

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza vlastností magnetických signálů
vyzařovaných v průběhu vývoje přírodních
bleskových výbojů

Autor: Bc. Andrea Kolínská
Vedoucí: Ing. Ivana Kolmašová, Ph.D.
Akademický rok: 2019/2020



Katedra: fyziky

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. Andrea Kolínská

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Název práce: Analýza vlastností magnetických signálů vyzařovaných v průběhu
(česky) vývoje přírodních bleskových výbojů

Název práce: Properties of magnetic signals generated during the development of
(anglicky) natural lightning discharges

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provést analýzu tzv. iniciačních pulsů a za nimi následujících pulzů tzv. zpětných výbojů nalezených v datech zaznamenaných zařízením Ústavu fyziky atmosféry AV ČR umístěným na severním cípu ostrova Korsika.
- 2) Na základě časové shody záznamů ÚFA a evropské detekční sítě Euclid nalézt polohu zaznamenaných výbojů, jejich polaritu a velikost špičkového proudu. Procesy u kladných a záporných blesků analyzovat odděleně.
- 3) Seznámit se s měřicími systémy LMA (Lightning Mapping Array) a s datovými produkty systému SAETTA (LMA).
- 4) Pro vybrané bleskové výboje nalézt v SAETTA datech časově relevantní VHF zdroje a ty poté využít k 3D mapování vývoje jednotlivých bleskových výbojů uvnitř bouřkového oblaku.
- 5) Stanovit výšku VHF zdrojů časově odpovídajících výskytu iniciačních pulsů a prozkoumat závislost této výšky na dalších parametrech daného výboje.

Doporučená literatura:

- [1] V. Cooray: An introduction to lightning, Springer, 2014
- [2] I. Kolmasova, et al.: Lightning initiation: Strong pulses of VHF radiation accompany preliminary breakdown, Sci. Rep. 8, 3650 (2018)
- [3] P. Kaspar, et al.: A model of preliminary breakdown pulse peak currents and their relation to the observed electric-field pulses, Geophys. Res. Lett. 44, 596 (2017)
- [4] R. J. Thomas, et al.: Accuracy of the Lightning Mapping Array, J. Geophys. Res. 109, D14207 (2004)
- [5] S. Coquillat, et al.: SAETTA: high resolution 3D mapping of the total lightning activity in the Mediterranean basin over Corsica, with a focus on a MCS event, Atmos. Meas. Tech. Discuss., in review (2019)

Jméno a pracoviště vedoucího diplomové práce:

Ing. Ivana Kolmašová, Ph.D., Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Jméno a pracoviště konzultanta:

Prof. RNDr. Ondřej Santolík, Dr., Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Datum zadání diplomové práce: 25.10.2019

Termín odevzdání diplomové práce: 04.05.2020

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

.....
garant oboru

.....
vedoucí katedry

.....
děkan



V Praze dne 25.10.2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd...) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala zejména doktorce Kolmašové a profesoru Santolíkovi za jejich cenné rady a podporu nejen v mém studijním životě – velmi si toho vážím. Také chci poděkovat mým přátelům, kteří mi byli psychickou oporou a především Alešovi za jeho pomoc při mém seznamování s tokamaky. Mé díky patří i mým rodičům, kteří vždy věřili, že zvládnu jakkoliv náročné studium.

Bc. Andrea Kolínská

Název práce: **Analýza vlastností magnetických signálů vyzařovaných v průběhu vývoje přírodních bleskových výbojů**

Autor: Bc. Andrea Kolínská

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Ivana Kolmašová, Ph.D., Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Konzultant: prof. RNDr. Ondřej Santolík, Dr., Ústav fyziky atmosféry AV ČR

Abstrakt: V této práci jsou analyzovány elektromagnetické signály generované přírodními bleskovými výboji se zaměřením na jejich iniciaci a vývoj. Magnetické vlnové formy naměřené širokopásmovým přijímačem (5 kHz–37 MHz) umístěným na pozemní stanici Ersá na ostrově Korsika jsou porovnávány s vysokofrekvenčními (VHF) zdroji záření detekovanými měřicími stanicemi bleskové mapovací sítě SAETTA v úzkém frekvenčním pásmu (60–66 MHz). Z bleskových výbojů detekovaných od září do prosince 2015 bylo identifikováno 176 záporných a 23 kladných zpětných výbojů, jejichž vlastnosti jsou podrobněji studovány. U všech iniciačních pulzů bylo v jejich čase výskytu velmi málo 3D lokalizovaných VHF zdrojů. Pouze pro 24 záporných a 2 kladné výboje byl první iniciační pulz v časové shodě s prvním 3D lokalizovaným VHF zdrojem. Byla však zjištěna časová korespondence mezi peaky iniciačních pulzů a VHF zdroji detekovanými jednotlivými SAETTA stanicemi. Za použití 3D lokalizovaných VHF zdrojů je také zkoumán vývoj výbojů v oblaku.

Klíčová slova: bleskový výboj, iniciační fáze, zpětný výboj, elektromagnetická měření, iniciace blesku

***Title:* Properties of magnetic signals generated during the development of natural lightning discharges**

Author: Bc. Andrea Kolínská

Abstract: Results of an analysis of electromagnetic signals emitted by natural lightning discharges, focusing on their initiation and development, are presented in this thesis. Magnetic field waveforms observed by a broadband (5 kHz–37 MHz) receiver located at the ground station Ersa (Corsica) are compared to sources of narrowband (60–66 MHz) very high frequency (VHF) radiation detected by Lightning Mapping Array SAETTA. 176 negative and 23 positive return strokes were identified from September to December 2015 and their properties are studied. For 24 negative and 2 positive flashes, the time of the first preliminary breakdown (PB) pulse corresponded to the first 3D localized VHF source. Generally, only a few VHF sources during the time intervals of PB pulse sequences were localized. However, there was very good time correspondence between PB pulses and VHF sources detected by individual SAETTA stations. Using the localized VHF sources, the development of discharges inside a thundercloud is investigated.

Key words: lightning flash, preliminary breakdown, return stroke, electromagnetic measurements, lightning initiation

Obsah

Úvod	3
1 Teorie	4
1.1 Elektrické výboje v atmosféře	4
1.1.1 Koronový výboj	4
1.1.2 Jiskrový výboj	5
1.2 Elektromagnetické pole generované bleskovým výbojem	8
1.2.1 Elektromagnetické pole dipólu nad dokonale vodivou plochou	8
1.2.2 Elektromagnetické pole elementu proudového kanálu v závislosti na čase	10
1.2.3 Elektromagnetické pole bleskového kanálu	10
1.3 Bouřkový oblak	11
1.3.1 Tvorba oblaku a jeho vývoj	12
1.3.2 Rozložení náboje v oblaku	13
1.3.3 Vznik bleskového výboje	13
1.4 Bleskové výboje	14
1.4.1 Typy bleskových výbojů	15
1.4.2 Časový vývoj záporných blesků typu oblak-země	16
1.4.3 Kladné bleskové výboje typu oblak-země	21
2 Metody měření	23
2.1 Měření změn magnetického pole	23
2.1.1 Anténa SLAVIA	23
2.1.2 Naměřená data a jejich zpracování	24
2.2 Detekční síť Météorage	25
2.3 Měřicí systémy LMA	25
2.3.1 SAETTA	26
3 Výsledky	28
3.1 Návaznost na výzkumný úkol	28

3.2	Datový soubor	28
3.3	Výsledky: záporné bleskové výboje	30
3.3.1	Bleskové výboje s přidanými daty od SAETTA	34
3.4	Výsledky: kladné bleskové výboje	46
3.4.1	Bleskové výboje s přidanými daty od SAETTA	50
3.5	Výsledky: izolované iniciační pulzy	59
4	Diskuze a shrnutí	62
5	Závěr	66
	Literatura	67

Úvod

Záblesk na potměšitém obloze a mohutný hřmot burácející skrze mračna zanechá dojem snad v každém. Ať už vyvolávají strach, respekt, či čistou fascinaci – blesky svou velkolepostí uchvátily lidskou představivost a vzbudily v lidech touhu jim porozumět.

Personifikace blesku jako nadpřirozené a nejmocnější síly je známa z mnoha pohanských náboženství a tradic. Nevyzpytatelnost tohoto fenoménu přiměla člověka blesky ctít jako bohy. Ačkoliv blesky nebývaly spojovány se silou přírody, ale jako obraz moci nadpozemské, bedlivé pozorování blesků vedlo i k více přirozeným poznatkům. Již Herodotos varoval, aby se nestavěly velkolepé stavby dosahující k nebesům, neboť bůh pomocí blesku zničí vše, co se přiblíží jeho výšinám. Další varování přišlo od Čingischána, který zakázal koupání pod širým nebem během bouřky ve snaze ochránit svůj lid.

Spojitosť blesku s bohy, hlavně jejich moc blesky ovládat, se přenesla i do křesťanství. Na středověkých kostelních zvonech nalezneme prosby vzývající „Od blesků a bouře vysvobod' nás, pane Ježíši Kriste“. Kvůli pověrám a folkloru lidé například věřili tomu, že v dosahu znění kostelních zvonů nemůže blesk udeřit. Samozřejmě, spojitost mezi zvukem zvonu a ochranou proti bleskům je v odborné literatuře těžké nalézt, a to ani vlevo dole.

Blesk a hrom nebyly jen předměty náboženských úvah, ale i úvah filozofických. Descartes věřil, že hrom je způsoben vibracemi vzduchu mezi dvěma oblaky. Jiní blesk považovali za zvuk vznikající při jejich srážce. Od dávných filozofů vedly úvahy k fyzikálním závěrům novověku. Jako první potvrdil spojitost blesku s elektřinou Benjamin Franklin roku 1752. Slavný experiment s drakem a kovovou tyčí prokázal, že blesk je dlouhý jiskrový výboj a bouřkový oblak je elektricky nabitý.

Teprve koncem 19. století se ke studiu bleskových výbojů začaly využívat fotografie a spektroskopické metody. Pomocí fotografických záznamů se ukázalo, že bleskové výboje přenášející záporný náboj z oblaku jsou složeny z vůdčího výboje pohybujícího se směrem k zemi a ze zpětného výboje ve směru opačném. Také bylo zjištěno, že první vůdčí výboj se v záporném blesku pohybuje po krocích. Kolem 30. a 40. let 20. století se ve velkém začala používat elektromagnetická měření signálů generovaných bleskovými výboji. Byl to první a dosud jediný přesnější způsob, kterým lze zkoumat procesy probíhající uvnitř oblaku.

V dnešní době jsme schopni detekovat signály se submikrosekundovou přesností. Využívá se širokopásmových i úzkopásmových přijímačů a získané poznatky se dávají do souvislosti s dalšími, získanými různými přístroji či metodami. Díky těmto moderním technikám se postupně přibližujeme k celkovému poznání blesku. Prozatím je však ještě spousta neznámých, které je nutno prozkoumat, a to například proces samotného vzniku bleskového výboje.

Kapitola 1

Teorie

1.1 Elektrické výboje v atmosféře

Vlivem zejména ultrafialového a rentgenového slunečního záření dochází k ionizaci vzduchu a výskytu volných elektronů v atmosféře. Ionizaci atmosféry zajišťuje také například vysokoenergetické kosmické záření a radioaktivní prvky v zemi [1, 2]. Zemi s ionosférou můžeme vidět jako velký kulový kondenzátor, přičemž země je nabitá záporně a ionosféra kladně [3]. Všechny ionty a volné elektrony jsou tímto polem urychlovány a vzniká tok nabitých částic mezi ionosférou a zemí, kde záporný náboj je přenášen z povrchu země do ionosféry. Při bouřce se však pak pod bouřkovým oblakem indukují opačné elektrické pole, jelikož silné záporné nábojové centrum ve spodní části oblaku přitahuje v zemi kladné náboje¹. Bouřkový oblak pak vytváří proud kladných částic směrem do ionosféry a přirozeně tak uzavírá globální elektrický obvod, jak je znázorněno na obrázku 1.1 [4].

Z hlediska elektrické vodivosti se vzduch obvykle chová jako izolátor, avšak jakmile hodnota elektrického pole překročí jistou kritickou hodnotu² stává se vodivým a může zde docházet k elektrickému průrazu. Vzduchem poté mohou protékat elektrické proudy ve formě jiskrových výbojů, jako jsou blesky. Základními typy výbojů, které mohou probíhat v atmosféře jsou výboje koronové a již zmíněné jiskrové výboje. Jejich vlastnosti jsou popsány v následujících podkapitolách.

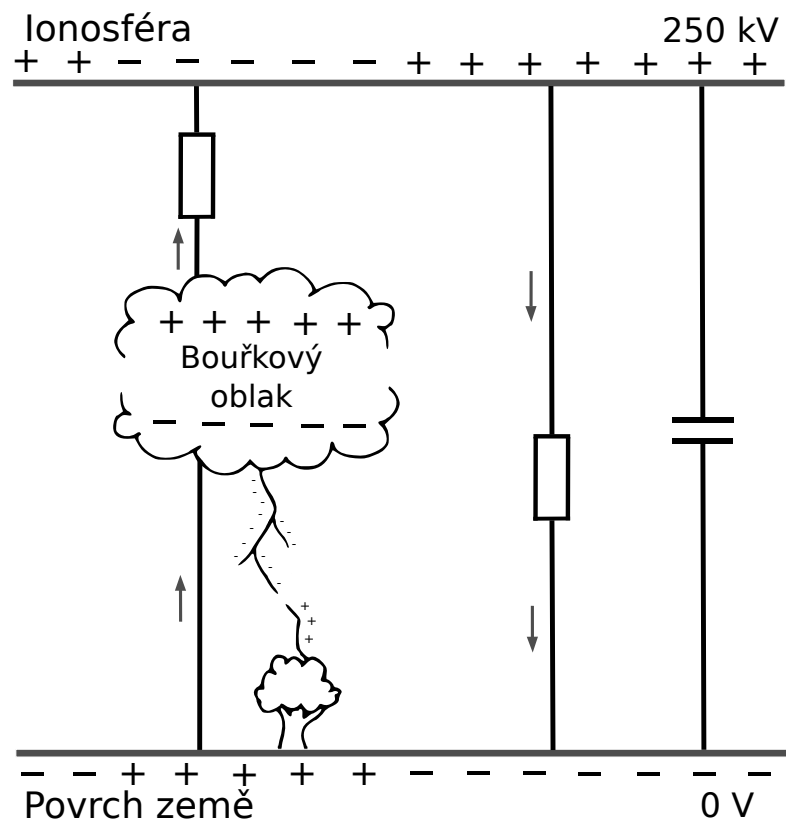
1.1.1 Koronový výboj

Představme si vodivý objekt nepravidelného tvaru umístěný v elektrickém poli bouřkového oblaku. Tímto objektem může být například ledová oblačná částice³. Na ostrých hrotech tohoto objektu se elektrické pole v porovnání s okolím výrazně zesiluje, přičemž čím ostřejší hrot, tím silnější je elektrické pole v jeho blízkosti a při vzdalování se od hrotu velikost pole rapidně klesá. Je-li elektrické pole bouřkového oblaku dostatečně silné, může se stát, že hodnota elektrického pole v blízkosti hrotu

¹Více o rozložení náboje v bouřkovém oblaku k nahlédnutí v kapitole 1.3.2

²U hladiny moře je tato hodnota přibližně $3 \cdot 10^6$ V/m a snižuje se s klesající hustotou atmosféry a přítomností oblačných částic. Podrobněji v kapitole 1.3.3

³Druhy oblačných částic jsou popsány v kapitole 1.3.2



Obr. 1.1: Zjednodušené schéma globálního elektrického oběhu (z části podle [5])

oblačné částice bude natolik vysoká, že překročí kritickou hodnotu nutnou pro elektrický průraz. V tomto případě pak každý volný elektron z této oblasti bude zvýšeným elektrickým polem natolik urychlen, že začne vyrážet další elektrony z atomů při srážkách a postupně tak dojde ke vzniku elektronové laviny. Toto časem způsobí zaplnění této oblasti bouřkového oblaku elektronovými lavinami. Probíhá zde ionizace a rekombinace, přičemž kladné a záporné ionty poté vedou proud. Při ionizaci a deionizaci dochází také k emisi fotonů. Tento jev je nejjednodušší formou elektrického výboje v přírodě a nazýváme ho koronový výboj. Koronový výboj může vzniknout i pod bouřkovým oblakem například na hrotech kovových stožárů jako tzv. Eliášův oheň [5].

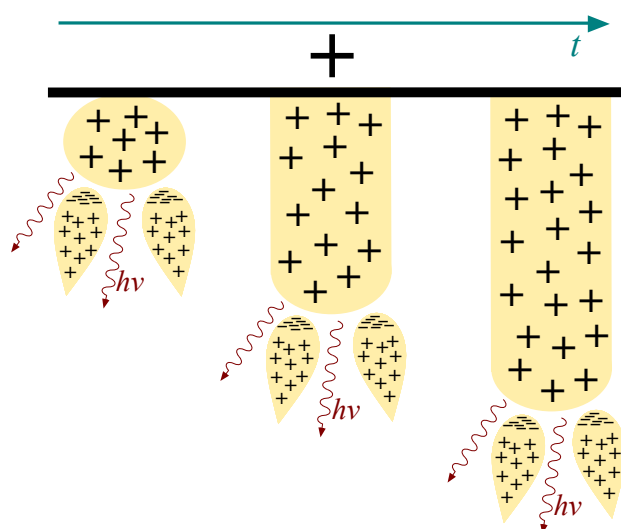
1.1.2 Jiskrový výboj

Lavina a streamer

Jiskrový výboj začíná rozvojem elektronových, případně elektron-fotonových lavin. Při jejich nárůstu dochází k hromadění náboje v čele laviny, a tím ke zvyšování elektrického pole v jeho okolí. Jestliže je vnější elektrické pole natolik vysoké, že umožní další nárůst laviny, dojde pak k dalšímu zvýšení pole v okolí čela laviny, až nakonec překročí hodnotu nutnou pro elektrický průraz. V tento moment začne elektrické pole v blízkosti čela laviny ovlivňovat ionizační procesy v blízkém okolí [5].

V této fázi dochází k přerodu laviny do tzv. streameru (*streamer discharge*), jakožto slabě vodivého kanálu s hustotou elektronů přibližně 10^{18} m^{-3} , jímž protéká proud o velikosti $10^{-4} - 10^{-2} \text{ A}$ [4]. Přesný způsob formování streameru závisí na polaritě zdroje okolního elektrického pole.

Nejprve se zaměříme na kladný zdroj, opět například kladně nabitou ledovou oblačnou částici v elektrickém poli bouřkového oblaku. K tomuto zdroji tedy budou přitahovány elektrony a budeme ho zde nazývat anodou. V momentě, kdy elektronová lavina dorazí k anodě, elektrony jsou anodou absorbovány a zanechají za sebou kladný iontový prostorový náboj. Jelikož zde dochází k rekombinaci kladných iontů a elektronů, je tato oblast bohatým zdrojem vysokoenergetických fotonů [5]. Fotoionizací¹ zde dochází ke generaci velkého množství elektronů, které pak tvoří dílčí laviny, nyní šířící se ke kladně nabitému čelu prvotní laviny, nikoliv k anodě. Jakmile dorazí k čelu, dojde k neutralizaci kladného náboje a vytvoření slabě vodivého sloupce plazmatu, tzv. streameru, do kterého se přesune část anodového potenciálu. Na přední části streameru se bude postupně hromadit kladný prostorový náboj zbylý z druhotných lavin a streamer bude směrem od anody narůstat [6]. Tomuto výboji se říká kladný streamer. Grafické znázornění mechanismu kladného streameru je zobrazeno na obrázku 1.2.

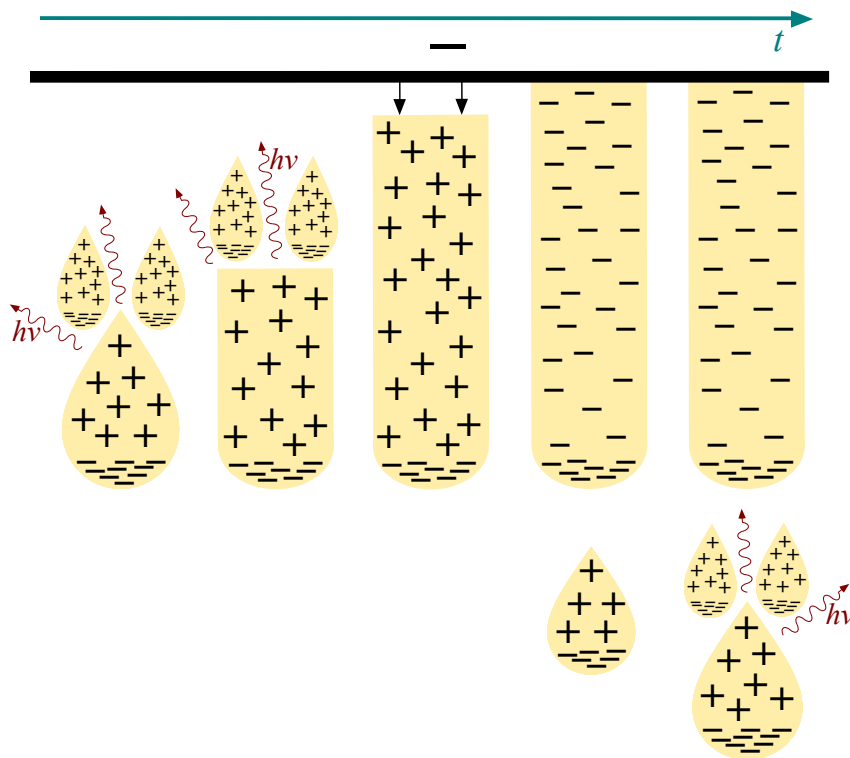


Obr. 1.2: Časový vývoj kladného streameru. Zelená šipka znázorňuje směr časového vývoje, červené šipky fotony vzniklé rekombinací kladných iontů a elektronů. Postupně narůstající streamer s lavinami je znázorněn žlutou barvou (z části podle [5, 4]).

Máme-li naopak zdroj se záporným nábojem, tedy katodu, elektronové laviny se v tomto případě pohybují ve směru od zdroje. Když prvotní lavina naroste nad jistou kritickou velikost, zanechá po sobě kladný náboj, který k sobě začne přitahovat sekundární laviny. Stejně jako v případě kladného streameru, i zde dojde k neutralizaci kladného náboje elektrony ze sekundárních lavin, a tím k postupnému

¹Fotoionizace je fyzikální proces, při kterém atom absorbuje energii dopadajícího fotonu a dojde tak k uvolnění elektronu z atomového obalu.

přibližování ke katodě. V momentě, kdy kladný náboj dorazí ke katodě, dojde k emisi elektronů z katody, a tím k neutralizaci kladného prostorového náboje a vytvoření slabě vodivého kanálu spojeného s katodou. Důsledkem je pak převedení části katodového potenciálu do tohoto kanálu, a tím zvýšení elektrického pole v jeho čele [5]. Tomuto výboji pak říkáme záporný streamer². Čelo streameru se poté chová jako virtuální katoda a znovu se opakuje výše popsany proces, přičemž streamer dále narůstá směrem od katody. Mechanismus tvorby záporného streameru je znázorněn na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Časový vývoj záporného streameru. Zelená šipka znázorňuje směr časového vývoje, červené šipky fotony vzniklé rekombinací kladných iontů a elektronů. Postupně narůstající streamer s lavinami je znázorněn žlutou barvou (z části podle [5, 4]).

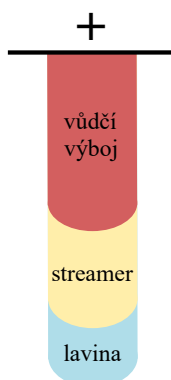
V některých případech může také docházet ke tvorbě tzv. obousměrných streamerů (*bidirectional streamer/midgap streamer*). Taková situace nastane tehdy, když je okolní elektrické pole natolik silné, že dojde k vytvoření streameru ještě před dosažením katody. V jednom směru se pak šíří záporný streamer a ve směru druhém kladný streamer [5].

Vůdčí výboj

U delších průbojových drah pak dochází k přeměně streamerového kanálu na tzv. vůdčí výboj (*leader discharge*), který je horký a mnohem vodivější, s hustotou elektronů přibližně 10^{20} m^{-3} , teplotou až 4000 K a protéká jím proud o velikosti stovek

²Blesky jsou ve většině případů jiskrové výboje se záporným streamerem.

ampérů [4]. K vývoji vůdčího výboje dojde tehdy, když elektronová hustota v streamerovém kanálu naroste na takovou hodnotu, že začne docházet k předávání energie mezi elektrony a kladnými ionty, a tím k poklesu elektronové a nárůstu iontové teploty. Kladné ionty poté začnou svou energii předávat neutrálním atomům, díky jejich srovnatelné hmotnosti. Kanál se začne rychle zahřívat a energie iontů a neutrálních stoupne natolik, že začne docházet k jejich ionizaci během srážek, tzv. termální ionizaci. Elektronová hustota rapidně vzroste, tím se zvýší vodivost kanálu a poté dojde k vyrovnání teplot všech komponent výboje. Výsledkem je přerod streamerového kanálu do horkého vodivého vůdčího výboje [5]. V čele vůdčího výboje se pak opět šíří streamer. Schéma vůdčího výboje je znázorněno na obrázku 1.4. Vůdčí výboje v blescích jsou pak dale popsány v kapitole 1.4.2



Obr. 1.4: Schéma tvorby vůdčího výboje (z části podle [4])

1.2 Elektromagnetické pole generované bleskovým výbojem

Bleskové výboje vyzařují elektromagnetické signály v širokém rozsahu frekvencí. Frekvence oscilace elektrického a magnetického pole je přitom svázána s rozměry daného výboje, přičemž se zvětšující se délkou výboje klesá frekvence vyzařovaného pole [5]. Průběh elektromagnetického pole vyzařovaného různými procesy v bleskových výbojích jak ve frekvenční, tak v časové závislosti je možné spočítat pomocí elektromagnetického pole krátkého dipólu nacházejícího se nad dokonale vodivou plochou¹. Rychlost šíření elektromagnetické vlny je rovna rychlosti světla c v daném prostředí.

1.2.1 Elektromagnetické pole dipólu nad dokonale vodivou plochou

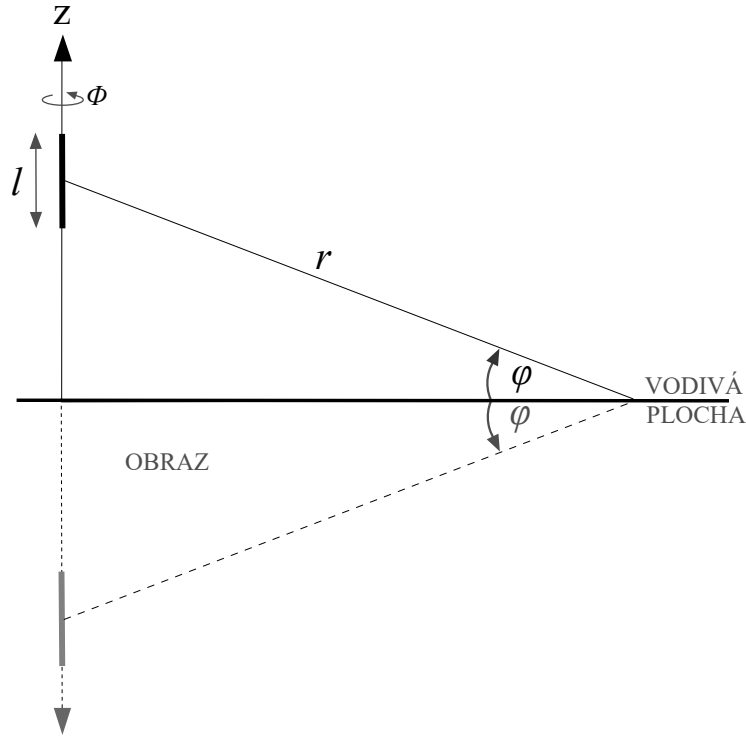
Nejdříve se zaměříme na průběh elektromagnetického pole v závislosti na frekvenci oscilací proudu protékajícího dipólem. Představme si dipól délky l orientovaný ve směru osy z , přičemž proud dipólem je dán výrazem

¹Zde touto plochou rozumíme zemský povrch.

$$I = I_0 e^{j\omega t}, \quad (1.1)$$

kde I_0 je amplituda proudu, j komplexní jednotka, ω úhlová frekvence oscilací a t čas.

Elektrické a magnetické pole generované dipólem v každém bodě prostoru pak můžeme spočítat s užitím skalárního a vektorového potenciálu ϕ a \mathbf{A} ² [5]. Okrajové podmínky na vodivé ploše vyřešíme přidáním zrcadlového obrazu dipólu, viz obr. 1.5.



Obr. 1.5: Schéma dipólu nad dokonale vodivou plochou

Jelikož horizontální složka elektrického pole nad dokonale vodivou plochou je nulová, stačí nám znát pouze složku vertikální. Ta je ve vzdálenosti r od osy dipólu rovna

$$E_v = -\frac{I_0 l e^{j(\omega t - \beta r)}}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{j\omega \cos^2 \varphi}{c^2 r} + (1 - 3 \sin^2 \varphi) \frac{1}{cr^2} + \frac{1}{j\omega r^3} (1 - 3 \sin^2 \varphi) \right], \quad (1.2)$$

kde $\beta = \frac{\omega}{c}$, c je rychlost světla, ϵ_0 permitivita vakua, φ úhel viz obr. 1.5 a π je Ludolfovo číslo [5].

První člen v rovnici 1.2 je tzv. radiační složka pole (*radiation field*), druhý člen indukční složka pole a třetí člen elektrostatická složka [8]. Je-li $r \gg l$ do celkového elektrického pole přispívá pouze složka radiační ³, jelikož se vzdáleností klesá pouze

²Podrobněji k elektromagnetickým potenciálům např. v [7].

³Mnohem větší vzdáleností r se obvykle rozumí vzdálenost desetkrát větší, než je délka dipólu/kanálu.

jako $1/r$. Zatímco zbylé dvě složky klesají s druhou a třetí mocninou r a jsou tedy ve velké vzdálenosti od dipólu zanedbatelné.

Magnetické pole⁴, které má azimutální směr, je rovno

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I_0 l e^{j(\omega t - \beta r)}}{2\pi} \cos \varphi \left[\frac{j\omega}{cr} + \frac{1}{r^2} \right], \quad (1.3)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua a ostatní proměnné viz výše [5].

První člen v rovnici 1.3 je tzv. radiační složka pole a druhý člen v rovnici 1.3 je indukční složka pole. Je-li r hodně velké, do celkového magnetického pole opět přispívá pouze radiační složka [8].

1.2.2 Elektromagnetické pole elementu proudového kanálu v závislosti na čase

Pro krátký element proudového kanálu umístěného nad dokonale vodivou plochou, kterým protéká proud $I(t)$ zajišťující transport náboje z jednoho konce elementu na opačný, je generované elektromagnetické pole totožné s polem dipólu. Využitím inverzní Fourierovy transformace rovnic 1.2 a 1.3 získáme časový průběh elektrického a magnetického pole ve vzdálenosti r jako

$$E_v(t) = -\frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\cos^2 \varphi}{c^2 r} \frac{dI(t-r/c)}{dt} + (1-3\sin^2 \varphi) \frac{I(t-r/c)}{cr^2} + \frac{1}{r^3} (1-3\sin^2 \varphi) \int_0^t I(z-r/c) dz \right], \quad (1.4)$$

$$B_\phi(t) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\frac{\cos \varphi}{cr} \frac{dI(t-r/c)}{dt} + \frac{\cos \varphi}{r^2} I(t-r/c) \right], \quad (1.5)$$

kde z je integrační proměnná [5].

Jak bylo zmíněno výše, v místě hodně vzdáleném od dipólu, kde $r \gg l$, naměříme pouze radiační složku a rovnice se zjednoduší na

$$E_{v, \text{rad}}(t) = -\frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\cos^2 \varphi}{c^2 r} \frac{dI(t-r/c)}{dt} \right], \quad (1.6)$$

$$B_{\phi, \text{rad}}(t) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\frac{\cos \varphi}{cr} \frac{dI(t-r/c)}{dt} \right]. \quad (1.7)$$

1.2.3 Elektromagnetické pole bleskového kanálu

Elektrické a magnetické pole generované bleskovým výbojem lze spočítat užitím výše uvedených rovnic 1.4 až 1.7, a to rozdělením bleskového kanálu na velké množství

⁴Termín magnetické pole zde i v dalším textu je používán pro vektor \mathbf{B} , tedy magnetickou indukci.

malých elementů o velikosti dz , na které pohlížíme jako na dipól. Následně celkové pole získáme sečtením příspěvků od každého dipólu po celé délce H daného výboje. Proud kanálem ve výšce z vyjádříme jako $I(z,t)$. Vertikální elektrické pole a azimutální magnetické pole ve vzdálenosti r od bleskového kanálu je dáno rovnicemi

$$E_v(t) = - \int_0^H \frac{dz}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\cos^2 \varphi}{c^2 r} \frac{dI(t-r/c)}{dt} + \frac{(1-3\sin^2 \varphi)}{cr^2} I(t-r/c) + \frac{1}{r^3} (1-3\sin^2 \varphi) \int_0^t I(z-r/c) dz \right], \quad (1.8)$$

$$B_\phi(t) = \int_0^H \frac{\mu_0 dz}{2\pi} \left[\frac{\cos \varphi}{cr} \frac{dI(t-r/c)}{dt} + \frac{\cos \varphi}{r^2} I(t-r/c) \right], \quad (1.9)$$

kde délka kanálu H může být délka celého kanálu zpětného výboje, ale i jednoho kroku vůdčího výboje⁵ [5, 9].

Opět, je-li vzdálenost od bleskového kanálu velká, $r \gg H$, naměříme pouze radiční složku a zároveň můžeme položit $\cos \varphi \approx 1$. Rovnice se tak zjednoduší na

$$E_{v, \text{rad}}(t) = - \frac{\cos^2 \varphi}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} \int_0^H \frac{dI(t-r/c) dz}{dt} \approx - \frac{1}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} \int_0^H \frac{dI(t-r/c) dz}{dt}, \quad (1.10)$$

$$B_{\phi, \text{rad}}(t) = \frac{\mu_0 \cos \varphi}{2\pi cr} \int_0^H \frac{dI(t-r/c) dz}{dt} \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_0 c^3 r} \int_0^H \frac{dI(t-r/c) dz}{dt}. \quad (1.11)$$

Jelikož pro rychlost světla c platí vztah $c^2 = 1/\mu_0\epsilon_0$ a pro velké r je $\cos \varphi \approx 1$, bylo možné rovnici 1.11 upravit do konečného tvaru, kde pak snadno vidíme, že je splněna podmínka

$$E_{v, \text{rad}}(t) = cB_{\phi, \text{rad}}(t), \quad (1.12)$$

a tedy ve velkých vzdálenostech mají elektrické a magnetické pole stejný časový průběh s poměrem amplitud rovným rychlosti světla [5].

Rovnic 1.8 až 1.11 a jejich modifikací se hojně využívá při počítačovém modelování bleskového kanálu, a to vůdčího a zpětného výboje [8, 10]. Model založený na těchto rovnicích se nazývá *Transmission line model*. Co se týče popisu iniciační fáze není tento model jako samotný dostatečně přesný a je v tomto případě nutné provést určité úpravy, případně použít jiného popisu [11].

1.3 Bouřkový oblak

Jediným druhem oblaku, ve kterém mohou za příznivých podmínek vznikat bleskové výboje, je oblak Cumulonimbus, neboli bouřkový oblak. Je to robustní oblak, jenž

⁵O zpětném a vůdčím výboji a o dalších fázích bleskových výbojů typu oblak-země pojednává kapitola 1.4.2.

dorůstá do výšky nejméně několika kilometrů, kde spodní okraj nebývá výše než 2 km nad zemským povrchem a horní okraj dosahuje až oblasti tropopauzy, případně může prorůstat i nad ní. Vlivem výškového proudění se jeho horní část protahuje jedním směrem, a tím oblak získává svůj typický kovadlinový tvar [12]. Fotka typického bouřkového oblaku viz obrázek 1.6.



Obr. 1.6: Fotografie bouřkového oblaku (autor: Martin Popek, Ústav fyziky atmosféry, AV ČR)

1.3.1 Tvorba oblaku a jeho vývoj

Každý bouřkový oblak je složen z několika tzv. bouřkových buněk, z nichž každá prochází třemi vývojovými fázemi.

Formování bouřkového oblaku začíná nerovnoměrným zahříváním zemského povrchu slunečním zářením. Ohříváný vzduch, jenž je v kontaktu se zemským povrchem se postupně rozpíná, tím se stává lehčím než vzduch v okolí a začne tedy stoupat vzhůru. Jak s výškou klesá tlak atmosféry, tento vzduch se poté dále rozpíná a přitom ochlazuje. Aby ale mohlo dojít k tvorbě oblaku, je zde navíc nutná přítomnost vody či vlhkosti. Během postupného ochlazování stoupající vzduchové hmoty začne zde obsažená vlhkost kondenzovat a tvořit mikroskopické vodní kapičky. Takto pak vznikají viditelná oblaka v tzv. stadiu cumulu. [5]

Postupně vzduchová hmota stoupá výše a výše a její teplota klesá. Jakmile dojde ke snížení teploty pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, část vodních kapiček zamrzne a vytvoří ledové krystalky. Nicméně některé kapičky zůstanou nadále kapalné a těm pak říkáme přechlazené vodní kapičky. Hydrometeory, jak souhrnně nazýváme všechny ledové a vodní částičky, k sobě během srážek navzájem přimrzají, a tím tvoří větší ledové krystalky. Postupně tak hydrometeory nabírají na hmotnosti a začíná u nich převládat vliv tíhové síly nad působením vzestupných vzduchových proudů. Částičky pak padají

směrem dolů. K tomuto pohybu přispívají těž sestupné proudy vzduchu, kde dochází k vypadávání srážek [5, 12]. Co se týče rychlosti pohybu vzduchových hmot, ta je po celé oblasti bouřkového oblaku (bouřkové buňky) konstantní a rovna rychlosti proudění ve střední vrstvě troposféry, a to i přesto, že rychlost horizontálního proudění v atmosféře se z výškou zvětšuje. Díky tomu pak vzniká v dolních oblastech na čelní straně buňky přetlak a v horních naopak podtlak, což podporuje další tvorbu vzestupných vzduchových proudů. Na týlové straně je tomu právě naopak a dochází zde k dalšímu rozvoji sestupných proudů [5]. V tomto okamžiku se buňka nachází ve fázi zralého stadia.

Postupně však dojde k zeslabení vzestupných proudů a rozvoji sestupných proudů po celém objemu buňky, což způsobí její rozpad. Tato fáze se proto nazývá stadiem rozpadu.

Jelikož je každá buňka v určitém momentu v různém stadiu vývoje, je doba života bouřkového oblaku jako celku mnohem delší a bouřka může trvat klidně několik hodin [13]. Co se týče výskytu bouřek, jsou nejčastějšími oblastmi místa nad pevninou s nižší zeměpisnou šířkou. V těchto oblastech dochází snadno k vzniku vzestupných vzdušných proudů, a to díky větším teplotním rozdílům mezi vzduchovými hmotami. [5]

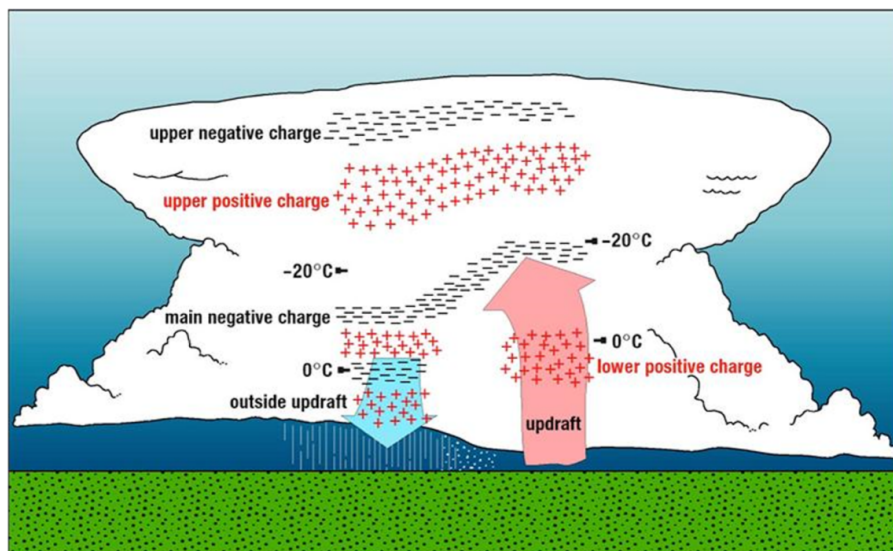
1.3.2 Rozložení náboje v oblaku

V bouřkovém oblaku se vyskytuje množství různých druhů hydrometeorů⁶, které se díky ionizaci vzduchu elektricky nabíjí. Lehčí hydrometeory se působením vzestupných vzdušných proudů pohybují směrem vzhůru, těžší kvůli většímu vlivu tíhové síly padají dolů [14]. Při těchto pohybech dochází k vzájemným srážkám, během kterých dochází k předávání elektrického náboje, přičemž v oblastech v rozmezí teplot od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se lehčí hydrometeory nabíjí převážně kladně a těžší záporně. Některé těžší částice nabírají dále na hmotnosti a tím se dostanou do do nižších vrtev oblaku, kde je již vyšší teplota a oblačné částice se zde začínají nabíjet kladně [5]. Tímto dojde v oblaku k vytvoření vrstev hydrometeorů majících stejný náboj, tzv. nábojových center. Zde popsané rozložení náboje popisuje tzv. třípólový model, který obsahuje hlavní centrum záporného náboje a horní a malé dolní centrum náboje kladného [12]. Ve skutečnosti je však rozložení náboje v bouřkovém oblaku mnohem složitější, viz obr. 1.7.

1.3.3 Vznik bleskového výboje

Prvotní iniciace bleskového výboje v bouřkovém oblaku není stále zcela objasněna. Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.1, pro vznik elektrického výboje v atmosféře je nutné, aby hodnota elektrického pole překročila jistou kritickou hodnotu potřebnou pro elektrický průraz. Tato hodnota se snižuje s klesající hustotou atmosféry (tedy i s výškou) a s vyšším množstvím oblačných částic. Za jasného počasí, bez přítomnosti oblačných částic, je tato hodnota u hladiny moře přibližně $3 \cdot 10^6\text{ V/m}$ a ve výšce 5 km nad hladinou moře asi $1,5 \cdot 10^6\text{ V/m}$ [5]. Na základě balónových

⁶Těmi jsou například vodní kapky, přechlazené vodní kapky, sněhové a ledové krupky či kroupy.



Obr. 1.7: Rozložení nábojových center v bouřkovém oblaku, dle balónových měření. Červené křížky znázorňují kladný náboj, černé čárky náboj záporný. (Převzato z [15])

měření bylo zjištěno, že hodnota elektrického pole v bouřkovém oblaku se pohybuje okolo $1 - 1,5 \cdot 10^5$ V/m, přičemž pole nutné pro elektrický průraz v podmínkách bouřkového oblaku, kde je přítomno velké množství hydrometeorů, je vyšší, s hodnotou přibližně $5 \cdot 10^5$ V/m [16, 5]. Je tedy jasné, že v oblaku musí docházet ještě k dalším procesům, které pomáhají snížit hodnotu kritického pole pod hodnotu naměřenou uvnitř bouřkového oblaku. Jedním z vysvětlení může být přítomnost tzv. ubíhajících (*runaway*) elektronů⁷, která způsobí lokální zvýšení ionizace, tím sníží hodnotu elektrického pole nutnou pro průraz a umožní tak vznik elektrického výboje v oblaku [14, 15]. Samotný výboj pak může být nastartován korónovým výbojem na hrotu tající ledové oblačné částice [5].

1.4 Bleskové výboje

V rámci každého blesku (*lightning flash*) vzniká jeden či více bleskových výbojů (*lightning strokes*), přičemž všechny bleskové výboje mají několik fází, vždy obsahující vůdčí (*leader*) a zpětný výboj (*return stroke*).

Jedná-li se o první výboj v rámci daného blesku, je první fází tzv. iniciační fáze (*preliminary breakdown*), během které dochází ke vzniku výboje uvnitř oblaku. Ta je pak následována prvním vůdčím výbojem (*stepped leader*), který krokově ionizuje

⁷Ubíhající elektrony vznikají interakcí vysokonergetického kosmického záření s částicemi atmosféry, kde vznikají spršky sekundárních částic rozpadajících se na elektrony, pozitrony a další elementární částice [17]. Tyto elektrony mají tak vysoké energie, že u nich převládne urychlující síla elektrického pole v bouřkovém oblaku nad brzdou silou způsobenou srážkami, a tehdy se stávají ubíhajícími. Při srážkách ubíhající elektronů s částicemi atmosféry vznikají další ubíhající elektrony [14].

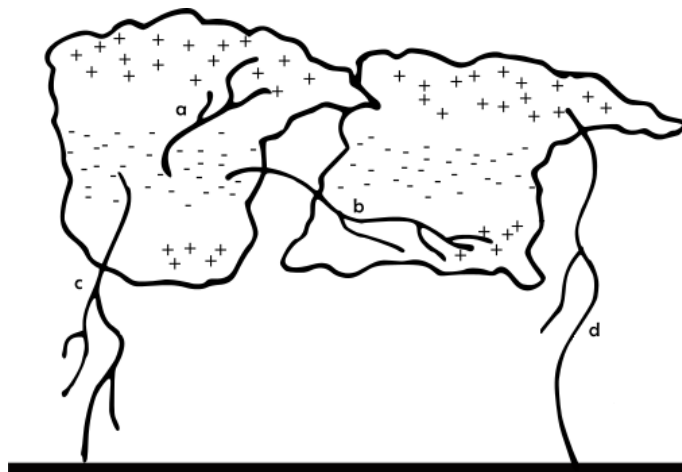
vzduch a vytváří vodivý kanál pro nadcházející zpětný výboj. Během fáze zpětného výboje protéká bleskovým kanálem proud o velikosti až několik stovek kiloampérů. Po této fázi může kanálem ještě nějakou dobu protékat tzv. udržovací proud o velikosti maximálně jednotek kiloampérů.

V případě, že je v oblaku ještě dostatek náboje, obvykle se začne formovat další bleskový výboj, který již začíná vůdčím výbojem (*dart leader*) spojitě se pohybujícím již vytvořenou vodivou cestou. Zpětný výboj v tomto případě nazýváme následným zpětným výbojem. Mezi jednotlivými bleskovými výboji dochází v oblaku k tzv. K a M změnám (*K-changes*, *M-components*). Jednotlivé fáze bleskového výboje jsou znázorněny na obrázku 1.9 a podrobněji popsány v kapitole 1.4.2.

1.4.1 Typy bleskových výbojů

Blesky rozdělujeme na různé typy, a to podle toho, mezi kterými oblastmi jejich výboje probíhají. Mezi dva základní typy patří blesky typu oblak-oblak (*cloud-to-cloud discharges*) a blesky typu oblak-země (*cloud-to-ground discharges*).

Blesky typu oblak-oblak jsou výboje probíhající mezi opačnými nábojovými centry téhož oblaku (*intracloud discharges*) případně dvou sousedních oblaků (*intercloud discharges*). Jsou také nejčastějším typem bleskových výbojů. U blesků typu oblak-země dochází k přenosu náboje mezi oblakem a zemí. Tento typ dále rozdělujeme na kladné a záporné blesky, a to podle polarity přenášeného náboje. Největší zastoupení v blescích typu oblak-země, cca 90 %, mají záporné blesky, jenž probíhají mezi záporným nábojovým centrem oblaku a zemí. Blesky kladné, probíhající naopak mezi kladným nábojovým centrem a zemí, se objevují přibližně jen v 10 % případů [9]. Všechny výše zmíněné typy bleskových výbojů jsou znázorněny na obrázku 1.8.

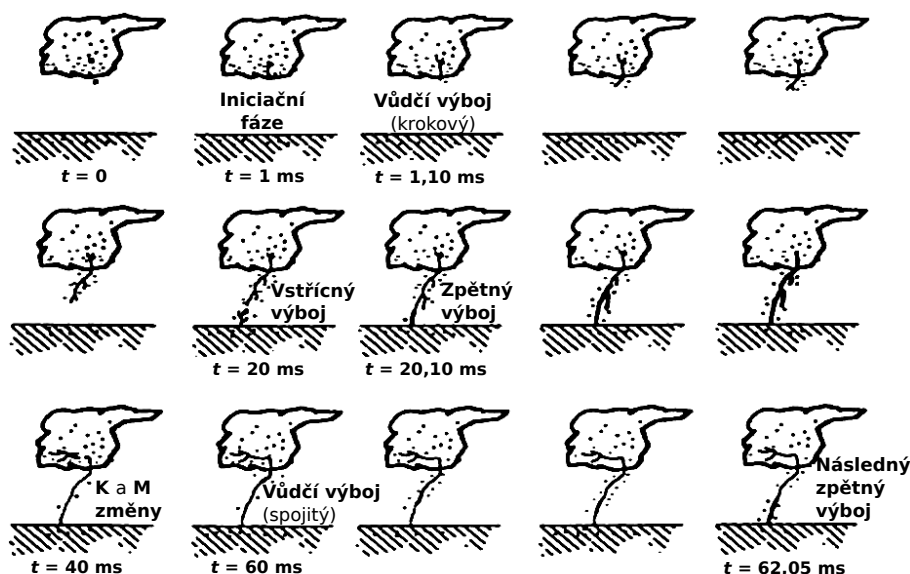


Obr. 1.8: Typy bleskových výbojů. (a) Blesk typu oblak-oblak (*intracloud*). (b) Blesk typu oblak-oblak (*intercloud*). (c) Záporný blesk typu oblak-země. (d) Kladný blesk typu oblak-země.

1.4.2 Časový vývoj záporných blesků typu oblak-země

Zde se zaměříme na vlastnosti záporných blesků typu oblak-země a jejich časový vývoj. Grafické znázornění časového vývoje je zobrazeno na obrázku 1.9 a jednotlivé vývojové fáze jsou popsány v následujících podkapitolách.

Nejprve jsou v oblaku vytvořena příslušná nábojová centra (čas $t = 0$, obrázek 1.9). Poté začíná iniciační fáze ($t = 1$ ms), během které v oblaku začne vznikat bleskový výboj, který potom v krocích postupuje směrem dolů. Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.3.3, doposud ovšem přesně nevíme, jakým mechanismem k samotnému vzniku výboje dochází. V momentě, kdy výboj opustí bouřkový oblak ($t = 1, 10$ ms), stane se z něj tzv. vůdčí výboj, který skokově ionizuje vzduch a postupně vytváří vodivý kanál. Když se vůdčí výboj přiblíží k zemi, velmi často se začne od nějakého vyvýšeného předmětu na zemi šířit směrem vzhůru tzv. vstříčný výboj. Spojí-li se jejich ionizované cesty ($t = 20$ ms), vzniká vodivý kanál mezi zemí a oblakem, kterým se začne směrem vzhůru šířit zpětný výboj ($t = 20, 10$ ms). Vzniklý kanál zůstává poté mírně vodivý a protéká jím udržovací proud. Pokud je v oblaku ještě dost nashromážděného náboje, může následně v oblaku docházet k tzv. K a M změnám ($t = 40$ ms), dále k typicky spojitému šíření dalšího vůdčího výboje ($t = 60$ ms) již vytvořeným kanálem a nakonec k následnému zpětnému výboji ($t = 62, 05$ ms). Obvyklý počet zpětných výbojů v rámci jednoho blesku je 3–5, nicméně některá pozorování zaznamenala až 26 zpětných výbojů [18].



Obr. 1.9: Typický časový vývoj blesku typu oblak-země (z části převzato z [18])

Iniciační fáze

Blesky typu oblak-země obvykle vznikají v oblasti spodní části záporného nábojového centra oblaku, kde za pomoci zvýšeného elektrického pole způsobeného přítomností dolního kladného nábojového centra, začne vznikat záporný streamer. První

průraz tedy může probíhat mezi těmito dvěma nábojovými centry [19]. Procesy, jenž se odehrávají při prvním formování bleskového výboje, nazýváme souhrnně iniciační fáze. Samotný vznik bleskového výboje nemůžeme přímo pozorovat, jelikož se odehrává uvnitř bouřkového oblaku, nicméně jsme schopni detekovat vyzařované elektromagnetické signály. Díky analýze těchto signálů víme, že během iniciační fáze dochází v oblaku k formování několika výbojů v rámci jednoho či více vodivých kanálů [5]. Jeden z těchto výbojů se později vyvine v záporný vůdčí výboj a začne po krocích postupovat směrem k zemi. Zaznamenáváme-li změny elektromagnetického pole generované bleskovými výboji, iniciační fázi zde pak vidíme jako sled bipolárních pulzů s dobou trvání maximálně několik milisekund. Různé vlastnosti iniciačních pulzů se pak mohou lišit s typem bouřky, vývojovým stádiem bouřkového oblaku, či geografickými podmínkami [9].

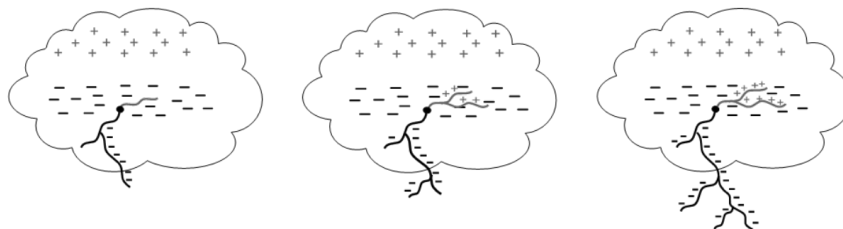
Polarita iniciačních pulzů je typicky shodná s polaritou prvního zpětného výboje. Baharudin ve své studii z roku 2010 zmiňuje 9 % detekovaných blesků nad Malajsií, u kterých byla polarita iniciačních pulzů opačná vzhledem k polaritě prvního zpětného výboje, avšak nelze s přesností říct, zda tyto konkrétní iniciační pulzy byly součástí stejného bleskového výboje jako příslušné zpětné výboje [20]. Co se týče amplitudy největšího iniciačního pulzu, její hodnota bývá nejčastěji přibližně poloviční vůči amplitudě prvního zpětného výboje. Nicméně existují studie, v rámci kterých bylo naměřeno nemalé procento blesků s amplitudou iniciačních pulzů převyšující amplitudu prvního zpětného výboje, a to například studie Gomesa a kol. ze Švédska [21], případně studie provedená v rámci bakalářské práce [22] či výzkumného úkolu [23].

Doba mezi zaznamenáním prvního iniciačního pulzu a zpětného výboje bývá nejčastěji 2–58 ms [24], avšak není to pravidlem. Například Marshall a kol. při svém měření zaznamenali u 5–10 % detekovaných blesků iniciační pulzy více než 100 ms před prvním zpětným výbojem [25]. Takto dlouhá doba může být důvodem, proč v rámci některých měření byly detekovány první zpětné výboje, kterým zdánlivě nepředcházely žádné iniciační pulzy [22]. V oblasti Hokuriku v Japonsku během zimního období Wu spolu s kolegy naměřili u záporných blesků časový rozestup mezi prvním iniciačním pulzem a prvním zpětným výbojem průměrně trvajícím 1, 3–5, 4 ms. Pro kladné blesky byl tento časový rozestup typicky delší a zase amplituda největšího iniciačního pulzu vzhledem k amplitudě prvního zpětného výboje mnohem menší, než tomu bylo u záporných blesků [26].

Díky studii iniciačních procesů, kterou provedla Kolmašová s kolegy v oblastech nad Korsikou a nad jižním pobřežím Francie, je nyní zřejmé, že během iniciační fáze dochází k vyzařování silných vysokofrekvenčních (*Very high frequency, VHF*) elektromagnetických signálů [27]. Tyto VHF signály byly detekovány současně s intenzivními peaky iniciačních pulzů, naměřenými pomocí širokopásmového analyzátoru. Pravděpodobně tedy během iniciační fáze dochází k rychlému krokovitému prodloužení bleskového kanálu uvnitř oblaku a dochází tak silnému elektromagnetickému vyzařování v širokém pásmu frekvencí.

Vůdčí výboj

Další fází vývoje blesku typu oblak-země je formování vůdčího výboje, který se vyvine z jednoho z výbojů vznikajících při iniciační fázi. Tento výboj je obvykle obousměrný s kladnou větví, tzn. přenášející kladný náboj, šířící se uvnitř záporného nábojového centra a zápornou větví postupující po krocích směrem k zemi. Počínaje momentem, kdy záporná větev opustí bouřkový oblak, ji začneme nazývat vůdčím výbojem. Často během jeho vývoje dochází k dalšímu větvení kanálu, přičemž všechny větve pak stejně jako původní narůstají krokově směrem k zemi. Schéma vzniku a vývoje vůdčího výboje je znázorněno na obrázku 1.10.



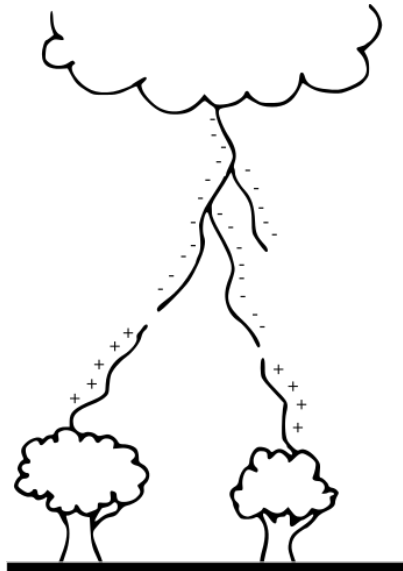
Obr. 1.10: Vznik a vývoj vůdčího výboje (převzato z [5])

Kanál vůdčího výboje bývá široký několik centimetrů a protéká jím proud přibližně 100 A, a to po celou dobu jeho vývoje. Když dochází k formování nového kroku, proud naroste na jednotky kiloampérů a teplota kanálu na hodnotu cca 20 000 K [5, 28]. Jednotlivé kroky se tvoří rychlostí až 10^8 m/s s časovou prodlevou asi 10–100 μ s a jejich délka bývá přibližně 10–100 m [29, 5]. Rychlost šíření celého vůdčího výboje k zemi je asi jen $3 \cdot 10^5$ m/s, což je způsobeno časovými prodlevami mezi jednotlivými kroky [30]. Avšak existuje závislost mezi množstvím či druhem hydrometeorů v oblaku a rychlostí šíření vůdčího výboje. Je-li v oblaku vysoké procento ledových částic, je elektromagnetické pole v této oblasti mnohem silnější a vůdčí výboj se zde pohybuje rychleji [31]. Krokovité prodlužování kanálu v rámci vůdčího výboje také vede k intenzivnímu vyzařování VHF signálů [32].

Jakmile vůdčí výboj naroste natolik, že se jeho čelo dostane do výšky maximálně pár stovek metrů od zemského povrchu, v tento moment se k němu od země začne šířit tzv. vstřícný výboj [5]. Vodivé cesty těchto dvou výbojů se následně spojí a nastane fáze zpětného výboje. V některých případech se s kanálem vůdčího výboje spojí více vstřícných výbojů a výsledný kanál vytvoří tzv. vidlicovitý tvar blesku (obrázek 1.11).

Zpětný výboj

Zpětný výboj je nejjasnější fází bleskového výboje a začíná po propojení vůdčího a vstřícného výboje, kdy dojde k vytvoření vodivého kanálu spojujícího oblak se zemí. Kladný náboj ze zemského povrchu se začne přesouvat směrem vzhůru do nově vytvořeného kanálu, rychlostí asi 10^8 m/s, a neutralizovat záporný náboj zde



Obr. 1.11: Vznik vidlicovitého tvaru blesku (z části podle [5])

zanechaný vůdčím výbojem [5, 33]. Vzniká tedy tok elektronů směrem k zemi a kanálem začne protékat elektrický proud o velikosti až 200 kA či více [34]. Takto silný proud způsobí velmi rychle zahřátí kanálu na teplotu přibližně 30 000 K, což poté vede k velkému rozjasnění kanálu a v neposlední řadě také k jeho rozepnutí [35]. Během extrémně rychlého rozšíření kanálu dochází k vzniku rázové vlny, projevující se akustickým třeskem – hromem.

Celková délka trvání zpětného výboje je v řádu stovek mikrosekund. Jakmile zpětný výboj projde celým bleskovým kanálem, zůstane kanál několik desítek milisekund zahřátý na teplotu řádově tisíce kelvinů a protéká jím tzv. udržovací proud [5]. V některých případech je tato fáze poslední fází blesku, nicméně je-li v oblaku stále dostatek nashromážděného náboje, nastávají pak ještě další děje, jako jsou například další vůdčí výboje, tentokrát postupující spojitě dříve vytvořenou cestou, či následné zpětné výboje.

O vlastnostech zpětných výbojů se dozvídáme různými způsoby. Jsme například schopni měřit elektrické proudy bleskovými kanály a studovat získané parametry, případně pozorovat změny jasnosti, anebo určovat teplotu, tlak a elektronovou hustotu v rámci kanálu [9]. Nejčastějším způsobem studia vlastností bleskových kanálů, ať už se jedná o fázi zpětného výboje či jakoukoliv jinou fázi, je však analýza změn elektrického a magnetického pole. V případě vzdálených bleskových výbojů¹ jejich pole obsahují pouze radiační složku, podrobněji v kapitole 1.2, a záznamy elektrického a magnetického pole se liší pouze konstantou, viz rovnice 1.10 a 1.11. Na principu měření radiační složky elektrického pole fungují také detekční sítě⁸, jež jsou díky vícebodovému měření následně schopny zrekonstruovat polohu bleskového výboje a navíc z naměřené amplitudy zpětného výboje získat odhad špičkového proudu.

¹Vzdálenými blesky rozumíme blesky vyskytující se minimálně několik kilometrů od měřícího zařízení.

⁸Více informací o detekčních sítích v kapitolách 2.2, 2.3.



Obr. 1.12: Fotografie blesku typu oblak-země s nejjasnější fází – zpětným výbojem (autor fotografie: Martin Popek, Ústav fyziky atmosféry, AV ČR)

Měření elektromagnetických polí využili také Said a kol. [36] ke studiu vlastností zpětných výbojů na jihovýchodním pobřeží USA. Většina záporných výbojů detekovaných nad oceánem měla velikost špičkového proudu vyšší než 75 kA, zatímco pro zpětné výboje nad pobřežím byla tato hodnota nižší, s průměrnou hodnotou 27 kA. Tento rozdíl může být důsledkem vyšší vodivosti slané vody. Například Pédeboy [37] a kol. provedli studii závislosti výskytu bleskových výbojů a proudu zpětnými výboji na ročním období. Jejich měření, probíhající ve Francii, ukázalo častější výskyt bleskové aktivity nad pobřežím v průběhu zimních měsíců. V letních měsících zase převažovaly bleskové výboje nad pevninou a proud zpětnými výboji byl nižší, než tomu bylo v zimním období.

K a M změny

Jakmile zpětný výboj dorazí do místa vzniku bleskového výboje v oblaku, dojde ke změně potenciálu v okolí, jež může vést ke vzniku kladného výboje pohybujícího se od kanálu zpětného výboje do záporného nábojového centra oblaku [5]. Díky těmto procesům pak dochází k přerozdělování náboje v oblaku doprovázeného prudkými změnami elektrického a magnetického pole [18]. Tyto děje, probíhající mezi jednotlivými bleskovými výboji, poté vedou k vzniku dalšího vůdčího výboje a souhrnně je nazýváme K-změny.

M-změny jsou procesy odehrávající se typicky několik milisekund po zpětném výboji, kdy bleskovým kanálem protéká udržovací proud a jsou doprovázeny dočasným zvýšením svítivosti kanálu [38]. Dochází zde ke vzniku výboje, který se pohybuje směrem k zemi a přitom podporuje udržovací proud.

Následné zpětné výboje

Je-li po prvním zpětném výboji v oblaku stále dostatek náboje, proběhnou zde K-změny a již vytvořeným kanálem se začne typicky spojitě šířit další vůdčí výboj. Jsou však případy, kdy si začne tento vůdčí výboj vytvářet částečně nebo úplně novou vodivou cestu a tehdy se pohybuje opět po krocích [9]. Důvodem rozdílného způsobu šíření je mnohem snazší postupování výboje v již vytvořeném vodivém kanálu o vysoké teplotě.

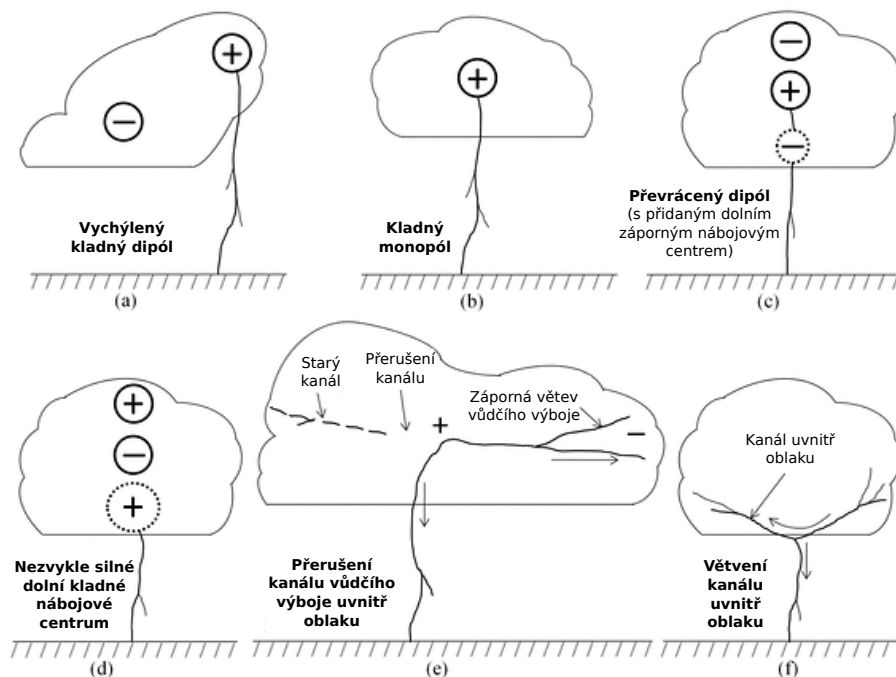
Jakmile tento vůdčí výboj dorazí k zemi, začne se směrem vzhůru šířit tzv. následný zpětný výboj, jehož mechanismus je totožný s prvním zpětným výbojem. Po tom, co následný zpětný výboj dorazí do oblaku, všechny výše zmíněné procesy se mohou znovu opakovat – opět nastanou K-změny, další spojitý vůdčí výboj a další následný zpětný výboj – a to do té doby, než M-změny dorazí k zemi, anebo dokud se nevyčerpá elektrický náboj v oblaku [5].

1.4.3 Kladné bleskové výboje typu oblak-země

Kladnými blesky nazýváme blesky přenášející kladný náboj z oblaku na zem. Z celkového počtu blesků typu oblak-země je pouze cca 10 % blesků kladných [32]. Jejich časový vývoj je téměř totožný s časovým vývojem záporných blesků, ovšem dochází zde k transportu náboje opačné polaritty, a tak se mechanismus různých fází mírně liší.

Kladné blesky vznikají v oblasti kladného nábojového centra oblaku, kde v rámci iniciační fáze stejně jako u záporných blesků dochází k tvorbě a vývoji tzv. obousměrného vůdčího výboje. V tomto případě je to ovšem kladná větev, která se pohybuje směrem k zemi, přičemž záporná větev tohoto výboje se šíří do kladného nábojového centra. Často kladné blesky vznikají v horním kladném nábojovém centru, které může být vůči zápornému nábojovému centru vychýleno do strany. Za této situace se pak kladný vůdčí výboj může šířit směrem dolů bez interakce se záporným nábojovým centrem oblaku, která by jinak vedla ke vzniku blesku typu oblak-oblak [5]. Nicméně existují i další možnosti vzniku kladného blesku v oblaku, některé potvrzené pozorováním a některé zatím pouze předpokládané [39]. Jednoduché grafické znázornění šesti možných scénářů vzniku kladného bleskového výboje je vyobrazeno na obrázku 1.13. Co se týče vlastností iniciačních pulzů u kladných blesků, bývá často poměr amplitudy největšího pulzu a pulzu zpětného výboje mnohem menší, než je tomu u záporných blesků [26]. Nag a kol. ve své práci zaměřené na kladné blesky uvádí, že pouze 15 % z celkového počtu detekovaných blesků bylo doprovázeno rozpoznatelnými iniciační pulzy v záznamech elektrického pole. Podle měření Wu a kolegů časový rozestup mezi iniciačními pulzy a prvním zpětným výbojem bývá pro kladné blesky obvykle delší [26], což potvrzuje i studie kladných blesků provedená Nagem a kol., kde se tento časový interval pohyboval v rozmezí 17–130 ms se střední hodnotou 40 ms [39].

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1.2, streamer přenášející kladný náboj, na rozdíl od streameru záporného, narůstá spojitě a to samé platí pro vůdčí výboj, jenž se z tohoto streameru postupně zformuje. Vůdčí výboje kladných blesků se tak k zemi pohybují téměř vždy spojitě. Jelikož zde obvykle nedochází ke krokovitému prodlu-



Obr. 1.13: Přijímané modely rozložení náboje a scénářů vedoucích ke vzniku kladných blesků typu oblak-země (převzato z [39])

žování bleskového kanálu, kladné vůdčí výboje ve většině případů nevyzařují elektromagnetické signály na vysokých frekvencích, jako je typické pro záporné vůdčí výboje [32]. Byly však pozorovány i kladné vůdčí výboje postupující po krocích, přičemž v těchto případech, jak uvedli například Rhodes a kol., Shao a kol. či Proctor, vyzářené VHF signály bývají stejně silné či silnější než u záporných vůdčích výbojů [40, 41, 42].

Při přiblížení vůdčích výboje k zemi se od vyvýšeného předmětu na zemi začne šířit záporný vstříčný výboj, který postupuje po krocích směrem vzhůru stejným způsobem, jako vůdčí výboj záporného blesku postupuje směrem k zemi. Po spojení cest záporného vstříčného výboje a kladného vůdčích výboje nastane, stejně jako u záporného blesku, fáze zpětného výboje, jehož mechanismus je shodný s mechanismem záporného zpětného výboje [5]. Proudů kladnými zpětnými výboji bývají vyšší, někdy i přesahující 300 kA [32]. Například Nag a kol. ve své práci uvádějí velikost špičkového proudu v rozmezí od 20 do 234 kA se střední hodnotou 75 kA, avšak při samostatné analýze blesků, kterým předcházely detekovatelné iniciační pulzy tato střední hodnota byla vyšší, a to 95 kA [39].

Zřídka se u kladných blesků objevují následné zpětné výboje, což je další rozdíl mezi kladnými a zápornými blesky. Často však kladné blesky doprovází zajímavé úkazy, jako například nadoblačné blesky. Tyto blesky, probíhající v oblastech mezi vršky bouřkových oblaků a spodní vrstvou ionosféry, nazýváme také přechodné světelné úkazy (*Transient Luminous Events, TLEs*) [9]. Patří sem například červení skříťci (*red sprites*), elfové (*elves*), hala, modré výtrysky (*blue jets*) anebo obří výtrysky (*gigantic jets*) [14].

Kapitola 2

Metody měření

2.1 Měření změn magnetického pole

K detekci změn magnetického pole vyzařovaného bleskovými výboji využíváme pozemní měřicí aparaturu umístěnou na stanici Ersa na severu ostrova Korsika. Měření zde probíhá v rámci projektu SOLID-PREVALS (*Space-based Optical Lightning Detection - PREparation, VALidation and Support*) za spolupráce Laboratoire d'Aérodologie OMP/CNRS/UPS Toulouse. Naměřená data jsou veřejně přístupná na webových stránkách Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd (<http://bleska.ufa.cas.cz/>).

Součástí měřicí aparatury je širokopásmový analyzátor BLESKA (*Broadband Lightning Electromagnetic Signal Keeper-Analyzer*), jenž je kopií vlnového analyzátoru IME-HF, vytvořeného na Ústavu fyziky atmosféry, AV ČR pro družici TARANIS¹ a přizpůsobený pro pozemní měření. BLESKA zabezpečuje rychlé digitální zpracování analogových signálů z předzesilovače (viz kapitola 2.1.1), měří ve frekvenčním rozsahu 5 kHz – 37 MHz, se vzorkovací frekvencí 80 MHz [43].

Analyzátor je přímo napojen na jednoduchou magnetickou smyčkovou anténu SLAVIA (*Shielded Loop Antenna with Versatile Integrated Amplifier*), která měří východo-západní složku změn magnetického pole (více o anténě v kapitole 2.1.1). Ukládání dat a jejich přenos je řízen řídicím počítačem. Čas prvního vzorku každého záznamu je odvozován ze sekundového pulsu systému GPS připojenému k řídicímu počítači. V případě výpadku proudu je systém napájen za pomoci autobaterie.

2.1.1 Anténa SLAVIA

Anténa SLAVIA je magnetická smyčka o ploše cca 0,25 m² a napětí na jejím výstupu je tedy úměrné časové změně magnetické indukce. Je sestavena z plastových odpadních trubek obalených měděnou páskou, jakožto vnějším vodičem, o poloměru 25 mm. Uvnitř trubek je jako vnitřní vodič upevněn měděný drát o poloměru 0,89 mm [9]. Fotografie antény viz obrázek 2.1.

¹TARANIS (*Tool for the Analysis of Radiation from lightNING and Sprites*) bude obíhat ve výšce 700 km nad povrchem Země a jejím hlavním cílem bude studium nadoblačných blesků a pozemních gama záblesků. Start družice je plánován na podzim roku 2020.

Anténa má v sobě integrovaný předzesilovač, umožňující zesílení slabých signálů z bleskových výbojů vyzařovaných například během iniciační fáze, a to až 90krát. Úroveň okolního rušení nám dovoluje detekovat pulzy s amplitudou od 0,4 nT a umožňuje pozorování submikrosekundových změn magnetického pole, jelikož pracuje dobře až do 90 MHz, nicméně frekvenční pásmo přístroje je limitováno frekvenčním pásmem analyzátoru BLESKA [27, 9, 43].



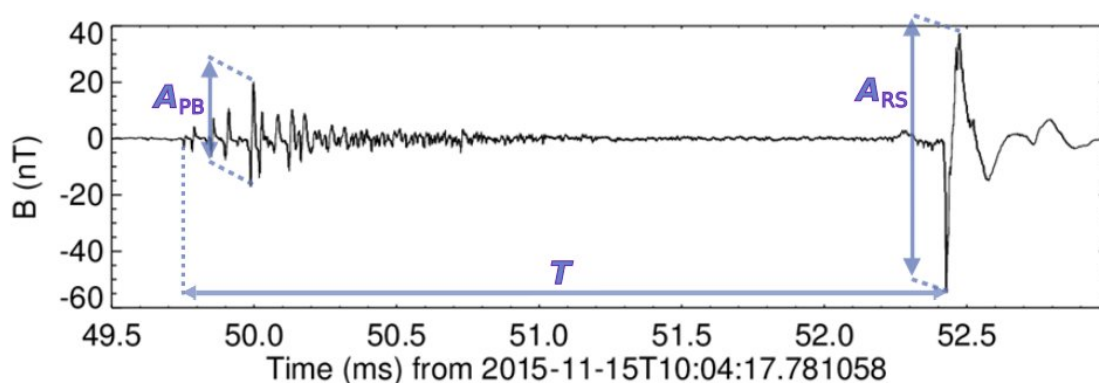
Obr. 2.1: Anténa SLAVIA.

2.1.2 Naměřená data a jejich zpracování

Data získávaná z měřicí aparatury jsou vlnové formy časových změn magnetického pole o délce 208 ms. Všechny naměřené úseky jsou následně numericky integrovány, a tím získáváme vlnové formy velikosti magnetického pole v časové závislosti.

V těchto záznamech pak můžeme nacházet signály vyzařované jednotlivými částmi bleskových výbojů, jako jsou například sekvence iniciačních pulzů či zpětné výboje, na které se zaměřujeme v této práci. Příklad iniciačních pulzů a pulzu zpětného výboje je vidět na obrázku 2.2, kde jsou taktéž modře vyznačeny parametry, jež byly v rámci práce pro jednotlivé pulzy z dat odčítány. Jedná se o amplitudu A_{PB} největšího pulzu iniciační fáze, amplitudu A_{RS} pulzu zpětného výboje a vzdálenost T mezi peakem prvního rozpoznatelného (větší než 0,4 nT) iniciačního pulzu a pulzem zpětného výboje.

Dále byla v případě časové shody záznamů k daným pulzům zpětných výbojů přiřazena data poskytnutá detekční sítí Météorage (více viz kapitola 2.2). Bleskovým výbojům s přidáním daty od detekční sítě Météorage byla navíc přiřazena data od měřících stanic SAETTA (více viz kapitola 2.3).



Obr. 2.2: Typický tvar iniciačních pulzů a pulzu zpětného výboje v časovém průběhu magnetického pole s modře vyznačenými parametry, které byly pro jednotlivé pulzy odčítány z dat.

2.2 Detekční síť Météorage

Francouzská detekční síť Météorage je součástí celoevropské detekční sítě EUCLID (*EUropean Cooperation for LIghtning Detection*). Tvoří ji 21 pozemních senzorů rozmístěných napříč Francií, na základě jejichž měření je možno získat informace o poloze, polaritě a velikosti špičkového proudu zaznamenanými zpětnými výboji [27]. Polohou zpětného výboje je zde myšlena 2D lokace místa, kde zpětný výboj udeřil do země. Detekční síť EUCLID a jí podobné jsou také schopny ve 2D lokalizovat mezioblačné blesky, avšak nedávají žádné informace o bouřkové buňce, ve které daný výboj vzniknul, ani o vývoji výboje či o jeho postupu bouřkovým oblakem.

Pro určení polohy zaznamenaného výboje je nutná jeho detekce alespoň čtyřmi senzory. Dosah jednotlivých senzorů je přibližně 625 km a medián přesnosti určení polohy daného výboje je cca 250 m, případně 150 m pro výboje v místech uvnitř sítě [44].

Velikost a polarita špičkového proudu se dopočítává pomocí modelu zpětného výboje (*Transmission Line Model*, stručně viz kapitola 1.2.3), který vyjadřuje hodnotu pole vyzařovaného vertikální anténou (bleskovým kanálem) jako funkci vzdálenosti antény od měřícího přístroje a proudu protékajícího anténou [10, 45]. Přesnost určení velikosti špičkového proudu je přibližně 18 % [27].

2.3 Měřicí systémy LMA

Narozdíl od detekčních sítí jako je Météorage (EUCLID) jsou měřicí systémy LMA (*LIghtning Mapping Array*) navrženy pro pozorování ve vysokofrekvenčním (VHF)

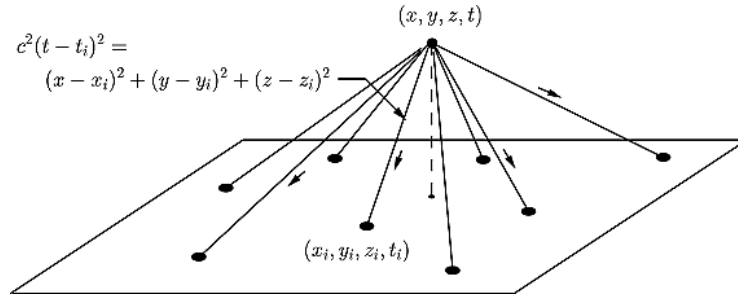
spektru¹, a tak jsou schopny sledovat procesy probíhající uvnitř oblaku během vývoje bleskových výbojů, jako například samotnou iniciaci blesku či vůdčí výboj.

Systémy LMA obsahují vždy několik pozemních stanic vybavených elektrickými anténami, obvykle rozmístěnými se vzájemnými rozestupy 15–50 km [46, 27]. Je-li VHF zdroj zaznamenán alespoň čtyřmi anténami, je poté s využitím metody *Time of arrival* možné dopočítat 3D lokaci místa vzniku daného zdroje. Přesnost lokace závisí na přesnosti určení času detekce a počtu a umístění jednotlivých stanic, jejichž měření využíváme k výpočtu. Každá stanice je vybavena systémem GPS, aby bylo možné časy detekce synchronizovat v rámci celého mapového pole [46]. Schopnost 3D lokace jednotlivých VHF signálů vyzařovaných během vývoje bleskových výbojů, kterou měřicí systémy LMA disponují, umožňuje mapování vývoje blesku přímo uvnitř oblaku.

Princip zmíněné metody *Time of arrival* je znázorněn na obrázku 2.3. V čase t dojde v místě (x, y, z) k vyzáření VHF signálu, který je posléze detekován vícero pozemními stanicemi. V místě (x_i, y_i, z_i) dojde k detekci tohoto signálu v čase t_i , pro který platí

$$c(t - t_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (2.1)$$

kde c je rychlost šíření signálu [46]. Různé časy t_i pro $N \geq 4$ detekce na různých stanicích jsou pak využity k výpočtu čtyř neznámých (x, y, z, t) .



Obr. 2.3: Grafické znázornění metody Time of arrival (převzato z [46])

2.3.1 SAETTA

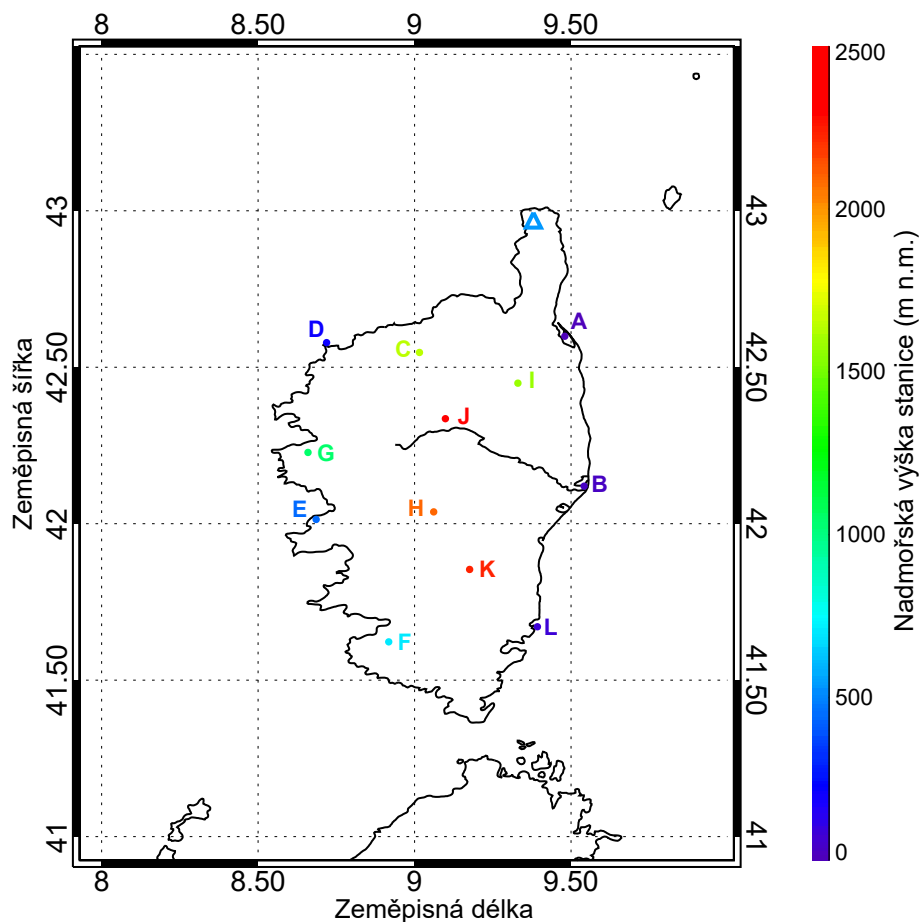
SAETTA (*Suivi de l'Activité Electrique Tridimensionnelle Totale de l'Atmosphère*) je síť dvanácti LMA stanic rozmístěných po ostrově Korsika². Mapu rozmístění stanic A–L spolu s lokací antény SLAVIA můžeme vidět na obrázku 2.4.

Každá stanice je schopna detekovat špičkovou intenzitu VHF zdrojů v rozmezí 60–66 MHz a jejich vzorkovací frekvence je 25 MHz [47, 48]. V rámci 80- μ s časového intervalu se vždy na lokální úložiště dané stanice zapíše výkon a čas detekce nejsilnějšího detekovaného VHF zdroje spolu s informací o celkovém počtu zdrojů

¹Obvykle fungují ve frekvencích okolo 60–66 MHz [27].

²Slovo „saetta“ navíc v korsickém jazyce znamená „blesk“.

detekovaných v tomto časovém oknu. Informace o zdroji jsou zachyceny tehdy, pokud jeho amplituda překročí jistý práh, který je pro každou stanicí nastaven zvlášť, na základě úrovně šumu v pozadí [48, 27]. 3D lokace místa vzniku daného zdroje se následně vypočte pomocí metody *Time of arrival* s využitím dat současně nejméně šesti stanic, aby se zabezpečila kontrola přesnosti řešení[47]. SAETTA je schopna 3D lokalizovat VHF zdroj jak uvnitř měřicí sítě, tak i vně, a to až do vzdálenosti 350 km od jejího středu [47].



Obr. 2.4: Mapa rozmístění stanic SAETTA na ostrově Korsika. Barevné tečky znázorňují jednotlivé stanice A–L s barvou odpovídající nadmořské výšce. Modrým trojúhelníkem je zakresleno umístění antény SLAVIA, barva opět odpovídá nadmořské výšce.

Kapitola 3

Výsledky

V rámci práce byla analyzována data zaznamenaná anténou SLAVIA od září do prosince 2015. K analýze vlastností naměřených bleskových výbojů byla navíc využita data poskytnutá detekční sítí Météorage a měřícími stanicemi SAETTA. Informace o anténě viz kapitola 2, o sítích Météorage a SAETTA viz kapitoly 2.2 a 2.3.

3.1 Návaznost na výzkumný úkol

Tato práce navazuje na studii provedenou ve výzkumném úkolu [23], kde byly v magnetických vlnových formách naměřených anténou SLAVIA v období od září do prosince 2015 identifikovány všechny bleskové výboje s iniciačními pulzy přímo předcházejícími pulz zpětného výboje. Pro všechny nalezené pulzy pak byly z dat odečteny parametry A_{PB} , A_{RS} a T , vynačené na obr. 2.2 a popsané v kapitole 2.1.2. V případě časové shody záznamů byla k daným zpětným výbojům přiřazena data od detekční sítě Météorage, která dala informace o poloze, polaritě a velikosti špičkového proudu těmito zpětnými výboji.

Výzkumný úkol tvoří analýza celkem 655 bleskových výbojů, přičemž 209 z nich disponuje přidanými daty od detekční sítě Météorage [23]. Všechny bleskové výboje jsou dále zpracovány ve formě grafů a histogramů týkajících se výše zmíněných parametrů A_{PB} , A_{RS} , T a velikosti špičkového proudu zpětným výbojem $|I_{RS}|$ a mapy výskytu bleskových výbojů. Vše však bez uvážení rozdílných polarit bleskových výbojů.

3.2 Datový soubor

Dataset analyzovaný v rámci výzkumného úkolu je dále v této práci rozšířen o data získaná od měřících stanic SAETTA, případně poupraven na základě nalezených nepřesností a v neposlední řadě analyzován odděleně s ohledem na polaritu daných zpětných výbojů.

Météorage

Z původních 655 bleskových výbojů byly pro statistiku v rámci této práce vybrány pouze bleskové výboje s přidanými daty od detekční sítě Météorage, tedy takové, u kterých je známa polarita a velikost špičkového proudu zpětným výbojem¹. Takovýchto blesků bylo ve výzkumném úkolu celkem 209, avšak u 10 z nich byl mezi iniciačními pulzy a zpětným výbojem detekován výboj mezioblačného blesku, a tak byly tyto případy vyřazeny ze statistiky pro diplomovou práci. Celkem tedy v této práci na základě parametrů A_{PB} , A_{RS} , T , $|I_{RS}|$ a polohy zpětného výboje studujeme vlastnosti 199 bleskových výbojů, z toho 176 záporných a 23 kladných. Výsledky pro záporné bleskové výboje byly zpracovány ve formě histogramů a grafů (viz obr. 3.1–3.6) a jsou popsány v kapitole 3.3. Výsledky pro kladné bleskové výboje jsou taktéž graficky zpracované (viz obr. 3.19–3.22) a popsané v kapitole 3.4.

SAETTA

Ze zmíněných 199 blesků s přidanými informacemi o poloze, polaritě a velikosti špičkového proudu zpětným výbojem od detekční sítě Météorage byly pro podrobnější studium vybrány blesky, u kterých byla Météorage schopna určit i přibližnou lokaci iniciačních pulzů. K těmto, celkem 92 bleskům, byla dále přiřazena data od měřících stanic SAETTA. V případě 26 blesků, a to 24 záporných a 2 kladných, se první 3D lokalizovaný VHF zdroj vyskytoval v časovém rozmezí ± 1 ms od času detekce prvního iniciačního pulzu. Zároveň byla kontrolována přibližná shoda 2D lokace (zeměpisná šířka a délka) prvního iniciačního pulzu sítě Météorage a prvního 3D rekonstruovaného VHF zdroje stanicemi SAETTA. Pro tyto blesky je v rámci práce provedena další studie zkoumající spojitost VHF zdrojů detekovaných měřícími stanicemi SAETTA a iniciačních pulzů v magnetických vlnových formách naměřených anténou SLAVIA. Za použití vypočtených 3D lokací detekovaných VHF zdrojů obdrženy od měřících stanic SAETTA je zde také pro vybrané blesky zkoumán jejich vývoj uvnitř oblaku. Studie záporných blesků je uvedena v kapitole 3.3.1 a výsledky graficky znázorněné na obr. 3.7–3.18. Pro kladné blesky viz kapitola 3.4.1 a obr. 3.25–3.34.

Při porovnávání času detekce VHF zdroje a prvního iniciačního pulzu byla uvážována doba šíření signálu a všechny časy zaznamenané stanicemi SAETTA byly přepočítány na čas detekce v místě antény SLAVIA. V případě 3D lokalizovaných VHF zdrojů byla za využití euklidovské geometrie spočtena vzdálenost mezi zdrojem a anténou SLAVIA, následně za předpokladu šíření signálu z VHF zdroje rychlostí světla v atmosféře (cca $0,9999 \cdot c$) vypočten čas, za který daný signál dorazí k anténě. Tento čas byl poté přičten k času vzniku VHF signálu, který ve svých datech uvádí SAETTA. Surová data z jednotlivých stanic SAETTA neobsahují informace o 3D lokaci daného VHF zdroje, a nejsou tudíž ani schopna určit čas vyzáření VHF zdroje v místě vzniku. V těchto datech jsou uvedené pouze časy detekce VHF zdrojů na jednotlivých SAETTA stanicích. Pro výpočet doby šíření VHF signálu k anténě SLAVIA byly tedy u dat z jednotlivých stanic využívány vždy souřadnice prvního

¹Z důvodu rozdílných vlastností kladných a záporných blesků (viz teoretický úvod) je pro získání užitečných výsledků nutno analyzovat kladné a záporné výboje odděleně.

3D lokalizovaného zdroje s předpokladem, že souřadnice zdrojů se v rámci daného výboje příliš nemění, a tedy rozdíl v čase detekce signálu stanicí SAETTA a anténou SLAVIA je přibližně konstantní. Poté byla opět za využití eukleidovské geometrie spočtena vzdálenost mezi anténou SLAVIA a zdrojem, vzdálenost mezi danou SAETTA stanicí a zdrojem a z jejich rozdílu pak za uvážení rychlosti šíření signálu spočten i časový rozdíl mezi detekcí anténou a stanicí SAETTA. Tento časový rozdíl byl pak přičten k času detekce SAETTA stanicí.

Izolované iniciační pulzy

Při analýze dat byly také nalezeny výboje obsahující pouze izolované iniciační pulzy, které nebyly v magnetických vlnových formách následovány pulzem zpětného výboje. V této práci je pro zajímavost uveden příklad jednoho takového výboje spolu se studií jeho vlastností (viz kapitola 3.5, obr. 3.35 a 3.36). Studie sekvencí izolovaných pulzů nalezených v datech zaznamenaných anténou SLAVIA v období podzimu 2015 je obsahem připravovaného článku [49].

Diskuze výsledků a porovnání s předešlými studiemi je k nalezení v kapitole 4.

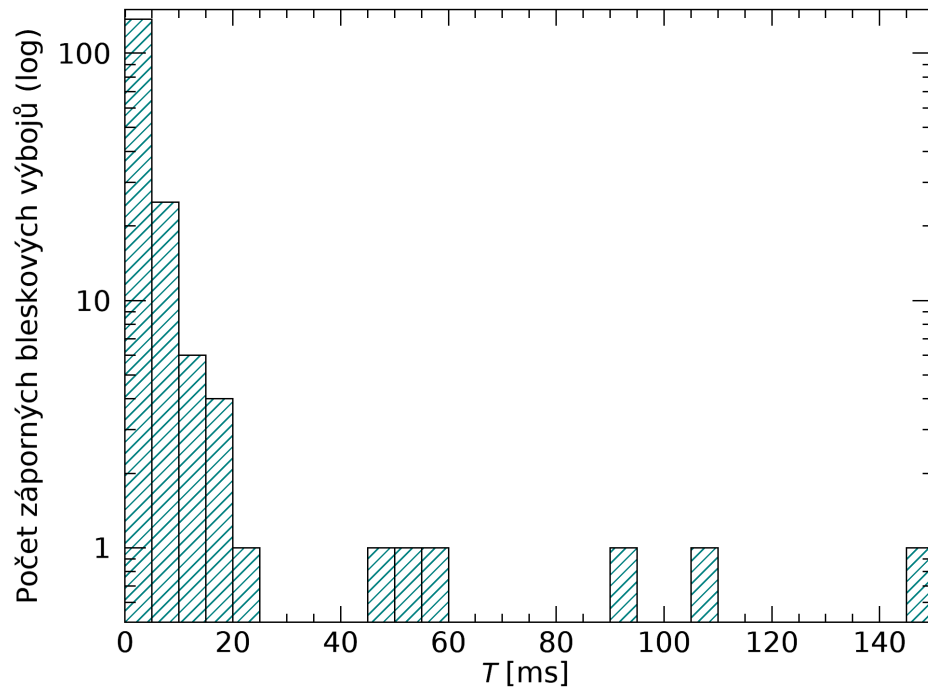
3.3 Výsledky: záporné bleskové výboje

Z analyzovaného datasetu 199 blesků s přidanými daty od detekční sítě Météorage bylo identifikováno celkem 176 blesků záporných. Jejich vlastnosti na základě parametrů A_{PB} , A_{RS} , T , $|I_{RS}|$ a polohy zpětného výboje dále studujeme v této kapitole.

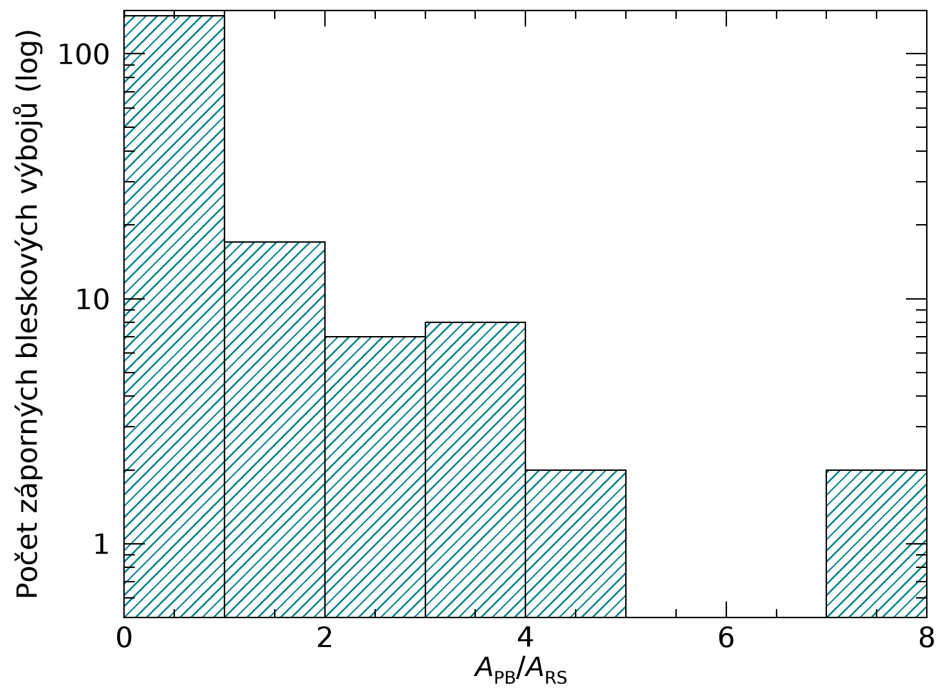
Histogram doby T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a po něm následujícím zpětným výbojem je vykreslen na obr. 3.1. Tato doba se pohybovala v rozmezí od 1 ms do 149,5 ms se střední hodnotou $\langle T \rangle \doteq 7$ ms a mediánem $\text{med}(T) \doteq 3$ ms.

U valné většiny blesků byla amplituda největšího iniciačního pulzu A_{PB} menší než amplituda odpovídajícího pulzu zpětného výboje A_{RS} , viz případy, kdy $A_{PB}/A_{RS} < 1$ na obr. 3.2. Nicméně ve čtyřech případech byla amplituda iniciačních pulzů A_{PB} až 4 a vícekrát větší než amplituda A_{RS} odpovídajícího zpětného výboje. Střední hodnota poměru A_{PB}/A_{RS} je $\langle A_{PB}/A_{RS} \rangle \doteq 0,8$ a medián $\text{med}(A_{PB}/A_{RS}) \doteq 0,3$.

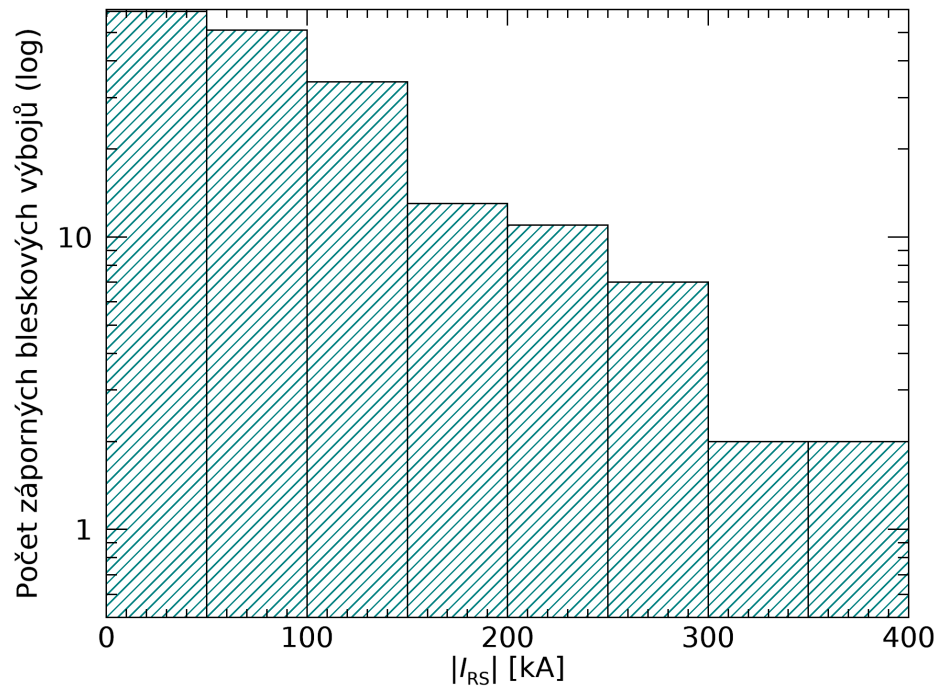
Na obr. 3.3 je vidět histogram velikosti špičkového proudu zpětnými výboji $|I_{RS}|$. Hodnoty se pohybují od jednotek kA až po 380 kA, přičemž o něco častější jsou hodnoty do 100 kA. Střední hodnota velikosti špičkového proudu je $\langle |I_{RS}| \rangle \doteq 97$ kA a medián $\text{med}(|I_{RS}|) \doteq 78$ kA.



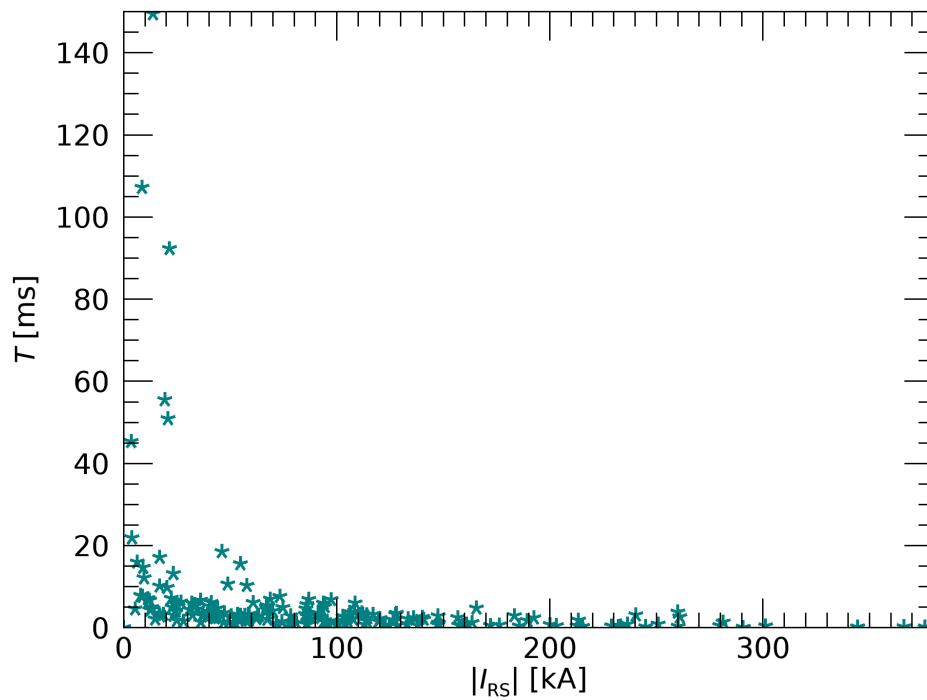
Obr. 3.1: Histogram časové prodlevy T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem pro záporné bleskové výboje.



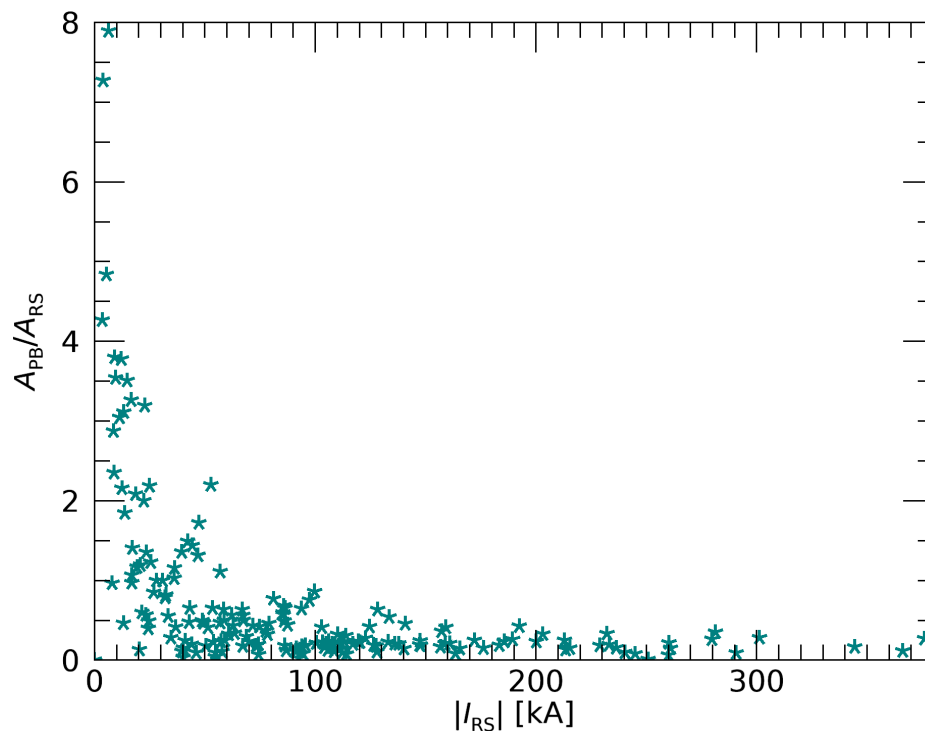
Obr. 3.2: Histogram poměru amplitud největšího iniciačního pulzu A_{PB} a pulzu následujícího zpětného výboje A_{RS} pro záporné bleskové výboje.



Obr. 3.3: Histogram velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ zápornými zpětnými výboji.



Obr. 3.4: Závislost doby T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem na velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ pro záporné bleskové výboje.

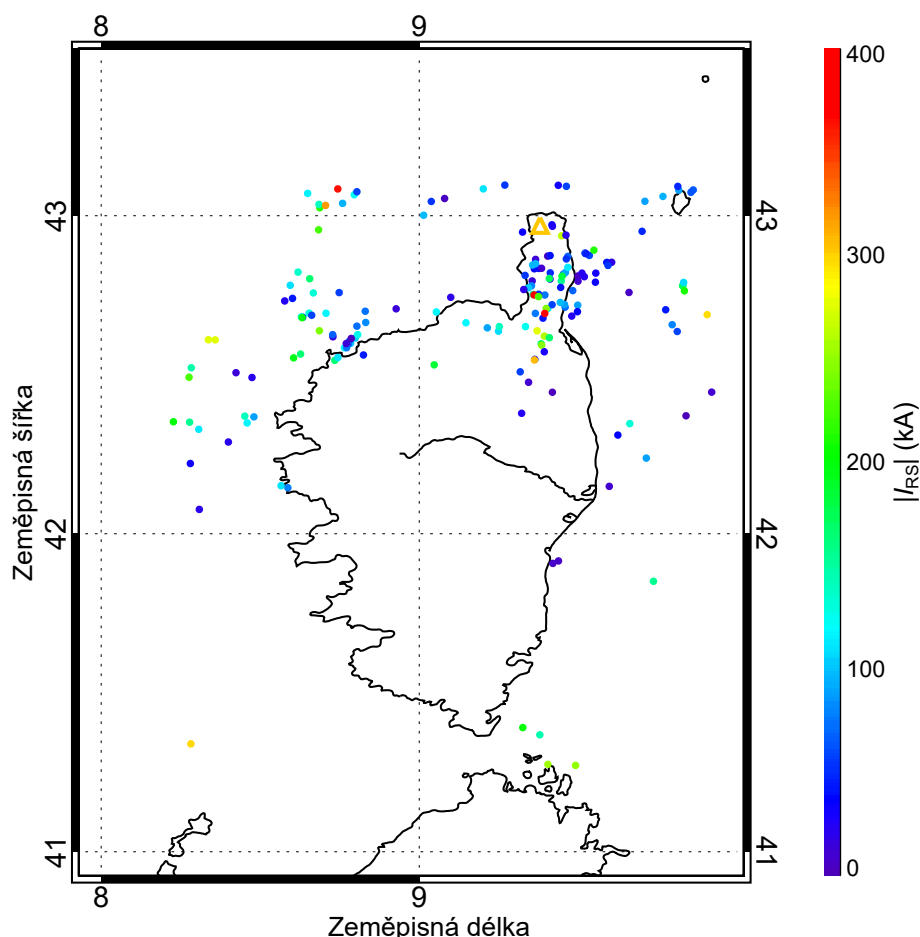


Obr. 3.5: Závislost poměru amplitud největšího iniciačního pulzu A_{PB} a odpovídajícího pulzu zpětného výboje A_{RS} na velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ pro záporné bleskové výboje.

Na obr. 3.4 je vykreslen graf závislosti doby T na velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ pro záporné bleskové výboje. Je zde vidět, že pro zpětné výboje s velikostí proudu $|I_{RS}| \geq 60\text{kA}$ byla vždy doba T mezi prvním iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem kratší než 10 ms.

Podobně pak na obr. 3.5, kde je pro záporné výboje vykreslena závislost poměru amplitud A_{PB} a A_{RS} na velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$, vidíme, že pro zpětné výboje s velikostí proudu $|I_{RS}| \geq 60\text{kA}$ byla navíc amplituda A_{PB} největšího iniciačního pulzu vždy menší než amplituda A_{RS} odpovídajícího pulzu zpětného výboje.

Mapa znázorňující 2D lokace míst, kde udeřily záporné zpětné výboje, spolu s barevným rozlišením znázorňujícím velikost špičkového proudu daným zpětným výbojem je vykreslena na obr. 3.6. Spojitost mezi velikostí špičkového proudu $|I_{RS}|$ a místem výskytu nebyla pozorována, silné i slabé zpětné výboje byly zaznamenány jak nad pevninou, tak nad mořem.



Obr. 3.6: Mapa výskytu záporných zpětných výbojů s barevnou škálou odpovídající velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ daným zpětným výbojem. Žlutý trojúhelník znázorňuje polohu antény SLAVIA.

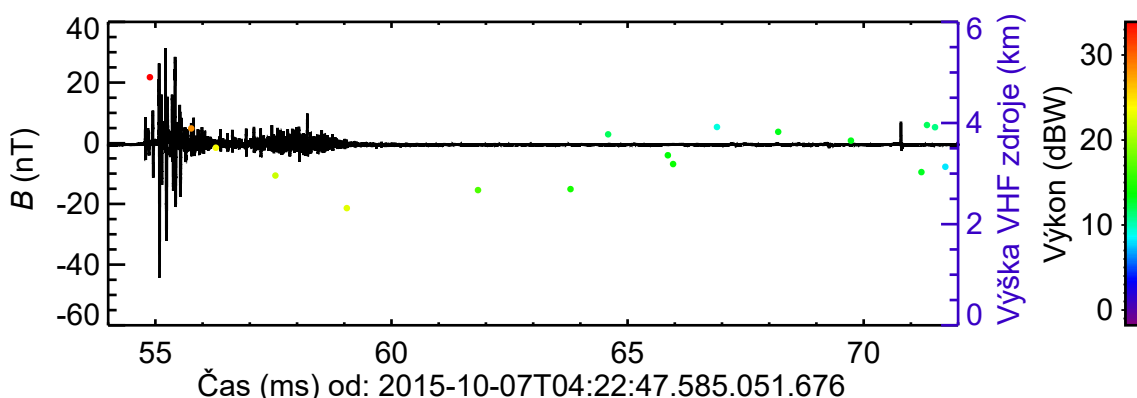
3.3.1 Bleskové výboje s přidáním daty od SAETTA

Tato kapitola se zaměřuje na studium souvislosti VHF zdrojů detekovaných stanicemi SAETTA s bleskovou aktivitou. Bylo vybráno celkem 24 záporných blesků, pro které byly srovnávány data ze stanic SAETTA s magnetickými vlnovými formami zaznamenanými anténou SLAVIA. Pro všechna SAETTA data byla před samotným srovnáváním uvažována doba šíření VHF signálu k anténě SLAVIA a všechny časy byly přepočítány na čas detekce v místě antény SLAVIA. Podrobněji o výběru datasetu a přepočtu doby šíření viz kapitola 3.2.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, ke studiu zde byly vybrány blesky, pro které byl čas detekce prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje v rozmezí ± 1 ms od času detekce prvního iniciačního pulzu. Níže jsou jako příklad uvedeny 2 výboje s význačnými vlastnostmi, a to výboj s vysokým poměrem A_{PB}/A_{RS} (viz obr. 3.7, 3.8, případně 3.15 a 3.16) a výboj s proudem $|I_{RS}|$ nad 100 kA (viz obr. 3.9 a 3.10).

Příkladem výboje s velkým poměrem A_{PB}/A_{RS} je výboj ze dne 7. 10. 2015 po 4:22:47,585 UTC. Pro tento výboj byl poměr amplitud $A_{PB}/A_{RS} \doteq 7,9$. Čas mezi

prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje $T \doteq 16$ ms a velikost proudu zpětným výbojem $|I_{RS}| \doteq 6,3$ kA. Na obrázku 3.7 je černě vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA v časovém okně od iniciačních pulzů po první zpětný výboj a barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje detekované SAETTA stanicemi, s barevnou škálou odpovídající výkonu daného zdroje a vertikálním rozmístěním odpovídajícím výšce vzniku zdroje. První 3D lokalizovaný VHF zdroj byl detekován celkem 8 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 4,9 km nad hladinou moře a jeho výkon činil cca 12,2 dBW. V rámci tohoto výboje byly SAETTA stanice schopny 3D lokalizovat celkem 17 VHF zdrojů, přičemž 5 z nich se vyskytovalo u iniciačních pulzů. Z obrázku 3.7 je navíc vidět, že první VHF zdroj měl největší výkon a výkon dalších zdrojů poté s časem spíše klesal. Také výška prvního VHF zdroje byla v rámci výboje nejvyšší. Polohy 3D lokalizovaných zdrojů vykreslené přes mapu Korsiky jsou pak znázorněné na obr. 3.15 a 3.16.

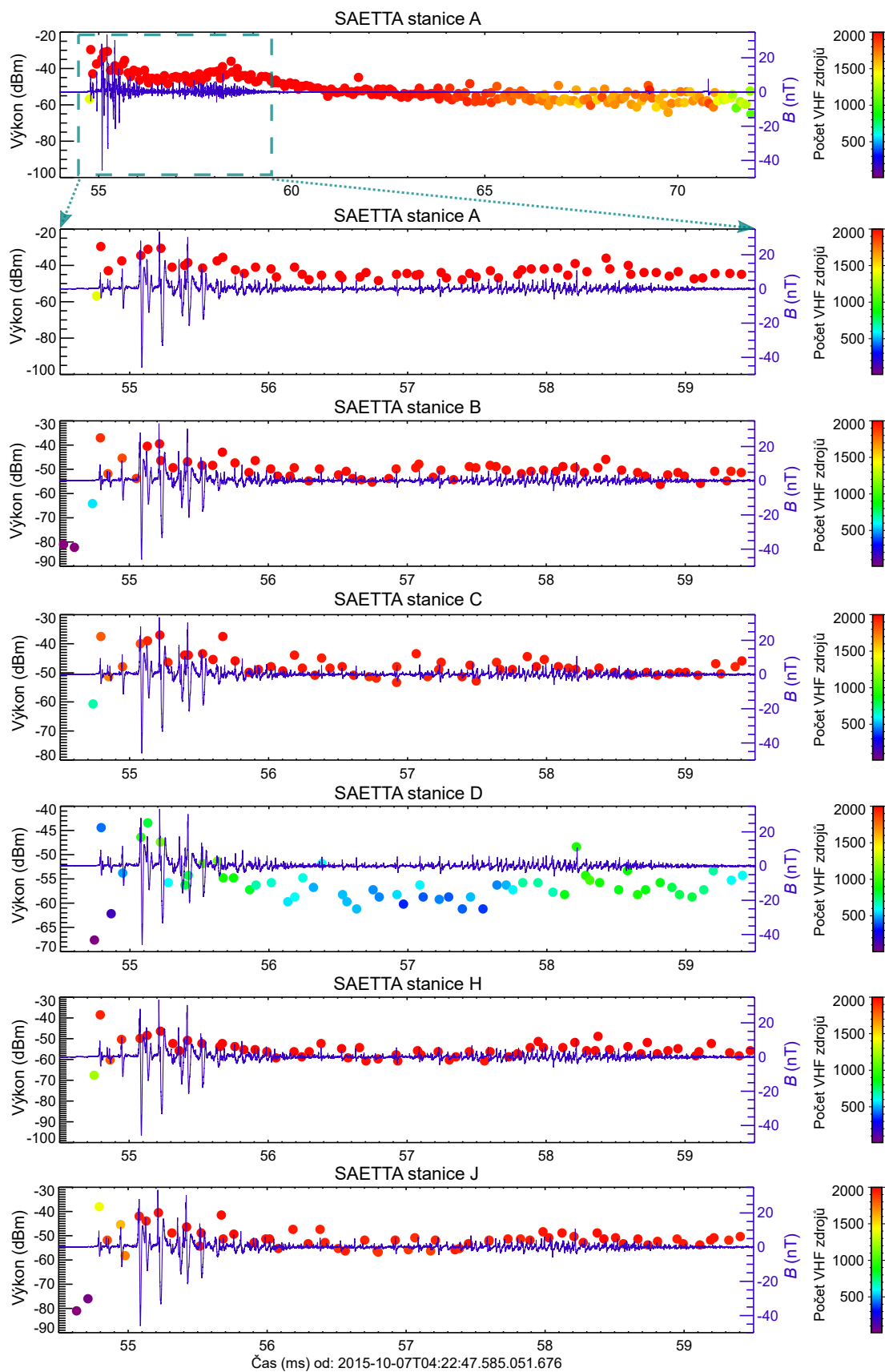


Obr. 3.7: Příklad výboje s velkým poměrem A_{PB}/A_{RS} . Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA, barevná škála odpovídá výkonu daného zdroje a jejich vertikální rozmístění výšce jejich vzniku.

Stejný výboj je zobrazen také na obr. 3.8, kde je tentokrát modře vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA a barevné tečky zde znázorňují VHF zdroje detekované jednotlivými SAETTA stanicemi, s barevnou škálou odpovídající celkovému počtu detekovaných VHF zdrojů a vertikálním rozmístěním odpovídajícím výkonu nejsilnějšího zdroje v daném 80- μ s časovém intervalu². Body s fialovým zabarvením jsou na úrovni okolního šumu. Na horním obrázku je vykreslen celý výboj s VHF zdroji zaznamenanými nejbližší SAETTA stanicí, stanicí A. Je zde vidět, že největší počet zdrojů byl zaznamenan v čase výskytu iniciačních pulzů a poté jejich počet s časem klesal, přičemž největší pokles následoval v čase po zaznamenaní pulzu zpětného výboje. Pod horním obrázkem jsou pak vykreslena data z 6 různých SAETTA stanic³ s přiblížením na iniciační pulzy. VHF zdroje se vyskytovaly v časech shodných s časy intenzivních peaků iniciačních pulzů. Na obr. 3.8 je také vidět, že různé stanice SAETTA zaznamenaly vždy značný, případně maximální počet VHF zdrojů v daných 80- μ s časových oknech, nicméně na obr. 3.7 vidíme, že SAETTA byla schopna 3D lokalizovat pouze 5 zdrojů nacházejících se v čase iniciačních pulzů.

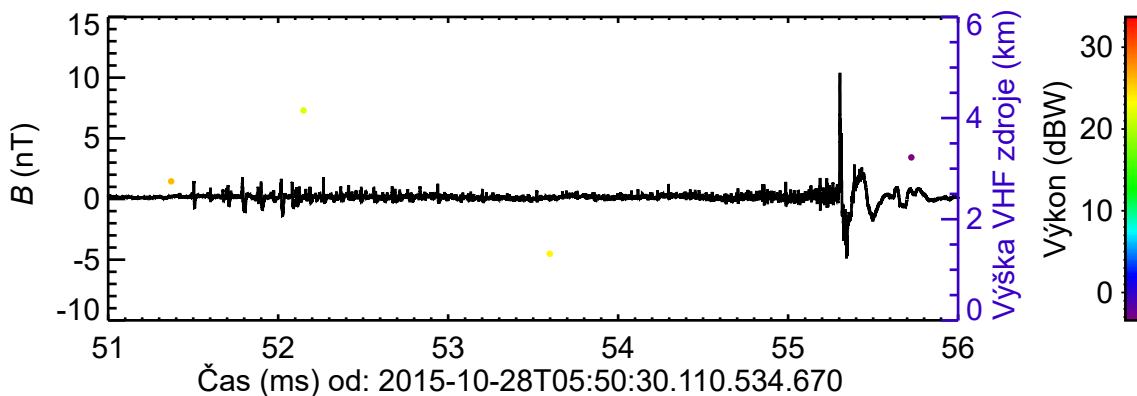
²Informace o ukládání dat na SAETTA stanicích jsou podrobněji uvedeny v kapitole 2.3.

³Mapu rozmístění jednotlivých SAETTA stanic můžeme vidět na obr. 2.4.



Obr. 3.8: Příklad výboje s velkým poměrem A_{PB}/A_{RS} (tentýž výboj se zakreslenými 3D lokalizovanými VHF zdroji viz obr. 3.7). Modře: vlnová forma naměřená anténou SLAVIA. Barevné tečky: VHF zdroje detekované jednotl. SAETTA stanicemi.

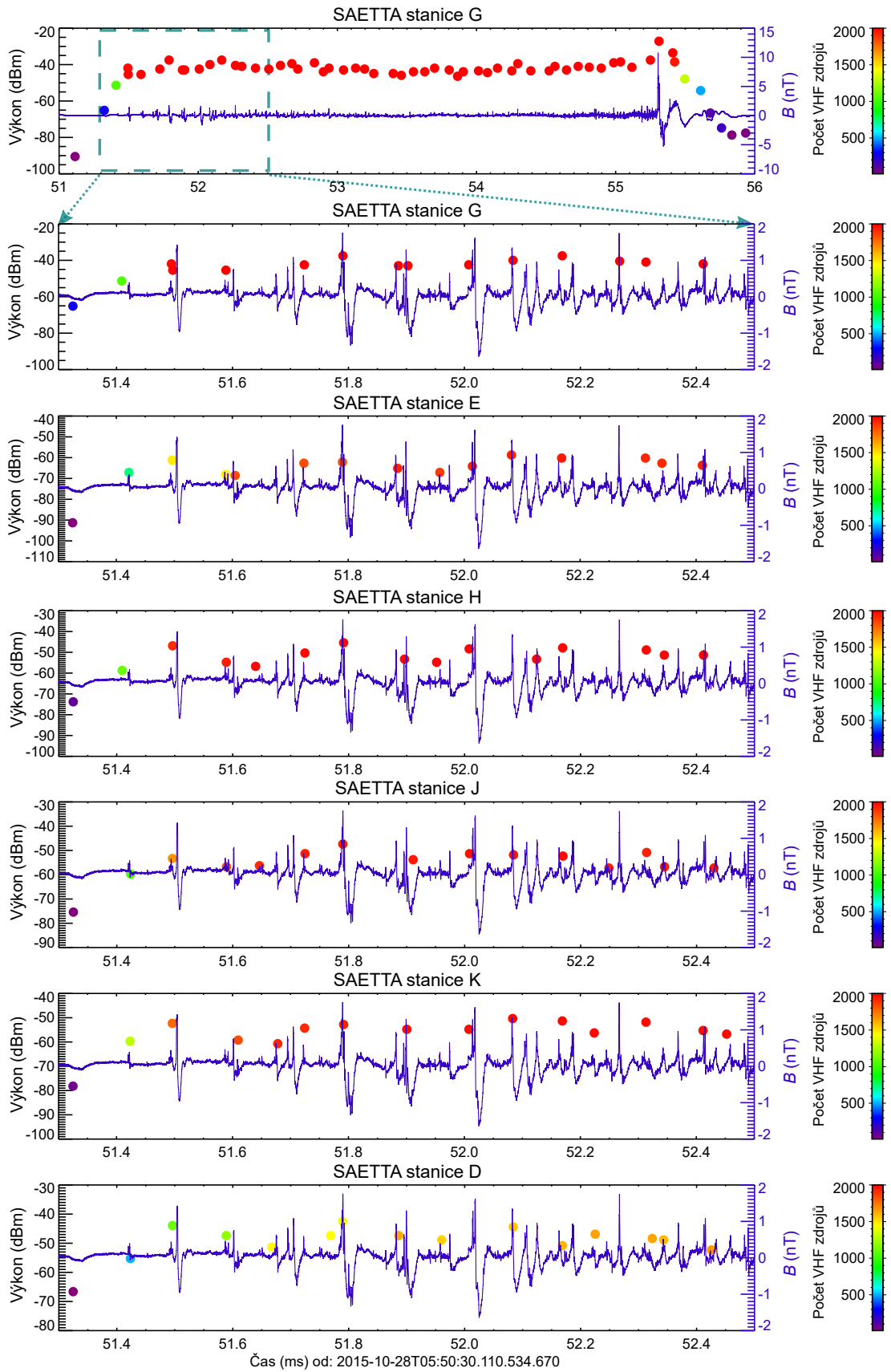
Příkladem výboje s proudem $|I_{RS}|$ nad 100 kA je výboj ze dne 28. 10. 2015 v čase po 5:50:30,111 UTC. Pro tento výboj byla velikost proudu zpětným výbojem $|I_{RS}| \doteq 108,2$ kA. Čas mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje $T \doteq 3,9$ ms a poměr amplitud $A_{PB}/A_{RS} \doteq 0,2$. Na obrázku 3.9 je vykreslen výboj od iniciačních pulzů po první zpětný výboj, opět s barevnými tečkami znázorňujícími 3D lokalizované VHF zdroje detekované SAETTA stanicemi. První 3D lokalizovaný VHF zdroj byl detekován celkem 6 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 3,8 km nad hladinou moře a jeho výkon činil cca 2,5 dBW. V rámci tohoto výboje byly SAETTA stanice schopny 3D lokalizovat celkem 4 VHF zdroje, přičemž 2 z nich se vyskytovaly u iniciačních pulzů.



Obr. 3.9: Příklad výboje s proudem $|I_{RS}|$ nad 100 kA. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA, barevná škála odpovídá výkonu daného zdroje a jejich vertikální rozmístění výšce jejich vzniku.

Výboj z obr. 3.9 je zobrazen také na obr. 3.10, kde je modře vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA a barevné tečky znázorňují VHF zdroje detekované jednotlivými SAETTA stanicemi, s barevnou škálou odpovídající celkovému počtu detekovaných VHF zdrojů a vertikálním rozmístěním odpovídajícím výkonu nejsilnějšího zdroje v daném 80- μ s časovém intervalu⁴. Na horním obrázku je vykreslen celý výboj s VHF zdroji zaznamenanými nejbližší SAETTA stanicí, stanicí G. Je zde vidět, obdobně jako v případě výboje vykresleného na obr. 3.8, že největší počet zdrojů byl zaznamenán v čase od začátku iniciačních pulzů po pulz zpětného výboje, přičemž po zaznamenání pulzu zpětného výboje jejich počet rapidně poklesl. Taktéž, stejně jako u výboje z obr. 3.8, v době před iniciačními pulzy byl počet VHF zdrojů nulový anebo minimální a v okolí prvního iniciačního pulzu rapidně narostl až na maximální zaznamenaný počet 2000 zdrojů. Pod horním obrázkem jsou pak vykreslena data z 6 různých SAETTA stanic s přiblížením na iniciační pulzy. VHF zdroje se opět vyskytovaly v časech shodných s časy intenzivních peaků iniciačních pulzů. Na obr. 3.10 je také vidět, že různé stanice SAETTA zaznamenaly vždy velký až maximální počet VHF zdrojů v daných 80- μ s časových oknech, nicméně na obr. 3.9 opět vidíme, že SAETTA byla schopna 3D lokalizovat pouze 2 zdroje nacházející se v čase iniciačních pulzů.

⁴Body s fialovým zabarvením jsou na úrovni okolního šumu.



Obr. 3.10: Příklad výboje s proudem $|I_{RS}|$ nad 100 kA (tentýž výboj s 3D lokalizovanými VHF zdroji viz obr. 3.9). Modře: vlnová forma naměřená anténou SLAVIA. Barevné tečky: VHF zdroje detekované jednotl. SAETTA stanicemi.

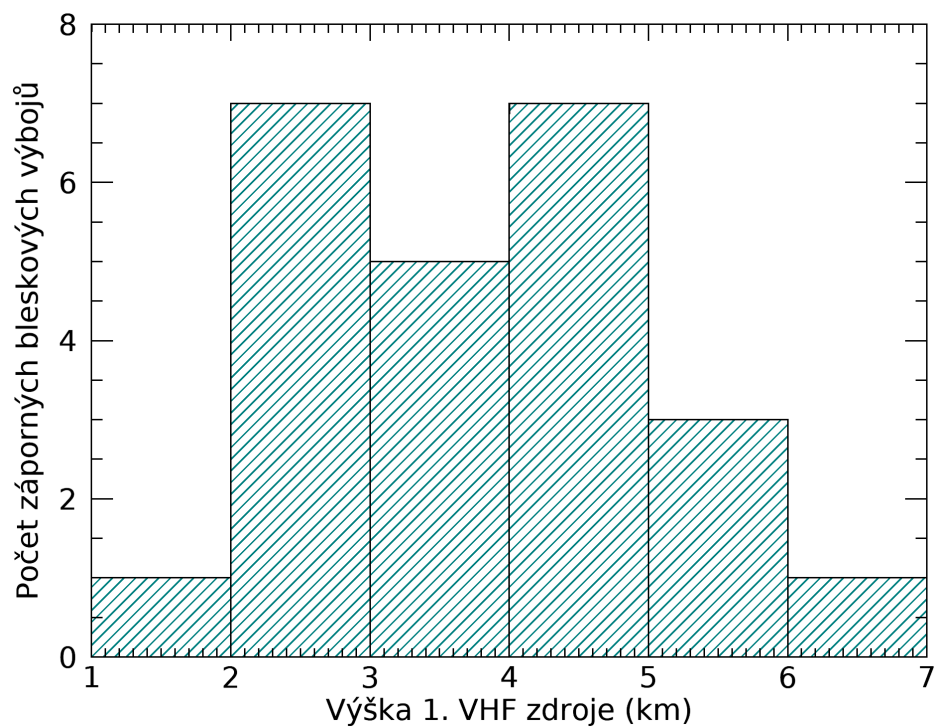
Výška vzniku bleskového výboje

Při vykreslení surových dat z jednotlivých SAETTA stanic jsme i u ostatních výbojů, stejně jako u výbojů z obr. 3.8 a 3.10, pozorovali maximální anebo vysoký počet detekovaných zdrojů v $80\text{-}\mu\text{s}$ časových oknech pro různé stanice SAETTA, zatímco malý počet 3D lokalizovaných zdrojů uváděných SAETTou. Současně jsme u všech 24 studovaných záporných blesků pozorovali obdobné chování VHF zdrojů detekovaných jednotlivými stanicemi, a to velký nárůst počtu detekovaných VHF zdrojů při začátku iniciační fáze a naopak rapidní pokles po čase prvního zpětného výboje a zejména časovou shodu intenzivních peaků iniciačních pulzů s detekovanými VHF zdroji. Na základě těchto poznatků, kterými potvrzujeme výsledky, jež uvedli Kolmašová a kol. ve své práci o souvislosti VHF zdrojů a iniciační fáze [27], můžeme tvrdit, že VHF signály jsou vyzařovány během rychlého skokovitého prodlužování bleskového kanálu v průběhu iniciační fáze, případně fáze vřdicího výboje, a jsou tedy pouze jinak detekovaným projevem stejného fyzikálního procesu. Potom platí, že výška prvního zaznamenaného 3D lokalizovaného VHF zdroje v čase ± 1 ms od prvního rozpoznatelného iniciačního pulzu je přibližně výškou vzniku daného bleskového výboje.

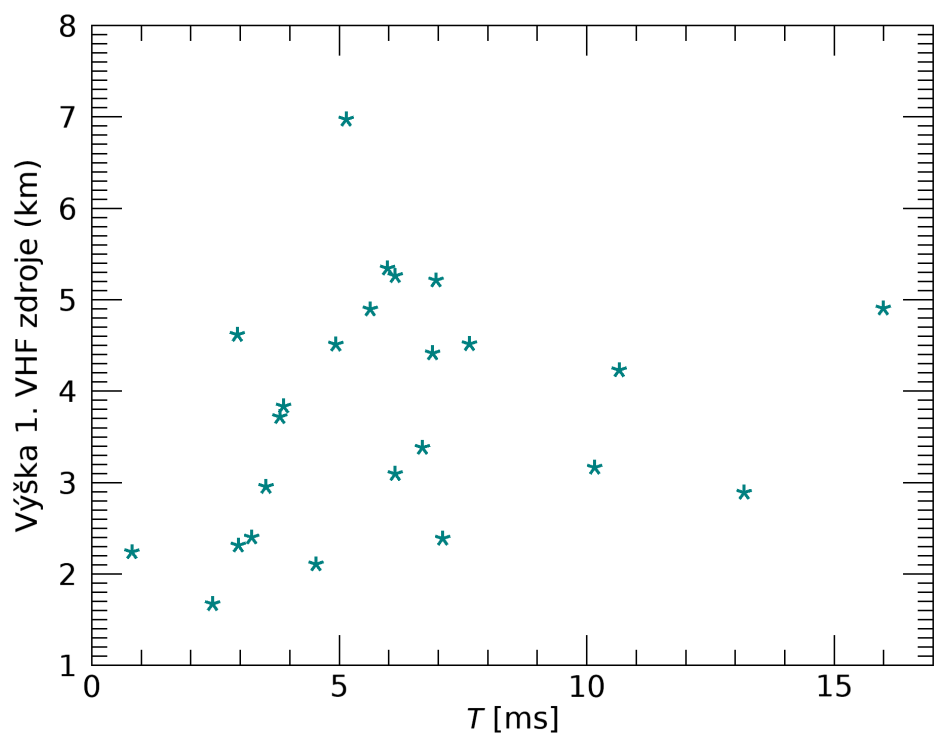
Na obr. 3.11 je vykreslen histogram výšek VHF zdrojů detekovaných v časech ± 1 ms od prvního iniciačního pulzu, odpovídajících výškám vzniku studovaných výbojů, pro všech 24 záporných bleskových výbojů. Hodnoty se pohybují přibližně od 1,7 km do 7 km nad hladinou moře, přičemž nejčastější výška vzniku záporného bleskového výboje byla v rozmezí 2 – 5 km. Střední hodnota výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje stejně jako její medián je přibližně 3,8 km.

Na obr. 3.12 je vykreslen graf závislosti výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na době T mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje pro záporné bleskové výboje. Žádná výrazná závislost mezi těmito parametry není patrná. Stejně tak i na obr. 3.13, kde je pro záporné výboje vykreslena závislost výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na poměru amplitud A_{PB} a A_{RS} .

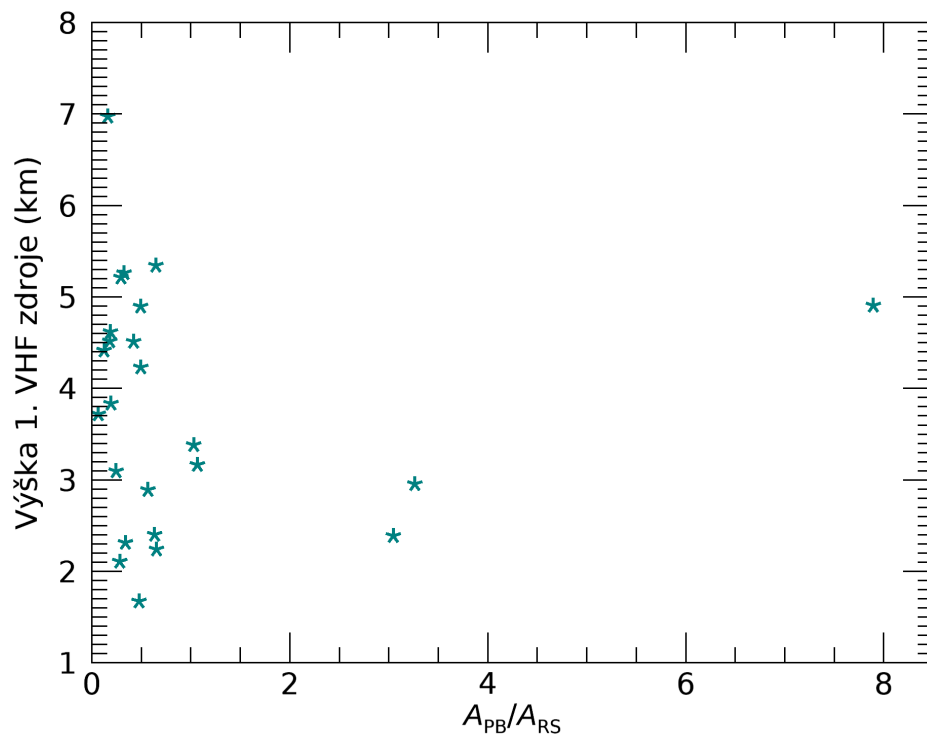
Obr. 3.14 znázorňuje závislost výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na velikosti proudu $|I_{RS}|$ daným zpětným výbojem, opět bez výrazně viditelné závislosti.



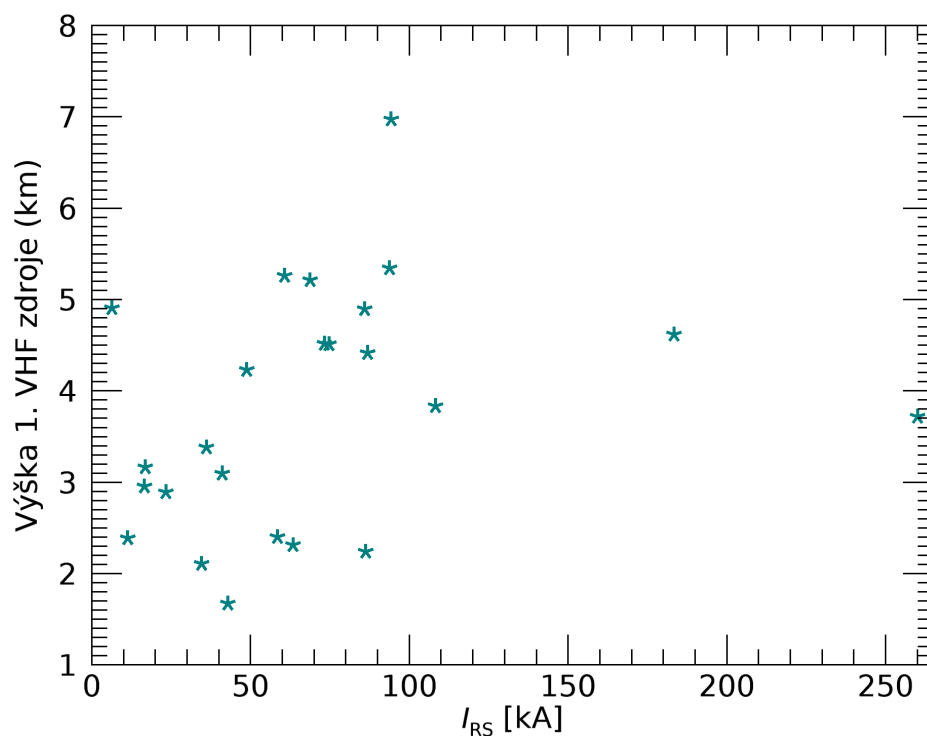
Obr. 3.11: Histogram výšek prvních 3D lokalizovaných VHF zdrojů v rámci záporných výbojů.



Obr. 3.12: Závislost výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na době T mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje pro záporné bleskové výboje.



Obr. 3.13: Závislost výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na poměru amplitud A_{PB}/A_{RS} pro záporné bleskové výboje.



Obr. 3.14: Závislost výšky prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje na velikosti proudu $|I_{RS}|$ daným záporným zpětným výbojem.

3D mapování vývoje výbojů

Po potvrzení, že detekované VHF zdroje jsou projevem rychlého prodlužování bleskového kanálu během iniciační fáze a fáze vůdčího výboje, jsme schopni s pomocí 3D lokalizovaných VHF zdrojů mapovat vývoj bleskového výboje v oblaku.

Pro většinu záporných blesků nebyla ovšem SAETTA schopna 3D lokalizovat dostatek VHF zdrojů k mapování vývoje v rámci jednoho bleskového výboje. Zde je proto uveden příklad 3D mapování jednoho záporného výboje v čase od začátku iniciační fáze po zpětný výboj (viz obr. 3.15 a 3.16) a jednoho záporného blesku s následnými zpětnými výboji v čase od začátku iniciační fáze až po poslední zpětný výboj v rámci stejného blesku (viz obr. 3.18).

Jako příklad 3D mapování vývoje bleskového kanálu v rámci jednoho výboje uvádíme mapu VHF zdrojů patřících k výboji ze dne 7. 10. 2015, po 4:22:47,585 UTC. Tento výboj byl studován již na začátku kapitoly 3.3.1, viz obr. 3.7 a 3.8. Na obr. 3.15 je pro lepší orientaci vykreslena lokace VHF zdrojů s ohledem na celou Korsiku, na obr. 3.16 je pak přiblíženo na samotné VHF zdroje.

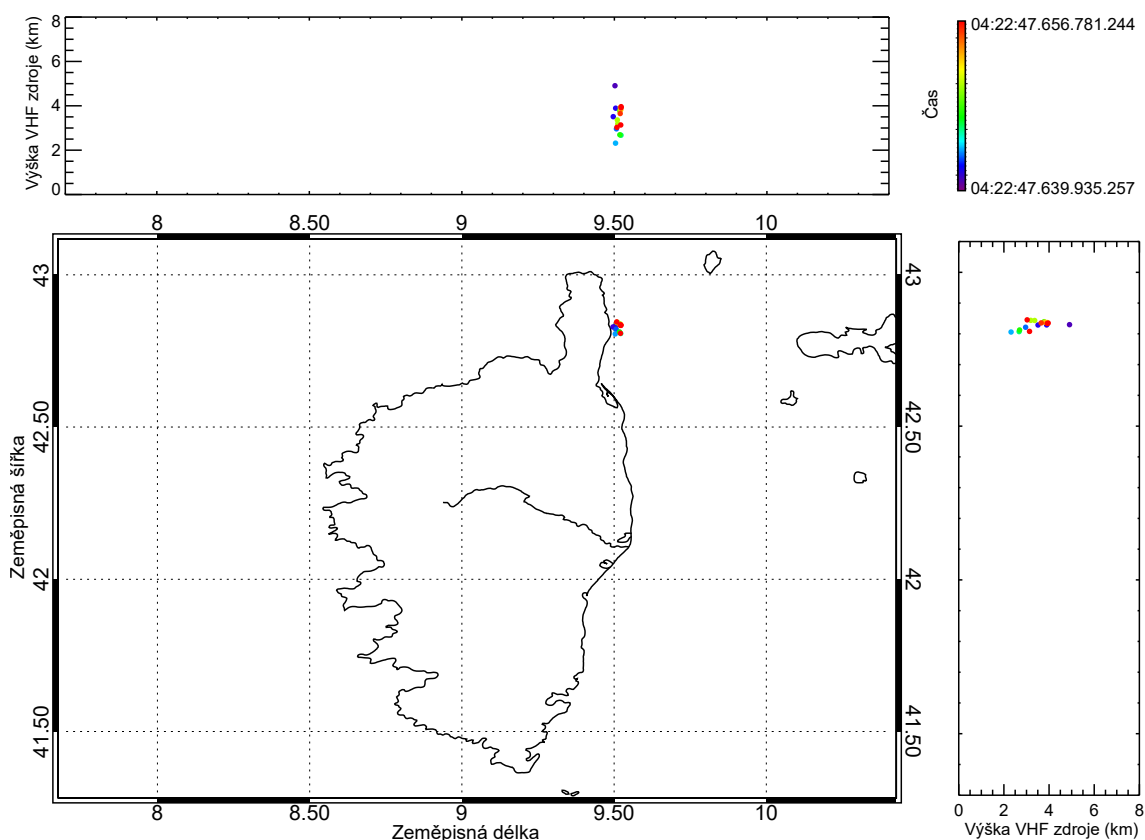
U všech obrázků pro 3D mapování výbojů hlavní část obrázku znázorňuje rozmístění VHF zdrojů v rámci zeměpisné šířky a délky, horní postranní graf závislost výšky VHF zdroje na zeměpisné délce a pravý postranní graf závislost na zeměpisné šířce. Barevné tečky odpovídají jednotlivým VHF zdrojům s barevnou škálou odpovídající času detekce v místě antény SLAVIA.

V obr. 3.16 vidíme, že uvedený výboj ze dne 7. 10. 2015, po 4:22:47,585 UTC se v průběhu svého vývoje rozdělil na 2 větve – jednu šířící se směrem na jih a druhou spíše na sever. Co se týče nadmořské výšky výboje, u obou jeho větví se s časem spíše snižovala.

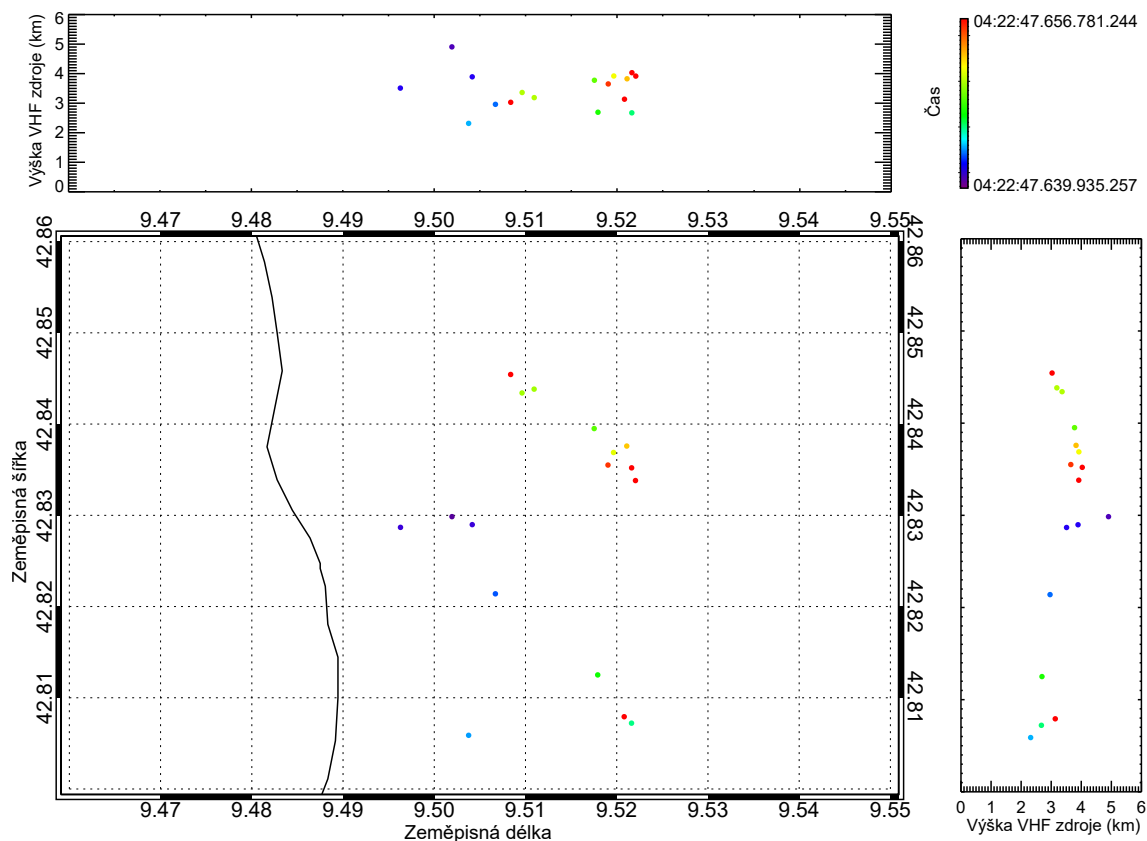
Příkladem záporného blesku s následnými zpětnými výboji je blesk detekovaný dne 7. 10. 2015, po 4:43:30,764 UTC. Na obr. 3.17 je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA v čase od iniciačních pulzů po poslední zpětný výboj v rámci blesku a barevné tečky opět znázorňují VHF zdroje detekované SAETTA stanicemi, s barevnou škálou odpovídající výkonu daného zdroje a vertikálním rozmístěním odpovídajícím výšce vzniku zdroje. První 3D lokalizovaný zdroj byl detekován celkem 6 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 4,4 km a jeho výkon činil 15,8 dBW. Tento blesk obsahoval celkem 5 následných zpětných výbojů, které byly rozpoznány na základě vizuální podobnosti v rámci magnetických vlnových forem (obdobně jako v [22]) a zároveň splňovaly pravidlo detekční sítě EUCLID pro seskupování výbojů do blesku (celková délka blesku menší než 1 s a vzdálenost mezi místy úderu jednotlivých zpětných výbojů menší než 10 km). Čas T mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem prvního zpětného výboje byl $T \doteq 6,9$ ms, poměr amplitud $A_{PB}/A_{RS} \doteq 0,1$ a velikost proudu prvním zpětným výbojem $|I_{RS}| \doteq 86,9$ kA. Druhý zpětný výboj nebyl zaznamenán sítí Météorage, a tedy nemáme informaci o velikosti jeho proudu. Velikosti proudu ostatními následnými zpětnými výboji, tedy třetím až šestým zpětným výbojem pak byly postupně $|I_{3RS}| \doteq 15,1$ kA, $|I_{4RS}| \doteq 21,5$ kA, $|I_{5RS}| \doteq 15,7$ kA a $|I_{6RS}| \doteq 13,8$ kA. Vidíme zde tedy i jistou závislost amplitudy pulzu zpětného výboje s proudem jím protékajícím.

Z obrázku 3.17 navíc vidíme, že před každým zpětným výbojem docházelo k poklesu výšky VHF zdrojů, což je očekávatelné, jelikož bleskový kanál před samotným zpětným výbojem postupuje směrem k zemi. Zdá se také, že vyzářený výkon s dalšími a dalšími zpětnými výboji postupně klesal. Tyto vlastnosti byly pozorovány u většiny dalších záporných blesků s následnými zpětnými výboji.

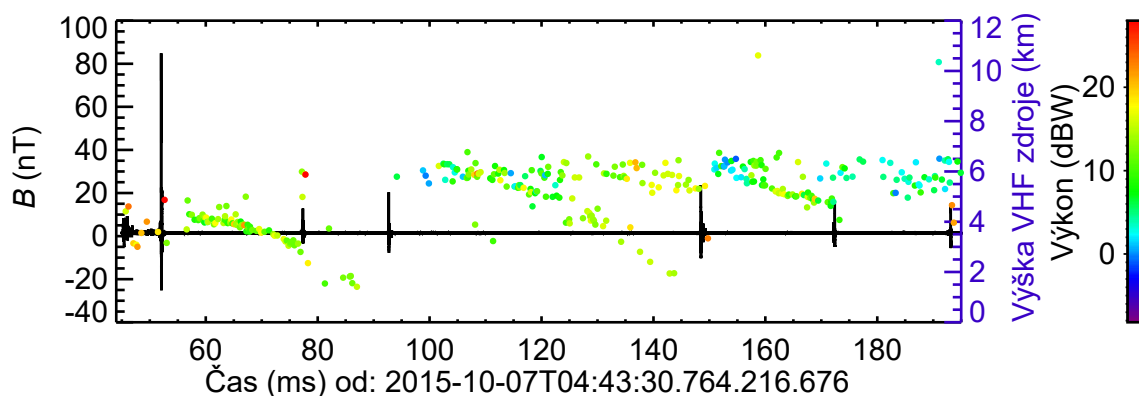
Na obr. 3.18 je tento blesk s několika zpětnými výboji zakreslen na mapě znázorňující 3D lokaci jednotlivých VHF zdrojů vyzářených v průběhu vývoje celého blesku. Je zde vidno, že se po jednotlivých výbojích a jim předcházejících poklesech výšky lokalizovaných zdrojů, vývoj vnitrooblakových částí blesku celkově přesouval spíše směrem vzhůru – začínal na výškách cca 4 km a končil spíše u výšek cca 6 km nad zemí.



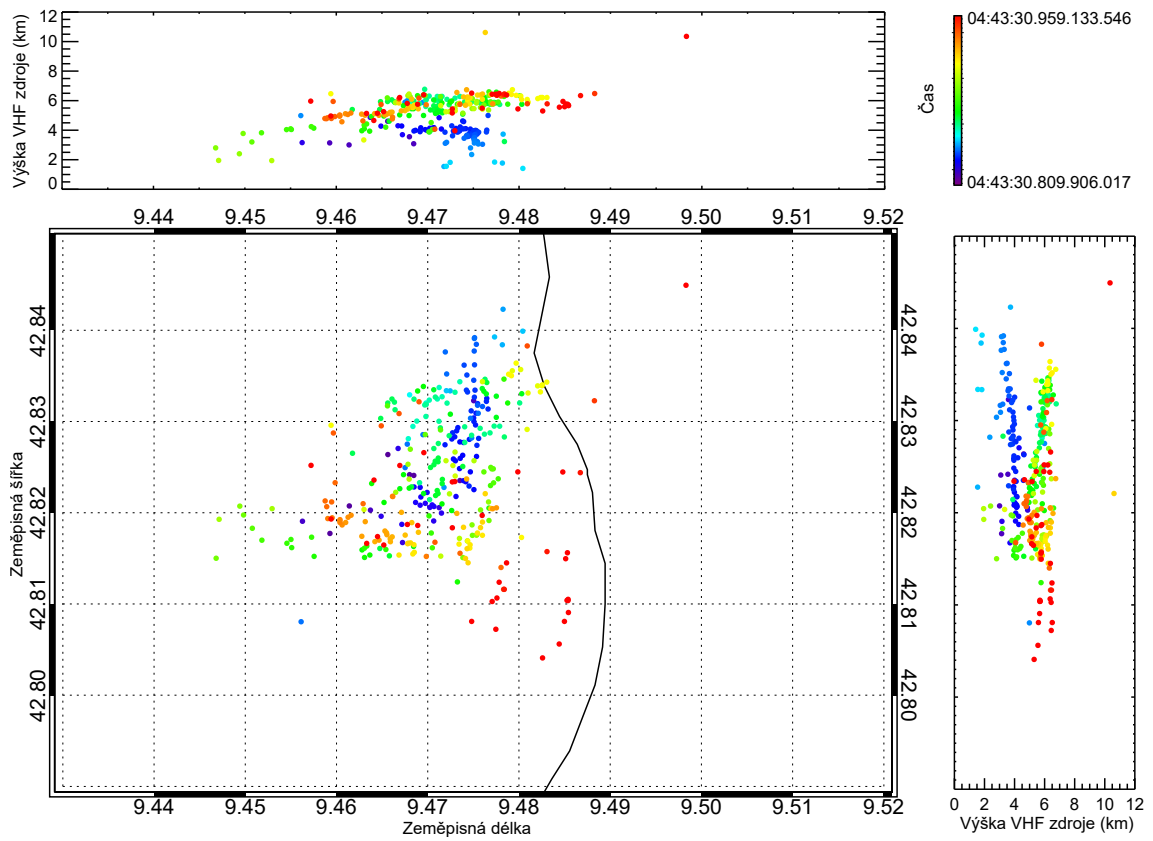
Obr. 3.15: Mapa VHF zdrojů vyzářených výbojem ze dne 7. 10. 2015, po 4:22:47,585 UTC



Obr. 3.16: Mapa VHF zdrojů vyzářených výbojem ze dne 7. 10. 2015, po 4:22:47,585 UTC, přibliženo na samotné VHF zdroje



Obr. 3.17: Příklad blesku s následnými zpětnými výboji. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA, barevná škála odpovídá výkonu daného zdroje a jejich vertikální rozmístění výšce jejich vzniku.

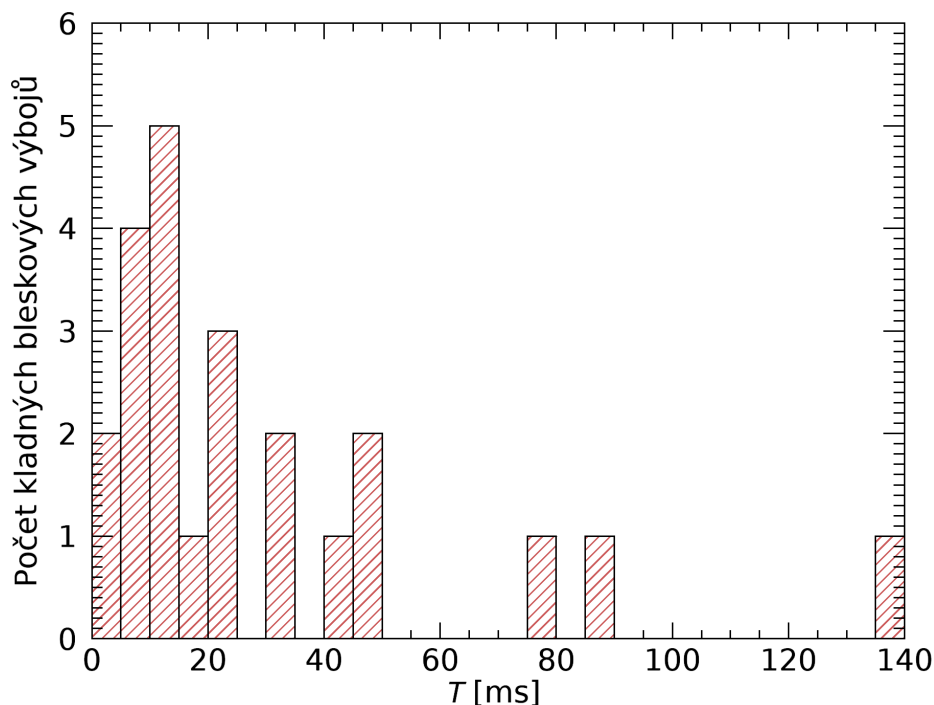


Obr. 3.18: Mapa VHF zdrojů vyzářených bleskem s následnými zpětnými výboji ze dne 7. 10. 2015, po 4:43:30,764 UTC. Vlnová forma viz obr. 3.17.

3.4 Výsledky: kladné bleskové výboje

Z analyzovaného datasetu 199 blesků s přidanými daty od detekční sítě Météorage bylo identifikováno celkem 23 kladných blesků. Jejich vlastnosti na základě parametrů T , A_{PB} , A_{RS} , I_{RS} a polohy zpětného výboje studujeme dále v této kapitole.

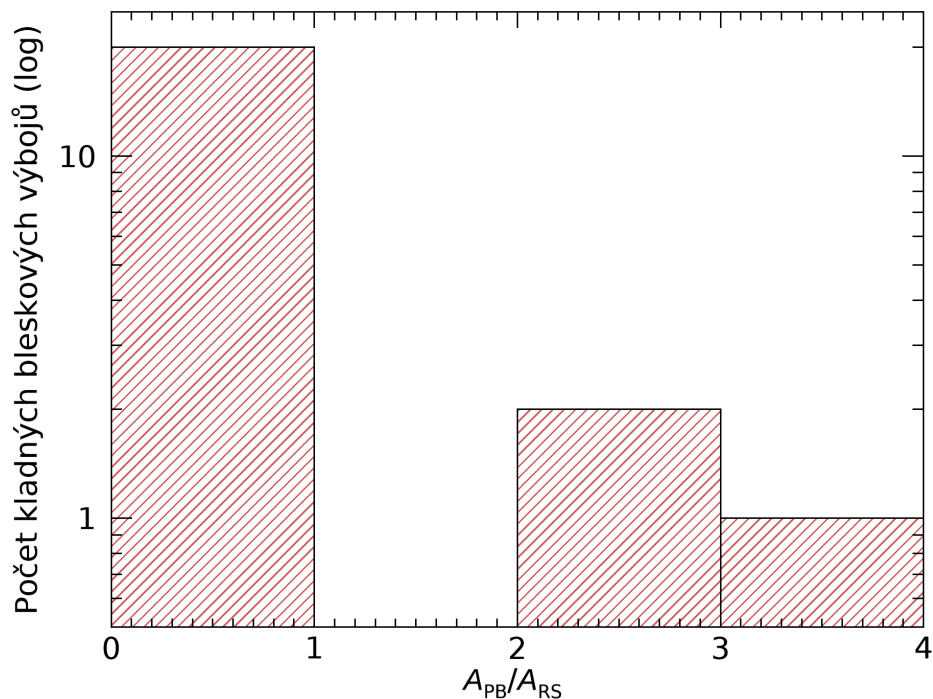
Histogram doby T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a po něm následujícím zpětným výbojem je vykreslen na obr. 3.19. Tato doba se pohybovala v rozmezí od 4,2 ms do 138,4 ms se střední hodnotou $\langle T \rangle \doteq 30$ ms a mediánem $\text{med}(T) \doteq 18$ ms.



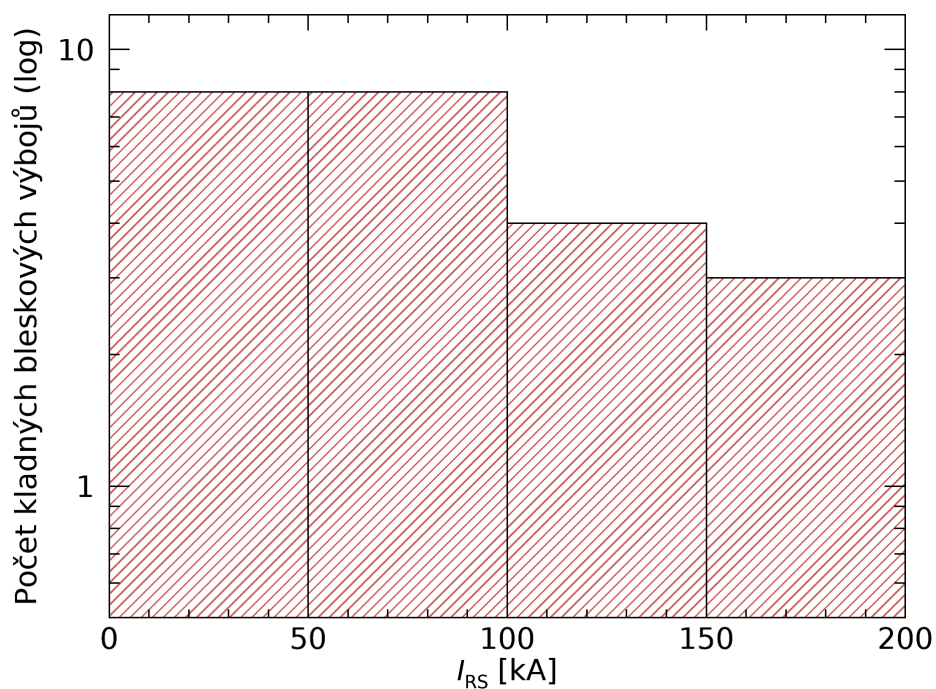
Obr. 3.19: Histogram časové prodlevy T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem pro kladné bleskové výboje.

U většiny kladných blesků byla amplituda největšího iniciačního pulzu A_{PB} menší než amplituda odpovídajícího pulzu zpětného výboje A_{RS} , viz případy, kdy $A_{PB}/A_{RS} < 1$ na obr. 3.20. Střední hodnota poměru A_{PB}/A_{RS} je $\langle A_{PB}/A_{RS} \rangle \doteq 0,6$ a medián $\text{med}(A_{PB}/A_{RS}) \doteq 0,3$.

Na obr. 3.21 je vidět histogram velikosti špičkového proudu kladnými zpětnými výboji I_{RS} . Hodnoty se pohybují od jednotek kA až po 160,6 kA. U většiny studovaných kladných blesků byla velikost proudu zpětným výbojem menší než 100 kA. Střední hodnota velikosti proudu je $\langle I_{RS} \rangle \doteq 77$ kA a medián $\text{med}(I_{RS}) \doteq 73$ kA.



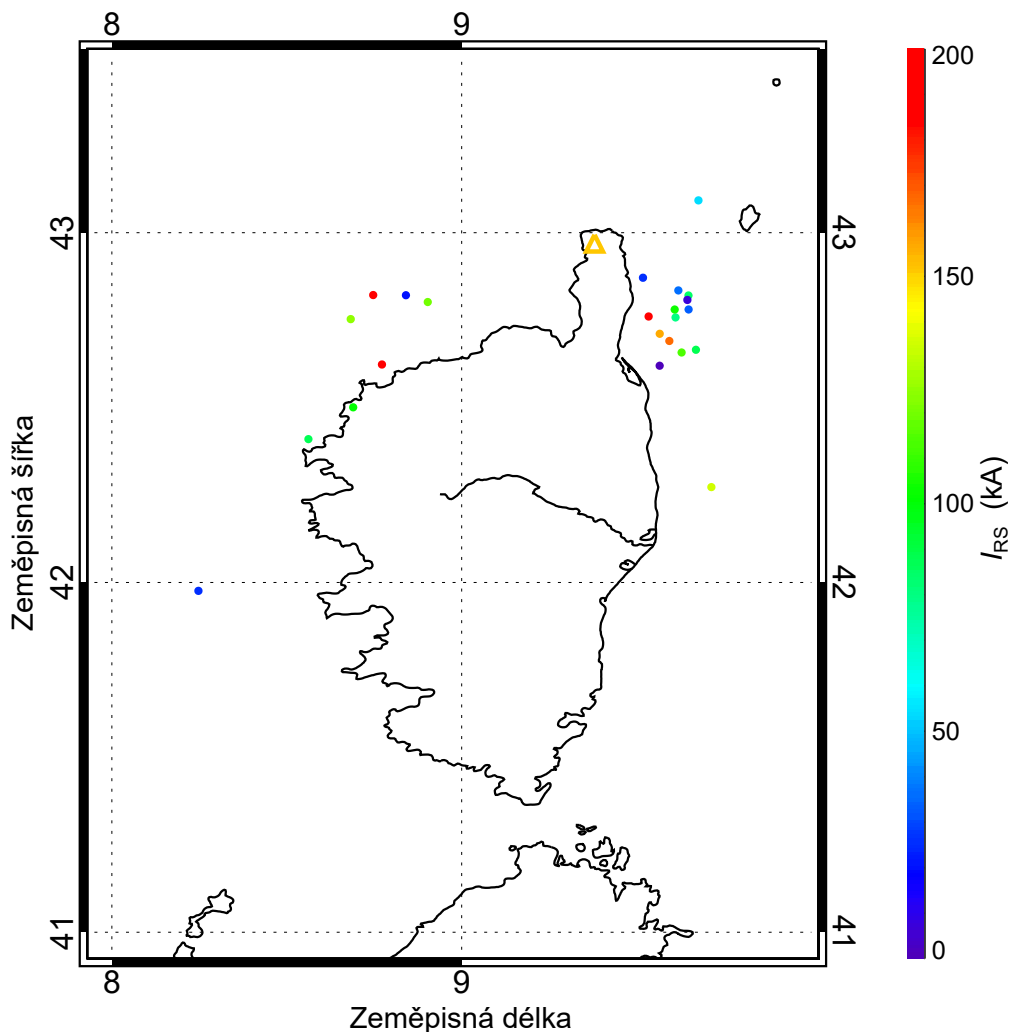
Obr. 3.20: Histogram poměru amplitud největšího iniciačního pulzu A_{PB} a pulzu následujícího zpětného výboje A_{RS} pro kladné bleskové výboje.



Obr. 3.21: Histogram velikosti špičkového proudu I_{RS} kladnými zpětnými výboji.

Mapa znázorňující 2D lokace míst, kde udeřily kladné zpětné výboje, spolu s barevným rozlišením znázorňujícím velikost špičkového proudu daným zpětným výbojem je vykreslena na obr. 3.22. Je vidět, že všechny kladné zpětné výboje se

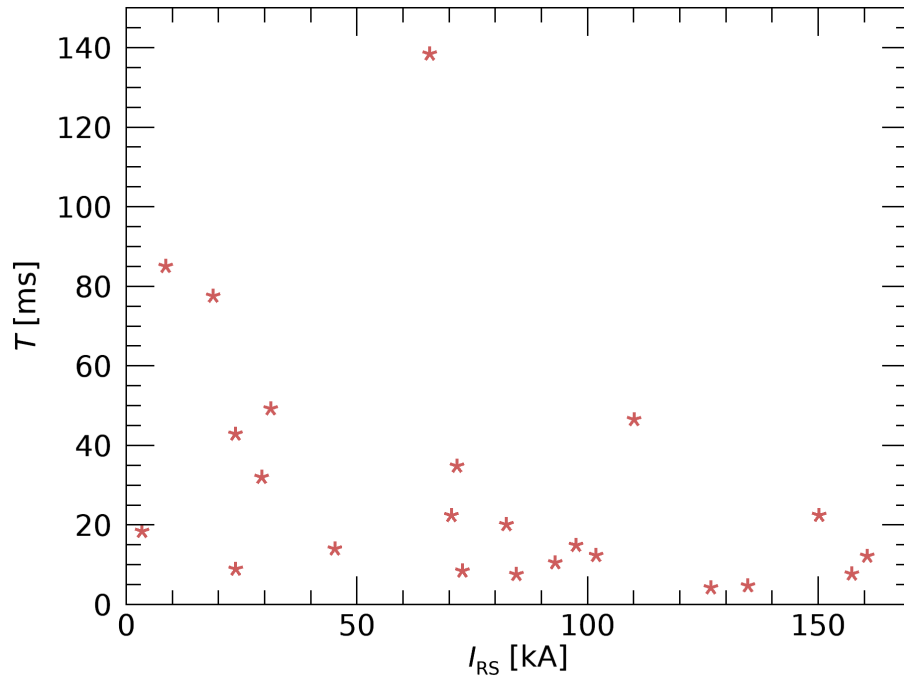
vyskytovaly nad mořem, případně nad pobřežím. Případná spojitost mezi velikostí špičkového proudu I_{RS} a vzdáleností místa výskytu od pobřeží nebyla pozorována.



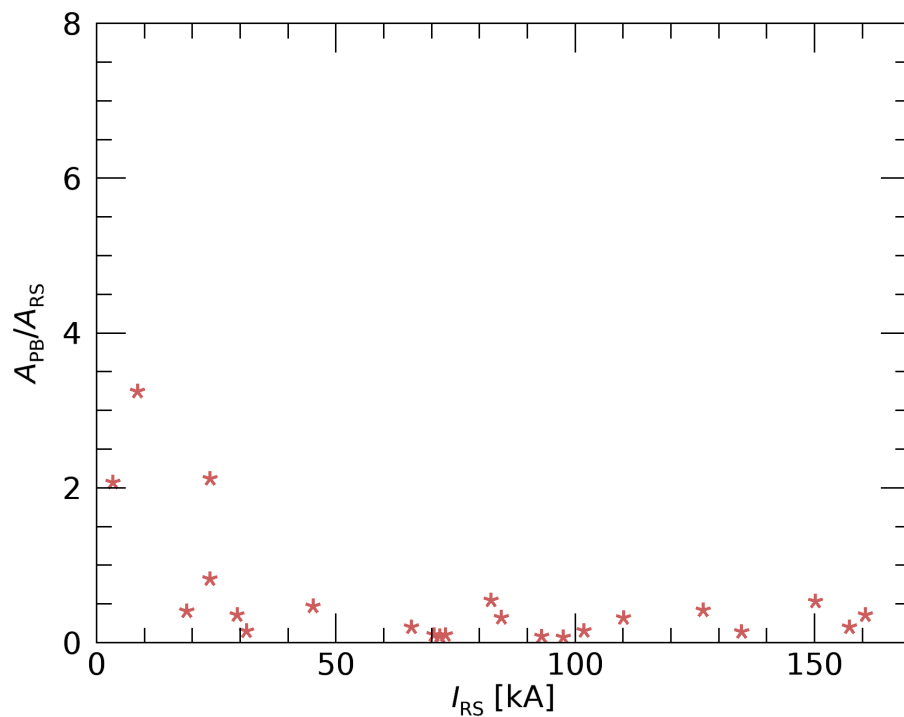
Obr. 3.22: Mapa výskytu kladných zpětných výbojů s barevnou škálou odpovídající velikosti špičkového proudu I_{RS} daným zpětným výbojem. Žlutý trojúhelník znázorňuje polohu antény SLAVIA.

Na obr. 3.23 je vykreslen graf závislosti doby T na velikosti špičkového proudu I_{RS} pro kladné bleskové výboje. Žádná závislost mezi parametry T a I_{RS} zde není patrná.

Závislost poměru amplitud A_{PB} a A_{RS} na velikosti špičkového proudu I_{RS} kladnými zpětnými výboji je vykreslena na obr. 3.24. Je zde patrné, že pro všechny zpětné výboje s velikostí proudu $I_{RS} \geq 25\text{kA}$ byla amplituda A_{PB} největšího iniciačního pulzu vždy menší než amplituda A_{RS} odpovídajícího pulzu zpětného výboje.



Obr. 3.23: Závislost doby T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem na velikosti špičkového proudu I_{RS} pro kladné bleskové výboje.

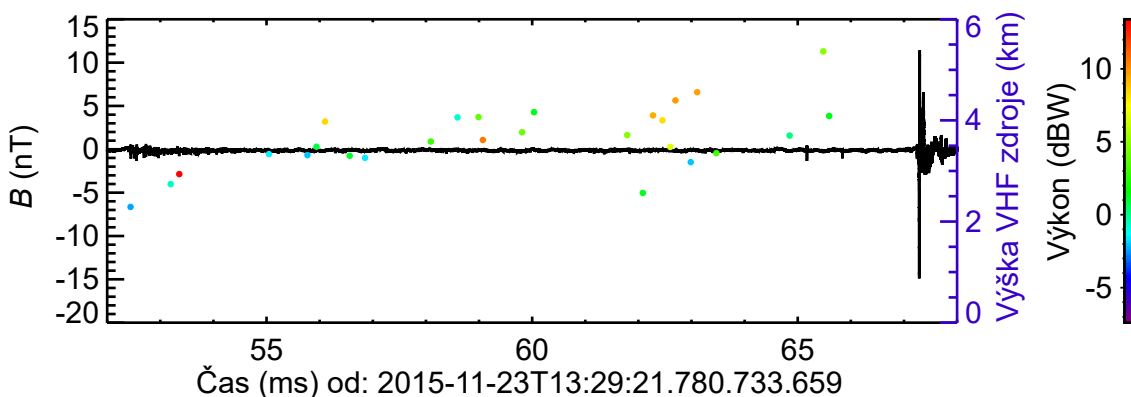


Obr. 3.24: Závislost poměru amplitud největšího iniciačního pulzu A_{PB} a odpovídajícího pulzu zpětného výboje A_{RS} na velikosti špičkového proudu I_{RS} pro kladné bleskové výboje.

3.4.1 Bleskové výboje s přidanými daty od SAETTA

Tato kapitola se stejně jako kapitola 3.3.1 zabývá studiem souvislosti VHF zdrojů detekovaných stanicemi SAETTA s bleskovou aktivitou, tentokrát však pro blesky kladné. Způsob výběru studovaného datasetu a popis přepočtu doby šíření jednotlivých signálů je popsán v kapitole 3.2. Kladné bleskové výboje, pro které byl čas detekce prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje v rozmezí ± 1 ms od času detekce prvního iniciačního pulzu a splňovaly i další kritéria výběru, byly identifikovány pouze 2. Jedná se o výboje detekované 23. 11. 2015 po 13:29:21,781 UTC (viz obr. 3.25, 3.27 a 3.29) a 24. 11. 2015 po 5:15:26,287 UTC (viz obr. 3.26, 3.28 a 3.30), vlastnosti obou těchto výbojů studujeme níže.

Pro kladný bleskový výboj ze dne 23. 11. 2015 po 13:29:21,781 UTC byla doba mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje $T \doteq 17,9$ ms, poměr amplitud $A_{PB}/A_{RS} \doteq 0,1$ a velikost proudu zpětným výbojem $I_{RS} \doteq 97,5$ kA. Magnetická vlnová forma zaznamenaná anténou SLAVIA je vykreslena na obr. 3.25 spolu s barevnými tečkami znázorňujícími 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA. První 3D lokalizovaný VHF zdroj byl detekován celkem 6 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 2,3 km nad hladinou moře a jeho výkon činil 21,7 dBW. V rámci tohoto výboje byly SAETTA stanice schopny 3D lokalizovat celkem 27 VHF zdrojů, přičemž 3 z nich se vyskytovaly u iniciačních pulzů. Z obrázku 3.25 je vidět, že výška prvního VHF zdroje byla v rámci výboje nejnižší a s časem výška dalších VHF zdrojů víceméně rostla. Mapa 3D lokalizovaných zdrojů je pak vykreslena na obr. 3.29.

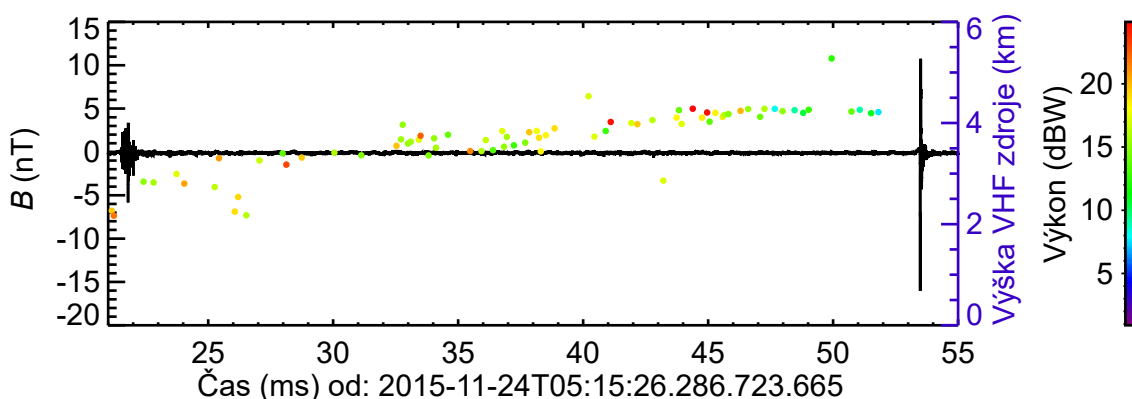


Obr. 3.25: Kladný bleskový výboj zaznamenaný dne 23. 11. 2015. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje.

Výboj ze dne 23. 11. 2015 je vykreslen také na obr. 3.27, kde jsou tentokrát barevnými tečkami zakreslena surová data, tedy VHF zdroje detekované jednotlivými SAETTA stanicemi, stejně jako u obrázků surových dat pro záporné blesky v kapitole 3.3.1. Na horním obrázku je vykreslen celý výboj s VHF zdroji zaznamenanými nejbližší SAETTA stanicí, stanicí C. Zde se na rozdíl od případu záporných blesků počet detekovaných VHF zdrojů v průběhu vývoje výboje nijak zvlášť nemění a nedochází zde k rychlému poklesu počtu detekovaných zdrojů v čase po zaznamení pulzu zpětného výboje. V čase před iniciačními pulzy je počet detekovaných VHF

zdrojů velmi malý (na úrovni okolního šumu) nebo nulový, stejně jako u záporných výbojů. Data z 6 různých SAETTA stanic (mapa stanic viz obr. 2.4) přiblížena na iniciační pulzy ukazují značný pokles počtu detekovaných VHF zdrojů se zvětšující se vzdáleností od zdroje (mapa VHF zdrojů viz obr. 3.29.) – maximálního počtu detekovaných zdrojů v rámci $80\mu\text{s}$ časového okna dosahuje pouze nejbližší stanice C.

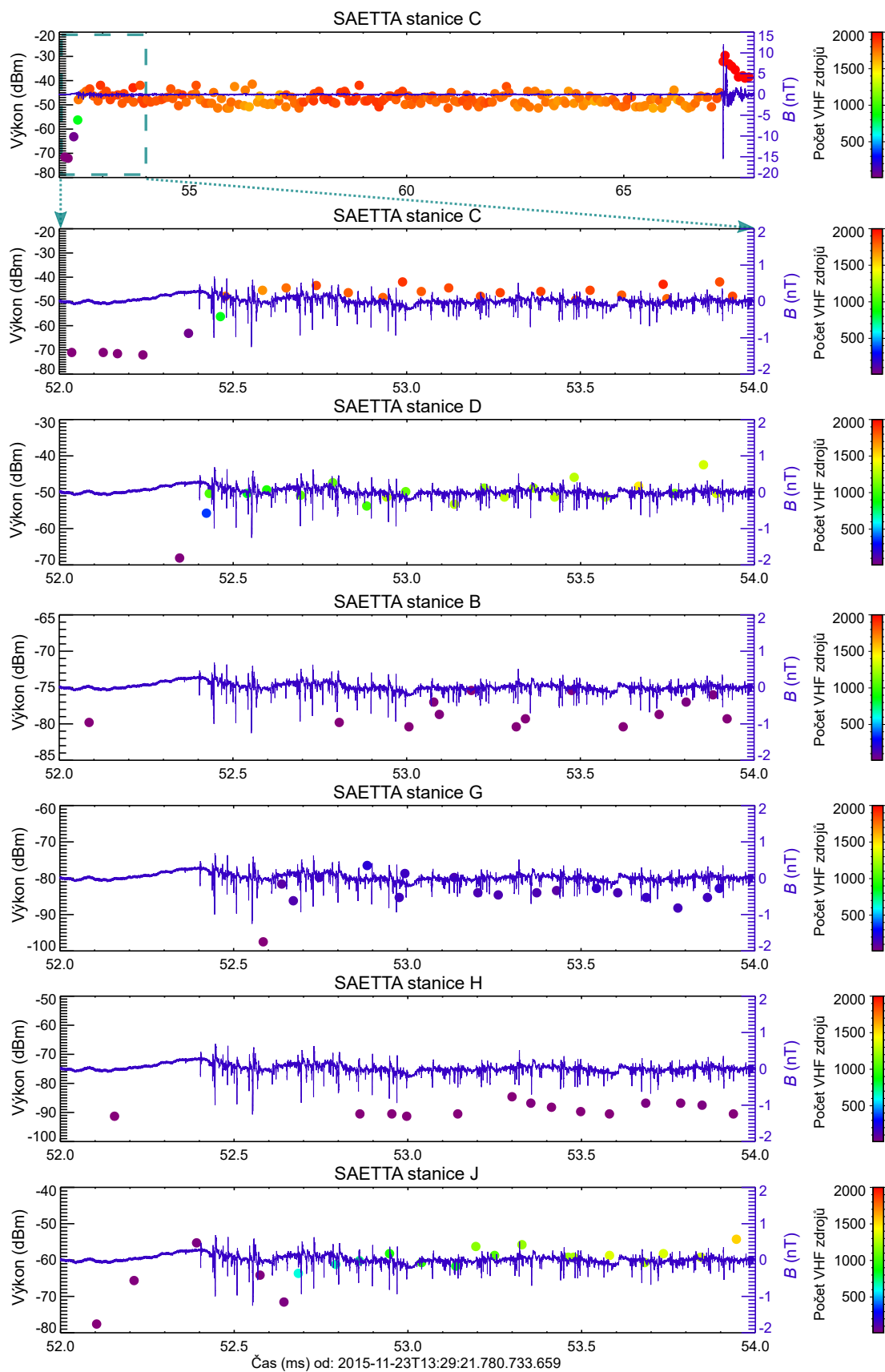
Kladný bleskový výboj ze dne 24. 11. 2015 po 5:15:26,287 UTC měl čas mezi prvním iniciačním pulzem a pulzem zpětného výboje $T \doteq 32$ ms, poměr amplitud $A_{\text{PB}}/A_{\text{RS}} \doteq 0,4$ a velikost proudu zpětným výbojem $I_{\text{RS}} \doteq 29,3$ kA. Magnetická vlnová forma zaznamenaná anténou SLAVIA je vykreslena na obr. 3.26 spolu s barevnými tečkami znázorňujícími 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA. První 3D lokalizovaný VHF zdroj byl detekován celkem 6 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 2,3 km nad hladinou moře a jeho výkon činil 19,5 dBW. V rámci tohoto výboje byly SAETTA stanice schopny 3D lokalizovat celkem 76 VHF zdrojů, přičemž 4 z nich se vyskytovaly u iniciačních pulzů. V obrázku 3.26 je podobně jako u předchozího kladného blesku (viz obr. 3.25) vidět, že výška prvního VHF zdroje byla v rámci výboje nejnižší a výška dalších VHF zdrojů poté víceméně rostla. Mapa 3D lokalizovaných zdrojů je pak vykreslena na obr. 3.30.



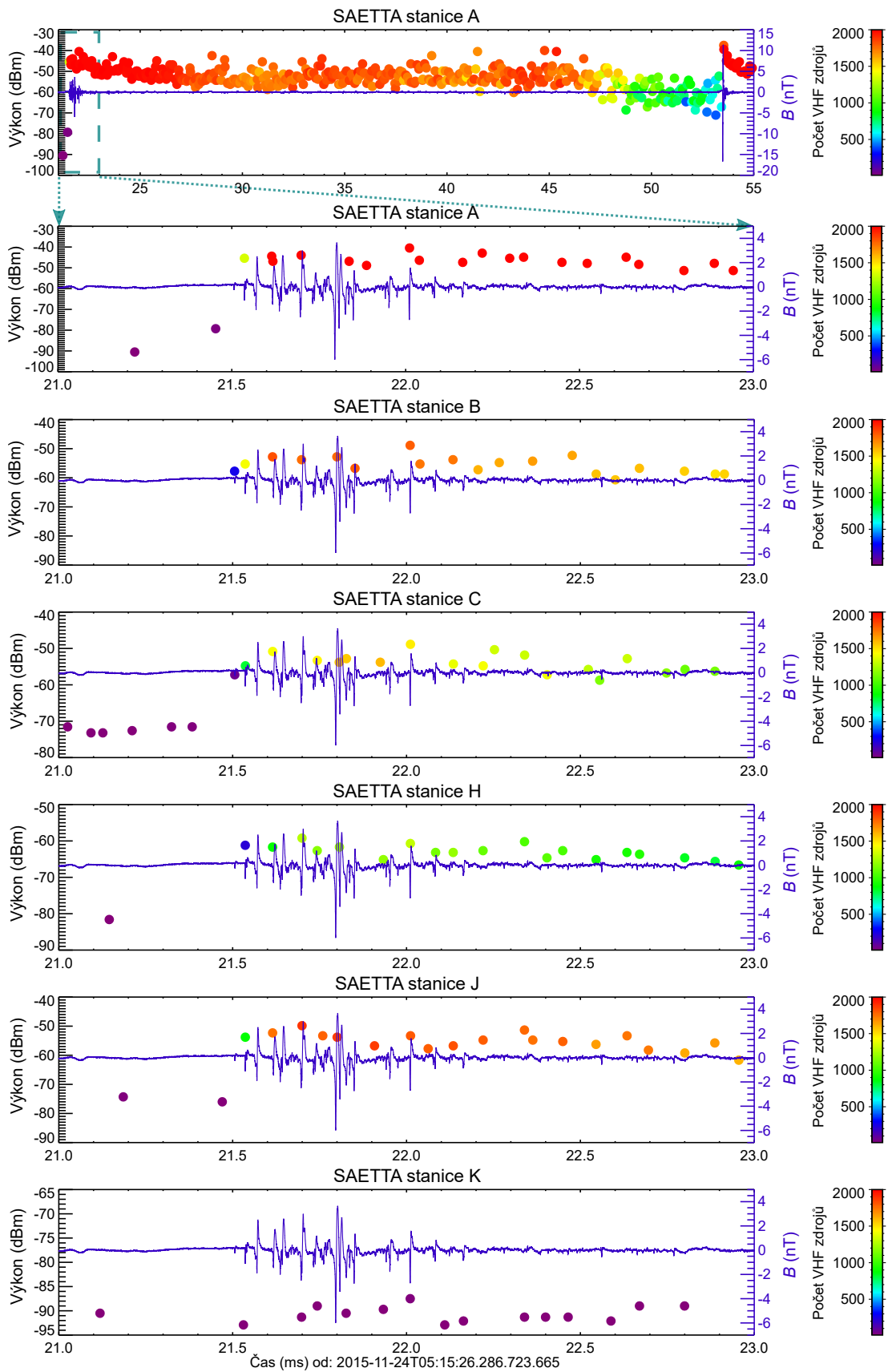
Obr. 3.26: Kladný bleskový výboj zaznamenaný dne 24. 11. 2015. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje.

Výboj ze dne 24. 11. 2015 je vykreslen také na obr. 3.28, kde jsou stejně jako u předchozího kladného bleskového výboje (obr. 3.27) barevnými tečkami zakresleny VHF zdroje detekované jednotlivými SAETTA stanicemi. Na horním obrázku je celý výboj s VHF zdroji zaznamenanými nejbližší SAETTA stanicí, stanicí A. Chování VHF zdrojů je obdobné jako u předchozího kladného výboje, pouze s tím rozdílem, že zde je viditelný značný pokles počtu detekovaných VHF zdrojů od času cca 5 ms před zpětným výbojem do času úderu zpětného výboje, kdy došlo opět k rapidnímu nárůstu počtu detekovaných zdrojů. Data z 6 různých SAETTA stanic přiblížena na iniciační pulzy opět ukazují znatelnější pokles detekovaných VHF zdrojů se zvětšující se vzdáleností od zdroje⁵ (mapa VHF zdrojů viz obr. 3.30), než tomu bylo u záporných výbojů.

⁵Body s fialovým zabarvením jsou na úrovni okolního šumu.



Obr. 3.27: Kladný bleskový výboj z 23. 11. 2015 (tentýž výboj s 3D lokalizovanými VHF zdroji viz obr. 3.25). Modře: vlnová forma naměřená anténou SLAVIA. Barevné tečky: VHF zdroje detekované jednotl. SAETTA stanicemi.



Obr. 3.28: Kladný bleskový výboj z 24. 11. 2015 (tentýž výboj s 3D lokalizovanými VHF zdroji viz obr. 3.26). Modře: vlnová forma naměřená anténou SLAVIA. Barevné tečky: VHF zdroje detekované jednotl. SAETTA stanicemi.

Výška vzniku bleskového výboje

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3.1 popisující výsledky pro záporné výboje, VHF signály detekované stanicemi SAETTA a iniciační pulzy zaznamenané anténou SLAVIA jsou pravděpodobně projevem stejného fyzikálního procesu, a to rychlého skokovitého prodlužování bleskového kanálu. Výška prvního detekovaného VHF zdroje je tedy výškou vzniku daného bleskového výboje.

Co se týče studovaných kladných bleskových výbojů, jejichž vlastnosti jsou podrobněji popsány na začátku kapitoly 3.4.1, výška jejich iniciace byla v obou případech přibližně 2,3 km nad hladinou moře.

3D mapování vývoje výbojů

Mapu VHF zdrojů patřících ke kladnému bleskovému výboji ze dne 23. 11. 2015 po čase 13:29:21,781 UTC (viz obr. 3.25 a 3.27) můžeme vidět na obr. 3.29. Výboj se u začátku svého vývoje rozdělil na 2 větve – jednu šířící se směrem na východ (doprava) a druhou směrem na západ (doleva). Co se týče nadmořské výšky, obě větve výboje s časem stoupaly směrem vzhůru, z původních cca 2 km se dostaly do výšky 4–5 km nad zemí.

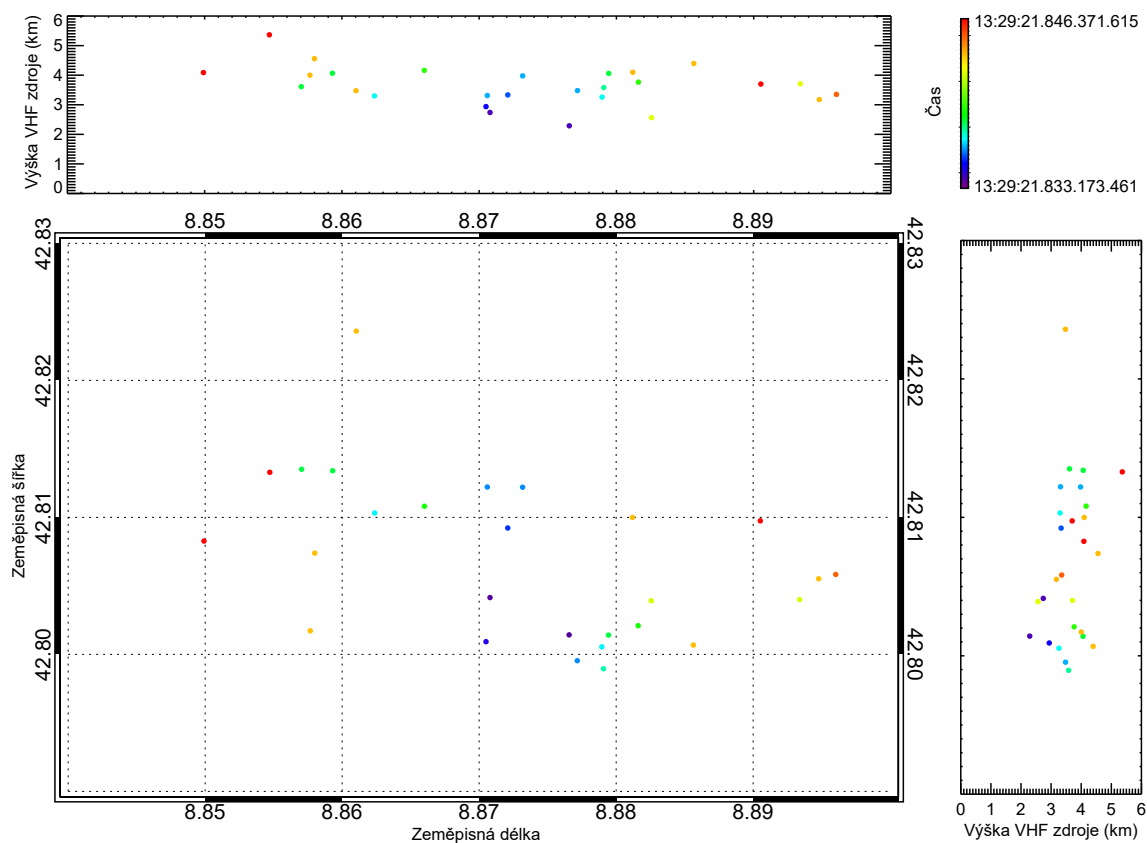
Na obr. 3.30 je vykreslena mapa vývoje kladného bleskového výboje detekovaného dne 24. 11. 2015 po čase 5:15:26,287 UTC (viz obr. 3.26 a 3.28). Je zde velmi dobře viditelné, že i tento výboj se šířil směrem vzhůru, vznikl ve výšce cca 2 km a šířil se až do výšek okolo 4–5 km nad zemí. Během svého vývoje také postupoval nejdříve severovýchodním směrem a poté směrem východním.

Mapování polohy VHF zdrojů vyzářených bleskovými výboji může být také velmi užitečné například k rozpoznání, které pulzy v magnetických vlnových formách patří ke kterým výbojům. Jako příklad využití uvádíme kladný blesk ze dne 24. 11. 2015 po 3:32:36,970 UTC, jehož magnetická vlnová forma spolu s barevně vyznačenými 3D lokalizovanými VHF zdroji je vykreslena na obr. 3.31. Tento blesk byl vyřazen z datasetu pro zkoumání výše studovaných vlastností, jelikož v magnetické vlnové formě obsahuje 2 sledy iniciačních pulzů následujících ihned za sebou a také jeden silný pulz mezioblačného výboje.

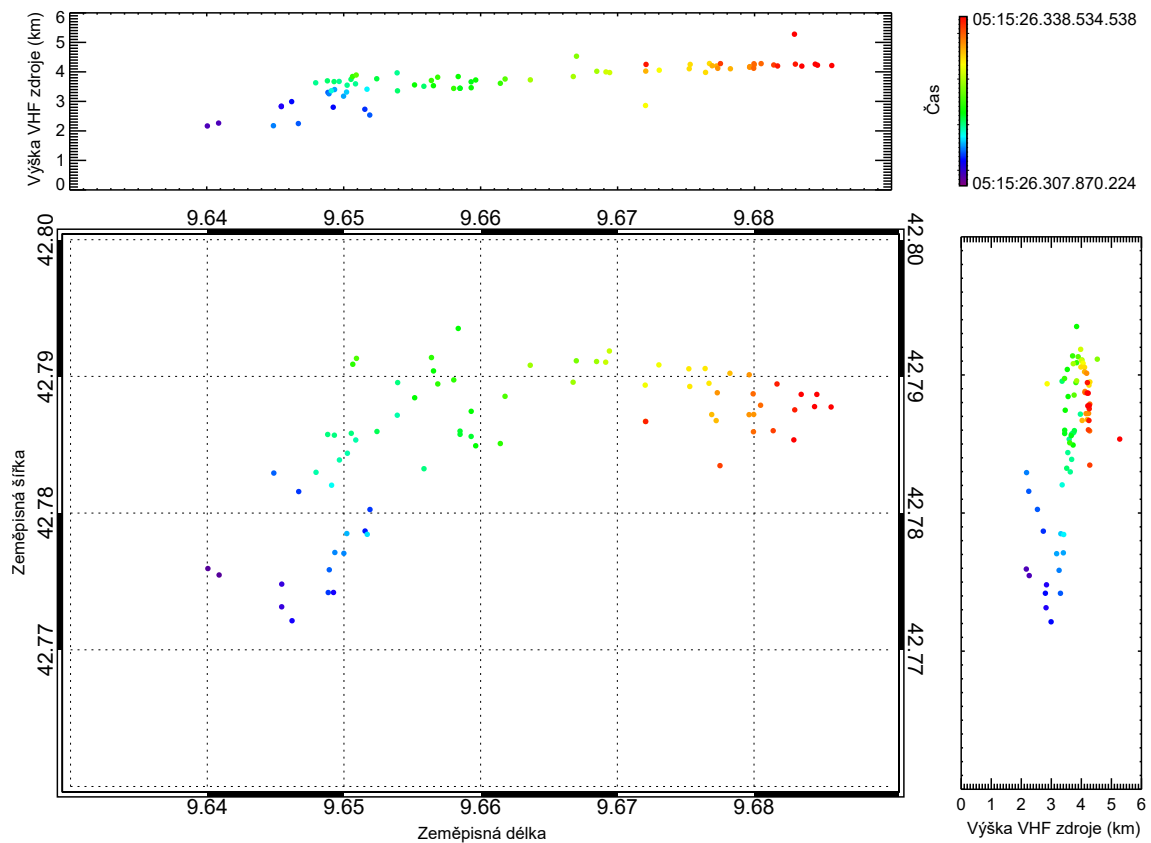
Ze samotné vlnové formy není možno rozlišit, který sled iniciačních pulzů patří ke kterému pulzu zpětného/mezioblačného výboje. Avšak při vykreslení mapy výskytu VHF zdrojů vyzářovaných v průběhu daného blesku se může stát, jako v případě tohoto blesku, že jsou na mapě jasně viditelné 2 oddělené větve vyvíjející se nezávisle na sobě, viz obr. 3.32. Zde vidíme jasně oddělenou horní větev od větve dolní. Všechny VHF zdroje vyskytující se v zeměpisných šířkách pod $42,84^\circ$ pak byly označeny jako zdroje patřící do dolní větve a všechny vyskytující se nad touto zeměpisnou šířkou zase jako zdroje patřící do horní větve. VHF zdroje z obou větví poté byly vykresleny odděleně opět do obrázků spolu s vlnovou formou zaznamenanou anténou SLAVIA – na obr. 3.33 vidíme VHF zdroje z horní větve a na obr. 3.34 VHF zdroje z větve dolní.

Díky tomuto oddělenému vykreslení horní a dolní větve VHF zdrojů vidíme z obr. 3.33, že až druhý sled iniciačních pulzů patří ke stejnému výboji jako pulz

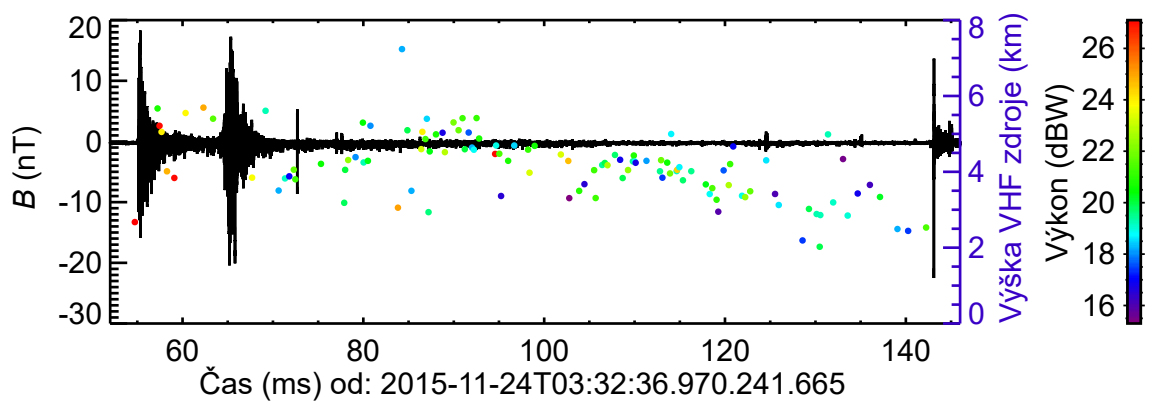
zpětného výboje nacházející se v čase cca 140 ms od prvního vzorku. Zatímco, jak vidíme na obr. 3.34, první sled iniciačních pulzů k tomuto zpětnému výboji pravděpodobně nepatří – buď patří k pulzu mezioblačného výboje, nacházejícího se v čase okolo 73 ms od prvního vzorku, anebo se jedná o izolované iniciační pulzy. Krátký komentář k izolovaným pulzům je uveden v následující kapitole, kapitole 3.5.



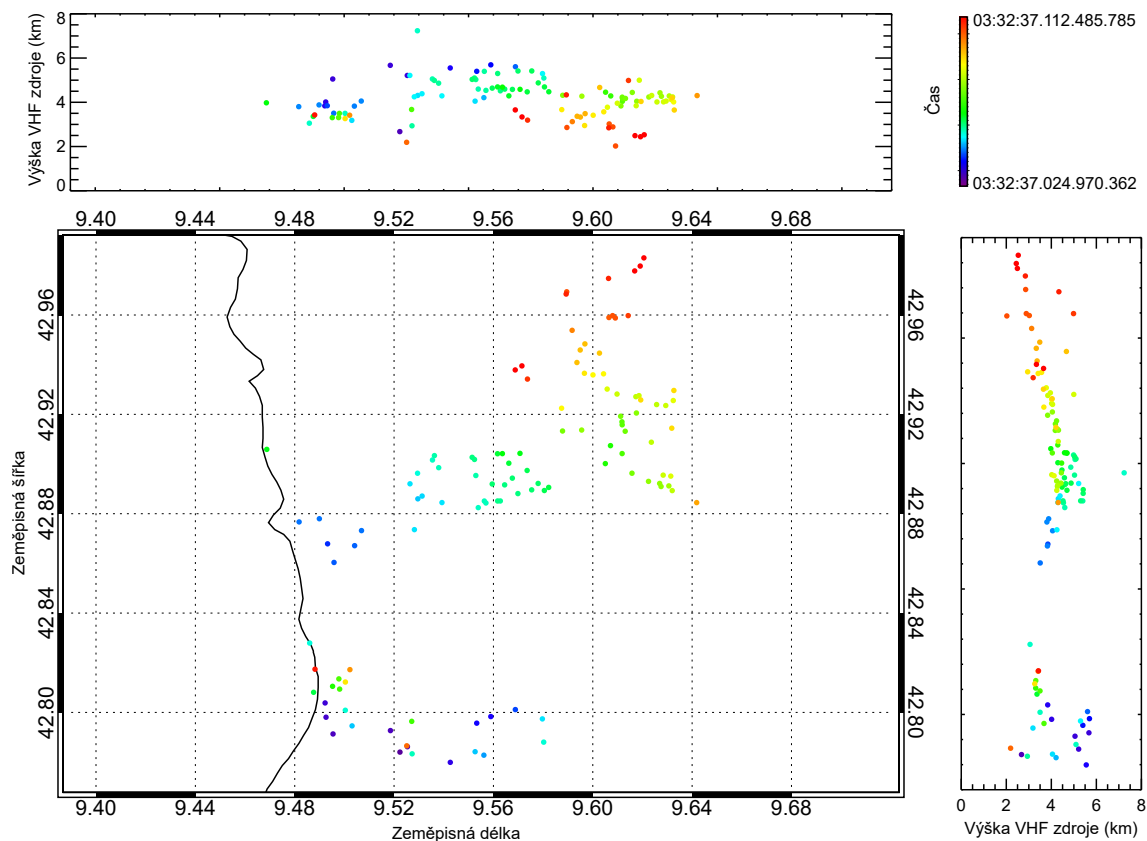
Obr. 3.29: Mapa VHF zdrojů vyzářených kladným bleskovým výbojem ze dne 23. 11. 2015, po 13:29:21,781 UTC. Vlnová forma viz obr. 3.25.



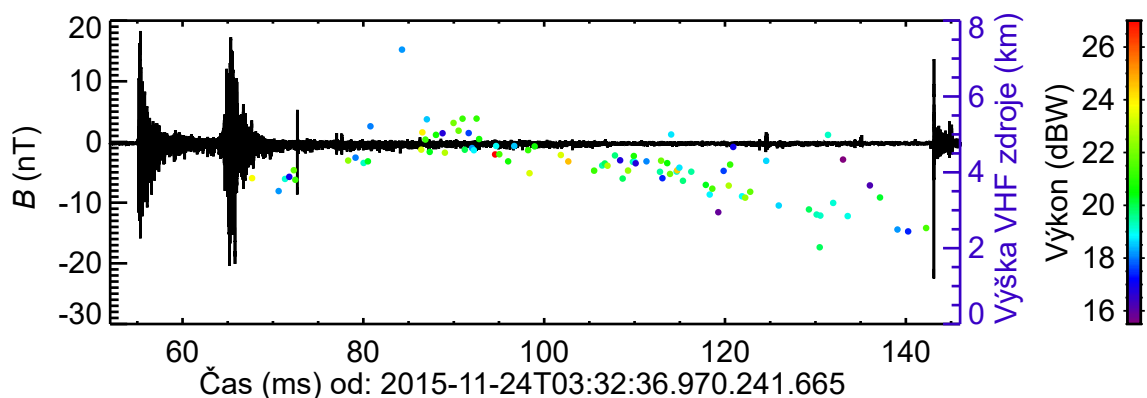
Obr. 3.30: Mapa VHF zdrojů vyzářených kladným bleskovým výbojem ze dne 24. 11. 2015, po 5:15:26,287 UTC. Vlnová forma viz obr. 3.26.



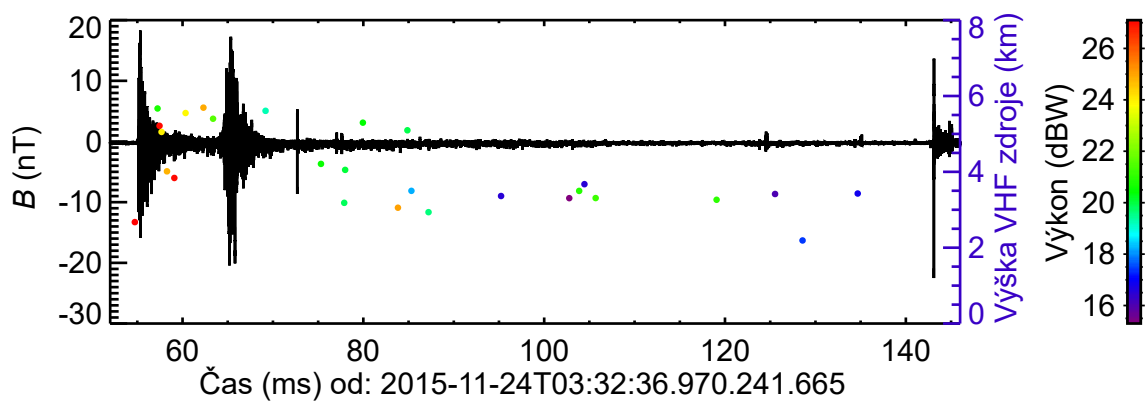
Obr. 3.31: Kladný blesk zaznamenaný dne 24. 11. 2015 po čase 3:32:36,970 UTC. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje.



Obr. 3.32: Mapa VHF zdrojů vyzářených kladným bleskem dne 24. 11. 2015, po 3:32:36,970 UTC. Vlnová forma viz obr. 3.31, s oddělenou horní větví VHF zdrojů viz obr. 3.33, s dolní větví viz obr. 3.34.



Obr. 3.33: Kladný blesk zaznamenaný dne 24. 11. 2015 po čase 3:32:36,970 UTC s vykreslenou pouze horní větví VHF zdrojů z mapy 3.32. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje.

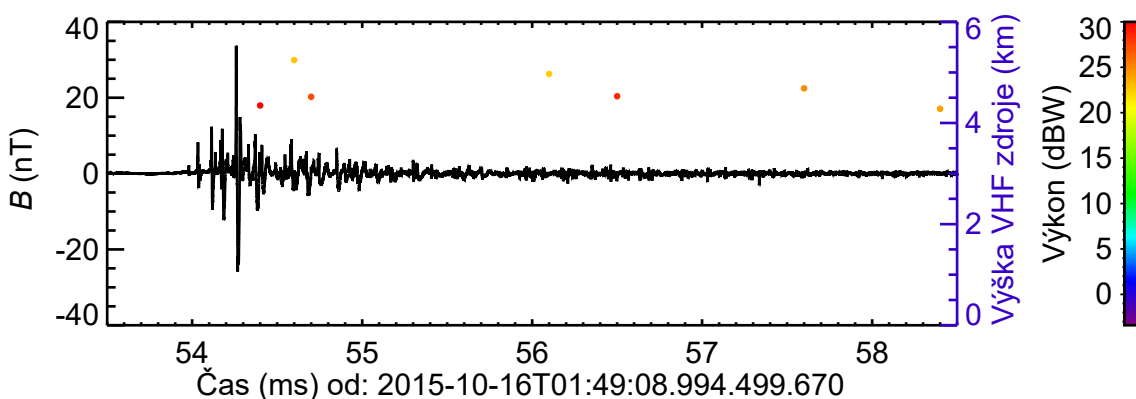


Obr. 3.34: Kladný blesk zaznamenaný dne 24. 11. 2015 po čase 3:32:36,970 UTC s vykreslenou pouze dolní větví VHF zdrojů z mapy 3.32. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje.

3.5 Výsledky: izolované iniciační pulzy

V rámci procházení dat zaznamenaných anténou SLAVIA v období od začátku do prosince 2015 byly také nalezeny iniciační pulzy, které nebyly následovány pulzem zpětného či mezioblačného výboje. Takovými pulzům říkáme izolované iniciační pulzy (*isolated breakdown*). Jako příklad jsou zde uvedeny izolované iniciační pulzy zaznamenané dne 16. 10. 2015 po 1:49:08,994 UTC. Studie všech nalezených izolovaných iniciačních pulzů je uvedena v připravovaném článku [49].

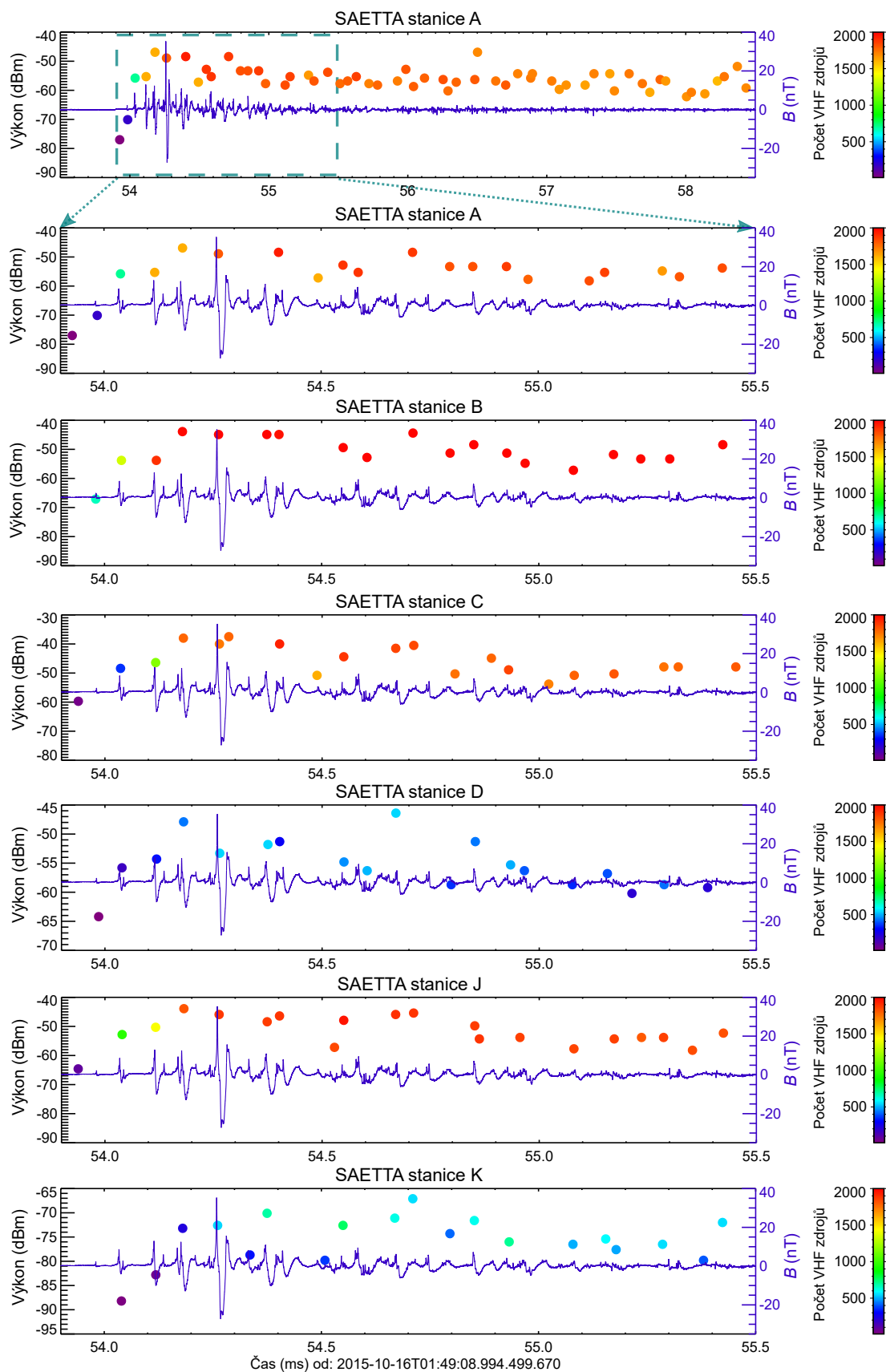
Na obr. 3.35 je vykreslena magnetická vlnová forma zaznamenaná anténou SLAVIA spolu s barevnými tečkami znázorňujícími 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA. První 3D lokalizovaný VHF zdroj byl detekován celkem 6 SAETTA stanicemi, byl vyzářen ve výšce přibližně 4,3 km nad hladinou moře a jeho výkon činil 30 dBW.



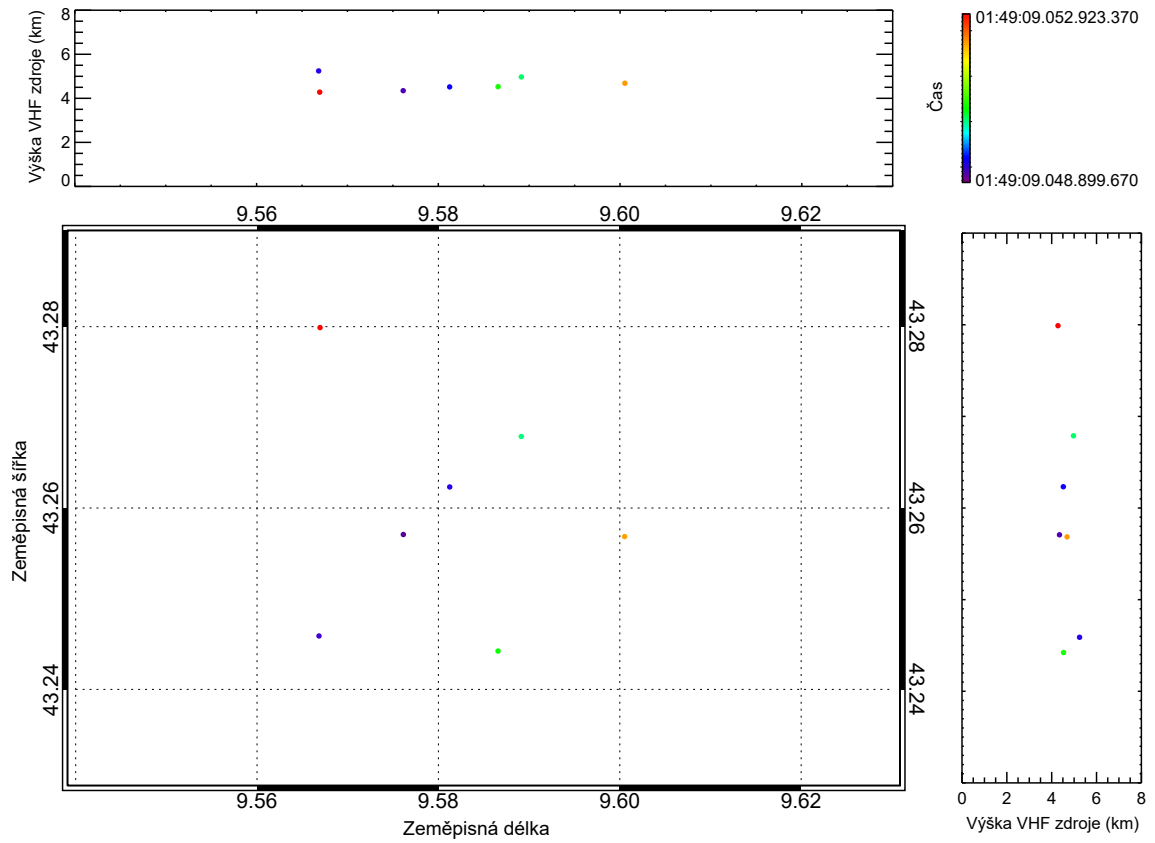
Obr. 3.35: Příklad izolovaných iniciačních pulzů. Černě je vykreslena vlnová forma naměřená anténou SLAVIA, barevné tečky znázorňují 3D lokalizované VHF zdroje detekované stanicemi SAETTA, barevná škála odpovídá výkonu daného zdroje a jejich vertikální rozmístění výšce jejich vzniku.

Tytéž izolované iniciační pulzy jsou vykresleny také na obr. 3.36, kde jsou stejně jako u předchozích bleskových výbojů barevnými tečkami zakresleny VHF zdroje detekované jednotlivými SAETTA stanicemi. Na horním obrázku je celý výboj s VHF zdroji zaznamenanými nejbližší SAETTA stanicí, stanicí A. V datech z jednotlivých stanic, přiblížených na silnější pulzy, vidíme velký počet různých VHF zdrojů zaznamenaných 6 stanicemi, avšak SAETTA byla v tomto časovém okně (53,9 ms – 55,5 ms od prvního vzorku) schopna 3D lokalizovat pouze 3 zdroje (viz obr. 3.35). Opět zde vidíme časovou shodu VHF zdrojů detekovaných jednotlivými stanicemi s intenzivními peaky iniciačních pulzů.

Mapa VHF zdrojů je vykreslena na obr. 3.37. Z důvodu malého počtu 3D lokalizovaných zdrojů nemáme při pohledu na mapu valnou představu o podrobnějším vývoji výboje v oblaku.



Obr. 3.36: Příklad izolovaných iniciačních pulzů (tytéž pulzy s 3D lokalizovanými VHF zdroji viz obr. 3.35). Modře: vlnová forma naměřená anténou SLAVIA. Barevné tečky: VHF zdroje detekované jednotl. SAETTA stanicemi.



Obr. 3.37: Mapa VHF zdrojů vyzářených izolovanými iniciačními pulzy ze dne 16. 10. 2015, po 1:49:08,994 UTC. Vlnová forma viz obr. 3.35.

Kapitola 4

Diskuze a shrnutí

Práce navazuje na studii provedenou v rámci výzkumného úkolu [23] a je zaměřena na studium vlastností bleskových výbojů se známou polaritou zpětného výboje. Využívá jak dat zaznamenaných anténou SLAVIA umístěnou na severním cípu ostrova Korsika, tak dodatečných dat od detekční sítě Météorage a měřících stanic SA-ETTA. Propojením dat z různých měřících zařízení bylo možno studovat vlastnosti jednotlivých bleskových výbojů mnohem podrobněji.

V období od září do prosince 2015 jsme nad Korsikou zaznamenali celkem 199 bleskových výbojů, ke kterým byla přiřazena data od detekční sítě Météorage, obsahující informace o poloze, polaritě a velikosti špičkového proudu $|I_{RS}|$ jednotlivými zpětnými výboji. Identifikováno bylo 176 záporných a 23 kladných zpětných výbojů.

Čas T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem se pro záporné bleskové výboje pohyboval v rozmezí od 1 ms do 149,5 ms se střední hodnotou $\langle T \rangle \doteq 7$ ms a mediánem $\text{med}(T) \doteq 3$ ms (viz obr. 3.1). Tyto výsledky jsou srovnatelné s měřeními provedenými Kolmašovou a kol., kteří uvádí nejčastější výskyt iniciačních pulzů 2–58 ms před prvním zpětným výbojem [24]. Pro kladné bleskové výboje se doba T pohybovala v rozmezí od 4,2 ms do 138,4 ms se střední hodnotou cca 4 krát vyšší a mediánem 6 krát vyšším než tomu bylo u záporných blesků – $\langle T \rangle \doteq 30$ ms, $\text{med}(T) \doteq 18$ ms (viz obr. 3.19). Tato měření jsou srovnatelná s výsledky, které publikovali Wu a kol. a Nag a kol. [26, 39].

Co se týče amplitudy největšího iniciačního pulzu A_{PB} , byla pro záporné i kladné bleskové výboje v drtivé většině případů menší než amplituda odpovídajícího zpětného výboje A_{RS} (viz obr. 3.2, 3.20). Pro záporné blesky byla střední hodnota poměru těchto dvou amplitud $\langle A_{PB}/A_{RS} \rangle \doteq 0,8$ a medián $\text{med}(A_{PB}/A_{RS}) \doteq 0,3$. Zaznamenali jsme také nemalé procento blesků s amplitudou A_{PB} větší než amplituda A_{RS} , stejně jako například Gomes a kol., či studie v rámci bakalářské práce nebo výzkumného úkolu [21, 22, 23]. Tyto blesky s velkým poměrem A_{PB}/A_{RS} můžeme vysvětlit pravděpodobnou přítomností silného dolního kladného nábojového centra v oblaku, které mohlo způsobit zeslabení daného zpětného výboje při jeho průchodu oblakem. U kladných blesků byly výsledky podobné: $\langle A_{PB}/A_{RS} \rangle \doteq 0,6$ a medián $\text{med}(A_{PB}/A_{RS}) \doteq 0,3$. V dřívějších studiích bývá uváděn poměr amplitud pro kladné výboje mnohem menší, než pro výboje záporné [26], což je v rozporu s na-

šími výsledky. Na tento rozpor bude třeba zaměřit další výzkum s větším objemem vstupních dat.

U záporných blesků se hodnoty velikosti proudu zpětným výbojem se pohybovaly od jednotek kA až po 380 kA se střední hodnotou velikosti proudu $\langle |I_{RS}| \rangle \doteq 97$ kA a mediánem $\text{med}(|I_{RS}|) \doteq 78$ kA (viz obr. 3.3). Závislost mezi velikostí proudu a místem výskytu zde nebyla pozorována (viz obr. 3.6), na rozdíl od studie provedené Saidem a kol., kteří uváděli velikost špičkového proudu vyšší než 75 kA pro zpětné výboje detekované nad oceánem, zatímco pro zpětné výboje nad pevninou průměrně 27 kA [36]. U všech záporných zpětných výbojů s $|I_{RS}|$ větší než 60 kA jsme také pozorovali, že časová prodleva T mezi prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem a následujícím zpětným výbojem vždy kratší než 5 ms (viz obr. 3.4). V případě záporných i kladných výbojů byl pro velikosti proudu zpětným výbojem pozorován i jistý práh, nad kterým byla amplituda A_{PB} vždy menší než A_{RS} , pro záporné výboje to bylo $|I_{RS}| \geq 60$ kA a pro kladné $I_{RS} \geq 25$ kA (viz obr. 3.5 a 3.24). Toto chování bylo očekávatelné, jelikož blesky vznikající v takto silných nábojových centrech vedou k silným magnetickým polím generovaným zpětným výbojem a tak i ke krátkému času mezi vznikem výboje a jeho úderu do země. Nicméně takto jasnou závislost mezi proudem I_{RS} a dobou T , jako u záporných blesků, jsme u kladných blesků nepozorovali (viz obr. 3.23). Pro kladné zpětné výboje byla střední hodnota velikosti špičkového proudu $\langle I_{RS} \rangle \doteq 77$ kA a $\text{med}(I_{RS}) \doteq 73$ kA (viz obr. 3.21). Střední hodnota je tedy menší, než u záporných zpětných výbojů. Dřívější studie proudů kladnými zpětnými výboji, však uvádí naopak proudy vyšší, jako např. Nag a kol., kteří uvádí střední hodnotu velikosti proudu 95 kA [32, 39]. Tento rozdíl s našimi výsledky může být opět způsoben nedostatečným množstvím námi detekovaných kladných výbojů. Všechny kladné zpětné výboje byly detekovány nad mořem či pobřežím (viz obr. 3.22) a většina záporných zpětných výbojů nad mořem, pobřežím či v oblasti horního cípu ostrova Korsika (viz obr. 3.6). Tyto výsledky se víceméně shodují s měřením ve Francii, kde Pédeboy a kol. detekovali během zimního období většinový výskyt blesků zejména nad pobřežím [37]. Toto rozložení výskytu blesků je pravděpodobně způsobeno vyššími teplotními rozdíly mezi pevninou a oceánem, a tedy lepšími podmínkami pro tvorbu stoupavých vzdušných proudů, které dávají vzniku bouřkovým oblakům.

K vybraným bleskovým výbojům jsme navíc obdrželi data od měřicích stanic SAETTA, obsahující informace o detekovaných VHF zdrojích vyskytujících se v časech daných bleskových výbojů. Pro tyto výboje jsme poté srovnávali data ze stanic SAETTA s magnetickými vlnovými formami zaznamenanými anténou SLAVIA. Ke následnému studiu byly vybrány výboje, pro které byl čas detekce prvního 3D lokalizovaného VHF zdroje v rozmezí ± 1 ms od času detekce prvního iniciačního pulzu, a to celkem 24 záporných výbojů a 2 kladné.

V případě záporných i kladných blesků byl při porovnání dat s 3D lokalizovanými VHF zdroji (příklady viz obr. 3.7, 3.9 pro záporné a obr. 3.25, 3.26 pro kladné) a surových dat z jednotlivých SAETTA stanic (příklady viz obr. 3.8, 3.10 pro záporné a obr. 3.27, 3.28 pro kladné) pozorován nedostatek 3D rekonstruovaných zdrojů, ačkoliv různé stanice detekovaly velké množství zdrojů, ve spoustě případů až maximální počet v daném 80- μ s časovém okně. Při přiblížení na iniciační pulzy byla navíc u všech studovaných blesků vidět časová shoda VHF zdrojů detekovaných

jednotlivými SAETTA stanicemi s intenzivními peaky iniciačních pulzů, stejně jako rychlý nárůst počtu detekovaných zdrojů spolu s prvním rozpoznatelným iniciačním pulzem. V případě všech záporných blesků byl vždy s pulzem zpětného výboje pozorován rychlý pokles počtu detekovaných VHF zdrojů, zatímco u blesků kladných byl naopak pozorován spíše nárůst počtu zdrojů. Nedostatek 3D rekonstruovaných zdrojů zejména v časech iniciační fáze byl dříve interpretován jako žádná anebo velmi malá souvislost detekovaných VHF zdrojů s iniciační fází bleskových výbojů [50, 51, 52, 53]. Avšak naše studie dat zaznamenaných jednotlivými SAETTA stanicemi spolu se studií provedenou Kolmašovou a kol. [27] ukazuje, že souvislost mezi těmito jevy jednoznačně existuje. U záporných blesků byl navíc téměř na všech stanicích zaznamenán maximální počet (2000) VHF zdrojů v daném 80- μ s časovém okně, což naznačuje téměř spojitě vyzařování ve VHF spektru. To může způsobovat problémy v identifikování jednotlivých zdrojů a následné 3D rekonstrukci z dat detekovaných jednotlivými stanicemi [27]. Vzhledem k tomu, že každá stanice nejprve uloží čas a výkon pouze jednoho VHF zdroje detekovaného v rámci 80- μ s časového okna a teprve s tímto vybraným zdrojem je dále pracováno v algoritmu pro 3D rekonstrukci, s rostoucím počtem detekovaných zdrojů na jednotlivých stanicích roste počet zdrojů, které se dále pro výpočet 3D rekonstrukce nevyužívají, a to poté vede k malému počtu 3D lokalizovaných zdrojů. Velký počet VHF zdrojů detekovaných v 80- μ s časovém okně byl pozorován také u kladných blesků a izolovaných iniciačních pulzů, ačkoliv zde tomu tak bylo pro menší počet jednotlivých SAETTA stanic, jelikož zde byl také znatelnější pokles počtu detekovaných zdrojů se vzdáleností stanic od zdroje narozdíl od záporných blesků. Na základě výše zmíněné časové shody VHF zdrojů a intenzivních peaků iniciačních pulzů v datech z jednotlivých SAETTA stanic můžeme tvrdit, že během iniciační fáze pravděpodobně dochází k rychlému krokovitému prodlužování bleskového kanálu a dochází tak k vyzařování elektromagnetických signálů v širokém rozsahu frekvencí. Tyto signály jsou tedy projevem stejného fyzikálního procesu a zaznamenáváme je pomocí širokopásmových přijímačů ve formě iniciačních pulzů a pomocí úzkopásmových LMA stanic ve formě VHF zdrojů [27].

Zkoumali jsme také výšky vzniku VHF zdrojů, které byly zaznamenány v čase okolo 1 ms od prvních iniciačních pulzů, a tedy odpovídají výškám vzniku jednotlivých blesků. Pro záporné výboje se tato výška pohybovala v rozmezí od 2–5 km nad hladinou moře se střední hodnotou a mediánem přibližně 3,8 km (viz obr. 3.11). Tato výška odpovídá nejčastěji pozorované výšce výskytu hlavního záporného centra v bouřkovém oblaku. Závislosti na parametrech T , A_{PB}/A_{RS} a $|I_{RS}|$ pro záporné výboje nevykazovaly žádný viditelný trend (viz obr. 3.12, 3.13, 3.14). Pro oba studované kladné bleskové výboje byla výška vzniku 2,3 km nad mořskou hladinou, což naznačuje jejich iniciaci v oblasti mezi dolním kladným a hlavním záporným nábojovým centrem oblaku.

Dále jsme 3D lokalizované zdroje využili k mapování vývoje jednotlivých výbojů. Za záporné blesky jsou v práci uvedeny 2 příklady – jeden samostatný výboj, u kterého bylo na mapě viditelné rozdělení do dvou větví (viz obr. 3.15 a 3.16) a jeden blesk s pěti následnými zpětnými výboji, u kterého jsme pozorovali rostoucí výšku s časem (viz obr. 3.17 a 3.18). U kladných výbojů jsme zmapovali oba výše uváděné výboje a o obou z nich jsme pozorovali postup výboje směrem vzhůru od cca

2 km do přibližně 4–5 km nad zemí. U jednoho z kladných bleskových výbojů bylo vidět rozdělení na 2 větve (viz obr. 3.29) a u druhého pouze postup v horizontálním a vertikálním směru (viz obr. 3.30).

3D mapování jsme využili také u kladného blesku, u něhož se v magnetické vlnové formě objevily 2 sledy iniciačních pulzů po sobě, jeden pulz mezioblačného blesku a jeden pulz zpětného výboje (viz obr. 3.31). Díky vykreslení mapy vývoje v prostoru jsme rozlišili a následně oddělili 2 navzájem neinteragující větve (mapa viz obr. 3.32), a tím získali představu, které iniciační pulzy patří ke kterému výboji (viz obr. 3.33 a 3.34). Vzhledem k tomu, že v samotných magnetických vlnových formách toto nejsme schopni rozlišit, je toto využití další značnou výhodou propojení dat z širokopásmových přijímačů s daty od LMA stanic pro kvalitnější a podrobnější studium bleskových výbojů.

V rámci práce jsme v datech našli také iniciační pulzy, které nebyly následovány pulzem zpětného či mezioblačného výboje – tzv. izolované iniciační pulzy. Zde jsme uvedli pouze příklad jednoho takového případu, opět spolu s daty od SAETTA stanic (viz obr. 3.35, 3.36 a 3.37). Co se týče počtu 3D lokalizovaných VHF zdrojů a časové shody VHF zdrojů detekovaných jednotlivými SAETTA stanicemi s intenzivními peaky iniciačních pulzů, i tyto izolované pulzy vykazovaly stejné vlastnosti jako výše zmíněné kladné a záporné výboje. Podrobná studie všech nalezených izolovaných iniciačních pulzů je obsahem připravovaného článku [49].

Kapitola 5

Závěr

V rámci práce byly splněny všechny body zadání:

1. Byla provedena analýza tzv. iniciačních pulsů a za nimi následujících pulzů tzv. zpětných výbojů nalezených v datech zaznamenaných zařízením Ústavu fyziky atmosféry AV ČR umístěným na severním cípu ostrova Korsika v období od září do prosince 2015. Popis studovaného datasetu viz kapitola 3.2.
2. Na základě časové shody záznamů ÚFA a francouzské detekční sítě Météorage byla nalezena poloha zaznamenaných výbojů, jejich polarita a velikost špičkového proudu. Procesy u kladných a záporných blesků byly analyzovány odděleně. Výsledky pro záporné blesky viz kapitola 3.3, pro kladné viz kapitola 3.4.
3. Byl nastudován princip fungování měřících systémů LMA (Lightning Mapping Array) a datových produktů systému SAETTA (LMA). Popis jejich vlastností je k nahlédnutí v kapitole 2.3.
4. Pro vybrané bleskové výboje byly nalezeny v SAETTA datech časově relevantní VHF zdroje a ty poté využity k 3D mapování vývoje jednotlivých bleskových výbojů uvnitř bouřkového oblaku. Výsledky pro záporné bleskové výboje viz kapitola 3.3.1, pro kladné viz kapitola 3.4.1.
5. Byla stanovena výška VHF zdrojů časově odpovídajících výskytu iniciačních pulzů a prozkoumána závislost této výšky na dalších parametrech daného výboje, a to parametrech A_{PB}/A_{RS} , T a $|I_{RS}|$. Výsledky pro záporné výboje viz kapitola 3.3.1, kladné viz kapitola 3.4.1.

Všechny výsledky jsou uvedeny v kapitole 3, diskuze a shrnutí výsledků viz kapitola 4.

Data od měřících stanic SAETTA a detekční sítě Météorage nám poskytli kolegové Eric Defer z Laboratoire d'Aérodologie, Toulouse, Francie a Stéphane Pedebay z Météorage, Pau, Francie. Za jejich ochotu jim patří naše díky.

Bibliografie

1. HULBURT, E. O. Ionization in the Upper Atmosphere of the Earth. *Phys. Rev.* 1928, **31**, 1018–1037. Dostupné z DOI: 10.1103/PhysRev.31.1018 (cit. na s. 4).
2. MAKINO, Masahiko; OGAWA, Toshio. Quantitative estimation of global circuit. *Journal of Geophysical Research.* 1985, **90**(D4). ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/JD090iD04p05961 (cit. na s. 4).
3. KULHÁNEK, Petr. *Blýskání, aneb, Třináctero vyprávění o plazmatu.* Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-3-9 (cit. na s. 4).
4. KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika: studijní text pro doktorské studium.* Praha, 2004. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická (cit. na s. 4, 6–8).
5. COORAY, Vernon. *An introduction to lightning.* New York: Springer, 2014. ISBN 9789401789370 (cit. na s. 5–14, 17–22).
6. KRACÍK Jiří, Jaromír TOBIÁŠ a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Elektrické výboje: určeno vývojovým pracovníkům, výpočtářům, konstruktérům a posluchačům elektrotechnických škol.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Malá elektrotechnická knihovna (cit. na s. 6).
7. SEDLÁK, Bedřich; ŠTOLL, Ivan. *Elektrina a magnetismus.* Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 9788024621982 (cit. na s. 9).
8. UMAN, Martin A.; MCLAIN, D. Kenneth; KRIDER, E. Philip. The electromagnetic radiation from a finite antenna. *American Journal of Physics.* 1975, **43**(1), 33–38. ISSN 0002-9505. Dostupné z DOI: 10.1119/1.10027 (cit. na s. 9–11).
9. KOLMAŠOVÁ, Ivana. *Analysis of broadband electric and magnetic signals radiated from lightning discharges.* Praha, 2013. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Oddělení fyziky (cit. na s. 11, 15, 17, 19, 21–24).
10. UMAN, Martin A.; MCLAIN, D. Kenneth. Magnetic field of lightning return stroke. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1969-12-20, **74**(28), 6899–6910 [cit. 2020-07-19]. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/JC074i028p06899 (cit. na s. 11, 25).

11. KAŠPAR, Petr; SANTOLÍK, Ondřej; KOLMAŠOVÁ, Ivana; FARGES, Thomas. A model of preliminary breakdown pulse peak currents and their relation to the observed electric field pulses. *Geophysical Research Letters*. 2017-01-16, **44**(1), 596–603. ISSN 00948276. Dostupné z DOI: 10.1002/2016GL071483 (cit. na s. 11).
12. BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologie: [úvod do studia dějů v zemské atmosféře]*. Vyd. 1. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-7178-653-5 (cit. na s. 12, 13).
13. BEDNÁŘ, Jan. *Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina*. 1. vyd. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2 (cit. na s. 13).
14. KOLMAŠOVÁ, Ivana. Blýská se... *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. 2015, **60**(2), 123–132. ISSN 0032-2423. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10338.dmlcz/144406> (cit. na s. 13, 14, 22).
15. STOLZENBURG, Maribeth; RUST, W. David; MARSHALL, Thomas C. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 3. Synthesis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1998-06-27, **103**(D12), 14097–14108 [cit. 2020-04-19]. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/97JD03545 (cit. na s. 14).
16. MARSHALL, Thomas C.; MCCARTHY, Michael P.; RUST, W. David. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1995, **100**(D4), 7097–7103 [cit. 2020-07-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/95JD00020 (cit. na s. 14).
17. GUREVICH, A.V.; MILIKH, G.M.; ROUSSEL-DUPRE, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A* [online]. 1992, **165**(5-6), 463–468 [cit. 2020-07-27]. ISSN 03759601. Dostupné z DOI: 10.1016/0375-9601(92)90348-P (cit. na s. 14).
18. RAKOV, Vladimir A.; UMAN, Martin A. *Lightning: physics and effects*. New York: Cambridge University Press, 2003. ISBN isbn0521583276 (cit. na s. 16, 20).
19. MURPHY, Martin J.; KRIDER, E. Philip; MAIER, Michael W. Lightning charge analyses in small Convection and Precipitation Electrification (CaPE) experiment storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1996-12-27, **101**(D23), 29615–29626 [cit. 2020-06-09]. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/96JD01538 (cit. na s. 17).
20. BAHARUDIN, Z. A.; AHMAD, N. A.; FERNANDO, M.; COORAY, V.; MÄKELÄ, J. S. Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in Malaysia and Florida. In: *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2010, s. 1–9 (cit. na s. 17).
21. GOMES, Chandima; COORAY, Vernon; JAYARATNE, Chandana. Comparison of preliminary breakdown pulses observed in Sweden and in Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 1998, **60**(10), 975–979 [cit. 2020-07-19]. ISSN 13646826. Dostupné z DOI: 10.1016/S1364-6826(98)00007-8 (cit. na s. 17, 62).

22. KOLÍNSKÁ, Andrea. *Rychlá měření magnetických signálů generovaných přírodními bleskovými výboji*. Praha, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta (cit. na s. 17, 42, 62).
23. KOLÍNSKÁ, Andrea. *Analýza vlastností elektromagnetických signálů vyzařovaných v průběhu vývoje přírodních bleskových výbojů*. Praha, 2019. Dostupné z: http://physics.fjfi.cvut.cz/publications/FTTF/VU_Andrea_Kolinska.pdf. Výzkumný úkol. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (cit. na s. 17, 28, 62).
24. KOLMAŠOVÁ, Ivana; SANTOLÍK, Ondřej; FARGES, Thomas; RISON, William; LÁN, Radek; UHLÍŘ, Luděk. Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes. *Geophysical Research Letters* [online]. 2014-07-28, **41**(14), 5316–5324 [cit. 2020-07-19]. ISSN 00948276. Dostupné z DOI: 10.1002/2014GL060913 (cit. na s. 17, 62).
25. MARSHALL, T.; SCHULZ, W.; KARUNARATHNA, N.; KARUNARATHNE, S.; STOLZENBURG, M.; VERGEINER, C.; WARNER, T. On the percentage of lightning flashes that begin with initial breakdown pulses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2014-01-27, **119**(2), 445–460 [cit. 2020-07-19]. ISSN 2169897X. Dostupné z DOI: 10.1002/2013JD020854 (cit. na s. 17).
26. WU, Ting; TAKAYANAGI, Yuji; FUNAKI, Tsuyoshi; YOSHIDA, Satoru; USHIO, T.; KAWASAKI, Zen-Ichiro; MORIMOTO, Takeshi; SHIMIZU, Masahito. Preliminary breakdown pulses of cloud-to-ground lightning in winter thunderstorms in Japan. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013, **102**, 91–98. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.014 (cit. na s. 17, 21, 62).
27. KOLMAŠOVÁ, Ivana et al. Lightning initiation: Strong pulses of VHF radiation accompany preliminary breakdown. *Scientific Reports* [online]. 2018, **8**(1) [cit. 2020-07-19]. ISSN 2045-2322. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-018-21972-z (cit. na s. 17, 24–27, 39, 64).
28. ORVILLE, Richard E. Spectrum of the lightning stepped leader. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1968-11-15, **73**(22), 6999–7008 [cit. 2020-07-19]. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/JB073i022p06999 (cit. na s. 18).
29. WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1999-06-27, **104**(D12), 14369–14376 [cit. 2020-07-19]. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/1999JD900201 (cit. na s. 18).
30. SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2006, **111**(D3) [cit. 2020-07-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/2005JD006415 (cit. na s. 18).

31. HEAVNER, Matthew J. LF/VLF and VHF lightning fast-stepped leader observations. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2002, **107**(D24) [cit. 2020-07-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/2001JD001290 (cit. na s. 18).
32. RAKOV, V. A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2003-06-01, **84**(6), 767–776 [cit. 2020-07-19]. ISSN 0003-0007. Dostupné z DOI: 10.1175/BAMS-84-6-767 (cit. na s. 18, 21, 22, 63).
33. IDONE, Vincent P.; ORVILLE, Richard E. Lightning return stroke velocities in the thunderstorm research international program (TRIP). *Journal of Geophysical Research* [online]. 1982, **87**(C7) [cit. 2020-07-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/JC087iC07p04903 (cit. na s. 19).
34. BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. Parameters of lightning flashes. *Electra*. 1975, **80**, 23–37 (cit. na s. 19).
35. ORVILLE, Richard E. A High-Speed Time-Resolved Spectroscopic Study of the Lightning Return Stroke. Parts I, II, III. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1968, **25**(5), 827–856. ISSN 0022-4928. Dostupné z DOI: 10.1175/1520-0469(1968)025<0852:AHSTRS>2.0.CO;2 (cit. na s. 19).
36. SAID, R. K.; COHEN, M. B.; INAN, U. S. Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2013-07-16, **118**(13), 6905–6915 [cit. 2020-07-19]. ISSN 2169897X. Dostupné z DOI: 10.1002/jgrd.50508 (cit. na s. 20, 63).
37. PÉDEBOY, Stéphane. Analysis of negative return stroke peak currents occurring in Ground Strike Points based on Lightning Locating System data. In: 2017. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317259210_Analysis_of_negative_return_stroke_peak_currents_occurring_in_Ground_Strike_Points_based_on_Lightning_Locating_System_data (cit. na s. 20, 63).
38. KASPAR, P.; STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; KOLMASOVA, I.; SANTOLIK, O. Comparison of Two Mechanisms of M Components Based on Their Electrodynamical Models. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2019, sv. 2019, AE13B–3214 (cit. na s. 20).
39. NAG, Amitabh; RAKOV, Vladimir A. Positive lightning: An overview, new observations, and inferences. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012-04-27, **117**(D8). ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/2012JD017545 (cit. na s. 21, 22, 62, 63).
40. RHODES, C. T.; SHAO, X. M.; KREHBIEL, P. R.; THOMAS, R. J.; HAYENGA, C. O. Observations of lightning phenomena using radio interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1994, **99**(D6). ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/94JD00318 (cit. na s. 22).

41. SHAO, X. M.; KREHBIEL, P. R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1996-11-27, **101**(D21), 26641–26668. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/96JD01803 (cit. na s. 22).
42. PROCTOR, David E. Lightning flashes with high origins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997-01-27, **102**(D2), 1693–1706. ISSN 01480227. Dostupné z DOI: 10.1029/96JD02635 (cit. na s. 22).
43. ODDĚLĚNÍ KOSMICKÉ FYZIKY, AV ČR. Širokopásmové elektromagnetické měření blesků. *Webové stránky*. Dostupné z: <http://okf.ufa.cas.cz> (cit. na s. 23, 24).
44. ERDMANN, Felix; DEFER, Eric; CAUMONT, Olivier; BLAKESLEE, Richard J.; PÉDEBOY, Stéphane; COQUILLAT, Sylvain. Concurrent satellite and ground-based lightning observations from the Optical Lightning Imaging Sensor (ISS-LIS), the low-frequency network Meteorage and the SAETTA Lightning Mapping Array (LMA) in the northwestern Mediterranean region. *Atmospheric Measurement Techniques* [online]. 2020, **13**(2), 853–875 [cit. 2020-07-19]. ISSN 1867-8548. Dostupné z DOI: 10.5194/amt-13-853-2020 (cit. na s. 25).
45. MÉTÉORAGE. *NOTE TECHNIQUE: Principe de calcul de l'intensité crete du courant d'arc*. 2015. Dostupné z: <https://cmstest.meteorage.com/resources/technical-notes> (cit. na s. 25).
46. THOMAS, Ronald J. Accuracy of the Lightning Mapping Array. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2004, **109**(D14) [cit. 2020-06-16]. ISSN 0148-0227. Dostupné z DOI: 10.1029/2004JD004549 (cit. na s. 26).
47. COQUILLAT, Sylvain et al. SAETTA: high resolution 3D mapping of the total lightning activity in the Mediterranean basin over Corsica, with a focus on a MCS event. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 2019, 1–35. Dostupné z DOI: 10.5194/amt-2019-192 (cit. na s. 26, 27).
48. RISON, W.; THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P. R.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophysical Research Letters*. 1999-12-01, **26**(23), 3573–3576. ISSN 00948276. Dostupné z DOI: 10.1029/1999GL010856 (cit. na s. 26, 27).
49. KOLMAŠOVÁ, Ivana et al. Two propagation scenarios of isolated breakdown processes. *Geophysical Research Letters*. 2020. Zasláno k publikaci (cit. na s. 30, 59, 65).
50. MARSHALL, T. C. Observed electric fields associated with lightning initiation. *Geophysical Research Letters*. 2005, **32**(3). ISSN 0094-8276. Dostupné z DOI: 10.1029/2004GL021802 (cit. na s. 64).
51. WILKES, R. A.; UMAN, M. A.; PILKEY, J. T.; JORDAN, D. M. Luminosity in the initial breakdown stage of cloud-to-ground and intracloud lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016-02-16, **121**(3), 1236–1247. ISSN 2169897X. Dostupné z DOI: 10.1002/2015JD024137 (cit. na s. 64).

52. HARE, B. M. et al. Do cosmic ray air showers initiate lightning?: A statistical analysis of cosmic ray air showers and lightning mapping array data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017-08-16, **122**(15), 8173–8186. ISSN 2169897X. Dostupné z DOI: 10.1002/2016JD025949 (cit. na s. 64).
53. STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; KARUNARATHNE, S.; KARUNARATHNA, N.; VICKERS, L. E.; WARNER, T. A.; ORVILLE, R. E.; BETZ, H.-D. Luminosity of initial breakdown in lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013-04-16, **118**(7), 2918–2937. ISSN 2169897X. Dostupné z DOI: 10.1002/jgrd.50276 (cit. na s. 64).