

Měření oblačnosti na Milešovce



Akademie věd
České republiky



věda
kolem
nás
co to je...

115

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., (ÚFA) je veřejná výzkumná instituce, která je jedním z pracovišť Akademie věd České republiky. Hlavním vědeckým zaměřením ústavu je výzkum procesů v zemské atmosféře a blízkém vesmíru. Jedná se o širokou vědní oblast od výzkumu a předpovědi jevů ve spodních partiích atmosféry, kterému se věnují pracovníci oddělení meteorologie, přes příčiny a projevy změn klimatu a jejich vliv na společnost, kterými se zabývají vědci z oddělení klimatologie, až po jevy ve vrchních partiích atmosféry a ionosféry, které studují v oddělení ionosféry a aeronomie. Navazujícímu výzkumu fyzikálních procesů v blízkém i vzdáleném prostoru Sluneční soustavy se věnují pracovníci oddělení kosmické fyziky a skupiny numerických simulací heliosférického plazmatu. Vedle základního výzkumu se zaměstnanci ústavu podílejí na návrhu a vývoji vědeckých přístrojů a metod nebo monitorování a speciálních pozorováních jak na povrchu Země, tak vysoko v atmosféře a v meziplanetárním prostoru. Získaná vědecká data jsou dále sdílena napříč vědeckou komunitou v rámci bohaté mezinárodní spolupráce a výsledky výzkumu jsou také publikovány v uznávaných vědeckých časopisech.

Ústav byl založen 1. ledna 1964 a jeho hlavní část od počátku sídlí v areálu Geofyzikálního ústavu AV ČR v Praze na Spořilově. Mimo hlavní budovu v Praze ústav spravuje meteorologické observatoře Milešovka a Kopisty, observatoř a telemetrickou stanicí Panská Ves, ionosférickou observatoř Průhonice a společnou observatoř Dlouhá Louka v Krušných horách.

Výzkumná činnost ÚFA probíhá v úzké spolupráci se zahraničními i tuzemskými vědeckými a odbornými pracovišti včetně vysokých škol. Ústav je také úspěšným navrhovatelem mnoha tuzemských a mezinárodních grantových projektů. Pracovníci ústavu se v neposlední řadě podílejí na výuce studentů na vysokých školách formou přednášek a vedením bakalářských, magisterských a doktorských prací. Pro mladší studenty a veřejnost ústav pořádá četné popularizační akce, jako jsou exkurze, přednášky a ukázky činnosti pracovníků, a aktivně se zúčastňuje různých vědeckých festivalů. Prezentace výzkumu a vědeckých výsledků probíhá také ve spolupráci s veřejnoprávními médii a je pravidelně zveřejňována v on-line prostoru.

Milešovka je se svou výškou 837 metrů nad mořem nejvyšší horou Českého středohoří a dominuje okolní krajině, kterou převyšuje až o 400 metrů. Na vrcholu byla v roce 1904 vybudována meteorologická observatoř, která je v provozu nepřetržitě od roku 1905 až do současnosti (viz obrázek 10). Observatoř patří svou polohou a délkou pozorování ke světově unikátním horským meteorologickým stanicím. Historie a současnost měření na Milešovce byla popsána již ve 29. svazku edice Věda kolem nás – *Observatoř Milešovka* (Zacharov et al., 2015). Mezi pozoruhodnosti stanice patří nejčastější výskyt mlhy ze všech meteorologických stanic v České republice. To vedlo už v minulosti k četným výzkumným kampaním, během kterých se měřily různé vlastnosti mlh a usazených srážek, ale i oblačnosti a padajících srážek. Například v roce 1967 byl na observatoři nainstalován první meteorologický radar v Čechách, který však fungoval pouze do roku 1968. I v současnosti klademe velký důraz na výzkum oblačných procesů, a proto byla observatoř vybavena moderní technikou, která ji řadí mezi nejlépe vybavené meteorologické stanice na světě. Dominantou observatoře je vyhlídková věž, na které je umístěna kopule *meteorologického radaru*, na meteorologické zahrádce je kromě běžného srážkoměru ještě druhý radar – *oblačný profiler* –, přístroj na měření spektra velikostí padajících dešťových kapek – *distrometr* –, přístroj na měření obsahu kapalné vody v oblaku nebo mlze – *PVM* – a přístroj měřící výšku spodní základny oblačnosti – *ceilometr*. Právě popisem a využitím těchto přístrojů a představením prováděného výzkumu se zabývá tato publikace.

Oblačnost

Oblaky představují jeden z nejviditelnějších projevů počasí vůbec. Jsou složeny z malých kapiček vody a ledových krystalků, kterým říkáme oblačné kapičky a oblačný led. Pokud tyto částice rostou, mohou se zvětšit do velikosti dešťových kapek nebo velkých sněhových částic, případně krupek či krup. Ty pak vypadávají z oblaku a vytváří srážky – déšť, sněžení či krupobití. Odborně všechny zmíněné částice od malých oblačných částic po velké kroupy označujeme jako *hydrometeory*.

Oblak – soustava nepatrných vodních kapek nebo ledových částic, případně obojího, v atmosféře (slovník ČMeS 2021). Hojně používané označení mrak je hovorové a neoborné synonymum.

Oblaky dokážou významně ovlivnit počasí, neboť mění množství slunečního záření dopadajícího na zem, podílejí se na hydrologickém cyklu, ale mohou být zodpovědné i za nebezpečné jevy, jako je silný vítr, krupobití nebo i tornáda. Studium oblakotvorných a srážkotvorných procesů je součástí moderní meteorologie a přispívá k pochopení dějů v oblaku i ke zlepšení předpovědi počasí.

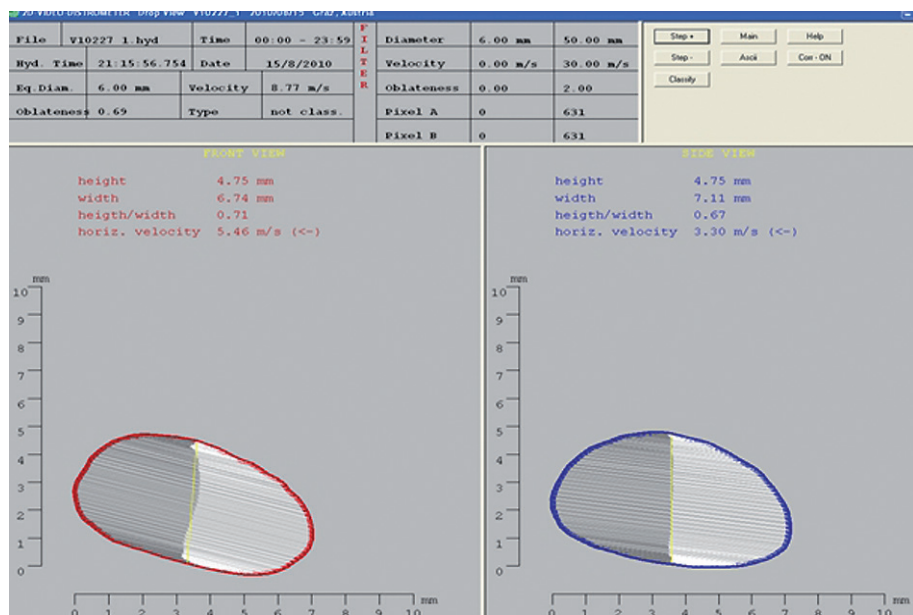
Mezi padající srážky, které dosahují zemského povrchu, patří následující **hydrometeory**: déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, krupky, zmrzlý déšť, kroupy a ledové jehličky.

Oblačnost se na observatoři pozoruje již od roku 1905. Pozorovatelé určují množství a druh oblačnosti a také výšku oblačnosti nad stanicí. V historii pozorování se tyto údaje zapisovaly třikrát denně v tzv. klimatických termínech v 7, 14 a 21 hod. místního času (SEČ). Momentálně se tyto údaje zapisují do zprávy každou hodinu a i přes využití moderní techniky v současné době se pozorovatel neobejde bez subjektivního pozorování, protože zatím neexistuje přístroj, který by přesně zhodnotil množství oblačnosti v horizontu dohledu pozorovatele a určil její druh. Ceilometr (viz kapitolu Měření výšky základny oblačnosti) může pozorovateli pomoci určit výšku základny oblačnosti, která se do zprávy zapisuje, ale pouze pokud byla oblačnost v posledních desítkách minut přímo nad observatoří. Naopak strukturu oblačnosti, její složení, pohyby uvnitř oblačnosti atd. pozorovatel samozřejmě určit nedokáže. K tomu právě slouží současné moderní vybavení observatoře.

„Na obloze vidíme mraky oblaků, nikoli oblaky mraků.“

Při pozorování oblačnosti rozdělujeme oblaky podle jejich morfologie neboli vnějších tvarů a vzhledu do dvou základních skupin. První skupinou jsou horizontálně homogenní oblaky bez výrazných struktur, s horizontálním rozměrem výrazně přesahujícím vertikální. Tyto oblaky připomínají oblačnou vrstvu a nazýváme je vrs-

Obr. 1 Tvar dešťové kapky změřený videodistrometrem ÚFA. Na obrázku je patrné zploštění dešťové kapky o horizontální velikosti 6,74 x 7,11 mm a výšce 4,75 mm (Ondřej Fišer, ÚFA)



tevnaté neboli stratiformní (stratus = vrstva). Druhou skupinu představují oblaky naopak vertikálně mohutné, s výraznými strukturami, které označujeme jako kupovité neboli konvektivní. Vrstevnaté oblaky produkují srážky s nízkou intenzitou, na rozdíl od intenzivních přeháněk z kupovité oblačnosti. Vrstevnatý oblak produkující nezanedbatelné srážky nazýváme *nimbostratus*, kupovitý oblak pak *cumulonimbus*. Ostatní druhy oblačnosti, kterých je ještě osm, neprodukují významné srážky.

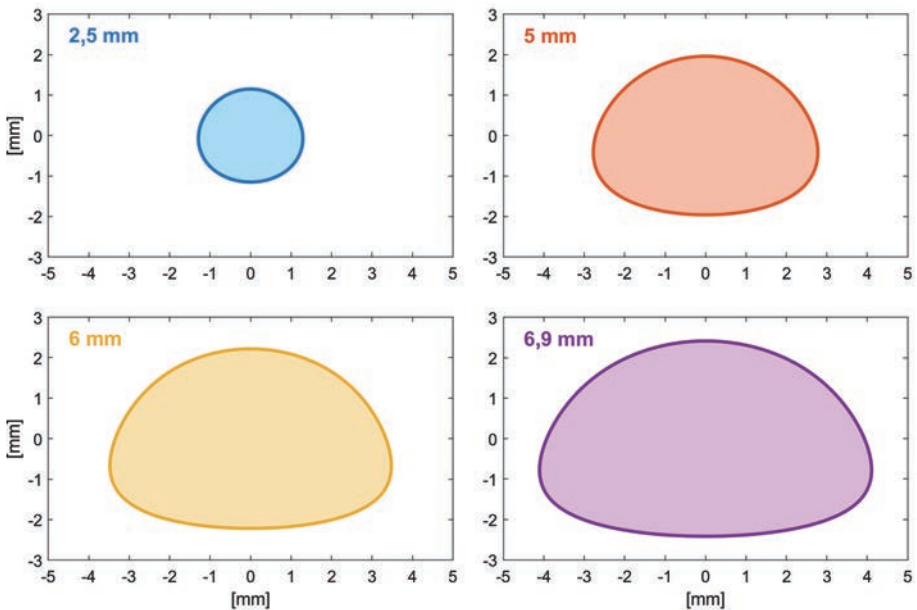
Pokud bychom chtěli experimentálně zkoumat oblačnost, existují dvě metody, jak to udělat. Buď můžeme v laboratoři zkoumat především oblakotvorné procesy, např. vlastnosti koalescence (tzn. jak splývají oblačné kapky při vzájemných srážkách), a případně i vliv větru a turbulence na tyto procesy. Druhým způsobem je měření vlastností oblaků tzv. *in situ* neboli přímo v atmosféře. To můžeme provádět buď měřením přímo v oblaku s využitím letadel nebo balonů, nebo pozemním měřením, které je na rozdíl od jednorázových leteckých kampaní většinou trvalejšího rázu.

Z těchto měření můžeme získat velké množství dat a informací zajímavých hlavně pro vědce, ale některé mohou zaujmout i veřejnost. Pokud se řekne kapka, každý si asi představí kapku padající od kohoutku nebo kapku z díla Ondřeje Sekory. Ale dešťová kapka letící vysoko z oblaku takto vůbec nevypadá. Ústav fyziky atmosféry provozuje v Praze na Spořilově videodistrometr, přístroj, který dokáže nejen měřit velikosti padajících kapek, ale také kapky vyfotografovat. Na obrázcích 1 a 2 si můžete prohlédnout, že malá padající dešťová kapka je přibližně kulová, ale velká dešťová kapka je zespondu zploštělá a do kuličky má opravdu daleko.

Meteorologické radary - princip a popis

Meteorologické radary jsou určeny k detekci a určení hydrometeorů ve svém okolí. Radar vysílá elektromagnetický pulz, jehož malá část se od hydrometeorů odráží a vrací zpátky k radaru. Čas mezi vysláním pulzu a přijetím odraženého signálu udává vzdálenost cíle. Většina současných radarů umí na základě Dopplerova jevu určit i rychlost pohybu hydrometeorů ve směru k radaru nebo od něj a dále např. zlepšit kvalitu dat tím, že dokážou vyloučit z dalšího zpracování nežádoucí nepohyblivé pozemní cíle v případě, že jsou v některých situacích detekovány. Polarimetrické radary umožňují navíc současně vyhodnocovat odrazy horizontálně a vertikálně polarizovaného záření a z jejich porovnání odvodit další charakteristiky hydrometeorů (viz obrázek 3). Velmi zjednodušeně platí, že zploštělá částice, např. letící dešťová kapka (viz předchozí kapitolu), bude odrážet více energie horizontálně polarizovaných vln než vertikálně polarizovaných, protože prostě zabírá v horizontálním směru více místa než ve vertikálním.

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného vlnění oproti vysílanému, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Dopplerův jev lze pozorovat i v běžném životě - jeho projevem je např. změna (snížení) vnímané výšky tónů vydávaných sirénou na vozidle projíždějícím okolo pozorovatele. Stejný efekt zažívá pozorovatel ve vlaku při projíždění přes zavřený přejezd se zvukovou signalizací (zdroj: Wikipedia 2021).



Obr. 2 Tvary dešťových kapek odvozené z měření podle Thurai (2007). V obrázku je vyznačena velikost kapky odpovídající průměru kuličky o stejném objemu jako daná kapka

Základní dělení radarů je podle vlnové délky vysílaného pulzu (viz tabulku). V meteorologických aplikacích se využívají radary pracující v pásmech S, C, X, K a W.

S-pásmové radary jsou využívány např. v USA, kde tvoří základ sítě NEXRAD. Díky zvolené vlnové délce je útlum na oblačných částicích minimální, což je hlavní výhoda těchto radarů. Jedná se však o mimořádně velké a drahé zařízení. **C-pásmové radary** jsou nejpoužívanějšími radary v meteorologických službách v Evropě a jsou využívány i v Českém hydrometeorologickém ústavu. Tyto radary jsou také značně velké a nákladné. Oproti S-pásmovým radarům se již částečný útlum na velkých oblačných částicích vyskytuje, nicméně stále je pro většinu situací nevýznamný a při praktickém provozu se tento útlum často nereší.

X-pásmové radary jsou vzhledem k použité vlnové délce menší než C-pásmové radary a méně náročné na výrobu. Jsou proto levnější a mohou být použity i jako mobilní radary. Útlum na srážkových částicích je u těchto radarů ovšem již značný. Tyto radary se používají pro výzkumné účely, k pokrytí míst nepokrytých sítě C-pásmových radarů nebo jako přehledové radary např. na lodích nebo u letišť. Pro pokrytí většího území je potřeba radary kvůli útlumu umístit blíže k sobě. Příkladem X-pásmového radaru je radar Furuno 2010 umístěný na věži meteorologické stanice Milešovka, který pracuje na frekvenci 9,4 GHz.

Hlavním účelem oblačných radarů je zkoumání vlastností a vývoje oblaků, výjimečně jsou využívány v praktickém provozu v okolí letišť. Obvykle pracují v **pásmu K** nebo v **pásmu W**. Tyto radary mají sice krátký dosah, ale zato vysoké rozlišení vhodné právě ke studiu oblačných procesů. Na Milešovce je umístěn oblačný profiler (na rozdíl od radaru je anténa zaměřena vertikálně a nepohybuje se) METEK Mira 35c, který pracuje s frekvencí 35 GHz.

Pásmo	Vlnová délka [cm]	Frekvence [GHz]
W	0,4	94
K	1	30
X	3	10
C	5	6
S	10	3

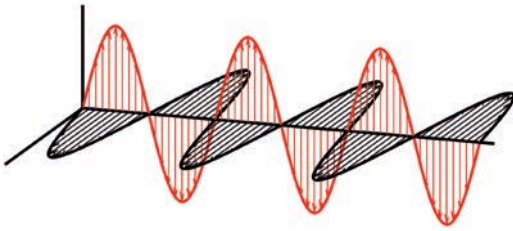
Tabulka: střední vlnové délky a frekvence pro jednotlivá pásma (zdroj: ČMeS 2021)

Obláčny radar METEK

Mira 35c je dopplerovský radar pracující v K pásmu na frekvenci 35 GHz. Anténa o průměru 1 m je orientována vertikálně a není pohyblivá. Radar se říká profiler, protože měří oblačnost pouze v úzkém profilu nad radarem a výsledkem měření je časový průřez oblakem nad Milešovkou. Radar vysílá lineární polarizovaný signál v jednom kanálu a přijímá na dvou kolmých lineárních polarizacích. Po přijetí odraženého signálu radarovým přijímačem je možné na základě zjištěné radarové odrazivosti určit hustotu oblačných částic v oblaku a pomocí lineárního depolarizačního poměru (LDR) usuzovat na mikrofyzikální složení oblačnosti (oblačné a srážkové kapky, ledové částice, sníh atp.). Poměr LDR odpovídá logaritmu podílu síly signálu přijatého ve vertikálním a horizontálním kanálu při vysílání pouze v horizontálním kanálu. U sféricky symetrických částic je hodnota LDR malá. Naproti tomu je hodnota LDR výrazná v oblastech s přítomností nesymetrických a různě orientovaných částic (např. vrstva, kde dochází k tání oblačných částic, tzv. *bright band*) nebo v oblasti výskytu krup. Profiler měří i dopplerovskou rychlost oblačných částic a padajících srážek, což lze využít jako další parametr při stanovení typu a velikosti padajících srážek. V následujícím textu uvádíme příklad měření radarem Mira 35c.

Nimbostratus (Ns)

Oblak nimbostratus je charakterizován jako šedá, často tmavá oblačná vrstva nebo plocha, která má matný rozplývavý vzhled (ČMeS 2021). Nimbostratus se vyznačuje velkým plošným rozsahem, velkou horizontální homogenitou, malou vertikální rychlostí a trvalými srážkami. Na vrcholu oblaku vznikají malé ledové krystalky depozicí neboli nárůstem krystalků přímo z vodní páry. Ledové krystalky mají velmi malé pádové rychlosti a jen velmi pomalu propadávají oblakem dolů. Ve střední části oblaku je dominantní agregace, spojování ledových krystalků při



Obr. 3 Horizontální (černá) a vertikální (červená) polarizace vln vysílané polarimetrickým radarem (radar představuje počátek souřadného systému vlevo na obrázku)

Obr. 4 Oblačný profiler METEK Mira 35c umístěný na meteorologické zahrádce observatoře Milešovka



jejich vzájemných nárazech a vznik sněhových vloček. Pádová rychlost vloček pak pomalu narůstá. Kolem nulové izotermy, hladiny atmosféry s teplotou rovnou 0 °C, se nachází vrstva tání, která je v měření zvýrazněna jako pás zvýšené odrazivosti, tzv. *bright band*. Pod touto vrstvou již vypadávají dešťové kapky s výrazně vyšší pádovou rychlostí, než měl sníh nad ní. Na obrázcích 5, resp. 6 je zaznamenáno měření odrazivosti a vertikální rychlosti hydrometeorů z noci 22.–23. září 2018, kdy přes Milešovku přecházel nimbostratus s takřka učebnicovými vlastnostmi. V horní části oblaku vidíme oblast s ledovými krystalky a velmi nízkými pádovými rychlostmi. Ve vrstvě 1–5 km vidíme oblast s vyšší odrazivostí a pádovou rychlostí. Zde narůstají ledové částice agregací. Výrazná čára zvýšené odrazivosti, *bright band*, se nachází kolem 1 km nad radarem. Ve vrstvě pod *bright band* se vyskytují kapky deště s vyšší pádovou rychlostí.

Bright band - oblačná vrstva o tloušťce několika stovek metrů, v níž je pozorováno zvýšení radarové odrazivosti vlivem tání sněhových srážek pod nulovou izotermou (slovník ČMeS 2021)

Cumulonimbus (Cb)

Cumulonimbus je charakterizován jako mohutný a hustý oblak velkého vertikálního rozsahu v podobě obrovských věží, s nevelkým horizontálním rozsahem, velkou prostorovou proměnlivostí, značnými vertikálními rychlostmi a přehánkami (ČMeS 2019). Hydrometeory v Cb část doby, po kterou rostou, oblakem stoupají vzhůru a pak rychle padají k zemi. Při růstu hydrometeorů převažuje koalescence, splývání vodních kapek při vzájemných kolizích, a zachycování přechlazených kapek ledovými krystaly. Rozdíl oproti Ns je dán hlavně výrazně odlišnou vertikální rychlostí v oblaku, a tedy i pohybem hydrometeorů v oblaku.

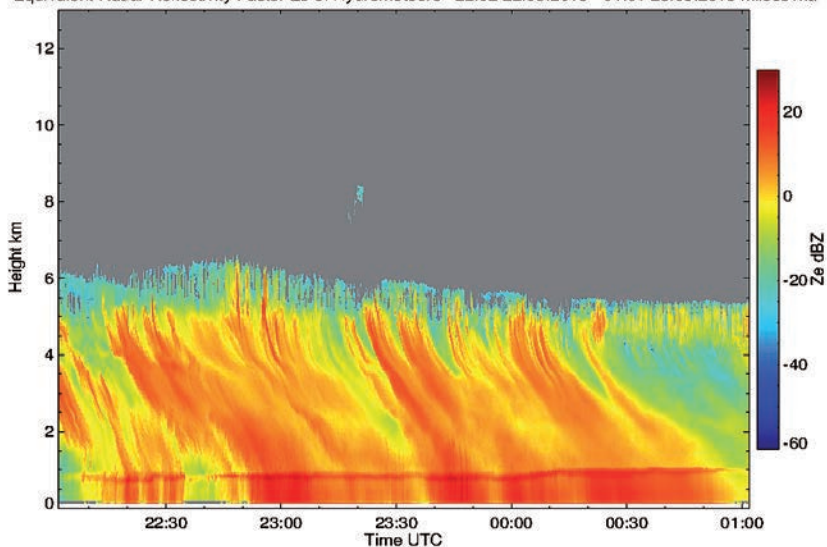
Na obrázku 7, resp. 8 je zaznamenáno měření odrazivosti a vertikální rychlosti hydrometeorů oblačným radarem na Milešovce z 23. dubna 2018, kdy přes ČR přecházela linie bouří s výraznou bleskovou činností. V horní části oblaku vidíme nárůst velkých oblačných částic ve spojení se vzestupnými i sestupnými pohyby. Okolo hranice 1,5 km nad radarem dochází opět k tání sněhu (*bright band*) a významnému nárůstu pádové rychlosti dešťových kapek pod touto hladinou.

Srážkový radar FURUNO

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., na Milešovce v listopadu 2020 nainstaloval a zprovoznil nový X-pásmový výzkumný radar Furuno WR2120. Radar je umístěn na vrcholu vyhlídkové věže ve výšce 837 + 23 m, kde první číslo je nadmořská výška Milešovky a druhé značí výšku věže.

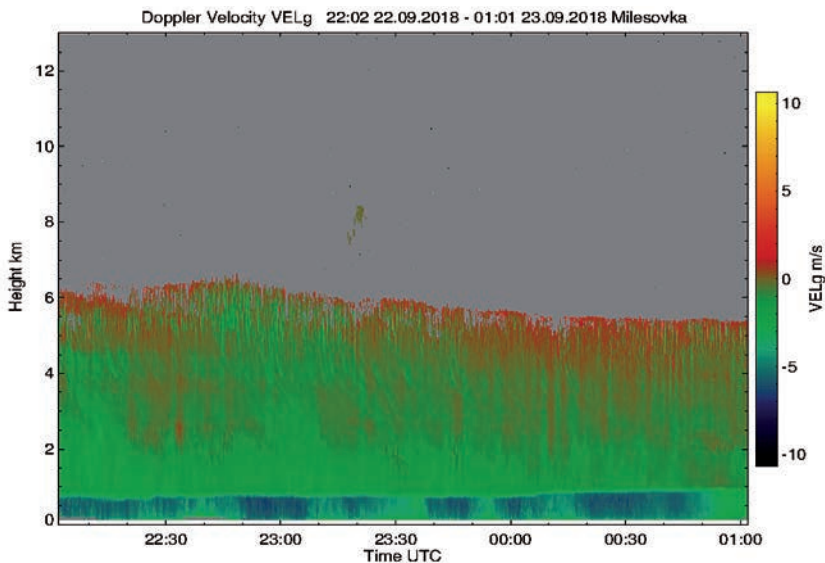
Radar Furuno WR2120 je polarimetrický dopplerovský radar, který pracuje na vysílací frekvenci 9432,5 MHz, délka vysílané vlny je tedy 3 cm. Současné nastavení radaru má dosah 50 km. Na rozdíl od radaru METEK je anténa pohyblivá a proměřuje atmosféru v elevačních úhlech 1,1; 1,7; 2,5; 4; 6; 10 a 25 stupňů.

Equivalent Radar Reflectivity Factor Z_e of Hydrometeors 22:02 22.09.2018 - 01:01 23.09.2018 Milešovka

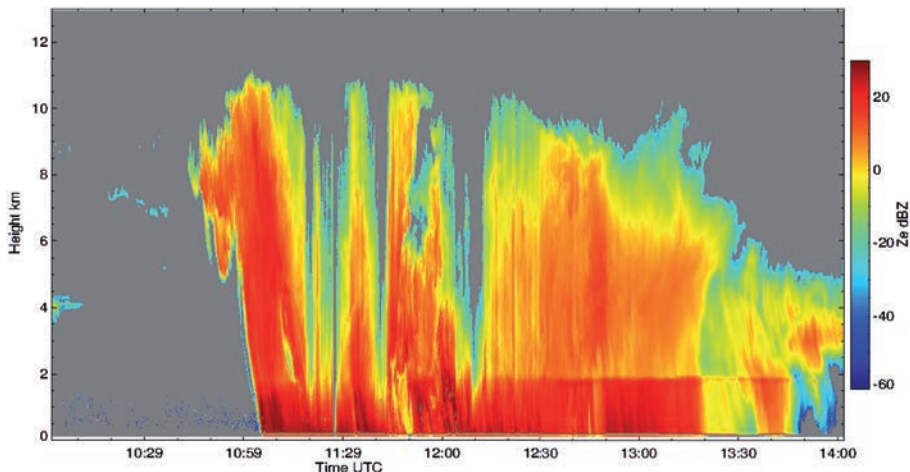


Obr. 5 Časový průřez radarové odrazivosti z nimbostratu přecházejícího přes Milešovku. Světle modré barvy označují ledové krystalky, oranžové až světle červené barvy sněh a nejtmaší odstíny červené barvy ve spodní části představují déšť. Znatelná červená čára ve výšce přibližně 1 km je bright band, pásmo tání sněhu pod nulovou izotermou

Obr. 6 Časový průřez vertikálních rychlostí z nimbostratu přecházejícího přes Milešovku. Světle zelené barvy označují malé pádové rychlosti sněhu, modré barvy ve spodní části představují déšť. Znatelný nárůst rychlosti ve výšce přibližně 1 km je v oblasti bright band

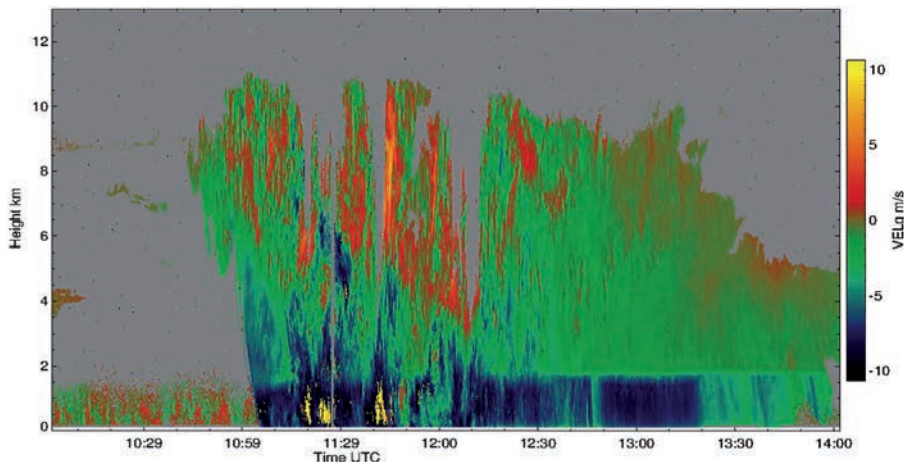


Dále následuje 6 vertikálních řezů atmosféry v azimutech 0, 60, 120, 180, 240 a 300 stupňů. Tento cyklus měření trvá necelé 3 minuty a neustále se opakuje. Radar FURUNO je polarimetrický a vysílá vlny v horizontální a vertikální rovině a odražené signály i odděleně přijímá. To umožňuje primárně získat data o tvaru



Obr. 7 Časový průřez radarové odrazivosti z cumulonimbu přecházejícího přes Milešovku. Světle modré barvy označují ledové krystalky, oranžové až světle červené sniž a nejtmaší odstíny červené barvy ve spodní části představují déšť. Znatelná červená čára ve výšce přibližně 1 km indikuje bright band

Obr. 8 Časový průřez vertikálních rychlostí z cumulonimbu přecházejícího přes Milešovku. Světle zelené barvy označují malé pádové rychlosti sněhu, červeno-žluté barvy v horní části představují vzestupné pohyby, modré barvy ve spodní části představují déšť. Znatelný přechod ve výšce přibližně 1 km představuje bright band, pásmo tání sněhu pod nulovou izotermou. Žluté barvy pod bright band jsou v místech s tak vysokými pádovými rychlostmi, že jsou radarem chybně vyhodnocovány jako vzestupné



Obr. 9 Pohled na věž
observatoře Milešovka
s umístěným radarem FURUNO
(foto Virtual Visit s. r. o.)



hydrometeorů. Radar je zároveň i dopplerovský, umožňuje určit rychlosti objektů ve směru k/od radaru.

Radar WR2120 měří nebo počítá různé veličiny, např. intenzitu srážek R [mm/h], odrazivost vlny vysílané v horizontální rovině Z_h [dBZ], odrazivost vlny vysílané ve vertikální rovině Z_v [dBZ], rozdíl $Z_h - Z_v$ [dBZ], radiální Dopplerovu rychlost V [m/s], spektrum dopplerovských rychlostí W [m/s] a kopolární korelační koeficient Phv . Měření radarem probíhá tak, že se jednotlivé vlny vysílají víckrát (řádově 10–100krát) a přijaté vlny odpovídající stejné vzdálenosti od radaru se průměrují nebo jinak statisticky zpracovávají. Z těchto dat se počítá W a R_{hv} , což je korelace mezi horizontální a vertikální odrazivostí.

Obrázek 11 ukazuje základní výstupy radaru pro měření, které začalo 17. 5. 2021 v 17.48 pro elevaci 1,1 stupně. Protože nadmořská výška radarového paprsku vzhledem k zakřivení Země a lomu světla stoupá, zobrazená pole odpovídají uprostřed výšce cca 860 m a ve vzdálenosti 50 km od radaru výšce 2000 m n m.

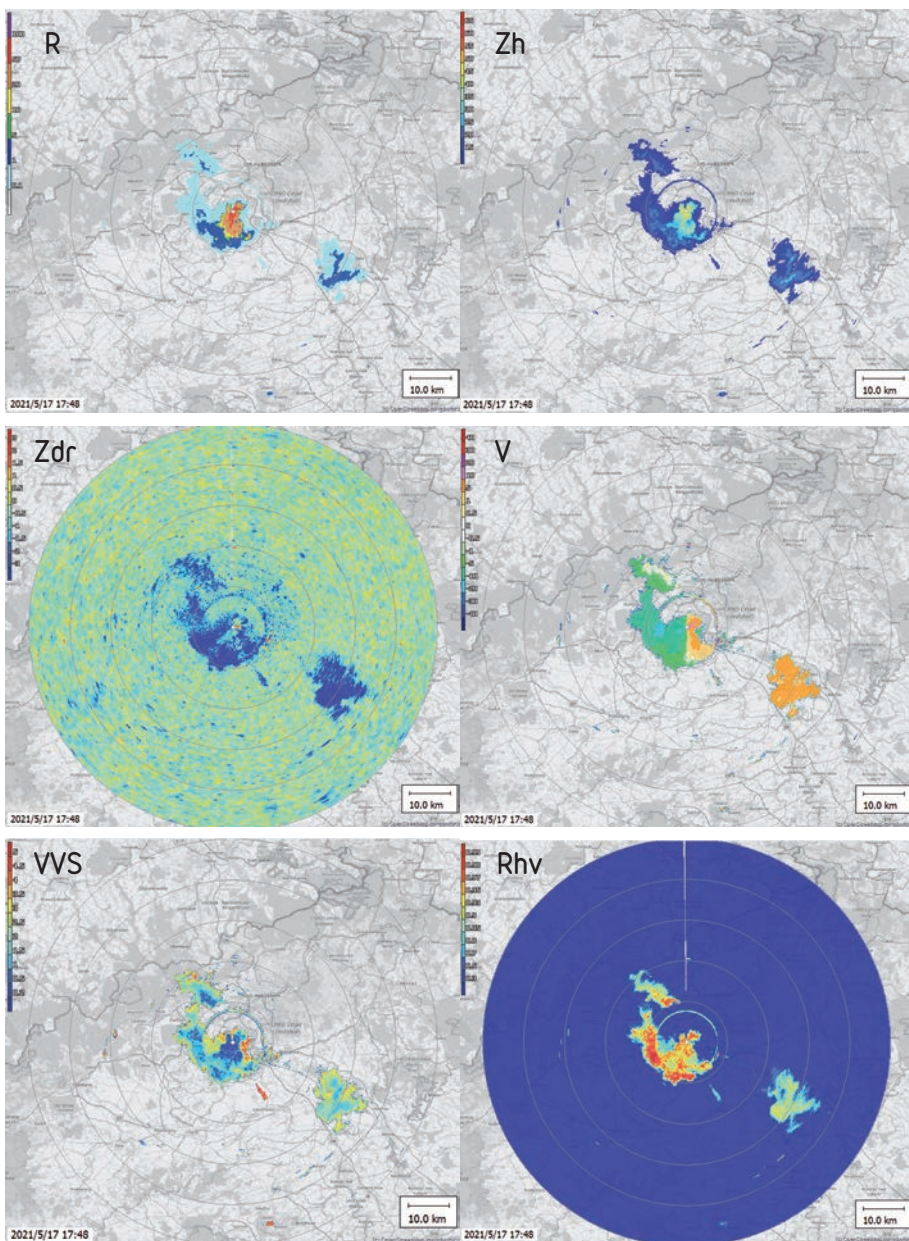
Na obrázku 11- Z_h vidíme v bezprostřední blízkosti radaru vysokou horizontální odrazivost (Z_h), která odpovídá intenzivní přeháňce s maximy více než 50 mm/h (11-R). Rozdíl mezi odrazivostí u horizontální a vertikální polarizace (Z_{dr}) v oblastech s vysokou odrazivostí Z_h indikuje protáhlý tvar hydrometeorů, což odpovídá větším dešťovým kapkám, případně kapkám s ledovým jádrem (červená oblast na východ od radaru). V oblasti s malou odrazivostí se vyskytují slabé náhodné odrazy (šum) vyznačené žlutými a světle zelenými odstíny (11- Z_{dr}). Hodnoty korelace mezi horizontální a vertikální odrazivostí R_{hv} (11- R_{hv}) pomáhají spolu s ostatními naměřenými veličinami klasifikovat typ srážek. Červené oblasti s $R_{hv} > 0,97$ ukazují oblasti se sférickými meteorologickými cíli, což v našem případě značí déšť tvořený malými kapkami. Modré oblasti, kde $R_{hv} < 0,8$, neobsahují meteorologické objekty (srážky). Pro zbývající hodnoty lze v místech detekce očekávat srážky s osově nesymetrickými hydrometeory, např. intenzivní déšť s velkými kapkami. Srovnáním hodnot polí R , Z_{dr} a R_{hv} můžeme tedy určit nejen oblasti, kde se vyskytuje déšť, ale i formu deště. Radiální rychlost (11- V) je orientována kladně směrem od radaru a ukazuje, že oblačnost přechází Milešovku přibližně ze západu. Obrázek 11- WS představuje proměnlivost naměřených rychlostí – v místech nízkých hodnot proměnlivosti jsou srážky homogenní, v místech vysokých hodnot lze předpokládat výskyt různých nebo různé velikých hydrometeorů, protože se liší jejich pádová rychlost. Na tomto obrázku, ale i na jiných, je vidět kružnice na sever od radaru. To je umělý artefakt, který je způsoben změnou radarové konfigurace horizontálního rozlišení měření ze 75 na 150 m.

Radiální rychlost, kterou radar měří, je rychlost hydrometeorů/objektů, které umožňuje vlnová délka radaru detekovat. Naměřené rychlosti tedy nejsou rychlosti vzduchu. Zatímco v horizontálním směru je rychlost vzduchu velmi podobná pohybu hydrometeorů, které se pohybují s oblaky, v případě vertikálního pohybu je pohyb hydrometeorů součtem rychlosti vzduchu a pádové rychlosti způsobené jejich hmotností, tzv. terminální rychlosti. Terminální rychlosti hydrometeorů jsou v rozsahu několika cm/s pro malé dešťové kapky až po rychlosti přesahující 10 m/s pro velké kroupy.

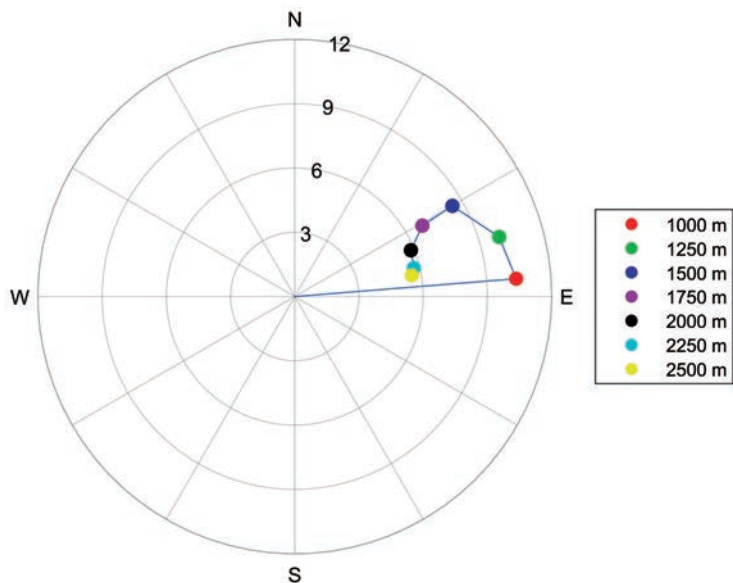
Obr. 10 Observatoř Milešovka
(foto Virtual Visit s. r. o.)





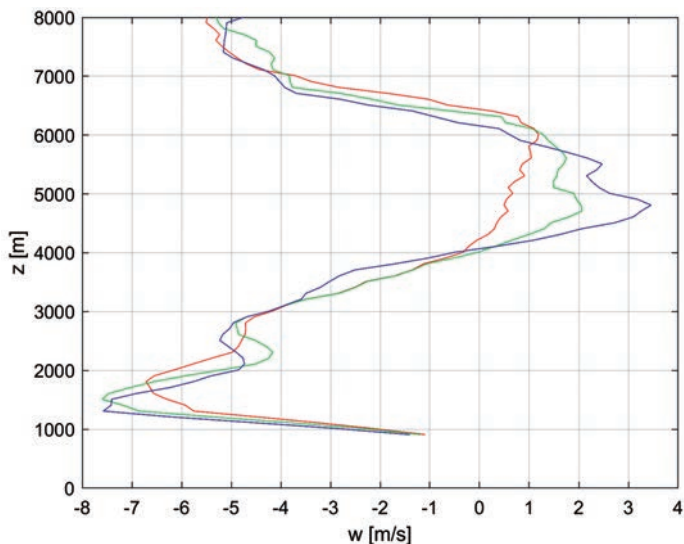


Obr. 11 Příklad grafických výstupů naměřených dat z termínu 17. 5. 2021 17:48



Obr. 12 Vertikální profil horizontální rychlosti větru (hodograf) vypočtený z naměřených dat z termínu 17. 5. 2021 17.48 metodou VAD. Legenda ukazuje nadmořskou výšku. Velikost vektoru od středu grafu do vyznačeného bodu ukazuje rychlost větru v m/s a směr vektoru ukazuje, kterým směrem vítr vane

Obr. 13 Závislost vertikální rychlosti w nad radarem na nadmořské výšce z pro termín 17. 5. 2021 17.48. Vertikální rychlosti jsou odvozeny pro různé množství využitých dat (tomu odpovídají křivky různých barev)



I když radar měří pouze radiální rychlost, lze vhodnou skenovací strategií odhadnout horizontální a vertikální rychlost hydrometeorů. Obrázek 12 ukazuje horizontální rychlost vypočtenou metodou VAD ze 17. 5. 2021 17.48 pro nadmořské výšky 1000 až 2500 m. Z obrázku je zřejmé, že v nadmořské výšce 1000 m, tj. asi 140 m nad radarem, vane západní vítr o rychlosti 10 m/s. I když většinou rychlost větru roste s výškou, v tomto případě rychlost větru nad observatoří do nadmořské výšky cca 2500 m klesala a až poté stoupala.

Odhad vertikálního pohybu hydrometeorů v využívá měření radaru namířené vertikálně. Velká variabilita vertikálních rychlostí v čase a prostoru však vyžaduje zpracování větších objemů dat, aby se získaly robustní výsledky. Obrázek 13 ukazuje tři odhady w v závislosti na nadmořské výšce z (w je kladná směrem nahoru), ze kterých lze usuzovat, že na Milešovce byl silný déšť, protože blízko zemského povrchu se vyskytovaly záporné rychlosti okolo -6 m/s, které odpovídají velkým dešťovým kapkám. Naopak ve výšce okolo 5 km jsou patrné výstupné pohyby tvořící bouři, která přecházela nad radarem.

Obr. 14 Distrometr Thies na Milešovce



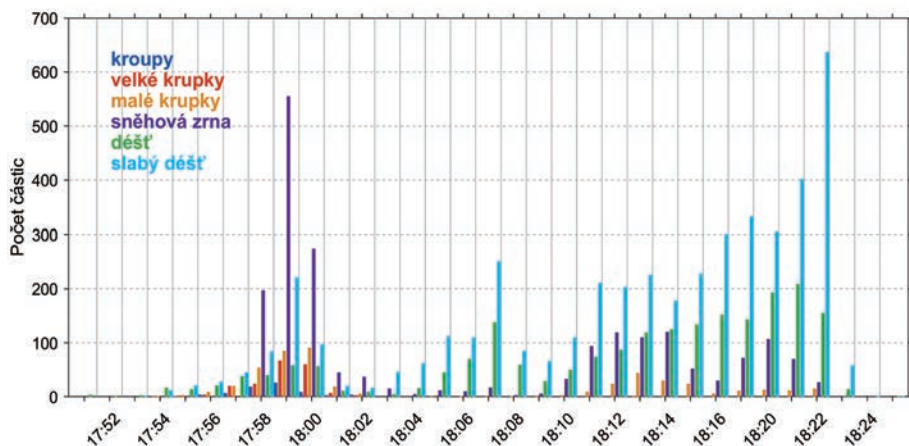
Měření srážkových částic

Kromě množství spadlých srážek zajímá meteorology i jejich složení, tedy množství kapek nebo ledových částic a jejich velikosti. K takové analýze srážek se používá přístroj, kterému se říká distrometr. Existuje řada distrometrů od různých firem, které využívají odlišné principy měření, například snímání pomocí rychlých kamer, které zachytí pády jednotlivých kapek, nebo útlumu světelného paprsku. V minulosti se používaly i jednoduché distrometry například ve formě obarvených listů papíru, na kterých se pak odečítal počet a velikost spadlých kapek. Pro detekci krup se používají desky z měkkého materiálu, do kterých se padající kroupy otisknou.

Distrometr – měřicí přístroj, který dokáže určovat velikosti srážkových částic, jejich skupenství a pádovou rychlost.

Na Milešovce používáme distrometr Laser Precipitation Monitor od firmy Thies. K měření se využívá laserový paprsek v infračervené oblasti (785 nm), který je optickou soustavou usměrňován do plochého svazku a prochází měřicí oblastí o rozměrech zhruba 25 × 2 cm. Přijímací část měří intenzitu dopadajícího záření a signálový procesor s vysokou frekvencí vyhodnocuje útlum signálu. Na základě informace o útlumu a jeho změnách pak přístroj určuje množství padajících srážek, ale i velikosti kapek nebo ledových částic a jejich rychlost pádu. Výstupem měření jsou minutové průměry spekter velikostí a typů srážkových částic.

Obr. 15 Měření počtu padajících srážkových částic jednotlivých kategorií distrometrem ze 17. 5. 2021. Barevně odlišené kategorie hydrometeorů jsou zobrazeny v legendě. Na obrázku je patrná intenzivní přeháňka v cca 17.59 a následný slabý déšť, který trval do 18.24





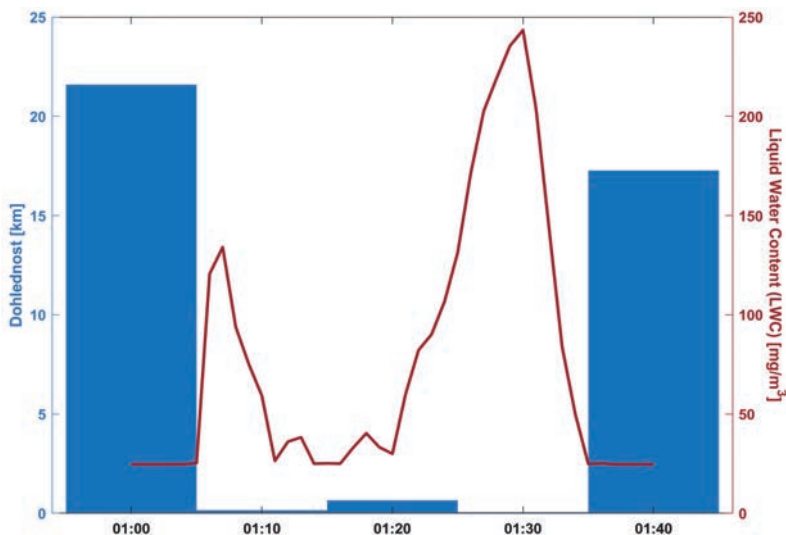
Obr. 16 Měřicí přístroj PVM-100 na Milešovce (foto M. Franc)

Jako příklad měření distrometrem uvádíme srážkovou událost ze 17. 5. 2021, která přecházela přes Milešovku kolem 18.00. Ze záznamu události je vidět, že nejprve přecházelo jádro bouře, ze kterého vypadávaly převážně tuhé srážky – kroupy, krupky a ledové částice, které distrometr označuje jako sněhová zrna. V druhé fázi pak již převládá déšť a ke konci epizody především drobný déšť.

Měření oblačných částic

K analýze množství kapalné vody v mlze se používá přístroj PVM, který pracuje na obdobném principu jako distrometr Thies, měří tedy útlum a rozptyl laserového paprsku v infračervené oblasti. Na rozdíl od distrometru přístroj neměří pádovou rychlost kapek, protože je primárně určen pro měření koncentrace drobných kapek v mlze nebo v nízké oblačnosti, která je na Milešovce častější. Přístroj měří obsah kapalné vody ve vzduchu (LWC – Liquid water content) a střední velikost kapek. Vysoké hodnoty LWC tedy indikují přítomnost mlhy nebo oblačnosti a s tím klesající dohlednost. Příklad takové situace, konkrétně přechodu oblaku přes vrchol Milešovky v noci 25. 5. 2021, je na ilustračním obrázku.

PVM-100 (Particulate Volume Monitor) je měřicí přístroj, který měří obsah kapalné vody v mlze nebo oblaku.



Obr. 17 Srovnání hodnot kapalného vodního obsahu (LWC) měřeného v minutových intervalech a dohlednosti měřen v desetiminutových intervalech při přechodu oblaku přes vrchol Milešovky. Z obrázku je patrný pokles dohlednosti způsobený přecházejícím oblakem

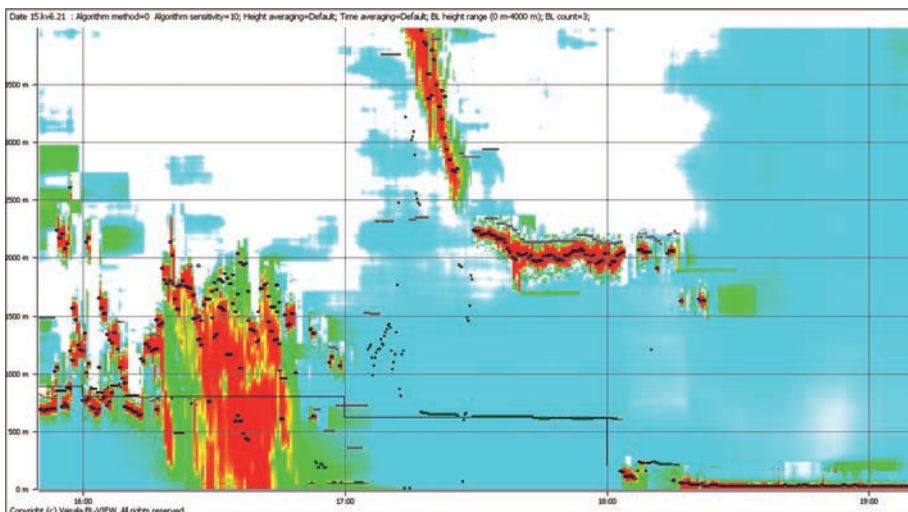
Měření výšky základny oblačnosti

V každém pozorovacím termínu, tzn. na Milešovce každou celou hodinu, musí pozorovatel do zprávy uvést subjektivně zhodnocené množství oblačnosti, druhy oblačnosti a také výšku základny oblačnosti. S poslední jmenovanou veličinou pomáhá pozorovateli přístroj, který se jmenuje ceilometr. Přístroj vysílá laserový paprsek, jehož část se odráží od jednotlivých vrstev oblačnosti, a z doby, za kterou se paprsek vrátí, spočítá, jak vysoko nad ním se oblačnost nachází. Ceilometr dokáže rozeznat i několik vrstev oblačnosti a z množství odraženého paprsku dokáže rozpoznat i mohutnost oblačné vrstvy. Moderní ceilometry obsahují prezentační modul, který umožňuje měřit a zobrazovat strukturu mezní vrstvy atmosféry na základě algoritmu, který určuje tloušťku směšovací vrstvy v závislosti na koncentraci aerosolů v atmosféře. Směšovací výška je klíčovým parametrem pro sledování znečištění ovzduší emisemi v závislosti na počasí, např. na větru, oblačnosti a srážkách. Viz též měření výšky základny oblaků (slovník ČMeS 2021).

Ceilometr je zařízení pro měření výšky základny (případně základny) oblačnosti nad stanicí. Princip činnosti je založen na měření času, za který urazí krátký impuls paprsku při průchodu atmosférou z vysílače ceilometru k základně oblaku, která toto světlo rozptýlí, a potom se vrátí zpět do přijímače.



Obr. 18 Ceilometry umístěné na meteorologické zahrádce observatoře Milešovka



Obr. 19 Příklad měření ceilometrem CL51 z 15. 5. 2021. Červená a žlutá oblast v levé polovině obrázku jsou padající srážky, uprostřed obrázku je vidět základna oblačnosti ve výšce 2 km a v pravé části dosahuje oblačnost až k zemskému povrchu

V současnosti jsou na observatoři v provozu dva ceilometry od firmy Vaisala, starší CT25K a moderní CL51, který umožňuje měření až do výšek kolem 14 km a zachytí tedy i vysokou ledovou oblačnost (viz obrázek 18).

Na obrázku 19 uvádíme příklad měření ceilometrem z 15. 5. 2021, na kterém je vidět hned několik situací. V levé části jsou zobrazeny srážky. Zde dochází k odrazu na padajících kapkách v různých výškách, které vytvářejí typickou rozmazanou oblast dosahující až k zemi. Uprostřed obrázku je vidět základnu oblačnosti ve výšce kolem 2 km a v pravé části je pak vidět situace, kdy je vrchol Milešovky v oblačnosti a vertikální dohlednost je téměř nulová.

Srážkoměr

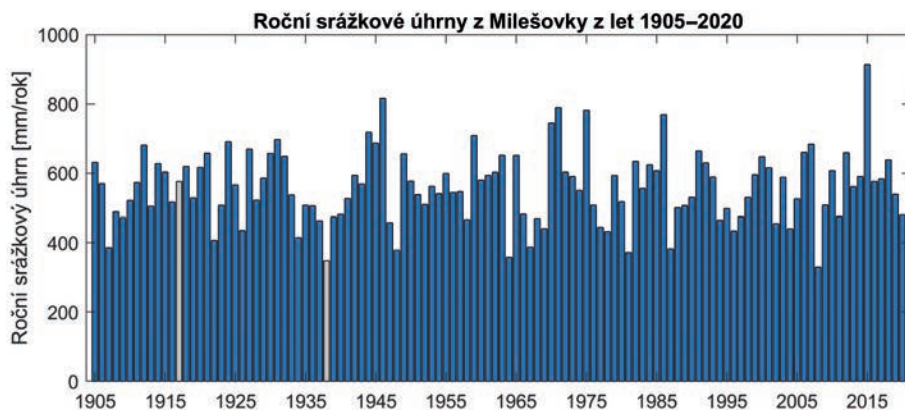
Dešťové či sněhové srážky se na Milešovce měří již od počátku měření v roce 1905. V minulosti se k měření srážek používala srážkoměrná nádoba s přesně určenou zachytnou plochou, množství srážek se pak ručně vyhodnocovalo přelitím srážkové vody do odměrného válce. Později bylo měření doplněno ombrografem, tedy mechanickým zařízením, které pomocí plováku sledovalo množství a zakreslovalo časový záznam průběhu srážek. V současné době používáme na stanici člunkový a váhový srážkoměr, přístroje zaznamenávají minutové úhrny srážek přímo do počítače. Jejich šestihodinové sumy se zapisují do meteorologických zpráv SYNOP, čtyřiatřicetihodinové do klimatologických výkazů.

Člunkový srážkoměr je automatický srážkoměr, jehož měření je založeno na zaznamenávání elektrických impulzů vyvolaných překlápním dvoudílného



Obr. 20 Člunkový (vlevo) a váhový (vpravo) srážkoměr na Milešovce

Obr. 21 Roční úhrny srážek z měření na observatoři Milešovka. Šedivé sloupce představují rok 1917, kdy se na stanici měsíc neměřilo z důvodu nedostatku uhlí, a 1938, kdy pozorovatel po mobilizaci opustil stanici a měsíc trvalo, než observatoř obsadila německá Říšská povětrnostní služba



člunku. Po naplnění jednoho dílu srážkovou vodou způsobí její hmotnost překlopení člunku. Z příslušné poloviny člunku voda vyteče, zatímco vodou se začíná plnit jeho druhá polovina. Z počtu impulzů je možné určit úhrn srážek, v případě silnějších srážek i jejich okamžitou intenzitu. Objem jednoho dílu člunku je přitom zpravidla navržen tak, aby jedno překlopení odpovídalo úhrnu srážek 0,1 mm (slovník ČMeS 2021).

Váhový srážkoměr je také automatický srážkoměr, jehož měření je založeno na vážení nádoby zachycující padající srážky. Odstraňuje nedostatky jednoduššího člunkového srážkoměru, protože zachytí a ihned vyhodnotí i tuhé srážky (sníh, krupky nebo kroupy) a jeho přesnost není závislá na intenzitě srážek. Navíc netrpí některými neduhy člunkového srážkoměru, jako je například ucpávání odtokové trubičky spadaným hmyzem nebo listím. Pro zachycení tuhých srážek je ve vážené nádobě ekologická nemrznoucí kapalina. Samovolný výpar z hladiny vážené nádoby je potlačen použitím vrstvy silikonového oleje na povrchu vážené kapaliny (slovník ČMeS 2021).

Zaměření výzkumu na Milešovce a další plány rozvoje

V posledních několika letech byla observatoř Milešovka vybavena špičkovými zařízeními, která jsou zaměřena na výzkum oblačnosti a srážek. Mezi ně patří oblačný vertikální radar METEK, X-pásmový radar FURUNO 2110, distrometr, ceilometr a PVM. Zařízení jsou využívána pro výzkum prováděný v ústavu i v rámci výzkumných projektů, např. CRREAT (Centrum výzkumu kosmického záření a radiačních jevů v atmosféře). Výzkum zaměřený na oblačnost probíhá v ÚFA již několik let a výsledkem je i několik odborných publikací ve špičkových meteorologických časopisech.

Moderní vybavení slouží především k analýze konvektivních bouří přecházejících přes Milešovku. Porovnáním informací získaných z obou radarů, z nichž každý vidí jiné charakteristiky oblačnosti, chceme například objasnit, v čem se liší bouře doprovázená blesky, tzn. bouřka, od konvektivní bouře, která přináší pouze srážky.

V souvislosti se zprovozněním X-pásmového radaru plánujeme dále studovat metody předpovědi výskytu konvektivních bouří s využitím všech dostupných dat pro velmi krátké předpovědní období do cca 60 minut. Výstupem této studie by měla být krátkodobá předpověď výskytu konvektivních bouří v okolí Milešovky prezentovaná veřejně na webových stránkách.

Dalším významným cílem pro budoucí roky je širší zapojení observatoře do mezinárodního výzkumu. Zástupci celoevropské výzkumné infrastruktury ACTRIS pozvali ÚFA a observatoř Milešovka k připojení do nově se formujícího tematického centra Cloud In Situ (CIS). Infrastruktura ACTRIS je zaměřena na poskytování dat a informací o aerosolech, oblacích, stopových plynech a souvisejících procesech v atmosféře. V současné době podnikáme kroky, abychom se stali součástí této mezinárodní komunity, aby náš ústav vstoupil do českého konsorcia ACTRIS-CZ a abychom na Milešovce vybudovali měřicí platformu CIS. Naší vizí je vytvořit na Milešovce multidisciplinární observatoř široce zapojenou do mezinárodního výzkumu.

Použitá literatura

ČMeS (Česká meteorologická společnost) [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 14.06.2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>; Thurai, M., Huang, G. J., Bringi, V. N., Randeu, W. L. and Schönhuber, M. Drop Shapes, Model Comparisons, and Calculations of Polarimetric Radar Parameters in Rain. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **24**, 2007, s.1019–1032; Zacharov, P., Bližňák, V., Chládová, Z., Matúšek, M., Pešice, P., Sedlák, P., Sokol, Z. *Observatoř Milešovka*. Edice Věda kolem nás, Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., 2015. Dostupné z: <http://www.vedakolemнас.cz>.

Obr. 22 Vrchol Milešovky (foto Lukáš Ronge)



Oddělení meteorologie se zabývá objektivními metodami pro zpřesnění lokální předpovědi meteorologických jevů, především přívalových srážek z konvektivních bouří, a analýzou příčin extrémů počasí na území ČR. Kromě toho studuje vlastnosti oblačnosti a oblakotvorné procesy včetně elektrizace oblaků, chemické a fyzikální vlastnosti mlhy a nízké oblačnosti, vliv oblačnosti a srážek na útlum elektromagnetických vln a vliv terénu na proudění vzduchu. Oddělení provozuje horskou meteorologickou observatoř Milešovka, kde se provádí řada experimentálních měření, observatoř Kopisty se speciálním osmdesátimetrovým meteorologickým stožárem a provádí také základní meteorologická měření na observatoři Dlouhá Louka.

Výzkum **oddělení klimatologie** probíhá ve čtyřech hlavních směrech: proměnlivost a změny klimatu; extrémní jevy a jejich simulace v klimatických modelech; atmosférická cirkulace a její vazby k přízemnímu klimatu; biometeorologie, tj. studium souvislostí mezi meteorologickými prvky a lidským zdravím. Pracovníci oddělení se zabývají rovněž vývojem a implementací statistických metod ve výzkumu klimatu, validací klimatických modelů a konstrukcí scénářů možného budoucího vývoje klimatu, včetně jeho dopadů.

Oddělení ionosféry a aeronomie se zabývá výzkumem ionosféry, dále studiem dlouhodobých změn v systému horní atmosféry a ionosféry, studiem vztahů Slunce–Země, studiem ozónu a cirkulace ve stratosféře a konstrukcí speciálních přístrojů. Provozuje také družicovou observatoř Panská Ves a ionosférickou observatoř Průhonice. Ve výzkumu ionosféry, jejíž stav rozhodujícím způsobem ovlivňuje šíření signálů GPS, se soustřeďuje na dopad kosmického počasí, vliv atmosférických vln z dolní atmosféry a na vývoj modelu mezinárodní referenční ionosféry.

Oddělení kosmické fyziky navazuje na bohatou tradici kosmického výzkumu, známou zejména z programu malých československých a českých družic Magion. Zaměřuje se na výzkum ionosféry a magnetosféry Země, ionosfér a magnetosfér planet sluneční soustavy, slunečního větru a kosmického počasí, experimentální a teoretický výzkum vln, nestabilit, nelineárních jevů a vzájemného působení vln a částic v kosmickém plazmatu. V současné době se pracovníci oddělení podílejí na návrhu a vývoji vědeckých přístrojů, které se v souladu s naším výzkumným zaměřením ocitnou na palubě budoucích umělých družic Země a kosmických sond k planetám Sluneční soustavy.

Skupina numerických simulací heliosférického plazmatu se zabývá studiem a modelováním vzájemné interakce těles ve Sluneční soustavě (planety a jejich přirozené satelity) s jejich okolním prostředím (toky nabitých částic slunečního větru a plazma zachycené v planetárních magnetosférách) a následným působením této interakce na celkovou strukturu elektromagnetického pozadí. Pozorované jevy jsou primárně zkoumány z pohledu lokálních kinetických procesů, tedy vzájemného působení jednotlivých částic a elektromagnetických vln.

Meteorologická stanice Milešovka oslavila již 116 let nepřetržité činnosti. Díky dlouhodobým meteorologickým pozorováním a experimentálním měřením můžeme nejen posuzovat a analyzovat vývoj klimatu, ale také získávat nové poznatky o atmosféře. Součástí stanice je i meteorologické muzeum a celoročně přístupná rozhledna, v současné době připravujeme pro veřejnost samostatný boční vstup do věže. Vstup je zpoplatněn, ale odměnou bývá daleký výhled na okolní kopce Českého středohoří. Při výborné dohlednosti je možné z rozhledny pozorovat např. Ještěd, hřbety Krkonoš, Českého lesa atd. Jako milešovská legenda se traduje, že za extrémně výborné dohlednosti byly s použitím dobrého dalekohledu spatřeny i vrcholky Alp.

Děkujeme RNDr. Haně Kyznarové, Ph.D., za korekci části textu a autorům fotografií Lukáši Veselému (www.lukasvesely.cz) a společnosti Virtual Visit s. r. o. (virtualvisit.cz) za souhlas s jejich využitím.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Jaroslav Šebek: **Kardinál Tomášek v období normalizace**

Zora Hesová: **Muslimové v Evropě**

Jan Hasil: **Odhalování minulosti Letenské pláně**

V EDICI DOSUD VYŠLO:

Jindřich Dejmek: **Pětasedmdesát let OSN**

Filip Smolík: **Psychologický ústav**

Radek Mikuláš: **Ichnofosilie**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

Měření oblačnosti na Milešovce | P. Zacharov, P. Pešice, P. Sedlák, Z. Sokol

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Nakladatelství Academia. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2021. Ediční číslo 12874. Tisk **SERIFA**[®], s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academia.cz