VYUŽITÍ RADARŮ PRO ODHADY SRÁŽEK

Milan Šálek[1]

Abstrakt

Odrazivost, kterou je možné získat pomocí měření meteorologickými radiolokátory, je možné pomocí známého Z-R vztahu přepočítat na intenzitu srážek, což umožňuje operativní sledování srážek v poměrně dobrém časovém i prostorovém rozlišení. Radarové odhady srážek jsou však zatíženy mnoha chybami, což vynutilo vytvoření různých algoritmů jejich korekcí. Tzv. fyzikální korekce zahrnují především opravy pomocí vertikálních profilů, adjustační procedury a (geo)statistické algoritmy většinou používají vazbu radarových odhadů srážek a srážkoměrných měření.

V Českém hydrometeorologickém ústavu je od roku 2003 v provozu systém kombinovaných odhadů srážek založený na určitém spojení radarových odhadů a dostupných údajů srážkoměrných stanic. Prostorové rozlišení uvedených odhadů je 1 km^2, do konce roku 2009 byly odhady k dispozici rutinně pouze v časovém kroku 1 hodina a delším. Na počátku roku 2010 byl zaveden inovovaný systém odhadu srážek, který počítá s lokálně proměnlivým, časově konzervativnějším adjustačním koeficientem a s kombinací metodou regresního krigování, které je také známo jako krigování s externím driftem. Příspěvek představí principy uvedeného algoritmu i výsledky testů na souboru hodinových měření 18 srážkoměrných stanic v městě Brně.

Klíčová slova: meteorologický radar, atmosférické srážky, krigování, srážkoměr

1. Úvod

Měření atmosférických srážek na zemském povrchu je založeno na srážkoměrech, což představuje přímý způsob měření srážek. Dalším možným způsobem zjišťování padajících srážek je využití metod dálkové detekce, především meteorologických radiolokátorů, což označujeme za měření nepřímé nebo za nepřímý odhad srážek. Oba způsoby měření a odhadu srážek mají své výhody a nevýhody, které také závisejí na účelu získaných údajů a též na typu vlastních měřených či odhadovaných srážek.

Data meteorologických radiolokátorů vhodná pro kvantitativní odhad srážek jsou v České republice k dispozici od roku 1995, kdy byl uveden do provozu moderní dopplerovský meteorologický radiolokátor Skalky, který poskytoval data v digitální podobě. V roce 2000 byl postaven na vrcholu kopce Praha radiolokátor pojmenovaný Brdy, jenž nahradil zastaralý radar MRL-5 na observatoři Praha-Libuš. Brzy po začátku měření radaru Skalky se objevily první práce hodnotící možnosti jeho radarového odhadu srážek [7], které zjistily některé významné problémy spojené s radarovými odhady a navrhovaly jejich možné korekce.

V zahraniční i domácí literatuře je možno najít velké množství článků a příspěvků, které se zabývaly možnostmi radarových odhadů srážek a korekcemi jejich nedostatků, nicméně do operativní praxe je zavedeno pouze několik. Zatímco se v době zrodu meteorologických radiolokátorů objevovaly názory o možném nahrazení srážkoměrů radary, převládá v současné době paradigma komplementarity, kdy je pro optimální územní odhad srážek vhodné používat více metod měření a jejich vhodnou kombinaci, která minimalizuje (odhadovanou) chybu odhadu.

V příspěvku jsou diskutovány možnosti a omezení využití meteorologického radaru pro odhady srážek, přičemž zde budou rozebírány zejména měření pro území města Brna, kde je předvedeno též srovnání korespondujících odhadů srážek a srážkoměrných měření a algoritmus jejich kombinace. Jedním z původních výsledků projektu GAČR 103/07/0676,

v rámci něhož tato práce vznikla, je odhad maximální vzdálenosti srážkoměrných stanic, při níž radarová měření již ke zlepšení odhadu srážek nepřispívají.

2. Odhad srážek pomocí meteorologického radaru

2.1 Princip měření meteorologických radiolokátorů

Předností meteorologických radarů je plošné pokrytí rozsáhlých území (desetitisíce až statisíce kilometrů čtverečních), nicméně se u radarových odhadů srážek objevují jisté problémy s absolutní přesností naměřených hodnot, pročež se pro praktické aplikace výsledků odhadů srážek zavádějí různé korekční algoritmy.

Princip měření meteorologických radiolokátorů je podrobněji rozebrán v publikacích [3], [2], [8], popř. [11], zde si jej uvedeme pouze ve stručnosti a pro radary využívající záření jedné polarizace.

Meteorologický radar získává objemovou informaci pomocí pohyblivé antény, která podle předem definovaného schématu měření vysílá do prostoru v krátkých pulsech elektromagnetické záření v pásmu mikrovln. Objekty, které leží v cestě tohoto záření, malou část energie zachycují a odrážejí zpět. Tato energie je pak anténou radaru zachycena, změřena a pomocí příslušných algoritmů zpracována. Základní informací poskytovanou meteorologickým radarem je radiolokační odrazivost Z, vyplývající z radarové rovnice (např. [4]):

$$P_r = C\frac{|K|^2 Z}{r^2} = \Pi_M \frac{Z}{r^2} \tag{1}$$

Radarová konstanta C je funkcí vysílaného záření, délky pulsu, tvaru radarového paprsku (který je konvenčně definován jako objemový prostor, kde je intenzita vysílaného záření aspoň 50% intenzity záření ve středu paprsku), a též odráží další charakteristiky konstrukce vlastního radaru Π_M. Může případně zahrnovat i dielektrickou konstantu $|K|^2$ a někdy se nazývá meteorologickým potenciálem radaru, označovaným Π_M. Symbolem *r* je označena vzdálenost cíle.

Vztah intenzity srážek a radarové odrazivosti je následujícího tvaru:

$$Z = aR^b \tag{2}$$

kde koeficienty *a*, *b* závisejí na typu kapalných srážek a na rozdělení velikosti kapek v daném snímaném objemu. Pokud jsou použity hodnoty *a* = 200, *b* = 1,6, pak hovoříme o Marshallově a Palmerově vztahu, který je vztahován k průměrnému dešti ze slohovité (stratiformní, velkoprostorové) oblačnosti.

V minulosti, hlavně v 60. – 80. letech 20. století, se odborníci na radarové odhady srážek soustředili na „ladění“ parametrů vztahu (2), viz např. Battan [1], ale v 90. letech již převládlo následující paradigma. Chyby vlivem nevhodných parametrů vztahu (2) sice nejsou zanedbatelné, ale jsou většinou menší než chyby vznikající vlivem výšky radarového paprsku na zemským povrchem, nerovnoměrným zaplněním snímaného objemu atmosférickými částicemi, různou fází hydrometeorů apod.

2.2 Chyby radarových odhadů srážek

Chyby radarového měření je možné rozdělit na meteorologické, vznikající především proměnlivostí počasí a s tím spojenou různou povahou hydrometeorů (fáze, rozdělení velikosti apod.), a ostatní („nemeteorologické“), které plynou z vlastní techniky radarového měření (kvalita radarového zařízení, tvar a šíření radarového paprsku v atmosféře apod.).

Mnohé chyby radarového odhadu plynou z kombinace obou faktorů, např. vliv měnícího se vertikálního rozsahu oblačnosti a výšky radarového paprsku nad terénem.

Mezi nemeteorologické chyby radarového měření srážek patří např. nepřesná kalibrace radarového měření, tedy nepřesné hodnoty *Z*, která může vyplynout např. ze špatné funkce vlastního radarového zařízení. Moderní radary jsou schopny mnohé z těchto problémů řešit či včas diagnostikovat, ale ne vždy je možné závadu odstranit včas.

Někdy dochází k záměně termínu „kalibrace“ s termínem „adjustace“. Přestože to zatím není všude akceptováno bez výhrad, přijímá se konvence, podle níž se pojmem „kalibrace“ míní nastavení (nebo udržení) parametrů radaru pomocí vlastního zařízení (někdy i pomocí jiného techniky), které zajišťuje především stabilitu měření neboli reprodukovatelnost. Termín „adjustace“ se používá hlavně ve spojení s radarovými odhady srážek, které jsou opravovány pomocí jiných metod měření srážek, typicky pomocí hodnot srážkoměrů.

Mezi podstatné problémy týkající se odhadu srážek z radarů patří výška nejnižšího použitelného paprsku nad zemským povrchem a jeho šířka, přičemž se oba parametry zvětšují s rostoucí vzdáleností od radaru. Ve vzdálenosti 120 km je při běžně používané nejnižší elevaci antény 0,5° střed paprsku ve výšce 2 km nad výškou radaru, geometrický průměr paprsku (při úhlové šířce 1°) 2 km, tudíž snímané meteorologické cíle jsou průměrovány z intervalu výšky 1 až 3 km nad výškou radaru. Při vzdálenosti 230 km je získávána průměrná odrazivost z vrstvy 1,6-5,6 km nad výškou vlastního radaru. Je nutné zdůraznit, že tyto problémy jsou významnější při slohovité oblačnosti, ve které typicky klesá odrazivost s výškou rychleji, zatímco při konvektivních srážkách (letní přeháňky či bouřky) se uvedený problém nejeví jako příliš kritický.

Mezi další nedostatky radarových měření patří možné částečné či úplné blokování paprsku terénními překážkami či jinými objekty (stožáry, budovy, stromy apod.). Samostatným problémem jsou pozemní cíle, jejichž přítomnost může radarové měření zcela znehodnotit. V současné době se k eliminaci („vymazání“) pozemních cílů používají algoritmy využívající Dopplerův jev, neboť pozemní cíle se na rozdíl od hydrometeorů většinou příliš nepohybují, popř. statistický filtr. Od roku 2005 se v určitých azimutech objevuje i rušení vlivem datových přenosů a neodfiltrovatelné pozemní cíle vznikající točením vrtulí větrných elektráren.

Mezi chyby měření srážek vzniklé především měnící se meteorologické parametry, např. změna typu srážek (déšť, sníh, srážky konvektivní či velkoprostorové). Při interpretaci radarových odhadů je tedy nutné znát či kvalifikovaně odhadnout převládající typ srážek.

2.3. Systém odhadů srážek v ČHMÚ

Ke konci 20. století se vyvinulo několik metod, které měly za cíl zlepšit absolutní přesnost radarových odhadů. V ČHMÚ je od roku 2003 v provozu systém, který kombinuje odhady srážek české meteoradarové sítě a dostupná měření ze srážkoměrných stanic. Systém byl zaveden autorem a je podrobněji popsán např. v [12], zde je uvedeno pouze stručné shrnutí. Algoritmus byl inspirován publikacemi [5], [10] a [9].

Základem je myšlenka komplementarity jednotlivých typů měření srážek („plošný“ radarový odhad, „bodová“ srážkoměrná měření) a uvádění informací, které mohou diagnostikovat případné problémy jednoho či druhého typu měření. Z tohoto důvodu se počítají a uvádějí (zobrazují uživatelům) všechny odhady, tedy nekorigovaný (původní) odhad srážek z meteorologických radarů, adjustovaný odhad, odhad srážek počítaný krigováním srážkoměrných měření a kombinace adjustovaného odhadu a srážkoměrných měření. Tyto odhady jsou počítány pro doménu české meteoradarové sítě CZRAD (zasahuje tedy i mimo Českou republiku) v rozlišení 1x1 km, tedy radarů Skalky a Brdy. Podrobnější údaje o těchto radarech jsou na veřejně dostupné internetové stránce http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad_sit.html. Zde jen stručně uvedeme, že tyto radary měří na vlnových délkách 5 cm (pásmo C), měří radiální rychlost objektů pomocí Dopplerova jevu, což je využíváno mj. i k eliminaci pozemních cílů.

2.3.1. Radarový odhad (nekorigovaný)

Pro výpočet nekorigovaného radarového odhadu se využívají se měření radiolokační odrazivosti v hladině (vrstvě) nejbližší 2 km nad mořem nebo z nejnižší dostupné elevace, jestliže není odrazivost z hladiny 2 km dostupná (což se označuje jako termínem pseudoCAPPI 2 km). Interval měření byl 10 minut, v roce 2007 se začala využívat pětiminutová měření v tzv. prokládaném módu, na jaře 2009 plnohodnotná pětiminutová měření. Změřená odrazivost ve výšce kolem dvou kilometrů je poté přepočtena na intenzitu srážek Marshallovým a Palmerovým vztahem $Z=200.R^{1.6}$ a suma za dané období je získána časovou integrací příslušných pětiminutových (dříve desetiminutových) měření.

2.3.2 Adjustovaný radarový odhad

Do roku 2009 byla používána adjustace územně konstantním adjustačním koeficientem, od jara 2010 je aplikován územně proměnlivý adjustační koeficient, který je spočten pomocí sumace aktuálně disponibilních párů radarových odhadů a územně příslušných srážkoměrných měření v územním elementu 1x1 km. Uvedený koeficient je plošně interpolován metodou univerzálního krigování.

2.3.3 Interpolace ze srážkoměrných měření

Od jara 2010 je počítán metodou univerzálního krigování.

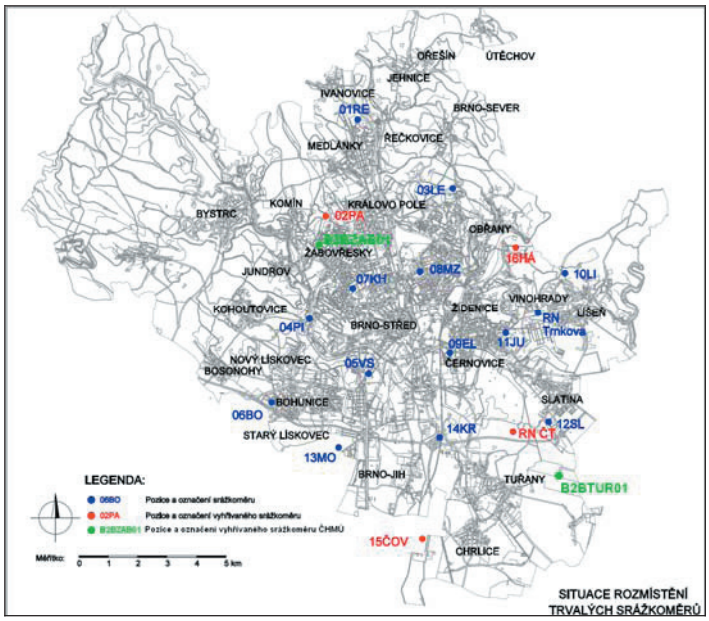
2.3.4 Vlastní kombinace (pracovní název: merge)

Pro závěrečnou kombinaci adjustovaného radarového odhadu srážek byl kromě dříve používaného převzatého algoritmu D. J. Sea [9], který upravil a implementoval autor této práce, vypracován a naprogramován algoritmus regresního krigování (označován jako RK), který je v podstatě totožný s tzv. krigováním s externím driftem (KED) [6].

3. Algoritmy odhadu srážek ve srovnání se srážkoměrnými měřeními v oblasti města Brna

Výše uvedené odhady srážek se operativně počítají v hodinovém (a delším) kroku pro území České republiky a okolí v gridu (územních elementech) velikosti 1 km^2. Hustota dostupných srážkoměrných stanic činí asi 1 stanice na 70 km^2 pro 24hodinové odhady za předpokladu dostupnosti všech měření včetně manuálních, což je však většinou v operativním provozu nedosažitelné. V reálné situaci je průměrná hustota stanic pro hodinové odhady srážek do 300 stanic na území České republiky, což odpovídá 1 stanici na asi 200-240 km^2. Mnoho stanic, jejichž měření jsou součástí operativního odhadu, je do databáze ČHMÚ importováno od jiných subjektů, mezi které patří zejména podniky Povodí.

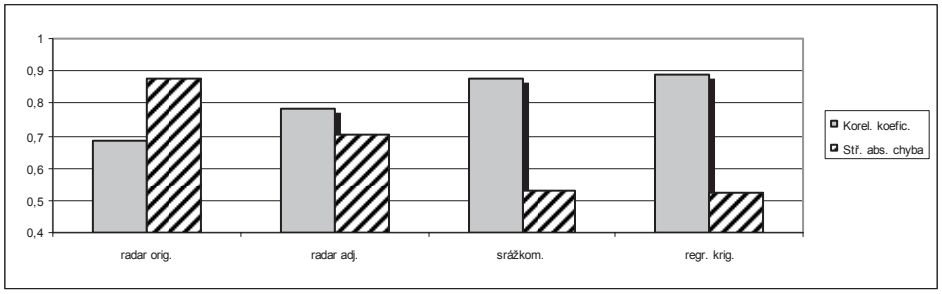
Měření stanic v oblasti města Brna podnikem Brněnské vodárny a kanalizace, a.s., (dále BVaK) poskytlo možnost přesnějšího výpočtu vztahu radarových odhadů srážek s různými korekcemi či kombinacemi a konkrétních hodnot srážkoměrů. Srážkoměrná síť 20 srážkoměrů se zahrnutím stanic Českého hydrometeorologického ústavu na území města Brna je uvedena na Obr. 1. Pro celkovou analýzu bylo použito 18 srážkoměrů účelové sítě BVaK z let 2008 a 2009, přičemž pro systém adjustace radarových odhadů a jejich kombinace se srážkoměrnými měřeními byly použity stanice ČHMÚ, konkrétně Brno-Žabovřesky a Brno-Tuřany. Hustota srážkoměrných stanic na území města Brna je při počtu 18 stanic asi jedna stanice na 8 km^2, tedy zhruba řádově vyšší než činí typická hustota srážkoměrů na území České republiky.



Obr. 1: Rozmístění srážkoměrů ve městě Brně

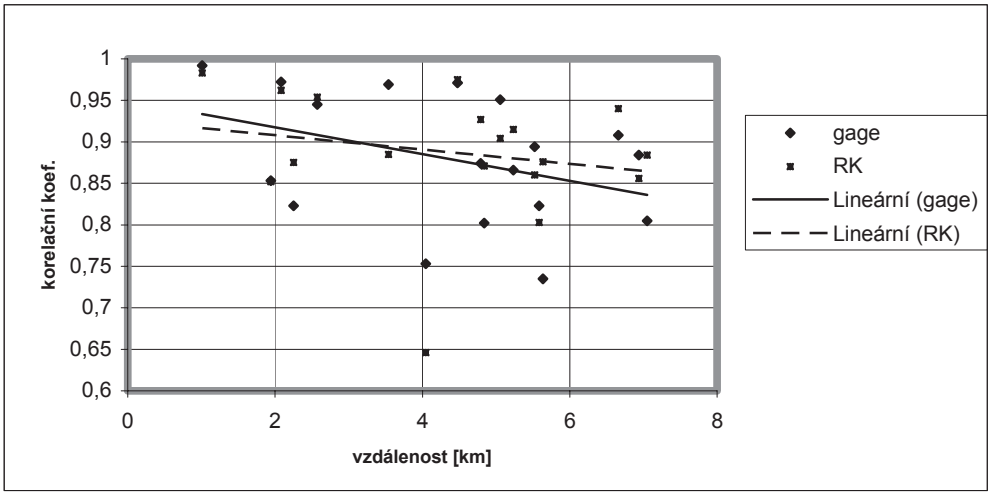
Pro účely zhodnocení různých typů radarových odhadů bylo vybráno období duben až říjen 2009, přičemž do analyzovaných údajů byly zahrnuty pouze hodinové odhady, navíc za podmínky nenulových srážek. Uvedený výběr zajistil lepší statistické rozdělení hodnot srážkových úhrnů. Tímto způsobem bylo vybráno celkem 208 hodinových epizod, pro které byly pro lokality verifikačního souboru stanic BVaK zjištěny odhady výše uvedené odhady srážek.

Pro 18 stanice BVaK byly spočteny charakteristiky vztahu srážkoměrných úhrnů a výše uvedených odhadů. Mezi tyto charakteristiky patřily korelační koeficient a průměrná (střední) absolutní chyba. Korelační koeficienty a střední absolutní chybu na všech (verifikačních) stanicích BVaK uvádí Obr. 2.

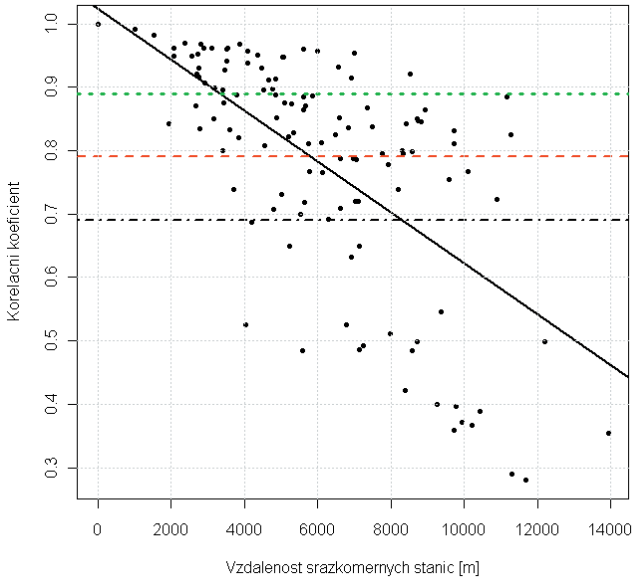


Obr. 2: Korelační koeficienty (šedě) a střední absolutní chyby (šrafura) různých typů odhadu pro stanice BVaK

Z výsledků vyplývá, že nejlepší shodu vykazuje metoda regresního krigování a univerzální krigování bez vlivu radaru, vlastní radarový odhad je výrazně horší. Adjustace sice chybu radarového odhadu výrazně zmenší, ale ani adjustovaný radarový odhad zdaleka nedosahuje kvality odhadu získaného pouze ze srážkoměrů. Radarový odhad zde tedy přispívá k lepší kvalitě odhadu pouze menší měrou a jeho vliv se projevuje pouze při aplikaci algoritmu regresního krigování. Příčinou relativně slabého příspěvku radaru je zřejmě poměrně velká blízkost stanic BVaK a stanic ČHMÚ (průměrně 4,4 km), ze kterých se plošné rozložení srážek algoritmem universálního a regresního krigování počítá.



Obr. 3: Závislost korelačního koeficientu odhadu srážek metodou univerzálního krigování pouze z hodnot srážkoměrů („gage“, plná čára) a metodou regresního krigování s použitím radaru („RK“, čárkovaně) na vzdálenosti od nejbližší srážkoměrné stanice použité ve výpočtu.



Obr. 4: Závislost korelačního koeficientu nenulových hodinových úhrnů srážkoměrných stanic z období duben-říjen let 2008 a 2009 na vzdálenosti (body). Uvedenou závislostí byla metodou nejmenších čtverců proložena přímka. Do grafu byly proloženy hodnoty korelačního koeficientu srážkoměrných hodinových srážkoměrných měření a příslušného nekorigovaného radarového odhadu (spodní čerchovaná přímka o hodnotě 0,69), adjustovaného radarového odhadu (střední čárkovaná linie o hodnotě 0,79) a odhadu metodou regresního krigování (horní tečkovaná přímka o hodnotě 0,89).

Z uvedených hodnot je možné též získat informaci, jak závisí kvalita universálního (tj. pouze srážkoměrného) a regresního (tj. s použitím radaru) krigování na vzdálenosti od nejbližšího použitého srážkoměru. Uvedená analýza je na Obr. 3 pro hodnoty korelačního koeficientu. Obr. 4 ukazuje závislost vzájemné korelace srážkoměrných stanic na vzdálenosti v porovnání s korelačními koeficienty ostatních odhadů.

Z Obr. 3 a 4 je možné usoudit, že radarová měření zpřesňují celkový odhad hodinových srážek až od vzdálenosti zhruba čtyř kilometrů od nejbližší použité srážkoměrné stanice.

4. Závěr

Z předložené studie vyplývá, že radarová měření mohou v oblastech s dobrou radarovou viditelností, ke kterým brněnská aglomerace jistě patří, pozitivně přispět ke kvalitě odhadu plošného rozložení srážek hlavně v případě řidší sítě srážkoměrných stanic, kdy jejich vzájemná vzdálenost přesahuje přibližně čtyři kilometry. Platnost uvedeného závěru je však zatím omezena na hodinové akumulace srážek, jiné intervaly akumulace srážek nebyly testovány.

Poděkování

Uvedená práce vznikla za podpory grantu GAČR č.103/07/0676.

Literatura

[1] BATTAN, L., 1973. Radar Observation of the Atmosphere. Univ. of Chicago Press, Chicago. 324 pp.

[2] COLLIER, C. G. , 1996. Applications of weather radar systems: a guide to uses of radar data in meteorology and hydrology. Ellis Horwood Limited Publishers. Chichester UK.

[3] DOVIAK, R. – ZRNIĆ, D., 1993. Doppler Radar and Weather Observation. Academic Press Inc..

[4] ŘEZÁČOVÁ, D. – NOVÁK, P. – KAŠPAR, M. – SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Academia. 576 s.

[5] FULTON, R. – BREIDENBACH, J. – SEO, D. J. – MILLER, D. – O'BANNON, T., 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. Weather and Forecasting, ročník 13, pp 377–395.

[6] HENGL, T., 2007. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. European Commission. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.

[7] ŠÁLEK, M. – KRÁČMAR, J., 1997. Odhady srážek z meteorologického radiolokátoru Skalky. Meteorologické zprávy, ročník 4: s. 99–109.

[8] RINEHART, R. E., 1997. Radar for Meteorologists. Rinehart Publications, Grand Forks.

[9] SEO, D. J., 1998. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. Journal of Hydrology, ročník 208, č. 1-2: pp 37 – 52, ISSN 0022-1694.

[10] SEO, D. J., 1998. Real-time estimation of rainfall fields using rain gage data under fractional coverage conditions. Journal of Hydrology, ročník 208, č. 1-2, pp 25 – 36, ISSN 0022-1694.

[11] ŠÁLEK, M. – CHEZE, J. L. – HANDWERKER, J. – DELOBBE, L. – UIJLENHOET, R., 2004. Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. Brussels: COST Office.

[12] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. In: *Third European Conference on Radar in Meteorology (ERAD).* ERAD Publication Series, ročník 2, pp 16–20.

Kontakty na autora

1 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: salek@chmi.cz