

OBNOVA METEOROLOGICKÉ RADAROVÉ SÍTĚ CZRAD V ROCE 2015

Petr Novák, Hana Kyznarová, Český hydrometeorologický ústav, oddělení radarové, Generála Šišky 942,
143 00 Praha 4, petr.novak@chmi.cz, kyznarova@chmi.cz

Upgrade of the CZRAD meteorological radar network in 2015. The Czech weather radar network (CZRAD), operated by the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), covers the entire area of the Czech Republic and its vicinity using volume scan measurements of its two radars with 5-minute updates rating up to 260 km in range. The CZRAD data are used for severe weather and precipitation monitoring, nowcasting, and warning purposes by national civil and military weather services, operational hydrology, air traffic control, and many other users, including general public. In 2015, both CZRAD radars were completely replaced with new, modern dual-polarization Vaisala WRM-200 Doppler weather radars. The upgrade of the CZRAD will ensure the continuity of high-quality radar measurements in future decades. The new radar units provide additional dual-polarization radar quantities that can be used for the quality improvement of standard single-polarization radar quantities (better filtering of non-meteorological data and attenuation correction) and also for radar echo classification. The paper summarizes the technical parameters of the Czech weather radar network after its renovation and the definition of operational volume data measurement, and it discusses improvements in radar data after the network upgrade. It also describes operational radar data processing and the visualization and utilization of the radar data in the CHMI's operational applications.

KLÍČOVÁ SLOVA: detekce dálková – radar meteorologický – radarová síť – CZRAD – Česká republika
KEYWORDS: remote sensing – meteorological radar – radar network – CZRAD – Czech Republic

1. ÚVOD

Meteorologické radary národní sítě CZRAD, provozované Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), poskytují třírozměrnou informaci o srážkové oblačnosti na velké ploše s vysokým prostorovým (1×1 km) i časovým (5 minut) rozlišením. Velmi užitečné jsou především pro detekci konvekčních bouří, které mohou být doprovázeny nebezpečnými jevy, jako např. intenzivními přívalovými srážkami, blesky, krupobitím, silným nárazovým větrem nebo dokonce tornády. Radarová měření ve formě polí radarové odrazivosti nebo jako plošné radarové odhady srážek za určité časové období jsou využívána na centrálním a regionálních předpovědních pracovištích ČHMÚ jako jeden z klíčových podkladů pro meteorologické i hydrologické předpovědi a výstražné účely, mimo jiné pro Systém integrované výstražné služby a Hlásnou a předpovědní povodňovou službu (Setvák et al. 2004; Šálek et al. 1997; Šálek et al. 2002). Radarové odhady a velmi krátkodobé předpovědi srážek (Novák, Kyznarová 2013) slouží jako vstupy do operativních hydrologických modelů (Březková 2015) a systému Indikátor přívalových povodní (Šercl 2015), provozovaných v ČHMÚ. Radarová data jsou též využívána širokou řadou externích uživatelů, jako např. Řízením letového provozu ČR, Armádou ČR, Integrovaným záchranným systémem, Ředitelstvím silnic a dálnic a dalšími. Díky prezentaci radarových měření v České televizi, na webových stránkách ČHMÚ a poslední době zejména díky specializovaným aplikacím pro mobilní telefony jsou data z meteorologických radarů využívána stále častěji i širokou veřejností.

Pravidelná manuální radarová měření na území České republiky začala na observatoři Hydrometeorologického ústavu v Praze-Libuši v roce 1971 a byla provozována po více než dvacet let (Strachota 1981; Strachota 1983; Strachota 1985). K zásadnímu zkvalitnění radarových měření došlo v průběhu devadesátých let 20. století, kdy byly nejdříve digitalizovány civilní i armádní radary MRL-5 (Kráčmar 1995). Následně byla vybudována dvě zcela nová radarová stanoviště s velmi dobrým radarovým horizontem (Kráčmar 1994): v roce 1995 na kótě Skalky na Dražanské vrchovině (Havráněk, Kráčmar 1996) a v roce 1999 na kótě Praha v Brdské vrchovině (Kráčmar 2000), na nichž byly instalovány moderní dopplerovské radary.

Tímto vznikla česká národní radarová síť CZRAD, jejíž měření pokrývá celou Českou republiku i blízké okolí a jež je sdílena civilní i armádní meteorologickou službou. Radary i díky částečné modernizaci v letech 2006–2007 (Novák et al. 2008) dobře sloužily více než 15 let. Postupem času však jejich elektronika stárla, klesala jejich spolehlivost, a bylo třeba provést jejich výměnu. Příprava obnovy radarů trvala poměrně dlouho, nako- nec se však výměnu obou radarů podařilo realizovat v průběhu roku 2015 v rámci projektu „Upgrade měřicích systémů pro předpovědní a výstražnou povodňovou službu“ financovaného z prostředků Operačního programu Životní prostředí (Prioritní osa: 1 – Zlepšování vodohospodářské infrastruktury a snižování rizika povodní). Článek seznamuje čtenáře s provedenou výměnou, popisuje technické parametry nových radarů a uvádí novinky, které tato výměna přináší uživatelům.

2. PROJEKT OBNOVY RADAROVÉ SÍTĚ CZRAD

Nákup nových radarů byl realizován na základě veřejné zakázky „Komplexní obnova srážkoměrných radarů sítě CZRAD“. Specifikace technických parametrů dodávky byla na základě zkušeností s dosavadním provozem radarů a poznatků získaných v rámci mezinárodních projektů EUMETNET-OPERA a EUMETNET-EUMETFREQ připravena v radarovém oddělení ČHMÚ. Požadována byla výměna radarů Brdy i Skalky za dva nové, hardwarově i softwarově identické polarimetrické dopplerovské radarové systémy pracující v pásmu C, včetně záložního zdroje napájení UPS. Staré radary musely být v rámci zakázky ekologicky zlikvidovány. Pro radarové centrum Praha-Libuš pak bylo požadováno dodání počítačového vybavení pro vzdálené řízení obou radarů a zpracování naměřených dat. Dodavatel musel též provést všechny potřebné testy, zajistit školení a dodat kompletní dokumentaci.

Při přípravě technické specifikace se vycházelo z toho, že nové radary musí zajistit dostatečně přesné, stabilní a spolehlivé měření na minimálně stejné technické úrovni jako stávající radary. V některých směrech byly požadavky rozšířeny; nejdůležitějším byl požadavek na možnost provádět polarimetrická měření, tj. souběžné vyhodnocování radarových odrazů pro horizontálně a vertikálně polarizované záření. Polarimetrická měření poskytují nové typy dat, které lze využívat přímo pro

rozlišení typu radarových cílů (např. dešťové kapky, sněhové vločky, kroupy, nemeteorologické cíle), ale zejména pro zkvalitnění standardních dat radarové odrazivosti a z nich počítaných odhadů srážek prostřednictvím účinnější eliminace nemeteorologických cílů z radarových měření a korekce útlumu radarového paprsku v silných srážkách. Polarimetrické radary pro operativní provoz se v meteorologických službách začaly instalovat v průběhu minulého desetiletí. K jejich velkému rozšíření v Evropě došlo v posledních několika letech, kdy obnova radarových sítí proběhla nebo stále probíhá v mnoha zemích – např. v Německu, Francii, Velké Británii, Slovensku, Rakousku, Švýcarsku, Finsku, Belgii a dalších.

Veřejná zakázka byla uveřejněna v červnu 2014 a výběr nejvhodnější nabídky probíhal od srpna do října 2014. Nabídku podali tři klíčoví výrobci radarů, kteří v posledních letech instalovali nebo modernizovali naprostou většinu radarů v Evropě. Se všemi výrobci měl ČHMÚ praktické zkušenosti z minulých let. Jednalo se o

- Enterprise Electronics Corporation, USA (výrobce radaru instalovaného v roce 1999 na kótě Brdy)
- OMNIPOL, a. s., ČR, se subdodavatelem technologie radarů Vaisala Oyj, Finsko, (prováděl modernizaci přijímače a řídicího softwaru radaru Brdy v roce 2007)
- Selex ES GmbH, Německo (výrobce radaru instalovaného v roce 1995 na kótě Skalky, prováděl též jeho modernizaci v roce 2006)

Hodnotícími kritérii nabídek byla nabídková cena s váhou 90 % a technická úroveň nabízeného plnění s váhou 10 %, u které bylo posuzováno splnění pěti rozšiřujících nepovinných požadavků nad rámec povinných technických parametrů. Rozdíl v technické úrovni nabídek byl velmi malý, a tak se rozhodující stala cena, která byla nejnižší u nabídky firmy OMNIPOL, a. s. (necelých 65 mil. Kč s DPH). V prosinci 2014 byla následně s firmou OMNIPOL, a. s. podepsána smlouva na dodávku dvou radarů Vaisala WRM-200 a souvisejícího plnění.

Samotná realizace výměny probíhala v průběhu roku 2015. V březnu proběhly úspěšně tovární akceptační testy, během května (27. 4.–4. 6. 2015) byl vyměněn radar Brdy a na přelomu srpna a září (18. 8.–16. 9. 2015) byl vyměněn radar Skalky. Uvedená časová období výměn radarů představují celkový rozsah prací od odstávky starých radarů až po úspěšné provedení akceptačních testů. Samotná doba výpadku radarových dat byla o něco kratší, v případě radaru Brdy 28 dní a v případě radaru Skalky 24 dní, protože dodávka radarových dat uživatelům byla ve zkušebním provozu obnovena ještě před provedením závěrečných akceptačních testů. Na obrázcích 1 a 2 je dokumentován průběh instalace radaru Vaisala WRM-200 v Brdech.

3. METEOROLOGICKÝ RADAR VAISALA WRM-200

Pulzní polarimetrický dopplerovský meteorologický radar Vaisala WRM-200 je představitelem nejnovější generace operativně provozovaných meteorologických radarů. Je zcela srovnatelný s meteorologickými radary instalovanými v poslední době jinde v Evropě. Radar Vaisala WRM-200 byl instalován např. ve Finsku, Estonsku, Turecku nebo Portugalsku. Srovnatelné radary od jiných výrobců jsou např.: Gematronik METEOR 600C/635C/700C/735C, instalované mj. na Slovensku, ve Švýcarsku, Francii, Belgii, nebo EEC DWSR 2501C/3501C/5001C, instalované mj. v Rakousku, Německu, Maďarsku nebo Švédsku.

Radar Vaisala WRM-200 se skládá z:

Tab. 1 Parametry meteorologických radarů ČHMÚ.

Table 1. Parameters of CHMI weather radars.

Vaisala WRM-200	
Základní charakteristika	polarimetrický dopplerovský meteorologický radar pracující v C pásmu (vlnová délka 5 cm)
Pracovní módy	<ul style="list-style-type: none"> • LDR (H-only) mód – je vysíláno pouze lineárně polarizované záření v horizontálním kanálu; přijímač vyhodnocuje horizontální i vertikální kanál • STAR mód – je vysíláno simultánně s horizontální i vertikální polarizací; přijímač vyhodnocuje horizontální i vertikální kanál
Fázová stabilita	< 0,5° RMS
Maximální ρ_{HV}	> 0,99
Minimální detekovatelná odrazivost ve vzdálenosti 260 km	5 dBZ
Vysílač	
Typ	polovodičový modulátor (solid state), koaxiální magnetron
Provozní frekvence	nastavitelná v rozsahu 5 500 až 5 700 MHz
Impulzní výkon	250 kW
Délka pulzu	0,5; 0,8; 1,0; 2,0 μ s
Opakovací frekvence	200–2 400 Hz
Anténa	
Druh	středová parabolická
Průměr	4,5 m
Šířka svazku	0,95°
Zisk	46 dB
Analogová část přijímače	
Typ	dvoukanalový lineární mezifrekvenční zesilovač
Minimální detekovatelný signál	-117 dBm (pro délku pulzu 2,0 μ s)
Dynamický rozsah	101 dB (pro délku pulzu 2,0 μ s)
Mezifrekvence	60 MHz
Digitální přijímač a signální zpracování	
Signální procesor	Vaisala Sigmet RVP-900
Digitalizace mezifrekvence	16bitová, vzorkování 100 MHz, 5 kanálů (3 využívány)
Dealiasing rychlosti	Dual PRF 2/3, 3/4, 4/5
Filtrování pozemních odrazů	dopplerovské filtry pevné, adaptivní nebo GMAP (potlačení >50 dB)
Další korekce	<ul style="list-style-type: none"> • prahování pomocí LOG, CSR (CCOR), SQI, SIG, PMI • dodatečná filtrace pomocí Point Clutter, ID Speckle, 2D Speckle filtrů • korekce útlumu radarové odrazivosti v silných srážkách pomocí polarimetrických dat
Řízení radaru	
Typ	Vaisala Sigmet RCP-8 + IRIS-Radar software
Měřicí módy	PPI, RHI, Volume, Sector, Manual
Možnosti lokálního monitorování	Real-time display, ascope, BITE, produkty

- Radarové skříně, umístěné v technologické místnosti těsně pod vrcholem věže. Ve skříně je umístěn vysílač, přijímač s digitálním signálním zpracováním naměřených dat, počítač zajišťující kompletní monitorování a řízení radaru, příjem naměřených objemových dat a generování produktů. Skříně obsahuje též některé pomocné systémy (měřiče výkonu, testovací signální generátor, dehydrátor vlnovodné trasy, napájecí moduly).

- Vlnovodné trasy mezi radarovou skříní a anténou.
- Anténní mechaniky, antény a kopule, umístěných na vrcholu radarové věže.

Technické parametry radarů jsou shrnuty v tabulce 1.

Radar Vaisala WRM-200 se z pohledu blokového schéma-

tu od předchozí generace radarů (Havránek, Kráčmar 1996; Kráčmar 2000) příliš neliší. Hlavním rozdílem je, že vlnovodná trasa a analogová část přijímače jsou zdvojené, aby mohl být samostatně zpracován horizontálně a vertikálně polarizovaný signál. Na výstupu vysílače, resp. na začátku vlnovodné trasy je softwarově řízený přepínač, který zajistí buď vyslání veškeré energie pulzu v horizontálním kanále (H), anebo jeho rozdělení na dvě poloviny a simultánní vysílání v horizontálním i vertikálním kanále (V). Přijímány a zpracovávány jsou vždy simultánně oba kanály. V bloku přijímače jsou přijaté vysokofrekvenční signály (tj. radarové odrazy) nejdříve zesíleny, filtrovány a posléze převedeny na mezifrekvenční signál. Následuje digitální zpracování signálu pomocí signálního procesoru Vaisala Sigmet RVP900, které je rozděleno na dvě části. První částí je digitální přijímač umístěný v přijímačovém bloku, který vždy při vyslání pulzu digitalizuje vzorek vyslaného signálu a následně souběžně digitalizuje a předzpracovává signál přijatý v horizontálním a vertikálním kanálu. Z digitálního přijímače jsou předzpracovaná digitalizovaná data fázových složek I, Q zaslána přes gigabitové ethernetové spojení do řídicího počítače, kde jsou z nich v softwarovém signálním procesoru vyhodnocovány jednotlivé radarové veličiny, často též označované jako radarové momenty. Signálové zpracování umožňuje též pokročilé filtrování a prahování nemeteorologických informací z radarových dat. Ze signálního procesoru jsou vyhodnocené radarové veličiny předávány aplikaci IRIS/Radar, běžící na téměř řídicím počítači. Zde jsou mimo jiné skládána třírozměrná objemová radarová data, která jsou následně po datové síti zaslána do radarového centra v Praze-Libuši k dalšímu zpracování.

3.1 Polarimetrická měření

Kromě známých veličin (radarová odrazivost, dopplerovská rychlost a šířka spektra dopplerovských rychlostí radarových cílů), získávaných již předchozí generací radarů při měření pouze na jedné (horizontální) polarizaci, umožňují nové polarimetrické radary vyhodnocení dalších, tzv. polarimetrických veličin¹⁾:

- Z_h (horizontal reflectivity) – horizontální radarová odrazivost – odpovídá síle přijatého signálu s horizontální polarizací při vyslání horizontálně polarizovaného radarového pulzu. Z_h je identická s radarovou odrazivostí Z , měřenou radary CZRAD před jejich modernizací.
- Z_v (vertical reflectivity) – vertikální radarová odrazivost – odpovídá síle přijatého signálu s vertikální polarizací při vyslání vertikálně polarizovaného radarového pulzu. Je to analogická veličina k Z_h .
- ZDR (differential reflectivity) – rozdílová odrazivost, někdy též označovaná jako diferenciální odrazivost – odpovídá logaritmu podílu horizontální odrazivosti Z_h a vertikální odrazivosti Z_v .



Obr. 1 Instalace nové kopule antény na radarovou věž radaru Brdy.

Fig. 1. Installation of a new radome on the Brdy radar tower.

Vzhledem k tomu, že oblačné částice mají v důsledku odporu vzduchu při pádu větší horizontální rozměr než vertikální, příp. jsou přibližně stejně velké, se hodnoty ZDR pohybují přibližně v rozmezí 0 dB až +4 dB s tím, že pro kapalně oblačné částice přibližně sféricky symetrické nebo větší v horizontálním směru ZDR nabývá kladných hodnot; pro kroupy, krupky či sníh se může ZDR pohybovat kolem nuly nebo být i záporná.

- LDR (linear depolarization ratio) – lineární depolarizační poměr – odpovídá logaritmu podílu síly signálu přijatého ve vertikálním a horizontálním kanálu při vyslání pouze v horizontálním kanálu. U sféricky symetrických částic je depolarizace zanedbatelná, výrazná je v oblastech s přítomností nesymetrických částic různě orientovaných – např. vrstva, kde dochází k tání oblačných částic (tzv. bright band) nebo oblasti výskytu krup. Přestože nové radary Vaisala WRM-200 obecně umožňují vyhodnocování veličiny LDR , není je možné provádět současně s vyhodnocováním ostatních polarimetrických veličin, ale samostatně na základě jiného objemového měření. S ohledem na časovou náročnost a též na riziko rychlejšího opotřebování radaru při přepínání režimu vysílače nebylo toto měření zahrnuto do operativní skenovací strategie CZRAD.
- $PhiDP$ (differential phase) – rozdílová fáze – integrovaná veličina, která udává rozdíl mezi fázemi přijatého horizontálně a vertikálně polarizovaného radarového signálu. Statisticky jsou oblačné částice větší v horizontálním směru, proto horizontálně polarizovaný radarový pulz typicky vykazuje větší fázový posun během šíření v atmosféře než vertikálně polarizovaný pulz, $PhiDP$ tak obvykle neklesá s rostoucí vzdáleností od radaru.
- KDP (specific differential phase) – specifická rozdílová fáze – derivace $PhiDP$ udává změny $PhiDP$ s rostoucí vzdáleností od radaru. KDP je veličina, která se v publikacích věnovaných kvantitativním odhadům srážek z radarových měření (např. Cifelli et al. 2011; Gorgucci et al. 2000;

Bringhi, Chandradekar 2001) často uvádí jako vhodný doplněk k obvykle používané radarové odrazivosti Z_h . Mezi její výhody patří, že z principu není závislá na útlumu či částečném blokování radarového pulzu např. orografickými překážkami.

- $RhoHV$ (correlation between H and V channels) – korelace mezi signály přijatými z horizontálního a vertikálního kanálu. Je tím větší, čím je rozložení velikosti a typu částic v měřeném objemu homogennější. Tedy vyšších hodnot dosahuje např. v oblasti obsahující čistě vodní menší kapky nebo pouze sněhové vločky; v přechodové vrstvě, kde dochází k tání v přítomnosti různých typů částic a při přítomnosti velkých a nepravidelných částic je $RhoHV$ nižší. Ještě nižších hodnot pak může dosáhnout v případě detekce některých nemeteorologických cílů.

Zřejmě největším přínosem polarimetrických měření je výrazně zlepšené rozlišení meteorologických a nemeteo-

¹⁾ Protože v současnosti nejsou v češtině ustálené termíny pro níže uvedené veličiny, je u každé uvedena používaná anglická zkratka a název.



Obr. 2 Zaměstnanci odboru distančních měření a informací ČHMÚ podílející se na obnově meteorologických radarů CZRAD společně s technikem výrobce u nově instalované skříně vysílače a přijímače radaru Vaisala WRM-200 na stanovišti Brdy.

Fig. 2. Employees of the Remote Sensing Department of the CHMI involved in the upgrade of the CZRAD weather radars together with a radar manufacturer technician surrounding the newly installed transmitter/receiver cabinet of the Vaisala WRM-200 radar at the Brdy site.

orologických cílů, které příznivě ovlivňuje kvalitu radarových dat a návazně i radarových odhadů srážek. Pomocí polarimetrických veličin je možné též rozlišovat různé typy meteorologických cílů, což je možné použít pro podrobnější analýzu srážkové oblačnosti. V literatuře lze nalézt různé algoritmy klasifikací radarových cílů na základě polarimetrických veličin (např. Bringhi, Chandrasekar 2001; Keranen et al. 2007; Dolan et al. 2013). Software IRIS radaru Vaisala WRM-200 implementuje klasifikační algoritmus nazvaný HydroClass (VAISALA 2014), který využívá metodu „fuzzy logic“ a je kombinací více veřejně publikovaných klasifikačních metod (Ryzhkov et al. 2005; Liu, Chandrasekar 2005; Lim et al. 2000; Waldfoegel et al. 1979). HydroClass umožňuje primárně rozlišovat nemeeteorologické cíle, déšť, déšť se sněhem, sníh, krupky a kroupy, viz obr. 3. Polarimetrické veličiny a metoda HydroClass jsou v současnosti testovány v radarovém oddělení ČHMÚ. Na

Tab. 2 Parametry radarových stanovišť ČHMÚ.

Table 2. Parameters of CHMI radar sites.

	Brdy – Praha	Skalky u Protivanova
Oblast	střední Čechy	střední Morava
WMO indikativ	11480	11718
Zeměpisná šířka	49°39'29,9" N (49,6583 N)	49°30'3,9" N (49,5011 N)
Zeměpisná délka	13°49'04,1" E (13,8178 E)	16°47'18,6" E (16,7885 E)
Nadmořská výška	860 m	730 m
Výška antény nad mořem	916 m	767 m
V provozu	od 1999	od 1995
Provozní vysílací frekvence (určená ČTÚ)	5 635 MHz	5 645 MHz

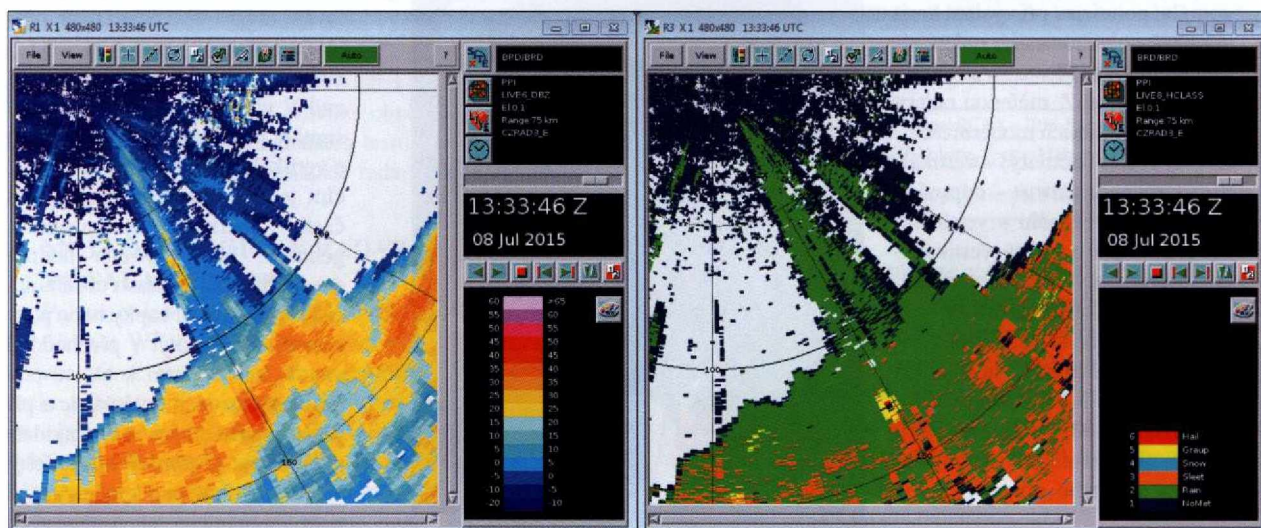
základě výsledků testování se počítá se zavedením do provozní praxe.

Na první pohled se klasifikační algoritmy jeví jako velmi užitečné nástroje, je však třeba si uvědomit, že samotné algoritmy nejsou při klasifikaci typu radarových cílů stoprocentně úspěšné, a zejména že úspěšnost klasifikace se odvíjí od kvality vstupních radarových veličin. Základním omezením je, že se stále jedná o měření v určité výšce nad zemským povrchem a i při kvalitní analýze např. typu oblačných částic (sníh, déšť) nelze s jistotou určit typ částic dopadajících na zemský povrch. Je třeba také uvažovat rozšiřování radarového pulzu s rostoucí vzdáleností od radaru. Při úhlové šířce pulzu 1° je ve vzdálenosti 150 km radarový pulz široký 2,6 km a ve vzdálenosti 260 km již 4,5 km, což vylučuje možnost podrobné analýzy vertikálního profilu typu částic. Výrobce doporučovaný dosah využívání algoritmu HydroClass je 100 km od radaru.

4. AKTUÁLNÍ PARAMETRY SÍTĚ CZRAD A MĚŘENÝCH DAT

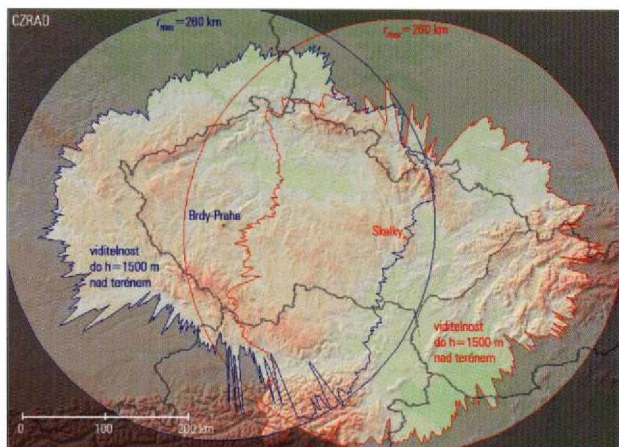
Nové radary byly instalovány na stávající věže současných radarových stanovišť. Základní parametry radarových stanovišť sítě CZRAD se tedy nezměnily a jsou shrnuty v tab. 2. Obr. 4 zobrazuje umístění radarů a dosahy operativních radarových měření, shodné s předchozí generací radarů.

V operativním provozu provádějí meteorologické radary



Obr. 3 Ukázka radarového měření konvekční oblačnosti s detekovanými kroupami. Pole radarové odrazivosti (vlevo), klasifikace radarových odrazů v produktu HydroClass (vpravo).

Fig. 3. Example of the radar observation of a convective storm with detected hailstones. Radar reflectivity field (left), radar echo classification using the HydroClass product (right).

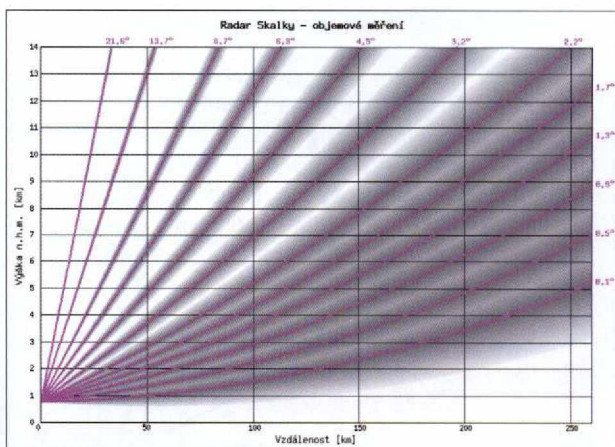


Obr. 4 Umístění a dosahy radarů české meteorologické radarové sítě CZRAD. Mapa ukazuje maximální dosahy meteorologických radarů ČHMÚ (kruhy) a dosahy vhodné pro určování intenzity srážek, do výšky 1500 m nad terénem, dle doporučení projektu COST 73 (Kráčmar1994).

Fig. 4. Positions and coverage of CHMI weather radars (CZRAD radar network). Map shows the maximum coverage of radars (circles) and coverage for precipitation estimation according to the recommendations of the COST 73 project (Kráčmar1994). (The lowest usable beam is 1 500 m above ground level.)

tzv. objemová měření (volume scan), kdy je třírozměrné rozložení srážkové oblačnosti zjišťováno měřením při otáčení antény postupně na několika zvolených elevačních úhlech. Při definici skenovací strategie objemového měření (počet elevací, rychlost otáčení antény, dosah, aktualizace měření) je třeba volit vhodný kompromis mezi protichůdnými uživatelskými požadavky. Větší počet měřených elevací a delší dosah zajišťují rozsáhlejší a detailnější informace, které jsou však získány na úkor délky měření, a tím pádem méně četné aktualizace dat. Čas měření je sice možné zkrátit rychlejším otáčením antény, přitom se však snižuje počet vzorků, ze kterých jsou vyhodnocovány radarové momenty, což může snížit jejich kvalitu. Předchozí radary, jak v Brdech, tak na Skalkách používaly nejdříve mírně rozdílné skenovací strategie (Brdy 14 elevací, Skalky 20 elevací), měřené do vzdálenosti 256 km a opakované každých 10 minut (Havránek, Kráčmar 1996; Kráčmar 2000). Tyto skenovací strategie byly využívány až do roku 2003, kdy byla na obou radarech zavedena nová skenovací strategie (Novák et al. 2008) optimalizovaná pro potřeby zabezpečení letového provozu nad územím ČR. Jednalo se o tzv. prokládané snímání rozdělující základní desetiminutový interval měření na dvě dílčí části s obnovou po 5 minutách. Po nárůstu požadavků na pětiminutovou obnovu dat od dalších uživatelů byla v roce 2009 na obou radarech zavedena nová skenovací strategie s intervalem 5 minut na 12 elevačních úhlech (postupně od nejvyššího k nejnižšímu) s maximálním dosahem 260 km. Tato definice objemového měření byla zachována až do současnosti a její základní parametry nebyly výrazněji změněny ani po výměně radarů. Zcela zachovány byly měřené elevační úhly, maximální dosah a aktualizace měření. Aktuální parametry operačního objemového měření radarů v síti CZRAD jsou shrnuty v tab. 3 a na obr. 5.

Díky lepším parametrům pracovního cyklu vysílače (činiteli plnění, angl. duty cycle) a podpoře více délek vysílaných pulzů mohly být u nových radarů mírně vylepšeny parametry skenovací strategie. Na nižších elevacích byly použity del-



Obr. 5 Graf závislosti výšky paprsku jednotlivých operativně měřených elevačních úhlů na vzdálenosti od radaru Skalky. Fialovou barvou jsou znázorněny osy radarových paprsků. Šedou barvou je znázorněna šířka radarového paprsku.

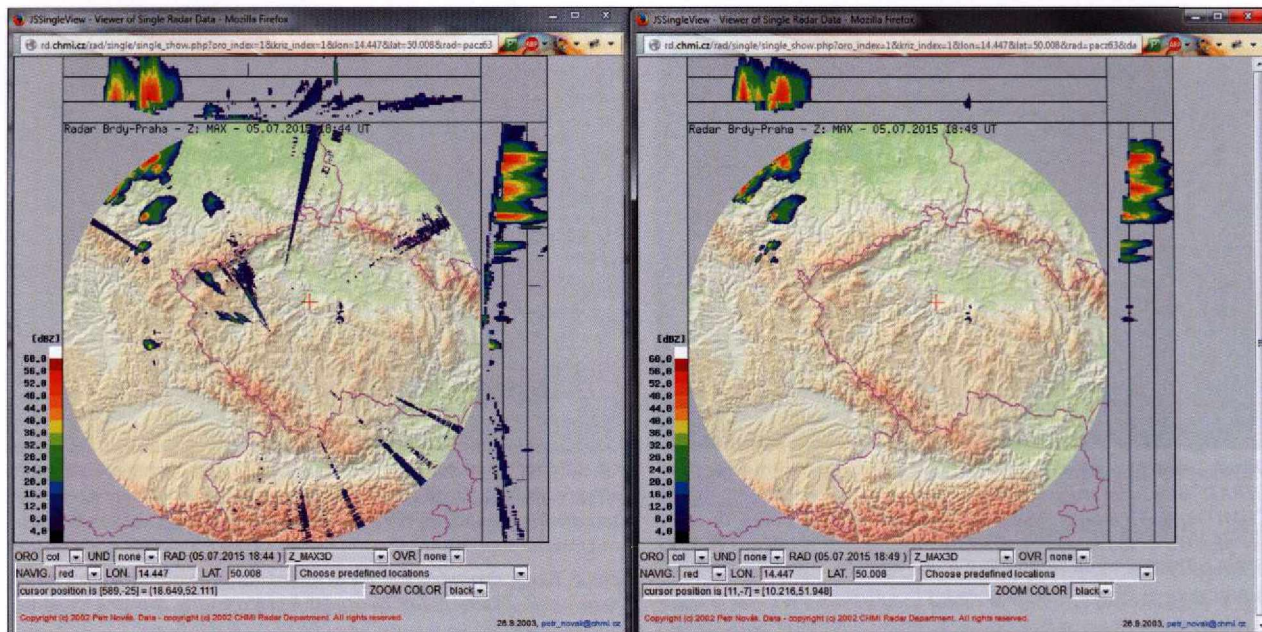
Fig. 5. Range dependency of the height of operationally measured elevations on the Skalky radar. The radar beam axes are depicted by purple color. Gray color represents the width of the radar beam.

Tab. 3 Parametry operačního objemového měření meteorologických radarů v síti CZRAD

Table 3. Parameters of the operational volume measurements of CZRAD weather radars.

Index	Elevační úhel [°]	Vysílací mód	Délka pulzu [µs]	Opakovací frekvence [Hz]	Dosah [km]	Rozlišení vzdálenostní [m]	Rozlišení azimutální [°]	Rychlost otáčení antény [°·s ⁻¹]	Počet průměrovaných vzorků	Maximální jednoznačně určitelná dopplerovská rychlost [m·s ⁻¹]
CZRAD3 Main (1x za 5 min)										
1	21,6	H+V	0,8	1490	100	200	1	37,25	40	19,9
2	13,7	H+V	0,8	1490	100	200	1	37,25	40	19,9
3	8,7	H+V	0,8	1490	100	200	1	37,25	40	19,9
4	6,3	H+V	1,0	990	151	400	1	28,29	35	13,2
5	4,5	H+V	1,0	990	151	400	1	28,29	35	13,2
6	3,2	H+V	2,0	576	260	400	1	16,46	35	7,7
7	2,2	H+V	2,0	576	260	400	1	16,46	35	7,7
8	1,7	H+V	2,0	576	260	400	1	16,46	35	7,7
9	1,3	H+V	2,0	576	260	400	1	16,46	35	7,7
10	0,9	H+V	2,0	576	260	400	1	16,46	35	7,7
11	0,5	H+V	2,0	576	260	400	1	14,40	40	7,7
12	0,1	H+V	2,0	576	260	400	1	14,40	40	7,7
CZRAD3 Dop (1x za 10 min)										
1	0,3	H+V	1,0	830 / 622	180	200	1	14,22	50	33,2

ší délky vysílaného pulzu, čímž byla zlepšena celková detekční schopnost radaru. Dále byla využita vyšší opakovací frekvence na vyšších elevacích, čímž se zvýšila maximální jednoznačně určitelná dopplerovská rychlost. Díky zlepšeným výpočetním možnostem signálního procesoru se též mírně zlepšilo radiální rozlišení dat, pokročilejší signálové zpracování a dostupnost polarimetrických dat výrazně rozšířily možnosti eliminace nemeteorologických cílů z radarových dat. Pro odstranění pozemních odrazů jsou stále jako hlavní využívány dopplerovské filtry, které potlačují odrazy s radiální dopplerovskou rych-



Obr. 6 Porovnání filtrace nemeteorologických cílů pouze na základě dopplerovského filtru (vlevo) a při kombinaci dopplerovského filtru s prahováním pomocí SQI a polarimetrických veličin (vpravo). Za zmínku stojí především eliminace radiálních paprsků rušení WIFI/RLAN, odrazů od vzdálených bouřek mimo dosah radaru a odrazů od farmy větrných elektráren v Krušných horách.

Fig. 6. Comparison of non-meteorological echo filtering based only on a Doppler filter (left) and based on combination of a Doppler filter and thresholding using SQI and polarimetric variables (right). Note the elimination of radial RLAN/WIFI interference, second trip echoes, and echoes from a wind farm in the Krušné hory (Ore Mountains).

lostí blízkou nule. Novinkou je využití algoritmu GMAP, který v případě, že přijatý signál obsahuje odraz jak od pozemního, tak i meteorologického cíle, umí tyto signály rozlišit a potlačit jen část signálu od pozemního cíle. Tímto postupem je do značné míry eliminováno nechtěné „vykousávání“ meteorologické informace na nejnižších elevacích. Stejně jako u předchozí generace radarů je stále použito prahování přijatého signálu pomocí parametru LOG (Noise Offset) pro eliminaci vlastního šumu přijímače a dále prahování pomocí CCOR (Clutter Correction) pro odstranění zbytkového signálu silných pozemních odrazů. Nově je pro eliminaci dodatečných nemeteorologických cílů v rámci signálového zpracování zapnuto také prahování na základě kvality signálu SQI (Signal Quality Index) a polarimetrické charakteristiky PMI (Polarimetric Meteorological Index). Tato dodatečná prahování umožňují velmi efektivně eliminovat z výsledných dat rušení způsobené vysílači na stejné frekvenci (RLAN/WIFI) (Novák et al. 2008; Žejdlík, Novák 2010), falešné cíle způsobené odrazy od silné bouřkové oblačnosti za maximálním dosahem radaru (second trip echo) a odrazy od farem větrných elektráren. Ukázka srovnání filtrace nemeteorologických dat využívané v předchozích radarech a nově využívané filtrace je uvedena obr. 6.

Operativní objemové měření trvá cca 4 minuty a 15 až 20 sekund, zbývající čas je ponechán pro servisní a testovací účely. Každých 10 minut je v něm prováděno doplňkové měření, optimalizované pro vyhodnocení nízkohladinového pole dopplerovských radiálních rychlostí (CZRAD3_Dop v tab. 3). Jednou za hodinu je dále prováděno kalibrační měření ZDR. Zbývající termíny jsou rezervou pro testovací měření, např. pro testování parametrů filtrace nemeteorologických dat v signálovém zpracování. V budoucnu by mohlo být zavedeno např. kontrolní měření polohy antény na základě detekce slunce (sun calibration).

Při simultánním vysílání v H i V kanálu, které se používá

při operativním měření CZRAD, dochází k rozdělení vysílaného výkonu na dvě poloviny, čímž se na polovinu (o 3 dB) snižuje celková detekční schopnost radaru, tj. minimální zachytitelná odrazivost radarových cílů. Zejména díky použití delší délky pulzu v operativním měření, většinou zisku antény a větší citlivosti přijímače je však výsledná detekční schopnost nové generace radarů oproti předchozí o něco vyšší.

5. ZPRACOVÁNÍ A VYUŽITÍ DAT

Společně s novými radary byla pro radarové centrum v Praze-Libuši dodána počítačová pracovní stanice se softwarem IRIS pro vzdálený monitoring a řízení radarů. Software IRIS umožňuje též tvorbu radarových produktů z naměřených objemových dat, čehož je využíváno především pro testování úprav signálového zpracování a analýzu polarimetrických dat.

Pro tvorbu produktů pro koncové uživatele je v operativním provozu využíván software RVD/RPD, vyvinutý v radarovém oddělení ČHMÚ. Tento software byl využíván již pro zpracování objemových dat z předchozí generace radarů; díky tomu nedošlo po výměně radarů pro uživatele k žádným změnám ve formátu a přístupu k radarovým datům. Obdobně jako u předchozích radarů jsou naměřená objemová data ještě na radarových stanicích konvertována do interního formátu ČHMÚ RVD a odeslána do centra v Praze-Libuši k dalšímu zpracování. Software RVD/RPD umožňuje dostatečně flexibilní tvorbu široké škály radarových produktů podle specifických požadavků uživatelů. Umožňuje tvorbu informace sloučené z více radarů a dále výpočet radarových odhadů srážek včetně kombinace se srážkoměry (Novák, Kyznarová 2013; Novák, Kyznarová 2014) a extrapoláčnických předpovědí budoucího rozložení radarového echa (Novák 2007; Novák et al. 2009; Kyznarová et al. 2009). Software umožňuje rovněž zpracování objemových dat z radarů okolních zemí a jejich začleňování do sloučených radarových informací (Novák et

al. 2012), čehož bylo využito při odstávkách měření během výměny radarů. V té době byla do standardní české sloučené radarové informace přechodně doplňována data z německých a slovenských radarů. Díky dohodě s německou a slovenskou meteorologickou službou pak bylo možné tuto doplněnou sloučenou informaci zpřístupnit nejen pro interní využití v ČHMÚ, jak již fungovalo v minulosti, ale nově i pro externí uživatele a veřejnost.

Radarové produkty jsou uživatelům dodávány nejčastěji ve formě dvourozměrné gridové informace v binárním formátu (interním formátu ČHMÚ RPD, případně jako ESRI ASCII Grid využitelný ve standardních geografických informačních systémech), nebo jako obrázek ve standardním grafickém formátu PNG. Zpracovatelský software je velmi flexibilní v podpoře geografických projekcí. S ohledem na omezení rozlišení generovaných produktů jsou nejčastěji používány tři různé geografické projekce:

- Gnómonická projekce – nativní radarová projekce, využívaná pro zobrazování radarových dat od počátku digitálního zpracování v 90. letech 20. století.
- WGS 84 / UTM 33 – v ČHMÚ preferovaná projekce, využívaná zejména pro výstupy do geografických informačních systémů a hydrologických modelů.
- Mercatorova projekce (ve variantě nazývané též Pseudo-Mercator nebo Web Mercator), kompatibilní s mapovými podklady GoogleMaps a OpenStreetMaps, využívána pro zobrazení v novějších webových aplikacích.

Pro vizualizaci radarových dat v ČHMÚ i pro některé externí uživatele byly vytvořeny webové aplikace JSMeteoView/JSPrecipView (Novák 2007; Novák et al. 2008; Novák, Kyznarová 2013). Tento způsob vizualizace dat urychluje přístup k radarovým datům. Díky zabudovaným základním GIS funkcím (výpočet a zobrazování zeměpisné polohy kurzoru, překreslování vrstev s geografickými informacemi, přibližování části obrazu) umožňuje i přesnou geografickou lokalizaci detekovaných jevů. Aplikace JSMeteoView nabízí též kombinaci radarových měření s dalšími meteorologickými daty, jako jsou snímky z družice MSG, bodová data detekce blesků, předpovědní pole z numerického modelu ALADIN, přízemní pozorování SYNOP. Tím přináší meteorologům detailnější představu o pozorovaných jevech. Zjednodušená verze této aplikace je k dispozici i na veřejných internetových stránkách ČHMÚ pro širokou veřejnost.

Zpracovatelský software RVD/RPD i webové aplikace JSMeteoView v současnosti pracují pouze s nepolarimetrickými radarovými daty. Polarimetrická data jsou v současnosti analyzována a jsou vyvíjeny nové verze software RVD/RPD a JSMeteoView, které budou tato data podporovat. Dle současných plánů by nové verze měly být dostupné v průběhu roku 2016.

6. ZÁVĚR

Modernizace české meteorologické radarové sítě CZRAD, provedená v r. 2015, byla důležitá pro zachování kontinuity měření kvalitních radarových dat v České republice. Nově instalované radary Vaisala WRM-200 jsou moderní přístroje, zcela srovnatelné s radary instalovanými v poslední době jinde v Evropě. Hlavním rozdílem v porovnání s předchozí generací radarů je zlepšení signálního zpracování a možnost polarimetrických měření. Polarimetrická měření poskytují nové typy dat, které lze využívat přímo pro rozlišení typu radarových cílů, ale zejména pro zkvalitnění standardních dat radarové odrazivosti a z nich počítaných odhadů srážek díky účinnější eli-

minaci nemeteorologických cílů a korekci útlumu radarového paprsku v silných srážkách. Základní parametry operativních objemových měření u nových radarů byly zachovány, zachován byl i zpracovatelský a vizualizační software RVD/RPD a JSMeteoView, což umožnilo minimalizovat dopady na koncové uživatele. V současné době probíhá v radarovém oddělení ČHMÚ testování polarimetrických veličin. Zařazení podpory polarimetrických veličin do software RVD/RPD a JSMeteoView je plánováno v průběhu roku 2016.

Literatura:

- BŘEZKOVÁ, L., JANÁL, P., NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., 2015. Možnosti predikce příválových povodní v podmínkách České republiky. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu – Možnosti predikce příválových povodní v podmínkách České republiky*, sv. 60, s. 29–49, ISBN 978-80-87577-27-1.
- BRINGI, V. N., CHANDRASEKAR, V., 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. *Cambridge UP*, 636 s.
- CIFELLI, R. et al., 2011. A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28, s. 352–364.
- DOLAN, B. et al., 2013. A Robust C-Band Hydrometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, s. 2162–2186.
- GORGUCCI, E., SCARCHILLI, G., CHANDRASEKAR, V., 2000. Sensitivity of multiparameter radar rainfall algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 105, s. 2215–2223.
- HAVRÁNEK, P., KRÁČMAR, J. 1996. Nová meteorologická radiolokační stanice na střední Moravě. *Meteorologické zprávy*, roč. 49, č. 3, s. 81–84. ISSN 0026-1173.
- KERANEN, R., SALTIKOFF, E., CHANDRASEKAR, V., LIM, S., HOLMES, J., SELZLER, J., 2007. Real-time hydrometeor classification for the operational forecasting environment. *Preprints, 33rd Conf. On Radar Meteorology*, Cairns, Australia, Amer. Meteor. Soc., P11B.11. Dostupné z WWW: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/123476.pdf>
- KRÁČMAR, J., 1994. Radiohorizonty a výskyt pozemních cílů pro radiolokační síť ČR. *Meteorologické zprávy*, roč. 47, č. 6, 163–171. ISSN 0026-1173.
- KRÁČMAR, J., 1995. Automatizace radaru MRL-5 v provozu Českého hydrometeorologického ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. 48, č. 2, s. 37–44. ISSN 0026-1173.
- KRÁČMAR, J., 2000. Nový meteorologický radar Brdy v síti CZRAD. *Meteorologické zprávy*, roč. 53, č. 6, s. 161–168. ISSN 0026-1173.
- KYZVAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK – Convective cell tracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics. *Atmospheric Research*, 93, s. 317–327.
- 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*, 43, s. 792–801.
- 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. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, s. 140–164.
- NOVÁK, P., 2007. The Czech Hydrometeorological Institute's Severe Storm Nowcasting System. *Atmospheric Research*, 83, s. 450–457.

- NOVÁK, P., HAVRÁNEK, P., KRÁČMAR, J., 2008. Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. *Meteorologické zprávy*, roč. **61**, č. 5, s. 129–136. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., BŘEZKOVÁ, L., FROLÍK, P., 2009. Quantitative Precipitation Forecast using Radar Echo Extrapolation. *Atmospheric Research*, **93**, s. 328–334.
- NOVÁK, P., FROLÍK, P., BŘEZKOVÁ, L., KYZVAROVÁ, H., 2012. Utilization of Exchange of Weather Radar Data in the Czech Hydrometeorological Institute. In *Proceedings of the 7th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012)*, 24.–29. 6. 2012, Toulouse, Francie.
- NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, 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., KYZVAROVÁ, H., 2014. Progress in Operational Quantitative Precipitation Estimation in the Czech Republic. In *Proceedings of the 8th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, 1.–5. 9. 2014, Garmish-Partenkirchen, Německo.
- 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*, **86**, s. 809–824.
- SETVÁK, M., NOVÁK, P., ŠÁLEK, M., 2004. Tornáda 31. května 2001 na území ČR, *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 4, s. 101–112. ISSN 0026-1173.
- STRACHOTA, J., 1981. Využití meteorologického radiolokátoru TESLA RM-2 při zajišťování požadavků uživatelů meteorologických radiolokačních informací. *Meteorologické zprávy*, roč. **34**, č. 1, s. 4–8. ISSN 0026-1173.
- STRACHOTA, J., 1983. Lokalizace a identifikace nebezpečných letních konvektivních jevů meteorologickým radiolokátorem MRL-2. *Meteorologické zprávy*, roč. **36**, č. 5, s. 147–157. ISSN 0026-1173.
- STRACHOTA, J., 1985. Radiolokační měření srážek pro hydrologické účely. *Meteorologické zprávy*, roč. **38**, č. 5, s. 137–140. ISSN 0026-1173.
- ŠÁLEK, M., KRÁČMAR, J., NOVÁK, P., SETVÁK, M., 1997. Využití distančních metod při povodňových událostech v červenci 1997. *Meteorologické zprávy*, **50**, č. 6, s. 177–178. ISSN 0026-1173.
- ŠÁLEK, M., NOVÁK, P., KRÁČMAR, J., 2002. Využití metod dálkové detekce během povodní v České republice v srpnu roku 2002. *Meteorologické zprávy*, roč. **55**, č. 6, s. 177–179. ISSN 0026-1173.
- ŠERCL, P., 2015. Indikátor přívalových povodní. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu – Možnosti predikce přívalových povodní v podmínkách České republiky*, sv. **60**, s. 10–28, ISBN 978-80-87577-27-1.
- VAISALA, 2014. User's Manual: IRIS™ and RDA Dual Polarization. Dostupné z: ftp://ftp.sigmet.vaisala.com/outgoing/manuals/IRIS_and_RDA_Dual_Polarization_Users_Manual.pdf
- WALDVOGEL, A., FEDERER, B., GRIMM, P., 1979. Criteria for the Detection of Hail Cells. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, s. 1521–1525.
- ŽEJDLÍK, T., NOVÁK, P., 2010. Frequency Protection of the Czech Weather Radar Network. In: *6th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, Sibiu, 6.–10. 9. 2010.