



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VLIV BOUŘKOVÉ ELEKTŘINY NA LETECKOU DOPRAVU

THE IMPACT OF STORM ELECTRICITY ON AIR TRANSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ľuboř Fiala

VEDOUĆÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. Karel Krřka, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Luboš Fiala**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Profesionální pilot
Vedoucí práce: **Karel Krška**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv bouřkové elektřiny na leteckou dopravu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bouřková elektřina jako problém v leteckém provozu. Její vznik a rozložení v atmosféře. Vývoj a struktura bouřkové oblačnosti. Technické prostředky lokalizace a identifikace nebezpečných konvektivních jevů – palubní a pozemní meteorologické radiolokátory. Omezení letištního a letového provozu za bouřkových situací. Účinky zásahu letadel bleskem za letu a bezpečnostní rizika.

Cíle bakalářské práce:

- sestavit přehled o bouřkách jako komplexu nebezpečných meteorologických jevů s ohledem na leteckou činnost.
- analyzovat postupy práce na letištích a posádek na letových tratích za bouřkových situací.
- zhodnotit využitelnost předpovědí a výstrah letecké meteorologické služby a pokynů řízení letového provozu v předletové přípravě a za letu k dosažení bezpečnosti a splnění úkolu při výskytu bouřek.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, P.: Letecká meteorologie. 2. vydání. Cheb: Svět křídel, 2010.

KRÁČMAR, J., KRŠKA, K., SOBOTA, J., SVATOŠ, V.: Meteorologie (050 00). Učební texty dle předpisu JAR-FCL 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.

ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M.: Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalárska práca je zameraná na objasnenie problematiky búrkovej elektriny ako sprievodného javu kumulonimbu. Venuje sa vývoju, typom, štruktúre a štádiám búrkovej oblačnosti, ako aj vzniku elektrického výboja a zriedkavých elektrometeorov. Ďalej sa zaoberá spôsobmi predpovedí a lokalizácie bleskov a ich vplyvmi na leteckú dopravu a stanovenými postupmi počas letu v búrkach.

Kľúčové slová:

búrka, búrková elektrina, kumulonimbus, predpoveď búrok, letecká doprava

Abstract

The bachelor thesis aims to clarify the issue of storm electricity as the side effect of cumulonimbus. It describes formation, types, structure, and phases of storm clouds, as well as formation of electric discharge and rare electrometeors. Furthermore, it is focused on the ways of forecast and lightning localisation and their effects on air transport, along with given regulations during flight in storms.

Key words:

storm, storm electricity, cumulonimbus, storm forecast, air transport

Bibliografická citácia

FIALA, L. *Vliv bouřkové elektřiny na leteckou dopravu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 str. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Karel Krška, CSc.

Čestné prehlásenie

Týmto prehlasujem, že bakalársku prácu na tému *Vliv bouřkové elektřiny na leteckou dopravu* som vypracoval samostatne, s využitím odbornej literatúry uvedenej v zozname použitých zdrojov a podľa konzultácií s vedúcim práce.

.....
Dátum

.....
Luboš Fiala

Pod'akovanie

Úprimne ďakujem všetkým, ktorí sa mi pomáhali s tvorbou mojej bakalárskej práce, a to najmä vedúcemu práce RNDr. Karlovi Krškovi, CSc., za cenné rady, ochotu a čas, ktorý mi venoval.

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 11 |
| 1 Vývoj a štruktúra búrkovej oblačnosti | 12 |
| 1.1 Vývoj búrkového oblaku a bleskového výboja | 12 |
| 1.1.1 Štádia rozvoja a zániku konvektívnej oblačnosti | 14 |
| 1.1.2 Vznik elektrického náboja | 15 |
| 1.2 Štruktúra a rozdelenie búrok | 18 |
| 1.2.1 Rozdelenie búrok podľa usporiadania buniek | 18 |
| 1.2.2 Regionálne a časové rozdelenie búrok | 21 |
| 1.2.3 Rozdelenie búrok podľa miesta vzniku..... | 21 |
| 1.3 Sprievodné javy búrkovej činnosti | 22 |
| 1.4 Zvláštnosti elektrometeorov | 26 |
| 2 Predpoveď a technické prostriedky zisťovania búrok | 29 |
| 2.1 Predpoveď búrok | 29 |
| 2.2 Detekcia a lokalizácia bleskov | 30 |
| 2.3 Letecké pozemné radary | 33 |
| 2.4 Palubné letecké radary | 35 |
| 2.5 Radarové ciele | 37 |
| 3 Vplyvy búrkovej činnosti na leteckú dopravu | 38 |
| 3.1 Pravdepodobnosť a následky úderu blesku do lietadla | 38 |
| 3.2 Pravidlá pre lety v oblasti búrkovej činnosti | 40 |
| 3.3 Ochranné prvky lietadiel proti úderu blesku. | 41 |
| Záver..... | 43 |
| Zoznam použitých zdrojov | 44 |
| Zoznam použitých skratiek | 46 |
| Zoznam použitých obrázkov, tabuliek a grafov | 48 |

Úvod

Ľudstvo bolo na počasí závislé už od nepamäti. V minulosti to bolo najmä poľnohospodárstvo, ktoré je ešte aj dnes priamo ovplyvnené atmosférickými podmienkami a závisí na nich najmä množstvo a kvalita úrody. Človek sa až do dnešnej vyspelej doby musí prispôbovať meteorologickým podmienkam, a to nie len v poľnohospodárstve, ale aj v iných odvetviach, ku ktorým neodmysliteľne patrí aj doprava. Táto bakalárska práca sa zameriava na búrkovú elektrinu, ktorá ovplyvňuje letectvo. Tento spôsob dopravy je v rapidnom rozmachu, a preto rýchlo stúpajú požiadavky na podrobnú znalosť procesov počasia spolu so snahou potláčať jeho vplyvy až do limitných hodnôt. Poznatky z tejto práce by mali slúžiť najmä pilotom, ale aj nezávislým záujemcom, ktorí sa chcú dozvedieť viac o procesoch na našej planéte.

Elektrina v atmosfére sa rozdeľuje na dva druhy. Prvým je elektrina pokojného ovzdušia. Plynný obal Zeme je vodičom, pretože obsahuje kladné a záporné ióny, ktoré vznikajú kozmickým žiarením a rádioaktivitou. Vodivosť vzduchu rastie exponenciálne s výškou, pričom hladina približne v 50 kilometroch sa považuje za dobrý vodič. Elektrina v tejto podobe nepredstavuje žiadne riziká pre leteckú prevádzku.

Druhým druhom atmosférickej elektriny je búrková elektrina, ktorá vzniká elektrickou indukciou v kopovitých oblakoch kumulonimboch, ktoré budú hlavnou témou práce. Búrková činnosť ako komplexný meteorologický jav ohrozuje letectvo z množstva ďalších dôvodov, ako sú výstupné a zostupné prúdy vzduchu, turbulencie, krúpy atď.

Všetky viditeľné aj počuteľné meteorologické prejavy vyvolané atmosférickou elektrinou sa nazývajú elektrometeory. Patrí sem v prvom rade blesk, ale aj zriedkavejšie úkazy ako guľový blesk, nadoblačné blesky, takzvaní Elfovia, Eliášov oheň, polárna žiara a nakoniec prízraky. Pre niektoré z nich existujú len teoretické dohady príčin ich vzniku.

Táto práca pojednáva aj o spôsoboch a prostriedkoch detekcie a predpovedi búrkovej činnosti. K zabezpečeniu plynulosti, efektivity, a čo je najdôležitejšie, bezpečnosti letovej prevádzky je nutné sa vyhýbať oblastiam s takouto činnosťou a klásť čoraz väčší dôraz na presnosť lokalizačných zariadení, aby sa dalo lietať za takmer každého počasia.

Podstatná časť tejto štúdie je analýza účinkov búrok na leteckú dopravu, kde sa zahŕňajú obmedzenia pre lietadlá, spôsoby oblietavania nebezpečných oblastí týkajúcich sa počasia a dôsledky úderu bleskom do draku lietadla.

1 Vývoj a štruktúra búrčkovej oblačnosti

Kumulonimbus, teda búrkový oblak, nadobúda pre leteckú dopravu veľký význam z dôvodu bezpečnosti. Nie len búrky ním sprevádzané spôsobujú problémy lietadlám. Prvá kapitola popisuje jeho vznik, vývoj, štruktúru a s ním spojené javy.

1.1 Vývoj búrkového oblaku a bleskového výboja

Búrková oblačnosť patrí do skupiny oblakov konvektívneho vývoja. Vznikajú núteným stúpaním teplého vlhkého vzduchu počas ohrievania povrchu zeme, hlavne pôsobením slnečného žiarenia. Oblaky sa vyvíjajú vertikálne a najčastejšie sa tak deje nad pevninou cez deň. Rozlišujeme dva druhy konvektívnych oblakov s vertikálnym vývojom, a to kumululus (Cu) a kumulonimbus (Cb).

Kumululus, po slovensky kopa, je podľa medzinárodnej morfolologickej klasifikácie oblakov charakterizovaný ako *kopovitý oblak značného vertikálneho rozsahu so silne vyvinutými výbežkami; pri pohľade z boku máva podobu karfiolu. Termín navrhol francúzsky meteorológ C. Maze na medzinárodnom meteorologickom kongrese v Paríži v roku 1889.^[1] Spolu s ním vznikajú zrážky iba ojedinele. Kumuly sa tvoria prevažne nad homogénnym zemským povrchom a sú sprevádzané pekným počasím. V tejto skupine oblakov nevzniká búrková činnosť.*

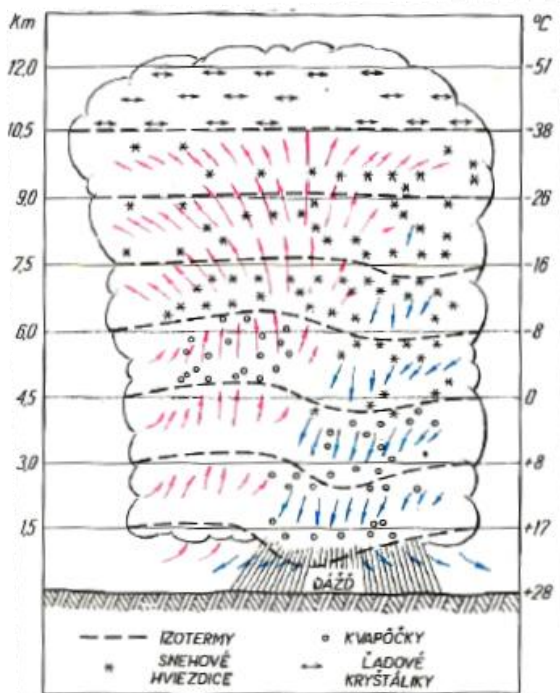


Obr. 1.1 Kumulus. [1]

Kumulonimbus, po slovensky búrková alebo dažďová kopa, je charakterizovaný ako mohutný a hustý veľkého vertikálneho rozsahu v podobe hôr alebo obrovských veží. Aspoň časť jeho vrcholu je obvykle hladká, vláknitá alebo rebrovitá a takmer vždy sploštená; táto časť sa často rozširuje do podoby nákovy alebo širokého chocholu. Termín kumulonimbus bol zavedený nemeckým meteorológom P. Weilbachom v rokoch 1879 až 1880.^[1] Pod tmavou základňou sa často nachádzajú nízke roztrhané oblaky. Z každého kumulonimbu však nemusia vznikáť búrky. Vo vertikálnom smere dorastá tento oblak vždy až do niekoľko kilometrov, v určitých prípadoch dosahuje do tropopauzy, niekedy prerastá až do spodnej stratosféry. Spodná základňa oblaku sa pri vertikálnom vývoji kumulonimbu približuje k zemi. Toto je dôvod, prečo sa búrkový oblak nesmie nadlietať alebo podlietať. Najčastejšie sa vyskytuje ako komplex viacerých ciel a tvorí sa pôsobením konvekcie hlavne na studených frontoch, na oklúziach charakteru studeného frontu, alebo na čiarach instability.

Elektrická štruktúra kumulonimbu sa vyznačuje záporne nabitou dolnou časťou a kladne nabitou hornou časťou oblaku. Okrem toho býva aj podružné centrum kladného náboja v oblasti základne spôsobené vypadávaním zrážok. Oblak je v letectve považovaný za veľmi nebezpečný jav, nakoľko sa v ňom vyskytujú výstupné a zostupné prúdy vzduchu, ktoré dosahujú rýchlosť až desiatky metrov za sekundu, silné turbulencie, námrazu, krúpy veľkých rozmerov a elektrické výboje.

S týmto oblakom sú spojené nebezpečné úkazy charakteristické pre priebeh konvektívnych búrok. Vyznačujú sa viditeľnými a silnými elektrickými javmi a významne ovplyvňujú elektrickú štruktúru atmosféry tým, že regenerujú záporné náboje zemského povrchu, ktorý by v pokojnom ovzduší bol neutralizovaný. Jedná sa o mohutnú oblačnosť siahajúcu až do stratosféry. Jeho základňa sa pohybuje vo výškach medzi 1 a 2 km a doba života je od 45 minút až do niekoľko hodín. Obsah vody v oblaku sa pohybuje v rozmedzí 1,5 až 4,5 g/m³, ale často môže byť aj väčší. Sprevádzané výstupné prúdy dosahujú rýchlosti 10-20 m.s⁻¹, v extrémnych prípadoch nad 30 m.s⁻¹.



Obr.1.2 Výstupné a zostupné prúdy vzduchu v kumulonimbe. [2]

^[1] Citované z: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*, ČMeS, dostupný na: <http://slovník.cmes.cz>.

Kvôli výstupným prúdom prevláda adiabatické ochladzovanie masy vzduchu nad radiačným. Pri adiabatickom ochladzovaní hovoríme o rozpínaní vzduchu a následným znížením jeho teploty pri neprijímaní tepla ani chladu z okolia. Naopak u radiačného žiarenia je prijímaná tepelná energia z okolia, a to najmä od zemského povrchu vplyvom slnečného žiarenia.

1.1.1. Štádia rozvoja a zániku konvektívnej oblačnosti

Búrkový oblak sa skladá z uzavretých jednotiek, nazývaných cely. Vývojový cyklus delíme na tri štádia, štádium kumulu, štádium zrelosti a štádium rozpadu.

- Štádium kumulu

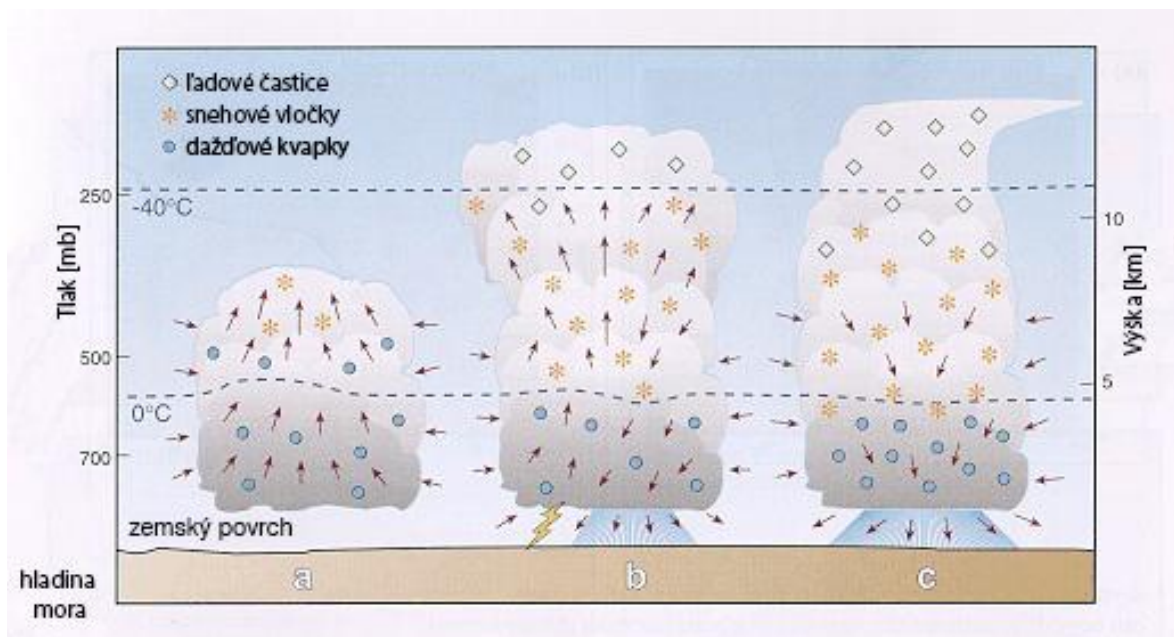
Jedná sa o výstupné prúdy, ktorých vertikálny rozsah je rovný horizontálnemu rozsahu oblaku. Ďalej oblak prerastá do vežovitého kumulu (Cu congestus, označený v správach METAR skratkou TCU), kedy sú výstupné prúdy najsilnejšie vzhľadom na celý priebeh búrky a prevyšujú v určitých častiach rýchlosť $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Okolité vzduch vteká zo všetkých strán do oblaku, kde sa pridružuje k výstupným prúdom spolu s vlhkosťou, čo spôsobuje nárast vnútornej energie. Dochádza k tvoreniu vodných kvapiek a vo vyšších hladinách k ľadovým kryštálkom. Veľké množstvo vodnej pary kondenzuje a je vynášané smerom hore, po pol hodine až hodine dosahuje výšok s teplotou $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, kde dochádza k zamrznutiu vodných kvapiek. Ľadové kryštálky potom tvoria charakteristickú nákovu (incus), ktorej tvar je podmienený prúdom vzduchu v tejto hladine a v ďalšom štádiu kumulonimbus získava svoj konečný tvar a rozsah.

- Štádium zrelosti

Vertikálny rast kumulonimbu v stredných zemepisných šírkach sa väčšinou zastavuje vo výškach 10-14 km nad zemou. Tuhé častice sa zoskupujú v najstaršej časti oblaku, kde končia výstupné prúdy. V mladšej časti vystupujú teplé prúdy. Následne dochádza k zostupným a výstupným prúdom v rôznych častiach oblaku súčasne. Tie sú spôsobené padaním vodných kvapiek alebo ľadových kryštálikov pri dosiahnutí hmotnosti, pri ktorej sa nedokážu udržať v hladine. Pri ich padaní so sebou strhávajú okolitý vzduch a v nižších, teplejších a nenasýtených hladinách sa opäť vyparujú. Tento proces spôsobuje ochladzovanie zostupných prúdov, ktoré dosahujú až na zemský povrch, kde sa prejavuje silným nárazovým studeným vetrom (húľavou), hlavne v smere pohybu búrky. Na čiare húľav je výrazné rozhranie studeného a teplého vzduchu pripomínajúce studený front. Vytvárajú sa výstupné prúdy teplého vzduchu, ktoré sú základom pre vznik ďalšej kopovitej oblačnosti a búrok. V niektorých kumulonimboch dosahujú výstupné prúdy rýchlosti až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a zostupné okolo $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Štádium zrelosti trvá približne 15-30 minút.

- Štádium rozpadu

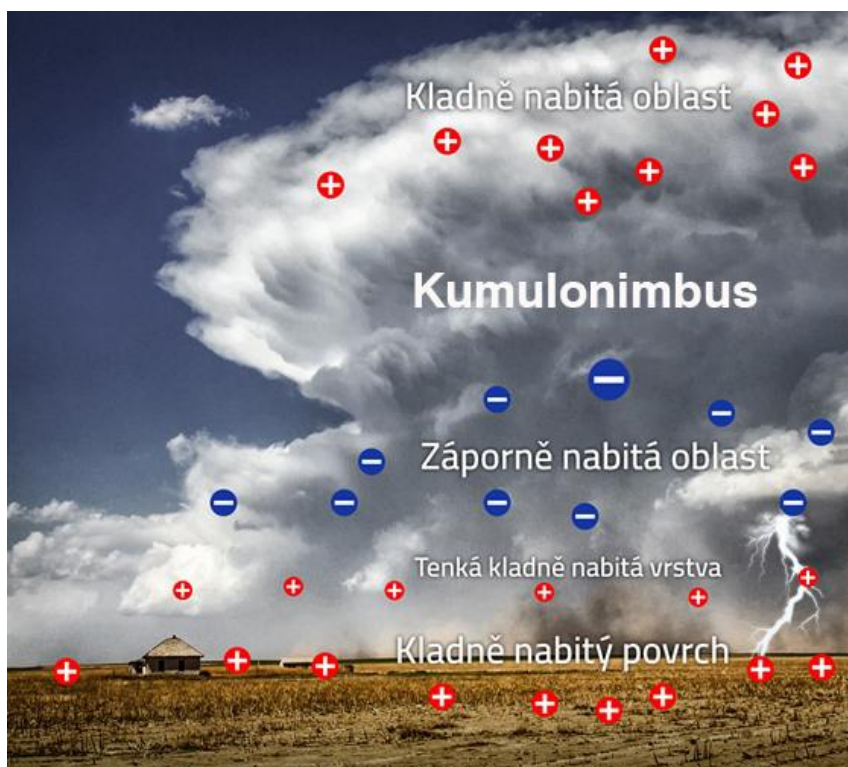
Koniec existencie kumulonimbu je sprevádzaný zostupnými prúdmi vzduchu v celom rozsahu oblaku. Jednotlivé bunky tvoriace v oblaku blesky bývajú v jednom čase v rôznych vývojových štádiách a navzájom sa ovplyvňujú v elektrickej aktivite, ktorá môže trvať výnimočne radu hodín. Nakoniec slabnú zrážky, a tiež elektrická aktivita. Oblačnosť sa rozpadáva do vrstiev, ktoré sa vyskytujú vo všetkých hladinách, kde sa pôvodne nachádzal kumulonimbus. Toto štádium trvá v normálnych podmienkach 20 až 30 minút a už nepredstavuje nebezpečenstvo pre lietadlá. Môže však znižovať dohľadnosť v spodných vrstvách ovzdušia najmä v chladnom období a hornatých oblastiach.



Obr. 1.3 Vývojové štádia kumulonimbu: (a) štádium kumulu, (b) štádium zrelosti, (c) štádium rozpadu. [3]

1.1.2. Vznik elektrického náboja

Kopovitá oblačnosť tvorí asi polovicu oblačnosti na zemi. Preto ich elektrické procesy sú pomerne významné. Štandardne sú oblaky v bipolárnom rozložení, čo znamená, že dve horizontálne vrstvy sa nabíjajú opačným znamienkom. Konkrétne u kumulonimbu je spodná vrstva nabitá záporne a horná kladne. Existuje viacero teórií vzniku centier elektrického náboja, z ktorých je považovaná za najsprávnejšiu nasledovná.



Obr. 1.4 Rozloženie elektrického náboja v oblaku a na zemskom povrchu. [4]

Doposiaľ spomínané výstupné prúdy sú základným predpokladom k vzniku centier elektrického náboja, kedy dochádza k treniu malých ľadových kryštálikov, ktoré sa nabíjajú kladne s väčšími nabíjajúcimi sa záporne. Určitá časť molekúl H_2O je disociovaná² a nachádzajú sa tu anióny OH^- a kationy vodíka H^+ . Kationy sú oveľa pohyblivejšie v porovnaní s aniónmi. Termodynamickým pohybom potom kladné náboje preskakujú na chladnejšie menšie kryštály, ktoré sa následne nabíjajú kladne. Pri väčších sa prejaví prebytok záporného náboja. Pri takomto procese je dôležitý vysoký vodný obsah v danom mieste ovzdušia. Malé kryštály sú vynášané do horných hladín, kde tvoria centrum kladného náboja. Väčšie krúčky sa udržiavajú nižšie, kde tvoria centrum záporného náboja alebo vypadávajú vo forme konvektívnych zrážok. Elektrický potenciál nevyhnutný pre vznik elektrického výboja v oblaku je okolo 1 MV.m^{-1} . Tieto výboje kumulonimbu sa rozdeľujú na dva druhy – blesk a hrotový výboj.

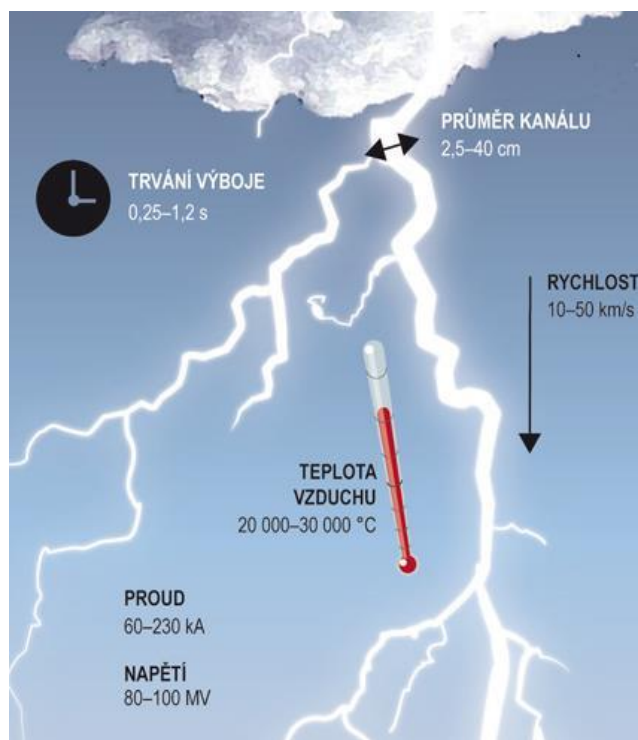
- Blesk

K blesku dochádza, ak vznikne silný iskrový výboj medzi centrami elektrického náboja opačnej polarít. Poznáme tri typy bleskov, a to blesk vnútri oblaku, blesk do zeme, blesk medzi dvoma blízkymi oblakmi, poprípade medzi oblakom a voľnou atmosférou.

² Rozklad chemickej zlúčeniny

Priebeh blesku môžeme rozdeliť na niekoľko fáz. Prvý, vedúci výboj smeruje rýchlosťou $200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ z oblaku k zemi a je takmer neviditeľný. Počas jeho vývoja dochádza k poklesu intenzity elektrického poľa, čo jeho pohyb zastaví do niekoľko desiatok mikrosekúnd, potom intenzita elektrického poľa znovu rýchlo narastie.

Ak sa vedúci výboj dostatočne priblíži k zemi, začne sa proti nemu tvoriť spätný výboj. Najčastejšie sa tak deje vo vyvýšených miestach, ako sú kopce, stromy, stožiare, vysoké budovy a podobne. V tomto procese sa dané dva výboje spoja a vzniká uzavretý kanál blesku. Tento kanál vysoko ionizovaného vzduchu, ktorý môže mať šírku až niekoľko centimetrov, vytvára priestor pre vznik prvého spätného výboja. V ňom vzniká prúd v desiatkách kA a je sprevádzaný jasným zábleskom. Medzi oblakmi je prúd spätných výbojov nižší. Jeho rýchlosť je omnoho vyššia ako u vedúceho výboja, a to až $20\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ pri teplote do $30\,000 \text{ K}$. Vysoká teplota ďalej spôsobuje rýchle zväčšenie objemu a následnú tlakovú vlnu, ktorá má akustické následky a nazývame ich hrmenie.



Obr. 1.5 Popis priebehu blesku. [5]

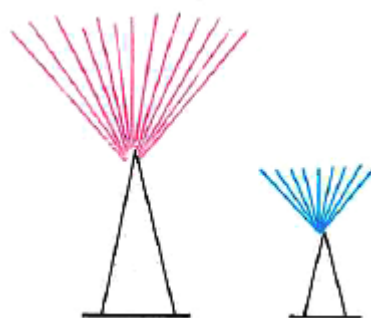
Každý viditeľný blesk môže byť sprevádzaný viacerými vedúcimi a spätnými výbojmi, ktorých je v priemere tri až päť. To sa vždy deje v jednom kanáli. Boli zaznamenané rekordy, kedy došlo k viac ako 20 spätným výbojom.

Iným prejavom blesku je vznik atmosférikov. Jedná sa o elektromagnetické rozruchy v tvare krátkych impulzov, ktoré sa šíria v nižších vrstvách atmosféry, pôvodcom ktorých je búrkový výboj a deje sa takto v kanáli blesku. Prevažná časť energie je spotrebovaná v oblasti dlhých vln pri spätnom výboji blesku do zeme a zvyšná energia sa minie pre veľmi krátke vlny pri vedúcom výboji.³

³ Zrov. ŘEZÁČOVÁ, D., KAŠPAR, M., NOVÁK, P., SETVÁK, M., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, str. 411 d.

- Hrotový výboj

Uvážením záporného náboja v spodnej časti oblaku a kladného náboja zemského povrchu siločiar medzi nimi smerujú približne vertikálne do zeme. Ak do takéhoto elektrického poľa vložíme vodič s malým priemerom, potom môžeme jeho koniec považovať za bod, teda hrot, ktorý je uzemnený (spojený so zemským povrchom) V jeho okolí sa potom deformujú siločiar a zbiehajú sa smerom k tomuto bodu. Zhustenie siločiar spôsobí znásobenie elektrického poľa a záporný náboj je odvádzaný smerom k zemi. Tomuto sa hovorí uzemnenie.



Obr. 1.6 Tvar a farby hrotových výbojov v závislosti na polarite v hrotoch (vľavo kladne polarizovaný, vpravo záporne polarizovaný). [6]

Hrotový výboj sa taktiež nazýva ionizácia nárazom. Jeho silné prejavy sú sprevádzané akustickými (praskaním, sršaním) aj viditeľnými efektami (iskrením) na hrotoch. Najčastejšie sú spomínanými hrotmi vrcholky stromov (hlavne ihličnatých), veže budov, špičky stožiarov, rôznych tyčí a podobne. Ľudovo sa tento úkaz pomenúva Eliášov oheň, ale časom sa dostal aj do odbornej terminológie. Bolo preukázané, že jeho intenzita sa zvyšuje spolu s rýchlosťou vetra.⁴

1.2 Štruktúra a rozdelenie búrok

Búrky klasifikujeme z rôznych hľadísk – podľa vnútornej štruktúry, času a miesta vzniku.

1.2.1 Rozdelenie búrok podľa usporiadania buniek

Búrkový oblak sa podľa odbornej literatúry skladá z vyššie spomenutých konvektívnych ciel. Podľa ich usporiadania delíme búrky na singlecelárne, multiceľárne a supercelárne.

⁴ Zrov. BEDNÁŘ, J., 1989. *Pozoruhodné jevy v atmosfére: atmosférická optika, akustika a elektřina*. Praha: Academia, str. 209-211

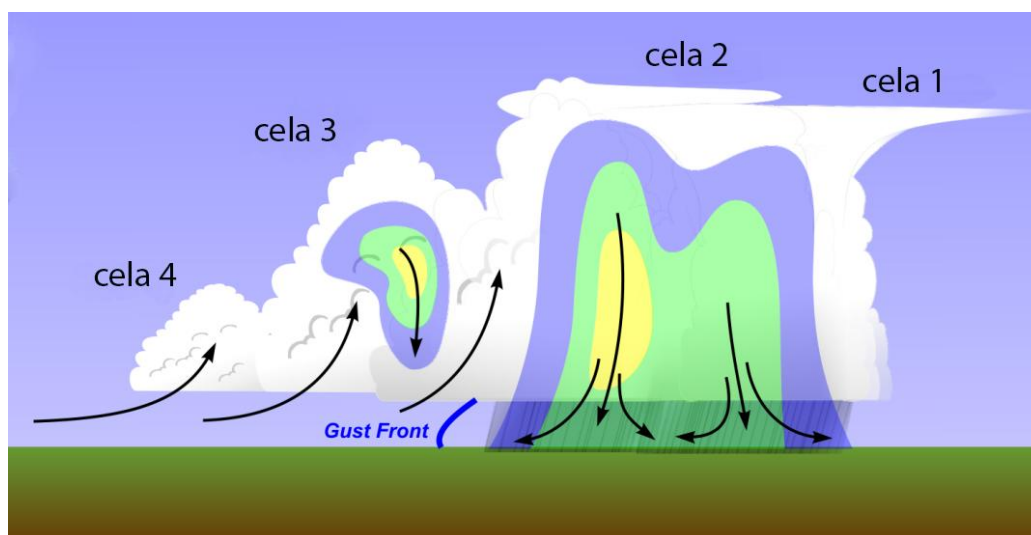
- Singlecela

Najjednoduchším druhom búrky je singlecela. V nej prebieha jeden výstupný prúd vzduchu a jeden zostupný. Z hľadiska geometrie javu tento systém delíme na dva typy: jednoduchá cela a konvektívna cela. Zatiaľ čo prvá uvedená má slabý priebeh, druhá cela sa vyznačuje veľkou silou, pri ktorej vznikajú rotujúce prúdy a jej životnosť je dlhotrvajúca so stále sa obnovujúcou cirkuláciou. Vnútri oblaku sa potom tlakové pole v stredných hladinách prejavuje nízkym tlakom vo forme mezocyklóny.

- Multicela

Búrková oblačnosť sa môže skladať z viacerých ciel, ktoré na seba vzájomne pôsobia a tvoria takzvaný multicelárny systém. Multicely charakterizujeme plošným a priestorovým rozložením a časom trvania. Vo väčšine prípadov sa jedná o sústavu jednoduchých ciel, pritom každá môže byť v inom štádiu vývoja. Ich priebeh sa dodnes nedá spoľahlivo predpovedať. Takýto systém s vystupujúcim teplým a vlhkým vzduchom a zostupujúcim studeným vzduchom vyvoláva silné prerušované zrážky, často s pridruženým krupobitím a silnou elektrickou aktivitou.

Usporiadané multicelárne búrky tvoria radu konvektívnych ciel a pôsobia ako jeden súvislý mohutný oblak. Nové cely sa tvoria postupne v 10 až 15 minútových intervaloch a pridružujú sa k už existujúcemu systému. Počas doby zrenia cely sa vo výške udržiava vysoká vlhkosť vzduchu a neskôr vypadáva vo forme zrážok a tvorí zostupný prúd, ktorý je najsilnejší na začiatku vypadávania zrážok spolu s veľmi silným nárazom vetra.



Obr. 1.7 Jednotlivé bunky (cely) multicelárnej búrky. Podrobnejší popis gust frontu je uvedený v podkapitole 1.3. [7]

Hlavnou príčinou vzniku nových ciel sú výstupné prúdy už existujúcich zrelých ciel, ktorých čelo predstavuje gust front. Takto vzniknuté cely sa potom nazývajú sekundárne

alebo dcérine cely. Ak sa tieto útvary spoja do jedného celku vzniká mohutný gust front sprevádzaný silnou konvergenciou, strihom vetra a elektrickou činnosťou. Pohyb multicely určujeme pomocou súčtu vektorov, pričom jeden vektor určuje smer pohybu samotného systému, ktorý kopíruje smer a rýchlosť vetra, druhý vektor pohybu tvorby nových ciel, čo môže nastávať kdekoľvek po obvode búrky.

- Supercela

Posledným búrkovým systémom je takzvaná supercela. Jedná sa o kombináciu silných výstupných prúdov spolu s dlhým trvaním. Je vo forme jednej konvektívnej a stále sa obnovujúcej cely. Pohyb je neusporiadaný a len málo závisí na smere vetra, väčšinou sa stáča smerom doprava pri pohľade zhora. Základňa je charakterizovaná oblasťou bez zrážok a výraznou rotáciou oblačnosti (anglicky: wall clou), ktorá klesá smerom k zemskému povrchu a dáva základ k vzniku tromby. Pozoruhodným javom je schopnosť takéhoto systému sa deliť na dve sekundárne supercely, ktoré po odpojení od seba, každá rotuje opačným smerom a zároveň sa od seba vzdávajú. Čo sa týka intenzity takejto búrky, je porovnateľná s multiceľárnou a dokonca častokrát slabšia.⁵



Obr. 1.8 Supercelárna búrka v americkom štáte Oklahoma, ktorý je známy častým výskytom veľmi silných búrok sprevádzaných tornádami. [8]

⁵ Zrov. ŘEZÁČOVÁ, D., KAŠPAR, M., NOVÁK, P., SETVÁK, M., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, str. 415-436

1.2.2 Regionálne a časové rozdelenie búrok

Najviac sa búrky vyskytujú nad pevninou v rovníkových pásmach, kde je ročne 150 a viac dní s búrkou. Naopak nad oceánskym povrchom je to iba 5 až 10 dní. Smerom k pólom počet dní klesá kvôli nižšej teplote povrchu zeme, a teda klesá rýchlosť vyparovania, a tým aj množstvo odparenej vody, ktorá je základom pre vznik kumulonimbu. Preto sa v polárnych oblastiach tvoria búrky len veľmi ojedinele.

Čo sa týka členitosti pevninského terénu, je v horských oblastiach početnejší výskyt kumulonimbov oproti nížinám.

Mimofrontálne búrky sa tvoria hlavne dopoludnia a vo večerných hodinách prevažne v letnom období. Neskoro večer sa začínajú rozpadat', behom noci slabnú a len zriedkavo sa udržia do rána. V zime je búrková činnosť všeobecne menej častá, napriek tomu môže vzniknúť pri rýchlom prechode studeného frontu. Búrky na teplom fronte sa tvoria najčastejšie počas prechodných období.

Tab. 1.1 Dlhodobý priemer počtu dní s búrkou v jednotlivých mesiacoch a za rok v Bratislave a v Prahe (1951-1970). [9]

| Mesto | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Rok |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| Bratislava | 0,0 | 0,3 | 0,2 | 1,8 | 5,5 | 8,2 | 7,4 | 5,0 | 1,4 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 30,2 |
| Praha | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 2,2 | 6,4 | 8,5 | 7,2 | 6,8 | 2,3 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 34,4 |

1.2.3 Rozdelenie búrok podľa miesta vzniku

Podľa miesta vzniku rozlišujeme niekoľko skupín búrok.

Búrky vo vnútri vzduchovej hmoty

- Insolačné alebo búrky z tepla vznikajú ohrevom vlhkého vzduchu vplyvom slnečného žiarenia.
- Advekčné sa tvoria v prípade, kedy sa studený vlhký vzduch presúva nad teplejší zemský alebo vodný povrch.

Frontálne druhy búrok

- Na studenom fronte
- Na teplom fronte
- Na oklúznom fronte

Orografické (horské) búrky

- Vznikajú v horských oblastiach na náveternej strane svahov, keď instabilný vlhký vzduch prúdi k horskému pásmu.

Búrky na čiare húl'av

- Silné konvektívne búrky, ktoré sa vytvárajú v pásmach intenzívnej instability ovzdušia a ktoré môžu byť od seba oddelené bezoblačným priestorom. Najčastejšie sa dajú spozorovať pred studeným frontom.

Búrky v konfluentnom prúdení

- Nachádzajú sa v priestoroch, kde sa zbiehajú prúdnicie, napríklad v brázdach nízkeho tlaku vzduchu.⁶

1.3 Sprievodné javy búrkovej činnosti

V tejto kapitole sú uvedené len javy najbežnejšie a zároveň najvýraznejšie.

Gust front

Jedná sa o čelo studeného zostupného prúdu vzduchu vytekajúceho z konvektívneho búrkového oblaku, ktorý dosahuje na zemský povrch a následne sa rozlieva do strán a nadvihuje okolitý teplý vzduch. Jeho vertikálne rozmery dosahujú stovky metrov až niekoľko kilometrov a pri zemi sa šíri až na vzdialenosť stoviek km od oblaku. Typicky je sprevádzaný silným poklesom tlaku a teploty vzduchu, a zmenou smeru a rýchlosti vetra. Pri prechode takéhoto frontu sa vytvára búrkový nos⁷. Ďalej sa na tomto čele tvorí zvláštnosť oblaku arcus⁸. Práve gust front môže iniciovať vznik nového búrkového oblaku. Poloha gust frontu je znázornená na obrázku 1.7.

Strih vetra

Je to náhla priestorová zmena vektora rýchlosti prúdenia vzduchu pripadajúca na jednotku vzdialenosti. Vyskytuje sa v cyklónach aj anticyklónach a najvýznamnejšia je jeho vertikálna zložka. Pre vyjadrenie rýchlosti prúdenia sa používa gradient, ktorý je udávaný v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 100 m, 1 000 m alebo 1 000 stôp. Tento jav je veľmi dôležitý najmä pri vzlete a pristátí lie-

⁶ Zrov. KRÁČMAR, J., KRŠKA, K., SOBOTA, J., SVATOŠ, V., 2006. *Meteorologie (050 00)*. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, str. 184-185.

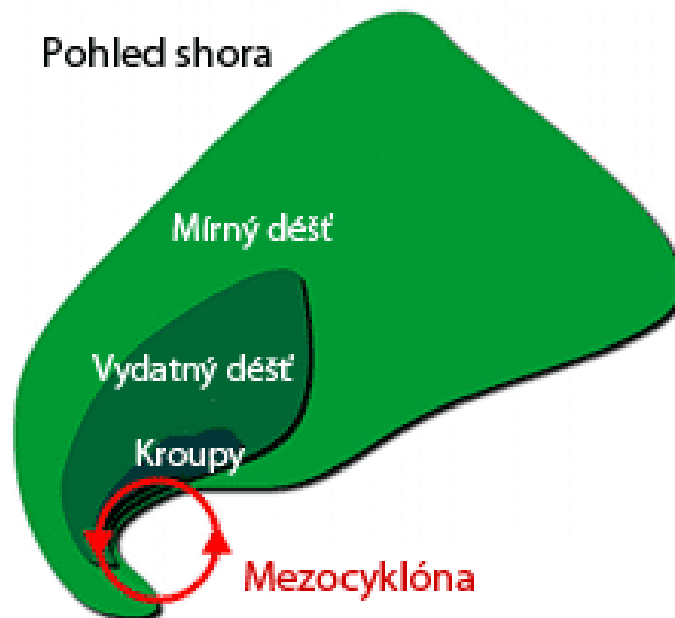
⁷ Náhlý vzostup tlaku vzduchu pri prechode húl'avy.

⁸ Hustý valcovitý horizontálny oblak, ktorý má vzhľad tmavého oblúku. Vyskytuje sa u oblakov Cb a Cu.

tadiel, a preto je letecká meteorologická služba podľa smerníc ICAO povinná na neho vydávať výstrahu.

Mezocyklóna

Je to rotujúci vír, spojený s výstupným prúdom v kumulonimbe alebo supercele, ktorý môže mať jak cyklonálny tak anticyklonálny smer rotácie. Poznáme dva druhy mezocyklón. Menej intenzívny druh vzniká v oblasti cyklón pri premiešavaní studeného výškového vzduchu sprevádzaného konvektívnou oblačnosťou s teplým prízemným, hlavne v pásmach miernych šírok a v arktickom vzduchu⁹. Prevažne sa vyskytuje vo forme brázdy nízkeho tlaku vzduchu¹⁰ a jej trvanie je v priemere 1 deň. Druhý druh je spätý so supercelou, kde vzniká jeho rotácia a môže mať cyklonálny aj anticyklonálny charakter. Trvanie je iba niekoľko hodín a výškový rozsah je 3 až 8 km. V takejto oblasti u oboch druhov mezocyklón sa očakáva veľmi silný vietor spolu s intenzívnymi zrážkami, prípadne snežením v zime.



Obr. 1.9 Schéma supercely s naznačenou oblasťou mezocyklóny. [10]

⁹ Chladný vzduch prúdiaci nad Arktídou a príľahlými oblasťami.

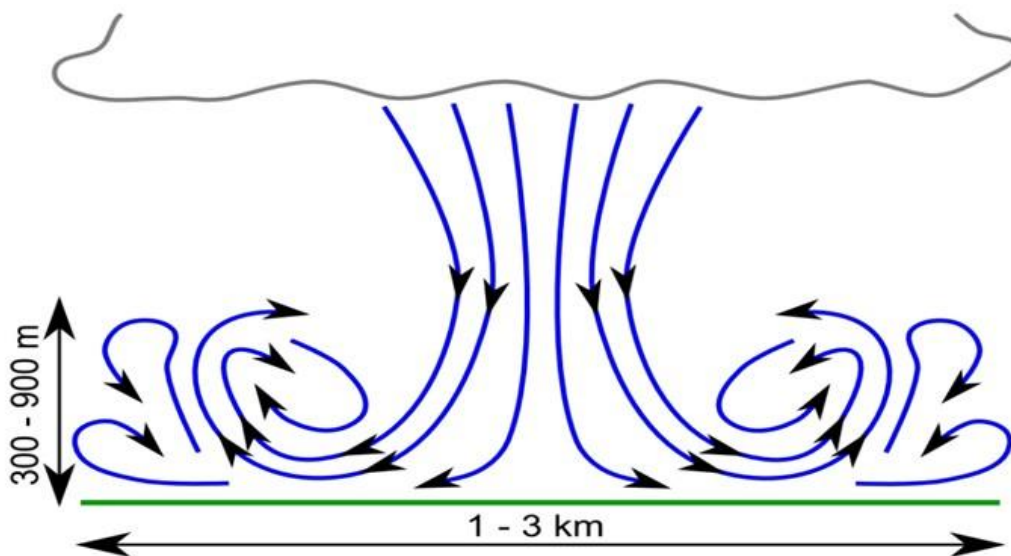
¹⁰ Oblasť nízkeho tlaku vzduchu obyčajne medzi dvoma oblasťami vysokého tlaku vzduchu.

Prívalové zrážky a krúpy

Ako už bolo spomenuté, spolu s búrkami prichádza vysoká zrážková činnosť, ktorá môže byť sprevádzaná krupobitím. Často spôsobuje ničenie úrody, lokálne povodne, zranenia ľudí a dobytku, a poškodenie majetku. Krúpy sú obzvlášť nebezpečné pre lietadlá z dôvodu veľkej pravdepodobnosti narušenia draku lietadla, najmä nosa a nábežných hrán, kedy sa menia aerodynamické vlastnosti letúnov.

Prepad vzduchu

Ide o veľmi silný zostupný prúd studeného vzduchu, angl. downburst, ktorý vypadáva z konvektívneho oblaku. Po dopade na zem sa rozteká do všetkých strán a tvorí rotujúce víry (obr. 1.10). Prepad vzduchu sa rozdeľuje na dve kategórie: malý prepád, angl. microburst zasahuje plochu o rozmeroch menej než 4 km pod dobu 2 až 5 minút, veľký prepád vzduchu, angl. macroburst, sa rozprestiera na ploche o veľkosti viac ako 4 km a trvá 5 až 30 minút. Často dochádza k vyparovaniu dažďových kvapiek pred dopadom na zem, čo spôsobí, že je taký prúd vzduchu neviditeľný, preto sa považuje za veľmi nebezpečný jav, obzvlášť pre pristávajúce lietadlá.



Obr. 1.10 Malý prepád vzduchu a jeho vertikálny a horizontálny rozsah. [11]

Tromba

Pojem tromba zahŕňa všetky atmosférické víry rotujúce okolo vertikálnej osi bez ohľadu na pôvod jej vzniku. Nepatria sem rotory, čo sú víry s rotáciou približne okolo horizontálnej osi. Ak sa tromba spúšťa z oblačnosti, jej počiatok nazývame tuba. Podľa medzinárodnej morfolologickej klasifikácie oblakov sa jedná o zvláštnosť oblaku, kedy oblačný stĺp alebo obrátený oblačný kužeľ (lievik) vychádza zo základne oblaku. Medzi povšimnutiahodné patria tie s výškovým rozsahom stoviek metrov do maximálnej výšky 2 km. Zaráďujeme

sem prašné alebo piesočné víry, takzvaných raráškov, kondenzačné choboty, ktoré sa nedotýkajú zemského povrchu, vodné smršte a nakoniec tromby dosahujúce až na zem, teda tornáda, ktoré sú bližšie objasnené v nasledujúcom odstavci.

Tornádo

Vzniká ako sprievodný jav silnej konvektívnej oblačnosti a dosahuje na zemský povrch. Rotuje od základne oblaku smerom dole, kde často spôsobuje značné materiálne škody. Pre popis intenzity sa používa Fujitova stupnica rozlišujúca 6 stupňov intenzity, z čoho F0 je najslabší a F5 najsilnejší. Odvodzuje sa od závažnosti vzniknutých škôd, pričom výskyt najslabších je zároveň najčastejší. Najsilnejšie sú vždy sprevádzané supercelami. Tvorí sa na celej zemeguli okrem polárnych oblastí. Na Slovensku a v Českej republike je ročne zaznamenaných niekoľko slabších tornád.¹¹



Obr. 1.11 Postupný vývoj tornáda (zľava doprava). [12]

¹¹ Zrov. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*, ČMeS, dostupný na: <http://slovník.cmes.cz>.

1.4 Zvláštnosti elektrometeorov

Elektrometeory sú všetky akustické a vizuálne prejavy elektriny v atmosfére. Niektoré z nich sú predmetom obdivu z dôvodu ich zriedkavosti, dokonca pri určitej skupine vedci doposiaľ nedokážu určiť presnú príčinu ich vzniku. V tejto podkapitole sú popísané niektoré z nich.

Polárna žiara

Je magnetická búrka vyskytujúca sa najčastejšie v oblastiach okolo zemských magnetických pólů v uhlovej vzdialenosti 20 - 25° od nich. Tu ich možno pozorovať až viac ako 100 krát ročne. Nachádzajú sa vo výškach od 80 do 100 km nad zemou. Ide o prejav elektricky nabitých častíc vyžarovaných slnečným žiarením vo vysokej atmosfére, ktoré vznikajú interakciami týchto častíc s molekulami veľmi zriedených plynů. Ich usporiadanie je nadobudnuté magnetickými siločiarami Zeme, okolo ktorých sa špirálovite stáčajú. Takto vytvárajú buď lúčovitú alebo nelúčovitú štruktúru. Prvý druh je takmer nepohyblivý a u druhého pozorujeme rýchle zmeny polohy v podobe závesů, farebných lúčů a podobne.¹² Ich neobyčajné prejavy rozptyľujú pilotov a rušia magnetické prístroje, čo môže viesť k nebezpečným situáciám.



Obr. 1.12 Polárna žiara nad Nórskom. Na obrázku je možné pozorovať typické špirálovité stáčanie molekúl elektricky nabitých plynů. [13]

¹² Zrov. BEDNÁŘ, J., 1989. *Pozoruhodné jevy v atmosfére: atmosférická optika, akustika a elektrina*. Praha: Academia, str. 218-219.

Nadoblačné blesky

Vznikajú nad mohutnou búrkovou oblačnosťou a boli prvýkrát spozorované pilotmi, ktorí lietajú vo veľkých výškach nad 50 km. Zozačiatku boli tajené posádkami zo strachu o stratu zamestnania. Blesky boli rôzne pomenované podľa ich tvaru a veľkosti, napríklad rudí škriatkovia, modré výtrysky, Elfovia a podobne. Zatiaľ neexistuje žiadna podložená teória ich vzniku, aj keď existujú výskumné centrá orientované práve na tieto javy.



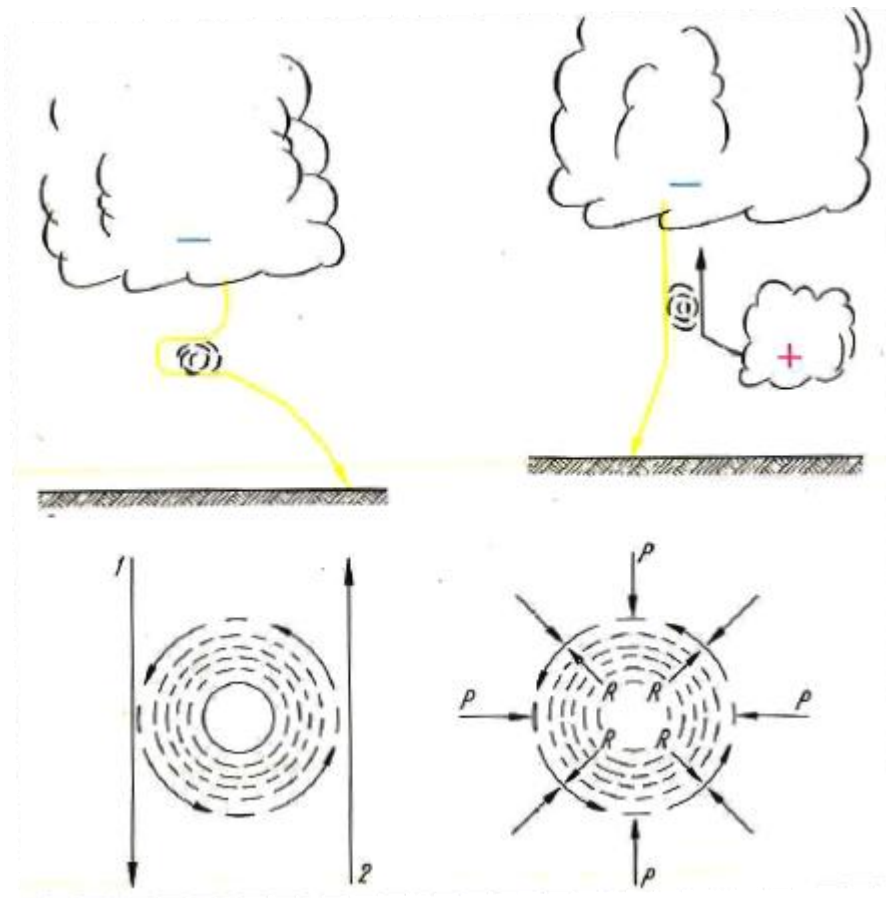
Obr. 1.13 Nadoblačné blesky zachytené pri búrke nad mestom Amarillo v Texase 16. mája 2016. [14]

Gul'ový blesk

Známy postrach pre človeka od dávnych čias. Je možné ho spozorovať ako ohnivú guľu, ktorá sa pohybuje pri zemi alebo, zriedkavejšie, môže padať z oblaku smerom dole. Dokáže sa dostať do budov cez okno a pri strete s človekom spôsobuje vážne až smrteľné popáleniny. Existuje množstvo aj úsmevných teórií jeho vzniku. Za najpravdepodobnejšiu sa považuje horenie častíc pochádzajúcich zo zemského povrchu, ako hlíny v dôsledku silného výboja sprevádzaného búrkami. Pre tie, ktoré sa pohybujú vyššie sa uvažuje o silne elektromagneticky nabitých prachových časticiach spolu s minerálmi. Najčastejšie sa tvoria na konci priebehu búrky. Vyskytujú sa aj pri zemetraseniach a vulkanických procesoch. V 99% prípadov sa tvoria do výšky 1 000 m nad zemou.

Podľa nemeckého vedca A. Meissnera, je gul'ový blesk rozžiarený plyn s otáčavým pohybom. Vzniká na dráhe dvoch bleskov (viď. obr. 1.14), ktorých výboje putujú opačným smerom. Je považovaný za gyroskopický vír a je udržiavaný v pohybe rovnováhou síl medzi vonkajším tlakom vzduchu a odstredivou silou vyvolávanou otáčavým pohybom plynov.

Jeho trvanie je dovtedy, kým neprenikne vzduch zvonku do stredu plynovej gule. Vtedy sa blesk rozpadne spolu so silným akustickým efektom, ktorý je tým silnejší, čím väčší je guľový blesk.¹³



Obr. 1.14 Vznik guľového blesku podľa A. Meissnera. 1 a 2 - silné proti sebe smerujúce prúdy vzduchu. P – sily tlaku vzduchu z okolia. R – odstredivé sily vyvolané rotačným pohybom. [15]

¹³ Zrov. SCHMIDT, M., 1980. *Meteorológia pre každého*. Bratislava: Alfa, str. 220-221.

2 Predpoveď a technické prostriedky zisťovania búrok

Druhá kapitola sa venuje problematike a technickým prostriedkom predpovedania búrkovej činnosti. V jednotlivých podkapitolách sú podrobnejšie popísané metódy predpovedí búrok a princíp práce rádiolokačných zariadení.

2.1 Predpoveď búrok

Pre meteorológov je takmer nemožné predpovedať búrkovú činnosť dlhšie dopredu a jej trvanie. Z tohto dôvodu nie je možné na letiskách varovať pilotov pred búrkou v dostatočnom predstihu. Výstrahy sa vydávajú na už existujúce búrky a ich ďalší pohyb vyplývajúci hlavne zo smeru vetra. Počas leta, kedy je ráno znateľný opar, v ovzduší je teda značné množstvo vodnej pary, je predpoklad vzniku konvektívnej nefrontálnej oblačnosti. Človek pociťuje zhoršené dýchanie, prípadne rýchlejšie potenie, čo popisuje ako dusno. Dopoludnia sa začínajú tvoriť kopovité oblaky, kumuly prerastajúce neskôr do kumulonimbusu. Búrky majú najsilnejšiu intenzitu popoludní a vo večerných hodinách. Pre letiská je tento jav často limitujúci iba na niekoľko desiatok minút, pretože kumulonimbus mení polohu vzhľadom k zemskému povrchu a v našich zemepisných šírkach má pomerne krátke trvanie. Naopak frontálne búrky sa dajú jednoduchšie predpovedať sledovaním pohybu studených front, pomocou numerického modelovania až na 3 dni dopredu.

V dnešnej dobe sa už nepoužívajú synoptické¹⁴ metódy predpovedi búrok, kedy meteorológ po analýze synoptickej mapy odhadoval ďalší priebeh počasia. Namiesto toho sa používajú zaznamenané dáta stavu atmosféry, ktoré následne vyhodnocuje počítač. Spracovávajú sa pomocou rovníc vychádzajúcich zo zákona zachovania hmoty, hybnosti¹⁵ a energie. Dáta sa zároveň ukladajú pre ďalšie použitie.¹⁶ Čo sa týka konkrétne predpovedí búrok, je dôležité si popísať základné metódy, ako sa predpovedajú.

- Štvorvrstvová metóda

Informácie sa získavajú zo štyroch tlakových vrstiev 850 -700 hPa, 850 -500 hPa, 850 -400 hPa a 850 – 300 hPa. Následne sa z niekoľkých staníc v oblasti, pre ktorú predpoveď platí, zoskupia tieto dáta v podobe štyroch indexov instability **i₁**, **i₂**, **i₃**, **i₄**, z čoho sa matematicky určuje pravdepodobnosť búrkovej činnosti.

¹⁴ Údaje zachytené v jednom okamihu na viacerých miestach

¹⁵ Súčin hmotnosti a okamžitej rýchlosti hmotného bodu

¹⁶ Zrov. DVOŘÁK, P., 2010. *Letecká meteorologie: učebnice meteorologie pro piloty kvalifikace UL, GLD, PPL, CPL, ATPL a všechny ostatní, kteří potřebují odborné znalosti letecké meteorologie*. Cheb: Svět křidel, str. 233 d.

- Faustova a Showalterova metóda

Obe tieto metódy používajú indexy instability, teda pravdepodobnosti vzniku kumulonimbu, a sú získavané z meteorologických staníc uprostred predpovedanej oblasti.

Showalterov index je rozdiel medzi skutočnou teplotou vzduchu v hladine 500 hPa a teplotou, ktorú získa častica vzduchu prechádzajúca z hladiny 850 hPa do hladiny kondenzácie, kde následne nasýtená klesá do hladiny 500 hPa. Hodnoty rozdielu teploty menej ako 3 °C odpovedajú prehánkam a menej ako 0 °C búrkam.

Faust svoj index popisuje ako instabilitu vyparovania. Vychádza z predpokladu, že rýchlosť vyparovania oblačných častíc je nepriamo úmerná pomernej vlhkosti vzduchu. Je to nevratný dej straty vlhkosti a teploty vzduchu. Stav ovzdušia hodnotíme pomocou porovnania krivky zvrstvenia s krivkou nulovej instability vyparovania. V praxi sa odčítava teplota v hladine 500 hPa od teploty nulového vyparovania. Pre interval rozdielu teplôt 0 °C až 3 °C je predpoklad prehánok a pre rozdiel teplôt nad 3 °C sa jedná o búrky.¹⁷

Na búrky ako jeden z nebezpečných meteorologických úkazov pre letectvo sa vydávajú výstrahy SIGMET. Sú to veľmi dôležité informácie o existujúcich alebo očakávaných nebezpečných javoch pre pilotov, ale aj pre riadenie letovej prevádzky. Patria sem búrky, silné krupobitie, húlavy, silné turbulencie, námraza, tropické cyklóny, silné vlnové prúdenie, prachové víchrice, ba aj oblaky sopečného popola. Tieto informácie sa zostavujú pomocou čísiel a predpísaných anglických slov a najčastejšie sa vydávajú na dobu nepresahujúcu 4 hodiny, maximálne však na 6 hodín. Časový úsek neplatí, ak SIGMET varuje pred oblakmi sopečného popola a vtedy môže platiť až 12 hodín.¹⁸

2.2 Detekcia a lokalizácia bleskov

Základom lokalizácie blesku je distančná metóda, teda meranie vzdialeností medzi detektorom a bleskom. Realizácia spočíva vo vytvorení takzvanej siete čidiel, snímajúcich elektromagnetickú energiu generovanú bleskom. Viacero snímačov vzdialených od seba desiatky až stovky kilometrov sa používa z dôvodu nedostatočnej spoľahlivosti pri použití len jedného snímača. Celá sieť musí byť časovo synchronizovaná najčastejšie pomocou GPS družíc a zároveň prepojená s riadiacim centrom. Ak je blesk zaznamenaný na viacerých čidlách, je

¹⁷ Zrov. KRÁČMAR, J., KRŠKA, K., SOBOTA, J., SVATOŠ, V., 2006. *Meteorologie (050 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, str. 186.

¹⁸ Zrov. NEDELKA, M. a kol., 1998. *Slovenský letecký slovník terminologický a výkladový*. Bratislava: Magnet-Press Slovakia. XIII – 212.

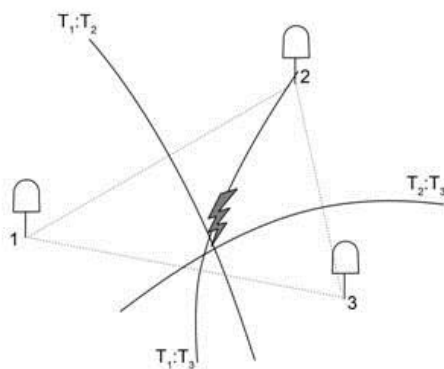
jeho poloha vypočítaná dvoma metódami: metóda doby príchodu signálu a metóda určenia smeru signálu.

- Doba príchodu

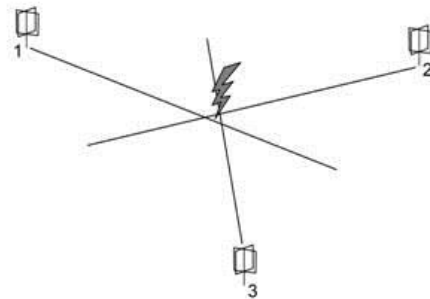
Presne sa porovnávajú časy príchodu signálu na antény čidiel, z čoho sa určuje poloha pomocou priesečníkov hyperbolických kriviek, ktoré predstavujú pomer časových rozdielov. Podmienkou je zachytenie signálu minimálne na troch snímačoch.

- Určenie smeru

V tomto prípade postačuje použitie iba dvoch snímačov, ale odporúčajú sa tri a viac. Výsledok získame z priesečníkov smerov prichádzajúceho signálu.



Obr. 2.1 Schématické znázornenie metódy určenia doby príchodu signálu. [16]



Obr. 2.2 Schématické znázornenie metódy určenia smeru prichádzajúceho signálu. [17]

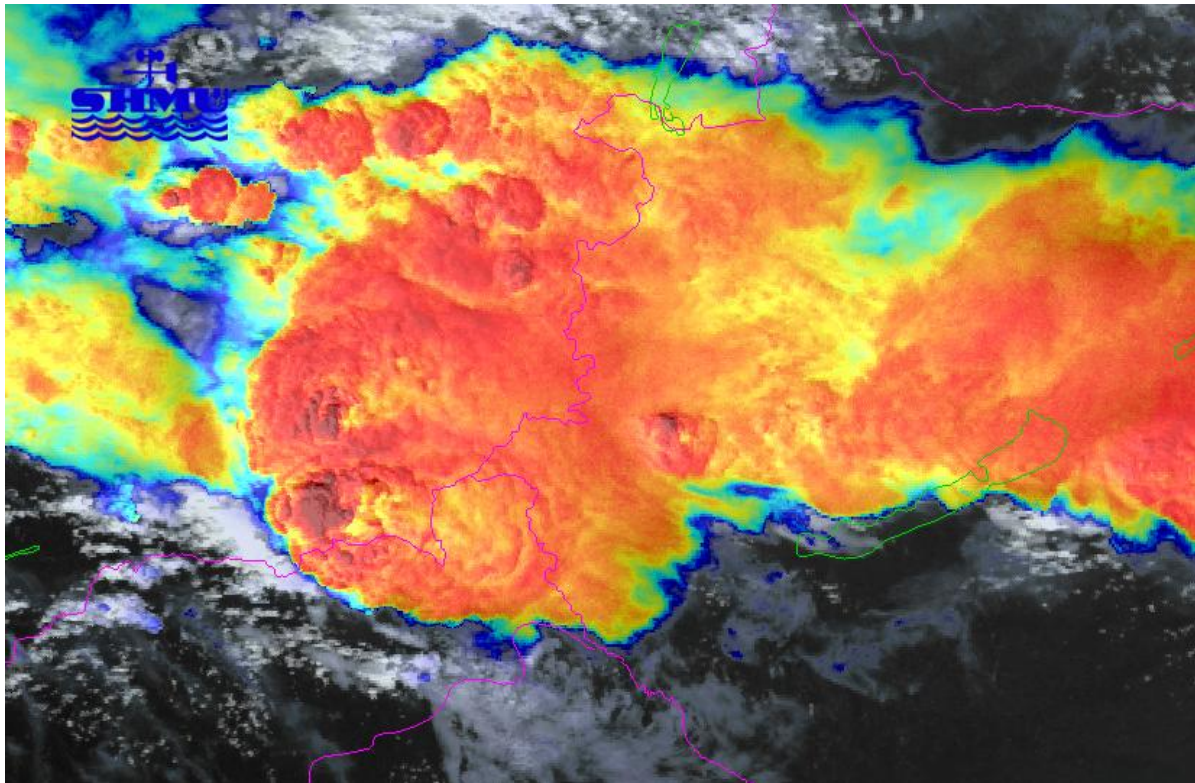
Najmodernejšie detekčné siete používajú kombináciu oboch metód a dokážu lokalizovať blesky s presnosťou až 500 m. Využívajú pritom hlavne oblasť dlhých a veľmi dlhých vln a presnosť je okolo 90 % pri bleskoch do zeme. Týkajú sa bleskov vnútri siete, mimo nej je presnosť veľmi oslabená. Na druhej strane existujú aj VKV systémy. Nutnosťou je podstatne zmenšiť vzdialenosti medzi čidlami, a to približne na 200 až 300 km. Práve táto sieť sa používa pre zabezpečovanie letiskovej prevádzky, pretože poskytuje možnosť detekcie všetkej elektrickej činnosti v okolí. Elektrická intenzita búrky sa vyjadruje počtom zaregistrovaných bleskov počas búrky a sú spracovávané v počítači.

Detekcia pomocou družíc

So zavedením družicového monitorovania sa, predovšetkým, výrazne zlepšila objektivita analýz počasia v oblastiach s riedkou staničnou sieťou, teda v oblastiach oceánov, kde nahradili alebo doplnili sieť stálych meteorologických lodí. Pozorovanie bleskov automatickými družicami začalo v 60. rokoch minulého storočia optickými metódami, ako aj pomocou rádiových vln. Dnes sa za najvýznamnejšiu považuje družica TRMM (z angl. Tropical

Rainfall Measuring Mission), ktorá je vo výške 400 km nad zemou a nesie so sebou prístroj LIS (z angl. Lightning Imaging Sensor). Jej umiestnenie je na polárnej dráhe a pokrýva tropické a subtropické pásma s nepretržitým monitorovaním územia s rozlohou 600 x 600 km.

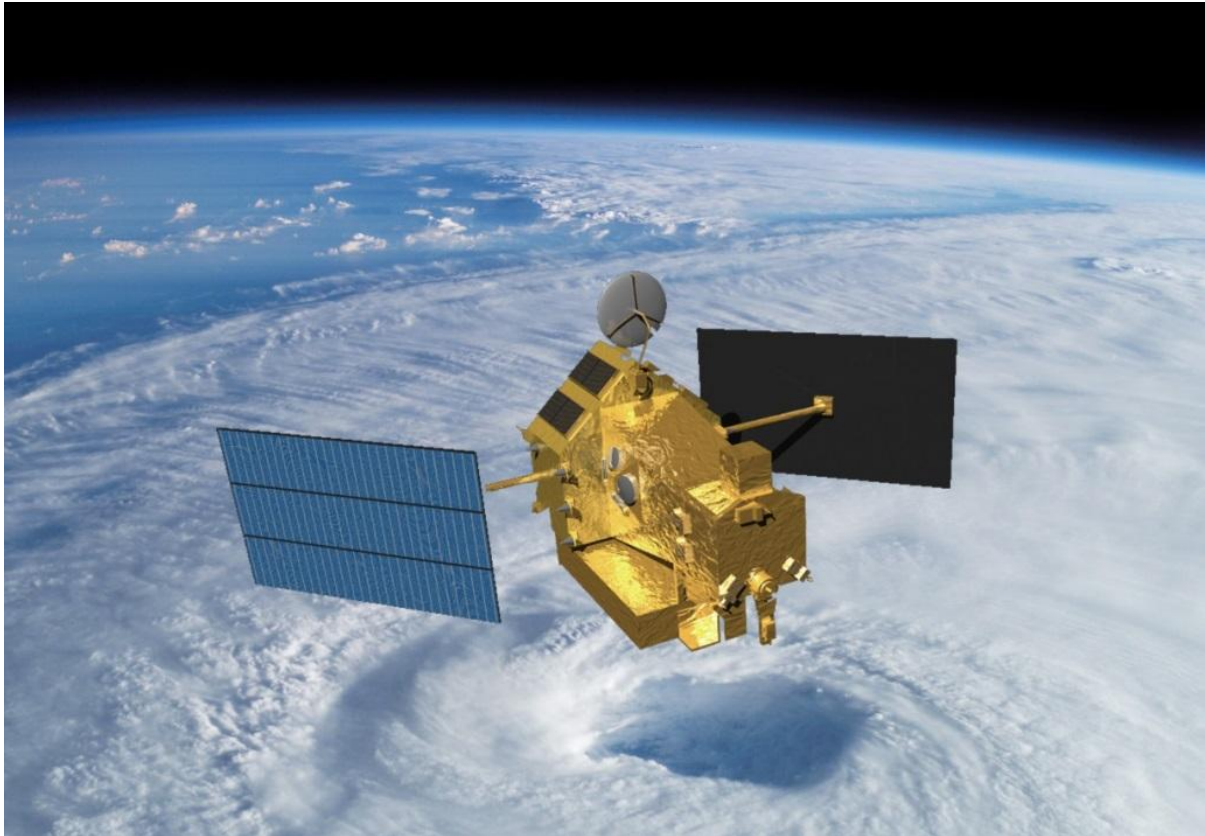
LIS je prototyp pripravovaných prístrojov, ktoré budú v budúcnosti umiestnené na geostacionárnych družiciach a budú pokrývať celú severnú pologuľu. Sledovanie elektrickej činnosti z obežnej dráhy umožňuje zaznamenávať frekvenciu výbojov, lepšie sledovať medzioblačné blesky a stanoviť ich žiarivej energie. Zariadenie pracuje v nočných aj v denných hodinách a je schopné detekovať aj veľmi slabé výboje. Vizualizácia výsledkov je spracovávaná priebežne a obsahuje čas, polohu, typ blesku a odhad prúdov. Ďalej sú tieto informácie zakresľované do mapy alebo ukladané do databáz, z ktorých sú generované obrázky v pravidelných intervaloch. Nevýhodou družicového sledovania je malá spoľahlivosť sledovania bleskov do zeme, ktorá má efektívnosť iba 45 až 70 %.¹⁹



Obr. 2.3 Snímka z družice Suomi-NPP z 15.8.2016, 14:40 SELČ²⁰, na ktorej je zaznamenaná supercela v Slovinsku. Logo SHMU patrí Slovenskému hydrometeorologickému ústavu. [18]

¹⁹ Zrov. ŘEZÁČOVÁ, D., KAŠPAR, M., NOVÁK, P., SETVÁK, M., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, str. 360-366.

²⁰ stredoeurópsky letný čas



Obr. 2.4 Animácia družice TRMM od autora NASA. [19]

2.3 Letecké pozemné radary

Radar (z angl. Radio Direction And Range) je zariadenie schopné merať vzdialenosti a smery cieľov. Poskytuje trojrozmernú informáciu o zrážkovej oblačnosti na veľkej ploche s vysokým rozlíšením. Najužitočnejší je práve pri detekovaní konvektívnych búrok, a tým výrazne zvyšuje presnosť lokalizácie búrok a nepriamo bezpečnosť leteckej dopravy.

Pracuje na princípe vysielania krátkych rýchlo sa opakujúcich impulzov s frekvenciou 100 Hz vo zväzku o šírke približne 1° vysielanom do ovzdušia od horizontu po 30° do výšky 15 km. Emitujú vlny v pásmach 2 až 10 GHz. Anténa radaru rotujúca asi 10 až 20 otáčok za minútu obsahuje vysielateľ ale aj prijímač, ktorý zachytáva odrazy od radarových cieľov, takzvané rádioechá. Pre tieto ciele, charakterizujúce aktuálny stav počasia, je určovaná ich poloha v sférických súradniciach, a to azimut a elevačný uhol. Vzdialenosť je daná časovým intervalom od vyslania signálu k jeho návratu na anténu a smer predstavuje uhol natočenia antény od magnetického severu. Pri dopplerovských rádiolokátoroch sú vzdialenosti cieľa merané pomocou frekvenčného posunu spätne odrazeného signálu. Významná je veľkosť odrazenej energie, ktorá zobrazuje charakter zachyteného cieľa, kedy závisí na jeho ploche, tvare, vzdialenosti a dielektrických vlastnostiach. Dosah týchto zariadení

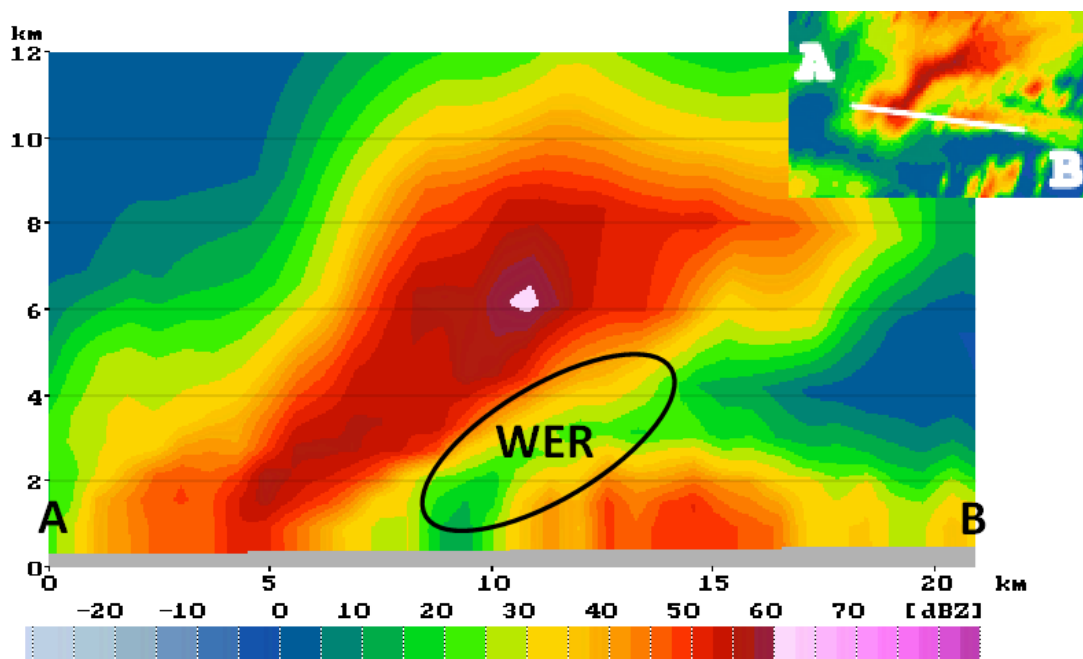
ní je 100 až 300 km s rozlíšením 1 až 2 km. Sú neodmysliteľnou súčasťou každého väčšieho letiska.

Na tomto princípe pracujú taktiež oblastné meteorologické radary, ktoré spolu tvoria sieť, a tým poskytujú zlúčenú rádiolokačnú informáciu. Na Slovensku sa meteorologické rádiolokačné stanice nachádzajú na Malom Javorníku neďaleko od Bratislavy a na Kojšovskej holi približne 16 km západne od Košíc. V Českej republike sú to stanice Brdy na vrchole Praha juhozápadne od mesta Praha a stanica Skalky vo vrcholovej časti Dražanskej vrchoviny v okrese Prostějov.²¹



Obr. 2.5 Meteorologická radarová stanica na Kojšovskej holi. [20]

²¹ Zrov. KRÁČMAR, J., KRŠKA, K., SOBOTA, J., SVATOŠ, V., 2006. *Meteorologie (050 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, str. 210-213.



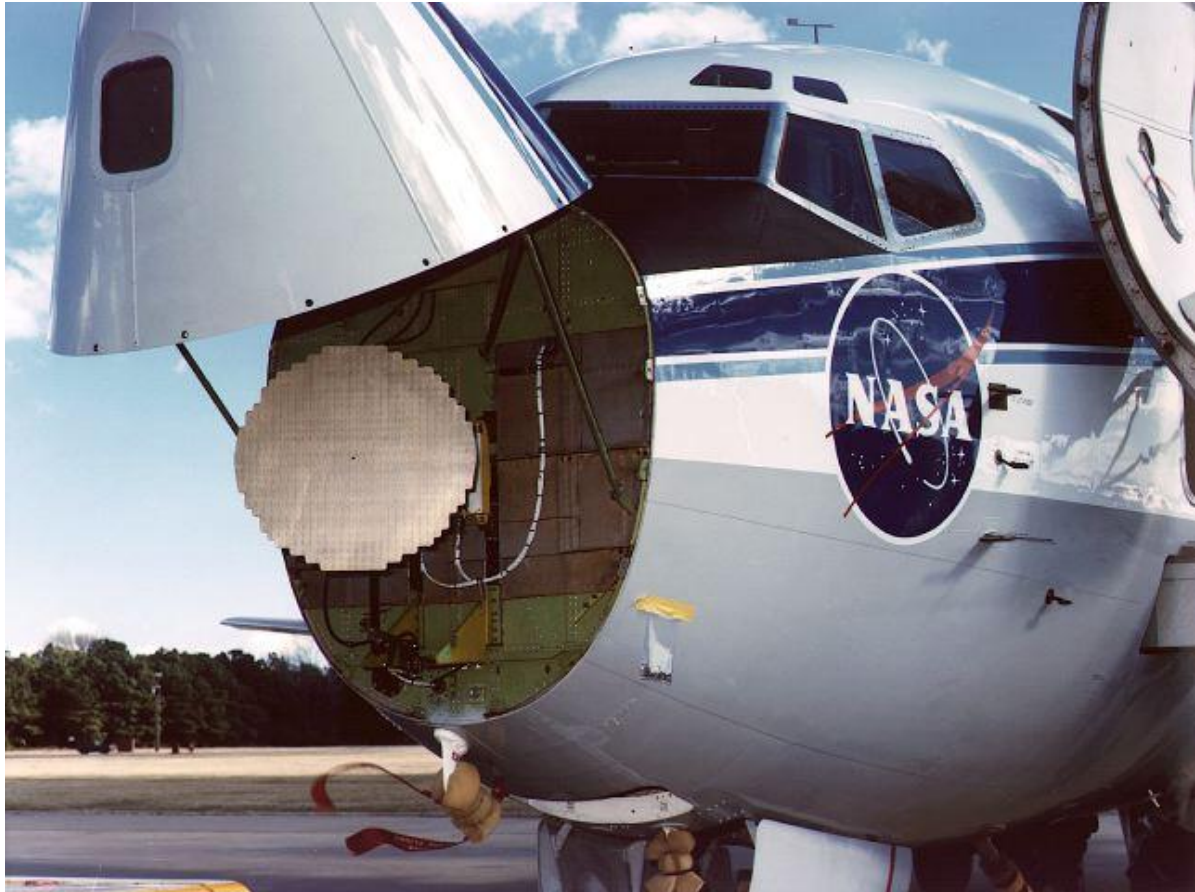
Obr. 2.6 Záznam supercely z Kojšovskej holi 6.5.2015, UTC²². Pri tejto búrke vznikli značné škody na Slovensku, spôsobené krúpami. WER (z angl. Weak Echo Region) vyznačuje miesto so slabou rádiolokačnou odrazivosťou. [21]

2.4 Palubné letecké radary

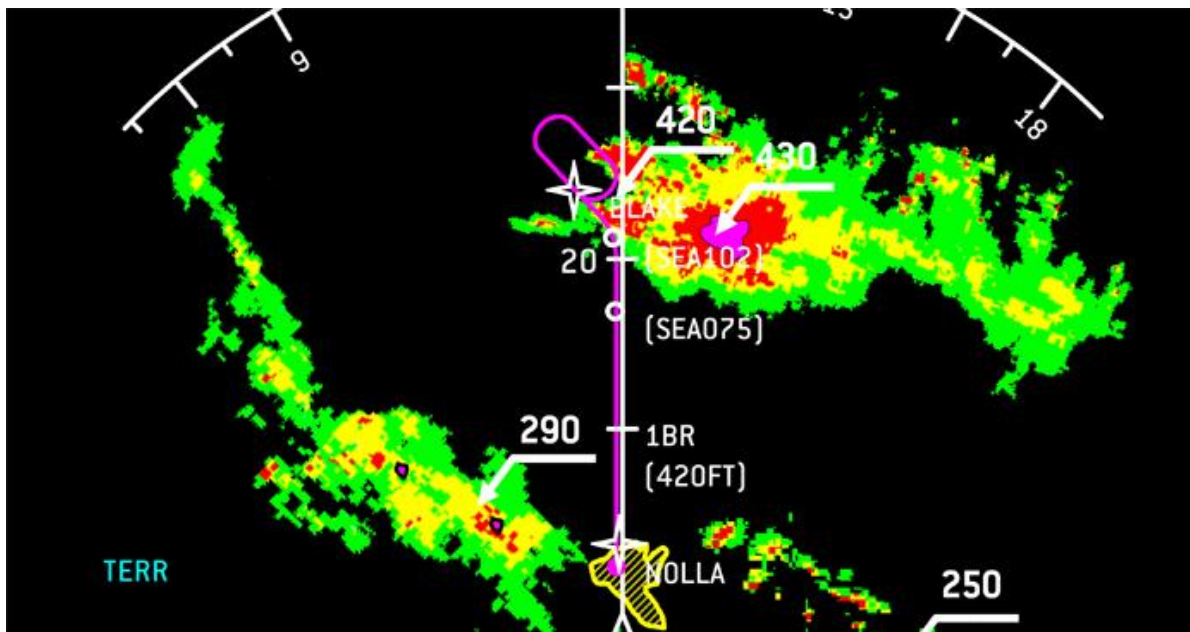
Sú známe ako AWR (z angl. Airborne Weather Radar) a ich hlavnou úlohou je zaznamenávať stav počasia pred lietadlom, ako turbulencie, zrážky a búrky. Ich ďalšou činnosťou je, napríklad, mapovanie terénu, protizrážkový systém, meranie traťovej rýchlosti, uhla znosu atď. Vyžarujú takzvaný ceruzkový lúč v tvare kužeľa s vrcholovým uhlom 3° až 5°, ktorý sa pohybuje v horizontálnej rovine v uhle 60° až 90° s frekvenciou signálu 9375 MHz ± 30 MHz. Anténa je tiež stabilizovaná voči náklonom lietadla, aby smerovala lúč vodorovne pred lietadlo. Funkcia TILT na paneli radaru v kabíne pilotov umožňuje pomocou manuálneho ovládania merať výšku oblačnosti tak, že anténa sa pohybuje vo vertikálnej rovine pomocou ovládača. Na displeji v kabíne sú zobrazované charakteristiky zachytených cieľov rôznymi farbami, u starších modelov čiernobielo. Tento prístroj nedokáže detekovať hmlu, riedku oblačnosť a turbulenciu v bezoblačnom priestore, prípadne v riedkej vysokej oblačnosti CAT (z angl. Clear Air Turbulence). Problémom sú aj slabé odrazy od suchého snehu.²³

²² Koordinovaný svetový čas (z angl. Universal Time Coordinated)

²³ Zrov. VOSECKÝ, S., 2011. *Radionavigace (062 00 00 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, str. 117-126.



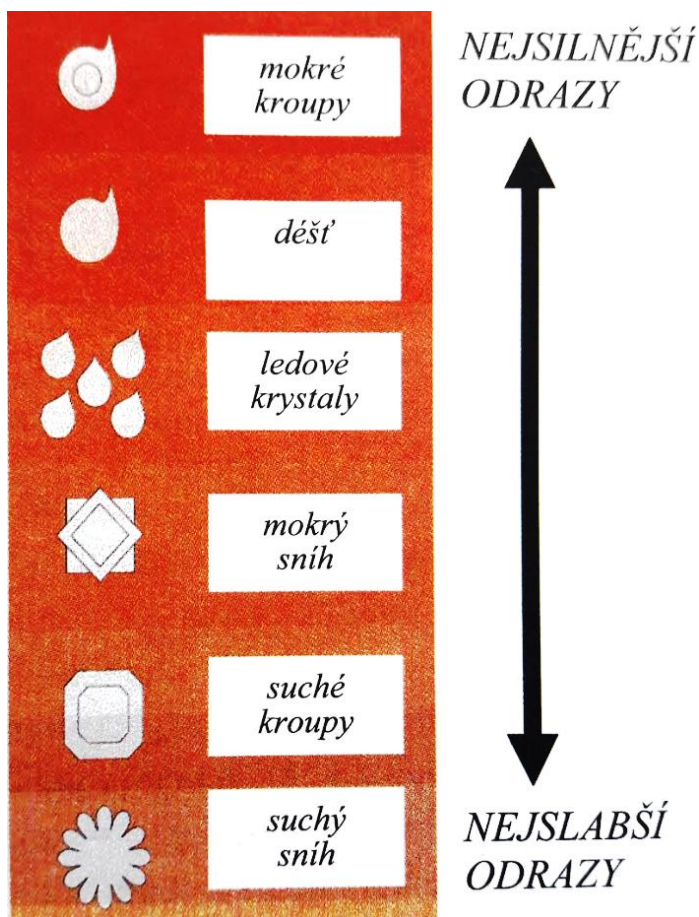
Obr. 2.7 Palubné letecké radiolokátory sa umiestňujú do nosov lietadiel. [22]



Obr. 2.8 Zobrazenie aktuálnej meteorologickej situácie pred lietadlom. [23]

2.5 Radarové ciele

Sú to odrazené signály od hmotných telies v atmosfére. Pre zachytenie cieľa je veľmi dôležitá radarová odrazivosť Z , alebo rádiolokačná odrazivosť meteorologického cieľa Z na ciele mimo oblasť platnosti Rayleighovho rozptylu, resp. na ciele s dielektrickou konštantou odlišnou od vody. Ekvivalentná rádiolokačná odrazivosť Z_e je číselne zhodná s odrazivosťou Z súboru sférických vodných kvapiek, ktorý pri Rayleighovom rozptyle odráža rovnaké množstvo energie. Z_e sa obvykle používa pre tuhé zrážky (sneh, krúpy, ...) a meria sa v dBZ.^[24] Ďalšia tzv. polarimetrická veličina potrebná na správne určenie tvaru cieľa je rozdielová odrazivosť ZDR (z angl. differential reflectivity). Vzhľadom na to, že kvapalné častice v oblakoch v dôsledku odporu vzduchu pri padaní na zemský povrch majú väčší horizontálny rozmer a pevné častice sú približne sféricky rovnaké, sa hodnoty ZDR pohybujú v rozmedzí 0 dBZ až +4 dBZ. Potom tuhé častice ako krúpy, krúpkový alebo sneh nadobúdajú hodnoty okolo 0 dBZ a kvapalné, nesymetrické sa pohybujú v kladných hodnotách dBZ.²⁵



Obr. 2.9 Schopnosť AWR detegovať rôzne typy zrážok. [24]

^[24] Citované z: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*, ČMeS, dostupný na: <http://slovník.cmes.cz>.

²⁵ Zrov. NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., 2016. *Obnova meteorologické radarové sítě CZARD v roce 2015*, Meteorologické zprávy, roč. 69, č. 1, s. 17 – 24.

3 Vplyvy búrkovej činnosti na leteckú dopravu

Medzi najnebezpečnejšie situácie v letectve patria lety v oblastiach s búrkovou činnosťou. Hlavným dôvodom je intenzívna turbulencia pri rýchlosti vzdušných prúdov až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kedy dochádza k silnému kymácaniu lietadla v náklonoch do 60° a zmenách výšky až do 1 700 m. Spôsobuje jeho preťaženie až do limitných hodnôt. Ďalšie nebezpečenstvo vzniká kvôli silnej námraze vo výškach, kde teplota vzduchu klesá pod 0°C . Značné problémy môžu spôsobiť aj údery bleskov do lietadiel, ktoré sú hlavnou témou tejto kapitoly.

3.1 Pravdepodobnosť a následky úderu blesku do lietadla

Výboje v oblakoch sú známym postrachom v letectve. Ohrozujú lety tak vo vnútri, ako aj na periférii búrkového oblaku. Rýchlosť šírenia blesku je $150 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, dynamický tlak tlakovej vlny je až $150 \text{ kg}/\text{m}^2$. Sila toku vnútri kanálu je okolo 200 000 A a teplota plazmy prevyšuje $1\,000^\circ\text{C}$. Pri zásahu lietadla vo väčšine prípadov nedochádza k jeho poškodeniu. Napriek tomu existuje rad prípadov, kedy sa objavili problémy najmä v elektrických sústavách alebo trvalé vychýlenie kompasov. V roku 1963 sa dokonca stala katastrofa, kedy lietadlo Boeing 707 vyčkávané na pristátie vo Filadelfii bolo zasiahnuté bleskom stratilo schopnosť riaditeľnosti, vznielo sa a vybuchlo. Všetci ľudia na palube zahynuli.²⁴

Štatisticky je výskyt bleskov v závislosti na výške vyjadrený na obr. 3.1:



Obr. 3.1 Početnosť bleskov v závislosti na výške. [25]

Výskum preukázal, že pravdepodobnosť úderu blesku do lietadla je v priemere 10^{-2} , čo znamená, že zo 100 bleskov v oblaku len jeden zasiahne stroj. Ak je lietadlo mimo trajektórie bleskov, teda mimo centra s najsilnejšími výbojmi, je pravdepodobnosť podstatne menšia, inak povedané, na 10 000 preletov je zasiahnuté iba raz. Rozdiel medzi hodnotami 10^{-2} a 10^{-4} je podmienený tým, že samo lietadlo je vodičom, ktorý sa preletom oblačnosťou polarizuje, priťahuje k sebe blízko prebiehajúci blesk, a preto v silne polarizovanom poli je väčšia pravdepodobnosť zásahu. Pri zásahu bleskom nadobúda pilot domnienky, ktoré majú za následok, že nebezpečenstvo tohto druhu nesprávne vyhodnotí.



Obr. 3.2 Dopravné lietadlo Airbus A380 zasiahnuté bleskom počas letu. Na obrázku je viditeľné ako blesk vstupuje do lietadla na inom mieste ako lietadlo opúšťa. [26]

Naproti prebiehajúcejmu blesku z oblaku, ak je lietadlo elektricky nabité, vyskočí iskra, ktorá sa spojí s kanálom blesku, a tak vznikne výboj. Ak je dĺžka lietadla I_c , potom iskra vystupujúca z lietadla, ktorá má dĺžku $2I_c$ zapríčini pravdepodobnosť zásahu 99%. Najčastejšie je lietadlo zasiahnuté na trati v cestovnej hladine, občas pri pristávaní, ale ani jeden prípad nebol zaznamenaný v dobe vzletu. K výboju významným spôsobom prispievajú pásy výfukových plynov.

Hlavný kanál blesku má niekoľko vetvení o dĺžke 2 až 3 km, čo opäť zvyšuje pravdepodobnosť zásahu lietadla. Čím ma lietadlo väčšie rozmery, tým je častejšie zasiahnuté. Podľa publikovaných materiálov Národným výskumným výborom letectva v USA je pravdepodobnosť zásahu bleskom do rôznych častí a prístrojov lietadla takáto: rádioantény 27%, krídla 22%, chvostové plochy 21%, trup 15%, vrtuľa 7%, kontrolné otvory 6% a kompas 2%. Najnebezpečnejšie situácie nastávajú pri zásahu bleskom do orgánov riadenia na chvostových plochách lietadla.

Pri nahromadení dostatočného veľkého náboja počas letu málo aktívnymi oblakmi môže tiež nastať výboj v nimbostratoch (Ns).²⁶ Aby k blesku došlo, oblak musí mať tiež

²⁶ Slohovitý zmiešaný oblak značného vertikálneho rozsahu so základňou spravidla v nízkom poschodí oblaku. Je typickým zrážkovým oblakom a býva súčasťou oblačného systému všetkých teplých frontov, predovšetkým však teplého frontu.

dostatočné elektrické pole. Vo veľmi zriedkavých prípadoch dochádza k zasiahnutiu lietadla guľovým bleskom. Skoro vždy zapríčini iba dočasnú traumu z ožiarenia silným svetlom.²⁷

3.2 Pravidlá pre lety v oblasti búrkovej činnosti

Zavedenie správnych pravidiel a postupov za prítomnosti búrok je veľmi dôležité z hľadiska komfortu cestujúcich a bezpečnosti letu. V prvom rade je snaha o vyhnutie sa kumulonimbom, a to minimálne obletením vo vzdialenosti 10 až 50 km v závislosti na výške letu. Ak je nutné letieť nad oblakom, musí byť vertikálna vzdialenosť aspoň 5000 stôp. Búrky by sa nemali nikdy podlietavať, nakoľko spodná hranica kumulonimbu zasahuje do malých výšok nad zemou. Vzlet ani priblíženie proti oblaku nesmie byť nikdy realizované. Môže dôjsť tak k silnej turbulencii, pričom vertikálne poryvy majú 10 až 12 krát väčší vplyv na namáhanie konštrukcie než poryvy horizontálne. Dochádza tiež k strihu vetra až do tej miery, že sa lietadlo stane čiastočne, v horšom prípade úplne neovládateľným. Tieto turbulencie môžu viesť v dôsledku vzniku aeroelastických javov k mechanickému poškodeniu lietadla.

V situácii, kedy nie je možné sa búrke vyhnúť, sa zavádzajú nasledujúce postupy. Piloti sa musia uistiť, že všetci členovia posádky majú zapnuté bezpečnostné pásy, a že sú zaistené všetky voľné predmety. Musia rozsvietiť signalizáciu bezpečnostných pásov pasažierov a skontrolovať, že sú všetci pripásaní. Jeden pilot sa musí plne venovať riadeniu letu a druhý musí nepretržite sledovať letové, navigačné a motorové prístroje. Je nutné, aby posádka sledovala obrazovku radaru a vyhýbala sa oblastiam s krupobitím, ktoré by mohlo lietadlo vážne poškodiť.



Obr. 3.3 Poškodený letún po prelete oblasťou s krupobitím. [27]

²⁷ Zrov. BARANOV, A. M., SOLONIN, S. V., 1975. *Aviacionnaja meteorologija*. Leningrad: Gidrometeoizdat. Str. 392 d'.

Úder blesku do trupu identifikuje posádka silným zábleskom, ktorý ich môže dočasne oslepiť, a to hlavne v noci. Niekedy sú na povrchu lietadla pozorované malé iskrenia, teda Eliášov oheň. Bývajú sprevádzané akustickým praskaním alebo statickým rušením v rádiovom prijíme. Piloti sú povinní skontrolovať správnu činnosť rádiokomunikačných navigačných prostriedkov a meteorologického radaru. Musia zapísať úder blesku do technického denníka lietadla a podať hlásenie prevádzkovateľovi. Na zemi je potom vykonaná prehliadka stroja za účelom zistenia možných škôd a kalibrácia magnetického kompasu.

Predpisy stanovujú zákaz plnenia, resp. odsávania paliva z lietadiel počas búrky, pričom začiatok a koniec búrky stanovuje letecká meteorologická služba na danom letisku.²⁸

3.3 Ochranné prvky lietadiel proti úderu blesku

Údery bleskov do lietadiel, obzvlášť do dopravných, sú pomerne časté. Preto je dôležité, aby konštruktéri počítali s týmto meteorologickým javom. Celokovové konštrukcie, ktoré sú stále najbežnejšie, znášajú elektrické výboje atmosféry pomerne dobre, keďže fungujú ako Faradayova klieť. Princíp kovovej kostry (klieťky) spočíva v sústreďení elektrického náboja na jej okraji. Vnútro je teda spoľahlivo chránené. Môže však, ako je to už vyššie spomenuté, spôsobiť problémy s elektrickými zariadeniami a kompasmi v lietadle.



Obr. 3.4 Následky úderu blesku do trupu lietadla. [28]

²⁸ Zrov. *Provozní příručka Českých aerolinií - část A – všeobecná, verze 1.1*, 2011. Praha: ČSA. Str. 25-29.

Omnoho horšie sú na tom kompozitné materiály, ktoré sa v dnešnej dobe dostávajú do popredia. Venuje sa im značná pozornosť a realizujú sa početné praktické skúšky a merania na zásahy bleskom. Tieto materiály nie sú schopné viesť elektrický prúd, pretože sú málo vodivé alebo úplne nevodivé. Používajú sa hlavne sklené lamináty a uhlíkové kompozity. Ako riešenie problému, aby blesky neprechádzali elektroinštaláciou a elektronikou, sú do nich integrované rôzne vodivé materiály, ako napríklad hliníkové fólie, medené siete alebo vodivé drôty, a to so snahou pokrytia celého lietadla, aby nevznikali medzery, ktoré by potom predstavovali rizikové miesta. Tiež je veľmi dôležité správne uzemnenie, tienenie elektroniky proti elektromagnetickým poliam a potlačanie prúdových rázov ochrannými zariadeniami.²⁹

²⁹ Zrov. HLINKA, J., *Zkoušení přístrojového vybavení*, Studijní podklady Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT.

Záver

V tejto práci je podrobne popísaný kumulonimbus najmä z hľadiska jeho elektrickej činnosti, ale aj jeho štádia, štruktúra a sprievodné javy. Ďalej sú rozobraté niektoré zriedkavé a zvláštne typy elektrometeorov. Nasledujúce strany sú venované lokalizácií a predpovediam búrkovej činnosti a napokon sú analyzované vplyvy a následky búrok na leteckú dopravu spolu s postupmi pre vyhýbanie sa týmto oblastiam a letom v nich.

Jednotlivé poznatky spracovaného textu pomáhajú pochopiť pilotom, prípadne iným záujemcom problematiku najmohutnejších oblakov na Zemi. Téma by mala zároveň slúžiť na prehĺbenie znalostí z elektrických javov spojených s búrkami, s cieľom zvýšiť bezpečnosť, a tým aj atraktivitu leteckej dopravy. Vďaka dnešným možnostiam a znalostiam v tejto sfére sme schopní sa lepšie prispôbovať počasiu, čo ponúka možnosť zvýšeného komfortu nielen pri cestovaní, ale aj v každodennom živote.

Búrky môžu predstavovať pre leteckú dopravu celý rad problémov. Ako komplexný meteorologický jav prinášajú prekážky pre priebeh letov v ich blízkosti a nebezpečné situácie v prípade, ak sa lietadlo ocitne v ich vnútri. Preto je potrebné tejto skutočnosti venovať veľkú pozornosť a podrobne poznať princípy procesov v búrkovej oblačnosti, k čomu by mala byť táto práca prínosom.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] BARANOV, A. M., SOLONIN, S. V., 1975. *Aviacionnaja meteorologija*. Lenin-grad: Gidrometeoizdat. 285 s.
- [2] BEDNÁŘ, J., 1989. *Pozoruhodné jevy v atmosféře: atmosférická optika, akustika a elektřina*. Praha: Academia. 240 s.
- [3] DVOŘÁK, P., 2010. *Letecká meteorologie: učebnice meteorologie pro piloty kvalifikace UL, GLD, PPL, CPL, ATPL a všechny ostatní, kteří potřebují odborné znalosti letecké meteorologie*. Cheb: Svět křídel. 481 s.
- [4] ESTIENNE, P., GODARD, A., 1970. *Climatologie*. Paris-5^e: Librairie Armant Colin. 367 s.
- [5] HLINKA, J., *Zkoušení přístrojového vybavení*, Studijní podklady Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT.
- [6] *Klíma a bioklíma Bratislavy*, 1979. Bratislava, Veda. 272 str.
- [7] KRÁČMAR, J., KRŠKA, K., SOBOTA, J., SVATOŠ, V., 2006. *Meteorologie (050 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 292 s.
- [8] *Let za ztížených povětrnostních podmínek*, 1963. Praha: Naše vojsko. 311 s.
- [9] LEXMANN, E., 1986. *Meteorológia pre športového pilota*. Bratislava: Alfa. 216 s.
- [10] *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*, ČMeS, dostupný na: <http://slovník.cmes.cz> .

- [11] *Meteorologie pro sportovní letce*. 1963. Praha: Naše vojsko. 268 s.
- [12] NEDELKA, M., 1984. *Prehľad leteckej meteorológie*. Bratislava: Alfa. 224 s.
- [13] NEDELKA, M. a kol., 1998. *Slovenský letecký slovník terminologický a výkladový*. Bratislava: Magnet-Press Slovakia. 494 s.
- [14] NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016. *Obnova meteorologické radarové sítě CZARD v roce 2015*, Meteorologické zprávy, roč. 69, č. 1, s. 17 – 24.
- [15] *Provozní příručka Českých aerolinií - část A – všeobecná, verze 1.1*, 2011. Praha: ČSA.
- [16] ŘEZÁČOVÁ, D., KAŠPAR, M., NOVÁK, P., SETVÁK, M., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia. 574 s.
- [17] SCHMIDT, M., 1980. *Meteorológia pre každého*. Bratislava: Alfa. 256 s.
- [18] STRACHOTA, J., 1983. *Lokalizace a identifikace nebezpečných letních konvektivních jevů meteorologickým radiolokátorem MRL-2*. Meteorologické zprávy, roč. 36, č. 5, s. 147 – 157.
- [19] VOSECKÝ, S., 2011. *Radionavigace (062 00 00 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 245 s.

Zoznam použitých skratiek

| | | |
|-------|---|---|
| A | ampér | ampere |
| angl. | anglicky | english |
| AWR | palubný meteorologický radar | airborne weather radar |
| CAT | turbulencia v bezoblačnom priestore | clear air turbulence |
| Cb | kumulonimbus | cumulonimbus |
| Cu | kumululus | cumulus |
| dBZ | radarová odrazivosť | disambiguation |
| dĎ. | dĎalšie | next |
| g | gram | gram |
| GHz | gigahertz | gigahertz |
| GPS | Globálny lokalizačný systém | Global Positioning System |
| hPa | hektopascal | hektopascal |
| Hz | hertz | hertz |
| ICAO | Medzinárodná organizácia pre civilné pre civilné letectvo | International Civil Aviation Organisation |
| K | kelvin | kelvin |
| kA | kiloampér | kiloampere |
| km | kilometer | kilometre |
| LIS | - | Lightning Imaging Sensor |
| m | meter | meter |
| METAR | pravidelná letecká meteorologická správa | aeorodrome routine meteorological report |
| MHz | megahertz | megahertz |
| Ns | Nimbostratus | Nimbostratus |
| obr. | obrázok | picture |
| s | sekunda | second |

| | | |
|--------------|---|---|
| SELČ | stredoeurópsky letný čas | Central European Summer Time |
| SHMÚ | Slovenský hydrometeorologický ústav | - |
| SIGMET | výstražná meteorologická informácia | significant meteorological information |
| str. | strana | page |
| tab. | tabuľka | table |
| TCU | kumulus kongestus veľkého vertikálneho rozsahu | towering cumulus |
| TRMM | - | Tropical Rainfall Measuring Mission |
| resp. | respektíve | - |
| UTC nated | koordinovaný svetový čas | Universal Time Coordi- |
| VKV | veľmi krátke vlny | - |
| WER | - | weak echo region |
| Z | odrazivosť vodných kvapiek | - |
| ZDR | rozdielová odrazivosť | - |
| Ze | odrazivosť tuhých zrážok | - |
| zrov. | parafrázované | - |

Zoznam použitých obrázkov, tabuliek a grafov

- [1] Obr. 1.1 Kumulus.
Dostupné z:
<https://mtmuchmore.wordpress.com/2013/05/02/day-123-something-beautiful-gentle-giants/>
- [2] Obr.1.2 Výstupné a zostupné prúdy vzduchu v kumulonimbe.
Zdroj:
SCHMIDT, M., 1980. *Meteorológia pre každého*.
- [3] Obr. 1.3 Vývojové štádia kumulonimbu: (a) štádium kumulu, (b) štádium zrelosti, (c) štádium rozpadu.
Dostupné z:
<http://sco-web1.meas.ncsu.edu/climate/tstorms/lifecycle.php>
- [4] Obr. 1.4 Rozloženie elektrického náboja v oblaku a na zemskom povrchu.
Dostupné z:
https://technet.idnes.cz/zasah-bleskem-blesk-vyboj-pocasi-bourka-fc5-/tec_technika.aspx?c=A170629_123654_tec_technika_vse
- [5] Obr. 1.5 Popis priebehu blesku.
Dostupné z:
<http://docplayer.cz/43188904-Vysoke-uceni-technicke-v-brne.html>
- [6] Obr. 1.6 Tvar a farby hrotových výbojov v závislosti na polarite v hortoch (vľavo kladne polarizovaný, vpravo záporne polarizovaný).
Zdroj:
SCHMIDT, M., 1980. *Meteorológia pre každého*.
- [7] Obr. 1.7 Jednotlivé bunky (cely) multiceľárnej búrky. Podrobnejší popis gust frontu je uvedený v podkapitole 1.3.
Dostupné z:
https://courseware.e-education.psu.edu/courses/meteo361/www.e-education.psu.edu/meteo361/15_p5.html

- [8] Obr. 1.8 Supercelárna búrka v americkom štáte Oklahoma, ktorý je známy častým výskytom veľmi silných búrok sprevádzaných tornádami.
Dostupné z:
<http://twistedifter.com/2014/10/supercell-near-panhandle-oklahoma/>
- [9] Tab. 1.1 Dlhodobý priemer počtu dní s búrkou v jednotlivých mesiacoch a za rok v Bratislave a v Prahe (1951-1970).
Autor.
- [10] Obr. 1.9 Schéma supercely s naznačenou oblasťou mezocyklóny.
Dostupné z:
<https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/supercela-26.5.2016/>
- [11] Obr. 1.10 Malý prepád vzduchu a jeho vertikálny a horizontálny rozsah.
Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/2762075/>
- [12] Obr. 1.11 Postupný vývoj tornáda (zľava doprava).
Dostupné z:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_of_a_Tornado.jpg
- [13] Obr. 1.12 Polárna žiara nad Nórskom. Na obrázku je možné pozorovať typické špirálovité stáčanie molekúl elektricky nabitých plynov.
Dostupné z:
<http://www.suntrek.org/blog/the-northern-lights-aurora-borealis>
- [14] Obr. 1.13 Nadoblačné blesky zachytené pri búrke nad mestom Amarillo v Texase 16. mája 2016.
Dostupné z:
<https://imgur.com/gallery/RRp6PkG>
- [15] Obr. 1.14 Vznik guľového blesku podľa Meissera. 1 a 2 - silné proti sebe smerujúce prúdy vzduchu. P – sily tlaku vzduchu z okolia. R – odstredivé sily vyvolané rotačným pohybom.
Zdroj: SCHMIDT, M., 1980. *Meteorológia pre každého*.
- [16] Obr. 2.1 Schématické znázornenie metódy určenia doby príchodu signálu.
Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/4114985/>

- [17] Obr. 2.2 Schématické znázornenie metódy určenia smeru prichádzajúceho signálu.
Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/4114985/>
- [18] Obr. 2.3 Snímka z družice Suomi-NPP z 15.8.2016, 14:40 LSEČ, na ktorej je zaznamenaná supercela v Slovinsku. Logo SHMU patrí Slovenskému hydrometeorologickému ústavu.
Dostupné z:
<http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=740>
- [19] Obr. 2.4 Animácia družice TRMM od autora NASA.
Dostupné z:
<http://www.astro.cz/clanky/kosmonautika/americka-meteorologicka-druzice-zahajuje-nekontrolovatelny-pad-z-obezne-drahy.html>
- [20] Obr. 2.5 Meteorologická radarová stanica na Kojšovskej holi.
Dostupné z:
<https://obecjasov.sk/turista/turistika/kojsovska-hola/>
- [21] Obr. 2.6 Záznam supercely z Kojšovskej holi 6.5.2015, UTC. Pri tejto búrke vznikli značné škody na Slovensku, spôsobené krúpami. WER (z angl. Weak Echo Region) vyznačuje miesto so slabou rádiolokačnou odrazivosťou.
Dostupné z:
<http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=615>
- [22] Obr. 2.7 Palubné letecké radiolokátory sa umiestňujú do nosov lietadiel.
Dostupné z:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airborne_weather_radar_NASA.jpg
- [23] Obr. 2.8 Zobrazenie aktuálnej meteorologickej situácie pred lietadlom.
Dostupné z:
https://www.rockwellcollins.com/Products_and_Services/Defense/Avionics/Radar/R TA-4100.aspx

- [24] Obr. 2.9 Schopnosť AWR detegovať rôzne typy zrážok.
Zdroj:
VOSECKÝ, S., 2011. *Radionavigace (062 00 00 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM.
- [25] Obr. 3.1 Početnosť bleskov v závislosti na výške.
Dostupné z:
HLINKA, J., *Zkoušení přístrojového vybavení*, Studijní podklady Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT.
- [26] Obr. 3.2 Dopravné lietadlo Airbus A380 zasiahnuté bleskom počas letu. Na obrázku je viditeľné ako blesk vstupuje do lietadla na inom mieste ako lietadlo opúšťa.
Dostupné z:
https://www.weather.gov/zme/safety_ts
- [27] Obr. 3.3 Poškodený letún po prelete oblasťou s krupobitím.
Dostupné z:
https://www.weather.gov/zme/safety_ts
- [28] Obr. 3.4 Následky úderu blesku do trupu lietadla.
Zdroj:
HLINKA, J., *Zkoušení přístrojového vybavení*, Studijní podklady Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT.