

Meteorologické zprávy

ROČNÍK
77–2024

2

- 33 Módy proměnlivosti atmosférické cirkulace: Nové poznatky a metody výzkumu**
Romana Beranová – Radan Huth – Vladimír Piskala – Jan Stryhal
- 37 Rádiové vlny emitované během vývoje přírodních bleskových výbojů**
Ivana Kolmašová – Ondřej Santolík – Radek Lán – Luděk Uhlíř
- 46 Dopad růstu koncentrace skleníkových plynů na horní atmosféru a ionosféru**
Jan Laštovička
- 48 Vliv troposférických situací mezosynoptického měřítka na dynamiku a variabilitu ionosféry**
Kateřina Potužníková – Petra Koucká Knížová – Jaroslav Chum
- 52 Rádiové přijímače na meziplanetárních sondách přinášejí nové poznatky o bleskových výbojích v atmosféře Jupiteru**
Ondřej Santolík – Ivana Kolmašová
- 57 Výzkum blesků a jejich modelování s využitím měření na observatoři Milešovka v rámci Výzkumného centra kosmického záření a radiačních událostí v atmosféře**
Zbyněk Sokol – Jana Popová
- 62 Vlny veder v ČR: Zvýšení rizika úmrtnosti v posledním desetiletí a naléhavost cílených opatření v oblasti veřejného zdraví**
Aleš Urban – Hana Hanzlíková – Eva Plavcová – Chloé Vésier – Jan Kyselý
- 67 Pokrok ve vývoji systémů pro předpověď stavu a teploty na silničních komunikacích**
Petr Zacharov – Vojtěch Bližňák



- 33 Modes of atmospheric circulation variability: New findings and research methods**
Romana Beranová – Radan Huth – Vladimír Piskala – Jan Stryhal
- 37 Radio waves emitted during the evolution of natural lightning discharges**
Ivana Kolmašová – Ondřej Santolík – Radek Lán – Luděk Uhlíř
- 46 Impact of increasing concentration of greenhouse gases on the upper atmosphere and ionosphere**
Jan Laštovička
- 48 Influence of mesoscale tropospheric situations on ionospheric dynamics and variability**
Kateřina Potužníková – Petra Koucká Knížová – Jaroslav Chum
- 52 Radio receivers aboard planetary spacecraft missions bring new knowledge about lightning discharges in the Jovian atmosphere**
Ondřej Santolík – Ivana Kolmašová
- 57 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 – Jana Popová
- 62 Heat waves in the Czech Republic: The increase in mortality risk over the last decade and the urgency of targeted public health action**
Aleš Urban – Hana Hanzlíková – Eva Plavcová – Chloé Vésier – Jan Kyselý
- 67 Progress in the development of road condition and temperature forecasting systems**
Petr Zacharov – Vojtěch Bližňák

Rozšiřuje – Free booking:

Český hydrometeorologický ústav, tiskové a informační oddělení
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, tel.: 244 032 721, 244 032 722

Czech Hydrometeorological Institute, Press and Information Department
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4, Czech Republic, Phones: (+420) 244 032 721, (+420) 244 032 722

Módy proměnlivosti atmosférické cirkulace: Nové poznatky a metody výzkumu

Modes of atmospheric circulation variability: New findings and research methods

Romana Beranová

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

Radan Huth

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ huth@ufa.cas.cz

Vladimír Piskala

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ vladimir.piskala@natur.cuni.cz

Jan Stryhal

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ stryhal@ufa.cas.cz

The investigation of atmospheric circulation is one of the main topics at the Department of Climatology, IAP. Throughout the years, we have studied atmospheric circulation from various perspectives, with one aspect being the exploration of modes of atmospheric circulation variability. In this paper, we introduce the issue of teleconnections detection and present two recent findings from our study of circulation modes as illustrative cases. First, we highlight a weakness of principal component analysis (PCA), the most commonly used method for mode detection. Specifically, the improper application of unrotated PCA leads to the identification of unrealistic modes, often incorrectly interpreted as genuine circulation patterns – a notable example being the Arctic Oscillation. Second, we demonstrate that PCA can be used to detect changes in the spatial-temporal structure of modes in long observational data sets. However, the application of PCA to this end often leads to artefacts due to the sensitivity of the method to subtle changes in the analysed data.

KLÍČOVÁ SLOVA: cirkulace atmosférická – vazby dálkové – oscilace Severoatlantická – oscilace Arktická – analýza hlavních složek

KEYWORDS: atmospheric circulation – teleconnections – North Atlantic Oscillation – Arctic Oscillation – principal component analysis

1. Úvod

Atmosférická cirkulace zásadním způsobem ovlivňuje přízemní klima. Cirkulační faktory přispívají k pozorovaným i očekávaným změnám klimatického systému a mají významný vliv na vznik a vývoj extrémních a nebezpečných jevů. Studium atmosférické cirkulace je jedním z hlavních témat výzkumu na oddělení klimatologie ÚFA. V průběhu let jsme atmosférickou cirkulaci zkoumali z různých pohledů, z nichž dominují dva. První představuje klasifikace polí cirkulačních proměnných. Kromě studií metodologických (Huth 1996) mají klasifikace v našem výzkumu bohatá uplatnění. Zabývali jsme se studiem persistence a trendů cirkulačních typů (Kučerová et al. 2017), vztahem mezi cirkulací a klimatickými trendy (Cahynová, Huth 2016), vztahem mezi cirkulací a extrémny počasí (Stryhal, Plavcová 2023) či vlivem sluneční aktivity na atmosférickou cirkulaci (Huth et al. 2008). V posledních letech jsme řešili na téma cirkulace několik projektů financovaných GAČR, zejména pak projekt Dálkové vazby – hlavní stavební kameny atmosférické cirkulace. Právě dálkové vazby představují druhý dominantní pohled na cirkulaci atmosféry a tento článek má za cíl představit některé z našich nejnovějších příspěvků k tomuto tématu.

2. Atmosférické dálkové vazby

Atmosférické dálkové vazby (angl. teleconnections) je pojem používaný pro geograficky vzdálené oblasti, v nichž mají změny tlaku vzduchu, geopotenciálních výšek, příp. i jiných klimatických prvků podobný časový průběh (tj. jsou spolu vysoce korelované). Zkoumání dálkových vazeb sahá až do počátku dvacátého století ke studii Walkera a Blisse (1932), která jako první zavedla tento pojem do věd o atmosféře. Moderní klimatologie dálkové vazby studuje zejména v souvislosti s nízkofrekvenčními oscilačními módy proměnlivosti

velkoprostorových cirkulačních polí, resp. akčních center atmosféry. Pro výstupy statistických metod při analýze polí meteorologických prvků se ustálil pojem módy nebo režimy proměnlivosti. Jejich nejznámějšími příklady jsou Severoatlantická oscilace (NAO) a Pacificko/Severoamerický mód (PNA) v mimotropických oblastech severní polokoule, Jižní oscilace v tropech a Antarktická oscilace (Jižní prstencový mód) na jižní polokouli. Módy proměnlivosti lze pokládat za základní stavební prvky atmosférické cirkulace, protože atmosférickou cirkulaci v daný časový okamžik lze dobře aproximovat jejich lineární kombinací.

3. Metody detekce

K detekci a popisu módů proměnlivosti se používají dvě hlavní metody. Starší a koncepčně jednodušší metoda je založena na autokorelačních mapách (např. Wallace, Gutzler 1981), které zobrazují korelace určitého referenčního bodu se všemi ostatními body. K popisu kompletní autokorelační struktury přízemního tlakového pole nebo geopotenciálních výšek by však bylo zapotřebí velkého množství takových map, což je nepraktické. V praxi se tedy z výsledků vytváří nová mapa, ve které je každému bodu přiřazena absolutní hodnota nejvyšší nalezené záporné korelace; oblasti s nejvyššími hodnotami pak představují akční centra dálkových vazeb (módů proměnlivosti).

V současnosti nejběžněji používanou metodou je analýza hlavních složek (angl. principal component analysis, PCA). Ta převádí soubor původních časových řad v jednotlivých bodech sítě do nového souboru časových řad neboli hlavních složek, které jsou lineární kombinací původních proměnných. Přitom několik prvních hlavních složek vysvětluje značnou část rozptylu původního souboru dat. Vhodnost PCA pro detekci módů atmosférické cirkulace prokázaly průkopnické studie Horela (1981) či Barnstona a Livezey (1987). Aby takto definované módy byly v souladu se známými autokorelačními strukturami, bývá nutné podrobit hlavní složky tzv. rotaci, tedy lineární transformaci, s cílem přiblížit se tzv. „jednoduché struktuře“ (angl. simple structure; Richman 1986). V praxi toto ovšem bývá někdy opomíjeno a nalezené nerealistické módy jsou vydávány za skutečné se vyskytující režimy proměnlivosti. Jeden takový příklad uvádíme v následující kapitole.

I při optimálním postupu nicméně není snadné (či dokonce možné) spojit výsledky PCA s konkrétními fyzikálními procesy. Metoda PCA totiž nebyla primárně navržena pro odhalování dynamického chování atmosféry, ale k efektivnímu zachycení variability dat. Navíc je to metoda lineární, která nemůže efektivně zachytit nelineární dynamiku. Jako možné alternativy byly mj. navrženy postupy založené na neuronových sítích. Jejich užitečnost byla nicméně prozatím zkoumána značně povrchně a na jejich limity jsme poukázali v nedávné studii (Stryhal et al. 2023).

4. Arktická oscilace jako artefakt PCA

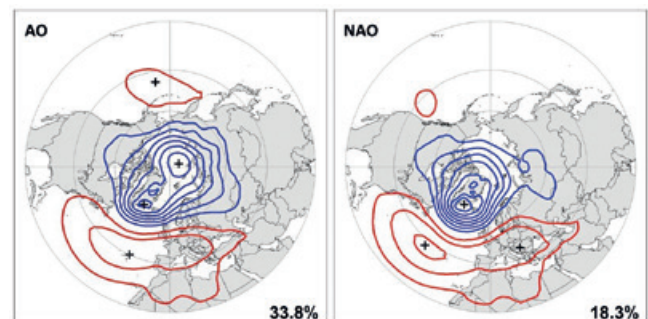
Arktická oscilace (AO) byla definována Thompsonem a Wallacem (1998) jako první nerotovaná hlavní složka v poli měsíčních anomálií tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře (SLP) v mimotropických šířkách severní polokoule. Ačkoli byla fyzikální realita AO mnohokrát zpochybňována (Itoh 2002), tak je koncept AO široce používán až do současnosti.

Na obr. 1 je zobrazena prostorová struktura AO a NAO. Pro tuto studii jsme použili data z NCEP/NCAR reanalýzy a období 1948–1997. NAO je použita jako referenční mód, pro jejíž detekci se rutinně používá rotovaná PCA a její existence je obecně přijímána a jsou známy fyzikální procesy, kterými se řídí (např. Woolings et al. 2008). NAO je charakterizována severo-j jižním dipólem s jižním centrem, které sahá od centrálního severního Atlantiku do jižní Evropy, a severním centrem, které se nachází západně od Islandu. NAO je druhou rotovanou hlavní složkou v poli SLP a vysvětluje 18,3 % celkového rozptylu v oblasti severně od 20° severní šířky.

AO je trojpól, jeden z jeho středů se nachází nad Arktidou, další dva středy opačného znaménka se nacházejí nad severním Atlantikem až jihozápadní Evropou (v oblasti Azorské výše) a nad severním Pacifikem (v oblasti Aleutské níže). Pacifické centrum je ve srovnání s ostatními dvěma centry podstatně slabší. AO vysvětluje 33,8 % celkového rozptylu.

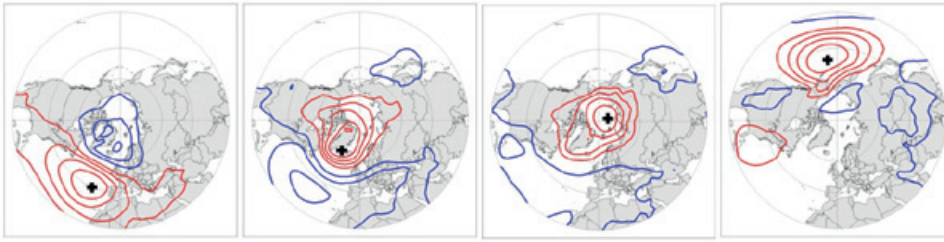
Autokorelační mapy pro AO jsou zobrazeny na obr. 2 pro hlavní body jeho tří center (pro arktické centrum mapujeme 2 body). Vzhledem k tomu, že bod azorského středu AO je blízko centra NAO, je očekávatelné, že odpovídající autokorelační mapa se podobá mapě NAO. Zjevná je absence aleutského centra. Korelační mapy pro dva body arktického centra se vzájemně značně liší. Mapa pro grónský bod se velmi podobá NAO; je vidět, že oblast slabých negativních korelací se středem nad severním Japonskem je daleko od oblasti, kde se vyskytuje aleutské centrum, a nespojuje s ním. Mapa druhého arktického bodu vykazuje pouze slabé korelace s pásem středních šířek nad severním Atlantikem a neexistuje zde ani žádné spojení s aleutským centrem. Aleutské centrum vůbec nekoreluje s Azorským centrem a korelace s arktickým centrem také nejsou zjevné, s výjimkou malé oblasti nad Východosibiřským mořem. Ve skutečnosti autokorelační mapa aleutského centra připomíná třetí rotovanou hlavní složku v SLP severní polokoule, známou jako PNA (např. Yeh et al. 2018).

Protože se prostorová struktura AO neshoduje s autokorelačními mapami a protože při změně prostorové a časové domény analýzy je její struktura nestabilní (Huth, Beranová 2021), tak by AO měla být považována pouze za artefakt analytické metody. Je to vlastně jen takový duch (angl. ghost pattern): ačkoli ve



Obr. 1 Mapy hlavních složek v poli SLP odpovídající Arktické oscilaci (AO) a Severoatlantické oscilaci (NAO). Interval vrstevnic je 1 hPa. Pozitivní/negativní isolinie jsou červené/modré, nulová je vynechána. Křížky označují akční centra, pro která jsou zobrazeny autokorelační mapy.

Fig. 1. Principal component maps in SLP corresponding to the Arctic Oscillation (AO) and the North Atlantic Oscillation (NAO). Contour interval is 1 hPa. Positive/negative isolines are in red/blue, zero is omitted. Crosses indicate action centres for which autocorrelation maps are shown.



Obr. 2 Autokorelační mapy pro centra AO, označené na obrázku 1 křížky. Interval isolinií je 0,2. Kladné korelace jsou znázorněny červeně, záporné modře. Poloha referenčního bodu je označena tučným křížkem.

Fig. 2. Autocorrelation maps for the centres of the AO, indicated in Fig. 1 by crosses. Contour interval is 0.2. Positive correlations are shown in red, negative in blue. The position of the reference point is indicated by a bold cross.

skutečnosti neexistuje, mnoho lidí v jeho existenci věří, a někteří jsou dokonce přesvědčeni, že jej viděli.

5. Citlivost metody PCA na výběr analyzovaného období

Jednou z možných aplikací PCA je detekce změn prostorové struktury módů v čase (Beranová, Huth 2008). Díky dlouhodobým atmosférickým reanalýzám máme nyní možnost sledovat tyto změny v průběhu celého dvacátého století. Jednou z nejdelších dostupných datových řad je Twentieth Century Reanalysis (20CR), pokrývající ve své verzi 2c období 1872–2012 a ve verzi 3 startuje rokem 1836. Tato reanalýza asimuluje pouze pozorování přízemního tlaku vzduchu, měsíční teploty hladiny moře a koncentrace mořského ledu (Compo et al. 2011), data z vyšších vrstev atmosféry nejsou zahrnuta.

Piskala a Huth (2023) ve své studii využili zimní měsíční hodnoty geopotenciálních výšek hladiny 500 hPa z 20CR pro popis změn cirkulačních módů v období 1872–2012. Za tímto účelem byly porovnány prostorové struktury cirkulačních módů získané pro klouzavá období trvající 20, 30, 40 a 50 let s časovým krokem 1 rok. Na základě této analýzy lze rozeznat 3 typy prostorových změn.

Prvním typem je pomalá a postupná změna, jejímž příkladem je mírný posun severního centra NAO směrem na východ od 70. let 20. století do roku 2000. Tento trend byl už dříve popsán (např. Jung et al. 2003). Posuny tohoto druhu odrážejí skutečné změny v atmosférické cirkulaci, protože jsou obvykle doprovázeny i změnami v autokorelačních mapách.

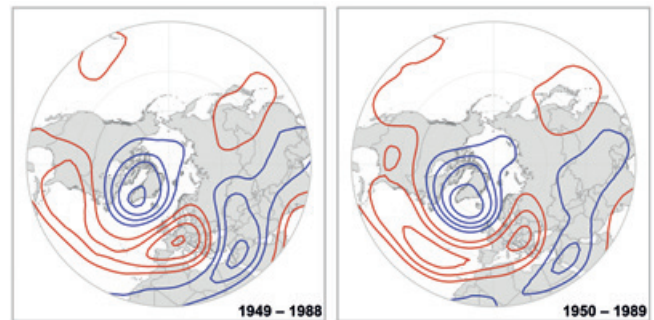
Druhým typem je rychlý a náhlý posun mezi dvěma po sobě jdoucími klouzavými obdobími, který není doprovázen změnou ve vysvětleném rozptylu. Příkladem je náhlá změna NAO mezi obdobími 1949–88 a 1950–89 (obr. 3). Takto rozsáhlé změny ale neodrážejí skutečné změny v atmosféře, protože obě po sobě následující období obsahují téměř identická vstupní data. Nejpravděpodobnějším důvodem tohoto typu změn je přidání dodatečné variability do vstupních dat. Tou dodatečnou variabilitou může být silná anomálie. Právě takovou anomálií byla zima 1988/89, která patří mezi několik zim s nejsilnějším pozitivním NAO indexem (Jones et al. 1997).

Třetím typem změn je náhlý posun doprovázený výraznou změnou vysvětleného rozptylu. V tomto případě je příčinou

citlivost PCA na počet rotovaných módů. I relativně malá modifikace vstupních dat totiž může způsobit, že se změní i optimální počet požadovaných módů. Při použití klouzavé PCA a zachování stejného počtu požadovaných módů pro všechna dílčí období může nastat efekt přerotování nebo podrotování (O’Lenic, Livezey 1988). V takovém případě se signál z jednotlivých dálkových vazeb může sloučit do jednoho módu, nebo se naopak rozpadnout do více módů, kdy jednu dálkovou vazbu popisuje více módů. Využití klouzavé PCA prokázalo, že tento efekt může doprovázet i nejsilnější módy jako je NAO nebo PNA.

prokázalo, že tento efekt může doprovázet i nejsilnější módy jako je NAO nebo PNA.

Výskyt náhlých změn módů je víceméně náhodný. Čím je zkoumané období kratší, tím častěji se vyskytují tyto náhlé změny. Z tohoto důvodu doporučujeme pro studium dlouhodobých změn cirkulačních módů používat PCA s klouzavým krokem, což umožňuje identifikovat tyto náhlé změny. Bohužel, většina autorů pro různé studie s využitím PCA používá pouze pevná nepřekrývající se období, což může jejich výsledky zkreslit výše popsanými náhodnými efekty. Mírnou změnou v analyzovaném období lze získat výrazně odlišné výsledky.



Obr. 3 Mapy Severoatlantické oscilace pro období 1949–1988 (vlevo) a pro období 1950–1989 (vpravo). Pozitivní/negativní isolinie jsou červené/modré, nulová je vynechána.

Fig. 3. Maps of the North Atlantic Oscillation for the period 1949–1988 (left) and 1950–1989 (right). Positive/negative isolines are in red/blue, zero is omitted.

6. Závěr

V tomto článku jsme představili stručný úvod do problematiky detekce dálkových vazeb atmosféry a jako příklad jsme uvedli dva z našich nejnovějších výsledků studia módů proměnlivosti atmosférické cirkulace. Poukázali jsme na slabiny metody PCA, která je nejpoužívanější metodou popisu módů. Předně při chybném použití nerotované PCA dochází k identifikaci nerealistických módů, které jsou interpretované jako skutečně se vyskytující režimy proměnlivosti. Příkladem takového módu je Arktická oscilace. Dále jsme ukázali, že prostorová struktura módů získaná metodou PCA je citlivá na výběr analyzovaného období. Na závěr chceme zdůraznit, že pro detekci módů atmosférické cirkulace metodou PCA je nezbytné věnovat pozornost

srovnání s prostorovými autokorelacemi a kontrole jejich prostorové a časové stability.

Literatura:

- BARNSTON, A. G., LIVEZEY, R. E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, Vol. **115**, s. 1083–1126. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2).
- BERANOVÁ, R., HUTH, R., 2008. Time variations of the effects of circulation variability modes on European temperature and precipitation in winter. *International Journal of Climatology*, Vol. **28**, s. 139–158. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.1516>.
- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R., 2016. Atmospheric circulation influence on climatic trends in Europe: an analysis of circulation type classifications from the COST733 catalogue. *International Journal of Climatology*, Vol. **36**, s. 2743–2760. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.4003>.
- COMPO, G. P., WHITAKER, J. S., SARDESHMUKH, P. D., MATSUI, N., ALLAN, R. J. et al., 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **137**, s. 1–28. ISSN 0035-9009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.776>.
- HOREL, J. D., 1981. A rotated principal component analysis of the interannual variability of Northern Hemisphere 500 mb height field. *Monthly Weather Review*, Vol. **109**, s. 2080–2092. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C2080:ARPCAO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C2080:ARPCAO%3E2.0.CO;2).
- HUTH, R., 1996. Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. **59**, s. 217–233. ISSN 0177-7971. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF01030145>.
- HUTH, R., KYSELÝ, J., BOCHNÍČEK, J., HEJDA, P., 2008. Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Annales Geophysicae*, Vol. **26**, s. 1999–2004. ISSN 0992-7689. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1999-2008>.
- HUTH, R., BERANOVÁ, R., 2021. How to recognize a true mode of atmospheric circulation variability. *Earth and Space Science*, Vol. **8**, e2020EA001275. ISSN 2333-5084. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020EA001275>.
- ITOH, H., 2002. True versus apparent Arctic oscillation. *Geophysical Research Letters*, Vol. **29**, 109. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2001GL013978>.
- JONES, P. D., JONSSON, T., WHEELER, D., 1997. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *International Journal of Climatology*, Vol. **17**, s. 1433–1450. ISSN 0899-8418. Dostupné z: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P).
- JUNG, T., HILMER, M., RUPRECHT, E., KLEPPEK, S., GULEV, S. K. et al., 2003. Characteristics of the recent eastward shift of interannual NAO variability. *Journal of Climate*, Vol. **16**, s. 3371–3382. ISSN 0894-8755. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C3371:COTRES%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C3371:COTRES%3E2.0.CO;2).
- KUČEROVÁ, M., BECK, C., PHILIPP, A., HUTH, R., 2017. Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *International Journal of Climatology*, Vol. **37**, s. 2502–2521. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.4861>.
- O' LENIC, E. A., LIVEZEY, R. E., 1988. Practical considerations on the use of rotated principal component analysis (RPCA) in diagnostic studies of upper-air height field. *Monthly Weather Review*, Vol. **116**, s. 1682–1689. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116%3C1682:PCITUO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116%3C1682:PCITUO%3E2.0.CO;2).
- PISKALA, V., HUTH, R., 2023. Identifying shifts in modes of low-frequency circulation variability using the 20CR reanalysis ensemble. *Journal of Climate*, Vol. **36**, s. 7771–7783. ISSN 0894-8755. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0620.1>.
- RICHMAN, M. B., 1986. Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, Vol. **6**, s. 293–335. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>.
- STRYHAL, J., BERANOVÁ, R., HUTH, R., 2023. Representation of modes of atmospheric circulation variability by self-organizing maps: A study using synthetic data. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, Vol. **128**: e2023JD039183. ISSN 2169-8996. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2023JD039183>.
- STRYHAL, J., PLAVCOVÁ, E., 2023. On using self-organizing maps and discretized Sammon maps to study links between atmospheric circulation and weather extremes. *International Journal of Climatology*, Vol. **43**, s. 2678–2698. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7996>.
- THOMPSON, D. W. J., WALLACE, J. M., 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, Vol. **25**, s. 1297–1300. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.
- WALKER, G. T., BLISS, E. W., 1932. World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, Vol. **4**, s. 53–84. Dostupné z: <https://www.rmets.org/sites/default/files/ww5.pdf>.
- WALLACE, J. M., GUTZLER, D. S., 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, Vol. **109**, s. 784–812. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C0784:TITGHF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C0784:TITGHF%3E2.0.CO;2).
- WOOLINGS, T., HOSKINS, B., BLACKBURN, M., BERRISFORD, P., 2008. A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. **65**, s. 609–626. ISSN 0022-4928. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/2007JAS2347.1>.
- YEH, S.-W., YI, D.-W., SUNG, M.-K., KIM, Y. H., 2018. An eastward shift of the North Pacific oscillation after the mid-1990s and its relationship with ENSO. *Geophysical Research Letters*, Vol. **45**, s. 6654–6660. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2018GL078671>.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Martin Hynčica, Ph.D., prof. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.

Rádiové vlny emitované během vývoje přírodních bleskových výbojů

Radio waves emitted during the evolution of natural lightning discharges

Ivana Kolmašová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Matematicko-fyzikální fakulta
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2
✉ iko@ufa.cas.cz

Ondřej Santolík

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Matematicko-fyzikální fakulta
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2

Radek Lán

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

Luděk Uhlíř

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

In this overview, we underscore the significance of conducting broadband electromagnetic measurements to study the initiation and progression of lightning discharges within thunderclouds.

Using a newly developed shielded magnetic loop antenna sensitive to frequencies ranging from 5 kHz to 90 MHz we enhanced our understanding of the initial phase of negative cloud-to-ground lightning discharges. Through the integration of broadband recordings with data obtained from narrowband lightning mapping arrays, we have unveiled the origins of rarely occurring microsecond-scale pulse trains in electromagnetic recordings and provided a detailed description of behaviour of attempted lightning leaders. Our findings also demonstrate that lightning can serve as a valuable tool for investigating the thundercloud charge structure, particularly when electromagnetic data sets are complemented with meteorological radar measurements.

KLÍČOVÁ SLOVA: výboj bleskový – oblak bouřkový – náboj elektrický – měření elektromagnetická

KEYWORDS: lightning discharge – thundercloud – electric charge – electromagnetic measurements

1. Úvod

Přírodní bleskové výboje emitují elektromagnetické signály v širokém pásmu frekvencí. Vlastnosti těchto signálů odrážejí časová a prostorová měřítka jednotlivých vývojových etap bleskového výboje. Nevelké proudy, které protékají krátkými bleskovými kanály uvnitř bouřkového oblaku, vyzařují rádiové vlny na výrazně vyšších frekvencích než velké proudy tekoucí několik kilometrů dlouhým bleskovým kanálem propojujícím bouřkový oblak a zemi při tzv. zpětném výboji (angl. return stroke – RS). Vzhledem k délce bleskového kanálu má rádiový puls zpětného výboje maximální spektrální výkonovou hustotu na frekvencích okolo 10 kHz a šíří se na velké vzdálenosti až několika tisíc kilometrů od místa svého vzniku. Komerční bleskové detekční sítě využívají skutečnosti, že signály od zdrojového bleskového výboje putují ke stanicím sítě konečnou rychlostí blízkou rychlosti světla a lze tedy metodou „time of flight“ dopočítat čas a místo úderu blesku, pokud jeho rádiový signál zachytily alespoň čtyři stanice.

V případě vnitřních procesů je širokopásmová analýza vyzařovaných rádiových signálů často jediný způsob, jak zkoumat jevy, které jsou jinými metodami buď nedostupné (vysokorychlostní kamery), či dokonce nebezpečné (in situ měření). Velká pozornost se již řadu let věnuje skupinám bipolárních tzv. iniciačních elektromagnetických pulsů, o nichž se domníváme, že provázejí zrod většiny bleskových výbojů někde na pomezí nábojových center různé polarizace uvnitř bouřkového oblaku (Marshall et al. 2014a). První studie vzniku bleskového výboje, ve kterých autoři analyzovali iniciační pulsy, se datují do 50. let 20. století (Clarence, Malan 1957; Norinder, Knudsen 1956). Od té doby byly publikovány desítky studií, které postupně odhalily jevy provázející vznik jak vnitřních bleskových výbojů (angl. Intra-Cloud, IC) tak výbojů do země (angl. Cloud-to-Ground, CG). Měření prováděná několik kilometrů od zdrojového blesku ukázala, že prvnímu iniciačnímu pulsu předchází tzv. ionizující iniciační událost, po níž následuje počáteční změna elektrostatického elektrického pole (Marshall et al. 2014b; 2019). Iniciační pulsy lze překvapivě detekovat stovky kilometrů daleko od jejich zdrojů v bouřkových oblacích (Kotovsky et al. 2016; Kolmašová et al. 2016). Iniciační procesy jsou v blescích do země obvykle následovány skokovitě postupujícím vůdčím výbojem (angl. stepped leader) a zpětným výbojem (Rakov, Uman 2003 a zde uvedené odkazy).

Analýza elektromagnetických záznamů odhalila, že poměry amplitud nejsilnějších iniciačních pulsů v jednotlivých sekvencích a odpovídajících následných pulsů zpětného výboje se mohou podstatně lišit v závislosti na geografických lokalitách a ročních obdobích. Tento poměr dosahuje ní-

kých hodnot v tropech a subtropích (15 % na Floridě, USA – Zhu et al. 2016; 17 % na Srí Lance – Gomes et al. 1998; 28 % v Malajsií – Baharudin et al. 2012a; b), vyšší hodnoty byly zaznamenány při měřeních ve vyšších zeměpisných šířkách nebo během zimní sezóny (47 % v Hokuriku, Japonsko – Wu et al. 2013; 70 % Albany, NY, USA – Brook 1992; 101 % ve Švédsku – Gomes et al. 1998). Někdy se iniciační procesy zastaví a k běžnému zpětnému výboji nedojde; nicméně vlastnosti těchto iniciačních sekvencí jsou podobné vlastnostem těch, které předcházejí negativním výbojům do země (Kolmašová et al. 2020). Takové události jsou v literatuře popisovány jako invertované vnitrooblačné výboje (Zhang et al. 2002; 2015; Chilingarian et al. 2020), izolované iniciační pulsy (Sharma et al. 2008; Kolmašová et al. 2018; 2020), či nedokončené vůdčí výboje (Nag, Rakov 2008; 2009). Výsledky modelování ukázaly, že za tento jev je zodpovědné neobvykle silné centrum kladného náboje ve spodní části bouřkového oblaku, které brání dalšímu šíření výboje postupujícího směrem dolů k zemi (Tan et al. 2014; Ludin et al. 2017).

Pro lepší pochopení vnitrooblačných procesů jsou širokopásmová elektromagnetická měření iniciačních sekvencí příležitostně kombinována s úzkopásmovými měřeními bleskových polí typu LMA (Lightning Mapping Array, Rison et al. 1999; Coquillat et al. 2019) nebo LOFAR (Low Frequency Array, van Haarlem et al. 2013). Tato kombinace měření pak umožňuje současně sledovat danou vývojovou fázi bleskového výboje v širokém rozsahu frekvencí a mapovat rozložení rádiových zdrojů uvnitř bouřkového oblaku (Kolmašová et al. 2018; 2020; 2023; Scholten et al. 2021; 2022).

Neméně přínosné je kombinovat elektromagnetické záznamy s měřeními meteorologických radarů, protože vlastnosti bouřkových oblaků spolu se složením hydrometeorů jsou klíčové pro elektrifikaci oblaků a tím i pro vznik bleskového výboje (Gurevich, Karasthin 2013; Bousquet et al. 2015; Ribaud et al. 2016). Schultz et al. (2011) díky kombinaci bleskových a radarových dat zjistili, že celková relativní četnost blesků (včetně těch vnitrooblačných) je lepším indikátorem zintenzivnění bouře (silný vítr, velká krupobití, tornáda), než když brali v úvahu pouze blesky do země. Podobným způsobem MacGorman et al. (2011) zjistili, že časové zpoždění prvního blesku do země po prvním vnitrooblačném blesku se podstatně lišilo (0–30 min) v bouřích odehrávajících se v různých geografických podmínkách. Studie Fuchse et al. (2015) odhalila, že relativní četnosti blesků závisí na dostupné konvektivní potenciální energii, neboli CAPE (angl. Convective Available Potential Energy), výšce základny oblačnosti a koncentraci aerosolů. Lang a Rutledge (2011) našli rozdíly v konvektivních buňkách s převahou kladných či záporných blesků do země, přičemž buňky s převahou kladných blesků měly větší objem a byly více vertikálně vyvinuté.

Tento článek představuje přehled výsledků případových studií vnitrooblačných procesů získaných rozborem záznamů pořízených širokopásmovými magnetickými anténami vyvinutými na oddělení kosmické fyziky Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a umístěnými v jižní Francii, na ostrově Korsika a v Holandsku (Kolmašová et al. 2016; 2018; 2020; 2022; 2023). Záznamy vnitrooblačných bleskových jevů byly zkombinovány s daty z úzkopásmových anténních polí (Kolmašová et al. 2018; 2020; 2023), či doplněny informacemi z měření meteorologických radarů (Kolmašová et al. 2022).

2. Přístrojové vybavení

2.1 Magnetické smyčkové antény

Počátky měření elektromagnetických signálů emitovaných bleskovými výboji jsou na oddělení kosmické fyziky ÚFA AV ČR neoddelitelně spjaty s naší účastí na francouzském družicovém projektu TARANIS (Tool for the Analysis of Radiation from lightNING and Sprites) (Blanc et al. 2007), na jehož přípravě jsme se podíleli od roku 2006. Pro tuto družici jsme navrhli a postavili analyzátor jako součást přístroje IME-HF (Instrument de Mesure du champ Electrique Haute Fréquence) určeného pro širokopásmové měření elektromagnetických vln o kmitočtech od několika kHz až do 37 MHz. Jako senzor elektrického pole byly použity dvě výklopné elektrické antény s předzesilovači vyvinuté v laboratoři LPC2E Orléans ve Francii.

Pro důkladné prozkoušení prototypu analyzátoru jsme je v roce 2012 napojili na jednoduchou kruhovou magnetickou smyčkovou anténu s efektivní plochou 0,8 m², nainstalovali na extrémně elektromagneticky klidném externím pracovišti laboratoře Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) na vrcholu La Grande Montagne a začali zaznamenávat rádiové signály od blesků. Tímto způsobem jsme nejen důkladně otestovali prototyp analyzátoru, ale také shromáždili zajímavá vědecká data, jejichž analýze jsme se dále věnovali. V roce 2013 jsme vyměnili obyčejnou smyčku za stíněnou smyčkovou anténu s integrovaným předzesilovačem SLAVIA (Shielded Loop Antenna with a Versatile Integrated Amplifier). Plocha antény SLAVIA je 0,23 m². Její citlivost je 6 nT/s/√Hz, což odpovídá 1 fT/√Hz na frekvenci 1 MHz. Anténa měří od několika kHz až do 90 MHz. Detailní popis konstrukce antény, příslušné kalibrační křivky a schéma integrovaného zesilovače lze nalézt v dizertační práci Kolmašové (2013), kapitola 5.7.1. Obrázek 1a zobrazuje měřicí anténu na vrcholu La Grande Montagne. Na obrázku 1b je akviziční a napájecí jednotka zabezpečená proti silným poryvům větrů přicházejících od moře. V roce 2014 jsme přidali další antény do celkového počtu čtyři. Tato konfigurace umožňuje interferometrická měření. Místo prototypu družicového přístroje jsme pro digitalizaci signálů z antén začali používat digitální osciloskopy. Prototyp družicového přístroje opatřený další anténou SLAVIA jsme přesunuli na severní cíp ostrovu Korsika, kde měří od roku 2015 (obr. 1d).

Družice TARANIS se bohužel nedostala na oběžnou dráhu okolo země kvůli chybě v montáži čtvrtého stupně rakety Vega VV17 a shořela v zemské atmosféře 17. listopadu 2020 několik minut po startu. Nicméně pozemní měření signálů od blesků ve Středomoří provozujeme i nadále a přidali jsme postupně ještě další měření: v Holandsku blízko obce Ter Wisch (obr. 1c), na Lomnickém štítu na Slovensku a čtyřech místech v Čechách: na observatořích ÚFA AVČR Milešovka, Dlouhá Louka, Kopisty a na Biskupském gymnáziu v Bohosudově.

2.2 Metodika měření

Magnetická smyčka měří časové změny vodorovné složky magnetického pole. Napětí indukované v anténní smyčce je úměrné součinu plochy smyčky a časové derivace magnetického pole dB/dt ve směru kolmém ke smyčce. Signál zesílený v předzesilovači je digitalizován s vzorkovací frekvencí 80 MHz (prototyp družicového přístroje) či 200 MHz (digi-

tální osciloskopy). Získaný signál je pak digitálně integrován. Měření neběží nepřetržitě, ale je spuštěno, pokud síla signálu na vstupu překročí předdefinovaný práh. Po spuštění je zaznamenána časová řada vzorků o nastavitelné délce. V současné době používáme úseky dlouhé 168 ms, které spolehlivě zachytí celý vývoj většiny typů bleskových výbojů. Měření je vždy opatřeno časovou značkou, kterou s přesností 1 μ s dodává přiřazený GPS přijímač. Data se přenáší do uložišť na ÚFA AV ČR a následně se analyzují. Základní metodou zpracování dat je analýza tvarů pulsů v časových řadách vzorků po pečlivém odstranění nepřírodních signálů z naměřených dat.

Na všech zahraničních měřicích stanovištích je měření pomocí anténních systémů SLAVIA provozováno ve spolupráci se zahraničními laboratoři. Na Korsice měříme ve spolupráci s francouzskou Laboratoire d'Aerologie z Toulouse, která provozuje úzkopásmové anténní pole SAETTA (Suivi de l'Activité Electrique Tridimensionnelle Totale de l'Atmosphère, viz kapitoly 3.2 a 3.3). V Holandsku měříme v součinnosti s Univerzitou v Groningen, která má na starosti analýzu dat z anténního pole LOFAR (viz kapitola 3.4). Při kombinování dat z antén SLAVIA s daty ze spolupracujících zahraničních laboratoří jsme věnovali maximální pozornost časové synchronizaci obou měření a to s přesností na 1 μ s. Chyby měření jsou uvedeny v jednotlivých případových studiích Kolmašové et al. (2016; 2018; 2020; 2022; 2023).

3. Analýza dat: případové studie

3.1 Šíření iniciačních pulsů na velké vzdálenosti

Ve studii Kolmašové et al. (2016) jsme analyzovali šíření iniciačních pulsů (Preliminary Breakdown Pulses – PBP) předcházejících záporný bleskový výboj do země. Schematické znázornění cest šíření signálu emitovaného vnitrooblačným procesem je ukázáno na obrázku 2a. Rádiový signál se šíří pomocí odrazů ve vlnovodu tvořeném povrchem Země a spodním okrajem ionosféry. Porovnávali jsme vlastnosti iniciačních pulsů zaznamenaných magnetickou smyčkou v LSBB se záznamy téhož jevu pořízenými pomocí dipólových elektrických antén v místech F1, F2, F3 vzdálených 321 km, 431 km, a 577 km od LSBB (obr. 2b). Příklad elektromagnetického záznamu jednoho blesku je znázorněn na obrázcích 2c–e. Blesk udeřil 27 km od LSBB a jeho špičkový proud dosáhl -97 kA. Z obrázku 2d je zřejmé, že se signály od iniciačních procesů mohou šířit ve vlnovodu tvořeném povrchem Země a spodním okrajem ionosféry na vzdálenosti přesahující 600 km.

Určili jsme empiricky celkový útlum signálu šířícího se vlnovodem. Zjistili jsme, že útlum (2dB/100km) je stejný pro zpětné výboje i pro iniciační pulsy. Odhadli jsme, že špičkové proudy tekoucí uvnitř bouřkového oblaku během vzniku bleskového výboje mohou dosahovat až 60 kA.

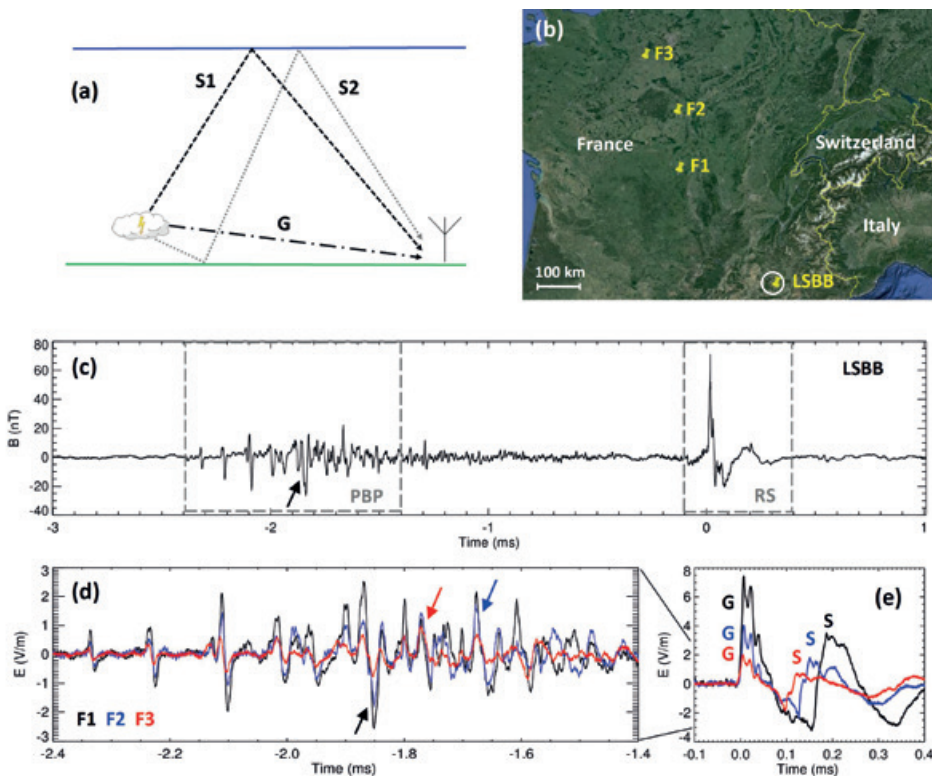
3.2 Intenzivní rádiové záření na velmi vysokých frekvencích provází iniciační fázi bleskového výboje

Ve studii Kolmašové et al. (2018) jsme analyzovali širokopásmové záznamy elektromagnetických pulsů vyzařovaných vnitrooblačnými proudy během iniciační fáze bleskových výbojů zaznamenaných ve Středozemí v letech 2012 a 2015. Tyto záznamy jsme porovnávali se záznamy stejných procesů detekovaných polem úzkopásmových přijímačů SAETTA v pásmu velmi vysokých frekvencí (VHF) 60–66 MHz. Pole SAETTA je díky současné detekci zdrojů vysokofrekvenčních signálů vyzařovaných vnitrooblačnými procesy na více stanicích schopné určit jejich polohu. Nenašli jsme téměř žádnou koincidenci mezi pulsy zaznamenanými širokopásmovým přijímačem a vysokofrekvenčními zdroji detekovanými polem SAETTA, což bylo v souladu s všeobecně přijímanou hypotézou, že procesy generující vnitrooblačné proudy a procesy vyzařující zdroje vysokofrekvenčního



Obr. 1. a) Jedna ze čtyř magnetických stíněných smyček SLAVIA umístěných na vrcholu La Grande Montage, Francie (1 028 m; 43,94° N; 5,48° E). b) Akviziční a napájecí jednotka tamtéž. c) Jedna ze dvou antén SLAVIA nainstalovaných v blízkosti holandské obce Ter Wisch (52,92° N, 7,09° E). d) Anténa SLAVIA měřící na Korsice v blízkosti obce Ersa (550 m; 42,97° N; 9,38° E).

Fig. 1. a) One of the shielded magnetic loops SLAVIA placed at the top of La Grande Montage, France (1 028 m; 43.94° N; 5.48° E). b) Acquisition and power units at the same place. c) One of the SLAVIA antennas installed close to Ter Wisch (52.92° N, 7.09° E), Netherlands. d) The SLAVIA antenna measuring at Cap Corse, France, close to Ersa (550 m; 42.97° N; 9.38° E).



Obr. 2 a) Schematické znázornění cest šíření signálů generovaných bleskovým výbojem v oblaku (nikoli v měřítku): země je zobrazena zeleně, ionosféra je zobrazena modře, dvě ionosférické vlny S1 a S2 a pozemní vlna G jsou zakresleny čárkovanou, tečkovanou a čerchovanou čarou. **b)** Umístění magnetické smyčky (LSBB) a elektrických antén (F1, F2 a F3) je označeno v mapě žlutými špendlíky; bílý kruh představuje oblast kolem LSBB, do které detekční síť umístila všechny analyzované blesky. **c)** Vlnová forma magnetického pole obsahující sekvenci iniciačních pulsů (PBP) a zpětný výboj (RS), zaznamenané přijímačem v LSBB. **d)** Detail iniciačních sekvencí ze stanice F1 (černá), stanice F2 (modrá) a F3 (červená), šípky označují dominantní pulsy z jednotlivých záznamů. **e)** Detail ukazující pozemní vlnu G a ionosférickou vlnu S, vzniklou sloučením vln S1 a S2. Datové záznamy všech čtyř stanic jsou časově posunuty o příslušné zpoždění šíření od zdroje blesku lokalizovaného bleskovou sítí MÉTÉORAGE ve 20:30:03,24582 UT. (převzato od Kolmašové et al. 2016).

Fig. 2. a) Visualization of signal propagation paths emitted by an in-cloud discharge (not to scale): depicting the ground in green, the ionosphere in blue, and denoting two sky waves, S1 and S2, and the ground wave G with dashed, dotted, and dash-dotted lines, respectively. b) Marking the locations of receivers utilized for magnetic-field measurements (LSBB) and electric field (F1, F2, and F3) using yellow pins. A white circle represents the geographical area encompassing all analysed lightning discharges, centred on LSBB. (c) Example of a magnetic field waveform showing a train of initiation pulses (PBP) followed by a return stroke, recorded by the receiver at LSBB; d) A closer view of the PBP sequences recorded at the F1 station (black), F2 station (blue), and F3 station (red). Arrows indicate the dominant PBP peaks in individual recordings. e) Details displaying the ground wave G and the sky wave S (S1 merged with S2). All data records from the four stations are synchronized by applying the respective propagation delays from the source lightning localized by MÉTÉORAGE at 20:30:03.24582 UT (from Kolmašová et al. 2016).

záření jsou pravděpodobně nezávislé (obr. 4a). Poté, co jsme detailně prozkoumali záznamy z jednotlivých stanic SAETTA, jsme došli k překvapivému zjištění, že VHF záření zaznamenané jednotlivými stanicemi je velmi intenzivní a vyskytuje se současně s iniciačními pulsy naměřenými širokopásmovým analyzátozem. Našli jsme, že nedostatek lokalizovaných VHF zdrojů časově souvisejících s iniciačními pulsy způsobuje příliš velké množství VHF zdrojů zaznamenaných na různých stanicích. Automatizovaná lokalizační procedura pak není schopna polohu VHF zdrojů určit (obr. 4b, c). Časovou shodu signálů naměřených v různých frekvenčních pásmech jsme vysvětlili extrémně rychlým skokovým prodlužováním vnitrooblačných proudových kanálů, ke kterému dochází na úplném začátku vývoje bleskového výboje.

3.3 Dva scénáře vývoje izolovaných iniciačních procesů

Běžnému zápornému bleskovému výboji do země předchází iniciační procesy a vůdčí výboj. V některých případech však iniciační procesy zůstanou izolované a k vůdčímu a zpětnému výboji nedojde. Zkoumali jsme 128 takových izolovaných sekvencí iniciačních pulsů zaznamenaných v letech 2015 a 2018 širokopásmovým analyzátozem připojeným k magnetické smyčkové anténě umístěné na severním cípu ostrova Korsika (Kolmašová et al. 2020). Širokopásmová data (5 kHz – 37 MHz) jsme zkombinovali s měřením pole úzkopásmových přijímačů SAETTA (60–66 MHz), které zaznamenává a lokalizuje emise provázející šíření výboje uvnitř bouřkového oblaku (obr. 5a, b). Zjistili jsme, že se nedokončený výboj může v bouřkovém oblaku vyvíjet dvěma různými způsoby: buď se šíří dále horizontálně po dobu nejméně 150 ms (typ A, 73 % případů, příklad obr. 5b, c) nebo rychle vymizí (typ B, 27 % případů). Dále jsme zjistili, že vlastnosti sekvencí iniciačních pulsů v obou scénářích vývoje nedokončeného výboje se nikterak neliší od pulsů předcházejících běžnému zápornému bleskovému výboji do země.

3.4 Silné elektromagnetické iniciační pulsy emitované bleskovými výboji vznikajícími ve frontálním

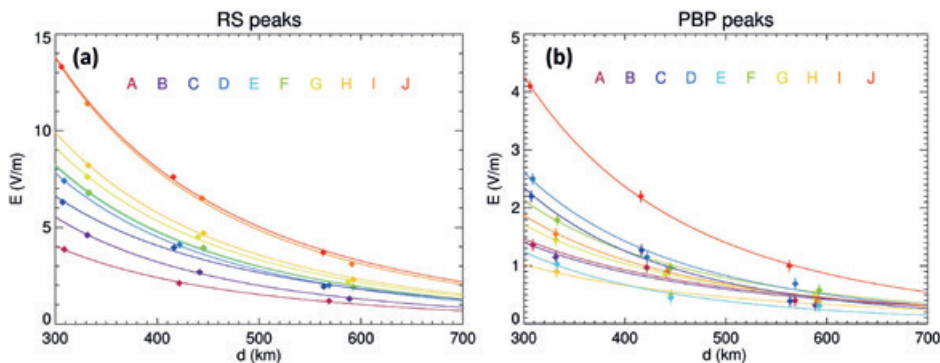
systemu s několika řadami lineárně organizovaných bouřkových buněk

Ve studii Kolmašové et al. (2022) jsme zkombinovali elektromagnetická měření s meteorologickými daty a s údaji z bleskové detekční sítě, abychom vysvětlili pozorování neobvykle silných elektromagnetických iniciačních pulsů emitovaných blesky vzniknuvšími 19. června 2013 v bouřkovém systému nad pobřežím Středozemního moře. Bouřkový systém byl složen z několika paralelních skupin buněk lineárně organizovaných ve směru JZ–SV. Zaměřili jsme se na analýzu deseti sekvencí silných elektromagnetických iniciačních pulsů zaznamenaných dvěma přijímači umístěnými v různých

vzdálenostech od zkoumané bouřky. Tyto silné pulsy byly generovány vnitrooblačnými proudy o velikosti až 36 kA, což odpovídá velikosti proudu v průměrně silném bleskovém výboji do země. Polarita všech pozorovaných iniciačních

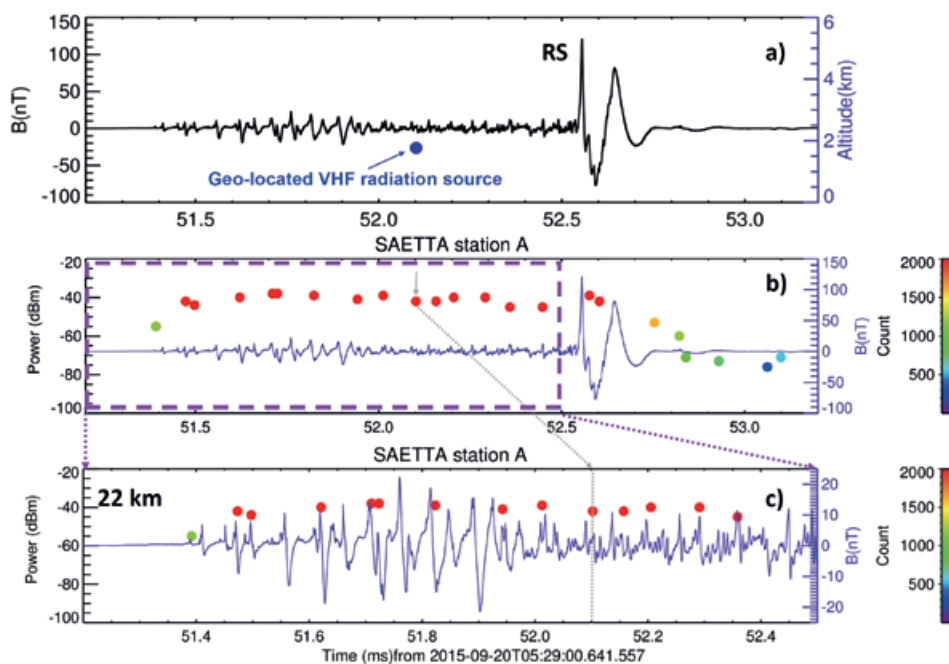
ních pulsů byla konzistentní s pohybem záporného náboje směrem dolů, stejně jako v případě iniciačních pulsů předcházejících záporným výbojům do země. Silné vnitrooblačné výboje se objevily v oblastech s nulovou nebo velmi slabou aktivitou blesků do země.

Většina těchto vnitrooblačných výbojů vznikala v malých, rychle se pohybujících konvektivních bouřkových buňkách s nepříliš dlouhou životností, které se navíc vyznačovaly nízkými hodnotami odrazivosti (zpravidla < 40 dBZ) a slabým vertikálním dosahem. Domníváme se, že by pozorovaná bouřka mohla mít netypickou nábojovou strukturu, obsahující kapsy s poměrně velkým záporným nábojem umístěné nad oblastí mohutného kladného náboje na dně bouřkového oblaku. Takové uspořádání náboje by vysvětlilo pozorování neobvykle silných iniciačních pulsů a chybějících pulsů zpětných výbojů v našich elektromagnetických záznamech.



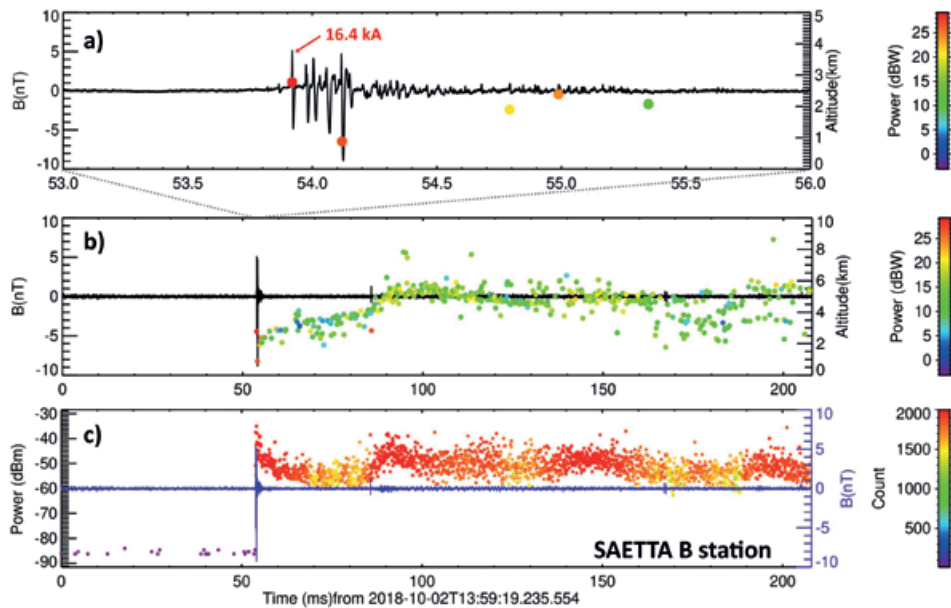
Obr. 3 a) Amplitudy zpětných výbojů a **b)** amplitudy příslušných předcházejících dominantních iniciačních pulsů jako funkce vzdálenosti od zdrojového zpětného výboje. Měřené hodnoty jsou znázorněny kosočtverci, nelineární fit je znázorněn plnou čarou. Jednotlivé případy jsou odlišeny barevně a písmeny A–J vzestupně podle špičkového proudu zpětného výboje odhadnutého bleskovou detekční službou MÉTÉORAGE (převzato od Kolmašové et al. 2016).

Fig. 3. a) Amplitudes of the return stroke pulses and b) the corresponding dominant initiation pulses as a function of the distance from the source lightning stroke. Measured values (dots) and nonlinear least squares fits (lines) of the model are denoted by letters A–J and colour coded from magenta to red according to the increasing return stroke peak current reported by MÉTÉORAGE for ten cases (from Kolmašová et al. 2016).

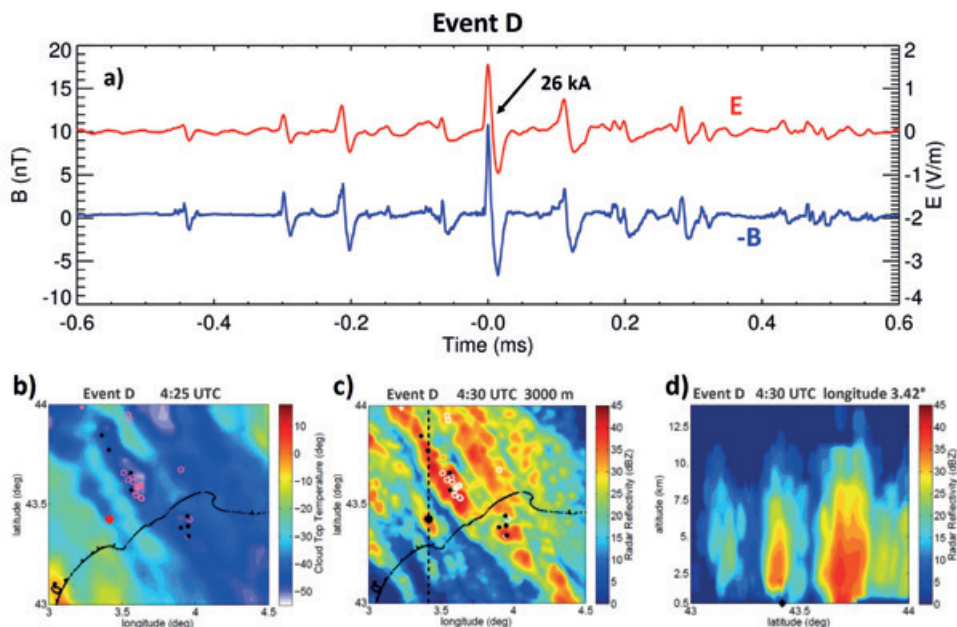


Obr. 4 a) Sekvence iniciačních impulsů a následný impuls zpětného výboje (20. září 2015, 05:29:00,7 UTC, 9,45° E, 42,80° N) s lokalizovanými zdroji VHF záření. **b)** Tentýž širokospektrální elektromagnetický záznam společně se zdroji emise zaznamenané na stanici A. Barevné body zobrazují výkon nejsilnějšího VHF zdroje v jednotlivých měřících oknech dlouhých 80 μ s, barva je dána počtem vzorků překračujících práh v daném okně. **c)** 1,3 ms dlouhý detail znázorňující sekvenci iniciačních pulsů a výkon VHF zdrojů detekovaný na stanici A. Šedá šipka a čára znázorňují jediný lokalizovaný zdroj VHF radiace vyskytující se v období před zpětným výbojem pozorovaného blesku (převzato od Kolmašové et al. 2018).

Fig. 4. Example of a negative cloud-to-ground discharge showing a sequence of initiation pulses and the corresponding return stroke pulse (20 September 2015, 05:29:00.7 UTC, 9.45° E, 42.80° N) with a geolocated VHF radiation sources and b) peaks of radiated VHF power recorded at the station A. The dots representing the strongest VHF peaks are colour-coded by the number of intense VHF samples recorded in the 80 μ s LMA windows. c) 1.3 ms-long detailed plot showing the initiation pulse sequence with the peaks of radiated VHF power detected at station A. Gray arrow and line show the only one geolocated VHF radiation source occurring within the pre-stroke period of the observed lightning (adopted from Kolmašová et al. 2018).



Obr. 5 Příklad izolované sekvence iniciačních pulsů typu A zaznamenané a) širokopásmovou magnetickou smyčkou, b) polem úzkopásmových antén, c) jednotlivou úzkopásmovou anténou. Šipka v panelu a) ukazuje na puls detekovaný evropskou bleskovou sítí EUCLID, barevné body v panelech a) a b) znázorňují výkon emisí detekovaných a lokalizovaných polem úzkopásmových antén SAETTA. Barevné body v panelu c) představují počet emisí zaznamenaných v jednom měřícím okně (80 μ s) přijímače na stanici SAETTA B a výkon nejsilnější emise detekované v daném měřícím okně (převzato od Kolmašové et al. 2020).
 Fig. 5. Example of an isolated breakdown event (Type A) occurring on 2 October 2018 at 13:55:19.236 UT: (a) A 3 ms long detail of the broadband waveform showing a sequence of isolated breakdown pulses overlaid on altitude of geo-located SAETTA VHF radiation sources color coded by their power; (b) the whole 208 ms long broadband record with geo-located VHF radiation sources; (c) the broadband record with peaks of radiated VHF power recorded at the SAETTA Station B, color coded by their counts within individual 80 μ s LMA windows (adopted from Kolmašová et al. 2020).



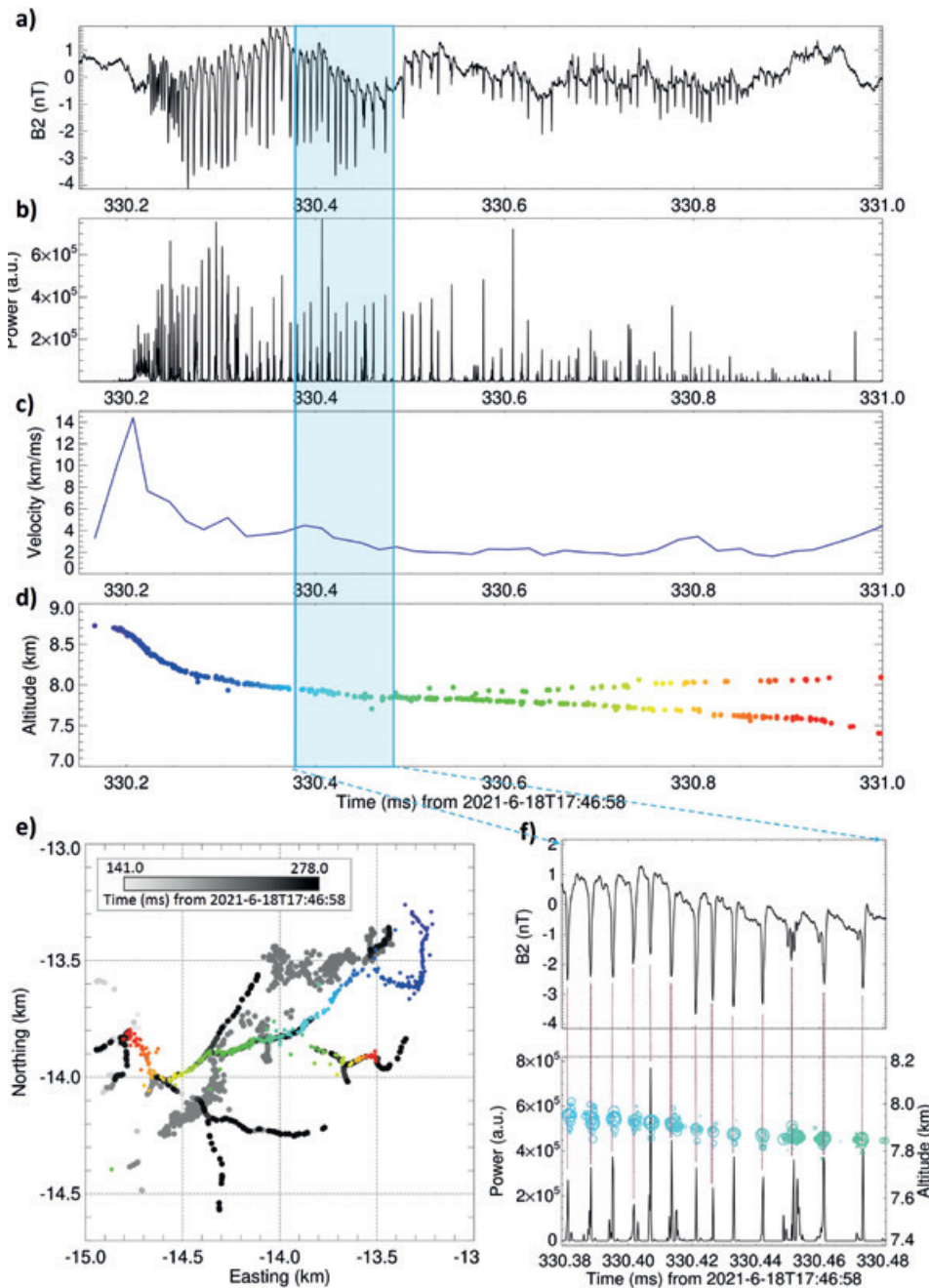
Obr. 6 a) Příklad fluktuací magnetického (modře) a elektrického pole (červeně) naměřeného během výskytu silných iniciačních pulsů. Puls detekovaný bleskovou sítí EUCLID je označen černou šipkou spolu s odhadem jeho špičkového proudu; b) teplota vršku oblaků ve stupních Celsia v uvedeném čase; c) horizontální průřez radarové odrazivosti v dBZ ve výšce 3 000 m; d) vertikální průřez radarové odrazivosti podél černé přerušované čáry v panelu c). Převzato od Kolmašové et al. (2022).
 Fig. 6. a) An example of magnetic-field (blue line) and electric-field waveforms (red line) of a train of PB pulses shifted in time to have the strongest PB pulse at $t = 0$. The PB pulse reported by EUCLID is indicated by black arrows together with its peak current estimate; b) CTT in Celsius at the time indicated; c) horizontal cross-section of radar reflectivity in dBZ at 3 000 m of altitude; d) vertical cross-section of radar reflectivity along the black dashed line in c). Adopted from Kolmašová et al. (2022).

3.5 Sekvence pravidelných mikrosekundových pulsů emitované vůdčím výbojem

V práci Kolmašové et al. (2023) jsme pátrali po původu sekvencí unipolárních mikrosekundových pulsů s překvapivě pravidelně rozloženými intervaly mezi pulsy. Sekvence byly pozorované během extenzivního vnitrooblačného výboje rozkládajícího se nad rovinatým terénem v Holandsku. Takové pravidelné pulsy byly z předchozích pozorování hlášeny jen velmi zřídka. V předchozí studii (Kolmašová, Santolík 2013) jsme představili hypotézu, že se tyto sekvence emitují během prodlužování vůdčího výboje, který se šíří bouřkovým oblakem po cestě ionizované předchozím vůdčím výbojem. Tentokrát jsme ke studiu těchto neobvyklých procesů měli k dispozici nejen data z magnetických smyčkových antén SLAVIA, ale i záznamy radioteleskopu LOFAR. Když jsme důkladně synchronizovali oba měřicí systémy, zjistili jsme, že se pravidelné širokopásmové pulsy dokonale shodují s lokalizovanými izolovanými zdroji energetického záření o velmi vysoké frekvenci detekované sítí antén LOFAR. Díky lokalizaci detekovaných rádiových zdrojů jsme zjistili, že dané sekvence byly vyzařovány zápornými vnitrooblačnými vůdčími výboji, které se šířily po pravidelných krocích existujícími bleskovými kanály původně vytvořenými předchozími kladnými vůdčími výboji. Potvrdili jsme tak hypotézu z předchozí studie (Kolmašová, Santolík 2013) a doplnili jsme ji zjištěním, že neobvykle pravidelné krokování vůdčího výboje je možné jen za příznivé kombinace vodivosti již existujících bleskových kanálů a okolního elektrického pole uvnitř bouřkových mraků.

4. Shrnutí a závěr

Výsledky případových studií vnitrooblačných procesů za použití širokopásmového měření magnetickými smyčkami uka-



Obr. 7 a) Sled pulsů naměřený anténou SLAVIA 2 dne 18. června 2021. b) VHF výkon detekovaný anténou LOFAR CS002. c) Průměrná rychlost šíření vůdčího výboje. d) Zdroje VHF radiace zobrazené metodou „impulse imager“. e) Mapa zobrazující vývoj vnitro oblačného blesku před pozorovanou sekvencí pulsů (ve stupnici šedi) a šíření vůdčího výboje v době pozorování pravidelných pulsů (barevná stupnice). f) Detail širokopásmového měření (horní panel) a VHF radiace včetně polohy zdrojů zobrazených metodou „TRI-D“. Detail z panelu f je označen v panelu a) modrým obdélníkem (převzato od Kolmašové et al. 2023).
 Fig. 7. a) Magnetic field pulse train measured by the SLAVIA 2 antenna on 18 June 2021. b) VHF power detected by the LOFAR antenna CS002. c) Average velocity of the leader movement. d) Sources of VHF radiation located by the LOFAR impulsive imager. e) A map showing a development of the flash before the pulse train was observed (in grey scale) and the leader propagation during the pulse train (color scale). f) Detail of the magnetic field waveform together with VHF power peaks and VHF sources imaged by the LOFAR TRI-D imager. The detail is marked in panel a) by a blue rectangle (from Kolmašová et al. 2023).

zují, že je možné efektivně nahlédnout dovnitř bouřkového oblaku a zkoumat proces vzniku bleskového výboje a jeho šíření oblakem. Podstatné informace o začátku bleskového výboje lze získat analýzou charakteristických vlastností tzv. iniciačních pulsů, které jsou v elektromagnetických záznamech snadno rozpoznatelné jako skupiny bipolárních pulsů a kterými pravděpodobně začíná vývoj všech blesků (Marshall et al. 2014). Zjistili jsme, že iniciační pulsy mohou být detekovány rádiovými přijímači vzdálenými až 600 km od zdrojového blesku (Kolmašová et al. 2016). Z poměru špičkové amplitudy iniciačních pulsů a amplitudy pulsu zpětného výboje lze usuzovat na mohutnost nábojových center uvnitř bouřkového oblaku. Pokud jsou iniciační pulsy neobvykle silné, je hlavní záporné nábojové centrum pravděpodobně velmi vyvinuté (Kolmašová et al. 2014). Pokud za iniciačními pulsy chybí puls zpětného výboje do země, je možné předpokládat a ověřit modelováním, že se v bouřkovém oblaku nachází neobvykle silné spodní kladné nábojové centrum, které nedovolí zpětnému výboji dorazit až na zem (Kolmašová et al. 2020).

Širokopásmová měření jsme kombinovali s úzkopásmovými měřeními výkonu zdrojů elektromagnetických emisí v pásmu velmi vysokých frekvencí, což nám umožnilo mapovat postup výboje oblakem (Scholten et al. 2021; 2022; Kolmašová et al. 2018; 2020; 2023). Zjistili jsme například, že neplatí původně všeobecně přijímaná hypotéza, že během vzniku bleskového výboje nedochází k vyzářování vysokofrekvenčních rádiových emisí. Pomocí analýzy širokopásmových dat a záznamů z jednotlivých stanic anténního pole LMA jsme dospěli k názoru, že rádiové emise jsou naopak tak intenzivní, že síť je přehlcena a nedokáže efektivně lokalizovat jejich jednotlivé zdroje (Kolmašová et al. 2018). Objevili jsme záporné vnitrooblačné vůdčí výboje, které se šíří rychlostí 10^6 m/s (Scholten et al. 2021), o řád rychleji, než naznačovala předchozí měření. Toto zjištění jsme vysvětlili přítomností nábojových „kapes“ v blízkosti předělu mezi hlavními nábojovými centry bouřkového oblaku. Pomocí důkladné meteorologické analýzy vlastností konvekčních buněk (Kolmašová et al. 2022) jsme našli adepty na takové „kapsy“ – oblasti s nepříliš dlouhou životností, nízkou odrazivostí, slabým vertikálním dosahem a nízkou hustotou blesků.

V budoucím zkoumání vnitrooblačných procesů se zaměříme na oblast Střední Evropy, neboť na observatořích ÚFA na Milešově, Dlouhé Louce a v Kopistech jsou nyní nainstalovány měřicí širokopásmové antény SLAVIA v konfiguracích umožňujících interferometrické měření. Další pár antén měří v Krupce ve spolupráci s Biskupským gymnáziem Bohosudov. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici řadu dalších přidavných měření: meteorologická měření, měření gama záření (ve spolupráci s Ústavem jaderné fyziky AV ČR) a optická měření (ve spolupráci s Astronomickým ústavem AV ČR), očekáváme nová zjištění v oblasti Střední Evropy, v níž není mikrofyzika vývoje přírodních bleskových výbojů zatím dostatečně prozkoumána.

Poděkování:

Tato publikace vznikla díky podpoře Grantové agentury České republiky grant č. 23-06430S.

Literatura:

- BAHARUDIN, Z. A., NOOR, A. A., FERNANDO, M., COORAY, V., MAKELA, J. S., 2012a. Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in Johor, Malaysia and Florida, USA. *Atmospheric Research*, Vol. **117**, s. 111–121. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.01.012>.
- BAHARUDIN, Z. A., FERNANDO, M., NOOR, A. A., MAKELA, J. S., RAHMAN, M. et al., 2012b. Electric field changes generated by the preliminary breakdown for the negative cloud-to-ground lightning flashes in Malaysia and Sweden. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **84–85**, s. 15–24. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.04.009>.
- BLANC, E., LEFEUVRE, F., ROUSSEL-DUPRÉ, R., SAUVAUD, J., 2007. TARANIS: A microsatellite project dedicated to the study of impulsive transfers of energy between the Earth atmosphere, the ionosphere, and the magnetosphere. *Advances in Space Research*, Vol. **40**, Issue 8, s. 1268–1275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.037>.
- BOUSQUET, O., BERNE, A., DELANOE, J., DUFOURNET, Y., GOURLEY, J. J. et al., 2015. Multifrequency Radar Observations Collected in Southern France during HyMeX-SOP1. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. **96**, Issue 2, s. 267–282. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00076.1>
- BROOK, M., 1992. Breakdown electric fields in winter storms. *Journal of Atmospheric Electricity*, Vol. **12**, s. 47–52. Dostupné z: <https://doi.org/10.1541/jae.12.47>.
- CHILINGARIAN, A., KHANIKYANTS, Y., RAKOV, V. A., SOGHOMONYAN, S., 2020. Termination of thunderstorm-related bursts of energetic radiation and particles by inverted intracloud and hybrid lightning discharges. *Atmospheric Research*, Vol. **233**, 104713. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104713>.
- CLARENCE, N. D., MALAN, D. J., 1957. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **83**, s. 161–172.
- COQUILLAT, S., DEFER, E., DE GUIBERT, P., LAMBERT, D., PINTY, J. P. et al., 2019. SAETTA: high-resolution 3-D mapping of the total lightning activity in the Mediterranean Basin over Corsica, with a focus on a mesoscale convective system event. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. **12**, s. 5765–5790. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-12-5765-2019>.
- FUCHS, B. R., RUTLEDGE, S. A., BRUNING, E. C., PIERCE, J. R., KODROS, J. K. et al., 2015. Environmental controls on storm intensity and charge structure in multiple regions of the continental United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **120**, s. 6575–6596. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2015JD023271>.
- GOMES, CH., COORAY, V., JAYRATHNE, CH., 1998. Comparison of preliminary breakdown pulses observed in Sweden and Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **60**, s. 975–979. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00007-8).
- GUREVICH, A. V., KARASHTIN, A. N., 2013. Runaway Breakdown and Hydrometeors in Lightning Initiation. *Physical Review Letters*, Vol. **110**, 185005. Dostupné z: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.185005>.
- IUDIN, D. I., RAKOV, V. A., MAREEV, E. A., IUDIN, F. D., SYSSOEVA, A. A. et al., 2017. Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **122**, s. 6416–6430. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2016JD026261>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., 2013. Properties of unipolar magnetic field pulse trains generated by lightning discharges. *Geophysical Research Letters*, Vol. **40**, s. 1637–1641. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/grl.50366>.
- KOLMAŠOVÁ, I., 2013. Analysis of broadband electric and magnetic signals radiated from lightning discharges, Thesis, Czech Tech-

- nical University, Faculty of Electrical Engineering. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/20086>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., FARGES, T., RISON, W., LÁN, R. et al., 2014. Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes. *Geophysical Research Letters*, Vol. **41**, s. 5316–5324. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2014GL060913>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., FARGES, T., CUMMER, S. A., LÁN, R. et al., 2016. Subionospheric propagation and peak currents of preliminary breakdown pulses before negative cloud-to-ground lightning discharges. *Geophysical Research Letters*, Vol. **43**, s. 1382–1391. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2015GL067364>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., DEFER, E., RISON, W., COQUILLAT et al., 2018. Lightning initiation: Strong VHF radiation sources accompanying preliminary breakdown pulses during lightning initiation. *Scientific Reports*, Vol. **8**, 3650. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21972-z>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., DEFER, E., KAŠPAR, P., KOLINSKA, A. et al., 2020. Two propagation scenarios of isolated breakdown lightning processes in failed negative cloud-to-ground flashes. *Geophysical Research Letters*, Vol. **47**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020GL090593>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SOULA, S., SANTOLÍK, O., FARGES, T., BOUSQUET, O. et al., 2022. A frontal thunderstorm with several multi-cell lines found to produce energetic preliminary breakdown. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **127**, e2021JD035780. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2021JD035780>.
- KOLMAŠOVÁ, I., SCHOLTEN, O., SANTOLIK, O., HARE, B. M., ZACHAROV, P. et al., 2023. A strong pulsing nature of negative intracloud dart leaders accompanied by regular trains of microsecond-scale pulses. *Geophysical Research Letters*, Vol. **50**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2023GL103864>.
- KOTOVSKY, D. A., MOORE, R. C., ZHU, Y., TRAN, M. D., RAKOV, V. A. et al., 2016. Initial breakdown and fast leaders in lightning discharges producing long-lasting disturbances of the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. **121**, s. 5794–5804. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2015JA022266>.
- LANG, T. J., RUTLEDGE, S. A., 2011. A Framework for the Statistical Analysis of Large Radar and Lightning Datasets: Results from STEPS 2000. *Monthly Weather Review*, Vol. **139**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05000.1>
- MACGORMAN, D. R., APOSTOLAKOPOULOS, I. R., LUND, N. R., DEMETRIADES, N. W. S., MURPHY, M. J. et al., 2011. The timing of cloud-to-ground lightning relative to total lightning activity. *Monthly Weather Review*, Vol. **139**, s. 3871–3886. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00047.1>.
- MARSHALL, T., SCHULTZ, W., KARUNARATHNA, N., KARUNARATHNE, S., STOLZENBURG, M. et al., 2014a. On the percentage of lightning flashes that begin with initial breakdown pulses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **119**, s. 445–460. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2013JD020854>.
- MARSHALL, T., STOLZENBURG, M., KARUNARATHNA, N., KARUNARATHNA, S., 2014b. Electromagnetic activity before initial breakdown pulses of lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **119**, s. 12,558–12,574. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2014JD022155>.
- MARSHALL, T., BANDARA, S., KARUNARATHNE, N., KARUNARATHNE, S., KOLMASOVA, I. et al., 2019. A study of lightning flash initiation prior to the first initial breakdown pulse. *Atmospheric Research*, Vol. **217**, s. 10–23. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.10.013>.
- NAG, A., RAKOV, V. A., 2008. Pulse trains that are characteristic of preliminary breakdown in cloud-to-ground lightning but are not followed by return stroke pulses. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **113**, D01102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2007JD008489>.
- NAG, A., RAKOV, V. A., 2009. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning. *Geophysical Research Letters*, Vol. **36**, L05815. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2008GL036783>.
- NORINDER, H., KNUDSEN, E., 1956. Pre discharges in relation to subsequent lightning strokes. *Arkiv foer Geofysik*, Vol. **2**, Issue 27, s. 551–571.
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A., 2003. *Lightning – Physics and effects*, Cambridge University Press, ISBN 9780521583275.
- RIBAUD, J.-F., BOUSQUET, O., COQUILLAT, S., 2016. Relationships between total lightning activity, microphysics and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bow-echo system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **142**, s. 298–309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.2756>.
- RISON, W., THOMAS, R. J., KREHBIEL, P. R., HAMLIN, T., HARLIN, J., 1999. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophysical Research Letters*, Vol. **26**, s. 3573–3576. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/1999GL010856>.
- SCHOLTEN, O., HARE, B. M., DWYER, J., LIU, N., STERPKA, C. et al., 2021. A distinct negative leader propagation mode. *Scientific Reports*, Vol. **11**, 16256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95433-5>.
- SCHOLTEN, O., HARE, B. M., DWYER, J., LIU, N., STERPKA, C. et al., 2022. Interferometric imaging of intensely radiating negative leaders. *Physical Review D*, Vol. **105**, 062007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.062007>.
- SCHULTZ, CH. J., PETERSEN, W. A., CAREY, L. D., 2011. Lightning and Severe Weather: A Comparison between Total and Cloud-to-Ground Lightning Trends. *Weather and Forecasting*, Vol. **26**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05026.1>.
- SHARMA, S. R., COORAY, V., FERNANDO, M., 2008. Isolated breakdown activity in Swedish lightning. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **70**, s. 1213–1221. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.03.003>.
- TAN, Y., TAO, S., LIANG, Y., ZHU, B., 2014. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **109**, s. 1003–1014. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2013JD019983>.
- VAN HAARLEM, M. P. et al., 2013. LOFAR: The LOw-Frequency Array. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. **556**, A2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873>.
- WU, T., TAKAYANAGI, Y., FUNAKI, T., YOSHIDA, S., USHIO, T. et al., 2013. Preliminary breakdown pulses of cloud-to-ground lightning in winter thunderstorms in Japan. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **102**, s. 91–98. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.014>.
- ZHANG, Y., KREHBIEL, P. R., LIU, X., 2002. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. *Chinese Science Bulletin*, Vol. **47**, s. 1725–1729.
- ZHANG, Y., ZHANG, Y., ZHENG, D., LU, W., 2015. Preliminary breakdown, following lightning discharge processes and lower positive charge region. *Atmospheric Research*, Vol. **161**, s. 52–56. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.017>.
- ZHU, Y., RAKOV, V. A., TRAN, M. D., 2016. A Study of Preliminary Breakdown and Return Stroke Processes in High-Intensity Negative Lightning Discharges. *Atmosphere*, Vol. **7**, 130. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos7100130>.

Lektoři (Reviewers):

doc. Dr. Ing. Pavel Kovář, prof. RNDr. František Němec, Ph.D., RNDr. Tomáš Gráf, Ph.D.

Dopad růstu koncentrace skleníkových plynů na horní atmosféru a ionosféru

Impact of increasing concentration of greenhouse gases on the upper atmosphere and ionosphere

Jan Laštovička

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

The increasing concentration of greenhouse gases, which heats the troposphere, cools the upper atmosphere (mesosphere, thermosphere, and ionosphere) via the infrared radiation. This has consequences for various upper atmosphere parameters, which are briefly described in this paper. We describe also the important role of the Institute of Atmospheric Physics both in investigations as well as coordination of the international collaboration.

KLÍČOVÁ SLOVA: plyny skleníkové – atmosféra horní – ionosféra

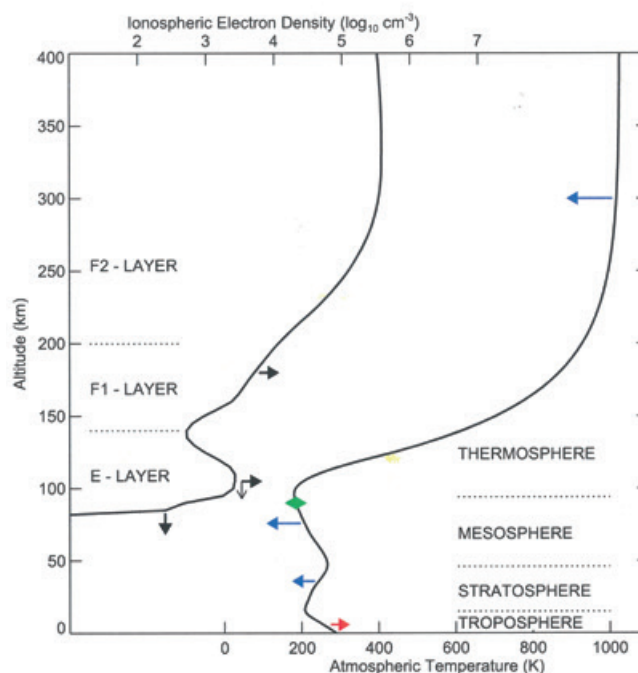
KEYWORDS: greenhouse gases – upper atmosphere – ionosphere

1. Úvod

Antropogenní růst koncentrace skleníkových plynů, zvláště CO₂, vyvolává ohřev troposféry. Ale s rostoucí výškou klesá hustota atmosféry, a v horní atmosféře (mezosféra, termosféra a ionosféra, výšky 50–500 km) je proto koncentrace CO₂ tak nízká, že nestačí zachycovat odchozí dlouhovlnnou radiaci a zahřívát atmosféru. Naopak dominuje jiná vlastnost CO₂, radiační ochlazování intenzivním vyzařováním v infračervené oblasti. Družicová pozorování ukazují, že přinejmenším až do výšky 110 km roste koncentrace CO₂ v atmosféře tak jako u povrchu, ~5 % za desetiletí (Rezac et al. 2018). To vede k ochlazení horní atmosféry s jejím následným smršťováním a ke změně rychlostí chemických reakcí s dopadem na malé složky atmosféry a na ionosféru.

Studium dlouhodobých trendů antropogenního původu v horní atmosféře zahájila modelová studie Robleho a Dickinsona (1989), prvou experimentální studií byla práce Aikina et al. (1991). V r. 1999 byla založena pracovní skupina IAGA/IAMAS „Dlouhodobé trendy v mezosféře, termosféře a ionosféře“. V r. 2006 vznikl první scénář dlouhodobých trendů v horní atmosféře (Laštovička et al. 2006), ukázaný na obr.

1. V teplotě neindikoval změnu v oblasti mezopauzy, ale ukázal ochlazování různé velikosti v mezosféře a termosféře. V ionosféře pak mírný vzrůst elektronové koncentrace pod ~200 km a mírný pokles výšky. Jeho součástí bylo i chování některých dalších parametrů. Měl ale celou řadu bílých míst a některé vnitřní rozpory. Celkový popis problematiky dlouhodobých trendů v horní atmosféře lze nalézt v práci Laštovičky et al. (2012), přehled pokroku za posledních šest let pak v práci Laštovičky (2023).



Obr. 1 Trendy v atmosféře Země. Atmosférické vrstvy jsou definovány profilem teploty, ionosférické vrstvy profilem elektronové koncentrace (půlnoc u rovníku). Šipky indikují směr změn. Červená – ohřev; modrá – ochlazování; zelená – teplota beze změny; černá – změny elektronové hustoty (horizontálně) a výšky ionosférických vrstev (vertikálně).

Fig. 1. Trends in Earth's atmosphere. The atmospheric layers are defined by the temperature profile, the ionospheric layers by the electron density profile (midnight at equator). Arrows indicate the direction of change. Red – warming; blue – cooling; green – no change of temperature; black – changes in electron density (horizontal) and heights of ionospheric layers (vertical).

2. Současný stav poznání

Začneme mezoférou a oblastí mezopauzy (výšky ~50–90 km), kde je dlouhodobý trend ovlivňován též antropogenními změnami koncentrace ozonu ve stratosféře. Mezoféra se ochlazuje tempem okolo 1–2 K/desetiletí, trochu více v období poklesu koncentrace ozonu, po zastavení poklesu ozonu v letech 1995–1997 trochu méně. Naopak teplota oblastí mezopauzy (nejstudenější část atmosféry Země) se v období poklesu koncentrace stratosférického ozonu neměnila, kdežto poté se začala mírně ochlazovat okolo 0,75 K/desetiletí. Ochlazování vede k mírnému smršťování mezoféry. Efekt změn koncentrace ozonu na hustotu neutrální atmosféry je dle modelových výpočtů největší až v dolní termosféře u 110 km; okolo 200 km už ale není detekovatelný. Koncentrace vodní páry v různých výškách se chová poněkud odlišně a nevykazuje stabilní trend, ale celkově poněkud roste. Ochlazování a růst koncentrace vodní páry vede k tomu, že v posledních letech i v Česku občas vidíme v létě polární mezoférická oblaka (tzv. stříbřitá oblaka). Oblast mezoféry a mezopauzy je výrazně ovlivňována atmosférickými vlnami a změnami v systému proudění. O jejich trendech víme jen málo, jisté je jen to, že v různých geografických oblastech jsou odlišné až i opačné.

Nad mezoférou se nachází termosféra (výšky okolo 90–500 km). Modelové výpočty ukazují očekávané ochlazování termosféry, dostatečně dlouhá měření neutrální teploty chybí. Měření iontové teploty, která by měla být pod 300 km zhruba stejná jako neutrální teplota, vykazují 2,5–3krát větší trend než neutrální teplota. Naopak ze změn hustot termosféry odvozený trend teploty termosféry obstojně souhlasí s modelovým trendem. Následkem ochlazování dochází k poklesu hustoty termosféry v pevných výškách tempem okolo –2 % za desetiletí, o něco méně níže, o něco více výše. To vede k prodloužení orbitální doby života nebezpečného kosmického „smetí“; srážky s ním již významně poškodily i vyřadily z provozu několik družic, zvláště telekomunikačních.

Ve výškách mezoféry a termosféry je atmosféra částečně ionizována. Tato oblast se nazývá ionosféra a je definována pomocí výškového profilu elektronové hustoty a skládá se z vrstev D (50–90 km), E (90–140 km), F1 (140–210 km) a F2 (210–500 km). V D-vrstvě je dlouhodobý trend elektronové koncentrace v pevných výškách převážně kladný díky vlivu termálního smršťování mezoféry. V E-vrstvě je slabý kladný trend elektronové hustoty v jejím maximu a záporný trend výšky tohoto maxima, podobná situace je i v F1 vrstvě. V elektronové koncentraci je to způsobeno vlivem teploty na chemické reakce, ve výšce tepelným smršťováním horní atmosféry. V F2 vrstvě celkově pozorujeme mírný pokles maximální elektronové koncentrace a pokles výšky maxima F2 vrstvy. Trend v elektronové koncentraci je silnější ve dne a v zimě, v létě v noci může být až lehce opačný. V některých oblastech hraje důležitou roli sekulární změna magnetického pole Země (výrazný posun polohy severního pólu a magnetického rovníku). Ale tento efekt je lokálně kladný i záporný, takže v průměru je zanedbatelný. Trend v celkovém elektronovém obsahu v jednotkovém sloupci má dopad na šíření GNSS/GPS signálů; dle předběžných výsledků je slabě záporný. Iontová teplota, která se měří jen na několika málo observatořích, vykazuje záporný trend, jehož velikost je stále tématem diskuze.

Veškeré dostatečně spolehlivé dlouhodobé trendy souhlasí s nejmenším kvalitativně s očekávaným efektem růstu koncentrace skleníkových plynů, zvláště CO₂. Pod ~150 km je trend

do jisté míry modifikován antropogenními změnami koncentrace stratosférického ozonu, nad ~150 km, zvláště v ionosféře a lokálně, pak sekulárními změnami magnetického pole Země. Dlouhodobě variuje i sluneční aktivita, tu ale při počítání trendů (zvláště v ionosféře) vylučujeme předem z dat.

3. Role ÚFA AVČR

Role Ústavu fyziky atmosféry (ÚFA) AVČR ve výzkumu dlouhodobých trendů v horní atmosféře je významná. Od založení pracovní skupiny IAGA/IAMAS „Dlouhodobé trendy v mezoféře, termosféře a ionosféře“ v r. 1999 byl J. Laštovička jejím předsedou a do r. 2023 místopředsedou. Tato pracovní skupina uspořádala 12 seminářů; J. Laštovička byl vždy předseda nebo místopředseda programového výboru. V r. 2006 mezinárodní tým (Laštovička et al. 2006) vytvořil první scénář dlouhodobých trendů v horní atmosféře. J. Laštovička byl rovněž autorem většiny přehledových článků z této problematiky. Tým ÚFA se podílel na studiu dlouhodobých změn vlnové aktivity v dolní ionosféře a mezoféře. Rovněž se zabýval dlouhodobými trendy ve všech oblastech ionosféry. Z nedávno dosažených výsledků lze uvést nalezení mírně záporného trendu v celkovém obsahu elektronů v jednotkovém sloupci. Ukázali jsme dále, že trend v maximu elektronové koncentrace závisí na použitém indexu sluneční aktivity a že pro střední šířky je správným indexem F30, ne převážně používané indexy F10.7 a relativní číslo slunečních skvrn (Laštovička 2024). To vysvětluje rozporné výsledky autorů některých dřívějších studií. Další naše výsledky lze nalézt v přehledových pracích Laštovičky et al. (2012) a Laštovičky (2023).

Literatura:

- AIKIN, A. C., CHANIN, M. L., NASH, J., KENDIG, D. J., 1991. Temperature trends in the lower mesosphere. *Geophysical Research Letters*, roč. **18**, s. 416–419.
- LAŠTOVIČKA, J., 2023. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **23**, s. 5783–5800. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>.
- LAŠTOVIČKA, J., 2024. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies. *Advances in Space Research*, roč. **73**, s. 685–689. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.047>.
- LAŠTOVIČKA, J., AKMAEV, R. A., BEIG, G., BREMER, J., EMMERT, J. T., 2006. Global change in the upper atmosphere. *Science*, roč. **314**, 5803, s. 1253–1254.
- LAŠTOVIČKA, J., SOLOMON, S. C., QIAN, L., 2012. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere. *Space Science Reviews*, roč. **168**, s. 113–145. Dostupné z: [doi:10.1007/s11214-011-9799-3](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9799-3).
- REZAC, L., YUE, J., YONGXIAO, J., RUSSELL, J. M., III, GARCIA, R., LOPEZ-PUERTAS, M., MLYNCZAK, M. G., 2018. On long-term SABER CO₂ trends and effects due to non-uniform space and time sampling. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, roč. **123**, s. 7958–1967. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2018JA025892>.
- ROBLE, R. G., DICKINSON, R. E., 1989. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and lower thermosphere? *Geophysical Research Letters*, roč. **16**, s. 1441–1444.

Recenzenti (Reviewers):

Ing. Eva Krtková, Ph.D., Ing. Jitka Slámová, Ph.D.,
Ing. Zuzana Rošková

Vliv troposférických situací mezosynoptického měřítka na dynamiku a variabilitu ionosféry

Influence of mesoscale tropospheric situations on ionospheric dynamics and variability

Kateřina Potužníková

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

Petra Koucká Knížová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení ionosféry a aeronomie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

Jaroslav Chum

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení ionosféry a aeronomie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

The connection between distant regions of the atmosphere has been confirmed by many theoretical and experimental studies. In this paper we focus mainly on the influence of the troposphere on the ionospheric plasma in the upper atmosphere. We discuss the possible effects of cold fronts and tropospheric convective storms and their influence on the upper atmosphere down to the ionospheric plasma. The state of the ionosphere is monitored using the DPS 4D digisonde and CDS Doppler sounding instrument. During extreme meteorological events, we have identified various perturbations on ionograms and CDS spectrograms, especially in the ionospheric F-layer.

KLÍČOVÁ SLOVA: fronta atmosférická – bouře konvektivní – vlny akusticko-gravitační – vazby vertikální atmosférické – vrstva F ionosférická

KEYWORDS: atmospheric front – convective storm – acoustic-gravity wave – vertical coupling in the atmosphere – ionospheric F layer

1. Úvod

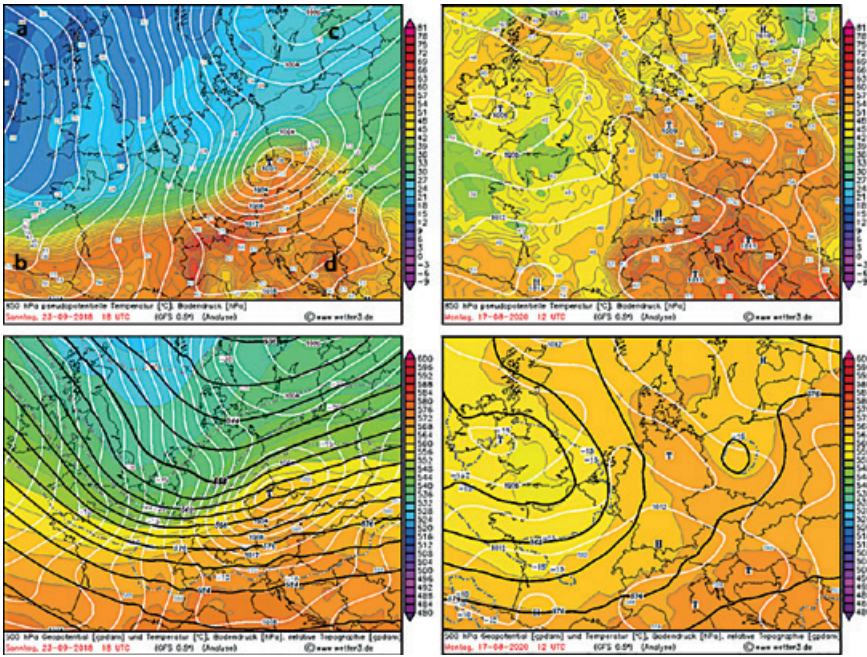
Zemská atmosféra představuje komplikovaný dynamický systém, jehož energetická bilance závisí primárně na slunečním záření. V různých oblastech atmosféry se uplatňují odlišné mechanismy a hrají roli jiné složky slunečního záření. Troposféra získává energii přenosem tepla od zemského povrchu (turbulentním prouděním, vyzařováním zemského povrchu/absorpcí dlouhovlnného záření atmosféry, uvolňováním latentního tepla), ionosféra vzniká pohlcováním krátkovlnné složky vstupujícího slunečního záření. Při analýze vertikálních vztahů mezi

jednotlivými vrstvami atmosféry se ukazuje, že nejdůležitějším zprostředkovatelem vazby jsou atmosférické vlny. Atmosféra podporuje šíření široké škály akusticko-gravitačních vln, které zajišťují přenos hybnosti a energie i na velmi velké vzdálenosti napříč atmosférou (Koucká Knížová et al. 2016).

Ionosféra představuje přechodovou zónu mezi plně ionizovanou magnetosférou (nad přibližně 1 000 km) a neutrální atmosférou (dolní hranice je ve dne obvykle pod 70 km, výjimečně až pod 50 km, v noci pod 130 km.) Je tvořena atmosférickým plazmatem, složeným jak z neutrálních částic, tak z iontů a volných elektronů. Za normálních podmínek je možné podle výškového průběhu elektronové koncentrace rozčlenit ionosféru do několika vrstev označovaných jako C, D, E a F. Navíc se může vytvořit i oblast zvýšené koncentrace kovových iontů uvnitř vrstvy E (označovaná jako Es vrstva) a to zejména v létě. Vrstva C se objevuje výjimečně a její měření není jednoduché. Vrstvy D, E během noci zanikají rekombinací (přímou reakcí kladných a záporných iontů). Pouze v nejvyšší vrstvě F složené z lehkých atomárních iontů, dochází k pomalé dvoustupňové rekombinaci, a proto během noci nestihne zcela vyhasnout. Stupeň ionizace v ionosféře je relativně nízký, v oblasti maxima ve vrstvě F ve výšce kolem 300 km dosahuje podíl ionizovaných částic maximální hodnoty 1 %. Je tedy zřejmé, že chování ionosféry je z podstatné části určováno neutrální složkou, kterou například mechanicky ovlivňují vlny přicházející z nižších oblastí atmosféry.

Troposféra je neustálým zdrojem vln se širokým spektrem vlnových délek, z nichž většina má i vertikální složku šíření energie. Podmínky šíření vln v atmosféře se řídí disperzní rovnicí pro akusticko-gravitační vlny (např. Mošna, Koucká Knížová 2012). Podmínky průchodu akusticko-gravitačních vln závisí na lokálních dynamických podmínkách atmosféry a jsou silně ovlivněny prostředím, v kterém se šíří, zejména vertikálním profilem proudění (Koucká Knížová et al. 2023). K filtraci vln (disipaci nebo refrakci) dochází zejména v mezoféře, vzhledem ke značné rychlosti a proměnlivosti horizontálního proudění. I vlny s relativně nízkými amplitudami v troposféře nabývají svého významu ve vyšších vrstvách vzhledem k přibližně exponenciálnímu poklesu hustoty atmosféry s výškou a odpovídajícímu nárůstu jejich amplitudy. Proto jsme relativně často schopni zaznamenat projevy troposférických událostí v ionosférickém plazmatu i přesto, že je část vln filtrována ve střední atmosféře.

V ústavu fyziky atmosféry se věnujeme vlivu troposféry na ionosféru poměrně dlouho (Boška, Šauli 2001; Šauli, Boška 2001; Sindelarova et al. 2009; Koucká Knížová et al. 2015). Přehled dosavadních poznatků vlivu spodní atmosféry na ionosféru středních zeměpisných šířek jsme shrnuli v rešerši

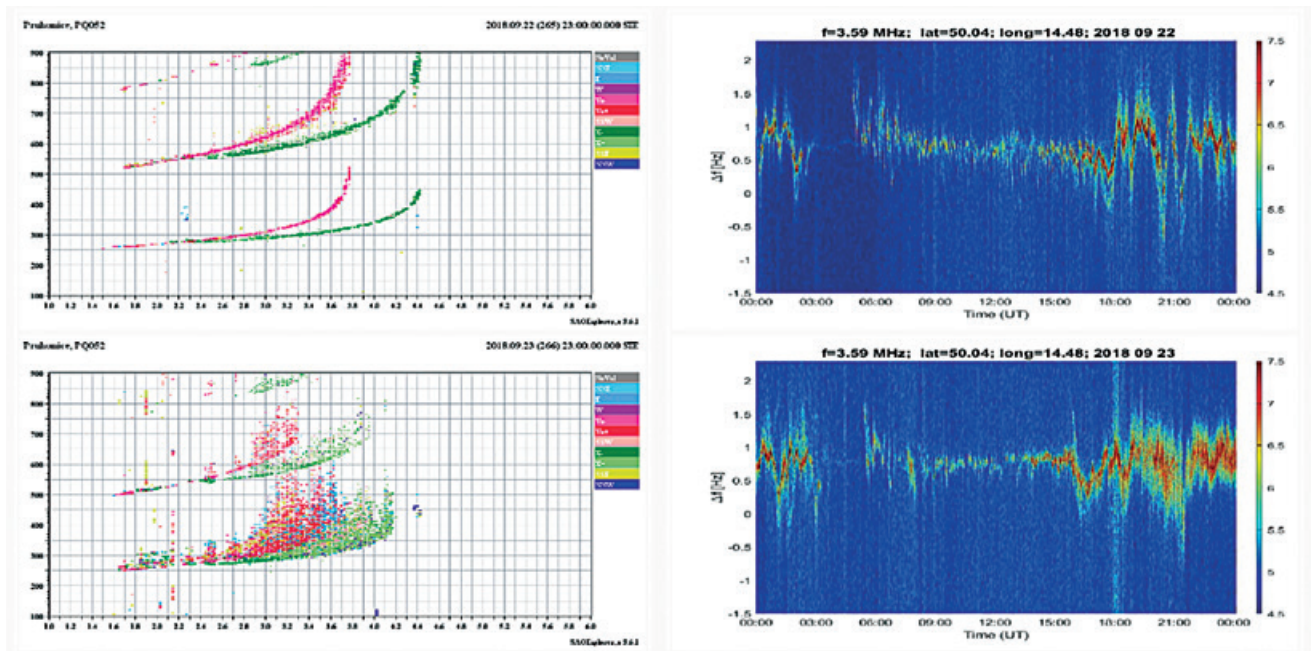


Obr. 1 (a, c) Analýza adiabatické ekvivalentní potenciální teploty v hladině 850 hPa (°C, barevně) a přízemního tlakového pole přepočteného na hladinu moře (hPa, bílé izobary). (b,d) Analýza výšky hladiny 500 hPa (geopotenciální dekametry, černě), teploty v 500 hPa (°C, šedé izotermy), relativní topografie 500/1 000 hPa (geopotenciální dekametry, barevně) a přízemního tlakového pole (hPa, bílé izobary). Dle modelu GFS, zdroj www.wetter3.de. Levé panely odpovídají situaci ze dne 23. 9. 2018 18:00 UTC, pravé panely ze 17. 8. 2020 12:00 UTC.

Fig. 1. (a, c) GSF model analysis of 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature in °C, (in colour) and sea level pressure in hPa (white isobars). (b, d) Analysis of 500 hPa level in gpm (black), 500 hPa temperature in °C (gray dashed lines), sea level pressure in hPa (white isobars), and relative topography 500–1 000 hPa (in colour). Left panels are for 23 Sep 2018 18:00 UTC, right panels are for 17 Aug 2020 12:00 UTC, provided by www.wetter3.de.

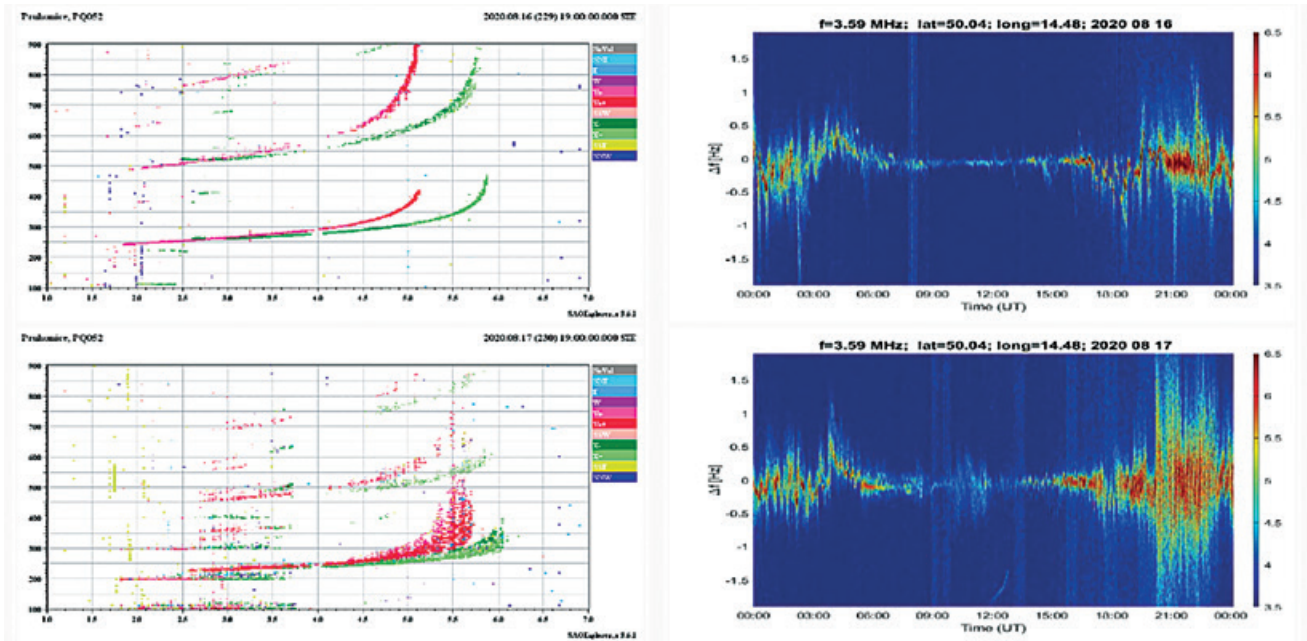
studii (Koucká Knížová et al. 2021). V poslední době se v experimentálním výzkumu zaměřujeme zejména na období teplé poloviny roku spojené se zdrojem troposférických gravitačních vln v podobě silných konvektivních bouří, ale také s podstatně komplikovanější strukturou i dynamikou ionosféry, což je jeden z důvodů, proč jsou vzájemné vazby mezi letní ionosférou a troposférou zatím málo prozkoumané (Koucká Knížová et al. 2020; Koucká Knížová et al. 2023; Potužníková et al. 2023).

Tato práce stručně představuje poruchy v ionosférickém plazmatu ve vrstvě F detekované ionosondou a dopplerovským systémem v souvislosti se dvěma různými troposférickými událostmi – s přechodem výrazné studené fronty a s letními bouřkami v tropické vzduchové hmotě.



Obr. 2 Panely v levém sloupci ukazují ionogramy z digisondy DPS 4D v Průhonicích v 23:00 UTC dne 22. 9., resp. 23. 9. 2018 – krátce po přechodu frontální cyklony Fabienne. Červenou a zelenou barvou jsou označeny stopy odrazu řádných a mimořádných módů. Ostatní barvy označují mimo-vertikální echa registrovaná anténním polem. Panely v pravém sloupci ukazují spektra spojitého dopplerovského sondování naměřená během 22. 9. a 23. 9. 2018.

Fig. 2. The panels in the left column show the ionograms recorded by DPS 4D digisonde in Průhonice. Red colour and green colour denote ordinary and extraordinary reflection traces. The other colours denote off-vertical echoes registered by the antenna field. The panels in the right column show the Continuous Doppler Sounder spectra from 22 and 23 September 2018.



Obr. 3 Jako obr. 2 pro případ konvektivních bouří ve večerních hodinách 17. 8. 2020. Ionogramy odpovídají 19:00 UTC 16. 8. 2020, resp. 17. 8. 2020. Záznam 24hodinového dopplerovského měření je z 16. 8., resp. z 17. 8. 2020.

Fig. 3. Same as Fig. 2 for convective tropospheric storm observed on 17 August 2020. Left panels show the ionograms and the right panels stand for the Continuous Doppler Soundings recorded on 16 and 17 August 2020 at 19:00 UTC.

2. Popis troposférických událostí

Rozbor synoptické situace spojené s rychle se pohybující frontální cyklonou „Fabienne“ a měření z přízemní meteorologické stanice Praha-Spořilov jsou uvedeny v příspěvku (Potužníková et al. 2023), resp. v článku (Koucká Knížová et al. 2020). Extrémní intenzitě studené fronty, která přešla přes území ČR 23. září 2018 ve večerních hodinách, odpovídá gradient adiabatické ekvivalentní potenciální teploty θ_{ep} ve spodní troposféře (obr. 1a). V úzké oblasti frontálního rozhraní mezi dvěma vzduchovými hmotami s velmi rozdílnou teplotou a vlhkostí docházelo k prudké turbulenci a ke vzniku vln, které se šířily do vyšších vrstev atmosféry. Rychlý přesun cyklony v jihozápadním řídicím proudění a následné výrazné ochlazení je patrné i na výškové mapě střední troposféry (obr. 1b).

Druhým příkladem meteorologické situace, jejíž odezvu jsme zaznamenali v ionosféře, byl mezoměřítkový konvektivní systém uvnitř tropické vzduchové hmoty před studenou frontou. Dne 17. 8. 2020 se první silné bouře objevily na západě Čech v 16:00 UTC, nad Prahu se silné bouře s přivalovými dešti přesunuly okolo 18:00 UTC. Tato letní bouřková situace byla charakteristická nevýrazným přízemním tlakovým polem a extrémní hodnotou θ_{ep} v hladině 850 hPa vypovídající o vysoké labilitě vzduchové hmoty (obr. 1c). Ve střední troposféře se během předcházejícího dne přes ČR přesouvala od jihozápadu výšková tlaková níže s uzavřenou oblastí studeného vzduchu. Výšková brázda s ní spojená podporovala výstupné pohyby vzduchu (obr. 1d). Gravitační vlny generované přestřelujícími vrcholky konvektivních bouří jsou pravděpodobnou příčinou poruch, které jsme se zpožděním několika minut až několika desítek minut zaznamenali v ionosférické F vrstvě.

3. Měření v ionosféře

Ke studiu chování ionosféry využíváme radarové techniky založené na odrazu rádiové vlny od plazmatu. V levé části obr. 2 je záznam z měření digisondy, což je vertikálně orientovaný radar s proměnnou sondovací frekvencí, který je umístěn na observatoři ÚFA v Průhoncích. Na horním panelu je odraz od neporušené/klidné vrstvy F před průchodem frontální cyklony Fabienne. Zdanlivá výška (výška při průchodu sondovací vlny vakuem) je pomocí programu Artist/NHPC invertována na reálnou výšku odrazu. Odraz nastává při frekvencích nižších, než je vlastní frekvence plazmatu v daném místě. Na spodním panelu je ukázka tzv. spread-F echa, který se vytvořil odrazem od zvlněné či jinak porušené vrstvy. Deformaci pravděpodobně způsobují procházející gravitační vlny s různou vlnovou délkou. V pravé části obr. 2 je záznam kontinuálního Dopplerova měření na frekvenci 3,5 MHz. Na horním panelu je večer 22. 9. před příchodem studené fronty v troposféře vidět úzké spektrum s oscilacemi v pásmu gravitačních vln. Na spodním panelu je 23. 9. kolem 18:00 UTC širokofrekvenční šum způsobený bleskovými výboji v blízkosti přijímače. Se zpožděním přibližně dvou hodin až do půlnoci je vidět široká stopa vypovídající o rozbití/zvlnění odrazové vrstvy plazmatu průchodem vln přicházejících zdola.

Změny v ionosféře vyvolané mohutnou konvekcí jsou viditelné jak na ionogramech, tak i na záznamu spekter Dopplerova měření. V horní části obr. 3 vidíme záznam klidné regulárně stratifikované ionosféry jeden den před událostí, kdy docházelo k odrazu sondovacích rádiových vln od ploch se stejnou hustotou plazmatu. V souvislosti s výskytem mezoměřítkového systému konvektivních bouří se na spodním ionogramu objevuje spread-F echo, z něhož nelze s jistotou určit vlastní frekvenci plazmatu ani přesnou výšku v místě odrazu sondovací rádiové vlny. „Viditelnost“ F vrstvy je zároveň snížena

přítomností sporadické vrstvy Es zhruba ve výšce 100 km, jejíž odraz je rovněž slabě rozostřen. Mimořádně silný šum se objevuje na dopplerovském signálu (pravý spodní panel) zhruba od 20:00 UTC.

Oba případy jsou detailněji diskutovány ve výše zmíněných pracích a zde jsou uvedeny dva ilustrativní příklady pozorování odezvy v ionosférickém plazmatu. Vzhledem ke klidným geomagnetickým a slunečním podmínkám přičítáme pozorované poruchy ionosféry v obou případech průchodu gravitačních vln troposférického původu.

4. Závěr

Přestože je chování atmosférického plazmatu řízeno především sluneční a geomagnetickou aktivitou, nelze zanedbat vliv vzdálených oblastí atmosféry, a to jak ve vertikálním, tak i horizontálním smyslu. Vzájemné vazby mezi vzdálenými oblastmi zprostředkovávají zejména atmosférické vlny. Velmi významnou roli ve stavu ionosféry hrají vlny troposférického původu, jejichž studiem se v Ústavu fyziky atmosféry dlouhodobě zabýváme. V poslední době se zaměřujeme především na vliv gravitačních vln generovaných silnou konvekcí. Dvě popsání troposférické situace vyvolaly kvalitativně podobnou odezvu v ionosféře. Došlo k porušení profilu elektronové koncentrace vlivem vzhůru postupujících vln. Zaznamenali jsme výrazný nárůst pohybu odrazných ploch se stejnou hustotou plazmatu (Doppler shifts) a zvlnění ploch odrazu sondovacích frekvencí (spread-F echo) – viz obr. 2 a 3, to znamená významnou změnu tvaru a pohybu profilu elektronové koncentrace a dále stříh horizontálních pohybů plazmatu a odchylky ve stratifikaci profilu (např. vznik cusp) – viz (Koucká et al. 2020). Ionosféra je velmi komplikovaný systém a její odezva na troposférické události závisí na její historii jak v krátkodobých škálách (např. hodinových v případech předcházející geomagnetické poruchy), tak v dlouhodobých souvisejících s fází slunečního cyklu. Podmínky šíření gravitačních vln závisí na okamžitém stavu atmosféry podél celé dráhy paprsku. Pro přesnější kvalitativní i kvantitativní vyhodnocení troposféricko-ionosférických vazeb se proto snažíme zapojit měření z více vrstev atmosféry. Z našeho pohledu je zajímavé, že se i meteorologické události relativně malých časových i prostorových rozměrů mohou na řádově delší dobu (až několik dní) otisknout ve stovky kilometrů vzdáleném ionosférickém plazmatu.

Literatura:

- BOŠKA, J., ŠAULI, P., 2001. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-Region. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C*, Vol. **26**, s. 425–428. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00024-1).
- KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., MOŠNA, Z., KOUBA, D., POTUŽNÍKOVÁ, K., BOŠKA, J., 2015. Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **136**, s. 244–250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.017>.
- KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., PODOLSKÁ, K., POTUŽNÍKOVÁ, K., KOUBA, D., MOŠNA, Z., BOŠKA, J. et al., 2020. Evidence of vertical coupling: meteorological storm Fabienne on 23 September 2018 and its related effects observed up to the ionosphere. *Annales Geophysicae*, Vol. **38**, s. 73–93. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/angeo-38-73-2020>.
- KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., LAŠTOVIČKA, J., KOUBA, D., MOŠNA, Z., PODOLSKÁ, K., POTUŽNÍKOVÁ, K. et al., 2021. Ionosphere influenced from lower-lying atmospheric regions. *Frontiers in Astronomy*

and Space Sciences, Vol. **8**, s. 1–29. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.651445>.

- KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., MOŠNA, Z., POTUŽNÍKOVÁ, K., MOŠNA, Z., BOŠKA, J., KOUBA, D., 2016. Vliv dolní atmosféry na ionosféru. Bulletin „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“ příspěvky přednesené na konferenci v Úpici ve dnech 19.–21. 5. 2015, s. 69–75, ISBN 978-80-86303-44-4.
- KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., POTUŽNÍKOVÁ, K., PODOLSKÁ, K., HANNAWALD, P., MOŠNA, Z. et al., 2023. Multi-instrumental observation of mesoscale tropospheric systems in July 2021 with a potential impact on ionospheric variability in midlatitudes. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Vol. **10**, No. 1197157. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1197157>.
- MOŠNA, Z., KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., 2012. Analysis of wave-like oscillations in parameters of sporadic E layer and neutral atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **90–91**, s. 172–178. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.04.007>.
- POTUŽNÍKOVÁ, K., KOUCKÁ KNÍŽOVÁ, P., CHUM, J., PODOLSKÁ, K., KOUBA, D. et al., 2023. Summer tropospheric mesoscale situations with impact on the ionospheric plasma. Proceedings of the Fifteenth Workshop „Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere“, s. 80–89, ISSN 2367-7570.
- ŠAULI, P., BOŠKA, J., 2001. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **63**, s. 945–950. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00205-4).
- SINDELAROVA, T., BURESOVA, D., CHUM, J., HRUSKA, F., 2009. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights. *Advances in Space Research*, Vol. **43**, s. 1644–1651, Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.022>.

Lektoři (Reviewers):

prof. RNDr. Petr Pišoft, Ph.D., doc. Mgr. Michal Žák, Ph.D.

Rádiové přijímače na meziplanetárních sondách přinášejí nové poznatky o bleskových výbojích v atmosféře Jupiteru

Radio receivers aboard planetary spacecraft missions bring new knowledge about lightning discharges in the Jovian atmosphere

Ondřej Santolík

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Matematicko-fyzikální fakulta
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2
✉ os@ufa.cas.cz

Ivana Kolmašová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení kosmické fyziky
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Matematicko-fyzikální fakulta
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2

In this review paper, we summarize pieces of information on Jovian lightning, which have been derived from data collected by radio receivers onboard planetary missions, starting with Voyager 1. This mission first unveiled the existence of lightning in Jupiter's atmosphere. However, a significant leap in our understanding of Jovian lightning characteristics occurred with the Juno mission, which has been in orbit around Jupiter since 2016. Data collected by Juno revealed new types of lightning-related electromagnetic signals, including rapid whistlers, Jupiter dispersed pulses, and microwave sferics. These electromagnetic measurements also lead us to the discovery that the Jovian ionosphere contains regions with an exceptionally low plasma density. Based on the analysis conducted thus far, we can assert that lightning on Jupiter exhibits significant similarities to terrestrial lightning in terms of flash rates and stepwise processes occurring after lightning initiation.

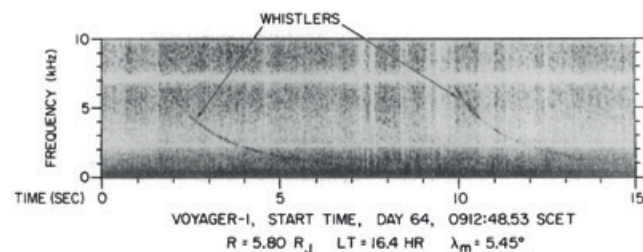
KLÍČOVÁ SLOVA: výboj bleskový – oblak bouřkový – náboj elektrický – měření elektromagnetická – atmosféry planetární – Jupiter – atmosféra Jupiteru

KEYWORDS: lightning discharge – thundercloud – electric charge – electromagnetic measurements – planetary atmospheres – Jupiter – Jovian atmosphere

1. Úvod

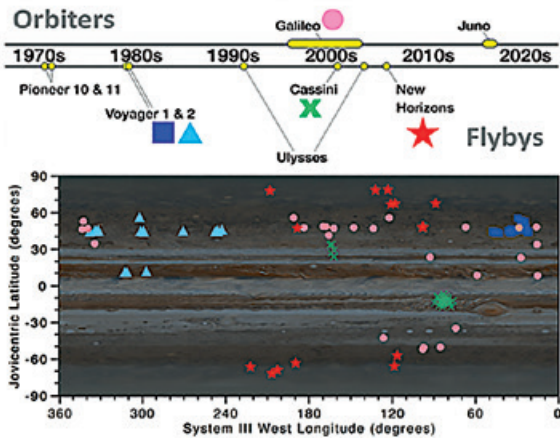
V březnu 1979 zaznamenal rádiový přijímač na palubě sondy Voyager 1 při svém průletu okolo planety Jupiter elektromagnetické signály na slyšitelných frekvencích (Gurnett 1979). Tyto záznamy po převedení na zvuk hvízdaly podobně jako elektromagnetické signály známé ze Země pod zvukomalebným názvem „hvizdy“. Širokopásmové rádiové pulzy, které pocházejí od pozemských blesků, se běžně šíří podél zemského povrchu rychlostí blízkou rychlosti světla. Pokud se ovšem takový signál dostane do plazmatického prostředí ionosféry a magnetosféry, jeho šíření se zpomalí, a navíc se nižší frekvence začnou opožďovat za těmi vyššími. Tím se z původního praskavého zvuku zachyceného poblíž zdrojového blesku stane delší hvízdavý klesající tón. Tento jev, známý od počátku minulého století, se podařilo vysvětlit až v jeho polovině (Storey 1953). Podoba hvízdání je dána především hustotou plazmatu a velikostí magnetického pole v místech, kterými se signál šíří. Sonda Voyager 1 zaznamenala 168 takových hvízdavých signálů dlouhých několik sekund (obr. 1), při průletu prolétla hustým plazmatickým prstencem měsíce *Io* ve vzdálenosti 5,5–6 poloměrů planety Jupiter od jejího středu. Díky podobnosti s pozemskými hvizdy bylo vysvětlení původu těchto pozorování od počátku založeno na existenci bleskových výbojů v atmosféře Jupiteru.

Existence blesků na Jupiteru byla ve velmi krátké době potvrzena i optickým měřením na palubě sondy Voyager 1 (Smith et al. 1979; Cook et al. 1979) a následně i řadou dalších sond, které své kamery namířily na tuto planetu. Postupně blesky



Obr. 1 Frekvenčně-časový spektrogram ukazující hvizdy detekované sondou Voyager 1 během průletu plazmatickým prstencem měsíce *Io* ve vzdálenosti 5,8 poloměrů planety od jejího středu. Převzato od Kurtha et al. (1985).

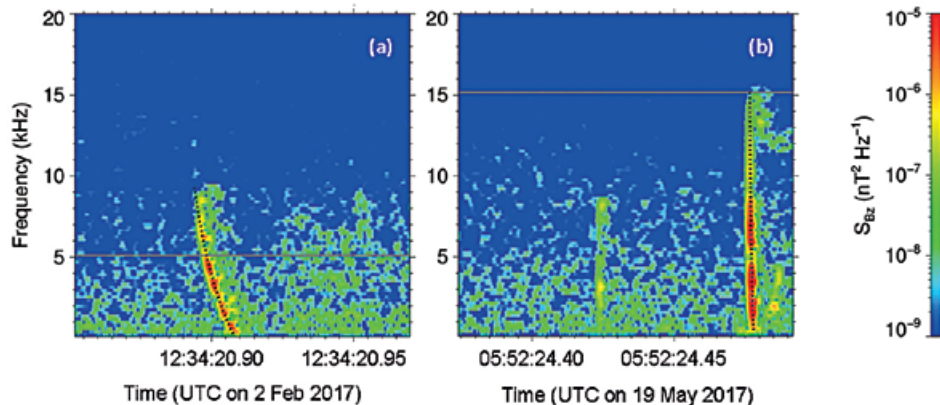
Fig. 1. Frequency-time spectrogram showing whistlers detected by Voyager 1 as it traversed through the *Io* plasma torus at a radial distance of 5.8 Jovian radii (from Kurth et al. 1985).



Obr. 2 Optická pozorování blesků před přiletem sondy Juno: modré čtverečky...Voyager 1 (36 detekcí blesků); světle modré trojúhelníky...Voyager 2 (18 detekcí); růžové body...Galileo (odhadem 336 detekcí ve 28 bouřích); zelené křížky...Cassini (přibližně 50 detekcí na 4 místech); červené hvězdičky...New Horizons (18 detekcí). Podkladovou mapu poskytl NASA/JPL/Space Science Institute (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA07782>).

Fig. 2. Optical lightning observations before Juno mission: blue squares, Voyager 1 (36 lightning detections); light blue triangles, Voyager2 (18 detections); pink dots, Galileo (estimated 336 flashes in 28 storms); green crosses, Cassini (approximately 50 flashes in 4 spots); red stars, New Horizons (18 flashes). The background map was provided by NASA/JPL/Space Science Institute (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA07782>).

v atmosféře Jupiteru zaznamenaly sondy Voyager 2 (Borucki, Magalhaes 1992), Galileo (Little et al. 1999), Cassini (Dyudina et al. 2004) a New Horizon (Baines et al. 2007). Souhrn optických detekcí blesků pomocí těchto sond je zobrazen na mapě na obrázku 2.



Obr. 3 Frekvenčně-časové spektrogramy fluktuací magnetického pole ukazující příklady rychlých hvízdů. a) Záznam z 2. února 2017, 12:34:20 UTC, výška 25 100 km nad úrovní 1 baru. b) Záznam z 19. 5. 2017, 05:52:24 UTC, výška 7 380 km nad úrovní 1 baru. Vodorovné šedé čáry znázorňují lokální protonovou cyklotronovou frekvenci vypočítanou z měření vektorového magnetometru. Černé tečkované čáry byly vypočteny pomocí modelu šíření elektromagnetických vln podél magnetických siločar v chladném plazmatu (převzato od Kolmašové et al. 2018).

Fig. 3. Frequency-time power spectrograms of the magnetic field fluctuations showing examples of Jovian rapid whistlers. a) Data from 2 February 2017, 12:34:20 UTC recorded at an altitude of 25,100 km above the 1 bar level. b) Data from 19 May 2017, 05:52:24 UTC recorded at an altitude of 7,380 km. The horizontal grey lines show the local proton cyclotron frequency calculated from measurements of the vector magnetometer. The black dotted lines were calculated from a field-aligned propagation model of electromagnetic waves in a cold plasma (from Kolmašová et al. 2018).

V roce 2016 dorazila po čtyřech letech cesty meziplanetárním prostorem a několika gravitačních manévrech na oběžnou dráhu okolo planety Jupiter sonda Juno vyslaná americkou vesmírnou agenturou NASA. Na palubě nese řadu přístrojů pro výzkum planety Jupiter a systému jejích měsíců. Díky rádiovému přijímači a mikrovlnnému přístroji jsme získali řadu nových poznatků o blescích v atmosféře planety.

2. Přístrojové vybavení sondy Juno

Základním úkolem sondy Juno je zkoumat vznik a vývoj planety Jupiter, a přispět tak k porozumění historii naší Sluneční soustavy a vzniku planetárních systémů. Sonda nese na své palubě přístroje ke zkoumání nitra planety, jejího gravitačního a magnetického pole a složení atmosféry. Dalším cílem je prozkoumání polární magnetosféry Jupiteru a intenzivních polárních září. Ke splnění svých vědeckých úloh sonda používá tříosý vektorový magnetometr, šestikanálový mikrovlnný radiometer, barevnou kameru, infračervený spektrometr, ultrafialový spektrometr a sadu přístrojů pro měření vln a částic v plazmatu (Bolton et al. 2017).

Rádiové signály emitované bleskovými výboji měří přijímač elektromagnetických vln, který detekuje a analyzuje proměnná elektrická pole ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 40 MHz a magnetická pole od 50 Hz do 20 kHz (Kurth et al. 2017). K přijímači je připojená elektrická anténa ve formě dipólu složeného ze dvou tyčí a umístěného kolmo k ose rotace sondy. Efektivní délka antény je 1,4 m. Magnetické čidlo tvoří cívka s 10 000 závitů měděného drátu namotaného na jádro z mu-metalu o délce 15 cm. Cívka je umístěná paralelně k rotační ose sondy. Část přístroje pracující na nejnižších frekvencích měří synchronně elektrické a magnetické pole v pásmu od 50 Hz do 20 kHz se vzorkovací frekvencí 50 kHz. Sled vzorků má délku 123 ms a je k dispozici jedenkrát za vteřinu. Druhá

nízkofrekvenční část přístroje měří elektrická pole v pásmu 10 kHz až 150 kHz a vzorky jsou zaznamenány s kadencí 375 kHz. Tato vlnová forma je 16,4 ms dlouhá a zaznamenána je rovněž jedenkrát za vteřinu. Vysokofrekvenční část přístroje pak pokrývá pásmo od 100 kHz do 40 MHz.

Data tohoto přístroje, která jsou archivována jako sled vzorků elektrického a magnetického pole, jsme systematicky zpracovali pomocí rychlé Fourierovy transformace do výkonových spektrogramů závislých na čase a frekvenci. Ze současného měření elektrického a magnetického pole jsme také stanovili vzájemnou fázi obou signálů a jejich koherenci, opět v závislosti na čase a frekvenci.

Hlavním úkolem mikrovlnného radiometru je změřit dynamické vlastnosti atmosféry Jupiteru hluboko pod viditelná hnědá mračna, určit globální množství

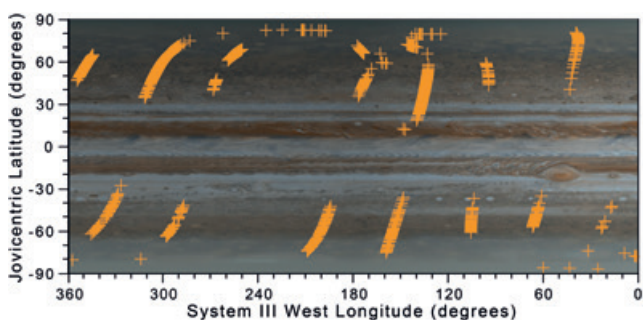
čpavku, dusíku a kyslíku, přítomného v atmosféře planety ve formě vody. Přístroj pracuje na vlnových délkách od 1 do 50 cm (Janssen et al. 2017). Pro detekci mikrovlnných emisí od blesků se používají dva kanály pracující na nejnižších frekvencích (600 MHz a 1,26 GHz). K získání jednoho datového vzorku přístroj integruje měření po dobu 0,1 s.

3. Měření na oběžné dráze planety Jupiter

3.1 Rychlé hvizdy

Analyzovali jsme desítky tisíc časově frekvenčních spektrogramů elektromagnetických vln naměřených na palubě družice Juno během průletů sondy v těsné blízkosti planety Jupiter. Našli jsme přes 1600 tzv. rychlých hvizdů, signálů generovaných bleskovými výboji v oblacích planety Jupiter (Kolmašová et al. 2018). Zjistili jsme, že se hvizdy zaznamenané sondou Juno podstatně liší od hvizdů zachycených v minulosti sondou Voyager 1. Zpoždění v příchodu signálů o frekvencích mezi 2 a 5 kHz bylo neočekávaně malé, obvykle nepřesahující deset milisekund (obr. 3). Takto malou disperzi bylo možné vysvětlit jedině podstatně menší hustotou ionosférického plazmatu, než jsme původně předpokládali na základě rádiových zákrutových měření sondy Voyager 2 (Hinson et al. 1998). Důsledkem malé hustoty plazmatu je i nízká frekvence vlastních kmitů plazmatu, která se zde blíží protonové cyklotronové frekvenci. Obě charakteristické frekvence pak ovlivňují vlastnosti šíření elektromagnetických vln od zdrojových výbojů.

Zjistili jsme také, že se více blesků vyskytovalo na severní polokouli a že se četnost blesků překvapivě blížila četnosti pozemských blesků. Záznamy rychlých hvizdů shromážděné během sedmi blízkých průletů sondy Juno okolo planety se staly v roce 2018 dosud nejrozsáhlejším souborem měření blesků u Jupiteru. Místa pravděpodobného výskytu zdrojových blesků vycházející ze záznamů rychlých hvizdů pořízených během prvních sedmi přiblížení k planetě jsou znázorněna na mapě na obr. 4. Analýzou téměř sta tisíc záznamů z dalších devíti



Obr. 4 Mapa poloh zdrojových blesků k rychlým hvizdům zaznamenaných během 7 blízkých průletů sondy Juno okolo planety Jupiter. Projekce podél modelových magnetických siločar od sondy Juno směrem dolů do výšky 300 km nad hladinou 1 baru (výška, kde předpokládáme polohu spodního okraje ionosféry) jsou zobrazeny oranžovými znaménky „+“ (převzato od Kolmašové et al. 2018).

Fig. 4. Map of locations of causative lightning strokes to rapid whistlers from 7 close approaches of the Juno probe to Jupiter. Projections along the model magnetic field lines from the Juno position down to an altitude of 300 km above the 1 bar level (anticipated altitude of the bottom of the ionosphere) are plotted by orange “+” signs (from Kolmašová et al. 2018).

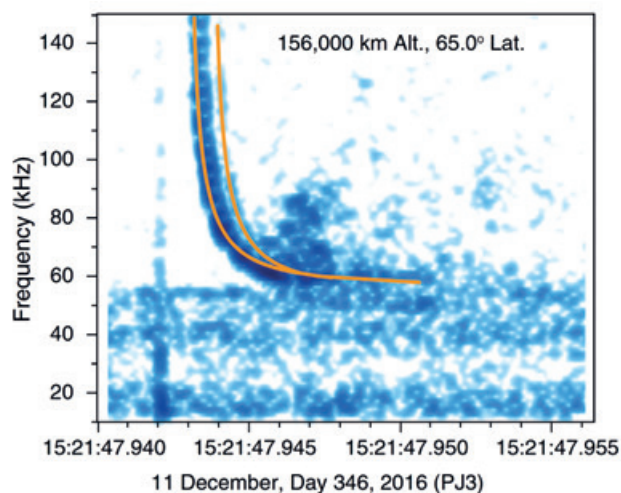
blízkých průletů sondy u Jupiteru jsme rozšířili soubor rychlých hvizdů na celkový počet téměř pěti tisíc případů. Nesymetrie výskytu blesků mezi hemisférami pozorovaná během prvních osmi přiblížení sondy Juno (Kolmašová et al. 2018) se dalším měřením nepotvrdila.

3.2 Mikrovlnné emise

Brown et al. (2018) poprvé popsali mikrovlnné emise od bleskových výbojů zaznamenané v okolí Jupitera. Zjistili, že se emise od blesků vyskytovaly převážně nad 40° severní šířky, objevily se i v polárních oblastech a chyběly v blízkosti rovníku. Toto rozložení blesků může naznačovat, že transport tepelné energie, která je hlavním zdrojem konvekce, směřuje z nitra planety směrem k pólům. Rozložení blesků podle Browna et al. (2018) nebylo ani ve středních a vyšších šířkách rovnoměrné, více blesků bylo pozorováno v tmavších barevných páslech oblačnosti než v jejich světlejších zónách. Rozložení blesků získané z měření mikrovlnných emisí se poměrně dobře shodovalo s rozložením rychlých hvizdů pozorovaných přístrojem Waves během prvních osmi blízkých průletů (Kolmašová et al. 2018).

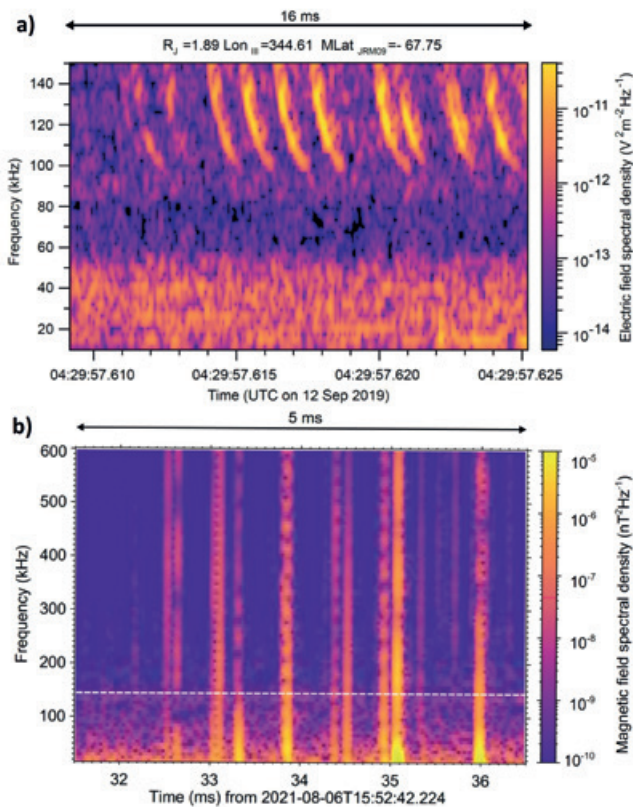
3.3 Elektrické pulsy s disperzí

Představili jsme i další zcela nový typ elektromagnetických signálů, které byly zaznamenané sondou Juno a jejichž zdrojem jsou také bleskové výboje v plynné atmosféře planety (Imai et al. 2019). Během prvních devíti blízkých průletů sondy okolo planety Jupiter jsme našli celkem 445 milisekundových pulsů, které vykazovaly disperzi (angl. Jupiter Dispersed Pulse – JDP) a které se nešířily pod tzv. frekvenci ořezu (obr. 5). Signály tohoto typu by nemohly proniknout ionosférou Jupiteru, pokud by neobsahovala nehomogenity s výrazně nižší hustotou plazmatu, než se předpokládalo na základě rádiových



Obr. 5 Časově-frekvenční spektrogram ukazující nový typ elektromagnetického signálu pocházejícího od blesků na Jupiteru. Záznam byl získán 11. prosince 2016 ve vzdálenosti 156 tisíc km od planety na 65° severní šířky. Oranžová křivka odpovídá modelu vypočítanému pro šíření elektromagnetické vlny v řádném módu (převzato od Imaie et al. 2019).

Fig. 5. A time-frequency spectrogram showing a new type of electromagnetic signal originating from lightning on Jupiter. The record was acquired on 11 December 2016 at an altitude of 156 thousand km from the planet at northern latitude of 65°. The orange curve corresponds to the model calculated for the propagation of the electromagnetic wave in the ordinary mode (from Imai et al. 2019).



Obr. 6 a) Frekvenčně časový spektrogram fluktuací elektrického pole obsahující skupinu pulzů s disperzí. Událost byla zaznamenána 12. září 2017 v 04:29:57 UTC ve vzdálenosti 1,89 poloměrů planety Jupiter od jejího středu. b) Frekvenčně časový spektrogram fluktuací magnetického pole zobrazující 5 ms dlouhý detail obsahující skupinu iniciačních pulzů vnitrooblačného bleskového výboje z 6. srpna 2021, 15:52:42 UTC. K měření jsme použili širokopásmovou smyčkovou anténu měřící ve frekvenčním pásmu 5 kHz až 90 MHz, instalovanou na observatoři Dlouhá Louka (více podrobností o měřícím systému je v článku „Kolmašové a kol.: Rádiové vlny emitované během vývoje přírodních bleskových výbojů“ v tomto čísle Meteorologických zpráv). Pro srovnání s pulzy s disperzí z panelu a) uvádíme horní frekvenční limit jejich měření zobrazený bílou přerušovanou čarou (převzato od Kolmašové et al. 2023).

Fig. 6. a) Frequency–time power spectrogram of the electric field fluctuations of a group of dispersed pulses recorded on 12 September 2017 after 04:29:57 UTC at a radial distance of 1.89 R_J (Jovian radii). b) Frequency–time spectrogram of magnetic field fluctuations showing the 5 ms long detail of the initiation of an intracloud flash occurring on 6 August 2021 at 15:52:42 UTC. The measurement was conducted by a broadband magnetic field antenna (5 kHz to 90 MHz) installed at the Dlouhá Louka observatory in Czechia (more details about the measuring system are available in the article “Kolmašová et al.: Radio waves emitted during the evolution of natural lightning discharges” in this issue of Meteorological Bulletin). For comparison with dispersed pulses from panel a), the white dashed line indicates the upper frequency limit of their measurements (from Kolmašová et al. 2023).

zákrytových měření sondy Voyager 2 (Hinson et al. 1998). Pomocí modelu jsme odhadli, jaká je hustota plazmatu v takových nehomogenitách a jaká je jejich velikost ve směru šíření elektromagnetického signálu od planety k sondě. Dospěli jsme k závěru, že ionosféra planety Jupiter obsahuje díry s hustotou menší, než je 250 částic v centimetru krychlovém.

3.4 Sekvence rádiových pulzů

V další studii (Kolmašová et al. 2023) jsme opět použili vlnové formy s vysokým časovým rozlišením, které nám poskytuje blízko planety pravidelně každou sekundu rádiový přijímač sondy Juno. Ve vlnových formách zaznamenaných oběma nízkofrekvenčními částmi přijímače jsme hledali záznamy obsahující alespoň tři za sebou následující rádiové pulsy (obr. 6a). Analyzovali jsme vlastnosti nalezených skupin pulzů s disperzí či rychlých hvizdů a porovnali je s charakteristikami sekvencí pulzů emitovanými během různých vývojových stadií bleskových výbojů v atmosféře Země detekovaných pozemními rádiovými přijímači. Zjistili jsme, že typický rozestup mezi pulsy je roven jedné milisekundě, což by odpovídalo tomu, že blesky na Jupiteru vznikají podobně jako vnitrooblačné blesky na Zemi (obr. 6b). Na základě podobnosti vodních bouřkových oblaků na Jupiteru a na Zemi jsme došli k závěru, že se bleskové kanály na Jupiteru pravděpodobně prodlužují v krocích, které jsou několik stovek až několik tisíc metrů dlouhé.

4. Shrnutí a závěr

Z tohoto přehledu výsledků vyplývá, že přijímače rádiových vln na předchozích i současných mezplanetárních sondách jsou stěžejním zdrojem informací o blescích v atmosféře planety Jupiter. Díky přijímači na sondě Voyager 1 jsme získali první důkaz o existenci bleskových výbojů na jiné planetě než na Zemi (Gurnett et al. 1979). Analýza dat naměřených rádiovými přijímači na palubě sondy Juno v různých frekvenčních pásmech přinesla řadu překvapivých výsledků. Objev rychlých hvizdů (Kolmašová et al. 2018) a elektrických pulzů s disperzí (Imai et al. 2019) vedl k zjištění, že je ionosféra Jupiteru mnohem proměnlivější, než vyplývalo z předchozích měření (Hinson et al. 1989), a že obsahuje oblasti s extrémně nízkou hustotou. Vzhledem k tomu, že se sonda Juno při svých přiblíženích k planetě nevrací nad tatáž místa, nemáme zatím informaci o rozloze hustotních „děr“ ani o délce jejich trvání. Neméně překvapivý byl objev pulzů způsobených blesky v záznamech mikrovlnného přístroje (Brown et al. 2018). Zatím nerozumíme tomu, proč při zahrnutí analýzy 17 blízkých průletů Juna okolo planety nesymetrie ve výskytu blesků mezi hemisférami zmizela jen případě rychlých hvizdů, ale data z mikrovlnného přístroje ji nadále ukazují. Hledání rychlých hvizdů v záznamech z dalších 17 blízkých průletů sondy okolo Jupiteru právě probíhá.

Neméně zajímavé je zjištění ultrafialového spektrometru na palubě Juna, že se nad bouřkovými oblaky na Jupiteru pravděpodobně objevují přechodné světelné jevy zvané ELVES (angl. Emission of Light and Very low-frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources) (Giles et al. 2020). Ultrafialové záření provázející výskyt pozemských „elfů“ zachytil opakovaně z oběžné dráhy okolo Země ultrafialový fotometr přístroje ASIM (Atmosphere–Space Interactions Monitor) umístěný na mezinárodní vesmírné stanici (Neubert et al. 2020; Bjørge-Engeland et al. 2022). Přímá souvislost výskytu elfa a přecházejícího velmi silného bleskového výboje již byla na Zemi nejen prokázána, ale i důkladně prozkoumána (např. Fukunishi et al. 1996; Barrington-Leigh, Inan 1999; Marshall et al. 2010; Kolmašová et al. 2020). U Jupiteru bohužel ani v jednom z 11 případů zachycených ultrafialových záblesků neměřily přijímače rádiových vln současně s ultrafialovým spektrometrem, takže nelze jednoznačně potvrdit, že pozorované záblesky souvisejí s bleskovými výboji.

V roce 2021 byla mise Juno prodloužena o další 4 roky se záměrem prozkoumat podrobněji měsíce planety Jupiter. Nicméně

při každém přiblížení sondy k Jupiteru zaznamenávají rádiové přijímače další data, takže lze ještě očekávat další překvapení týkající se vlastností bleskových výbojů a signálů, které blesky emitují na rádiových frekvencích.

V roce 2031 dorazí k planetě Jupiter evropská sonda JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer), která odstartovala svou dlouhou cestu v dubnu 2023. Tato velká meziplanetární sonda nese na své palubě elektromagnetický analyzátor, který bude díky šestisložkovému měření elektromagnetických polí na slyšitelných frekvencích schopen nejen zaznamenat elektromagnetické signály od bleskových výbojů, ale určit i polarizaci pozorovaných vln a charakterizovat jejich šíření z radiální vzdálenosti devíti poloměrů Jupiteru (Fletcher et al. 2023). Na tato nová data ovšem bude třeba ještě 8 let počkat.

Poděkování:

Autoři děkují všem, kdo se zapojili do mise sondy Juno, zejména na týmu z Univerzity v Iowě odpovědnému za rádiový přijímač Waves. Uložení dat z planetárních misí na Univerzitě v Iowě vzniklo za podpory fondu „Roy J. Carver Charitable Trust“. Článek vznikl za podpory grantu MŠMT LTAUSA17070 a výzkumného programu Vesmír pro lidstvo Strategie AV21.

Literatura:

BAINES, K. H., SIMON-MILLER, A. A., ORTON, G. S., WEAVER, H. A., LUNSFORD, A. et al., 2007. Polar lightning and decadal-scale cloud variability on Jupiter. *Science*, Vol. **318**, s. 226–229. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.114791>.

BARRINGTON-LEIGH, C. P., INAN, U., 1999. Elves triggered by positive and negative lightning discharges. *Geophysical Research Letters*, Vol. **26**, Issue 6, s. 683–686. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/1999GL900059>.

BJØRGE-ENGELAND, I., ØSTGAARD, N., MEZENTSEV, A., SKEIE, C. A., SARRIA D. et al., 2022. Terrestrial Gamma-ray Flashes with accompanying Elves detected by ASIM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **127**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2021JD036368>.

BOLTON, S. J. et al. 2017. Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft. *Science*, Vol. **356**, 6340, s. 821–825. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.aal2108>.

BORUCKI, W. J., MAGALHAES, J. A., 1992. Analysis of Voyager 2 images of Jovian lightning. *Icarus*, Vol. **96**, s. 1–14. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90002-O](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90002-O).

BROWN, S., JANSSEN, M., ADUMITROAIE, V., ATREYA, S., BOLTON, S. et al., 2018. Prevalent lightning sferics at 600 megahertz near Jupiter's poles. *Nature*, Vol. **558**, 87, s. 87–90. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0156-5>.

COOK, A. F., DUXBURY, T. C., HUNT, G. E., 1979. First results on Jovian lightning. *Nature*, Vol. **280**, s. 794. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/280794a0>.

DYUDINA, U. A., DEL GENIO, A. D., INGERSOLL, A. P., PORCO, C., WEST, R. A. et al., 2004. Lightning on Jupiter observed in the Ha line by the Cassini imaging science subsystem. *Icarus*, Vol. **172**, s. 24–36. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.07.014>.

FLETCHER, L. N., CAVALIÉ, T., GRASSI, D., HUESSO, R. et al., 2023. Jupiter Science Enabled by ESA's Jupiter Icy Moons Explorer. *Space Science Reviews*, Vol. **219**, 7, 53. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00996-6>.

FUKUNISHI, H., TAKAHASHI, Y., KUBOTA, M., SAKANNOI, K., INAN, U. et al., 1996. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophysical Research Letters*, **23**, Issue 16, s. 2157–2160. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/96GL01979>.

GILES, R. S., GREATHOUSE, T. K., BONFOND, B., GLADSTONE, G. R., KAMMER, J. A. et al., 2020. Possible transient luminous events observed in Jupiter's upper atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. **125**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020JE006659>.

GURNETT, D. A., SHAW, R. R., ANDERSON, R. R., KURTH, W. S., SCARF, F. L., 1979. Whistlers observed by Voyager 1: detection of lightning on Jupiter. *Geophysical Research Letters*, Vol. **6**, s. 511–514. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/GL006i006p00511>.

HINSON, D. P., TWICKEN, J. D., KARAYEL, E. T., 1998. Jupiter's ionosphere: new results from Voyager 2 radio occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. **103**, s. 9505–9520. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/97JA03689>.

IMAI, M., KOLMAŠOVÁ, I., KURTH, W. S., SANTOLÍK, O., HOSPODARSKY, G. B., 2019. Evidence for low density holes in Jupiter's ionosphere. *Nature Communications*, Vol. **10**, 2751. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10708-w>.

JANSSEN, M. A., OSWALD, J. E., BROWN, S. T., GULKIS, S., LEVINET, S. M. et al., 2017. MWR: microwave radiometer for the Juno mission to Jupiter. *Space Science Reviews*, Vol. **213**, s. 139–185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0349-5>.

KOLMAŠOVÁ, I., IMAI, M., SANTOLÍK, O., KURTH, W. S., HOSPODARSKY, G. B. et al., 2018. Discovery of rapid whistlers close to Jupiter implying lightning rates similar to those on Earth. *Nature Astronomy*, Vol. **2**, 7, s. 544–548.

KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., KAŠPAR, P., POPEK, M., PIZZUTTI, A. et al., 2020. First observations of elves and their causative very strong lightning discharges in an unusual small-scale continental spring-time thunderstorm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. **125**. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020JD032825>.

KOLMAŠOVÁ, I., SANTOLÍK, O., IMAI, M., KURTH, W. S. et al., 2023. Lightning at Jupiter pulsates with a similar rhythm as in-cloud lightning at Earth. *Nature Communications*, Vol. **14**, 2707. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38351-6>.

KURTH, W. S., STRAYER, B. D., GURNETT, D. A., SCARF, F. L., 1985. A summary of whistlers observed by Voyager 1 at Jupiter. *Icarus*, Vol. **61**, s. 497–507. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(85\)90138-1](https://doi.org/10.1016/0019-1035(85)90138-1).

KURTH, W. S., HOSPODARSKY, G. B., KIRCHNER, D. L., MOKRZCYCKI, B. T., AVERKAMP, T. F., 2017. The Juno Waves Investigation. *Space Science Reviews*, Vol. **213**, s. 347–392. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0396-y>.

LITTLE, B., ANGER, C. D., INGERSOLL, A. P., VASAVADA, A. R., SENSKÉ, D. A. et al., 1999. Galileo images of lightning on Jupiter. *Icarus*, Vol. **142**, s. 306–323. Dostupné z: <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6195>.

MARSHALL, R. A., INAN, U. S., GLUKHOV, V. S., 2010. Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. **115**(A4), A00E17. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2009JA014469>.

NEUBERT, T., ØSTGAARD, N., REGLERO, V., CHANRION, O., HEUMESSER, M. et al., 2020. Terrestrial gamma-ray flashes and ionospheric UV emissions generated by lightning. *Science*, Vol. **367**, s. 183–186. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.aax3872>.

SMITH, B. A., SODERBLOM, L. A., JOHNSON, T. V., INGERSOLL, A. P., COLLINS, S. A. et al., 1979. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1. *Science*, Vol. **204**, Issue 4396, s. 951–957. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.204.4396.951>.

STOREY, L. R. O., 1953. An investigation of whistling atmospherics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. **246**, s. 113–141. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.1953.0011>.

Lektoři (Reviewers):

prof. RNDr. František Němec, Ph.D., RNDr. Tomáš Gráf, Ph.D.

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.

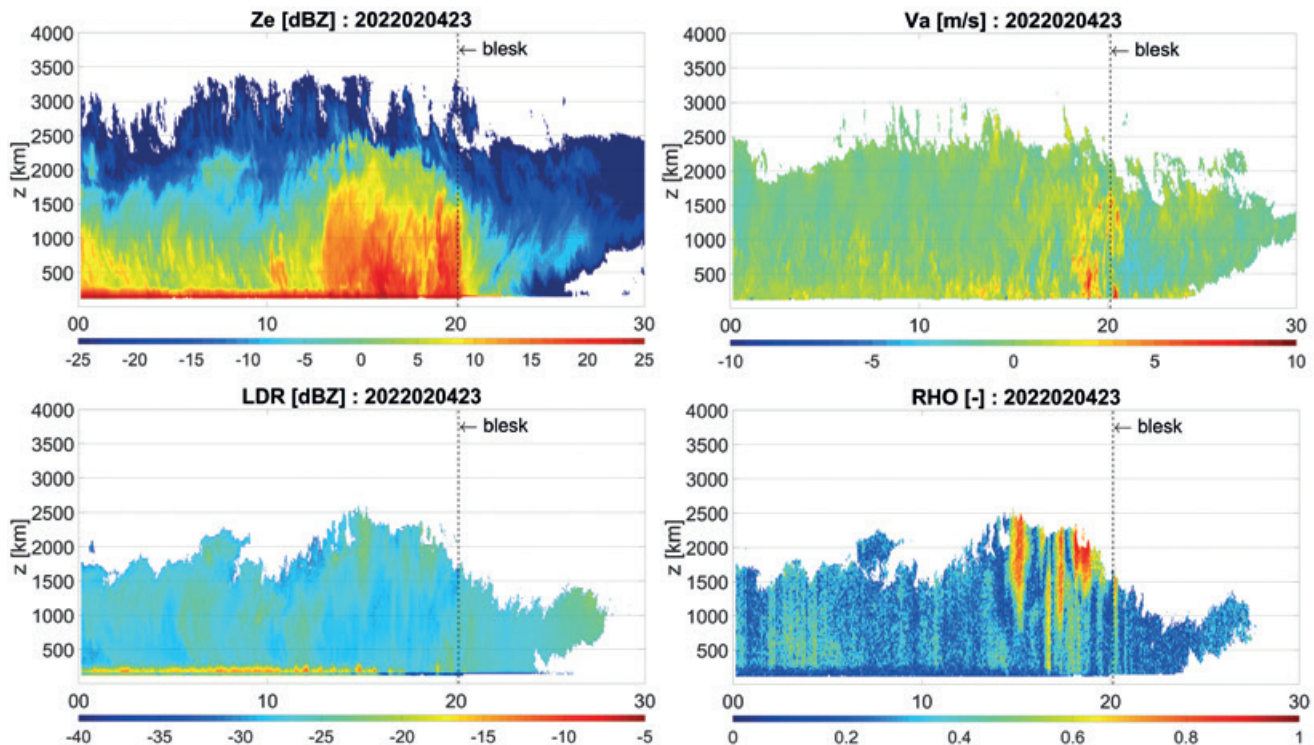
Fig. 1. View of the Milešovka observatory from an aircraft. The WR2120 radar is located at the top of the tower. The light box on ground in the foreground on the left side of the image represents SEVAN – the MIRA 35c radar is located to its left.

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>).

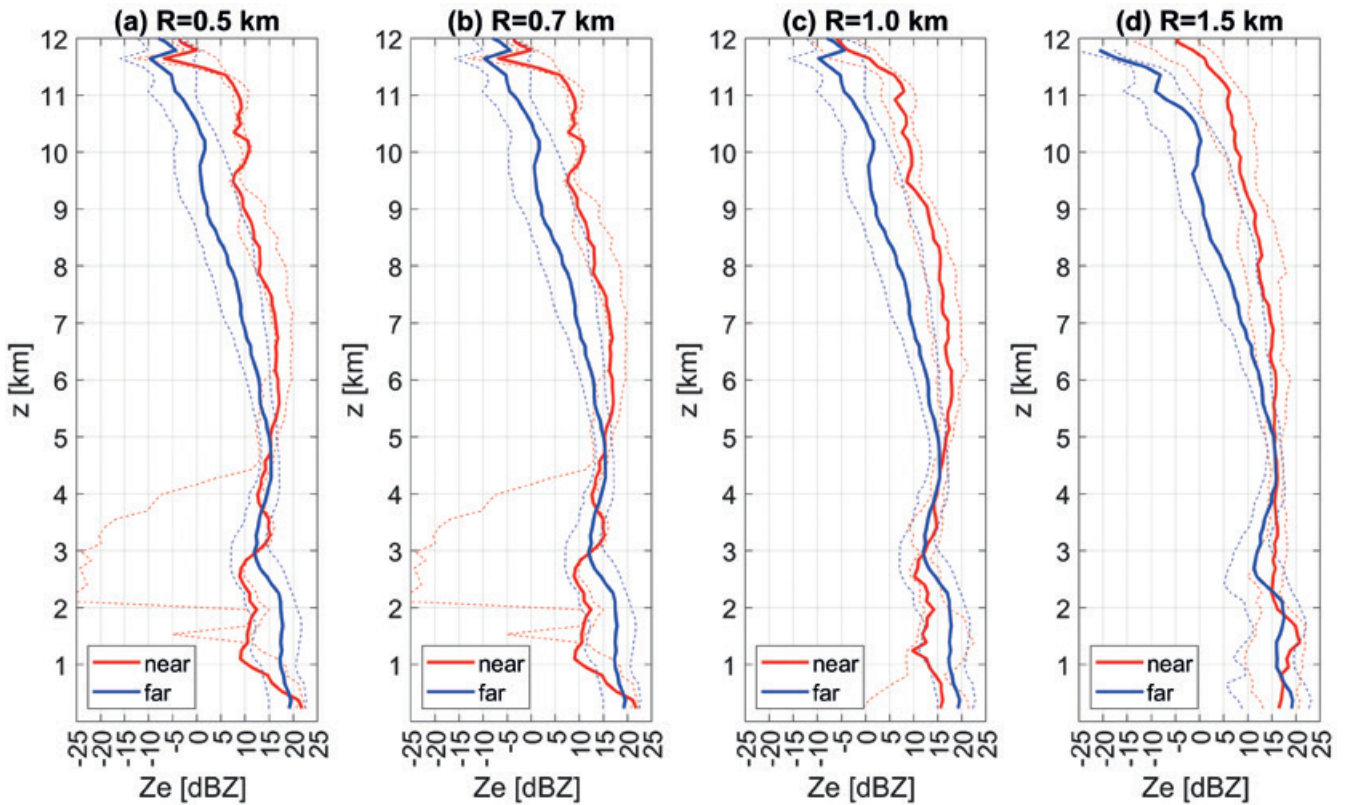
METEK MIRA 35c je vertikálně orientovaný oblačný radar, který pracuje na frekvenci 35 GHz (pásmo Ka) a byl uveden do provozu v roce 2018. Jedná se o dopplerovský polarimetrický radar pracující s vertikálním rozlišením 28,9 m, časovým rozlišením 2 s a s dosahem až 14 km. Další parametry radaru lze nalézt 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 (Z_e), dopplerovská radiální rychlost (V), lineární depolarizační poměr (LDR), diferenciální fázové posunutí (Φ_{dp}) a ko-polární korelační koeficient ($R_{ho}hv$).

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



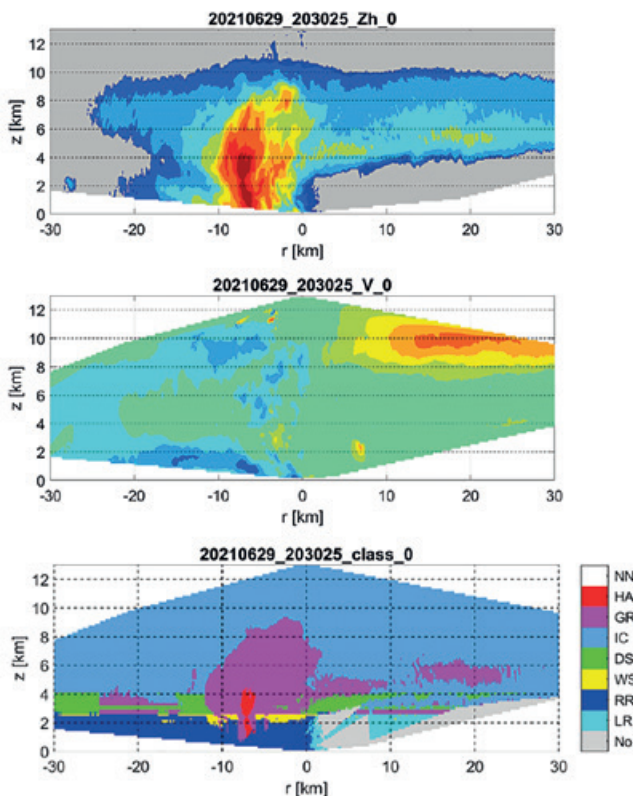
Obr. 2 Pole Z_e , LDR a RHO naměřená oblačným radarem MIRA 35c dne 4. 2. 2022 mezi 23:00 a 23:30 UTC (horizontální osa). Vertikální osa znázorňuje výšku v metrech nad radarem. Ve vyznačeném čase přerušovanou svislou čarou byl zaregistrován blesk na observatoři, který zasáhl její věž. Zvýšené hodnoty 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. Z_e , 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 (déšť), LR (jemný déšť) 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 (Rho) a šířku dopplerovského rychlostního spektra (W).

3. Modelování konvektivních bouří a bouřkové činnosti

V rámci projektu CRREAT byl využit matematický model oblačky poskytnutý prof. Pao K. Wangem z Academia Sinica (Tchaj-pej, Tchaj-wan), který byl doplněn o nově vyvinutý model elektrizace oblačnosti. Nově vzniklý komplexní model nazvaný 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 atmosféry, např. ze sondážních měření, časový vývoj oblaku a elektrického pole. CEMW popisuje kromě základních meteorologických 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 rovnice. Při výpočtu elektrického pole model zohledňuje přenos a vývoj nábojů v rámci procesů oblačné mikrofyziky probíhající v oblaku, separaci náboje kontaktem v důsledku srážek krupek, ledu a sněhu, interakci mezi ionty a náboji nesenými hydrometeorů, korónový výboj a dále zahrnuje i zjednodušený model vzniku elektrických výbojů v atmosféře, včetně větvení kanálu blesku a redistribuci náboje mezi ionty a hydrometeorů po výboji.

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

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

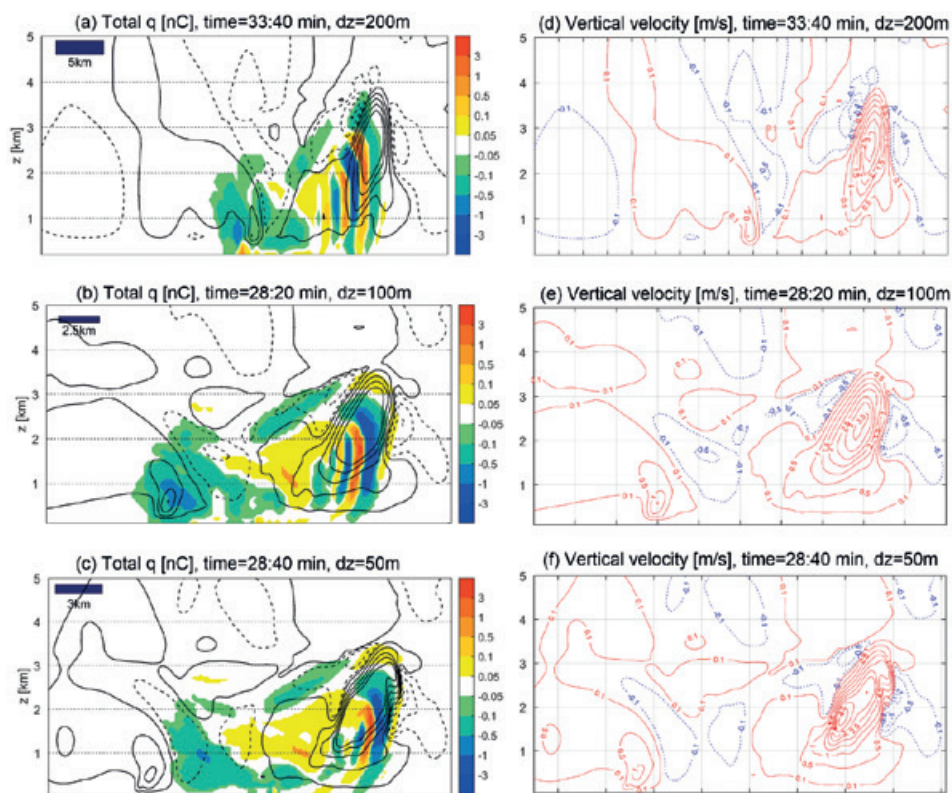
Výstupy radaru WR2120 jsou využívány jak k plošnému zobrazení struktury bouří a k identifikaci jejich pohybů, tak k pohledu dovnitř oblaků pomocí měření ve vertikálních řezech. Vytvořili jsme algoritmus, který provádí klasifikaci hydrometeorů v oblačnosti v horizontálních i vertikálních řezech (Bobotová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

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 radaru MIRA 35c jsme využili jeho schopnost identifikovat oblačnou vodu a vyvinuli jsme techniku pro výpočet vertikální rychlosti vzduchu (Sokol et al. 2018). Byla vyvinuta nová metoda klasifikace hydrometeorů v oblačnosti, která využívá vypočtené vertikální 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 výbojem, který přímo zasáhl věž na Milešovce. Speciální struktury naměřených dat umožňují identifikovat místa, kde lze očekávat



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 mobilními 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.

Vlny veder v ČR: Zvýšení rizika úmrtnosti v posledním desetiletí a naléhavost cílených opatření v oblasti veřejného zdraví

Heat waves in the Czech Republic: The increase in mortality risk over the last decade and the urgency of targeted public health action

Aleš Urban

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství
a environmentálního modelování
Kamýcká 129, 165 00 Praha–Suchdol
✉ urban@ufa.cas.cz

Hana Hanzlíková

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Geofyzikální ústav AV ČR
Boční II 1401, 141 00 Praha 4

Eva Plavcová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

Chloé Vésier

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství
a environmentálního modelování
Kamýcká 129, 165 00 Praha–Suchdol

Jan Kyselý

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství
a environmentálního modelování
Kamýcká 129, 165 00 Praha–Suchdol

Heat waves are considered the most hazardous meteorological events in Europe, in terms of their impact on mortality. Due to the ongoing impact of climate change, Central Europe has witnessed an increase in both the frequency and intensity of these periods. Until now, studies from developed countries have mostly documented a long-term decline in vulnerability to heat due to prevailing positive socioeconomic development. However, our study, as one of the first in Europe, suggests a reversal of this trend, indicating an increased

risk of death due to heat over the last two decades. This aligns with projections indicating the impact of climate change on future heat-related mortality. The reversal is a consequence of a significant increase in the frequency and intensity of heat waves in Central and Eastern Europe, coupled with the growing vulnerability of the Czech population due to its ageing. These findings highlight the importance of i) better understanding the mechanisms by which society adapts to climate change and ii) accelerating the development of public health protection measures specifically targeted at the most vulnerable population groups.

KLÍČOVÁ SLOVA: úmrtí související s horkem – změny v čase – nerovnosti sociální – adaptace na vlny veder

KEYWORDS: heat-related mortality – temporal changes – social inequity – adaptation to heat waves

1. Úvod

Jedním z nejprůkaznějších projevů probíhající změny klimatu je pozvolný nárůst průměrné teploty vzduchu ve většině regionů světa (IPCC 2021). S ním souvisí i zvyšující se četnost a intenzita vln veder ve střední Evropě (Lhotka et al. 2018; Guerreiro et al. 2018), jak ukazuje obr. 1 na příkladu Prahy. Nejnovější poznatky naznačují, že nedávná rekordně teplá letní období v Evropě, která byla zaznamenána v letech 2018 (Hoy et al. 2020), 2019 (Xu et al. 2020) nebo 2021 (Lhotka et al. 2022), mohou být předzvěstí obvyklého průběhu léta již v příští dekádě (Lhotka et al. 2018; CCAG 2022). V budoucím klimatu se ve většině regionů Evropy očekává nárůst úmrtnosti související s horkem, a naopak pokles úmrtnosti v důsledku nízkých teplot v zimě (Gasparrini et al. 2017; Vicedo-Cabrera et al. 2018a; Lee et al. 2019).

Tyto odhady jsou však v protikladu s dlouhodobým historickým poklesem úmrtnosti související s horkem u obyvatel vyspělých zemí Evropy, Severní Ameriky, východní Asie a Austrálie (Sheridan, Allen 2018; Vicedo-Cabrera et al. 2018b; Achebak et al. 2019; Lay et al. 2021). Různé druhy adaptace – fyziologická (tj. aklimatizace na vyšší teploty), behaviorální (tj. změna kulturních zvyklostí, např. oblékání, pracovní doby)

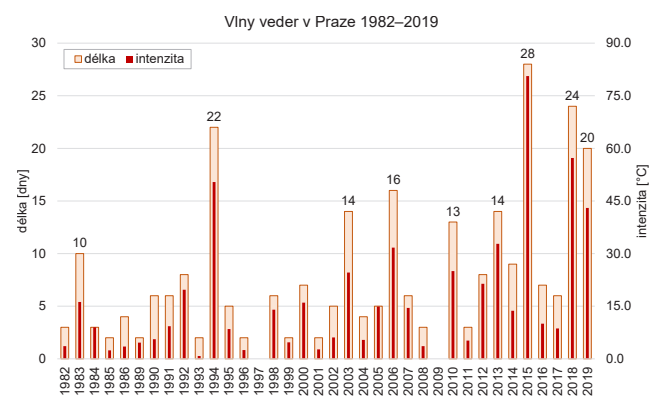
i technologická (např. rozšíření klimatizace, úprava plánování měst a projektování budov, zavádění akčních plánů na ochranu obyvatelstva před horkem) – jsou často uváděny jako příčiny snížených dopadů horkého počasí na úmrtnost (Bobb et al. 2014; Hondula et al. 2015; Arbutnott et al. 2016; Sheridan, Allen 2018). Nicméně pochopení těchto adaptačních mechanismů a vlivu konkrétních opatření na snižování dopadů teplotních extrémů je stále nedostatečné a je třeba je dále studovat (Boeckmann, Rohn 2014).

Výzkum vztahů mezi proměnlivostí počasí a lidským zdravím má v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR zhruba 20letou tradici. Problematikou se zabývali pracovníci oddělení klimatologie v rámci několika projektů GA ČR řešených ve spolupráci se Státním zdravotním ústavem ČR, v poslední době také s Fakultou životního prostředí ČZU; aktuálně zde probíhá výzkum i v rámci mezinárodních aktivit Multi-City Multi-Country collaborative research network (MCC 2023) a COST Action PROCLIAS (PROCLIAS 2023). V následujícím textu předkládáme stručné shrnutí některých výsledků těchto projektů se zaměřením na i) časový vývoj dopadů extrémně vysokých teplot na úmrtnost v Praze a ČR a ii) skupiny obyvatelstva, kterých se zvýšené riziko úmrtnosti v důsledku horka týká nejvíce.

2. Data a metodika

2.1 Data

Pro analýzu vztahů mezi teplotou a úmrtností byla použita databáze zemřelých, kterou spravuje Ústav zdravotnických informací a statistiky ve spolupráci s Českým statistickým úřadem. Údaje o denním počtu zemřelých jsou k dispozici od roku 1982, podrobnější členění databáze s informacemi o pohlaví, věku, příčině smrti a trvalém bydlišti každého zemřelého až na úroveň okresu je k dispozici od roku 1994. Databáze dále



Obr. 1 Celková délka a intenzita vln veder v Praze v letech 1982–2019. Vlny veder jsou definovány jako alespoň dva po sobě jdoucí dny s průměrnou teplotou vyšší než 95. percentil rozdělení teploty od května do září za sledované období. Světlé sloupce znázorňují celkovou délku vln veder v daném roce, tmavé jejich intenzitu, tj. celkovou sumu odchylek teploty od 95. percentilu během vln veder v daném roce.

Fig. 1. Total duration and intensity of heat waves (at least two consecutive days with average temperatures higher than the 95th percentile of the temperature probability distribution during May–September over the study period) in Prague 1982–2019. The light columns represent the total duration of heat waves in a given year, while the dark ones represent their intensity, i.e., the total sum of temperature deviations from the 95th percentile during heat waves in the given year.

obsahuje informace o státní příslušnosti, vzdělání a rodinném stavu zemřelého v době úmrtí. Průměrné denní teploty vzduchu pro zájmové území (Prahu nebo ČR) byly spočítané z vybraných meteorologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (viz obr. 1 ve studii Vésiera a Urbana 2023).

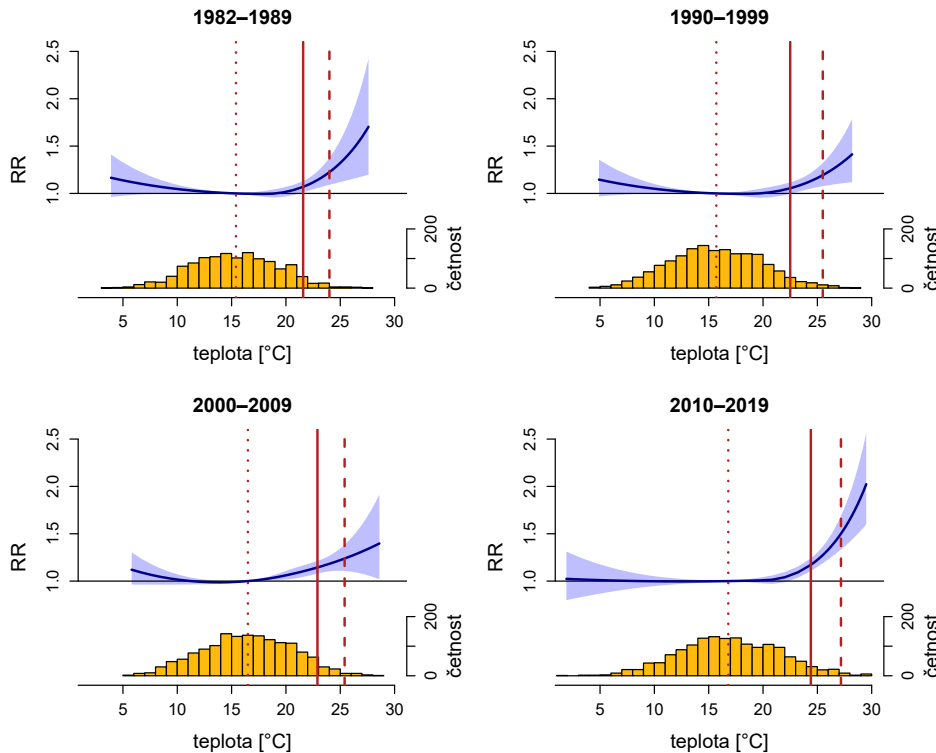
2.2 Metody

Pro statistické vyhodnocení míry rizika úmrtnosti v důsledku horka byly použity regresní modely s Poissonovým rozdělením, pomocí kterých bylo možné v rámci jednoho modelu ošetřit časové řady úmrtnosti o dlouhodobé a sezónní trendy a zároveň analyzovat vliv krátkodobé proměnlivosti teploty (Bhaskaran et al. 2013). V níže prezentovaných studiích jsme použili jmenovitě zobecněné aditivní modely (GAM, Wood 2006) kombinované s nelineárním modelem zpožděného vlivu (DLNM, Gasparrini 2011). Hlavním výstupem těchto modelů je hodnota relativního rizika (RR) úmrtnosti, která udává relativní změnu pravděpodobnosti úmrtí při dané teplotě oproti mediánu rozdělení teploty. Jako prahovou teplotu pro definici horka v našich studiích používáme 95. percentil rozdělení teploty vzduchu v období květen–září; hodnotu RR vztahujeme k 99. percentilu tohoto rozdělení v souladu s běžně používaným přístupem (Vicedo-Cabrera et al. 2018a; Achebak et al. 2019). Díky využití DLNM metodiky zahrnuje hodnota RR i zpožděný vliv teploty na úmrtnost (viz Kyselý 2004; Qiao et al. 2015). Na základě vypočteného RR je následně možné určit počet (a podíl) úmrtí v důsledku horka z celkového počtu úmrtí v daném období.

3. Výsledky a diskuse

Většina studií z rozvinutých zemí prokázala klesající riziko úmrtnosti související s horkem během druhé poloviny 20. století (Hondula et al. 2015; Arbutnott et al. 2016; Sheridan, Allen 2018; Vicedo-Cabrera et al. 2018a; Achebak et al. 2019). Tyto studie však také ukazují, že klesající trend postupně zpomaloval, v některých případech už od konce 90. let 20. století. V souladu s tím jsou i poznatky z dřívějších prací týkajících se české populace. Časové změny úmrtnosti v důsledku horka jsme jako první v ČR systematicky zkoumali ve studii Kyselého a Plavcové (2012), která prokázala významný pokles zhruba o 5 % za 10 let. Za hlavní důvody snižujících se dopadů lze pokládat zlepšení zdravotních služeb a celkové životní úrovně v souvislosti se společenskými změnami po r. 1989, vedoucí ke zlepšení zdravotního stavu populace, a v neposlední řadě zvýšené povědomí veřejnosti o rizicích souvisejících s horkem. Zpomalení klesajícího trendu v souladu se zahraničními studiemi potvrdila i studie Urbana et al. (2020), ve které jsme také zaznamenali pokles rizika úmrtnosti v důsledku horka (mezi lety 1994 a 2017), avšak pozvolnějším tempem – pouze 3 % za 10 let.

Tento trend potvrdila i poslední obdobná analýza, ve které jsme zjišťovali změny ve vztahu mezi horkem a úmrtností na 38 let dlouhé časové řadě v Praze (1982–2019, Urban et al. 2022). Takto dlouhá časová řada nám umožnila rozdělit data do čtyř dekad (obr. 2) a vzít tak v úvahu vliv postupné aklimatizace společnosti na rostoucí teploty. Výsledky i přesto prokázaly zastavení klesajícího trendu rizika úmrtnosti v důsledku horka na přelomu tisíciletí, a naopak rostoucí trend v posledních dvou dekadách (2000–2019; obr. 3). Tento nárůst byl způsoben již zmíněnou vzrůstající četností intenzivních vln veder v ČR v druhé polovině sledovaného období (obr. 1). Nárůst rizika úmrtnosti se projevil zejména v posledním desetiletí (2010–2019), během něhož jsme zjistili v průměru

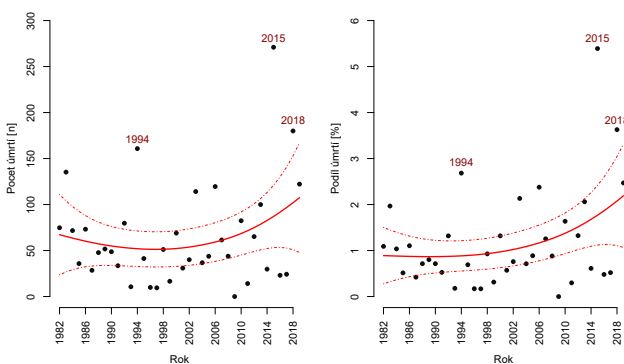


Obr. 2 Vztah mezi průměrnou denní teplotou vzduchu a rizikem úmrtí (RR) v Praze v teplé části roku (květen–září) pro jednotlivá období. Hodnota RR udává relativní změnu pravděpodobnosti úmrtí při dané teplotě oproti mediánu (tečkovaná červená čára) rozdělení teploty (RR = 1,0). Plná (čárkovaná) červená čára znázorňuje 95. (99.) percentil rozdělení teploty.

Fig. 2. Relationship between daily mean temperature and the risk of death (RR) in Prague during the warm part of the year (May–September) for individual periods. The RR value indicates the relative change in the probability of death at a given temperature compared to the median (dashed red line) of the temperature probability distribution (RR = 1.0). The solid (dashed) red line represents the 95th (99th) percentile of the temperature probability distribution.

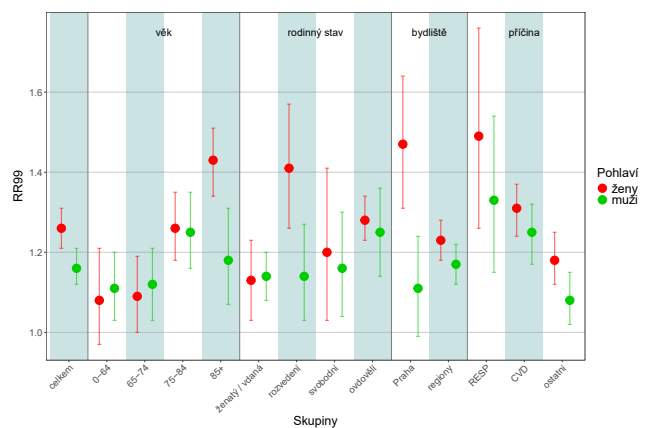
90 úmrtí v důsledku horka (2 % z celkového počtu zemřelých) v období květen–září ve srovnání s 50 úmrtími (1 %) v prvních třech dekadách (1982–2009). Rekordní počet úmrtí v důsledku horka byl zaznamenán v roce 2015. Tehdy v Praze (ČR) dosáhl více než 250 (770; Urban et al. 2020), což činilo více než 5 % všech úmrtí od května do září ve stejném roce (obr. 3).

Ve studii Urban et al. (2022) jsme analyzovali data pro Prahu, která představuje oblast s nejvýznamnějšími dopady horka na úmrtnost v rámci ČR (Jánoš et al. 2023). Již dřívější práce prokázaly, že fyzicko-geografické podmínky (průměrná letní teplota, nadmořská výška) a míra urbanizace (hustota osídlení, procento nepropustného povrchu), posilující tzv. efekt městského tepelného ostrova (Skalák et al. 2015), souvisí s vyšším rizikem úmrtnosti v důsledku horka ve velkých městech, zejména v Praze (Urban et al. 2014; Urban et al. 2016). Další studie navíc naznačují, že vysoké koncentrace rizikových skupin obyvatel (starší, chronicky nemocní, ovdovělí) představují důležitý aspekt zvýšené úmrtnosti z horka ve městech (Gronlund et



Obr. 3 Počet úmrtí (vlevo) souvisejících s horkem (ve dnech s průměrnou denní teplotou vyšší než 95. percentil rozdělení teploty během období květen–září) a jejich procentuální podíl na celkovém počtu úmrtí (vpravo) v Praze v období květen–září v letech 1982–2019. Červená křivka znázorňuje odhad nelineárního trendu dopadu extrémního horka na úmrtnost. Letopočty jsou zvýrazněny roky s nejvyšším počtem úmrtí v důsledku horka za sledované období.

Fig. 3. Number of heat-attributable deaths (on days with daily mean temperatures higher than the 95th percentile of the temperature probability distribution in May–September) (left) and their percentage of the total number of deaths (right) in Prague in May–September, 1982–2019. The red curve represents an estimate of the nonlinear trend in the impact of extreme heat on mortality. The years with the highest number of heat-attributable deaths during the study period are highlighted in red.



Obr. 4 Relativní riziko úmrtí pro 99. percentil rozdělení teploty vzduchu v období květen–září (RR99) zvláště pro ženy (červeně) a muže (zeleně) v ČR v závislosti na věku, rodinném stavu, bydlišti (regiony = všechny kraje mimo Prahu) a primární příčině úmrtí podle listu zemřelého (RESP = respirační onemocnění, CVD = kardiovaskulární, ostatní = ostatní příčiny).

Fig. 4. Relative risk of death for the 99th percentile of the air temperature probability distribution in May–September (RR99), separately for women (red) and men (green) in the Czech Republic. The results are divided by age (věk), marital status (rodinný stav, displayed in the following order from left: married, divorced, single, widowed), place of residence (bydliště, regiony = all regions except Prague), and primary cause of death according to the death certificate (RESP = respiratory diseases, CVD = cardiovascular diseases, ostatní = other causes).

al. 2015). Tento poznatek potvrzují i výsledky nejnovější analýzy (Vésier, Urban 2023), které dokládají významně vyšší riziko úmrtnosti v důsledku horka u obyvatel Prahy oproti ostatním regionům, a to zejména v případě žen (obr. 4).

Stejná studie potvrdila již dříve pozorované vyšší riziko úmrtnosti v důsledku horka u žen ve srovnání s muži (Kyselý et al. 2011; Hanzlíková et al. 2015), obecný nárůst rizika s věkem (Kyselý et al. 2011; Arbuthnott, Hajat 2017) a nejvyšší riziko úmrtí u osob s chronickým respiračním a kardiovaskulárním onemocněním (Hanzlíková et al. 2015; Arbuthnott, Hajat 2017). Z hlediska rodinného stavu bylo nejnižší riziko pozorováno u osob žijících v manželském (příp. partnerském) svazku oproti svobodným, ovdovělým a rozvedeným. Jedním ze zajímavých výsledků studie bylo zjištění významně vyššího rizika úmrtí v důsledku horka u rozvedených žen ve srovnání s rozvedenými muži i ostatními skupinami podle rodinného stavu (obr. 4). Vzhledem k tomu, že socioekonomická deprivace je často uváděna jako rizikový faktor výskytu chronických onemocnění, a tudíž zvyšující riziko úmrtnosti v důsledku horka (Lago et al. 2018; McMaughan et al. 2020), naše výsledky podporují hypotézu, že kromě fyziologických a demografických rozdílů (Kenney, Munce 2003; Yanovich et al. 2020) mohou vyšší riziko úmrtí u žen ve srovnání s muži způsobovat i nerovnosti v socioekonomickém postavení (Breil et al. 2021; Vésier, Urban 2023; Jánoš et al. 2023). Pro potvrzení této hypotézy by bylo třeba analyzovat riziko úmrtí v důsledku horka na základě podrobnějších indikátorů socioekonomického postavení zemřelého (jako jsou vzdělání či výše příjmu). Takové informace ovšem nejsou v úmrtnostních datech evidovány, nebo nebyly za studované období zaznamenávány dostatečně konzistentně (např. údaj o vzdělání, viz Vésier, Urban 2023). Výsledky proto poukazují na kritický nedostatek relevantních informací v individuálních datech o zemřelých, které by umožnily lépe identifikovat zranitelné skupiny populace (nejen) vůči extrémnímu horku a zacílit na ně potřebná preventivní opatření.

Mezi taková opatření patří dlouhodobá adaptace měst a obcí na vlny veder formou volby vhodných stavebních postupů v rámci územního rozvoje, které zabráňují zbytečnému přehřívání sídel v letních měsících a poskytují dostatečnou ochranu obyvatelstvu před horkem. Kromě dlouhodobých kroků města a regiony v teplejších klimatických oblastech zavádějí akční plány pro zmírnění dopadů vln veder na zdraví obyvatel (McGregor 2015). Takové plány v případě vyhlášení výstrahy na vysoké teploty či vlny veder jasně stanovují postupy napříč resorty zaměřené na zmírnění dopadů, a přispívají tak ke snížení počtů úmrtí u zranitelných skupin populace během těchto epizod (Martínez-Solanas, Basagaña 2019).

4. Závěr

Vlny veder se řadí k nejrizikovějším meteorologickým jevům v Evropě z hlediska dopadu na úmrtnost. V souvislosti s probíhající změnou klimatu dochází k nárůstu četnosti a intenzity těchto období i ve střední Evropě. Naše výsledky jako jedny z prvních v Evropě ukazují změnu doposud klesajícího trendu rizika úmrtnosti v důsledku horka (vlivem příznivého socioekonomického vývoje) na rostoucí trend. Tento zvrát je zapříčiněn významným nárůstem četnosti a intenzity vln veder v oblastech střední a východní Evropy v minulé dekádě a zároveň i rostoucí zranitelností populace ČR kvůli jejímu stárnutí.

Jelikož se střední a východní Evropa řadí k regionům s největším nárůstem intenzity teplotních extrémů v rámci kontinentu, je třeba pokračovat ve výzkumu dopadů extrémních teplot na lidské

zdraví, pokusit se lépe porozumět mechanismům, kterými se společnost adaptuje na změnu klimatu, a implementovat účinnější opatření na ochranu zdraví obyvatel před těmito dopady.

Poděkování:

Děkujeme za podporu GA ČR prostřednictvím projektu 22-24920S. Dále děkujeme doc. B. Křížovi (in memoriam), dr. J. Kynčlovi a dr. M. Malému ze Státního zdravotního ústavu ČR za dlouhodobou spolupráci a pomoc s přípravou a interpretací epidemiologických dat.

Literatura:

- ACHEBAK, H., DEVOLDER, D., BALLESTER, J., 2019. Trends in temperature-related age-specific and sex-specific mortality from cardiovascular diseases in Spain: a national time-series analysis. *Lancet Planetary Health*, roč. **3**, s. e297–e306. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30090-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30090-7)
- ARBUTHNOTT, K. G., HAJAT, S., 2017. The health effects of hotter summers and heat waves in the population of the United Kingdom: a review of the evidence. *Environmental Health*, roč. **16**, s. 119. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0322-5>.
- ARBUTHNOTT, K. G., HAJAT, S., HEAVISIDE, C., VARDOULAKIS, S., 2016. Changes in population susceptibility to heat and cold over time: assessing adaptation to climate change. *Environmental Health*, roč. **15**, s. 73–93. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0102-7>.
- BHASKARAN, K., GASPARRINI, A., HAJAT, S. et al., 2013. Time series regression studies in environmental epidemiology. *International Journal of Epidemiology*, roč. **42**, s. 1187–1195. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ije/dyt092>.
- BOBB, J. F., PENG, R. D., BELL, M. L., DOMINICI, F., 2014. Heat-Related Mortality and Adaptation to Heat in the United States. *Environmental Health Perspective*, roč. **122**, s. 811–816. Dostupné z: <https://doi.org/10.1289/ehp.1307392>.
- BOECKMANN, M., ROHN, I., 2014. Is planned adaptation to heat reducing heat-related mortality and illness? A systematic review. *BMC Public Health*, roč. **14**, s. 1–13. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-1112>.
- BREIL, M., ZANDERSEN, M., PISHMISHEVA, P. et al., 2021. 'Leaving No One Behind' in climate resilience policy and practice in Europe: Overview of knowledge and practice for just resilience. Technical Paper 2021/2. Dostupné z: https://doi.org/10.25424/CMCC/JUSTTRANS_EUROPE.
- CCAG (Climate Crisis Advisory Group), 2022. Record-breaking heatwave will be an average summer by 2035, latest Met Office Hadley Centre data shows [cit. 28. 9. 2022].
- GASPARRINI, A., 2011. Distributed lag linear and non-linear models in R: The Package dlnm. *Journal of Statistical Software*, roč. **43**, s. 1–20. Dostupné z: <https://doi.org/10.18637/jss.v043.i08>.
- GASPARRINI, A., GUO, Y., SERA, F. et al., 2017. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planetary Health*, roč. **1** s. e360–e367. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30156-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0).
- GRONLUND, C. J., BERROCAL, V. J., WHITE-NEWSOME, J. L. et al., 2015. Vulnerability to extreme heat by socio-demographic characteristics and area green space among the elderly in Michigan, 1990–2007. *Environmental Research*, roč. **136**, s. 449–461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.08.042>.
- GUERREIRO, S. B., DAWSON, R. J., KILSBY, C. et al., 2018. Future heatwaves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, roč. **13**, s. 034009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>.
- HANZLÍKOVÁ, H., PLAVCOVÁ, E., KYNČL, J. et al., 2015. Contrasting patterns of hot spell effects on morbidity and mortality for cardiovascular diseases in the Czech Republic, 1994–2009. *Internatio-*

- nal Journal of Biometeorology*, roč. **59**, s. 1673–1684. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0974-1>.
- HONDULA, D. M., BALLING, R. C., VANOS, J. K., GEORGESCU, M., 2015. Rising temperatures, human health, and the role of adaptation. *Current Climate Change Reports*, roč. **1**, s. 144–154. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0016-4>.
- HOY, A., HÄNSEL, S., MAUGERI, M., 2020. An endless summer: 2018 heat episodes in Europe in the context of secular temperature variability and change. *International Journal of Climatology*, roč. **40**, s. 6315–6336. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.6582>.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- JÁNOŠ, T., BALLESTER, J., ČUPR, P., ACHEBAK, H., 2023. Countrywide analysis of heat- and cold-related mortality trends in the Czech Republic: growing inequalities under recent climate warming. *International Journal of Epidemiology*, s. 1–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ije/dyad141>.
- KENNEY, W. L., MUNCE, T. A., 2003. Invited Review: Aging and human temperature regulation. *Journal of Applied Physiology*, roč. **95**, s. 2598–2603. Dostupné z: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00202.2003>.
- KYSELÝ, J., 2004. Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic *International Journal of Biometeorology*, roč. **49**, s. 91–97. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0218-2>.
- KYSELÝ, J., PLAVCOVÁ, E., HANZLÍKOVÁ, H., KYNČL, J., 2011. Comparison of hot and cold spell effects on cardiovascular mortality in individual population groups in the Czech Republic. *Climate Research*, roč. **49**, s. 113–129. Dostupné z: <https://doi.org/10.3354/cr01014>.
- KYSELÝ, J., PLAVCOVÁ, E., 2012. Declining impacts of hot spells on mortality in the Czech Republic, 1986–2009: adaptation to climate change? *Climatic Change*, roč. **113**, s. 437–453. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0358-4>.
- LAGO, S., CANTARERO, D., RIVERA, B. et al., 2018. Socioeconomic status, health inequalities and non-communicable diseases: a systematic review. *Journal of Public Health*, roč. **26**, s. 1–14. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10389-017-0850-z>.
- LAY, C. R., SAROFIM, M. C., VODONOS ZILBERG, A. et al., 2021. City-level vulnerability to temperature-related mortality in the USA and future projections: a geographically clustered meta-regression. *Lancet Planetary Health*, roč. **5**, s. e338–e346. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00058-9).
- LEE, J. Y., KIM, H., GASPARRINI, A. et al., 2019. Predicted temperature-increase-induced global health burden and its regional variability. *Environment International*, roč. **131**, s. 105027. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105027>.
- LHOTKA, O., KYSELÝ, J., FARDA, A., 2018. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and Applied Climatology*, roč. **131**, s. 1043–1054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2031-3>.
- LHOTKA, O., KYSELÝ, J., 2022. The 2021 European heat wave in the context of past major heat waves. *Earth and Space Science*, roč. **9**, s. 1–12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2022EA002567>.
- MARTÍNEZ-SOLANAS, È., BASAGAÑA, X., 2019. Temporal changes in temperature-related mortality in Spain and effect of the implementation of a heat health prevention plan. *Environmental Research*, roč. **169**, s. 102–113. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.006>.
- MCC, 2023. Multi-Country Multi-City (MCC) Collaborative Research Network. [cit. 9. 11. 2023]. Dostupné z: <https://mccstudy.lshtm.ac.uk/>.
- McGREGOR, G., BASEMOULIN, P., EBI, K., MENNE, B. et al., 2015. Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development; WMO-No. 1142; World Meteorological Organization and World Health Organization: Geneva, Switzerland, ISBN 978-92-63-11142-5.
- McMAUGHAN, D. J., OLORUNTOBA, O., SMITH, M. L., 2020. Socioeconomic status and access to healthcare: interrelated drivers for healthy aging. *Frontiers of Public Health*, roč. **8**, s. 231. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00231>.
- PROCLIAS, 2023. Process-based models for climate impact attribution across sectors. COST Action CA19139 [cit. 9. 11. 2023]. Dostupné z: <https://proclias.eu/>.
- QIAO, Z., GUO, Y., YU, W., TONG, S., 2015. Assessment of short- and long-term mortality displacement in heat related mortality. *Environmental Health Perspectives*, roč. **123**, s. 766–773. Dostupné z: <https://doi.org/10.1289/ehp.1307606>.
- SHERIDAN, S., ALLEN, M., 2018. Temporal trends in human vulnerability to excessive heat. *Environmental Research Letters*, roč. **13**, s. 043001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab214>.
- SKALÁK, P., ŽÁK, M., ZAHRADNÍČEK, P., HELMAN, K., 2015. Příspěvek projektu UHI k poznání klimatu Prahy. *Meteorologické zprávy*, roč. **68**, č. 1, s. 18–23. ISSN 0026-1173.
- URBAN, A., DAVÍDKOVÁ, H., KYSELÝ, J., 2014. Heat- and cold-stress effects on cardiovascular mortality and morbidity among urban and rural populations in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*, roč. **58**, s. 1057–1068. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0693-4>.
- URBAN, A., BURKART, K., KYSELÝ, J., SCHUSTER, C. et al., 2016. Spatial patterns of heat-related cardiovascular mortality in the Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, roč. **13**, s. 284. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijerph13030284>.
- URBAN, A., KYSELÝ, J., PLAVCOVÁ, E. et al., 2020. Temporal changes in years of life lost associated with heat waves in the Czech Republic. *Science of The Total Environment*, Vol. **716**, s. 137093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137093>.
- URBAN, A., FONSECA-RODRÍGUEZ, O., DI NAPOLI, C., PLAVCOVÁ, E., 2022. Temporal changes of heat-attributable mortality in Prague, Czech Republic, over 1982–2019. *Urban Climate*, roč. **44**, s. 101197. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101197>.
- VĚSIER, C., URBAN, A., 2023. Gender inequalities in heat-related mortality in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*, roč. **67**, s. 1373–1385. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02507-2>.
- VICEDO-CABRERA, A. M., SERA, F., GUO, Y. et al., 2018a. A multi-country analysis on potential adaptive mechanisms to cold and heat in a changing climate. *Environment International*, roč. **111**, s. 239–246. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.006>.
- VICEDO-CABRERA, A.M., SERA, F., HEAVISIDE, C., et al., 2018b. Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. *Climatic Change*, roč. **150**, s. 391–402. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2274-3>.
- WOOD, S., 2006. Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman & Hall/CRC. ISBN 978-1-3-153-7027-9.
- XU, P., WANG, L., LIU, Y. et al., 2020. The record-breaking heat wave of June 2019 in Central Europe. *Atmospheric Science Letters*, roč. **21**, s. e964. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/asl.964>.
- YANOVICH, R., KETKO, I., CHARKOUDIAN, N., 2020. Sex differences in human thermoregulation: Relevance for 2020 and Beyond. *Physiology*, roč. **35**, s. 177–184. Dostupné z: <https://doi.org/10.1152/physiol.00035.2019>.

Lektoři (Reviewers):
Mgr. Martin Novák, RNDr. Radim Tolasz, Ph.D.

Pokrok ve vývoji systémů pro předpověď stavu a teploty na silničních komunikacích

Progress in the development of road condition and temperature forecasting systems

Petr Zacharov

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401
141 31 Praha 4
✉ petas@ufa.cas.cz

Vojtěch Blížňák

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401
141 31 Praha 4

Forecasting the road surface condition is a key forecast for road maintenance to take action in time when dangerous winter phenomena occur. The Institute of Atmospheric Physics of the Czech Academy of Sciences in close cooperation with the Czech Hydrometeorological Institute have developed in several joint projects the forecast of road surface temperature and condition of Czech roads both in the form of point forecasts at the locations of road weather stations on the Czech road network and in the form of line forecasts of road surface temperature and condition of selected roads in Prague (ICEWARN system) and most of the Czech motorways (FROST system). The line forecasts use unique information about objects in the close vicinity of the motorway to calculate the potential shading of the road surface from the sun's rays. In the FROST system, for the first three hours, the time extrapolation of satellite cloud cover measurements is used instead of cloud cover forecasted by the ALADIN numerical weather prediction model. All outputs of these forecasts are operatively available at the central forecasting office of the Czech Hydrometeorological Institute.

KLÍČOVÁ SLOVA: meteorologie silniční – družice meteorologická – systém předpovědní

KEYWORDS: road meteorology – meteorological satellite – forecasting system

1. Úvod

Včasný zásah údržby silnic dokáže v zimním období předejít mnoha dopravním nehodám s velkými škodami na majetku, nebo dokonce na lidských životech. Takový zásah je ale nutné plánovat včas dopředu díky kvalitní předpovědi počasí a také

díky předpovědi teploty a stavu povrchu silnic. Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i. ve spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavem použil v roce 2012 kanadský model METRO (Model of the Environment and Temperature of Roads; Crevier a Delage 2001; Sokol et al. 2014; Sokol et al. 2017) na predikci stavu a povrchu vozovky v bodech silničních meteorologických měření. Model METRO, založený na řešení rovnice vedení tepla vozovkou a energetické bilance na povrchu vozovky, využívá pro předpověď aktuální data měření na silničních stanicích a operativní výstupy numerického modelu předpovědi počasí ALADIN. Původní model METRO se v různých úpravách používá i v zahraničí (např. Karanko et al. 201; Kršmanc et al. 2012)

Přizpůsobení původního modelu METRO na české podmínky METRO-CZ si časem vyžádalo zásadní změny přepsáním kódu, doplněním vlivu zastínění apod. takové míry, že je současný model používán s označením FORTE (Forecast Of Road Temperature and condition). V návazném projektu ICEWARN byl výpočet modelu rozšířen na liniovou předpověď pro hlavní pražské komunikace s využitím zastínění povrchu před přímým slunečním zářením. V projektu bylo zjištěno, že významnou chybu předpovědi teploty povrchu silnic způsobuje častá chyba v předpovědi zejména nízké oblačnosti numerickým předpovědním (NWP) modelem ALADIN. V navazujícím projektu FROST byla tedy předpověď doplněna o využití časové extrapolace družicových měření oblačnosti na několik hodin dopředu, která se využívá místo prvních hodin předpovědi množství oblačnosti modelem ALADIN.

V předkládaném článku představíme nejdříve model FORTE, dále předpovědní systém ICEWARN a vliv zastínění na teplotu vybrané pražské vozovky, a nakonec předpovědní systém FROST s využitím časové extrapolace družicových měření oblačnosti pro předpověď stavu a teploty povrchu českých dálnic.

2. Model FORTE a popis vstupních dat

Model FORTE patří do skupiny 1D fyzikálních modelů počítajících předpověď stavu a teploty povrchu vozovky na základě řešení rovnice přenosu tepla a energetické bilance a skládá se ze tří hlavních kroků: (i) inicializace, při níž se vypočítá počáteční teplotní profil vozovky; (ii) coupling, který umožňuje modelu FORTE přizpůsobit předpověď NWP modelu skutečným pozorováním na silničních meteorologických stanicích; a (iii) volná předpověď teploty a stavu povrchu vozovky. Pro přípravu počátečních a okrajových podmínek využívá model dvojí typ vstupních dat – měření na silničních meteorologických stanicích a prognostické údaje získané integrací NWP modelu ALADIN.

Silniční meteorologické stanice rovnoměrně pokrývají hlavní silniční komunikace v České republice a jejich měření zahrnují teplotu a vlhkost vzduchu ve výšce 2 m (v reálných podmínkách kvůli znečištění vlivem silničního provozu měření často ve 3–4 m), rychlost větru ve výšce 10 m, teplotu a stav povrchu vozovky a tzv. prognózní stanice i teploty v hloubce 5 a/nebo 30 cm pod povrchem vozovky. Frekvence zasílání naměřených údajů se na jednotlivých stanicích liší a obvykle se pohybuje mezi 1 a 30 minutami. Po přijetí naměřených dat probíhá před vlastním spuštěním modelu standardní korekční procedura, jejímž cílem je kontrola a případná oprava naměřených dat dle údajů změřených na sousedních silničních stanicích. Pokud nejsou v době startu modelu FORTE k dispozici naměřené údaje o teplotě vzduchu, vlhkosti nebo větru, odhadují se jejich hodnoty interpolací prognostických údajů ALADIN v čase (lineární interpolace) a prostoru (bilinéární interpolace).

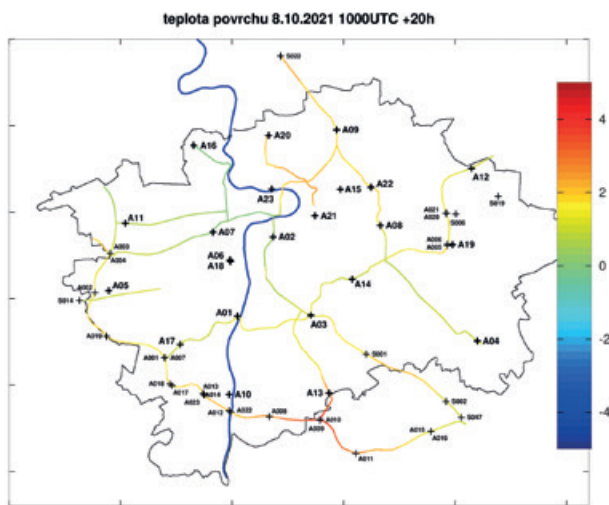
NWP model ALADIN je nehydrostatický model, který je integrován čtyřikrát denně (00:00, 06:00, 12:00 a 18:00 UTC) s horizontálním rozlišením přibližně 2,3 km a 87 vertikálními hladinami (Brožková a kol. 2019). Doba předpovědi modelu je 72 hodin (pro start předpovědi v 18:00 UTC je délka předpovědi pouze 54 h), ovšem pro účely předpovědi povrchové teploty a stavu vozovky je modelem FORTE využíváno pouze prvních 30 hodin. Následující prognostické proměnné představují vstupní data do silničního modelu: teplota a relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m, rychlost větru ve výšce 10 m, tlak

v modelové orografii, pokrytí oblohy oblaky a množství a typ srážek. Předpovědi NWP modelu jsou kvůli couplingu zpožděny o 6 až 11 hodin v době startu silničního modelu a hodnoty prognostických proměnných jsou interpolovány ze sítě NWP modelu ALADIN do míst silničních stanic.

3. ICEWARN

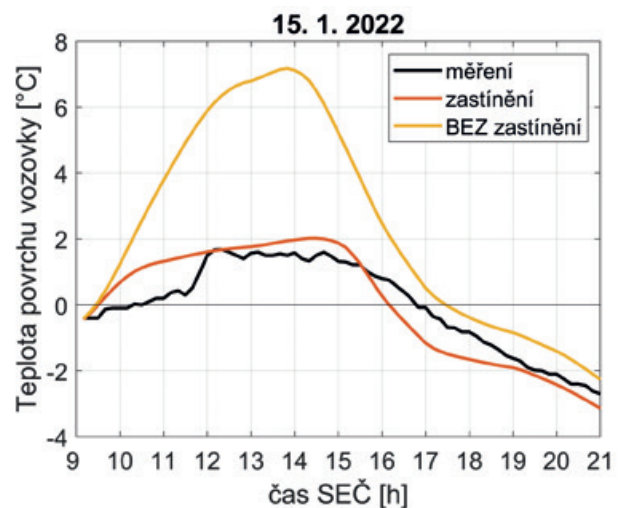
Předpovědní systém ICEWARN byl vyvinut v rámci projektu Operačního programu Praha – pól růstu (OPPPR) – Předpověď teploty a stavu povrchu silnic na území Prahy pro zimní období. Systém vytváří liniovou předpověď stavu a teploty povrchu vybraných pražských komunikací s nejvyšší prioritou zimní údržby. Do systému vstupují data z pražských i blízkých mimopražských silničních meteorologických stanic a tato měření jsou interpolována do sítě bodů pokrývajících vybrané vozovky. Systém je navržen tak, že v případě výpadku části měření využívá k interpolaci měření pouze dostupné stanice a je tedy schopen překlenout i výpadky několika měřících stanic. V případě výpadku všech stanic přiřazených vybrané komunikaci samozřejmě výpočet předpovědi pro danou komunikaci neproběhne. Jednotlivé body výpočtu se pak od sebe liší vypočteným zastíněním pro azimut a výšku Slunce během celého výpočetního období. Do každého výpočetního bodu je následně interpolovaná předpověď počasí modelem ALADIN. Dalším krokem je výpočet předpovědi modelem FORTE a vykreslení map předpovědi stavu a teploty povrchu na jednu až dvacet čtyři hodin dopředu (viz obrázek 1).

Zastínění povrchu vozovky může hrát ve dne zásadní roli ve vývoji teploty povrchu, a tedy v návaznosti i stavu povrchu. Přínos využití zastínění je zřetelný z obrázku 2, kde se chyby v předpovědi teploty povrchu vozovky v poledních hodinách



Obr. 1 Příklad termínové předpovědi teploty povrchu vybraných pražských silnic z 8. 10. 2021, start předpovědi v 10:00 UTC, délka předpovědi +20 h (čas předpovědi tedy 9. 10. 2021 06:00 UTC). Černá čára představuje hranici Prahy, tlustá modrá křivka je Vltava a teplota povrchu silnic ve stupních Celsia je zobrazena v legendě. Černé křížky představují využití silniční meteorologické stanice pro výpočet předpovědi (malé křížky jsou stanice ředitelství silnic a dálnic ČR, velké křížky jsou meteostanice Technické správy komunikací hl. m. Prahy).

Fig. 1. Example of a term forecast of the surface temperature of selected Prague roads from October 8, 2021, forecast start at 10:00 UTC, forecast lead time +20 h (forecast time is 06:00 UTC on October 9, 2021). The black line represents the border of Prague, the thick blue curve is the Vltava River and the road surface temperature in degrees Celsius is shown in the legend. The black crosses represent the road weather stations used to calculate the forecast (small crosses are the stations of the Directorate of Roads and Motorways of the Czech Republic, large crosses are the weather stations of the Technical Administration of Communications of the Capital City of Prague).



Obr. 2 Vliv využití zastínění na teplotu povrchu vozovky na stanici P029 v termínu 15. 1. 2022 a starty předpovědi 08:00–15:00 UTC. Tlustá černá křivka (viz legenda) znázorňuje měření teploty povrchu, oranžová čára představuje výpočet bez využití zastínění s polední odchylkou od měření okolo 4 °C, pro červenou křivku vidíme při využití zastínění značný pokles chyby na hodnotu okolo 0,5 °C.

Fig. 2. Effect of shading usage on road surface temperature at the P029 station on 15 January 2022 and forecast starts 08:00–15:00 UTC. The thick black curve (see legend) shows the surface temperature measurement, the orange line represents the calculation without shading with a noontime error of about 4 °C, for the red curve we see a significant decrease in error to about 0.5 °C when shading is used.

pohybují okolo čtyř stupňů Celsia, kdežto při využití zastínění se chyby předpovědi v téže situaci snížily na 0.5 °C. Zahnutí zastínění může zpřesnit i odhad času poklesu teploty pod bod mrazu. I když se nejedná o pražskou silniční stanic, je stanice P029 na 129. km dálnice D5 v zimě při nízké výšce Slunce z jižní strany významně zastíněna jehličnatým porostem na mírném návrší.

4. FROST

Předpovědní systém FROST počítá předpověď stavu a teploty povrchu českých dálnic obdobně, jako systém ICEWARN předpověď pro pražské silnice s tou výjimkou, že do systému FROST vstupuje navíc krátkodobá předpověď pokrytí oblohy oblačností získaná z časové extrapolace satelitního měření oblačnosti. Systém FROST počítá předpověď pro většinu českých dálnic tam, kde jsou dostupná data měření ze silničních meteorologických stanic. Stejně jako systém ICEWARN počítá předpověď v linii podél dálnice a jednotlivé body se od sebe odlišují informací o zastínění. Příklad předpovědi systému FROST je uveden na obrázku 3, kde je možné spatřit postupné chladnutí dálnic od západu a nebezpečí mrznoucího deště při přecházející studené frontě ze dne 18. 1. 2024.

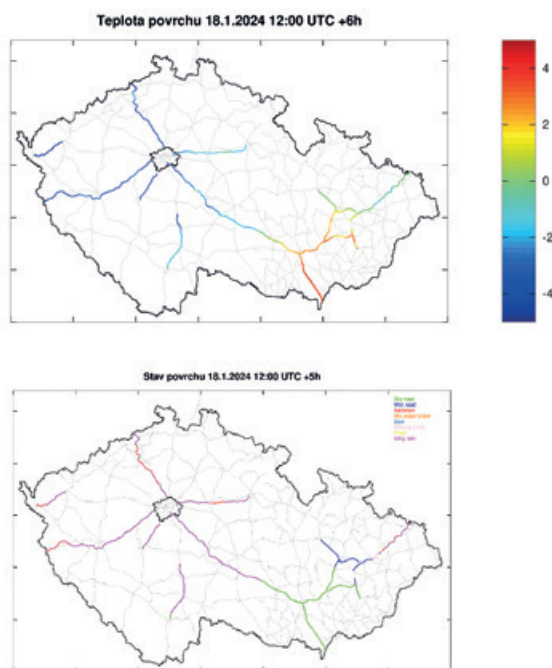
Extrapolované pokrytí oblohy oblaky využívané systémem FROST je odvozené z družicových měření meteorologické geostacionární družice Meteosat-11 (Meteosat druhé generace (MSG, z angl. Meteosat Second Generation)). Data MSG

jsou k dispozici každých 15 minut ve 12 spektrálních kanálech od viditelné po infračervenou část elektromagnetického spektra a jejich horizontální rozlišení nad Českou republikou je přibližně 4 × 6 km. Vyhodnocení, zda je daný gridový bod oblačný nebo bezoblačný, se zjišťuje pomocí algoritmu Cloud Mask (CMa), který je součástí softwaru NWC SAF (Satellite Application Facility on Support to Nowcasting & Very Short Range Forecasting) představujícího balík algoritmů pro výpočet odvozených družicových produktů z MSG, případně jiných družicových systémů. Detekce oblačnosti se provádí pomocí multispektrální prahové metody využívající kromě družicových dat i data z NWP modelu ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Pozorované hodnoty v jednotlivých spektrálních kanálech a jejich rozdíly jsou porovnávány s prahovými hodnotami, které vymezují jasové teploty/odrazivost pixelů bez oblačnosti od pixelů, které oblačnost obsahují. Tyto informace jsou pak extrapolovány pomocí produktu EXIM (Extrapolated Imagery), který na základě pohybového pole extrapoluje CMa (nebo jiný vybraný produkt) na předem definovanou dobu předpovědi. Celkové množství oblačnosti se pak vypočítá jako poměr počtu oblačných a bezoblačných pixelů ze čtverce 10 × 10 gridových bodů se středem nad uvažovaným pixelem.

Vliv extrapolovaného pokrytí oblohy oblaky na předpovídanou povrchovou teplotu vozovek byl experimentálně analyzován na dvouměsíčním období (prosinec 2021 – leden 2022) v místech měření silničních meteorologických stanic lokalizovaných na 4 českých dálnicích (D3, D5, D8 a D11). Předpovídané hodnoty povrchové teploty vozovek byly vyhodnoceny zvlášť pro modelový běh využívající množství oblačnosti odvozené z NWP modelu ALADIN a zvlášť pro běh využívající extrapolované množství oblačnosti z družicových měření pomocí střední chyby (ME) a střední kvadratické chyby (RMSE). Výsledky jsou prezentovány ve formě verifikačních matic (obr. 4), které zobrazují ME a RMSE zvlášť pro každý start modelového běhu (svíslá osa) a pro každou dobu předpovědi (vodorovná osa).

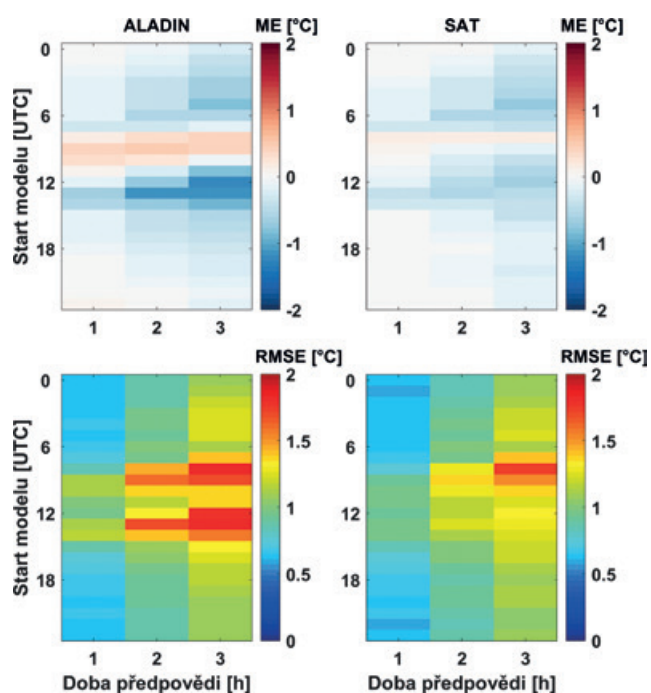
Z verifikačních matic vyplývá, že vliv extrapolované oblačnosti na přesnost předpovídané povrchové teploty je nejvíce patrný během dne (tj. mezi 08:00 a 16:00 UTC) a zejména pro 2. a 3. předpovídanou hodinu, kdy zlepšení předpovědi z hlediska RMSE dosahuje téměř 30 % a z hlediska ME přesahuje 50 %. Verifikační matice zobrazující chyby modelového běhu využívajícího množství oblačnosti z NWP modelu ALADIN ukazuje dvě problematická období v rámci denního cyklu. Prvním jsou ranní modelové starty mezi 08:00 a 10:00 UTC a dobou předpovědi 2–3 hodiny, kdy model nadhodnocuje předpovídané hodnoty povrchové teploty, druhým jsou pak odpolední časy startů modelu mezi 12:00 a 14:00 UTC a dobou předpovědi 2–3 hodiny, kdy zpravidla dochází k podhodnocení předpovědi.

Jedním z důvodů kladných hodnot odchylek z ranních startů může být absence vlivu zastínění v silničním modelu. Tento důvod však plně nevysvětluje skutečnost, že odpolední předpovědi, kdy stále převládá dopadající krátkovlnné záření, jsou podhodnoceny. Rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny nesprávnými informacemi o budoucím pokrytí oblohy oblaky, protože běh modelu s využitím extrapolované předpovědi oblačnosti tyto chyby snižuje a předpovídané hodnoty povrchových teplot se blíží pozorování jak v ranních, tak odpoledních hodinách. Jako příklad lze uvést běh modelu startující ve 12:00 UTC a dobou předpovědi 3 hodiny, kdy modelový běh s pokrytím oblohy oblaky z modelu ALADIN předpovídá v prů-



Obr. 3 Příklad termínové předpovědi teploty povrchu českých dálnic z 18. 1. 2024, start předpovědi ve 12:00 UTC, délka předpovědi +5 h (čas předpovědi tedy 18. 1. 2024 17:00 UTC). V horní části je barevně vyznačena teplota povrchu českých dálnic (viz legenda), v dolní části je uvedena předpověď stavu povrchu dálnic.

Fig. 3. Example of the Czech highway surface temperature forecast from 18 January 2024, forecast start at 12:00 UTC, forecast length +5 h (forecast time is 18 January 2024 17:00 UTC). In the upper part the surface temperature of Czech motorways is indicated in colour (see legend), in the lower part the forecast of the motorway surface condition is given.



Obr. 4 Průměrná chyba (horní řádek) a střední kvadratická chyba (spodní řádek) předpovědi povrchové teploty zprůměrované přes všechny stanice umístěné na vybraných dálnicích v období od prosince 2021 do ledna 2022. Levý sloupec představuje běh modelu využívající množství oblačnosti z NWP modelu (ALADIN), pravý sloupec pak množství oblačnosti odvozené z extrapolovaného družicového měření (SAT). Vertikální osa značí čas startu modelového běhu [UTC] a horizontální osa dobu předpovědi [h]. Střední chyba byla vypočtena jako předpověď – pozorování. Převzato z práce Bližňáka a kol. (2023).

Fig. 4. Mean Error (top row) and Root Mean Square Error (bottom row) of forecasted road surface temperature averaged over all stations located on selected motorways between December 2021 and January 2022. The left column represents a model run using cloud coverage from the NWP model (ALADIN), and the right column represents cloud coverage derived from extrapolated satellite measurements (SAT). The vertical axis denotes the model run start time [UTC] and the horizontal axis denotes the lead time [h]. The mean error was calculated as forecast – observation. Adapted from Bližňák et al. (2023).

měru o 1,18 °C méně než pozorování, zatímco model využívající extrapolované pokrytí oblohy oblaky z družicových měření jen o 0,66 °C.

Naproti tomu nejpřesnější hodnoty povrchových teplot jsou předpovídány modelovými běhy startující ve večerních hodinách (tj. 18:00–00:00 UTC), kdy povrch vozovky již není ovlivňován slunečním zářením a hlavním energetickým tokem je dlouhodobé vyzařování povrchu (Kršmanc et al. 2013). V nočních hodinách (tj. 00:00–06:00 UTC) jsou předpovědi povrchových teplot u obou modelových běhů velmi blízké (rozdíl RMSE je do 5 %), přičemž zcela převažuje jejich podhodnocení.

5. Závěr

V úzké spolupráci s ČHMÚ jsme vyvinuli předpovědní systém pro výpočet teploty a stavu povrchu českých vozovek v zimním období, který jednak zohledňuje možné zastínění povrchu před slunečními paprsky, a také využívá extrapolované družicové měření pro krátkodobou předpověď oblačnosti na

stanicích. Všechny výstupy předpovědí, tzn. bodové výstupy z modelu FORTE v některých stanicích silniční sítě i liniové předpovědi ze systému ICEWARN a nově i FROST, jsou k dispozici meteorologům v předpovědním centru ČHMÚ, a jsou tedy operativně využitelné pro předpověď stavu povrchu vozovek v zimním období pro silniční údržbu. Vybrané obrázky z aktuálních předpovědí jsou a další informace o projektech silniční meteorologie na ÚFA jsou dostupné na webových stránkách: <https://www.ufa.cas.cz/silnicni-meteorologie/>.

Poděkování:

Autoři článku děkují kolektivu spolupracovníků z ÚFA, tj. Zbyňku Sokolovi, Pavlu Sedlákovi, Petru Pešice a Jiřímu Hoškovi, a kolektivu spolupracovníků z ČHMÚ, tj. Martinovi Tomášovi, Jindřichu Štáskovi, Janu Šedivkovi a Janu Sulanovi, za práci na společných projektech, ze kterých vyústil tento přehledový článek. Děkujeme Technické správě komunikací Hl. m. Prahy a.s. a Ředitelství silnic a dálnic ČR za poskytnutá data. V neposlední řadě děkujeme Martinu Novákovi, Janu Sulanovi a Ondřeji Vlčkovi za přínosnou recenzi textu.

Literatura:

- BLIŽŇÁK, V., ZACHAROV, P., SOKOL, Z., PEŠICE, P., ŠTÁSTKA, J., SEDLÁK, P., 2023. Impact of satellite-derived cloud cover on road weather forecasts. *Atmospheric Research*, Vol. 292, 106887. ISSN 0169-8095. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106887>.
- BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, Vol. 72, s. 129–139. ISSN 0026-1173.
- CREVIER, L.-P., DELAGE, Y., 2001. METRo. A new model for road-condition forecasting in Canada. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 40, S. 2026–2037. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<2026:MANMFR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<2026:MANMFR>2.0.CO;2).
- KARANKO, S., ALANKO, I., MANNINEN, M., 2012. Integrating METRo into a winter maintenance weather forecast system covering Finland, Sweden and Russia. *Proceedings of SIRWEC 2012*, Helsinki, 23-25 May 2012. Dostupné na: <http://sirwec.org/wp-content/uploads/2022/04/Helsinki-51.pdf>.
- KRŠMANC, R., SLAK, A. Š., CARMAN, S., KOROŠEC, M., 2012. METRo model mesting at Slovenian road weather stations and suggestions for further improvements. *Proceedings of SIRWEC 2012*, Helsinki, 23-25 May 2012. Dostupné na: <http://sirwec.org/wp-content/uploads/2022/04/Helsinki-54.pdf>.
- KRŠMANC, R., SLAK, A. Š., DEMŠAR, J., 2013. Statistical approach for forecasting road surface temperature. *Meteorological Applications*, Vol. 20, s. 439–446. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/met.1305>.
- SOKOL, Z., ZACHAROV, P., SEDLÁK, P., HOŠEK, J., BLIŽŇÁK, V. et al., 2014. First experience with the application of the METRo model in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, Vol. 143, s. 1–16. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.017>.
- SOKOL, Z., BLIŽŇÁK, V., SEDLÁK, P., ZACHAROV, P., PEŠICE, P., ŠKUTHAN, M., 2017. Ensemble forecasts of road surface temperatures. *Atmospheric Research*, Vol. 187, s. 33–41. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.010>.

Recenzenti (Reviewers):

Mgr. Martin Novák, RNDr. Jan Sulan, Mgr. Ondřej Vlček

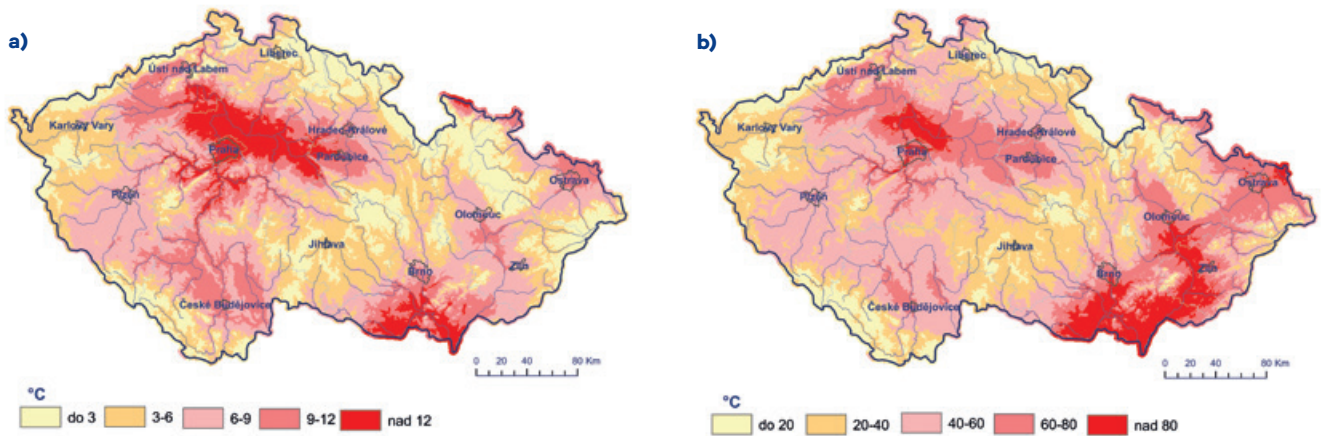
POČASÍ A ROSTLINY

Fenologický vývoj na území ČR v lednu a únoru 2024

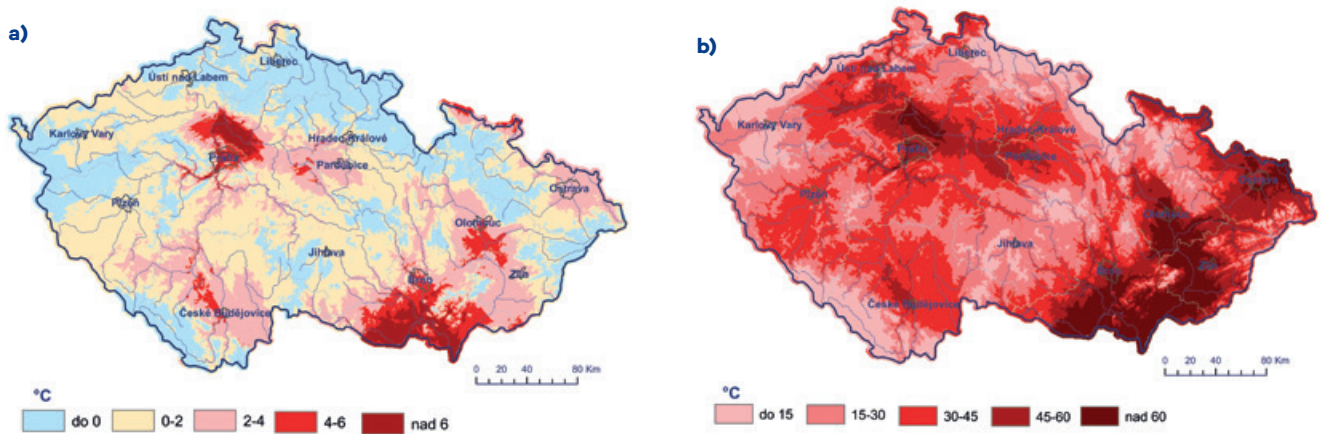
Podobně jako v předchozích letech, i v roce 2024 Vás budeme pravidelně informovat o stavu počasí a rostlin v České republice - z hlediska vývoje efektivní teploty vzduchu nad 5 °C, teploty

půdy v hloubce 10 cm, kumulativního úhrnu srážek a fenologického vývoje rostlin. V tomto čísle vyhodnotíme časové období od 1. ledna do 29. února 2024 (jedná se o přestupný rok). Při hodnocení vybraných charakteristik je používán normál 1991–2020.

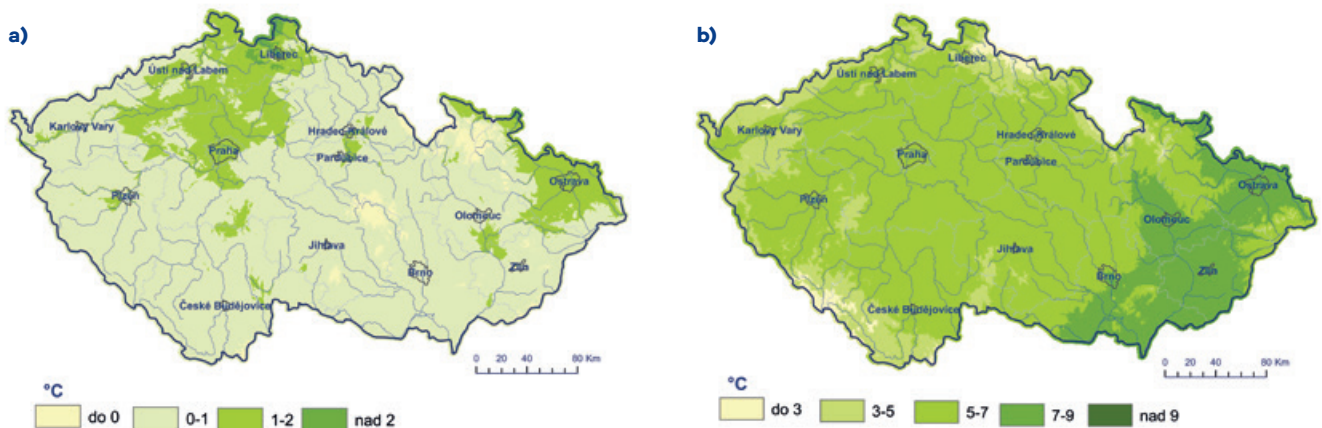
Celkovou sumu **efektivních teplot nad 5 °C** od 1. 1. 2024 do 31. 1. 2024 a 29. 2. 2024 a její srovnání s normálem 1991–2020 zobrazují následující mapy (obr. 1, 2). Absolutní hodnoty sumy efektivních teplot vzduchu nad 5 °C byly v roz-



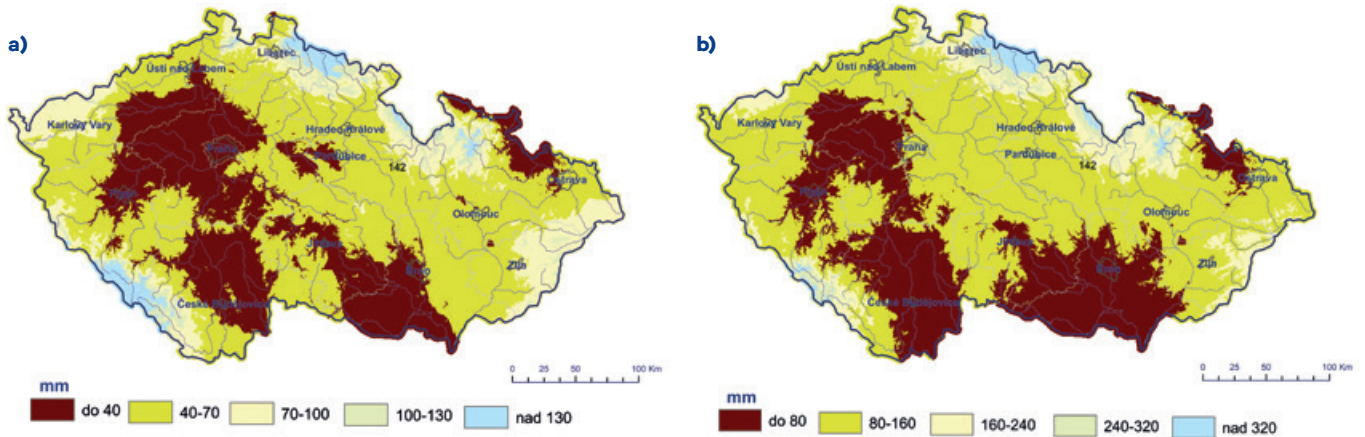
Obr. 1 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C od 1. 1. 2024 do 31. 1. 2024 (a) a do 29. 2. 2024 (b).



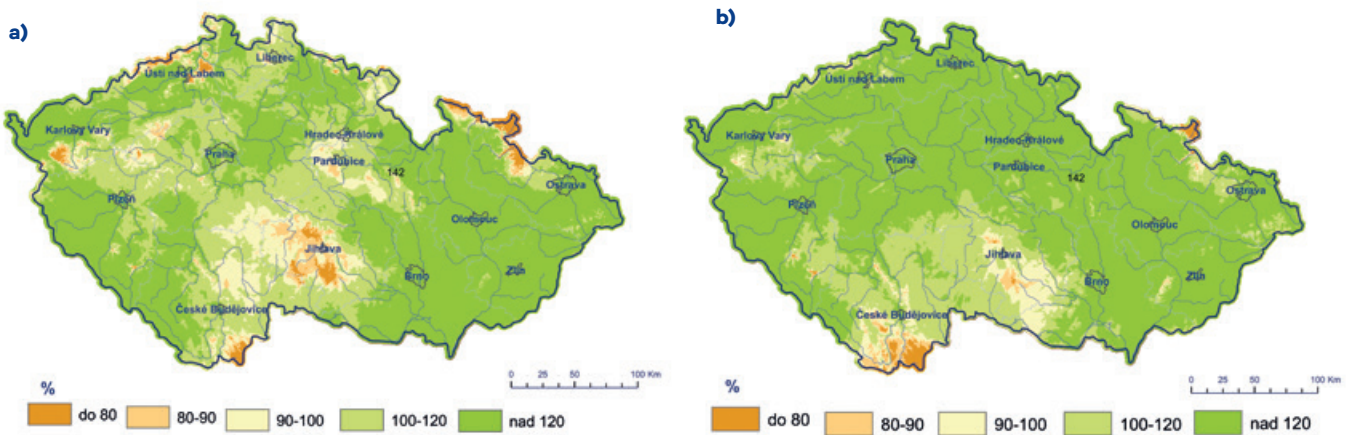
Obr. 2 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C – odchylka od normálu 1991–2020 od 1. 1. 2024 do 31. 1. 2024 (a) a do 29. 2. 2024 (b).



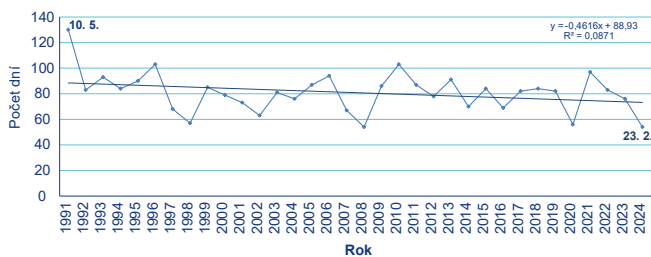
Obr. 3 Průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm dne 31. 1. 2024 (a) a 29. 2. 2024 (b).



Obr. 4 Kumulativní úhrn srážek k 31. 1. 2024 (a) a 29. 2. 2024 (b).



Obr. 5 Kumulativní úhrn srážek (procenta normálu 1991–2020) k 31. 1. 2024 (a) a 29. 2. 2024 (b).



Obr. 6 Modřín opadavý (*Larix decidua*), fenologická fáze butonizace, stanice Český Rudolec.

mezi do 3 °C a nad 80 °C. Odchyly od normálu 1991–2020 byly v lednu na některých lokalitách záporné, ale v únoru byly odchyly kladné na celém území ČR a pohybovaly se v rozmezí od 20 do 80 °C. Ve srovnání s rokem 2023 byly odchyly dvakrát větší (v roce 2023 byly odchyly od normálu v rozmezí 10–40 °C).

Průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm dne 31. 1. 2024 a 29. 2. 2024 je uvedena v obrázku 3. Hodnoty byly v lednu v rozmezí 0–2 °C, v únoru byly výrazně vyšší 3–9 °C (průměrná denní teplota půdy v 10 cm byla 28. 2. 2023 v rozmezí 1–3 °C). Dále byly velké teplotní rozdíly mezi východem a západem republiky, což se odrazilo i v teplotě půdy, jak dokládá připojená mapa.

Kumulativní úhrn atmosférických srážek od 1. 1. 2024 do 31. 1. 2024 a 29. 2. 2024 a procentické vyjádření normálu 1991–2020 jsou vykresleny na obrázku 4 a 5. Nejnižší kumulativní úhrn srážek (do 80 mm) byl zaznamenán zejména v zá-

padních, středních, jižních a částečně severních Čechách a na jižní Moravě. Ve srovnání kumulativních hodnot srážek s normálem 1991–2020 dosahovaly hodnoty na většině území 90 až 120 % normálu. Rok 2023 byl v tomto období výrazně sušší.

Začátek roku 2024 byl výrazně atypický z hlediska vývoje vegetace. V lednu byly rostliny ve vegetačním klidu, ale vzhledem k výrazně teplejšímu průběhu února (i leden byl teplejší než obvykle) se vegetace začala probouzet výrazně dříve. Fenologické předjaří začalo s 5týdenním předstihem! A s tím byl bohužel spojený i začátek pylové sezóny, která začala již v první dekádě února s rozkvetem lísky obecné. Ve třetí dekádě února byla pylová sezóna již v plném proudu, protože v krátkém časovém odstupu rozkvetly i olše, topoly, tisy a vrby. Na olších jsme zaregistrovali neobvykle vysoké množství jehněd. Na stanici Český Rudolec dokonce nastala butonizace modřínu již 23. 2. 2024 (obr. 6). A z jarních bylin jsme se v únoru mohli kochat květy sněženek a bledulí (ve středních polohách byly v plném květu), dále květy např. krokusy a čemeřice, a dokonce jsme již mohli vidět první květy podléšek, podbělů či narcisek a objevily se i první listy blatouchů a sasaneček. Zvětšovaly se pupeny dřeviny, kvetla kalina vonná, rozkvetaly zlatice a dřín, a začínal se olisňovat bez černý. A na jižní Moravě (Velké Pavlovice) a místy i v Praze začaly v posledním únorovém týdnu ojedinele rozkvétat meruňky.

Ve třetí dekádě února se již v přírodě vyskytla klíšřata! V dalším čísle Vám přineseme aktuální informace o vlivu počasí na vegetaci v březnu a dubnu 2024.

Lenka Hájková

Meteorologické zprávy

Meteorological
Bulletin

Odborný recenzovaný časopis se zaměřením na meteorologii, klimatologii, kvalitu ovzduší a hydrologii. Dvuměsíčník

Reviewed journal specialized in meteorology, climatology, air quality and hydrology. Bi-monthly

Vydavatel (redakce) – Publishers

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany

Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany, Czech Republic

e-mail: mz@chmi.cz, casmz.chmi.cz

Vedoucí redaktor – Chief Editor

R. Tolasz, Český hydrometeorologický ústav, Ostrava, Česká republika

Redaktor – Assistant Editor

H. Stehlíková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Redakční rada – Editorial Board

J. Bednář, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

R. Brožková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

R. Čekal, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Z. Horký, Praha, Česká republika

F. Hudec, Univerzita obrany, Brno, Česká republika

I. Hůnová, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

P. Huszár, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

M. Kašpar, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

K. Krška, Brno, Česká republika

M. Lapin, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovenská republika

F. Neuwirth, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Austria

L. Němec, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

V. Pastirčák, Bratislava, Slovenská republika

E. Plavcová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

D. Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

M. Setvák, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

J. Strachota, Praha, Česká republika

J. Sulan, Český hydrometeorologický ústav, Plzeň, Česká republika

F. Šopko, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

A. Vizina, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha, Česká republika

H. Vondráčková, Praha, Česká republika

V. Voženílek, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Česká republika

Abstracting and Indexing:

Meteorological and Geostrophysical Abstracts

Tisk:

COLORA PrintHouse s. r. o., Husova 373/29, 757 01 Valašské Meziříčí

CC BY-NC-ND

ISSN 0026-1173

ISSN 2788-3140 (on-line)

Registrační číslo MK ČR E 5107

© Meteorologické zprávy, Český hydrometeorologický ústav

Publikace vydané v nakladatelství ČHMÚ v roce 2023

1. **P. Sercl, M. Pecha, P. Novak, H. Kyznarova, O. Ledvinka, V. Svoboda, J. Danhelka: Flash Flood Indicator.** ISBN 978-80-7653-050-8 [online]. ISBN 978-80-7653-054-6 [tištěná]
2. **První konference PERUN.** Recenzovaný sborník příspěvků z konference. ISBN 978-80-7653-063-8 [online]
3. **V. Kodeš, R. Grabic, R. Kodešová: Metodika pro stanovení podmínek bezpečného využití vody a kalu z čistíren odpadních vod v zemědělství.** Certifikovaná metodika. ISBN 978-80-7653-064-5 [online]
4. **V. Kodeš, R. Kodešová, M. Ackermanová, R. Grabic: Mapy specifické zranitelnosti podzemních vod vybranými organickými mikropolutanty původem z odpadních vod a kalů.** Specializovaná mapa s odborným obsahem. ISBN 978-80-7653-065-2 [online]
5. **Seminář ACTRIS-CZ 2023.** Sborník abstraktů ze semináře. ISBN 978-80-7653-062-1 [online]
6. **L. Hájková, M. Možný: Fenologická pozorování I.** ISBN 978-80-7653-067-6 [online]
7. **L. Hájková, M. Možný: Fenologická pozorování II.** Praktická část. ISBN 978-80-7653-068-3 [online]
8. **Hospodaření s vodou v krajině 2023.** Sborník abstraktů z mezinárodní konference: ISBN 978-80-7653-059-1 [online]. Recenzovaný sborník příspěvků z mezinárodní konference: ISBN 978-80-7653-066-9 [online]
9. **M. Možný, L. Hájková, V. Vlach, A. Musilová, V. Oušková: Webová aplikace AGROPOČASÍ.** ISBN 978-80-7653-053-9 [online]
10. **M. Možný, L. Hájková, A. Musilová, V. Oušková, V. Vlach: Biopočasí – informace o aktuálním vlivu počasí na živou přírodu v Česku.** ISBN 978-80-7653-057-7 [online]
11. **Výroční konference České meteorologické společnosti 2023.** Sborník abstraktů z mezinárodní konference. 51 stran. ISBN 978-80-7653-058-4 [online]
12. **National Greenhouse Gas Inventory Report of the Czech Republic: Submission under the UNFCCC and the Kyoto protocol reported inventories 1990–2021.** ISBN 978-80-7653-052-2 [online]
13. **Integrated reporting on greenhouse gas policies and measures and on projections in the Czech Republic.** ISBN 978-80-7653-055-3 [online]
14. **Hydrologická ročenka České republiky 2022.** ISBN 978-80-7653-061-4 [online]
15. **Klimatologická ročenka České republiky 2022.** ISBN 978-80-7653-047-8 [online]
16. **Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2022.** ISBN 978-80-7653-060-7 [online]