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 vnitrooblačných 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 polarity 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 vnitrooblačných 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 níz-

https://doi.org/10.59984/mz.2024.02.02

kých hodnot v tropech a subtropech (15 % na Floridě, USA – Zhu et al. 2016; 17 % na Srí Lance – Gomes et al. 1998; 28 % v Malajsii – 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; Iudin 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 vnitro oblačném 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 neoddělitelně 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 jej v roce 2012 napojili na jednoduchou kruhovou magnetickou smyčkovou anténu s efektivní plochou 0,8 m^2, 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 m^2. 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 měřící 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 μs 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.

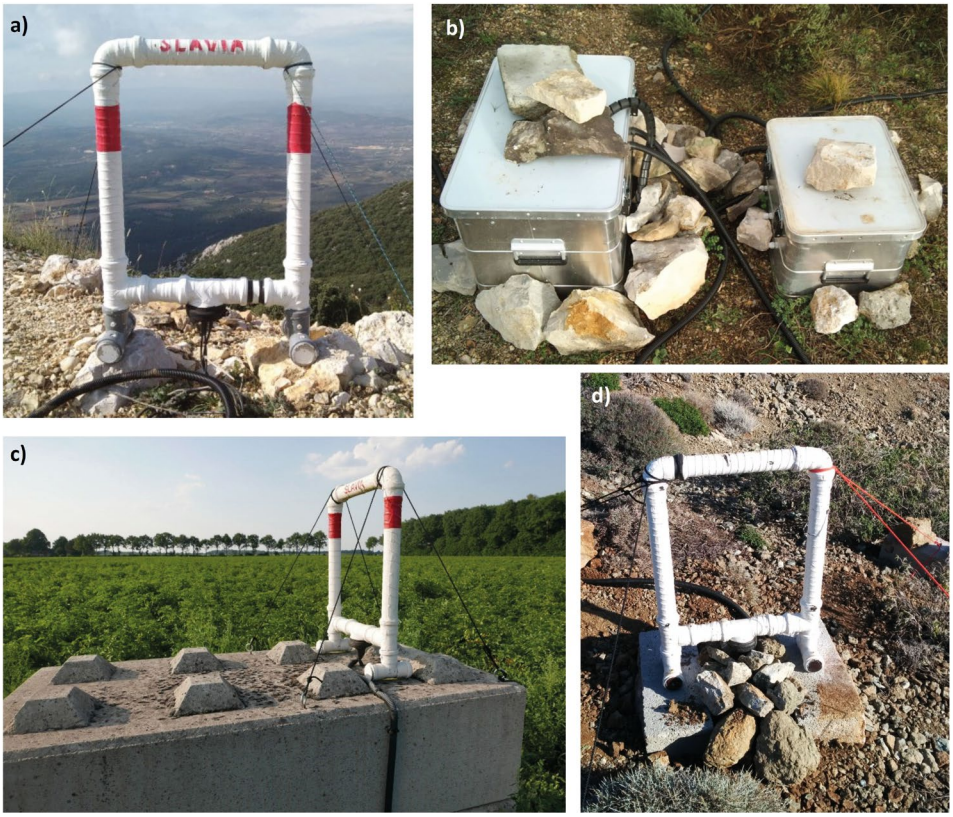
Na všech zahraničních měřících stanovištích je měření pomocí anténních systémů SLAVIA provozováno ve spolupráci se zahraničními laboratořemi. Na Korsice měříme ve spolupráci s francouzskou Laboratoire d'Aerologie z Toulouse, která provozuje úzkopásmové anténní pole SAETTA (Suivi de l'Activité Electrique Tridimensionnelle Totale de l'Atmosphère, viz kapitoly 3.2 a 3.3). V Holandsku měříme v součinnosti s Univerzitou v Gronningen, 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 μs. 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 tvořeným 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.

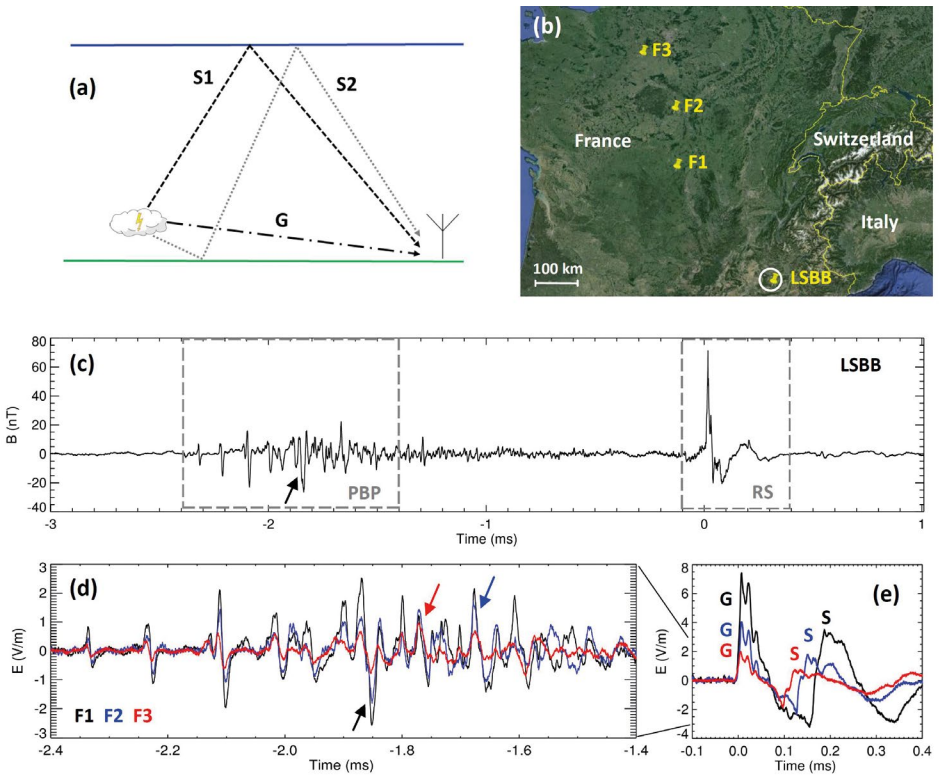


Obr. 1 a) Jedna ze čtyř magnetických stíněných smyček SLAVIA umístěných na vrcholu La Grande Montage, Francie (1 028 m; 43,94° N; 5,48° E). b) Akviziční a napájecí jednotka tamtéž. c) Jedna ze dvou antén SLAVIA nainstalovaných v blízkosti holandské obce Ter Wisch (52,92° N, 7,09° E). d) Anténa SLAVIA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

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. 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 čárou. 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), šipky 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 analyzátorem. 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.

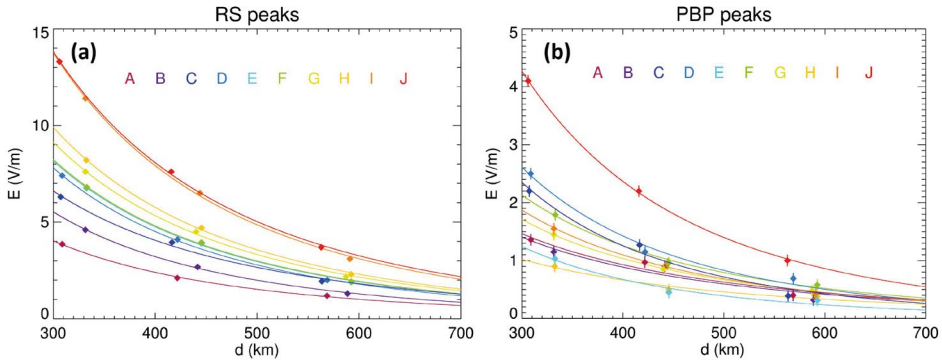
3.3 Dva scénáře vývoje izolovaných iniciačních procesů

Běžnému zápornému bleskovému výboji do země předcházejí 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 analyzátorem 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 dál 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 systému s několika řadami lineárně organizovaných bouřkových buněk

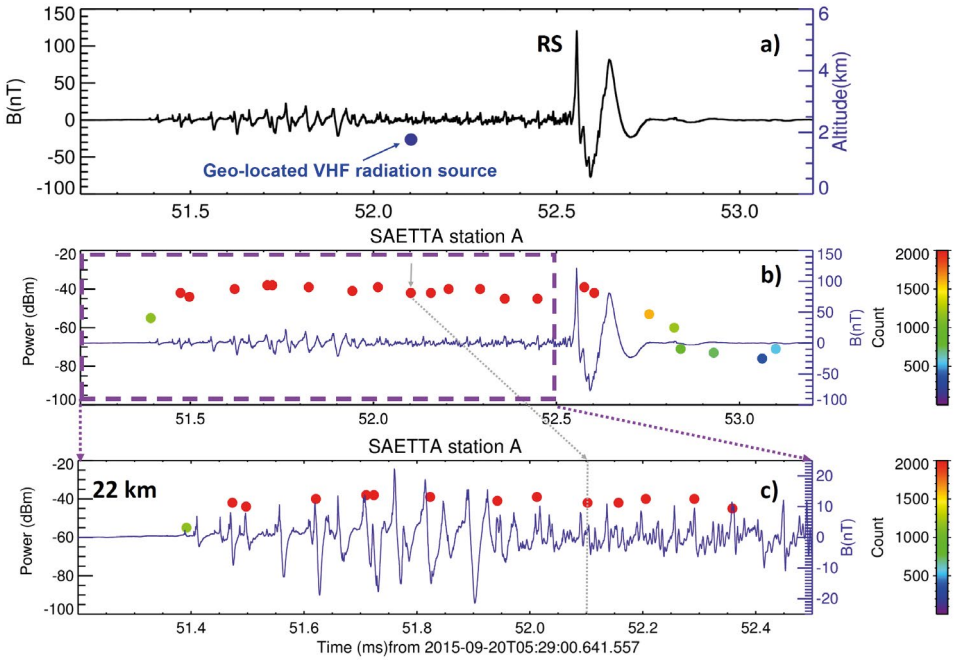
Ve studii Kolmašové et al. (2022) jsme zkombinovali elektromagnetická měření s meteorologickými daty a s údaji z bleskové detekční sítě, abychom vysvětlili pozorování neobvykle silných elektromagnetických iniciačních pulsů emitovaných blesky vzniknuvšími 19. června 2013 v bouřkovém systému nad pobřežím 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 pulsů byla konsistentní 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.



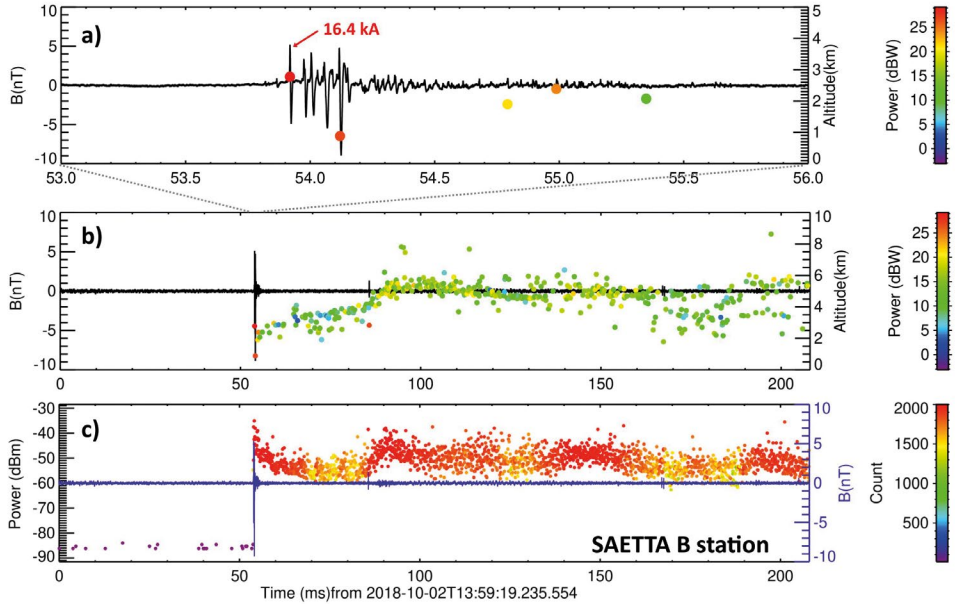
Obr. 3 a) Amplitudy zpětných výbojů a b) amplitudy příslušných předcházejících dominantních iniciačních pulsů jako funkce vzdálenosti od zdrojového zpětného výboje. Měřené hodnoty jsou znázorněny kosočtverci, nelineární fit je znázorněn plnou čarou. Jednotlivé případy jsou odlišeny barevně a písmeny 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).

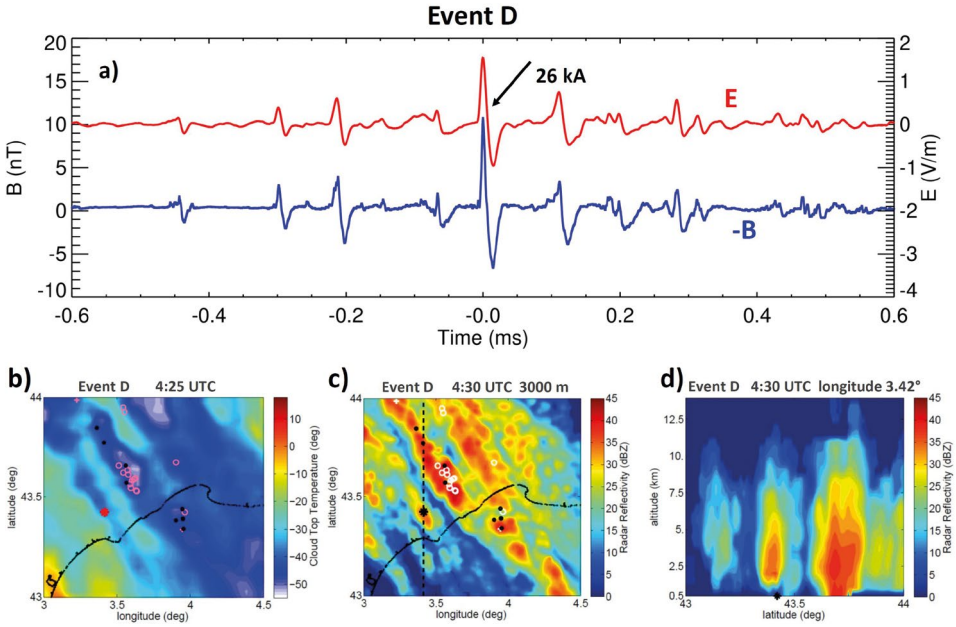


Obr. 4 a) Sekvence iniciačních impulsů a následný impuls zpětného výboje (20. září 2015, 05:29:00,7 UTC, 9,45° E, 42,80° N) s lokalizovanými zdroji VHF záření. b) Tentýž širokospektrální elektromagnetický záznam společně se zdroji emise zaznamenané na stanici A. Barevné body zobrazují výkon nejsilnějšího VHF zdroje v jednotlivých měřících oknech dlouhých 80 μs, 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).

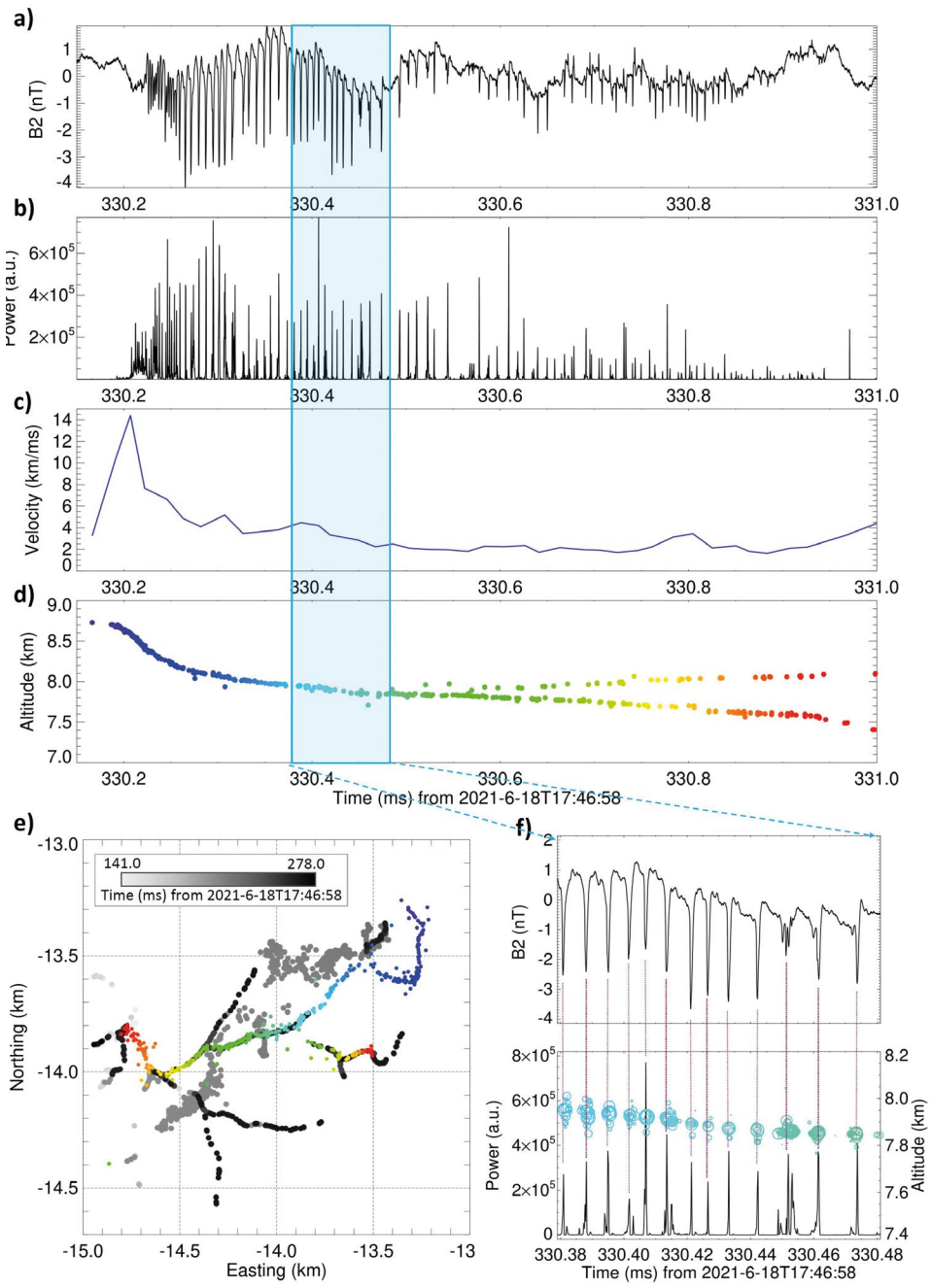
Fig. 4. Example of a negative cloud-to-ground discharge showing a sequence of initiation pulses and the corresponding return stroke pulse (20 September 2015, 05:29:00.7 UTC, 9.45° E, 42.80° N) with a) geolocated VHF radiation sources and b) peaks of radiated VHF power recorded at the station A. The dots representing the strongest VHF peaks are colour-coded by the number of intense VHF samples recorded in the 80 μs 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 μs) 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 μs 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).



Obr. 7 a) Sled pulzů 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).

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 měřící 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-

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 vyzařování 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 konvektivních buněk (Kolmašová et al. 2022) jsme nalezli 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 Milešovce, Dlouhé Louce a v Kopistech jsou nyní nainstalovány měřící 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 přídavných 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.

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., SYSSOEV, 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.