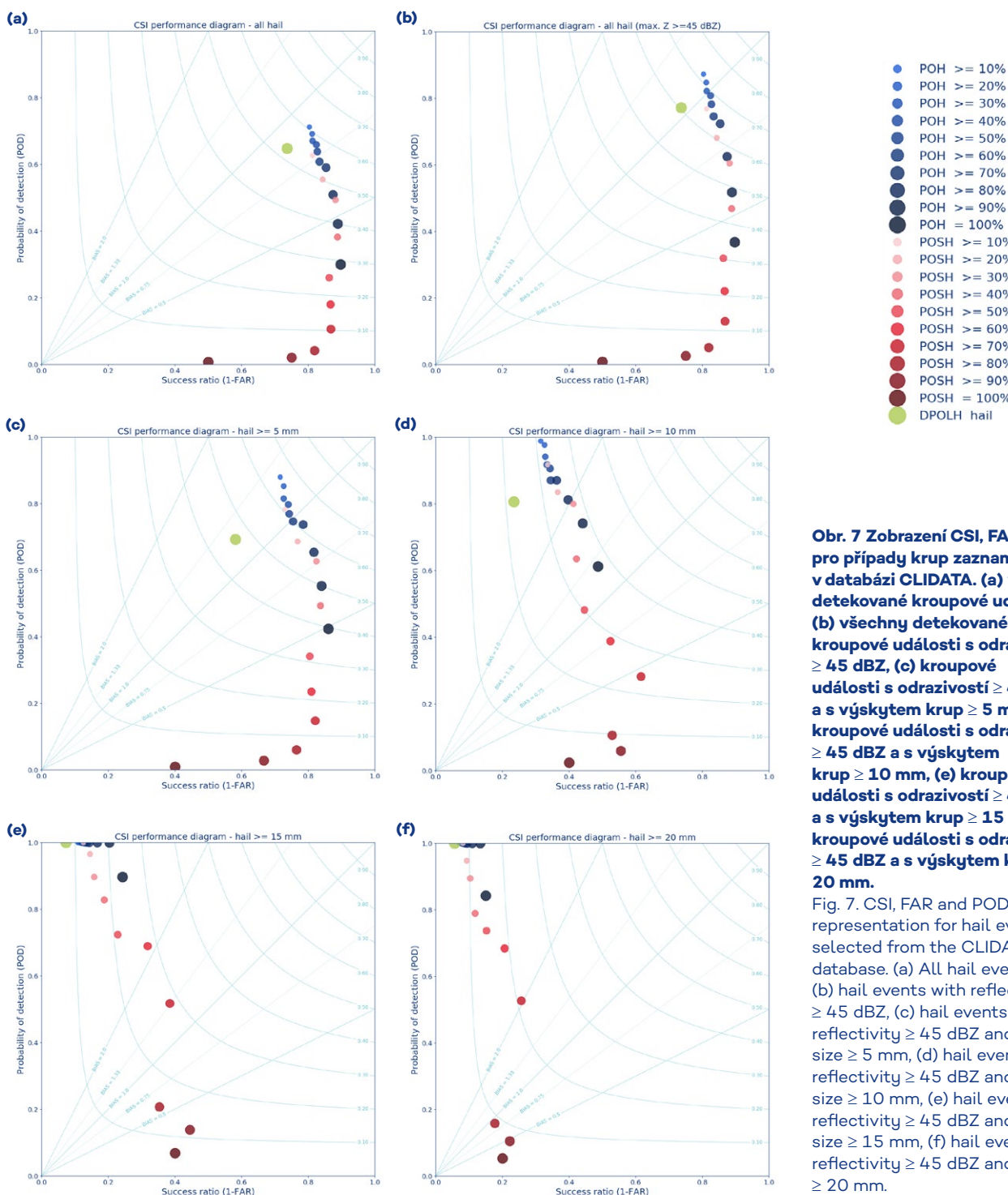
duktem POH dané nevhodností jeho použití pro odrazivosti do 45 dBZ. Pokud se omezíme na odrazivosti použitelné pro algoritmus POH, z grafu na obr. 7(b) je patrné, že nejlepších výsledků při odhadu výskytu krup bez ohledu na jejich velikost dosahuje produkt POH při pravděpodobnostech 30 %, příp. 40 %. Jak je vidět z tabulky 1, pouze u 217 případů z 354 se podařilo v záznamech databáze CLIDATA přiřadit kroupové události maximální velikost krup. Pokud tedy používáme sadu dat se zaznamenanou velikostí krup, má to následně vliv na vypočtené hodnoty CSI, FAR, POD. Hodnoty FAR jsou u všech zkoumaných produktů o cca 0,1 vyšší než u sady dat, která zahrnuje i případy bez zaznamenané maximální velikosti krup. Nelze tedy s hodnotami CSI, FAR a POD

pracovat jako s naprosto přesnými čísly. Protože považujeme toto zkrácení hodnot za akceptovatelné, využili jsme tuto omezenou sadu dat pro výpočet CSI, FAR a POD při výskytu krup o velikosti 5 (příp. 10, 15 a 20) mm a vyšší. Výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 7(c)–(f). Z grafů je zřejmé, že se zvětšující se velikostí krup výrazně klesá CSI u všech sledovaných produktů. Je vidět, že hodnota pravděpodobnosti POH nelze použít jako indikátor výskytu velkých krup, neboť je výrazně vychýlena směrem k nadměrnému varování i v případech vysokých hodnot pravděpodobnosti POH. Stejně vychýlený je produkt DPOLH. Nejméně vychýlené výsledky dávají v závislosti na velikosti krup hodnoty pravděpodobnosti mezi 60 % a 80 % produktu POSH. CSI je však nízká a pro kroupové události s maximální velikostí krup 20 mm a vyšší je již velmi špatná (0,1). To je dáno obecně snižováním CSI s rostoucí extremitou událostí. Kroupových událostí s maximální velikostí krup 20 mm a vyšší bylo na profesionálních stanicích ve sledovaném období zaznamenáno celkem jedenáct.

DPOLH je vhodným indikátorem výskytu krup, pokud nebereme v úvahu jejich velikost. Z grafů na obr. 7(a) a (b) vidíme, že je velmi málo vychýlený, ale nedosahuje CSI produktu POH a stejně jako POH při odrazivostech pod 45 dBZ podhodnocuje výskyt krup.

2.3.2 Kroupové události z databáze ESWD

Vyhodnocení záznamů z databáze ESWD proběhlo na srovnatelném množství případů (tab. 1) jako v případě databáze CLIDATA, ale protože zde nemáme k dispozici informace o silných srážkách bez výskytu krup tak jako při zpracování dat z databáze CLIDATA, hodnocení pomocí CSI, FAR a POD jsme neprováděli. Stejně jako v případě databáze CLIDATA, také pro ESWD byly vytvořeny grafy rozložení četností veličin POH, POSH a DPOLH. Na obrázku 8 vidíme, že naprostá většina pravděpodobností POH dosahuje ve vyhodnocovaných případech hodnoty 100 %. Také rozložení četností POSH je posunuto k vyšším hodnotám oproti případům zaznamenaným v CLIDATA. Obrázek 9 znázorňuje rozložení

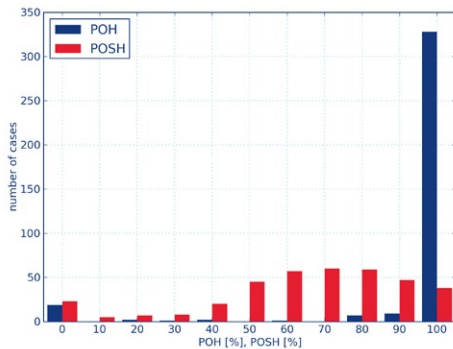


Obr. 7 Zobrazení CSI, FAR, POD pro případy krup zaznamenané v databázi CLIDATA. (a) všechny detekované kroupové události, (b) všechny detekované kroupové události s odrazivostí ≥ 45 dBZ, (c) kroupové události s odrazivostí ≥ 45 dBZ a s výskytem krup ≥ 5 mm, (d) kroupové události s odrazivostí ≥ 45 dBZ a s výskytem krup ≥ 10 mm, (e) kroupové události s odrazivostí ≥ 45 dBZ a s výskytem krup ≥ 15 mm, (f) kroupové události s odrazivostí ≥ 45 dBZ a s výskytem krup ≥ 20 mm.

Fig. 7. CSI, FAR and POD representation for hail events selected from the CLIDATA database. (a) All hail events, (b) hail events with reflectivity ≥ 45 dBZ, (c) hail events with reflectivity ≥ 45 dBZ and hail size ≥ 5 mm, (d) hail events with reflectivity ≥ 45 dBZ and hail size ≥ 10 mm, (e) hail events with reflectivity ≥ 45 dBZ and hail size ≥ 15 mm, (f) hail events with reflectivity ≥ 45 dBZ and hail size ≥ 20 mm.

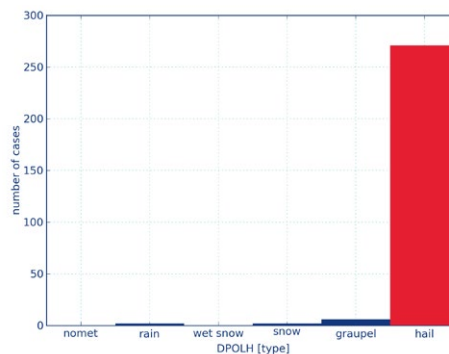
četností jednotlivých typů hydrometeorů produktu DPOLH. Naprostá většina odpovídá typu „hail“. Zpracování tedy potvrzuje, že oproti databázi CLIDATA tato databáze obsahuje ve vyhodnocovaných letech především významnější případy výskytu krup. Lze na to usuzovat z posunutí rozložení pravděpodobností detekce krup produktů POH a POSH směrem k vyšším hodnotám pravděpodobnosti, v případě DPOLH pak posunu v rozložení jednotlivých typů hydrometeorů. V případech, kdy byla zaznamenána maximální velikost krup (333 případů) byl vyhodnocen také produkt MEHS. Obrázek 10 znázorňuje scatter plot hodnot produktu MEHS a zaznamenaných skutečných maximálních velikostí krup. Z obrázku je patrné, že zaznamenané skutečné maximální

velikosti krup a velikosti odhadované produktem MEHS nejsou v příliš dobré shodě. Pokud vynecháme odlehle méně často se vyskytující hodnoty a zaměříme se pouze na častěji se vyskytující hodnoty (ve scatter plotu znázorněné temnější modrou), vidíme rozdíly ve skutečné a odhadované velikosti v řádu 1–2 cm. Nicméně při porovnání s hodnotami pro změřené maximální velikosti krup ≥ 20 mm z databáze CLIDATA ve scatter plotu obr. 6 (b), nejsou hodnoty MEHS v případě databáze ESWD tak viditelně vychýlené. Scatter plot potvrzuje, že v databázi ESWD jsou uloženy především případy výskytu velkých krup, neboť naprostá většina maximálních velikostí krup zaznamenaných pro jednotlivé případy dosahuje 2 cm a více.



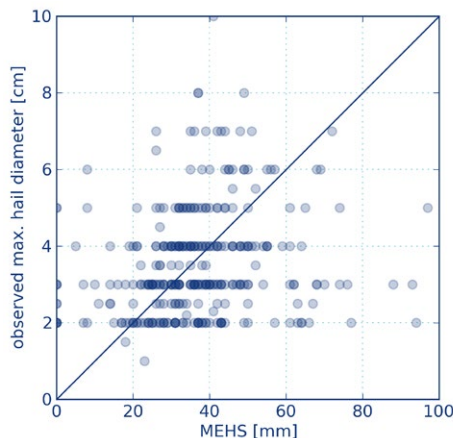
Obr. 8 Rozložení četností pro produkty POH a POSH vypočítaných pro kroupové události zaznamenané v databázi ESWD.

Fig. 8. Frequency distribution of POH and POSH products for hail events selected from the ESWD database.



Obr. 9 Rozložení četností pro produkt DPOLH vypočítaných pro kroupové události zaznamenané v databázi ESWD.

Fig. 9. Frequency distribution of DPOLH product for hail events selected from the ESWD database.



Obr. 10 Scatter plot veličiny MEHS vypočítané pro kroupové události zaznamenané v databázi ESWD a zaznamenaných skutečných maximálních velikostí krup pro dané události. Intenzita modré barvy odpovídá počtu případů spadajících do daných intervalů hodnot.

Fig. 10. Scatter plot of MEHS values and measured maximum hail size for hail events selected from the ESWD database. Intensity of blue colour corresponds to the number of events.

3. Operativní využití produktů detekce krup v ČHMÚ

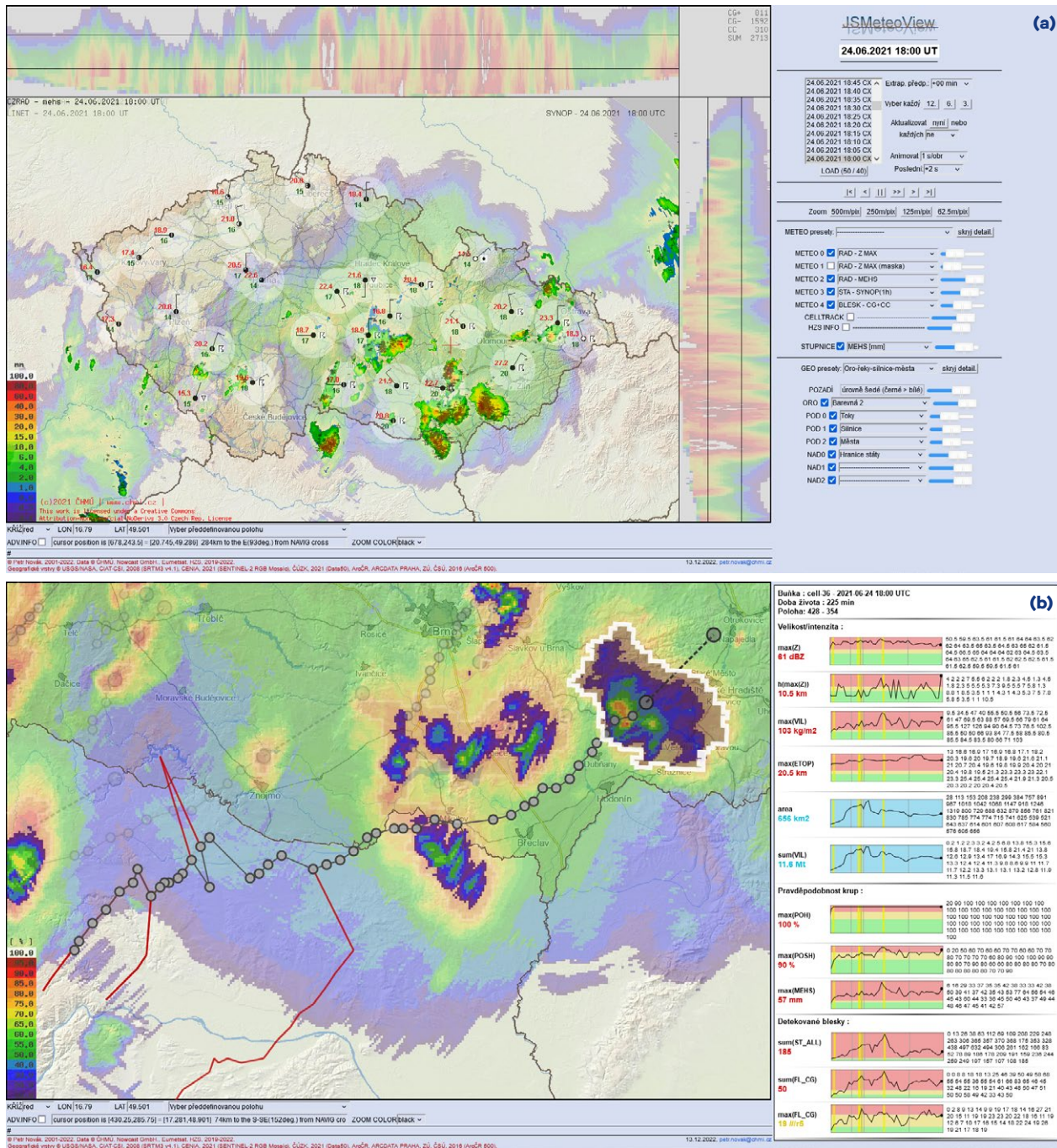
V ČHMÚ je dlouhodobě hlavní interní aplikací pro zobrazení radarových dat webová aplikace JSMeteoView. Od roku 2004 je součástí této aplikace i zobrazování produktů detekce pravděpodobnosti výskytu krup POH. Aplikace byla průběžně vylepšována a rozšiřována. V souvislosti se snahou o zkvalitnění zobrazení konvektivních bouří a jejich vlastností bylo třeba aplikaci zásadně modernizovat a většina aplikace tak byla od základu přeprogramována. Nová, výrazně zkvalitněná aplikace, která dostala název JSMeteoView2, byla do operativního provozu uvedena v roce 2020. Radarové produkty jsou pro novou aplikaci generovány v prostorovém kroku $0,5 \times 0,5$ km oproti původním 1×1 km. Stejně tak jsou v podrobnějším rozlišení připraveny i geografické podkladové vrstvy. Data je tak možné zobrazit až do rozlišení $62,5 \times 62,5$ m na pixel. Dále došlo k navýšení počtu dostupných produktů, nejen radarových, ale i bleskových, družicových a pozemních pozorování. Z hlediska výskytu krup jsou kromě původně zobrazovaného produktu POH nově zobrazovány také produkty POSH a MEHS. Produkt DPOLH v současnosti není implementován, ale vzhledem k jeho výsledkům je jeho implementace zvažována. Místo samostatného zobrazování jednotlivých produktů detekce krup je zvažováno kombinované zobrazení produktů POH, POSH a DPOLH.

V aplikaci JSMeteoView2 je možné zobrazit najednou až 5 libovolných rastrových produktů a k tomu 2 vektorové vrstvy. První vektorovou vrstvou je výstup algoritmu CELLTRACK. Tato

vrstva umožňuje výrazně kvalitnější sledování parametrů jader vysoké odrazivosti v porovnání s původní aplikací JSMeteoView. Vrstva CELLTRACK je nově interaktivní a umožňuje zobrazení různých parametrů jader vysoké odrazivosti včetně kroupových a jejich vývoj v čase. Druhou vektorovou vrstvou je zobrazení jednotlivých výjezdů Hasičského záchranného sboru k událostem souvisejícím s počasím. Tato vrstva je velmi užitečná pro verifikaci předpovědi a výstrah. Ukázka nové aplikace JSMeteoView2 je na obr. 11(a)–(b). Obrázek 11(a) zobrazuje kombinaci různých meteorologických a geografických vrstev na přehledové sloučené informaci pokrývající celé Česko. Na obrázku 11(b) pak vidíme jinou kombinaci meteorologických vrstev zobrazenou na přibližné oblasti jižní Moravy a blízkého okolí. V pravé části obrázku 11(b) můžeme vidět seznam a průběh hodnot parametrů nebezpečné tornadické supercelární bouře ze dne 24. 6. 2021 na jižní Moravě. Z produktů zobrazujících pravděpodobnost výskytu krup jsou v současnosti operativně znázorňovány max(POH), max(POSH), max(MEHS), které nabývají maxima příslušné veličiny (POH, POSH, MEHS) detekovaného v oblasti identifikovaného jádra vysoké odrazivosti. Maxima jednotlivých produktů detekce krup jsou znázorňována, protože tato část aplikace JSMeteoView2 má sloužit především pro vyhodnocení nebezpečnosti konvektivní bouře a jako jeden z podkladů pro případné vydání výstrahy. Na obrázku 11(b) max(MEHS) v 18:00 UTC pro supercelární bouři dosahuje hodnoty 57 mm s tím, že předchozích 60 minut se hodnoty max(MEHS) pohybovaly mezi 37 mm a 57 mm. V databázi ESWD jsou mezi 17:00 a 18:00 UTC v oblasti výskytu bouře zaznamenány výskyty krup o velikosti 7 cm (Hodonín), 8 cm (Mutěnice), 6 cm (Milotice), 4 cm (Vracov). To názorně ukazuje rozdíly mezi hodnotami MEHS a skutečnými velikostmi krup, jak byly diskutovány v kapitole 2.3.2.

4. Závěr

Vyhodnocení produktů pro odhad výskytu krup a jejich maximální velikosti založených na radarových a sondážních datech ukázalo, že tyto produkty jsou poměrně úspěšné při vyhodnocování přítomnosti krup, pokud vyhodnocujeme jejich přítomnost bez ohledu na velikost. Při vyhodnocování je třeba brát v úvahu, že produkt POH s ohledem na způsob výpočtu je pro odrazivosti nižší než 45 dBZ roven nule. Produkt POSH je sice počítán pro hodnoty od 40 dBZ, ale je určen pro odhad pravděpodobnosti výskytu velkých krup a je vychýlen směrem k podceňování výskytu krup více než POH (ve zpracovávaných událostech nebyl nalezen případ, kdy by POSH bylo nenulové při výskytu oblačnosti s odrazivostí nedosahující 45 dBZ). Při vyhodnocování možností výskytu krup je proto vhodné kromě



Obr. 11 Ukázka výstupu aplikace JSMeteoView2 pro termín 24. 6. 2021 18:00 UTC. (a) Přehledová informace zobrazující na pozadí poloprůhledně data maximální odrazivosti, a přes ně překreslené pole MEHS, staniční pozorování a data z detekce blesků. (b) Detailní informace v oblasti jižní Moravy a blízkého okolí zobrazuje na pozadí poloprůhledně pole maximálních odrazivosti, přes ně překreslené pole POSH a výstup metody CELLTRACK (bílé obrysy identifikovaného jádra odrazivosti, černé a tmavě červeně jeho trajektorie, vpravo pak grafický a tabelární výpis jeho parametrů).

Fig. 11. Example of JSMeteoView2 output for 24 June 2021 18:00 UTC. (a) Overview showing maximum reflectivity (semitransparent background layer) with overlay MEHS layer representing station observations and lightning detection data. (b) Detailed information over area of Southern Moravia and close vicinity showing maximum reflectivity (semitransparent background layer), with overlaying POSH field and CELLTRACK output (white contour showing identified reflectivity core, black and red lines showing its trajectory, graphs and tables on the right side show related parameters).

produktů POH a POSH sledovat i další produkty radarové odrazivosti (např. data maximálních odrazivosti) a počítat s tím, že se mohou kroupy vyskytnout i u slabších bouří, i když půjde s největší pravděpodobností o malé ne příliš nebezpečné kroupy.

V případech výskytu krup souvisejících s bouřemi s odrazivostmi 45 dBZ a vyššími dosahují dobrých výsledků produkty POH a DPOLH, pokud nezohledňujeme velikost krup. Jako nejvhod-

nější se ukazuje produkt POH při pravděpodobnostech 30–40 %, který dosahuje nejlepšího CSI a není vychýlený. Maximální hodnoty CSI pro produkt POH dosahují 0,7, což se poměrně dobře shoduje s prací Betscharta a Heringa (2012), kde CSI produktu POH počítaného v rámci MeteoSwiss dosahuje hodnoty 0,78.

Pokud se zaměříme na výskyt krup podle velikosti (a zejména na velké nebezpečné kroupy), úspěšnost produktů POH, POSH

i DPOLH klesá s rostoucím průměrem krup. Produkty POH a DPOLH jsou velmi vychýlené směrem k nadhodnocování. Pro odhad výskytu velkých krup dosahuje relativně nejlepších výsledků ze zkoumaných produktů produkt POSH při pravděpodobnostech 60–80 %, což odpovídá tomu, že produkt POSH byl vyvinut právě pro detekci velkých nebezpečných krup.

Odhad velikosti krup není příliš spolehlivý. U produktu MEHS se vyskytuje nadhodnocování velkých krup nad 20 mm v porovnání se skutečností podle databáze CLIDATA, přičemž podle databáze ESWD je odhad velikosti krup sice nespolehlivý, ale nejví se na první pohled vychýlený. Tento rozdíl může být důsledkem toho, že v databázi ESWD jsou obsaženy informace o událostech poté, co byla prozkoumána zasažená oblast. V případě databáze CLIDATA jsou zapisovány velikosti krup změřené pouze přímo na stanici. Snáze může nastat situace, kdy největší kroupy při dané kroupové události nespádnou přímo na stanici, a nejsou proto změřeny.

Další vývoj by se mohl týkat produktu DPOLH, který v současnosti není implementován mezi zobrazovanými parametry konvektivních buněk v aplikaci JSMeteoView2. Na základě výše uvedeného je jeho implementace v budoucnu zvažována jakožto alternativa ke stávajícím produktům POH a POSH. Mohlo by být vhodné v budoucnu provést také slučování tohoto produktu z jednotlivých radarů nikoliv podle nejvyšší dosažené hodnoty v daném místě, ale podle toho, která hladina PPI je v daném místě blíže k povrchu. Nicméně vzhledem k tomu, že při odhadech výskytu krup bez zohlednění jejich velikosti je DPOLH nevychýlený, případně mírně vychýlený směrem k podhodnocování výskytu krup, není jisté, že by zmíněný způsob slučování vedl k lepším výsledkům.

Do budoucna by mohlo být zajímavé provést porovnání radarových produktů pro výpočet pravděpodobnosti krup založených na vstupu teplotních dat z meteorologických sondáží s produkty založenými na vstupu dat z numerického předpovědního modelu. S ohledem na větší uživatelskou přívětivost zvažujeme také implementaci kombinovaného zobrazování uvedených produktů v aplikaci JSMeteoView2.

Literatura:

- BETSCHART, M., HERING, A., 2012. Automatic Hail Detection at MeteoSwiss: Verification of the radar-based hail detection algorithms POH, MESHS and HAIL. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, č. 238, 59 s. Dostupné také z WWW: <https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:ebc4a5-8913-4f41-bd41-22c54596afbc/ab238.pdf>.
- DELOBBE, L., HOLLEMAN, I., 2006. Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection. *Meteorological Applications*, Vol. 13, s. 361–374. ISSN 1350-4827.
- HOLLEMAN, I., 2001. Hail detection using single-polarization radar. Scientific report WR-2001-01, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands, 74 s. Dostupné také z WWW: <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmi/pubWR/WR2001-01.pdf>.
- CHANGNON, S.A. jr., 1970. Hailstreaks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 27, č. 1, s. 109–125.
- KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2008. Využití radarových měření pro identifikaci a předpověď pohybu konvektivních bouří. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 1, s. 14–19. ISSN 0026-1173.
- KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK – Convective cell tracking algorithm and its use for deriving lifecycle characteristics. *Atmospheric Research*, Vol. 93, s. 317–327. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.019>.
- LIM, S., CHANDRASEKAR, V., BRINGI, V. N., 2005. Hydrometeor Classification System Using Dual Polarization Radar Measurements: Model Improvements and In Situ Verification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, č. 4, s. 792–801. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.843077>.
- LÍŠKOVÁ, M., 2006. Možnosti detekcie krúp pomocou odvodených veličín z meteorologického radiolokátora. Diplomová práce, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava.
- LIU, H., CHANDRASEKAR, V., 2000. Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 17, č. 2, s. 140–164. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0140:COHBOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0140:COHBOP>2.0.CO;2).
- NOVÁK, P., FROLÍK, P., BŘEZKOVÁ, L., KYZNAROVÁ, H., 2007. Nowcasting srážek pomocí extrapolace radarového echa. *Meteorologické zprávy*, roč. 60, č. 5, s. 147–151. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., FROLÍK, P., BŘEZKOVÁ, L., KYZNAROVÁ, H., 2012. Utilization of Exchange of Weather Radar Data in the Czech Hydrometeorological Institute [online]. [cit. 7. 2. 2023]. ERAD 2012 – The Seventh European Conference On Radar In Meteorology And Hydrology, NET 278 Extended Abstract. Dostupné z WWW: http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_278_ext_abs.pdf.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2013. Využití radarových měření pro kvantitativní odhady a nowcasting srážek v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. 66, č. 6, s. 175–181. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016. Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015. *Meteorologické zprávy*, roč. 69, č. 1, s. 17–24. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2020. Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků. *Meteorologické zprávy*, roč. 73, č. 3, s. 65–77. ISSN 0026-1173.
- ROEBBER, P. J., 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Weather and Forecasting*, Vol. 24, č. 2, s. 601–608.
- RYZHKOV, A. V., SCHUUR, T. J., BURGESS, D. W., HEINSELMAN, P. L., GIANGRANDE, S.E., ZRNÍČ, D. S., 2005. The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 86, s. 809–824. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-6-809>.
- SCHUUR, T., RYZHKOV, A., HEINSELMAN, P., 2003. Observations and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D radar, NOAA, University of Oklahoma, Norman, OK, USA.
- SKRIPNIKOVÁ, K., 2013. Detekce krup pomocí dat z meteorologických radarů. Disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha.
- SKRIPNIKOVÁ, K., ŘEZÁČOVÁ, D., 2014. Radar-based hail detection. *Atmospheric Research*, Vol. 144, s. 175–185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.06.002>.
- SKRIPNIKOVÁ, K., ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2017. Krupobití v Česku podle radarových informací. *Meteorologické zprávy*, roč. 70, č. 2, s. 33–38.
- VAISALA OY., 2016. Manuál: User Guide: Dual Polarization IRIS and RDA.
- WALDVOGEL, A., FEDERER, B., GRIMM, P., 1979. Criteria for the Detection of Hail Cells. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 18, s. 1521–1525. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1521:CFTDOH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1521:CFTDOH>2.0.CO;2).
- WAPLER, K., 2021. Mesocyclonic and non-mesocyclonic convective storms in Germany: Storm characteristics and life-cycle. *Atmospheric Research*, Vol. 248, 105186. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105186>.
- WITT, A., EILTS, M. D., STUMPF, G. J., JOHNSON, J. T., DEWAYNE MITCHEL, E., THOMAS, K.V., 1998. An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, Vol. 13, s. 286–303.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Petr Zacharov, Ph.D., RNDr. Jan Sulan