

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.

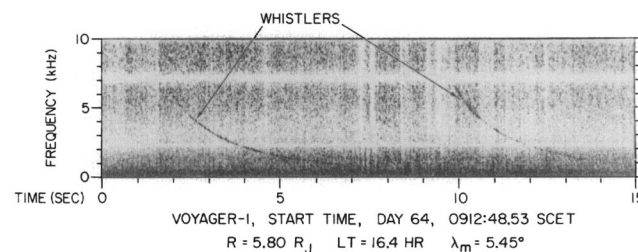
KLÍČOVÁ SLOVA: výboj bleskový – oblak bouřkový – náboj elektrický – měření elektromagnetická – atmosféry planetární – Jupiter – atmosféra Jupiteru

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

1. Úvod

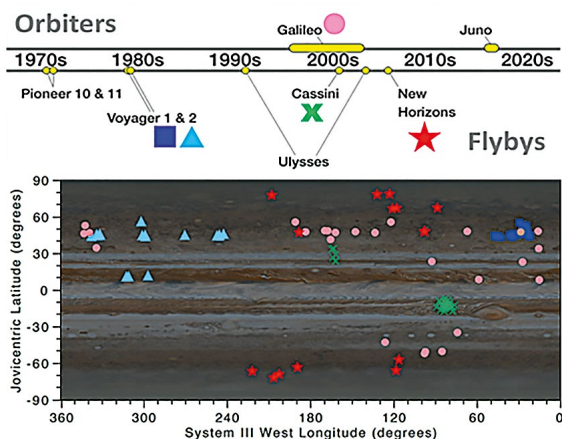
V březnu 1979 zaznamenal rádiový přijímač na palubě sondy Voyager 1 při svém průletu okolo planety Jupiter elektromagnetické signály na slyšitelných frekvencích (Gurnett 1979). Tyto záznamy po převedení na zvuk hvízdaly podobně jako elektromagnetické signály známé ze Země pod zvukomalebným názvem „hvizdy“. 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 hvízdami 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).

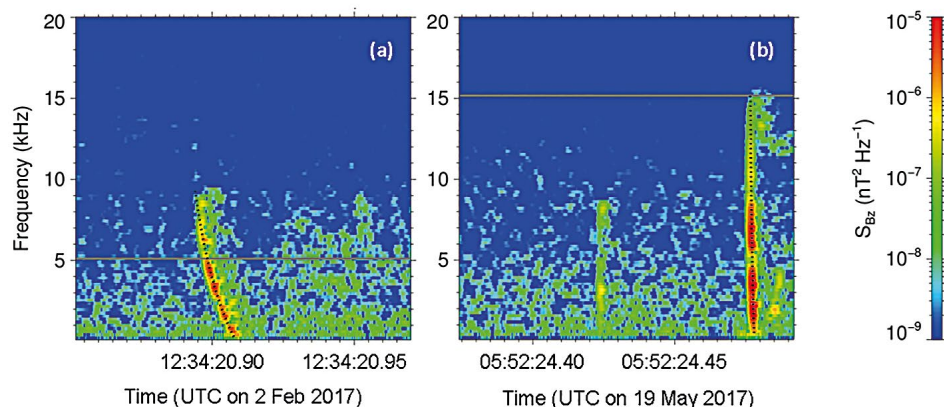
Fig. 1. Frequency-time spectrogram showing whistlers detected by Voyager 1 as it traversed through the *Io* plasma torus at a radial distance of 5.8 Jovian radii (from Kurth et al. 1985).



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, Voyager 2 (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 zář. 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 připojena 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 hnědává mračna, určit globální množství

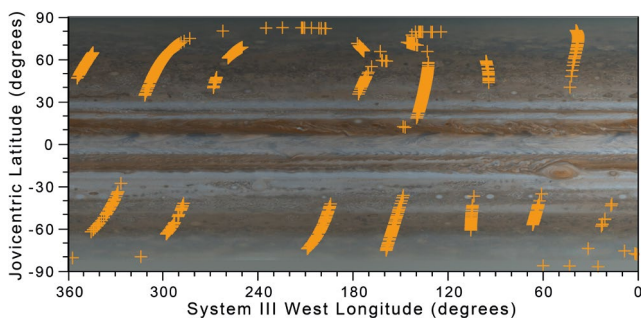
čpavku, dusíku a kyslíku, přítomného v atmosféře planety ve formě vody. Přístroj pracuje na vlnových délkách od 1 do 50 cm (Janssen et al. 2017). Pro detekci mikrovlnných emisí od blesků se používají dva kanály pracující na nejnižších frekvencích (600 MHz a 1,26 GHz). K získání jednoho datového vzorku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

3. Měření na oběžné dráze planety Jupiter

3.1 Rychlé hvizdy

Analýzovali 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 znázorněná 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).

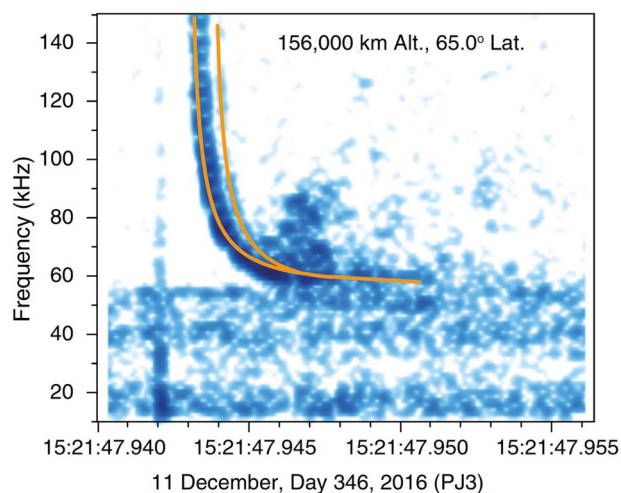
blízkých průletů sondy u Jupiteru jsme rozšířili soubor rychlých hvizdů na celkový počet téměř pěti tisíc případů. Nesymetrie výskytu blesků mezi hemisférami pozorovaná během prvních osmi přiblížení sondy Juno (Kolmašová et al. 2018) se dalším měřením nepotvrdila.

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).

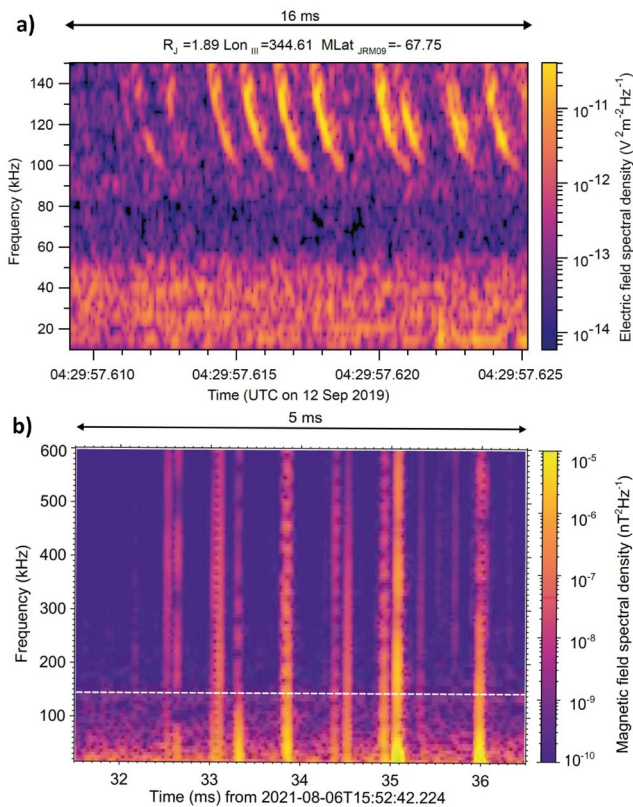
3.3 Elektrické pulsy s disperzí

Představili jsme i další zcela nový typ elektromagnetických signálů, které byly zaznamenány 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 vln v řádném módu (převzato od Imai 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 pulsů 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 pulsů 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 „Kolmašová 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 pulsů

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 pulsů s disperzí či rychlých hvizdů a porovnali je s charakteristikami sekvencí pulsů emitovaných 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 pulsů 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 pulsů 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 případně 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 provázající 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 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/10.1029/1999GL000059>.
- 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, B. G. 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/10.1007/s11214-017-0349-5>.
- 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., MOKRZYCKI, 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., HEUMESSE, 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., SODERBLUM, 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.