

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie



Lucie Pacovská

**Vztah mezi povětrnostními typy a daty bleskových výbojů ve
střední Evropě**

Relationship between weather types and lightning discharges in
Central Europe

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jana Popová, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Název práce:

Vztah mezi povětrnostními typy a daty bleskových výbojů ve střední Evropě

Cíle práce:

Cílem práce je představit celosvětovou nízkonákladovou síť WWLLN (World Wide Lightning Location Network) detekující blesky na velmi nízké frekvenci a zjistit, zda existuje vztah mezi bleskovou aktivitou a povětrnostní situací, resp. povětrnostními typy.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje:

V práci budou použity základní statistické metody pro analýzu datových souborů. Hlavní pracovní metodou bude oboustranný binomický test, který bude použit na testování hlavních hypotéz vztahu mezi bleskovou aktivitou a povětrnostními typy. Práce pracuje s daty z celosvětové sítě WWLLN (World Wide Lightning Location Network) a Typizací povětrnostních situací vydávaných ČHMÚ. Zájmové území bude v případě této práce vymezeno jako část střední Evropy se středem nad Českem, konkrétně mezi 8° – 22° východní zeměpisné délky a mezi 48° – 52° severní zeměpisné šířky.

Datum zadání práce: 13.11.2020

Jméno studenta: Lucie Pacovská

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Jana Popová, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne

Lucie Pacovská

Abstrakt:

Práce představuje úvod do studia bleskových výbojů a detekce bleskové aktivity s důrazem na celosvětovou síť WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Dále zkoumá možné souvislosti mezi daty bleskových výbojů z celosvětové sítě WWLLN a Typizací povětrnostních situací ve střední Evropě vydávanou Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). V rešeršní části práce je představena problematika oblačné elektřiny a bleskových výbojů a současné možnosti jejich detekce s důrazem na detekci síťovou. Dále je představena celosvětová síť WWLLN, ukázky výstupů, které tato síť veřejně poskytuje, a některé vědecké studie, které zpracovávaly data WWLLN jak na území celého světa, tak na území Evropy, s důrazem na účinnost této sítě. Tato práce využívá získaná data ze sítě WWLLN mezi lety 2017-2019 a zároveň data Typizace povětrnostních situací ČHMÚ. V práci je představeno časové a prostorové rozložení dat WWLLN s hlavním důrazem v praktické části na testování hypotéz týkajících se souvislostí mezi bleskovými výboji a povětrnostními typy pomocí oboustranného binomického testu. Z výsledků se dá vyčíst, že při výskytu povětrnostních typů B (brázda nízkého tlaku nad střední Evropou), NWa (severozápadní anticyklonální situace) a Wal (západní anticyklonální situace letního typu) je pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje větší a při výskytu povětrnostních typů Wa (západní anticyklonální situace) a Sa (jižní anticyklonální situace) naopak menší, než je klimatologická pravděpodobnost, a to na hladině spolehlivosti 1 %. Pokud jde o výskyt alespoň sta výbojů během jednoho dne, vychází pravděpodobnost větší než pravděpodobnost klimatologická u typů B, Bp (brázda postupující přes střední Evropu), C (cyklóna nad střední Evropou), Cv (cyklóna výšková) a Wal na hladině spolehlivosti 1 %. Naopak menší pravděpodobnost než je pravděpodobnost klimatologická, že se během jednoho dne vyskytne alespoň sto výbojů, prokazují typy A (anticyklóna nad střední Evropou), Apl (putující anticyklóna), Ec (východní cyklonální situace), NWc (severozápadní cyklonální situace), Sa a Wa, opět na hladině spolehlivosti 1 %.

Klíčová slova

blesk, výboj, povětrnostní typ, střední Evropa

Abstract:

This thesis aims at describing a lightning discharge and the lightning activity detection with an emphasis put on the World Wide Lightning Location Network (WWLLN). It also investigates possible relationships between the lightning discharge data from the WWLLN and the weather types given by the Weather type catalogue, which is published by the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), in Central Europe. In the state of the art, cloud electricity and lightning discharges as well as their detection and network detection are presented followed by a detailed description of the WWLLN, examples of outputs which are provided by WWLLN to the public, and some of the studies processing the data of WWLLN at global and European level mostly dealing with the network efficiency. This thesis uses the WWLLN data during 2017 – 2019 and the weather types provided by the CHMI. It displays the temporal and spatial distribution of the WWLLN data and mainly the results of testing the hypothesis whether there is a relationship between lightning discharges and weather types (or not) by using the two-tailed binomial test. The results show that for the weather types B (low pressure trough), NWa (northwestern anticyclonal situation) and Wal (western anticyclonal summer situation) the probability that at least one discharge occurs is higher than the climatological probability, while for the weather types Wa (western anticyclonal situation) and Sa (southern anticyclonal situation) the probability that at least one discharge occurs is lower than the climatological probability; both at the confidence level of 1 %. As far as the occurrence of at least one hundred discharges per day is concerned, the probability is higher than the climatological probability in case of B, Bp (migratory low pressure trough), C (cyclone), Cv (high-level cyclone) and Wal weather types, whereas the probability is lower than the climatological probability in case of A (anticyclone), Ap1 (migratory anticyclone), Ec (Eastern cyclonal situation), NWc (northwestern cyclonal situation), Sa, and Wa weather types at the confidence level of 1 %.

Keywords

lightning, discharge, weather type, Central Europe

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především RNDr. Janě Popové, Ph.D. za její podporu, ochotu a za nápady a cenné rady při odborném vedení této práce. Další poděkování patří Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, za poskytnutí dat ze sítě WWLLN. Poslední poděkování patří mé rodině za to, že mi jsou neustálou oporou.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Rešeršní část	11
1.1 Úvod do problematiky atmosférické elektřiny	11
1.1.1 Oblačná elektřina.....	12
1.1.2 Bleskové výboje	14
1.2 Detektory bleskové aktivity.....	16
1.2.1 Detekce jedním senzorem	19
1.2.2 Síťová detekce.....	19
1.3 WWLLN (World Wide Lightning Location Network)	20
1.3.1 Příklady výstupů WWLLN	20
1.3.2 Práce využívající data WWLLN	22
1.3.3 Práce využívající data WWLLN na území Evropy	24
2 Data, zájmové území a metody	25
2.1 Data WWLLN	25
2.2 Zájmové území	25
2.3 Typizace povětrnostních situací	26
2.4 Testování vztahu mezi daty WWLLN a povětrnostními typy	28
3 Výsledky a diskuze.....	30
3.1 Časové a prostorové rozložení dat WWLLN	30
3.1.1 Časové rozložení dat	30
3.1.2 Prostorové rozložení dat.....	32

3.2	Vztah mezi povětrnostními typy a výskytem min. 1 výboje.....	34
3.3	Vztah mezi povětrnostními typy a výskytem min. 100 výbojů.....	37
4	Shrnutí a závěr.....	39
	Seznam použitých zdrojů.....	41
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam grafů.....	45
	Seznam tabulek.....	45

Seznam použitých zkratk

Cb = oblak Cumulonimbus

CC = blesk cloud-to-cloud (mezi oblaky)

CG = blesk cloud-to-ground (do země)

CG- = negative cloud-to-ground

CG+ = positive cloud-to-ground

CLDN = Canadian Lightning Detection Network

ČHMÚ = Český hydrometeorologický ústav

ČMeS = Česká meteorologická společnost

DF = Direction Finding

IC = blesk intracloud (uvnitř oblaku)

LASA = Los Alamos Sferic Array

LF = low frequency

LIS = Lightning Imaging Sensor

RF = radiofrekvenční (záření)

TLE = Přechodný světelný úkaz

TOA = Time of Arrival (čas příchodu)

UTC = coordinated universal time

VLF = very low frequency

VHF = very high frequency

WWLLN = World Wide Lightning Location Network

Úvod

Blesková aktivita je jedním z nejpůsobivějších, ale zároveň nejnebezpečnějších atmosférických jevů. Samotné blesky způsobují nejen škody na majetku, ale ohrožují i lidské zdraví potažmo životy. To jsou jen některé z důvodů, proč je kompletní porozumění tohoto jevu tak důležité. Ačkoli se tématem bleskové aktivity zabývají vědci po celém světě, stále ještě není ve všech otázkách této problematiky jasno. Skvělým pomocníkem k pochopení jevů v atmosféře vedoucím ke vzniku blesků jsou detektory bleskové aktivity, které zaznamenávají data o výbojích s velmi vysokým časovým rozlišením. Tyto detektory, potažmo detekční sítě, dokáží spolu se zlepšováním technického vybavení odpovědět na stále více nejasností v této problematice. Jednou z novějších sítí tohoto druhu je celosvětová síť World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Do této sítě se postupem času přidávají další a další senzory a síť je tak čím dál více účinnější. Právě tato síť může být velmi užitečná a přinést řadu nových odpovědí v problematice bleskových výbojů či samotné oblačné elektřiny.

Data ze sítě WWLLN jsou tak použita v této práci, která si dává za cíl zjistit, zda existuje vztah mezi bleskovou aktivitou zaznamenanou sítí WWLLN a povětrnostní situací danou povětrnostními typy dle typizace Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) ve střední Evropě mezi lety 2017 – 2019.

Tato práce je dále rozčleněna následovně. Kapitola 1 je věnována základním poznatkům v problematice oblačné elektřiny a bleskových výbojů a současné možnosti jejich detekce s důrazem na detekci síťovou. Tato kapitola se také zaměřuje na detailnější popis sítě WWLLN, veřejně dostupné výstupy této sítě a stěžejní práce analyzující data a hlavně účinnost této sítě. Kapitola 2 se věnuje zájmovému území ve střední Evropě, datům bleskových výbojů a katalogu povětrnostních typů a v neposlední řadě také oboustrannému binomickému testu, který byl použit pro testování vztahu mezi bleskovou aktivitou a povětrnostní situací. Třetí a poslední kapitola představuje a diskutuje výsledky a je následována shrnutím a závěrem.

Rešeršní část

V této části práce jsou představeny teoretické koncepty a dosavadní znalosti v oblasti atmosférické a oblačné elektřiny. Jsou zde nastíněny jevy, ke kterým dochází v oblaku druhu Cumulonimbus (Cb) a které vedou ke vzniku blesku. Další podkapitola je věnována detektorům bleskové aktivity a v poslední podkapitole je představena detekční síť World Wide Lightning Location Network (WWLLN) a vybrané vědecké práce, které data WWLLN analyzovaly.

1.1 Úvod do problematiky atmosférické elektřiny

V učebnicích a odborné literatuře se obvykle rozlišují dva základní typy podmínek, které probíhají v atmosféře a týkají se elektrických procesů. První z nich je označován jako „fair weather conditions“. Tento výraz se do češtiny překládá jako „podmínky klidného počasí“ a označuje situaci s jasnou oblohou nebo jen velmi malým pokrytím oblohy oblačností, beze srážek, bez silného větru a prakticky konstantním elektrickým polem. Druhý typ podmínek je označován jako „disturbed weather conditions“, v překladu by se dalo říci „podmínky bouřlivého počasí“. Tento termín odpovídá výskytu výrazné a vertikálně mohutné oblačnosti, zejména oblačného druhu Cumulonimbus (Cb), a zesílenou elektrickou aktivitou, která se navíc velmi rychle mění v čase (Rakov, Uman 2003; Kopáček, Bednář, Žák 2020).

Atmosféra a zemský povrch jsou nabitý elektrickými náboji opačné polarity. Díky tomu se v atmosféře vytváří přibližně vertikálně orientované elektrické pole. Intenzita elektrického pole dosahuje u zemského povrchu za podmínek klidného počasí kolem $130\text{--}140 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. V případě bouřlivého počasí, a to zejména pod základnami oblaků druhu Cb, elektrické pole zesiluje řádově až na desítky $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ a je orientováno opačně než za podmínek klidného počasí (Řezáčová a kol. 2007; Kopáček, Bednář, Žák 2020).

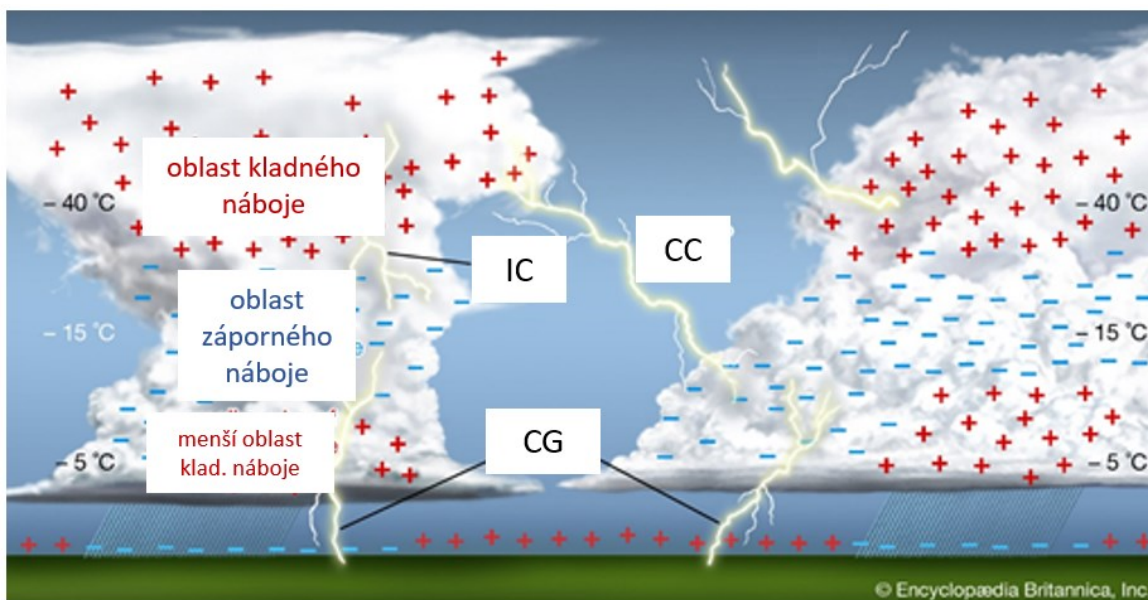
Podle klasického pohledu na elektrické vlastnosti atmosféry je ionosféra považována za ekvipotencionální plochu stejně tak jako povrch Země. Soustava Země – ionosféra se tak dá považovat za sférický kondenzátor. Za podmínek klidného počasí by mělo sice docházet k vybíjení tohoto kondenzátoru, protože vzduch není dokonalý izolátor. Protože je však elektrické pole za klidného počasí přibližně konstantní, musí existovat nějaký dobíjecí mechanismus. Takovým mechanismem je právě bouřková činnost, při které je dodáván zpravidla záporný náboj na zemský povrch za pomoci bleskových výbojů, čímž dochází k opětovnému nabíjení zmíněného kondenzátoru (Řezáčová a kol. 2007; Kopáček, Bednář, Žák 2020).

1.1.1 Oblačná elektřina

Oblak druhu Cb má podle teoretických modelů dvě hlavní centra elektrického náboje. V horní části se nachází centrum náboje kladného a v dolní části pak centrum náboje záporného. Cb tedy můžeme s větším zjednodušením interpretovat jako elektrický dipól a pro jednoduchost uvažujeme vertikální orientaci tohoto dipólu, i když v reálných případech bývá jeho vertikální osa i dosti výrazně skloněná a reálná struktura náboje málokdy odpovídá jednoduchému dipólovému schématu. Dolní záporný náboj Cb indukuje bezprostředně pod sebou, na jinak převážně záporně nabitým zemským povrchem, kladný náboj, a to zejména na vyvýšených místech jako stožár apod. (Bednář, Popek, 2012).

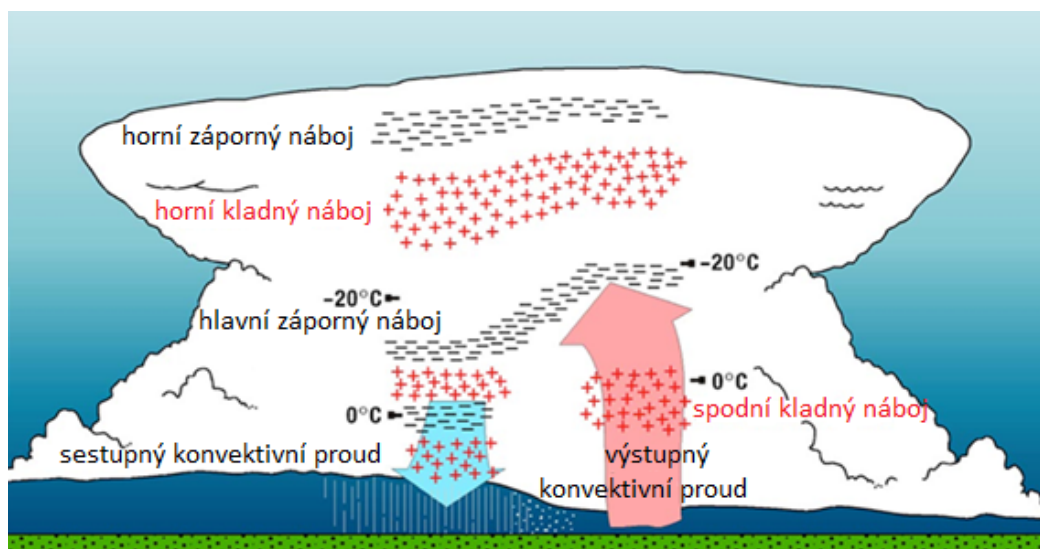
S modelem dipólu v Cb pracuje velká část autorů (Helsdon, Wu, Farley 1992; Doztek a kol. 2005; Volarić 2010), nicméně všichni uvádějí, že jde o zjednodušení. To samé se týká i rozšíření tohoto modelu na tzv. tripól (*obrázek 1*), kde se mimo dipól navíc indikuje menší oblast kladného náboje u základny oblaku Cb (Uhlířová 2020).

Obrázek 1: Schématické znázornění struktury náboje v Cb dle teoretického tripólového modelu (upraveno z Encyclopedia Britannica). CC – (z angl. cloud-to-cloud) výboj mezi dvěma oblaky. IC – (z angl. intracloud) výboj uvnitř oblaku. CG – (z angl. cloud-to-ground) výboj z oblaku do země.



Naproti tomu v článku autorů Stolzenburg a Marshall (2008) či v jejich dřívější práci Stolzenburg a kol. (1998) jsou dobře popsána i tzv. vedlejší centra elektrického náboje. Na *obrázku 2* je ukázáno rozložení náboje tak, jak bylo zjištěno na základě hodnot z balonových měření v Novém Mexiku. Měření probíhalo ve vzestupných i sestupných konvektivních proudech MCS (mezoměřítkový konvektivní systém) a byly měřeny jak hodnoty elektrické intenzity ve vertikále E_z tak potenciálu V . Z *obrázku 2* je patrné, že naměřená struktura náboje se značně liší od té teoretické dipólové či tripólové, ačkoliv autoři v závěru uvádějí, že dipólovou potažmo tripólovou základní strukturu lze na tomto obrázku rovněž vyzorovat, a že ostatní centra jsou vedlejší či méně silná.

Obrázek 2: Centra elektrického náboje v Cb. Upraveno z Stolzenburg a Marshall (2008)



Separace elektrického náboje v oblaku, vedoucí ke vzniku nábojových center, jak je znázorněno na *obrázku 2*, je výsledkem vzájemného spolupůsobení několika procesů, které souvisejí s přítomností ledové fáze, a jsou podmíněny intenzivním narůstáním ledových částic, rychlým namrzáním kapiček přechlazené vody na těchto částicích a vzájemnými kolizemi. (Bednář, Popěk 2012). Teorií separace elektrického náboje a tedy i vzniku center elektrického náboje v Cb je několik, roste však konsenzus, že při vzniku a počátečních fázích výboje jsou dominantním procesem kolize ledových krystalků a krupek v oblaku za přítomnosti přechlazených vodních kapiček (Rakov, Uman 2003).

1.1.2 Bleskové výboje

Blesk je komplex elektrických výbojů, který vzniká mezi centry kladného a záporného náboje v oblacích nebo na povrchu Země (ČMeS online). Bednář a kol. (1993) vykládají slovo blesk jako elektrický výboj, který vzniká mezi centry kladných a záporných nábojů jednoho nebo více oblaků, mezi oblakem a zemí, vzácně mezi oblakem a stratosférou.

Podle ČMeS (online) je výboj definován jako: „impulz proudu blesku, který se může během jednoho blesku vícenásobně opakovat.“

Podle místa výskytu blesku rozlišujeme dva základní typy blesků. Prvním typem jsou tzv. vnitřní blesky označované IC (z angl. intra-cloud), kdy se jedná zejména o bleskové výboje mezi dvěma hlavními centry elektrického náboje s opačnou polaritou v Cb. Druhým typem jsou blesky do země, které nejčastěji přenášejí ze záporně nabitého dolního centra záporný náboj k zemskému povrchu, a jsou označované CG- (negative cloud-to-ground). Mnohem řídkěji se vyskytují bleskové výboje mezi kladným centrem náboje a zemským povrchem, označované jako CG+ (positive cloud-to-ground). K těmto výbojům dochází zpravidla z kovádky Cb, kde převažuje oblast kladného náboje, přímo do země. Za zmínku dále stojí, že CG výboje (CG- a CG+ dohromady) představují jen asi 10 % celkové bleskové aktivity (Bednář, Poppek 2012).

Pro běžného pozorovatele se blesk jeví jako spojitý jev trvající relativně krátký okamžik. Studium magnetického a elektrického pole v okolí blesku a dnes i s přispěním vysokorychlostních kamer vědci zjistili, že se blesk skládá z posloupnosti jednotlivých fyzikálních jevů, které se od sebe odlišují například směrem šíření náboje, velikostí neseného špičkového proudu, dobou trvání apod. Jednotlivé fáze blesku jsou popsány v následujících odstavcích, a to konkrétně blesku CG nesoucím záporný náboj, přičemž vycházím hlavně z publikace (Rakov, Uman 2003).

Nejprve vzniká Prvotní elektrický průraz (Preliminary Breakdown), který trvá několik milisekund. Následuje Krokový vůdčí výboj (Stepped Leader). Tento výboj je tvořený negativně nabitým kanálem plasmy, který se pohybuje směrem k zemi rychlostí $2 \cdot 10^5$ ms. Zvláštností je, že se pohybuje po tzv. krocích, kdy se řádově po 50 m zastaví na 20 – 50 μ s a pak opět pokračuje v pohybu. Předpokládá se, že k tomuto zastavení dochází z důvodu poklesu intenzity elektrického pole pod určitou prahovou hodnotu a výboj se již nemůže samovolně šířit. Během doby zastavení výboje se intenzita elektrického pole opět zvýší, náboj se naindukuje a výboj se začne znovu šířit. Celková doba trvání krokového vůdčího výboje je okolo 10 ms, proud ve výboji je řádově 1 kA a vyzařovaná frekvence 1 – 200 MHz.

Když se krokový výboj přiblíží k zemi a elektrické pole dosáhne prahové hodnoty (v tomto okamžiku dosahuje napětí kolem deseti milionů voltů), vzniká vzestupný kladně nabitý výboj směřující k čelu vůdčího výboje. Vžilo se pro něj označení Spojovací výboj (Attachment Process). Po spojení Spojovacího výboje s Vůdčím výbojem vzniká Zpětný výboj (Return Stroke). Ten je nejviditelnější složkou CG výboje. Tímto výbojem, může protékat elektrický proud až 30 kA, čímž se kanál zahřívá až na 30 000 °C. Právě toto ohřátí vede k rychlému nárůstu tlaku vzduchu a vzniku tlakové vlny, kterou pozorovatelé vnímají jako hrom. Zpětný výboj je spolu se spojovacím výbojem silným zdrojem VLF (z angl. „very low frequency“ – tedy od 3 do 30 kHz) elektromagnetického záření.

Po zpětném výboji může blesk skončit. Mnohem častěji však v blesku nastávají další procesy, které vedou k dalšímu výboji ve vzniklém vodivém kanálu. Takto vzniklý výboj se v češtině označuje jako Druhý vůdčí výboj (angl. Dart Leader). Tento výboj se pohybuje k zemi rychlostí $107 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a většinou neprojevuje známky větvení. Maximální proud při výboji dosahuje 1 kA a podél vodivého kanálu dochází k uložení náboje o velikosti řádově 1 C. Některé šípové výboje vytvářejí zcela nový kanál mezi oblakem a zemí.

Po Druhém vůdčím výboji se objevuje Následný zpětný výboj (Subsequent Return Stroke). Jde o obdobu Zpětného výboje. Po Následném zpětném výboji vzniká poměrně často (ve více jak 50 % případů) tzv. Průběžný proud (Continuing Current) o velikosti 10 – 100 A trvající až stovky ms. Ten lze považovat za částečně stabilní obloukový výboj mezi nabitou oblastí oblaku a zemí. (Rakov, Uman 2003)

1.2 Detektory bleskové aktivity

Jak bylo nastíněno v předchozí kapitole, blesk se skládá z posloupnosti fyzikálních jevů. Každý z nich, je přitom charakterizován typickým elektromagnetickým polem. Blesk je tedy zdrojem elektromagnetického záření a to převážně v rozsahu 1 – 300 Hz. Nejčastěji se ale pohybuje ještě v užším rozmezí (5 – 10 kHz), tedy v oblasti radiového záření. V dalších podkapitolách budou představeny hlavní metody detekce blesků, především ty, které jsou založeny na měření elektromagnetického záření.

Předtím však poznamenejme, že detekci bleskové aktivity za pomoci přístrojů můžeme rozdělit na družicovou a pozemní. Sensory na družicích detekují výboje především optickou metodou (např. družice GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*), kdežto senzory instalované na zemském povrchu se zaměřují na elektromagnetické vlnění, které se šíří od samotného výboje. V této práci se pracuje s daty pozemní detekce a následující text se tak na ni zaměřuje.

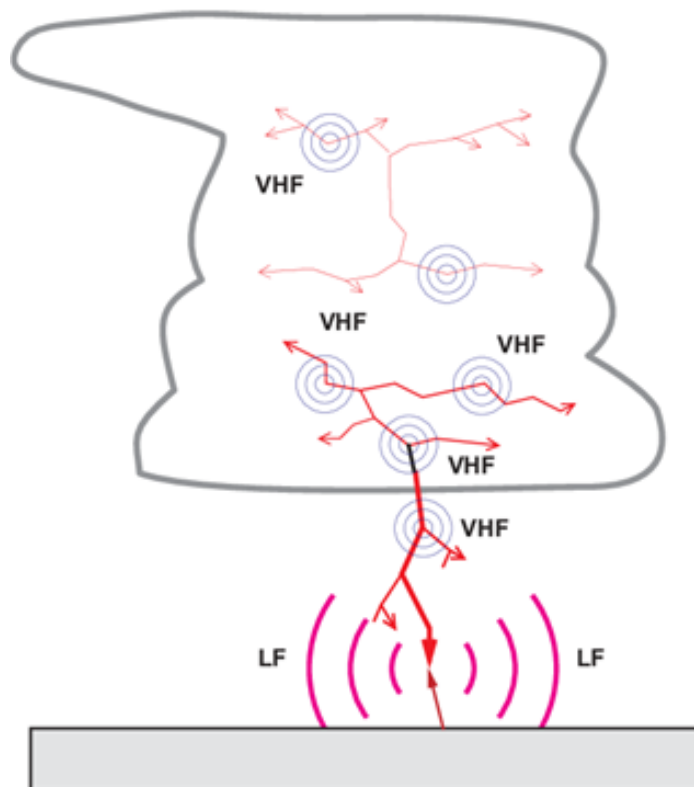
K pozemní detekci je možné využívat jeden senzor nebo detekční síť (viz. níže). Právě těmito sítěmi je prováděna přesnější detekce, protože k lokalizaci jednoho výboje se používá informace z více senzorů (Rakov, Uman 2003).

Pozemní detektory lze rozlišit podle toho, v jakém ze třech hlavních frekvenčních pásem snímají. Podle toho rozlišujeme:

- VHF senzory z angl. „very high frequency“ (velmi vysoká frekvence), které snímají pásmo od 30 do 300 MHz
- LF senzory z angl. „low frequency“ (nízká frekvence), které se zaměřují na pásmo od 30 do 300 kHz
- VLF senzory z angl. „very low frequency“ (velmi nízká frekvence), které detekují výboje v pásmu – od 3 do 30 kHz

Systémy detekující CG blesky pracují ve VLF/LF rozsahu. Důvodem je, že právě v tomto rozsahu zpětný výboj silně vyzařuje. Systémy detekující záření ve VHF pásmu odhalují jednotlivé IC výboje a vůdčí výboje v bleskovém kanálu. Na *obrázku 3* jsou schematicky znázorněny zdroje RF (radiofrekvenčního) záření při CG a IC blesku.

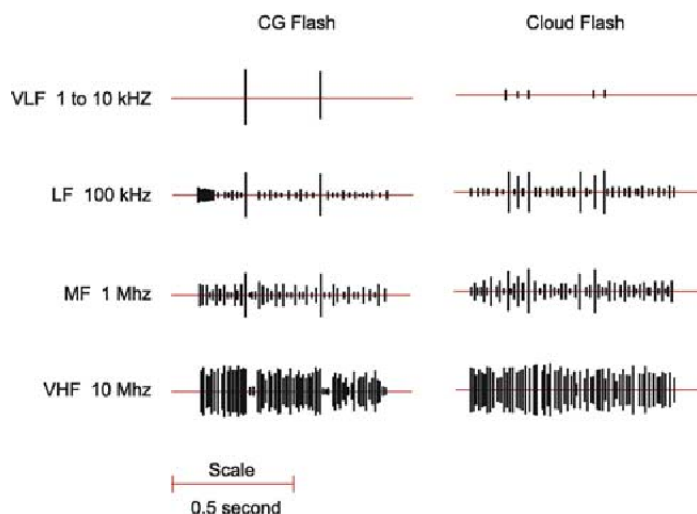
Obrázek 3: Schématické zobrazení zdrojů RF záření při CG a IC blesku. Převzato z Finke, Kreyer (2002).



Autoři Bednář a Popěk (2012) píší, že podle velikosti polarity a případných změn této polarity v závislosti na horizontální vzdálenosti pozorovatele od bouřky lze pak na záznamech časového průběhu intenzity elektrického pole rozlišit, zda příslušné impulsy pocházejí od vnitřního blesku, od záporného či kladného blesku do země, nebo od elektrického výboje směřujícího z horní části Cb vzhůru. Této skutečnosti se dnes využívá k identifikacím a rozlišení charakteru bleskových výbojů. Tuto skutečnost potvrzují i autoři Schulz a Lojou (2006), kteří píší, že IC a CG blesky nevyzařují stejným způsobem, proto používáme k jejich detekci různé druhy senzorů.

Obrázek 4 pro představu ukazuje, jak se liší záření při CG a IC blesku.

Obrázek 4: Porovnání RF záření při CG blesku (vlevo) a IC blesku (vpravo). Převzato z Schulz, Lojou (2006).



1.2.1 Detekce jedním senzorem

Jeden senzor detekuje blesky pomocí zaznamenání směru elektromagnetické vlny generované výbojem a podle její síly určí jeho vzdálenost od daného senzoru. Detektory s jedním senzorem zjistí přítomnost bleskové aktivity na určitém území, nedokáží však výboj přesně lokalizovat (Rakov, Uman 2003).

1.2.2 Síťová detekce

Pozemní detektory častěji tvoří, tzv. síť senzorů, které jsou rozmístěny po zájmovém území. Jednotlivé senzory musí být přesně časově synchronizovány a každý měří přesný čas příchodu signálu bleskového výboje, popřípadě i směr, a předává tyto informace do centra zpracování. Na základě získaných údajů z jednotlivých senzorů je v tomto centru vyhodnocena poloha výboje.

Povětšinou se používají dvě metody lokalizace výbojů. První z nich je metoda DF. Název metody pochází z anglického Direction Finding a jde při ní k určení směru zdroje

elektromagnetického pole. Tato metoda využívá Faradayova indukčního zákona. Užívají se dvě vertikálně ortogonálně orientované antény ve směru severo-jihním a východo-západním, kterými je detekován směr, ze kterého přichází elektromagnetický signál. Poloha blesku je pak dána průsečíkem naměřených přímk. Teoreticky jsou k lokalizaci nutné dva senzory, v praxi se ale používá senzorů více v rámci detekčních sítí. K lokalizaci jednoho výboje se tak nejčastěji používají alespoň tři senzory (Rakov, Uman 2003).

Druhá metoda se nazývá TOA (čas příchodu) z anglického Time of Arrival. Řezáčová a kol. (2007) uvádějí, že senzory využívající tuto metodu určují přesný čas zaznamenání signálu od výboje; výsledná poloha výboje se definuje jako průsečík hyperbol pro stejné časové diference několika senzorů (nejlépe tří až čtyř).

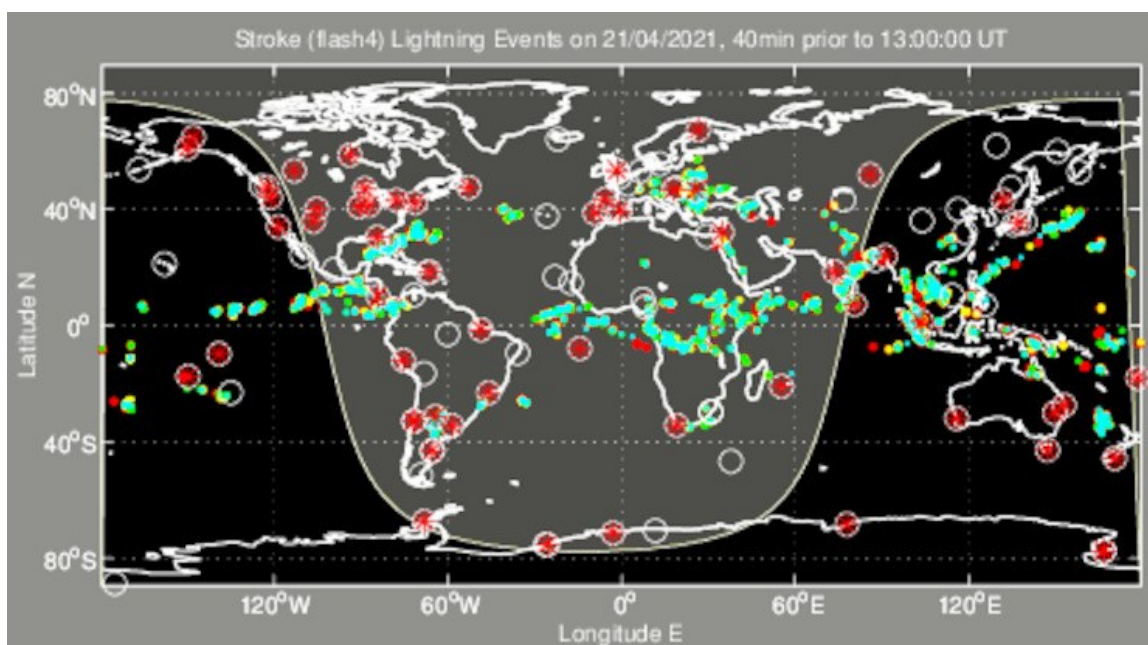
1.3 WWLLN (World Wide Lightning Location Network)

World Wide Lightning Location Network (WWLLN) je celosvětová pozemní detekční síť která funguje od března r. 2003. Jedná se o nízkonákladovou pozemní síť, která je schopna detekovat bleskové výboje kdekoli na Zemi s vysokou časovou a prostorovou přesností. V současné době má po celém světě přes 70 senzorů, které jsou určeny k detekci radiofrekvenčních vln v pásmu VLF. Síť spravuje tým Prof. Holzwortha z Univerzity ve Washingtonu (WWLLN online). V této práci je síť WWLLN věnována samostatná podkapitola, protože v praktické části jsou zpracovávána data právě z této sítě.

1.3.1 Příklady výstupů WWLLN

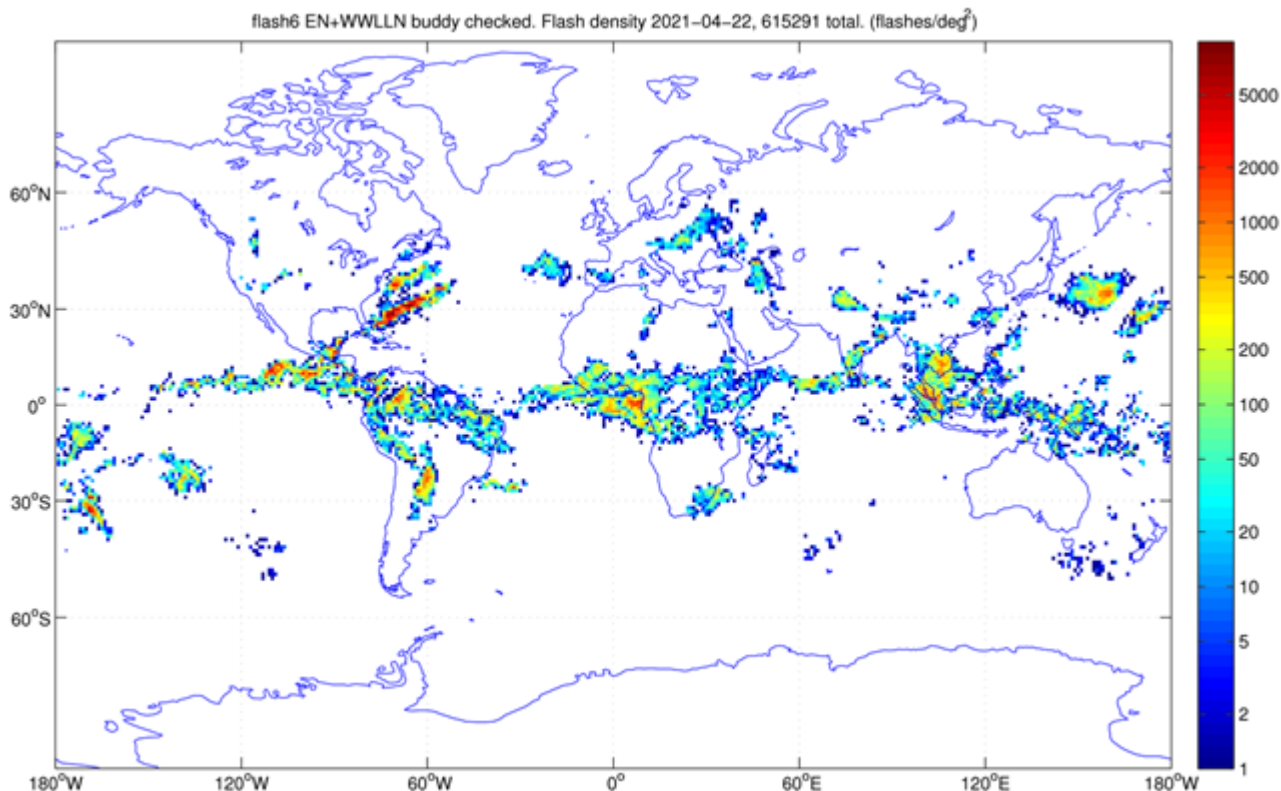
Na *obrázku 5* je vidět příklad rozložení bleskové aktivity ze dne 21.4.2021 (posledních 40 min do 13:00:00 UTC - universal time coordinated), tak jak je dostupný na webových stránkách WWLLN (<http://wwlln.net/>).

Obrázek 5: Blesková aktivita na Zemi od 12:40 do 13:00 UTC dne 21.4. 2021. Převzato z <http://wwlln.net/>. Poloha bleskových výbojů je zobrazena barevnými tečkami podle toho, kolik minut uplynulo od jejich naměření. Modře jsou zobrazeny výboje, které byly naměřeny během posledních 10 min, zeleně během posledních 20 min, žlutě během posledních 30 min a červeně během posledních 40 min. Červené hvězdičky v bílých kroužkách indikují aktivní místa senzorů WWLLN a bílá čára znázorňuje hranici mezi dnem a nocí, přičemž denní část má šedý podklad, zatímco ta noční černý.



WWLLN na svých webových stránkách mimo bleskovou aktivitu za posledních 40 min (obrázek 5) dále zdarma poskytuje obrázek kumulované hustoty bleskové aktivity na Zemi za poslední den (obrázek 6) a animaci vývoje bleskové aktivity po hodinách pro jednotlivé části světa, včetně satelitního podkladu National Weather Service/Aviation Weather Center pro snazší interpretaci.

Obrázek 6: Kumulovaná blesková aktivita na Zemi za den 22.4.2021. Převzato z <http://wwlln.net/>. Barevná škála zobrazuje počet výbojů na km².



Obrázky 5 i 6 ukazují výraznou bleskovou aktivitu v oblasti kolem rovníku. To není nijak překvapivé, protože rozložení bleskové aktivity na Zemi je značně nerovnoměrné a zhruba 78 % všech blesků na Zemi se vyskytuje právě v oblasti kolem rovníku, a to mezi 30. stupni severní a jižní zeměpisné šířky (Christian a kol. 2003).

1.3.2 Práce využívající data WWLLN

Od roku 2003, kdy byla síť WWLLN spuštěna byla data získaná touto sítí použita v řadě výzkumů. Některé z nich s převahou těch zabývajících se účinností sítě jsou představeny níže.

V roce 2006 byly publikovány dvě studie, které posuzovaly účinnost sítě WWLLN. První z nich má název *Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study*. Tou dobou měla síť 25 stanic rozmístěných po

celém světě. Autoři v článku zkoumají účinnost sítě WWLLN porovnáním s komerční sítí fungující na Novém Zélandu. Z výsledků jejich práce vyplývá, že síť WWLLN je obecně přesnější u bleskových výbojů s vysokým zpětným proudem (Rodger, a kol. 2006).

Druhý článek byl vydán pod jménem *Performance Assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), Using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as Ground Truth*. Autoři v něm také posuzovali výkonnost sítě, tentokrát porovnáním s detekční sítí LASA (Los Alamos Sferic Array). Výsledkem jejich práce bylo zjištění, že účinnost sítě WWLLN stoupá. Průměrná prostorová přesnost lokalizace blesku byla 15 km a autoři také nastínili možnost využití dat WWLLN pro předpověď počasí (Jacobson a kol. 2006).

Dalším článkem je *A performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) via comparison with the Canadian Lightning Detection Network (CLDN)*. V této studii šlo také o hodnocení účinnosti sítě WWLLN, tentokrát porovnáním jejích dat s daty CLDN (Canadian Lightning Detection Network). Autoři v práci zmiňují, že jsou do sítě WWLLN postupem času přidávány další přijímací stanice, které postupně zvyšují účinnost celé sítě. Z výsledků lze vyčíst, že průměrná absolutní přesnost lokalizace blesku byla 7,24 km. Autoři mimo jiné také zjistili, že se účinnost sítě WWLLN zvyšuje s narůstajícím zpětným proudem (Abreu a kol. 2010).

Nejnovějším článkem je článek *Lightning in the Arctic*, kde autoři popisují, jak výrazně během poslední dekády stoupl počet blesků v oblasti Arktidy pomocí dat sítě WWLLN. Autoři v článku popisují, že ačkoli je počet blesků v různých částech světa poměrně stálý (v závislosti na ročním období), dramatickou změnu shledávají právě v oblasti Arktidy. Průměrný počet blesků zde vzrostl z přibližně 18 tisíc na více než 150 tisíc za rok. Při srovnání těchto čísel s tím, co senzory naměřily jinde ve světě, se ukázalo, že bleskové výboje v Arktidě představovaly v roce 2010 0,2 % všech výbojů na Zemi, zatímco v roce 2020 už to bylo 0,6 %. Autoři v článku na základě tohoto zjištění tvrdí, že jde o další důkaz změny klimatu (Holzworth a kol. 2021).

1.3.3 Práce využívající data WWLLN na území Evropy

Data ze sítě WWLLN byla použita i v řadě výzkumů, které řeší území Evropy. Na následujících řádcích jsou zmíněny některé z nich.

Článek *Ground-based climatology of lightning and transient luminous events above Europe* si bere za cíl vytvoření první klimatologie více než 8000 Přechodných světelných úkazů (TLE) pozorovaných v různých systémech detekce blesků. (Jen pro upřesnění LTE jsou nadoblačné blesky.) Výzkum zjistil, že TLE jsou nad územím Evropy v létě intenzivnější nad pevninou, zatímco na konci podzimu jsou intenzivnější nad pobřežními oblastmi a nad mořem. Autoři tvrdí, že výsledky mohou být použity pro srovnání s vesmírným pozorováním na Mezinárodní vesmírné stanici (Arnone a kol. 2019).

Druhý článek nese název *Signatures of large peak current lightning strokes during an unusually intense sprite-producing thunderstorm in southern England*. Autoři v něm zkoumali synoptickou situaci a strukturu bouře, která se vytvořila v noci z 26. na 27. května 2017 v jižní Anglii. V této studii jsou data ze sítě WWLLN použity k analýze celkové aktivity výbojů během této bouře. Vědci pomocí dat WWLLN také zkoumali vztah mezi špičkovým proudem výboje a vlastnostmi blesku. Podle autorů by tato studie mohla přispět k charakteristice drobných bouří v severní Evropě, a k vyhodnocování rizik pro lodní a leteckou dopravu souvisejících s těmito bouřemi (Pizzuti a kol. 2021).

Další problematice související s bleskovými výboji nad Evropou se věnuje článek *Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions*. Autoři v článku připomínají, že blesk je hlavní příčinou vzniku přirozených lesních požárů na Zemi a zkoumají meteorologické podmínky vzniku blesků, které způsobují tyto požáry na Pyrenejském poloostrově a v Řecku. Tým vědců používá data bleskových výbojů ze sítě WWLLN, ale i z dalších zdrojů např. z LIS (Lightning Imaging Sensor), což je senzor umístěný na palubě Mezinárodní vesmírné stanice. Výsledky naznačují, že blesky, které způsobují lesní požáry v Řecku a na Pyrenejském poloostrově se vyskytují v oblacích druhu Cb s vyšší teplotou a pomalejším vznikem srážek (Pérez-Invernón a kol. 2021).

2 Data, zájmové území a metody

V této kapitole jsou popsána použitá data ze sítě WWLLN i Typizace povětrnostních situací. Je zde také vymezeno zájmové území a popisují se zde metody použité k získání výsledků v praktické části práce.

2.1 Data WWLLN

Základní popis sítě WWLLN byl nastíněn v předchozím textu (kap. 1.3.). Data ze sítě WWLLN jsem získala přes vedoucí mé práce od prof. Holzwortha z Univerzity ve Washingtonu. Zakoupená data konkrétně zahrnují období 2017 – 2019 a pokrývají území celé Země.

Data jsou ve formátu číselných tabulek, kde každý zápis představuje jeden bouřkový výboj. O každém výboji se dá z dat vyčíst datum a čas v UTC s přesností na tisíce ms, kdy byl výboj naměřen. Dalším podstatným údajem pro mojí práci jsou zeměpisné souřadnice místa, kde byl výboj lokalizován. Dále můžeme v datech najít údaje o chybě časového uložení, o počtu stanic, které výboj lokalizovaly, a o energii výboje (J).

Získaná data byla zkoumána nejprve ze dvou hledisek. Prvním bylo časové rozložení dat, jejich měsíční sumy a denní chod, zkoumané pomocí základních statistických metod. Druhým bylo prostorové rozložení bleskových výbojů na základě poskytnutých map od prof. Holzwortha. Obě tato hlediska byla zkoumána pro území definované níže.

2.2 Zájmové území

V této práci jsem nepracovala s celým územím, které získaná data WWLLN pokrývají (tedy celý svět). Místo toho jsem se zaměřila na oblast ve střední Evropě. Zvolila jsem území mezi 8° – 22° východní zeměpisné délky a mezi 48° – 52° severní zeměpisné šířky

(obrázek 7). Jedná se tak o celé území Česka a Slovenska a o části území Maďarska, Rakouska, Německa, Polska a malé části Ukrajiny.

Obrázek 7: Zájmové území. Převzato z Global Multi-Resolution Topography Data Synthesis (GMRT).



Na *obrázku 7* jsou dobře rozpoznatelná některá pohoří, která se v zájmovém území nacházejí. Konkrétně jde o severovýchodní část Alp, pohraniční pohoří Česka (Šumavu, Krušné hory, Krkonoše a Jeseníky), celé Západní Karpaty, severní část Východních Karpat a také část Transylvánské vysočiny.

Podle Köppenovy klasifikace podnebí se většina území nachází v oblasti vlhkého kontinentálního podnebí s teplými léty. Najdeme zde ale také menší oblasti vlhkého kontinentálního podnebí s horkými léty (oblast Maďarské nížiny a jihu Slovenska) a oblasti subpolárního podnebí (Alpy a Karpaty) (Peel, Finlayson, McMahon 2007).

2.3 Typizace povětrnostních situací

Při vytváření typizací povětrnostních (synoptických) situací berou meteorologové zřetel nejen na okamžitý stav přízemního a výškového proudění vzduchu, ale i na polohu front, na

charakter tlakového pole a na vzduchové hmoty, protože všechny tyto parametry ovlivňují počasí (ČHMÚ online).

Typizací existuje celá řada. Asi nejznámější je typizace povětrnostních typů podle Hessa a Brezowského (Hess, Brezowsky 1952). V této práci je však použita typizace vypracovaná pro území Česka vzhledem k zájmovému území s centrem nad Českem (viz výše, *obrázek 7*). Jedná se o kalendář synoptických situací, který je vydáván Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). Pro území České republiky se pravidelně sestavuje kalendář synoptických typů od roku 1946. V letech 1946-1971 byl tento kalendář publikován v Katalogu povětrnostních situací pro území ČSSR. Kalendář pro další roky je až do současnosti každoročně publikován v časopise Meteorologické zprávy a od roku 2002 je i součástí webových stránek ČHMÚ. V letech 1946-1990 byl sestavován jednotný kalendář pro celé území tehdejšího Československa. Od roku 1991 je sestavován zvlášť pro území Česka a zvlášť pro území Slovenska (Brádka a kol. 1961; Křivancová, Vavruška 1997). Z webových stránek ČHMÚ (<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-povetrnostnich-situaci>) je možné zdarma získat data povětrnostních typů s časovým rozlišením jeden den. Tato data ukazují, jaká povětrnostní situace v daný den na území Česka převládala.

Na následujících řádcích je uveden seznam zkratk, jak je používá ČHMÚ a jak jsou použity v této práci:

- Wc - západní cyklonální situace
- Wcs - západní cyklonální situace s jižní dráhou
- Wa - západní anticyklonální situace
- Wal - západní anticyklonální situace letního typu
- NWc- severozápadní cyklonální situace
- NWa - severozápadní anticyklonální situace
- Nc - severní cyklonální situace
- NEc - severovýchodní cyklonální situace
- NEa - severovýchodní anticyklonální situace
- Ec - východní cyklonální situace

Ea - východní anticyklonální situace
SEc - jihovýchodní cyklonální situace
SEa - jihovýchodní anticyklonální situace
Sa - jižní anticyklonální situace
SWc1 - jihozápadní cyklonální situace
SWc2 - jihozápadní cyklonální situace
SWc3 - jihozápadní cyklonální situace
SWa - jihozápadní anticyklonální situace
B - brázda nízkého tlaku nad střední Evropou
Bp - brázda postupující přes střední Evropu
Vfz- vchod frontální zóny
C - cyklóna nad střední Evropou
Cv - cyklóna výšková
A - anticyklóna nad střední Evropou
Ap - putující anticyklóna (rozdělena na Ap1, Ap2, Ap3 a Ap4 podle směru dráhy pohybu anticyklóny)

2.4 Testování vztahu mezi daty WWLLN a povětrnostními typy

Mimo časové a prostorové rozložení dat WWLLN ve sledovaném území (viz výše) byly v této práci ověřovány dvě hypotézy (viz níže), které mají ukázat, zda existuje statisticky významný vztah mezi daty WWLLN a daty Typizace povětrnostních situací. V první řadě bylo nutné převést data WWLLN na denní údaje, aby je bylo možné porovnávat s daty povětrnostních typů. Vznikla tak databáze zahrnující téměř 1 102 000 dat během tří let, tj. za zkoumané období 2017 – 2019.

Na ověření námi zvolených dvou hypotéz byl použit oboustranný binomický test. Pomocí oboustranného binomického testu, můžeme otestovat, zda výskyt zkoumaného jevu odpovídá očekávané frekvenci. Binomický test vychází z pravděpodobnosti, že při n opakování binárního náhodného jevu s úspěšností p je pravděpodobnostní rozložení náhodné veličiny X značící počet úspěšných pokusů dáno následujícím vzorcem:

$$\Pr(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad \text{_____} (1)$$

Pravděpodobnosti, že X bude $\geq k$ nebo $\leq k$ jsou pak dány vzorci:

$$\Pr(X \geq k) = \sum_{X \geq k} \Pr(X = k) \quad \text{_____} (2)$$

A

$$\Pr(X \leq k) = \sum_{X \leq k} \Pr(X = k) \quad \text{_____} (3)$$

Nulovou hypotézu, že data pocházejí z náhodného procesu s pravděpodobností p při pozorovaném počtu úspěšných pokusů k z n, můžeme na hladině spolehlivosti α vyloučit v případě, že pravděpodobnost ve vzorci (2) vyjde menší než $\alpha/2$ (to ukazuje, že pravděpodobnost generujícího procesu je vyšší než p) nebo v případě, že pravděpodobnost ve vzorci (3) vyjde menší než $\alpha/2$ (to ukazuje, že pravděpodobnost generujícího procesu je nižší než p) (Wilks 2011).

Data povětrnostních (synoptických) situací byla rozčleněna podle typů a po spojení s daty ze sítě WWLLN vznikla tabulka obsahující datum, počet výbojů naměřených v daný den a synoptický typ, který byl danému dni přidělen ČHMÚ. Pro každý synoptický typ se pomocí oboustranného binomického testu zkoumaly následující dvě hypotézy.

V prvním případě byla ověřována hypotéza, že pravděpodobnost, že se vyskytne blesková aktivita v daném dni při daném povětrnostním typu, je jiná, než klimatologická pravděpodobnost výskytu bleskové aktivity (min. 1 výboj za den) ve sledovaném období. V druhém případě šlo o hypotézu, že pravděpodobnost, že se vyskytne alespoň 100 výbojů v daném dni při daném povětrnostním typu je jiná, než klimatologická pravděpodobnost výskytu alespoň 100 výbojů v jeden den ve sledovaném období.

Obě hypotézy byly testovány na hladině spolehlivosti $\alpha = 5 \%$, resp. $\alpha = 1 \%$ a klimatologická pravděpodobnost byla stanovena jako poměr počtu dní, kdy byl zaznamenán alespoň jeden výboj (v případě první hypotézy) nebo alespoň 100 výbojů (v případě druhé hypotézy), ku celkovému počtu dní ve sledovaném období.

3 Výsledky a diskuze

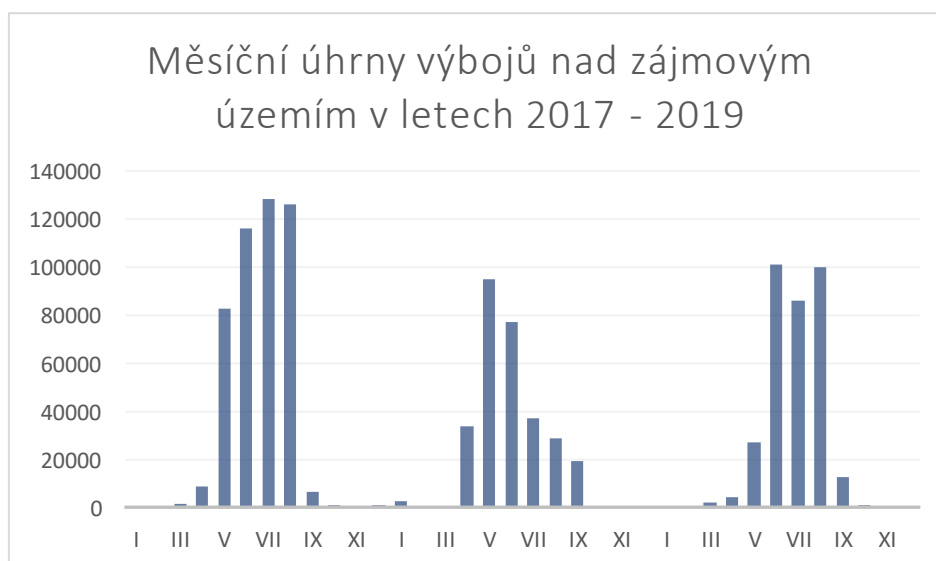
V následující kapitole jsou prezentovány výsledky výzkumu, které byly vytvořeny na základě metod popsanych výše. Nejprve je představeno časové a prostorové rozložení zkoumaných dat bleskové aktivity a následně jsou popsány výsledky testování vztahu mezi těmito daty a povětrnostními typy.

3.1 Časové a prostorové rozložení dat WWLLN

3.1.1 Časové rozložení dat

Jak bylo zmíněno výše, jednou ze zkoumaných vlastností dat bylo jejich rozložení v čase. Pro každý měsíc z námi sledovaných let byly sečteny jednotlivé výboje. Výsledek je vidět na *grafu 1*, kde jsou znázorněny měsíční úhrny výbojů nad zájmovým územím. Jsou zde dobře patrná letní maxima, která dosahují až ke 100 000 výbojů za měsíc. Rovněž jsou dobře patrná i zimní minima. Na *grafu 1* si lze také povšimnout, že v roce 2017 byla letní maxima bleskové aktivity o něco větší než v nadcházejících dvou letech. V roce 2017 spadalo letní maximum na měsíc červenec, zatímco v roce 2018 bylo maximum naměřených výbojů v květnu a v roce 2019 v červnu.

Graf 1: Měsíční sumy bleskových výbojů. Zdroj dat: WWLLN. Na ose x jsou znázorněny měsíce. Na ose y počet detekovaných výbojů.



Další zkoumanou charakteristikou byl denní chod bleskové aktivity. Nejprve byl pro každou denní hodinu zjištěn celkový počet detekovaných bleskových výbojů a poté byla vypočítána průměrná hodnota počtu zaznamenaných výbojů za každou hodinu. Z takto získaných dat byl vytvořen graf denního chodu bleskové aktivity (*graf 2*). Každý sloupec reprezentuje průměrný počet detekovaných bleskových výbojů v časovém úseku (60 minut od každé celé hodiny v UTC).

Maxima detekované bleskové aktivity se dle *grafu 2* vyskytují mezi 14. a 17. hodinou UTC. Z *grafu 2* je dále dobře patrný odpolední nárůst bleskové aktivity oproti nočním hodinám, kdy se naopak vyskytuje minimum výbojů. Zjištěný denní chod je v souladu s průměrným denním chodem bleskových výbojů v Česku, popřípadě v Evropě (Enno, Sugier 2018).

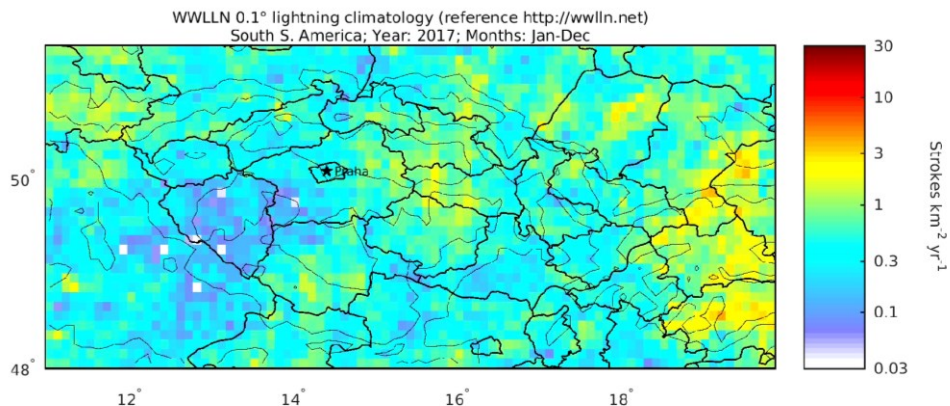
Graf 2: Denní chod bleskové aktivity. Zdroj dat: WWLLN. Na ose x jsou znázorněny denní hodiny (číslo na ose udává vždy čas v UTC začínajícího hodinového intervalu) a na ose y průměrný počet detekovaných výbojů.



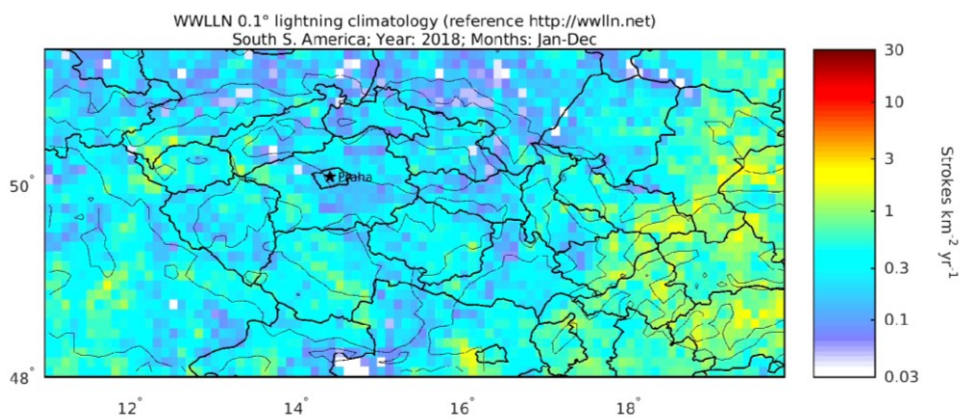
3.1.2 Prostorové rozložení dat

Jednou z dalších vlastností dat WWLLN je jejich prostorové rozložení. Na datech (*obrázky 8 – 10*) lze sledovat dva trendy v prostorovém rozložení výbojů. Prvním z nich je zvýšený výskyt bleskové aktivity v horských oblastech zkoumaného území. Druhým trendem je celkově postupný narůstající výskyt bleskových výbojů ze severozápadu směrem na jihovýchod. Toto rozložení bleskové aktivity odpovídá např. i rozložení bleskových výbojů, které zkoumali autoři Enno a Sugier (2018). Na *obrázcích 8 – 10* je zmíněné rozložení dobře patrné. Také je zde vidět rozdíl v počtu výbojů během zkoumaných let, který byl patrný i na *grafu 1*. Tedy, že rok 2017 měl ze sledovaného období největší počty výbojů, a to hlavně ve východní polovině území.

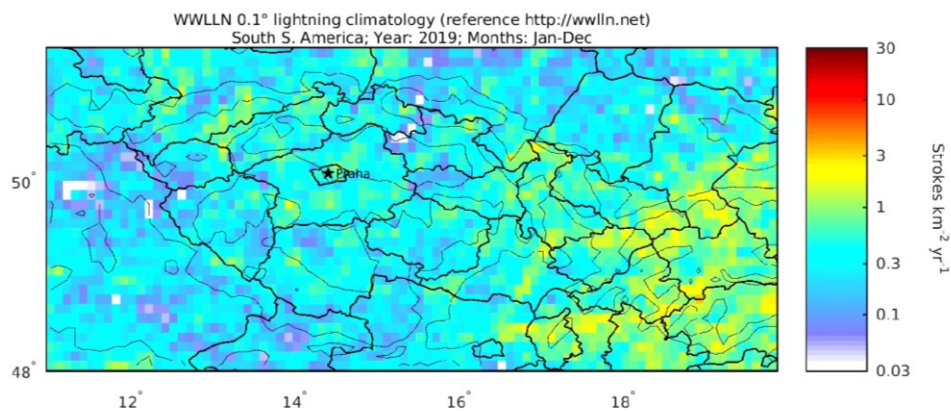
Obrázek 8: Hustota bleskové aktivity (počet výbojů na km² za rok) nad oblastí Česka v roce 2017.
Poskytnuto prof. Holzworthem z WWLLN (online).



Obrázek 9: Hustota bleskové aktivity (počet výbojů na km² za rok) nad oblastí Česka v roce 2018.
Poskytnuto prof. Holzworthem z WWLLN (online).



Obrázek 10: Hustota bleskové aktivity (počet výbojů na km² za rok) nad oblastí Česka v roce 2019.
Poskytnuto prof. Holzworthem z WWLLN (online).



3.2 Vztah mezi povětrnostními typy a výskytem min. 1 výboje

V tabulce 1 jsou zobrazeny výsledky binomického testu pro testovanou hypotézu, zda pro daný povětrnostní typ je pravděpodobnost, že se vyskytne alespoň 1 výboj za den jiná, než je klimatologická pravděpodobnost, že se 1 výboj za den vyskytne bez ohledu na povětrnostní typ. Klimatologická pravděpodobnost byla v tomto případě určena jako poměr počtu dní, kdy byl zaznamenán alespoň jeden výboj ku celkovému počtu dní ve sledovaném období, tzn. $834/1095 = 76,16 \%$.

V tabulce 1 jsou zeleně znázorněny ty povětrnostní typy, u nichž vyšla menší pravděpodobnost výskytu a hnědě ty typy, které vykazují větší pravděpodobnost výskytu, než je pravděpodobnost klimatologická. Sytost barvy pak značí hladinu spolehlivosti. Nejsytější odstín značí statistickou významnost výsledku na hladině spolehlivosti 1 %, střední sytost statisticky významný výsledek na hladině spolehlivosti 5 % a nejméně sytý odstín pak značí, že výsledek není statisticky významný na hladině spolehlivosti 5 %.

Z výsledků je patrné, že u synoptických typů B, NWa a Wal je pravděpodobnost výskytu výboje statisticky významně vyšší než klimatologická pravděpodobnost, a to na hladině spolehlivosti 1 %. U NWa to souvisí pravděpodobně s instabilitou podmiňující výskyt blesků, u B s přechodem atmosférických front či silnými rozhraními a u Wal pravděpodobně s lokálními bouřkami tzv. z tepla. U typu Cv je pravděpodobnost rovněž statisticky významně vyšší, a to na hladině spolehlivosti 5 %. Tento typ může usnadňovat konvekci a tím i vznik výbojů.

Tabulka 1: Pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje za den během daného synoptického typu v porovnání s pravděpodobností klimatologickou (p klimatol.). První sloupec udává synoptický typ (zkratky synoptických typů jsou uvedeny v kapitole 2.3.), druhý sloupec n udává opakování binárního náhodného jevu, třetí sloupec k počet úspěšných případů, čtvrtý sloupec kumulativní pravděpodobnost (kumul. p) menší nebo rovno než p klimatol, pátý sloupec kumul. p větší nebo rovno než p klimatol a poslední sloupec ukazuje pravděpodobnost empirickou ($p \text{ emp} = k/n$).

Povětrnostní typ	n	k	kumul. p <=	kumul. p >=	p emp
A	51	37	0,3212	0,7828	0,7254
Ap1	36	26	0,3487	0,7780	0,7222
Ap2	49	37	0,5121	0,6186	0,7551
Ap3	16	7	0,0053	0,9988	0,4375
Ap4	2	0	0,0568	1,0000	0,0000
B	120	104	0,9985	0,0031	0,8666
Bp	104	83	0,8381	0,2271	0,7980
C	11	11	1,0000	0,0500	1,0000
Cv	27	24	0,9718	0,0856	0,8888
Ea	54	34	0,0205	0,9901	0,6296
Ec	13	7	0,0655	0,9812	0,5384
Nc	26	22	0,8983	0,2224	0,8461
NEa	27	22	0,8063	0,3491	0,8148
NEC	55	47	0,9681	0,0669	0,8545
NWa	33	32	0,9998	0,0014	0,9696
NWc	76	56	0,3472	0,7439	0,7368
Sa	38	19	0,0004	0,9998	0,5000
SEa	26	17	0,1449	0,9307	0,6538
SEc	39	31	0,7439	0,3944	0,7948
SWa	33	20	0,0339	0,9858	0,6060
SWc1	33	24	0,3851	0,7539	0,7273
SWc2	25	21	0,8797	0,2544	0,8400
SWc3	5	3	0,3426	0,9083	0,6000
Vfz	16	10	0,1601	0,9363	0,6250
Wa	22	7	0,0001	0,9999	0,3181
Wal	49	47	0,9999	0,0002	0,9591
Wc	76	57	0,4495	0,6527	0,7500
Wcs	34	29	0,9337	0,1459	0,8529

p klimatol. = 834/1095 = 76,16 %

	menší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 1\%$
	menší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 5\%$
	menší pravděpodobnost výskytu, statisticky nevýznamné na $\alpha = 5\%$
	větší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 1\%$
	větší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 5\%$
	větší pravděpodobnost výskytu, statisticky nevýznamné na $\alpha = 5\%$

U typu C nevyšla větší pravděpodobnost výskytu výboje než pravděpodobnost klimatologická statisticky významně (na hladině spolehlivosti 5 %), ačkoli šla očekávat, vzhledem k tomu, že každý den, kdy se tento typ v datech vyskytl, byl pozorován alespoň

jeden výboj (*tabulka 2*). Souvisí to s tím, že četnost typu C je v datech nízká (vyskytl se pouze 11x ve zkoumaném období), sledované období je relativně krátké a klimatologický pravděpodobnost vysoká (76 %). To lze vyřešit například tím, že se zvýší práh počtu bleskových výbojů, který logicky sníží klimatologickou pravděpodobnost, takže relativně nižší četnost typu C už nebude představovat problém.

Tabulka 2: Pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje za den pro povětrnostní typ C. První sloupec n udává počet náhodného jevu, druhý sloupec kumulativní pravděpodobnost (kumul. p) menší nebo rovno než p klimatol, třetí sloupec kumul. p větší nebo rovno než p klimatol a poslední sloupec ukazuje pravděpodobnost empirickou ($p_{emp} = k/n$).

n	kumul.p <=	kumul. p >=	p emp
0	0,0000	1,0000	0,0000
1	0,0001	0,9999	0,0909
2	0,0001	0,9999	0,1818
3	0,0008	0,9999	0,2727
4	0,0056	0,9991	0,3636
5	0,0274	0,9943	0,4545
6	0,0968	0,9725	0,5454
7	0,2551	0,9031	0,6363
8	0,5082	0,7448	0,7272
9	0,7777	0,4917	0,8181
10	0,9499	0,2222	0,9090
11	1	0,0500	1

p. klimatol = 76,16 %

Oproti typům s vyšší pravděpodobností výskytu blesků typy Ap3 a Ea vykazují v *tabulce 1* statisticky významně nižší pravděpodobnost než je pravděpodobnost klimatologická na hladině spolehlivosti 5 % a Sa a Wa rovněž statisticky významně nižší pravděpodobnost, a to dokonce na hladině spolehlivosti 1 %. U anticyklonálních typů jsou výsledky v souladu s očekáváním. Anticyklonální typy jsou, zjednodušeně řečeno, zejména v letní polovině roku charakterizované nízkým až žádným pokrytím oblohy oblačností beze

srážek, slabým větrem nebo bezvětřím a velkou denní amplitudou teploty vzduchu (ČMeS online).

3.3 Vztah mezi povětrnostními typy a výskytem min. 100 výbojů

V *tabulce 3* jsou zobrazeny výsledky binomického testu pro testovanou hypotézu, zda je pro daný povětrnostní typ pravděpodobnost, že se vyskytne alespoň sto výbojů za den jiná, než je klimatologická pravděpodobnost, že se sto výbojů za den vyskytne bez ohledu na povětrnostní typ. Klimatologická pravděpodobnost byla určena jako poměr počtu dní, kdy bylo zaznamenáno alespoň sto výbojů ku celkovému počtu dní ve sledovaném období ($380/1095 = 34,7\%$). *Tabulka 3* je barevně upravena stejně, jak bylo popsáno u *tabulky 1*, tedy barva rozlišuje větší či menší pravděpodobnost než je pravděpodobnost klimatologická a sytost rozlišuje hladinu spolehlivosti výsledku.

Z výsledků lze vyčíst, že pro synoptické typy B, Bp, C, Cv a Wal je pravděpodobnost výskytu alespoň sta výbojů statisticky významně vyšší než klimatologická pravděpodobnost, a to na hladině spolehlivosti 1 %. U typů B a Bp souvisí výsledky stejně jako u první hypotézy, pravděpodobně s možným přechodem front či silným rozhraním. U typů C a Cv to může být způsobeno přízemními frontálními poruchami a s přílivem teplého vzduchu od jihu (ČHMÚ online). U typu Wal bude pravděpodobnou příčinou, stejně jako v prvním případě, výskyt bouřek z tepla. Lze si tedy povšimnout, že zvýšením prahu z jednoho na sto výbojů za den už výsledek pro typ C vyšel dle předpokladu statisticky významný – v tomto případě bylo při 11 dnech s typem C pozorováno v deseti dnech 100 a více výbojů, přičemž klimatologická pravděpodobnost byla, jak je uvedeno výše, 35 % oproti předchozím 76 %. Z podobného důvodu zřejmě vyšly statisticky významné i další zmíněné synoptické typy.

Tabulka 3: Pravděpodobnost výskytu alespoň sta výbojů za den během daného synoptického typu v porovnání s pravděpodobností klimatologickou (p klimatol.). První sloupec udává synoptický typ (zkratky synoptických typů jsou uvedeny v kapitole 2.3.), druhý sloupec n udává opakování binárního náhodného jevu, třetí sloupec k počet úspěšných případů, čtvrtý sloupec kumulativní pravděpodobnost (kumul. p) menší nebo rovno než p klimatol, pátý sloupec kumul. p větší nebo rovno než p klimatol a poslední sloupec ukazuje pravděpodobnost empirickou (p emp = k/n).

Povětrnostní typ	n	k	kumul. p <=	kumul. p >=	p emp
A	51	3	0,0001	0,9999	0,0588
Ap1	36	10	0,0000	1,0000	0,2777
Ap2	49	10	0,0221	0,9904	0,2040
Ap3	16	3	0,0103	0,9989	0,0625
Ap4	2	0	0,4263	1,0000	0,0000
B	120	66	0,9999	0,0000	0,5500
Bp	104	50	0,9981	0,0033	0,4807
C	11	10	0,9999	0,0002	0,9090
Cv	27	16	0,9974	0,0078	0,5925
Ea	56	16	0,2640	0,8222	0,2962
Ec	13	0	0,0039	1,0000	0,0000
Nc	26	9	0,5856	0,5769	0,3461
NEa	27	9	0,5292	0,6300	0,3333
NEC	55	25	0,9633	0,0645	0,4545
NWa	33	14	0,8668	0,2246	0,4242
NWc	76	10	0,0001	0,9999	0,1315
Sa	38	5	0,0026	0,9993	0,1315
SEa	26	8	0,4230	0,7300	0,3076
SEc	39	14	0,6329	0,4976	0,3589
SWa	33	8	0,1392	0,9295	0,2424
SWc1	33	11	0,5145	0,6295	0,3333
SWc2	25	13	0,9763	0,0566	0,5200
SWc3	5	0	0,1187	1,0000	0,0000
Vfz	16	2	0,0474	0,9896	0,1250
Wa	22	0	0,0000	1,0000	0,0000
Wal	49	33	0,9999	0,0001	0,6530
Wc	76	22	0,1756	0,8810	0,2894
Wcs	34	14	0,8350	0,2664	0,4117

p klimatol. = 380/1095 = 34,7 %

	menší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 1 \%$
	menší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 5 \%$
	menší pravděpodobnost výskytu, statisticky nevýznamné na $\alpha = 5 \%$
	větší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 1 \%$
	větší pravděpodobnost výskytu než p klimatol. na $\alpha = 5 \%$
	větší pravděpodobnost výskytu, statisticky nevýznamné na $\alpha = 5 \%$

U synoptických typů A, Ap1, Ec, NWc, Sa a Wa je pravděpodobnost výskytu alespoň 100 výbojů naopak statisticky významně nižší než je pravděpodobnost klimatologická, a to u všech vyjmenovaných typů na hladině spolehlivosti 1 %. U typů Ap2, Ap3 a Vfz je pravděpodobnost také statisticky významně nižší, ale na hladině spolehlivosti 5 %. U ostatních typů jsou pak výsledky statisticky nevýznamné na hladině spolehlivosti 5 %. U jmenovaných anticyklonálních typů jsou výsledky opět v souladu s očekáváním, zatímco výsledek pro typy Ec a NWc může být překvapivý. Pravděpodobným vysvětlením by mohlo být, že tyto typy přináší srážky spíše vytrvalejšího charakteru než konvektivní přívalové.

4 Shrnutí a závěr

Blesková aktivita představuje velice nebezpečný přírodní jev, který ohrožuje nejen majetek ale i zdraví a lidský život a proto je potřeba této problematice věnovat náležitou pozornost. Tato práce uvádí nejen současné poznatky o oblačné elektřině a bleskové aktivitě, ale představuje také možnosti detekce bleskových výbojů. V práci je představena celosvětová síť WWLLN a vědecké studie, které s daty z této sítě pracují.

V praktické části jsou testovány hypotézy, zkoumající souvislost bleskových výbojů ze sítě WWLLN s daty typizace povětrnostních situací. Při zkoumání denního a ročního chodu bleskové aktivity byla zjištěna, v souladu s očekáváním a dosavadními poznatky, maxima v odpoledních hodinách a letních měsících. Výsledky testování hypotéz že se během daného synoptického typu vyskytne alespoň jeden výboj, či sto výbojů ukázaly následující:

- Při výskytu povětrnostních typů B, NWa a Wal je pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje větší a při výskytu povětrnostních typů Wa a Sa naopak menší než klimatologická pravděpodobnost, a to na hladině spolehlivosti 1 %.
- Pokud jde o výskyt alespoň sta výbojů během jednoho dne, je větší pravděpodobnost, než klimatologická u typů B, Bp, C, Cv a Wal a naopak menší u typů A, Ap1, Ec, NWc, Sa a Wa na hladině spolehlivosti 1 %.

Hlavní přínos práce vidím v představení sítě WWLLN. Její potenciál využití ve výzkumu se jeví přínosný, jak ukazují např. výsledky časového rozložení dat WWLLN v této práci, které jsou v souladu s pracemi používajícími data z jiných sítí. Prokázané vazby na synoptické typy v této práci by bylo vhodné v budoucnu rozšířit o testování vztahu dat WWLLN se synoptickou situací definovanou např. daty z reanalýz, které by umožňovaly jít i do subdenního měřítka.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

- ABREU, D. a kol. (2010): A performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) via comparison with the Canadian Lightning Detection Network (CLDN), *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1143–1153.
- ARNONE, E. a kol. (2019): Ground-based climatology of lightning and transient luminous events above Europe. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
- BEDNÁŘ, J. a kol. (1993): Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Ministerstvo životního prostředí ČR, Academia. 594 s.
- BEDNÁŘ, J., POPEK, M. (2012): Přejídné světelné úkazy související s bouřkovou činností. *Meteorologické Zprávy*, 65, 168-173.
- BRÁDKA, J. a kol. (1961): Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích. Praha, HMÚ. 32 s.
- CHRISTIAN, J. a kol. (2003): Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108.D1: ACL 4-1-ACL 4-15.
- DOTZEK, N. a kol. (2005): Lightning activity related to satellite and radar observations of a mesoscale convective system over Texas on 7–8 April 2002. *Atmospheric research*, 76.1-4: 127-166.
- ENNO, S.E., SUGIER J. (2020): Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data. *Atmospheric Research*, 235: 104769.
- FINKE, U.; KREYER, O. (2002): Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations. Report. Institute für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover. Germany.

- HELSDON, H., WU, G., FARLEY, R. D. (1992): An intracloud lightning parameterization scheme for a storm electrification model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97.D5: 5865-5884.
- HOLZWORD, H. a kol. (2021): Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, e2020GL091366.
- JACOBSON, A. R. a kol. (2006): Performance assessment of the world wide lightning location network (WWLLN), using the Los Alamos spheric array (LASA) as ground truth. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(8), 1082-1092.
- KOPÁČEK, J.; BEDNÁŘ, J.; ŽÁK, M. (2020): *Jak vzniká počasí*. Charles University in Prague, Karolinum Press.
- KŘIVANCOVÁ, S., VAVRUŠKA, F. (1997): *Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961-1990*. Český hydrometeorologický ústav.
- PEEL, C.; FINLAYSON, L.; MCMAHON, A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11.5: 1633-1644.
- PÉREZ-INVERNÓN, F. a kol. (2021): Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1-43.
- PIZZUTI, A. a kol. (2021): Signatures of large peak current lightning strokes during an unusually intense sprite-producing thunderstorm in southern England. *Atmospheric Research*, 249: 105357.
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A. (2003): *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-58327-6.
- RODGER, C. a kol. (2006): Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study, *Ann. Geophys.*, 24, 3197–3214.

- ŘEZÁČOVÁ, D. a kol. (2007): Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia. 576 s.
- SCHULZ, W.; LOJOU, J. Y. (2006): Total lightning detection network in central europe: The FLASH project. In: *9th International Lightning Detection Conference*. p. 24-25.
- STOLZENBURG, M. a kol. (1998): Electrical structure in thunderstorm convective regions: 1. Mesoscale convective systems. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103.D12: 14059-14078.
- STOLZENBURG, M.; MARSHALL, C. (2008): Charge structure and dynamics in thunderstorms. *Space Science Reviews*, 137.1-4: 355-372.
- UHLÍŘOVÁ, Iva. (2020): Predikce bleskové aktivity numerickým modelem předpovědi počasí. Praha. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce Popová, Jana.
- VOLARIĆ, B. (2010): Crmljavinski oblak cumulonimbus (cb) - Električni generator. *Hrvatski meteorološki časopis*, 44.44/45: 47-61.
- WILKS, S. (2011): *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press.

Internetové zdroje

- ČHMÚ (online). Český hydrometeorologický ústav: Typizace povětrnostních situací pro území České republiky. (cit. 14.4.2021). Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/typizace-povetrnostnich-situaci>
- ČMeS (online). Česká meteorologická společnost: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). (cit 26.04.2021). Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA: Electrical charge distribution in a thunderstorm. (cit. 6.4.2021) Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification>
- GMTS (online). Global Multi-Resolution Topography Data Synthesis. (cit. 23.4.2021) Dostupné z: <https://www.gmrt.org/index.php>

Seznam obrázků

- 1 - Schématické znázornění struktury náboje v Cb dle teoretického tripólového modelu.
- 2 - Centra elektrického náboje v Cb.
- 3 - Schématické zobrazení zdrojů RF záření při CG a IC blesku.
- 4 - Porovnání RF záření při CG blesku a IC blesku.
- 5 - Blesková aktivita na Zemi 21.4. 2021v 13:00 UTC.
- 6 - Kumulovaná blesková aktivita na Zemi za den 22.4.2021.
- 7 - Zájmové území.
- 8 - Rozložení bleskové aktivity nad oblastí Česka v roce 2017.
- 9 - Rozložení bleskové aktivity nad oblastí Česka v roce 2018.
- 10 - Rozložení bleskové aktivity nad oblastí Česka v roce 2019.

Seznam grafů

- 1 - Měsíční sumy bleskových výbojů.
- 2 - Denní chod bleskové aktivity.

Seznam tabulek

- 1 - Pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje za den během daného synoptického typu v porovnání s pravděpodobností klimatologickou.
- 3 - Pravděpodobnost výskytu alespoň jednoho výboje za den pro povětrnostní typ C.
- 2 - Pravděpodobnost výskytu alespoň sta výbojů za den během daného synoptického typu v porovnání s pravděpodobností klimatologickou.