

Výzkum blesků a jejich modelování s využitím měření na observatoři Milešovka v rámci Výzkumného centra kosmického záření a radiačních událostí v atmosféře

Research on lightning and its modelling using measurements at the Milešovka Observatory within the Research Center of Cosmic Rays and Radiation Events in the Atmosphere

Zbyněk Sokol

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
✉ sokol@ufa.cas.cz

Jana Popová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2

The article describes the equipment of the Milešovka meteorological observatory that is aimed at studying the internal structure of convective storms and storms accompanied by lightning. It also presents the developed numerical model of the cloud and its electrification called CEMW, which is used to simulate idealized and real storms. The article also includes a brief description of the obtained results with reference to published studies where the findings are described in detail. As main results, we consider newly developed methods and algorithms for processing data of the METEK 35c cloud profiler and the FURUNO WR2120 X-band weather radar, which were used in the research and development of the original CEMW mathematical model simulating cloud electrification and electrical discharges.

KLÍČOVÁ SLOVA: bouře konvektivní – blesky – radary meteorologické – radar oblačný – model oblaku – elektrizace oblaku

KEYWORDS: convective storms – lightning – meteorological radars – cloud radar – cloud model – cloud electrification

1. Úvod

Jedním ze směrů výzkumu, který se rozvíjí v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR (ÚFA) v oddělení meteorologie, je od r. 2016 výzkum konvektivních bouří se zaměřením na elektrizaci oblačnosti a vznik blesků. Tento výzkum byl podpořen vytvořením Výzkumného centra kosmického záření a radiačních událostí v atmosféře – projektem CRREAT (CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000481), kterého se dále zúčastnilo oddělení kosmické fyziky ÚFA, Ústav jaderné fyziky AV ČR (ÚJF, hlavní řešitel projektu) a Fakulta elektrotechnická Českého vysokého učení technického v Praze (FEL ČVUT). V rámci projektu probíhala spolupráce s osmi zahraničními institucemi.

Především díky tomuto projektu byla observatoř Milešovka vybavena novými výzkumnými zařízeními, která jsou podrobně popsána v kapitole 2. Kromě zásadního rozšíření měření a následného analyzování nových typů dat se zabýváme modelováním oblačnosti a elektrickými procesy, které uvnitř oblaku probíhají, včetně modelování bleskových výbojů.

Cílem tohoto článku je poskytnout přehled, jaké přístrojové vybavení používané ke studiu konvektivních bouří je v současnosti na Milešovce k dispozici, a ilustrovat základní výsledky, které byly z hlediska meteorologické analýzy konvektivních bouří získány.

2. Přístroje na observatoři Milešovka

Observatoř Milešovka (50°33'17" s. š., 13°55'57" v. d.) se nachází v severní části České republiky v Českém středohoří na jeho nejvyšším vrcholu Milešovka (837 m n. m., obr. 1), který převyšuje své okolí o více než 300 m. Observatoř je vybavena standardními meteorologickými a klimatologickými přístroji pro měření tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu, teploty půdy, směru a rychlosti větru, globálního záření a srážek včetně ceilometru Vaisala CL51, který měří výšky spodních hranic vrstev oblačnosti nad stanicí. V rámci výzkumu konvektivních srážek a bouřek v projektu CRREAT byl na stanici



Obr. 1 Pohled na observatoř Milešovka z letadla. Na věži je umístěn radar WR2120. Světlá krabice na zemi v popředí na levé straně obrázku znázorňuje SEVAN a vlevo od něho se nachází radar MIRA 35c.

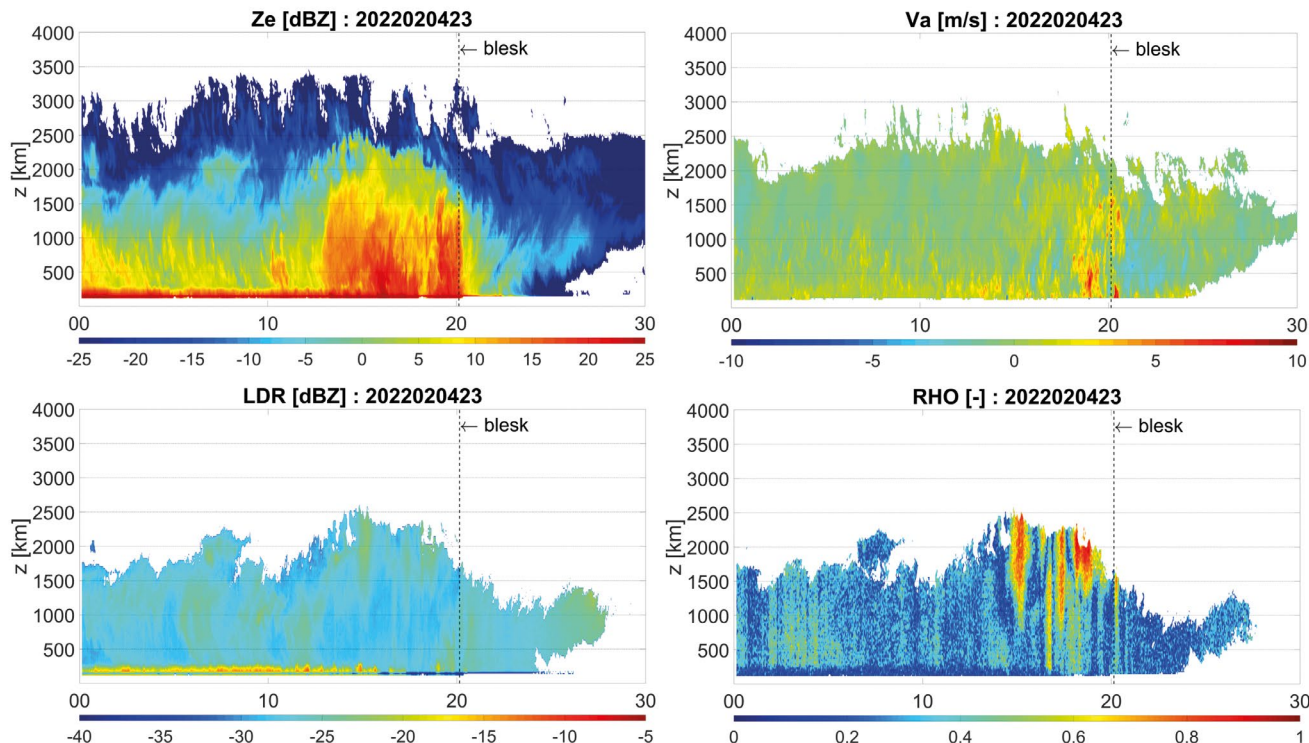
Fig. 1. View of the Milešovka observatory from an aircraft. The WR2120 radar is located at the top of the tower. The light box on ground in the foreground on the left side of the image represents SEVAN – the MIRA 35c radar is located to its left.

umístěn laserový distrometr srážek Thies Laser Precipitation Monitor, dva výzkumné meteorologické radary METEK MIRA 35c a FURUNO WR2120, detektor SEVAN, který měří nabitě a neutrální částice sekundárního kosmického záření, o nichž se předpokládá, že pomáhají vzniku bleskového kanálu při vývoji blesků. Dále je stanice vybavena zařízením monito-

rujícím elektrické pole (EFM-100) a magnetické pole (anténa SLAVIA). Poslední dva přístroje instalovali a využívají pracovníci oddělení kosmické fyziky ÚFA (Kolmašová et al. 2022). SEVAN nainstaloval ÚJF, jehož pracovníci data využívají při studiu blesků. V poslední době bylo na Milešovce umístěno bleskové čidlo globální sítě World Wide Lightning Location Network (<https://wwlln.net/>), která monitoruje bleskovou aktivitu na celé Zemi. Na začátku roku 2024 byl na observatoř Milešovka nainstalován bleskový senzor sítě Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN), která je také globální, ale na rozdíl od nízkofrekvenční WWLLN pracuje multifrekvenčně (<https://ghrc.nsstc.nasa.gov/home/content/earth-networks-total-lightning-network-entln-global-lightning-network/>).

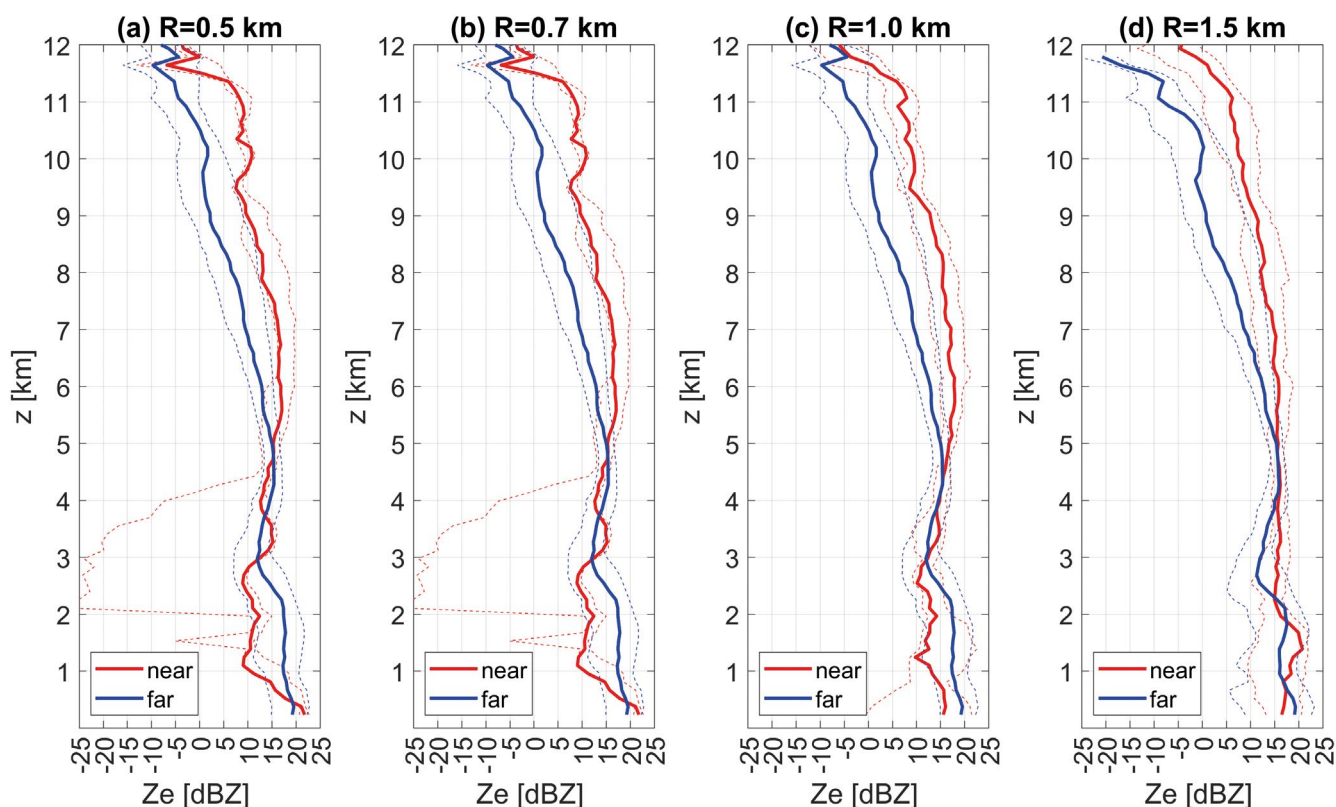
METEK MIRA 35c je vertikálně orientovaný oblačný radar, který pracuje na frekvenci 35 GHz (pásmo Ka) a byl uveden do provozu v roce 2018. Jedná se o dopplerovský polarimetrický radar pracující s vertikálním rozlišením 28,9 m, časovým rozlišením 2 s a s dosahem až 14 km. Další parametry radaru lze nalézt v publikaci Sokola et al. (2018). Základní veličiny vypočtené na základě měření radaru, které jsou využívány při analýze vnitřní struktury konvektivních bouří, jsou ekvivalentní radarová odrazivost (Ze), dopplerovská radiální rychlost (V), lineární depolarizační poměr (LDR), diferenciální fázové posunutí (Φ_{dp}) a ko-polární korelační koeficient (Rho_{hv}).

FURUNO WR2120 je dopplerovský plně polarimetrický meteorologický radar měřící v pásmu X (9,4 GHz), který byl nainstalován na Milešovku na konci roku 2020. V současnosti



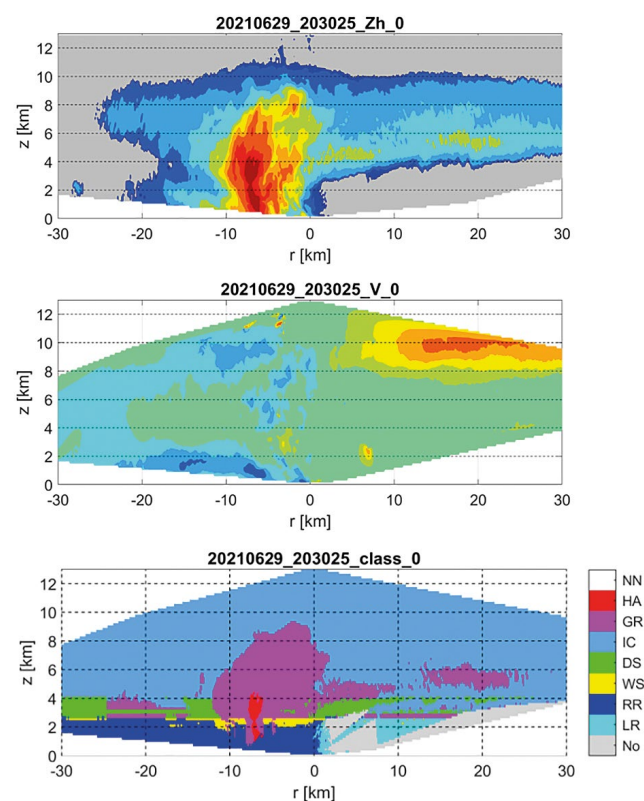
Obr. 2 Pole Ze , LDR a RHO naměřená oblačným radarem MIRA 35c dne 4. 2. 2022 mezi 23:00 a 23:30 UTC (horizontální osa). Vertikální osa znázorňuje výšku v metrech nad radarem. Ve vyznačeném čase přerušovanou svislou čarou byl zaregistrován blesk na observatoři, který zasáhl její věž. Zvýšené hodnoty LDR a RHO ve vyšších hladinách před výbojem dokládají jednotnou orientaci ledových krystalků v silném elektrickém poli, což je příhodné pro vznik blesku.

Fig. 2. Ze , LDR and RHO fields measured by the MIRA 35c cloud radar on February 4, 2022 between 23:00 and 23:30 UTC (horizontal axis). The vertical axis shows the height in meters above the radar. At the time indicated by the dashed vertical line, lightning was registered at the observatory and struck the observatory tower. Higher values of LDR and RHO at higher levels before the discharge demonstrate the uniform orientation of ice crystals in the strong electric field, which is suitable for the formation of lightning.



Obr. 3 Průměrné hodnoty Z_e pro konvektivní bouře, kdy se vyskytl blesk do vzdálenosti R od radaru (červené čáry) a kdy se blesk vyskytl alespoň 7,5 km od radaru MIRA 35c (modré čáry). Tenké přerušované čáry ukazují 40% a 60% kvantily. Vertikální osa znázorňuje výšku nad radarem v km. Výsledek je získán z termínů, kdy se vyskytla bouřka do 10 km od radaru za 5 let měření (2018–2022).

Fig. 3. Average Z_e values for convective storms when lightning occurred within a distance R of the radar (red lines) and when lightning occurred at least 7.5 km from the MIRA 35c radar (blue lines). Thin dashed lines show the 40% and 60% quantiles. The vertical axis shows the height in km above the radar. The obtained result come from dates when a storm occurred within 10 km of the radar during 5 years of radars measurements (2018–2022).



Obr. 4 Vertikální řez Z_h , V a klasifikace hydrometeorů na základě měření radaru WR2120. Vertikální řez je veden přibližně ve směru pohybu silné konvektivní bouře procházející blízko Milešovky dne 13. 7. 2021 v 19:03:53 UTC. Legenda u spodního obrázku značí následující kategorie hydrometeorů: NN (není definováno), HA (kroupy), GR (krupky), IC (led), DS (suchý sníh), WS (vlhký sníh), RR (děšť), LR (jemný děšť) a No (nejsou data).

Fig. 4. Vertical cross-section of Z_h , V and hydrometeor classification based on WR2120 radar measurements. The vertical cross-sections are taken approximately in the direction of movement of a strong convective storm passing near Milešovka on July 13, 2021 at 19:03:53 UTC. The legend of the bottom panel indicates the following hydrometeor categories: NN (not defined), HA (hail), GR (graupel), IC (ice), DS (dry snow), WS (wet snow), RR (rain), LR (light rain), and No (no data).

jsou radarová měření prováděna s rozlišením 75 m a s dosahem 35 km. Podrobnější informace o radaru a jeho konfiguraci lze nalézt v publikaci Bobotové et al. (2022). Radar měří následující standardní typy dat: odrazivost vlny s horizontální polarizací (Z_h), diferenciální odrazivost (Z_{dr}), dopplerovskou rychlost (V), specifickou diferenciální fázi (K_{dp}), diferenciální fázový posun (Φ_{dp}), ko-polární korelační koeficient (R_{ho}) a šířku dopplerovského rychlostního spektra (W).

3. Modelování konvektivních bouří a bouřkové činnosti

V rámci projektu CRREAT byl využit matematický model obla- ku poskytnutý prof. Pao K. Wangem z Academia Sinica (Tcha- j-pej, Tchaj-wan), který byl doplněn o nově vyvinutý model elektrizace oblačnosti. Nově vzniklý komplexní model nazva- ný CEMW s horizontálním rozlišením od 50 m a vertikálním rozlišením od 10 m při zemi, simuluje na základě zadaných počátečních podmínek ve formě bodového profilu atmosfé- ry, např. ze sondážních měření, časový vývoj oblaku a elek- trického pole. CEMW popisuje kromě základních meteorolo- gických veličin vývoj 5 druhů hydrometeorů (oblačná voda, dešťová voda, sníh, led a krupky). CEMW zároveň modeluje vývoj elektrických nábojů těchto hydrometeorů a rozložení kladných a záporných iontů v atmosféře pomocí iontové rov- nice. Při výpočtu elektrického pole model zohledňuje přenos a vývoj nábojů v rámci procesů oblačné mikrofyziky probí- hající v oblaku, separaci náboje kontaktem v důsledku srážek krupek, ledu a sněhu, interakci mezi ionty a náboji nesenými hydrometeory, korónový výboj a dále zahrnuje i zjednodušený model vzniku elektrických vý- bojů v atmosféře, včetně větvení kanálu blesku a redistribuci ná- boje mezi ionty a hydrometeory po výboji.

4. Hlavní výsledky

Výsledky výzkumné činnosti lze rozdělit na ty, které vycházely z analýz především radarových dat, a na ty, které vzešly z práce s modelem elektrizace oblačnosti CEMW.

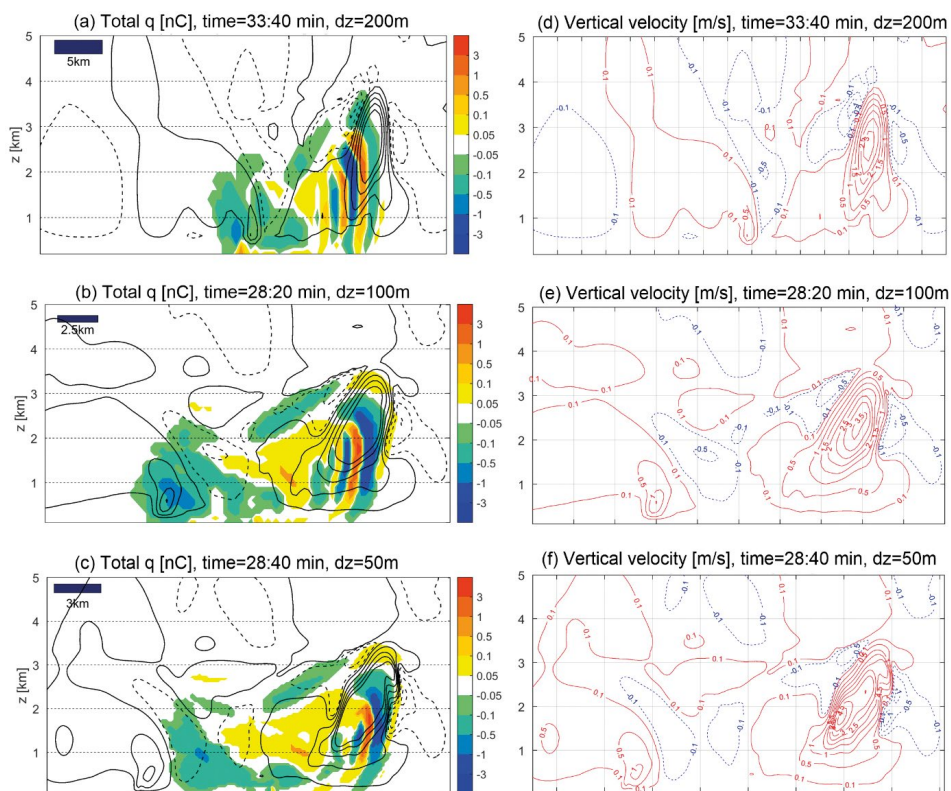
4.1 Výsledky analýz dat z radaru MIRA 35c a WR2120

Při práci s daty oblačného rada- ru MIRA 35c jsme využili jeho schopnost identifikovat oblač- nou vodu a vyvinuli jsme tech- niku pro výpočet vertikální rych- losti vzduchu (Sokol et al. 2018). Byla vyvinuta nová metoda klasi- fikace hydrometeorů v oblačnos- ti, která využívá vypočtené verti- kální rychlosti vzduchu, analýzy naměřeného spektra V , hodnot LDR a teploty vzduchu (Sokol et al. 2018; 2020). Obr. 2 ukazuje příklad vybraných radarových výstupů pro zimní bouři s výbo- jem, který přímo zasáhl věž na Milešovce. Speciální struktury naměřených dat umožňují iden- tifikovat místa, kde lze očekávat

vysoké hodnoty elektrického pole v oblačnosti, které za vhod- ných podmínek vedou k elektrickému výboji. Oblačný radar má však v případě intenzivního deště silný útlum, který ruší měření. V takových případech můžeme analyzovat pouze po- čátek a konec bouře.

Vyvinutá metoda klasifikace hydrometeorů umožňuje v jedné radarové buňce identifikovat více druhů hydrometeorů. Na zá- kladě analýzy dlouhodobých měření se podařilo identifikovat rozdíly ve struktuře konvektivních bouří v okolí Milešovky s vý- skytem blesku blízko radaru a bez výskytu v jeho blízkém okolí (Sokol a Popová 2021; Sokol et al. 2023; obr. 3).

Výstupy radaru WR2120 jsou využívány jak k plošnému zob- razení struktury bouří a k identifikaci jejich pohybů, tak k po- hledu dovnitř oblaků pomocí měření ve vertikálních řezech. Vytvořili jsme algoritmus, který provádí klasifikaci hydrome- teorů v oblačnosti v horizontálních i vertikálních řezech (Bo- botová et al. 2022). Obr. 4 ukazuje vybraná naměřená data pro konvektivní bouři ze dne 13. 7. 2022, která procházela



Obr. 5 Vertikální řezy zimní bouří ze dne 4. 2. 2022 simulované modelem CEMW (vertikální osa je výška nad radarem v km, horizontální osa je vedena přibližně ve směru postupu bouře). Levý sloupec ukazuje strukturu elektrického náboje v nC a vertikální rychlost vzduchu, která je podrobně zobrazena v pravém sloupci v m·s⁻¹ (plné nebo červené čáry značí kladnou rychlost, přerušované nebo modré čáry ukazují zápornou rychlost). Řezy v řádkách odpovídají výpočtům s různým vertikálním rozlišením (dz) a čas odpovídá času těsně před tím, než v modelu došlo k prvnímu výboji. Řezy ukazují, že rozlišení modelu zřetelně mění detaily modelových polí.

Fig. 5. Vertical cross-sections of the winter storm on February 4, 2022 simulated by the CEMW model (the vertical axis is the height in km above the radar, the horizontal axis is approximately in the direction of the storm movement). The left column shows the electric charge structure in nC and the vertical air velocity, which is detailed in the right column in m·s⁻¹ (solid or red lines indicate positive velocity, while dashed or blue lines show negative velocity). The panels correspond to calculations with different vertical resolution (dz) from the top to the bottom. The time corresponds to the time just before the first discharge was produced in the model. The vertical cross-sections show that the model resolution clearly changes the details of the model fields.

v těsné blízkosti Milešovky a jejíž výška oblačnosti dosahovala 16,5 km. Ve srovnání se standardními C-pásmovými radary sice trpí X-pásmový radar významným útlumem, ale vzhledem k tomu, že měření využíváme ke studiu lokálních vlastností oblačnosti v blízkosti radaru, nepovažujeme tento nedostatek za zásadní.

4.2 Výsledky modelu elektrizace oblačnosti CEMW

Matematický model oblaku a jeho elektrizace je komplikovaný jak po fyzikální stránce, tak po stránce numerické. Řada parametrizovaných procesů a hodnot jejich parametrů vychází částečně z laboratorních měření, ale z velké části z empirických zkušeností. Výstupy těchto modelů nelze rigorózně verifikovat, protože až na výjimky nejsou k dispozici vhodná data. Nám se podařilo s využitím poskytnutého oblačného modelu vytvořit komplexní model CEMW, který byl validován na simulaci idealizované letní bouře (Popová et al. 2022) a na simulaci reálné zimní bouře (Popová et al. 2023). Naše výsledky se liší od většiny publikovaných studií v tom, že elektrický náboj v oblaku má významnou vertikální strukturu. Příklad rozložení elektrického náboje v bouři je znázorněn na obr. 5.

5. Závěr

Observatoř Milešovka je v současnosti velmi dobře vybavena pro měření charakteristik oblačnosti a řadí se mezi malý počet stanic v Evropě, jež je vybavena dvěma radary (z čehož jeden je oblačný), které měří prakticky nepřetržitě. Vytvořili jsme postupy na zpracování radarových dat tak, aby se mohly využívat k výzkumu bouří. Vyvinuli jsme model elektrizace oblačnosti CEMW a jeho validace potvrdila, že je schopen simulovat oblak včetně elektrických výbojů jak pro idealizované, tak i pro reálné bouře. Naším dalším cílem je využít model ICON vyvinutý Německou meteorologickou službou a obohatit ho o explicitní modelování elektrizace. Předpokládáme, že výsledný model bude použitelný pro simulace konkrétních zejména letních událostí.

Poděkování:

Výzkum proběhl v rámci projektu CRREAT CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000481 a Strategie AV21 (Interpretace radarových měření). Také byl podpořen mobilitními projekty Mobility Plus Project Akademie věd České republiky (MOST-20-04 a CNR-22-25).

Literatura:

- BOBOTOVÁ, G., SOKOL, Z., POPOVÁ, J., FIŠER, O., ZACHAROV, P., 2022. Analysis of Two Convective Storms Using Polarimetric X-Band Radar and Satellite Data. *Remote Sensing*, Vol. **14**, 2294. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs14102294>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., ŠLEGL, J., POPOVÁ, J., SOKOL, Z. et al., 2022. Continental thunderstorm ground enhancement observed at an exceptionally low altitude. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. **22**, s. 7959–7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-22-7959-2022>.
- POPOVÁ, J., SOKOL, Z., ŠLEGL, J., WANG, P., CHOU, Y.-L., 2022. Research cloud electrification model in the Wisconsin dynamic/microphysical model 2: Charge structure in an idealized thunderstorm and its dependence on ion generation rate. *Atmospheric Research*,

Vol. **270**, 106090. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106090>.

- POPOVÁ, J., SOKOL, Z., WANG, P., SVOBODA, J., 2023. Observations and modelling of the winter thunderstorm on 4 February 2022 at the Milešovka meteorological observatory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, qj.4572. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.4572>.
- SOKOL, Z., MINÁŘOVÁ, J., NOVÁK, P., 2018. Classification of Hydrometeors Using Measurements of the Ka-Band Cloud Radar Installed at the Milešovka Mountain (Central Europe). *Remote Sensing*, Vol. **10**, 1674. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs10111674>.
- SOKOL, Z., MINÁŘOVÁ, J., FIŠER, O., 2020. Hydrometeor Distribution and Linear Depolarization Ratio in Thunderstorms. *Remote Sensing*, Vol. **12**, 2144. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs12132144>.
- SOKOL, Z., POPOVÁ, J., 2021. Differences in Cloud Radar Phase and Power in Co- and Cross-Channel—Indicator of Lightning. *Remote Sensing*, Vol. **13**, 503. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13030503>.
- SOKOL, Z., POPOVÁ, J., SKRIPNIKOVÁ, K., TORCASIO, R. C., FEDERICO, S., FIŠER, O., 2023. Comparison of Cloud Structures of Storms Producing Lightning at Different Distance Based on Five Years Measurements of a Doppler Polarimetric Vertical Cloud Profiler. *Remote Sensing*, Vol. **15**, 2874. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs15112874>.

Lektoři (Reviewers):

Ing. Jan Mikeš, Ph.D., prof. RNDr. Jan Bednář, CSc.