

TVORBA BLESKOVÝCH KANÁLOV A PRIESTOROVÉ VYROVNANIE NÁBOJOV

Jaroslav Patúc, Žilina, Slovenská republika, jaropat@gmail.com

Creation of lightning channels and spatial settlement charges. The aim of this analysis is to provide a conceptual basis for the numerical calculation of the planetary circulation of electrical charges from a position of electrodynamics, plasma physics and atmospheric physics of lightning structure. The sole task of lightning structure analysis is to analyse the spatial equalization (compensation) electric charge and thus the electrical potential difference between two regions of space. For creating the electrical potential difference, other processes may be used, in our case „Atmospheric Dynamics“. This analysis deals with the physical mechanisms for the initialization of lightning inside thunderclouds and after reaching a sufficient size of the electric field (electric voltage background), its visibility, and its spread for many tens of kilometres. Although the mechanism of the Transient Luminous Events (TLEs) applies, the same rules also apply to electrodynamics in an environment of the increasing ionization of air as height increases.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: balík bleskov (koherentná množina elektrických výbojov) – mechanizmus kompenzačný – inicializácia balíka bleskov – kanál blesku iónový – vzdialenosť iskry preskoková – blesk temný – elektrické napätie pozadia – ohnisko blesku

KEYWORDS: Package flashes (coherent set of electrical discharges) – compensation mechanism – initialization package of lightning – lightning ion channel – flashover distance sparks – dark lightning – electrical voltage background – lightning-centre

1. ZÁKLADNÝ PRINCÍP ANALÝZY, KOMPENZAČNÝ MECHANIZMUS

Vedecký záujem o blesky, a s tým spojený výskum sa začal omnoho skôr než v polovici 20. storočia. T. S. Townsend (1915) vykonal pokusy so vzduchovým kondenzátorom. Po preskoku elektrickej iskry dôjde k vyrovnaniu, kompenzácii elektrických nábojov na platniach kondenzátora a bývalý plazmový kanál sa skladá z neutrálnych molekúl, teda už po rekombinácii nábojov neexistuje. Inak je to v ovzduší pri preskoku elektrickej iskry medzi dvoma oblasťami rozdielnych nábojov. Tu, po rozpade plazmového kanálu iskry, funkciu vyrovnania elektrických nábojov plní kompenzačný mechanizmus (kap. 2.3), usporiadanie aniónov a katiónov pozdĺž kanálu iskry podľa zákonov elektrodynamiky (Červeň 2005; Jirků 2010). Možno konštatovať, že kanálom výboja sa v zlomku sekundy premiestnia kompenzačné elektrické náboje bez praktickej zmeny polohy molekúl vzduchu. Spotrebuje sa energia, ktorú vykonal do tej chvíle pohyb vzduchu (atmosférická dynamika (Bařka 2014)) pri premiestňovaní elektrických nábojov, molekúl vzduchu. Tieto nové náboje sa stanú

predmetom triediaceho mechanizmu pri inicializácii blesku (kap. 3.1) a vzniku podmienky preskoku ďalších iskier (kap. 2.2). Tak vzrastá množstvo nábojov a pri búrke dôjde k vzniku rozsiahlej viditeľnej bleskovej aktivity na oblohe (kap. 3.2), aby sa vyrovnal priestorový náboj (kap. 3.6).

Proces na zrušenie elektrických nábojov v ovzduší sa odohráva medzi dvoma oblasťami v oblaku s rozdielnymi nábojmi, ktoré pôsobia na seba silovo (Gaussov a Coulombov zákon) (Červeň 2005). Vlastnosti molekulárneho sveta sa stávajú zrejmy pri sledovaní pohybu elektrických nábojov. Kladné a záporné náboje (ióny) sa prejavujú elektrickým potenciálom U_{1pn} a U_{2pn} v bodoch priestoru 1 a 2 (princíp superpozície) a potenciálnou energiou W_{ppn} . Rozdiel elektrických potenciálov, vektor U_{pn} medzi bodmi 1 a 2 pre budúci n -tý preskok iskry (6) a potenciálny (náhradný) elektrický náboj Q_{ppn} (náhrádza silový účinok bodových nábojov Q_j , Q_m) je:

$$U_{pn} = U_{1pn} - U_{2pn} = \sum k_m \cdot (Q_m / R_{1m}) \cdot r_{1m} - \sum k_m \cdot (Q_m / R_{2m}) \cdot r_{2m}, \quad (1)$$

$$W_{ppn} = (\sum \sum k_m \cdot ((Q_j \cdot Q_m) / R_{jm})) / 2, \\ \text{pričom } j \leq m \\ \text{a } j! = m, \quad (2)$$

$$W_{ppn} = |U_{pn}| \cdot Q_{ppn}, \\ \text{potom } Q_{ppn} = W_{ppn} / |U_{pn}|, \quad (3)$$

kde k_m je konštanta úmernosti v prostredí, v ktorom sa náboj Q_m nachádza; r_{1m} a r_{2m} sú jednotkové vektory v bodoch 1 a 2 smerujúce podľa znamienka od náboja Q_m ; R_{1m} je vzdialenosť náboja Q_m od bodu 1 a R_{2m} od bodu 2; R_{jm} je vzájomná vzdialenosť medzi nábojmi Q_m a Q_j ,

Elektrická pevnosť E_{pn} alebo dielektrická pevnosť je fyzikálny pojem vyjadrujúci odolnosť materiálu, v našom prípade vzduchu, voči elektrickému poľu. Preskok elektrickej iskry priamo závisí na nehomogenite priestorových nábojov Q_m , intenzite elektrického poľa, rozdieli elektrických potenciálov (1) medzi bodmi 1 a 2. Po splnení podmienky (6) a preskoku iskry, premiestňujú sa, kmitajú prúdy elektrónov (nábojov) pozdĺž plazmového kanálu iskry. V tom rytme sa mení aj intenzita elektrického a magnetického poľa v okolí, čo môže evokovať vytváranie ďalších paralelných alebo vetvených kanálov iskier. Rozpadom plazmového kanálu iskry na iónový (kap. 2.3), náboj Q_{pne} (10) sa stane prírastkom v bodoch priestoru 1 a 2 nábojov Q_m a zruší sa tým silové pôsobenie nábojov v bodoch 1 a 2 (kompenzačný mechanizmus).

Uvedené boli základné vzťahy z elektrodynamiky pre tvorbu bleskových kanálov v elektricky nehomogénnom atmosférickom prostredí. Zostáva rozpracovať a určiť (zistiť) zjednodušujúce okrajové podmienky riešenia a vytvoriť nástroje pre spracovanie vytvorených modelov (obr. 1). Takou okrajovou podmienkou, pri vzdialenosti d_{12} bodov 1 a 2 v priestore pre výber množiny nábojov Q_m (1) a (2) je:

$$R_{1m} \gg d_{12} \text{ alebo } R_{2m} \gg d_{12}, \\ \text{alebo } |R_{1m} - R_{2m}| \ll d_{12}. \quad (4)$$

Vplyv takýchto nábojov na potenciály U_{1pn} a U_{2pn} je prakticky rovnaký, takže ich môžeme z množiny nábojov Q_m vyradiť.

Ako je napísané v mnohých prácach, napr. Ondrášková et al. (2008), búrková činnosť je batériou, ktorá zabezpečuje funkciu „globálneho zemského kondenzátora“. Sú to blesky udierajúce do zeme a nadoblačné elektrické výboje, ktoré sú tiež súčasťou balíka bleskov. Planetárna cirkulácia elektrických nábojov je takto umožnená dvoma javmi: vertikálnou zmenou elektrickej vodivosti atmosféry a búrkovými zdrojmi. Vyjadrením toho („Ohmového zákona na oblohe“) je blokovaná multi schéma na obr. 1.

Na obr. 1 je náhradný elektrický obvod, multi schéma (1 až k časovo nesúvisiacich balíkov bleskov, prebiehajúcich v atmosfére v rôznych oblastiach zeme), budiacimi zdrojmi napätia U_z , experimentálne určenými a plávajúcimi voči zemi a globálnym napätím sférického zemského kondenzátora U_g (kap. 4). Pre účely programovania a simulácie na počítači (kap. 5) je potrebné sa pozeráť na jednotlivé prvky obvodu ako na bloky, v ktorých sa odohrávajú jednotlivé dynamické procesy v atmosfére Zeme a v časových okamžikoch je na výstupe bloku reálna hodnota prvku jednotlivého dynamického procesu.

Virtuálny kondenzátor C_p sa nabíja cez impedancie Z_{c1} (kladný náboj) a Z_{c2} (záporný náboj) zo zdroja U_z (kap. 3.1). Energiou zdroja U_z je mohutné vertikálne prúdenie vzduchu pri tvorbe búrkových oblakov, ktoré spôsobuje vznik iónov

a ich triedenie podľa polarít. Napätie $|U_{pl}|$ vektora elektrického napätia pozadia U_p medzi platňami kondenzátora C_p je plávajúce voči zemi. Kondenzátor C_p sa počas preskoku iskry vybíja cez impedanciu Z_{cc} , ktorá simuluje prostredie pre vnútro-oblačné blesky (CID) (kap. 3.2 a 3.3). Počas balíka bleskov sa sférický zemský kondenzátor nabíja cez impedancie Z_{cg} a Z_{tle} a neustále vybíja cez impedanciu Z_{gg} . Impedancia Z_{cg} simuluje prostredie pre blesky oblak – zem (kap. 3.4) a Z_{tle} pre nadoblačné blesky (kap. 3.5).

Pri napätí $|U_{pl}| \geq U_{pi}$ (5) na kondenzátore C_p dôjde k preskoku iskry (kap. 5.1). Toto je príklad pre vyrovnanie nábojov medzi platňami virtuálneho kondenzátora C_p . Nabíjanie kondenzátora cez impedancie Z_{c1} a Z_{c2} znovu pokračuje a do preskočenia ďalšej iskry sa stihnú katióny a anióny medzi platňami kondenzátora C_p rekombinovať, alebo prúdením vzduchu roztriediť podľa polarít (kap. 3.1). Vplyvom prúdenia vzduchu sa rozpadajú predchádzajúce výbojové kanály iskry a vznikajú nové. V príklade je uvedené, že impedancia simuluje prostredie pre preskok iskry (blesku). Táto možnosť vychádza z doterajších laboratórných zistení chovania sa molekúl plynu medzi elektródami v prostredí pri rôznych napätiach, tlakoch, teplote a žiarení pozadia (Hippel 1963).

2. BALÍK BLESKOV

2.1 Inicializácia balíka bleskov

Vybudovanie vetveného iónového kanálu tzv. temného blesku (Rozhlas 2013a) (vizuálne nepostrehnuteľného) môže nastať, ak hodnota elektrického napätia pozadia $|U_{pl}|$ vektora U_p (1) medzi koncovými bodmi budúceho kanálu spätného výboja je väčšia ako kritické (inicializačné) elektrické napätie pozadia U_{pi} :

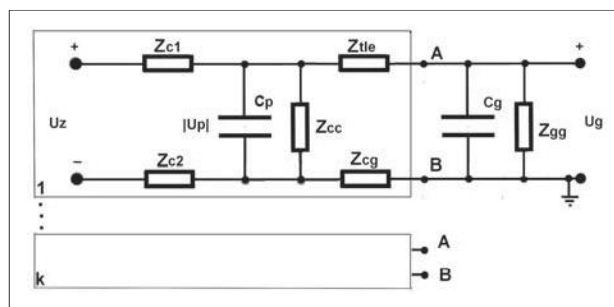
$$|U_{pl}| > U_{pi}. \quad (5)$$

2.2 Preskok elektrickej iskry v priestore

Otázkou je, aký fyzikálny mechanizmus ovláda rôzne typy vodcovských výbojov (leaders) šíriaceho sa blesku (Dwyer, Uman 2014) (negative stepped, first positive, negative dart, negative dart-stepped, negative dart-chaotic) medzi oblakom a zemou, medzi oblakom a ionosférou a vnútri oblaku.

Elektrická pevnosť suchého vzduchu je asi 30 kV.cm^{-1} (pri zemi) a klesá s výškou. Potom pri rovnakom lokálnom napätí pozadia $|U_{pn}|$ vzniká dlhšia iskra (6), a tým väčšie periodické prepätie (kladné alebo záporné) na koncoch kanálu iskry voči okoliu. Pri väčšom množstve voľných pozdĺžne kmitajúcich elektrónov, a možnosť, i keď spočiatku chaotickeho a dočasného (kap. 3.1) spájania (vetvenia) nových kanálov iskry (blesku).

Preskok začínajúci od kladnejšej nehomogenity smerom k zápornejšiemu čelu blesku pri vytváraní novej vetvy blesku



Obr. 1 Planetárna cirkulácia elektrických nábojov.

Fig. 1. The planetary circulation of electrical charges.

sa označuje ako „ústreťový výboj“ (opposite-moving discharge, od zeme „upward-moving discharge“). Preskok pri existujúcom iónovom kanáli sa označuje „tmavý výboj“ (dart discharge) a pri plazmovom kanáli „spätňý výboj“ (return discharge). Pri vetvení bleskových kanálov sa používa označenie „záporný postupujúci vodca“ (negative stepped leader), ktorý pozostáva z následných udalostí: tmavý výboj + spätňý výboj + ústreťový výboj. Preskok začínajúci od kladnejšieho čela vetvy blesku (záporný náboj je na opačnom konci vetvy) smerom k zápornejšej nehomogenite, pri vytváraní novej vetvy blesku, sa označuje ako „kladný postupujúci vodca“ (positive stepped leader). Tento preskok je skôr predlžovanie existujúceho kanálu iskry pri pozdĺžnom kmitaní elektrónov v kanáli iskry.

Aká môže byť maximálna hodnota napätia pozadia $|U_{pn}|$, rozdielu elektrických potenciálov vektora U_{pn} medzi dvoma oblasťami, bodmi v priestore (1)? Dané je to preskokovou vzdialenosťou D elektrickej iskry (ústreťového výboja), závislej na elektrickej pevnosti E_{pn} v danom mieste prostredia:

$$|U_{pn}| > E_{pn} \cdot D. \quad (6)$$

Po splnení podmienky pre preskok iskry sa začne vytvárať plazmový kanál iskry. Novovytvorená elektrická iskra (výboj) v priestore je v podobe elektrického dipólu so získanou počítačnou energiou W_{ppn} úmernou hodnote dostatočnému spádu elektrického potenciálu $|U_{pn}|$ pre preskok elektrickej iskry pri elektrickom náboji Q_{ppn} (3), ktorý sa presunie budúcim kanálom iskry:

$$W_{ppn} = Q_{ppn} \cdot |U_{pn}|. \quad (7)$$

Vytvorenie elektrickej iskry v priestore prebehne lavínovou premenou statickej energie W_{ppn} na dynamickú W_{ppn} pri veľkej nadobudnutej rýchlosti elektrónov (porovnanie výstrelu po uvoľnení praku) vo vytvorenom plazmovom kanáli elektrického dipólu. Tento prechodový jav je sprevádzaný vyžarovaním vysokofrekvenčnej energie v podobe X alebo dokonca gama žiarenia (Rozhlas 2013a; Dwyer, Uman 2014).

Pred preskokom iskry pri iónovom kanáli je medzi koncami kanálu napätie U_{jn} . Energia W_{ppn} (7) pri napätí $|U_{jn}|$ pred preskokom tmavého výboja v iónovom kanáli sa rovná energii W_{pn} (10):

$$Q_{ppn} \cdot |U_{jn}| = Q_{pne} \cdot |U_{kn}|.$$

Potom pri následnom spätňom výboji sa prenesie v plazmovom kanáli príspevkový náboj Q_{pnn} :

$$Q_{pnn} = (|U_{kn}| / |U_{jn}|) \cdot Q_{pne} = G_{jn} \cdot Q_{pne}. \quad (8)$$

G_{jn} je stupeň ionizácie n -tého iónového kanálu iskry, definovaného: $G_{jn} = E_{pn} / E_{jn}$, kde E_{jn} je elektrická pevnosť samotného iónového kanála a E_{pn} je elektrická pevnosť prostredia v okolí iónového kanála. Pri predpoklade, že $E_{pn} \gg E_{jn}$, značne sa zvýši príspevkový náboj Q_{pnn} v plazmovom kanáli tmavého a spätňého výboja oproti náboju Q_{ppn} pri tvorbe pôvodného kanálu ústreťového výboja.

2.3 Kompenzačný mechanizmus, spôsob rozpadu plazmového kanálu výboja

Elektrický dipól po preskoku iskry je silne vodivý plazmový kanál elektrického výboja, v ktorom prebieha tlmený kmitavý pohyb elektrónov spočiatku medzi oboma koncami dipólu. Plazmový kanál sa mení na iónový zo strany zápornejšieho elektrického potenciálu U_{pn} pozadia (elektrónový oblak v plazmovom kanáli je priťahovaný viac na stranu

kladného napätia U_{pn} pozadia). Nakoniec vznikne neviditeľný iónový kanál elektrického výboja, kde sú anióny a kationy usporiadané pozdĺž kanálu tak, aby kompenzovali pôvodné napätie U_{pn} pozadia elektrického dipólu pred preskokom elektrickej iskry, teda zápornejší bude koniec kanálu na strane kladnejšieho elektrického potenciálu U_{pn} pozadia.

Pri iónovom kanáli môžeme matematicky vyjadriť napätie U_{sn} na elektrickom dipóle ako rozdiel dĺžok vektorov, ktoré majú navzájom opačný smer:

$$U_{sn} = |U_{pn}| - |U_{kn}|, \quad (9)$$

kde $|U_{kn}|$ je hodnota kompenzačného napätia v iónovom kanáli. Presunutý ekvivalentný náboj Q_{pne} v kanáli výboja vytvoril kompenzačné napätie U_{kn} . Spotrebovala sa pritom kompenzačná energia W_{pn} pri napätí $|U_{kn}|$:

$$W_{pn} = Q_{pne} \cdot |U_{kn}|. \quad (10)$$

Ekvivalentný náboj Q_{pne} nahrádza náboj Q_{pn} , ktorý sa rozložil pozdĺž iónového kanálu iskry tak, že poloha jednotlivých nábojov je funkciou intenzity elektrického poľa pozadia medzi koncami kanálu.

V kanáli iskry sa rekombinoval náboj $Q_{pnn} = (Q_{ppn} - Q_{pn})$ a zostal náboj Q_{pn} , kde

$$\begin{aligned} \text{množstvo kladného náboja} &= \\ &= \text{množstvo záporného náboja} = Q_{pn} / 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Počas prechodového javu pri preskoku iskry a potom pri tlmenom kmitaní elektrónov v elektrickom dipóle sa uvoľnila energia

$$W_{pnd} = W_{ppn} - W_{pn}, \quad (12)$$

vo forme elektromagnetického žiarenia (patrí sem aj svetelný prejav), tepelného a mechanického (akustického) procesu a relativistických (vysoko energetických) procesov (uvoľnenie elektrónov, X a gama žiarenie), napr. Dwyer, Uman (2014).

2.4 Podmienka pre ukončenie balíka bleskov

Spätňý výboj vo vybudovanom iónovom kanáli výboja nemôže nastať, ak hodnota elektrického napätia pozadia $|U_{pl}|$ medzi koncovými bodmi kanálu elektrického výboja poklesne pod dolnú medznú hodnotu elektrického napätia pozadia U_{pf}

$$|U_{pl}| < U_{pf}. \quad (13)$$

3. FÁZY BALÍKA BLESKOV

3.1 Inicializácia procesu balíka bleskov

V práci Hippela (1963) sú popisované „Lichtenbergove obrazce“, ktoré vznikajú pri určitej hodnote priestorového náboja a ionizácii prostredia. Podmienkou pre vznik vetvených výbojových kanálov blesku v atmosfére je dostatočne nehomogénne elektrické pole, ktoré sa vytvára v ovzduší postupom nabitých častíc (vodné kvapky, ľadové kryštáliky, prachové častice...). Otázke inicializácie sa venuje tiež kniha autorov Rakov a Uman (2003).

Ako sa vytvárajú v priestore náboje (malé ióny), ktoré sa potom zachytia na hore spomenutých časticiach? Podľa V. F. Hess (1912) vznikajú kationy a anióny mimo iného aj pôsobením spršky kozmického žiarenia na molekuly vzduchu. Výsledná koncentrácia elektrického poľa (elektrické napätie pozadia U_p podľa (5)) je asi desatina toho, čo by bolo potrebné na vznik viditeľnej bleskovej činnosti na oblohe (myslí sa homogénne elektrické pole v ovzduší bez ionizovaných pries-

torov). Pôsobením kozmického žiarenia sa zvyšuje lokálne ionizácia prostredia. V iónovom kanáli sú kladné a záporné ióny v podstate vedľa seba a takmer okamžite by sa rekombinovali. Znížená elektrická pevnosť prostredia dáva podnet k preskoku krátkého bleskového výboja s novým usporiadaním aniónov a katiónov v iónovom kanáli podľa kap. 2.3. Zdá sa, že kozmické žiarenie zohráva rozhodujúcu úlohu pri sfomovaní viditeľného blesku v závere inicializačného procesu blesku.

Pri silnejších pohyboch vertikálnych vzdušných prúdov vodné kvapky a ľadové kryštáliky do seba narážajú, spájajú sa alebo triešia na menšie čiastočky. Pri tejto situácii vznikajú trením kladné a záporné náboje, začiatok vzniku rozdielu elektrických potenciálov (1) a podmienky pre preskok krátkej iskry. Každý preskok iskry, vizuálne nepostrehnuteľnej, zvyšuje v priestore v dôsledku kompenzačného mechanizmu (kap. 2.3) prírastok elektrického náboja Q_{pn} (11), čo je veľmi dôležité, ale súčasne miestne znižuje intenzitu elektrického poľa (9) a spotrebúva sa časť práce prúdenia vzduchu. Množstvo m iónov náboja Q_i , ktoré unáša vietor prostredím (Bařka 2014) pri inicializácii balıka bleskov možno vyjadriť:

$$m = ((Q_z + Q_t + \Sigma Q_{pn}) - Q_r)/Q_0, \quad (14)$$

kde Q_0 je jednotkový náboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), Q_t je náboj vznikajúci vzájomným trením pevných a kvapalných čiastočiek vo vzduchu, Q_z kozmickým žiarením a Q_r zanikajúci rekombináciou.

Pohyb vzduchu unáša a triedi jednotlivé náboje Q_i a menı svoju kinetickú energiu W_{pic} na elektrostatickú (2). Bodové náboje Q_m pôsobia silovo v bodoch priestoru 1 a 2 a vytvárajú napätie pozadia U_p (1) pri použití okrajových podmienok (4). Do splnenia podmienky (5) sa rozpadne vplyvom prúdenia vzduchu veľký počet iónových kanálov iskier a zvyšuje sa nehomogenita prostredia. Malé kladné a záporné ióny s dĺžkou života do 60 s sa viažu na kvapky vody, ľadové krúpkky a iné nečistoty, čím vznikajú veľké a pomalšie (Langevinove) ióny s dĺžkou života až do 10^3 (Hippel 1963). Dôležitou vlastnosťou pevných a kvapalných čiastočiek je schopnosť viazať a aj udržať čím väčšie množstvo elektrického náboja rovnakej polarıty. Triediaci mechanizmus nábojov v oblaku podľa myšlienky C. T. R. Wilsona (1929) je taký, že malé kladné ióny sa viažu pravdepodobne na kvapky vody, ktoré unáša vzduch hore (horný kladný náboj) a záporné malé ióny na zmrznuté zrážky v oblaku padajúce k zemi (spodný záporný náboj), i keď tekuté zrážky pri zemi sú zväčša nabité kladne (elektróny sú odovzdávané v spodnej časti oblaku, alebo sťahované do zeme pri páde kvapky na zem).

V prípade prehánky, frontálnej oblačnosti, ale aj v pred búrkovom kumulonimbe sa udržuje dynamická rovnováha (14) medzi množstvom vznikajúcich elektrických nábojov a ich rekombináciou (silové pôsobenie nábojov Q_i v bodoch priestoru 1 a 2 a aj napätie pozadia U_p sa v čase podstate nemenı).

Pri mohutných pohyboch vzduchu v búrkovom oblaku stúpa množstvo nábojov Q_i a tým aj hodnota napätia pozadia U_{pl} . Vplyvom triediaceho mechanizmu nábojov vznikajú v priestore nehomogenity elektrického poľa (oblasti s rozdielnym rozdelením priestorového náboja), ktoré sú podmienkou pre spájanie iónových kanálov a ich vetvenie. Až pri splnenı podmienky (5) možno hovoriť o preskoku prvej („zápalnej“) iskry a ďalšom vytváranı nových kanálov (vetiev) tzv. temného blesku (Rozhlas 2013a). V novom kanáli vetvy kmitavý pohyb elektrónov pozdĺž plazmového kanálu menı rozdiel

elektrického potenciálu voči okolitým bodom v priestore. Ak je tento rozdiel dostatočne zápornejší voči blízkej kladnejšej nehomogenite prostredia (kap. 2.2), spustı sa z kladnejšej oblasti ústretový výboj a spojı sa so zápornejším čelom (vodcom) vetvy. Nové čelo vetvy vznikne v mieste začiatku ústretového výboja. Vetvenie prebieha lavınovite zo smeru kladnejšieho priestorového rozloženia elektrického náboja.

Hodnota napätia pozadia U_{pl} a úmerne aj hodnoty miestnych napätı iónových kanálov U_{pnl} (kap. 2.3) sa postupným posúvanım záporných nábojov v kanáloch výbojov do kladnejšej oblasti znižujú. Keďže hodnoty miestnych kompenzačných napätı U_{knl} v jednotlivých iónových kanáloch sa vkrátkom časovom intervale skoro nemenı (pohyb vzduchu nenarušı iónový kanál), tak vzrast zápornej hodnoty miestneho napätia U_{sn} (9) a jeho dostatočná veľkosť U_{snl} na preskok iskry v opačnom smere spôsobı, že priestorová sústava predtým vybudovaných iónových kanálov sa stáva nestabilnou. Potrebná absolútna veľkosť napätia U_{snl} bude zrejme už pri iónovom kanáli ďaleko menšia, ako bola hodnota napätia U_{pnl} pri inicializácii kanálu iskry (ústretového výboja). K nestabilite prispievajú aj dočasné vzájomné rezonančné väzby medzi kmitajúcimi elektrickými dipólmi resp. iónovými kanálmi, čo môže zvýšiť absolútnu hodnotu miestneho preskokového napätia U_{snl} .

3.2 Začiatok balıka bleskov

Nórski vedci (Rozhlas 2013a) podrobili dôkladnému pozorovaniu a analýze rad bleskov a zistili, že pred vlastným viditeľným zábleskom možno v bleskovom epicentre niekedy rozoznať ešte dve ďalšie fázy. V prvej fáze (kap. 3.1 inicializácia) tu dôjde len k slabému pulzu rádiového žiarenia. V druhej fáze (kap. 2.2 tmavý výboj) sa náhle objavı prudký záblesk vysoko energetického žiarenia gamma, sprevádzaný tiež viac silnejším rádiovým pulzom. Až v tretej fáze (kap. 2.2 spätný výboj) je silný optický záblesk s ďalším silným rádiovým pulzom, ktorý vidíme vlastnými očami a hovorıme mu blesk. To všetko netrvá spravidla dlhšie než jednu stotinu sekundy. Pred rokom 1991 tento fakt nebol vôbec známy.

Spätný výboj prebehne pozdĺž všetkých vetvených kanálov „temného blesku“ a do ohniska blesku (miesta, kde začalo spojité vetvenie) sa presunie celkový náboj Q_{st} , skladajúci sa z jednotlivých prıspevkových nábojov (8):

$$Q_{st} = Q_{pn_1} + Q_{pn_2} + \dots + Q_{pnn} + \dots \quad (15)$$

Dozvedáme sa, že vodivý (plazmový) kanál bol na začiatku vizuálne nepostrehnuteľný temný blesk. Môžeme zhrnúť, že temný blesk, prvotné vytváranie iónového kanálu postupným lavınovým spájanım kanálov jednotlivých preskokov – elektrických dipólov v nehomogénom elektrickom prostredı, je základom vzniku (inicializácie) a šírenia (vetvenia) blesku a začiatkom balıka bleskov.

Zistenie, že najskôr je fáza temného blesku, vyplýva aj z doterajšieho spôsobu simulovania blesku v laboratórných podmienkach (Hippel 1963). „Negatívna iskra“ tu zodpovedá procesu fázy temného blesku a „pozitívna iskra“, ak elektrické napätie pozadia prekročılo hodnotu „inicializačného elektrického napätia pozadia“ (5), ten silný optický záblesk, ktorý už vidíme na oblohe.

3.3 Vnútro-oblačné blesky CID (compact intra-cloud discharges)

Predtým vytvorené miestne iónové kanály (temná fáza blesku) sa stanú ďalším postupným vetvenım röznyimi smermi spojenými „žiaricami“ plazmovými kanálmi „nesymetrické-

ho elektrického multipólu“, sústavy dipólov pospájaných do nejakého celku, s dominanciou jedného alebo viacerých dipólov, ktoré zaberajú veľkú časť oblohy v smere vertikálnom a horizontálnom. Rozvetvené kanály blesku CID sa zbiehajú z kladnejšej oblasti oblaku do ohniska (prípadne do viac ohnísk) blesku v zápornejšej časti oblaku. Ohnisko blesku je silne ionizovaný plazmový priestor, do ktorého sa pri periodickej prílive elektrónov sústreďuje veľké množstvo voľného záporného náboja, ktorý zvyšuje spád elektrického potenciálu voči okoliu, s možným pokračovaním rozvoja vetiev čiarového blesku k zemi. Nasledujúce fotografia je toho príkladom, i keď nevidíme celú sústavu blesku ukrytú vo vyšších častiach oblaku (ukazy.astro.cz).

- Počas rozvíjajúceho sa procesu, prúdy elektrónov sa sťahujú do ohniska blesku a následne sa pumpujú znovu do všetkých koncov vetiev, kde zvyšujú spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie ústretových výbojov (ďalších elektrických dipólov) z blízkej kladnejšej nehomogenity elektrického poľa a vzrast celkového náboja Q_{st} (15). Tento proces môžeme porovnať napríklad krvnému obehu u človeka, kde srdce je pumpou. Frekvencia tohto procesu sa rozrastaním výboja znižuje, pretože sa predlžuje dráha, ktorú musí prúd elektrónov prekonať. Pri určitej dĺžke už treba rátať s rušivým vplyvom prúdenia vzduchu, ktoré je vírivé a časti vetiev výboja sa môžu „oddeľovať“ od celku.
- Elektrický výbojový dipól sa správa ako anténa, ktorá vyžaruje elektromagnetické vlny o vlnovej dĺžke zodpovedajúcej dĺžke dipólu. Zo spomalených videozáznamov rozvoja bleskových kanálov (film Univerzum: Blesky plné energie) môžeme vypozerovať vytváranie izolovaných elektrických bleskových dipólov (kanálov) aj mimo nesymetrického multipólu. Je to aj dôsledok spomínanej vyžarovanej elektromagnetickej energie, ktorá indukuje (zvyšuje) rozdiel elektrických potenciálov v izolovaných oblastiach s rozdielnym elektrickým nábojom. Elektromagnetické žiarenie takto napomáha k rozširovaniu bleskových kanálov na oblohe v závislosti na frekvencii a veľkosti elektrických prúdov, ktoré pretekajú nesymetrickým elektrickým multipólom.
- Elektrický výbojový dipól sa správa ako prúdový zdroj. Pri prerušení tohto zdroja, v dôsledku nárazového prudkého zvýšenia elektrického odporu prostredia v ceste prúdu elektrónov, sa následne uvoľní energia. Prejavuje sa to hlavne svetelnými efektmi, ktoré sa dajú pozorovať na oblohe. Nárazovým javom je pritom utvorenie ionizovaného plazmového priestoru s prebytkom elektrónov a jeho možné uzatvorenie sa do guľového útvaru s prudkým zvýšením spádu elektrického potenciálu voči okoliu. Minimálne dôjde k opätovnému spojeniu prerušeného kanálu prúdového zdroja, no hlavne môžu sa vytvárať aj nové vetvy blesku, a to aj smerom k zemi.
- Proces na udržanie plazmových bleskových kanálov na oblohe končí vtedy, keď sa prestanú tvoriť ústretové výboje (kanály nových vetiev), a tým prestane vzrast celkového náboja Q_{st} (15). Je to možno (hlavne) kvôli úbytku záporného náboja, ktorý sa presunul pri údere blesku do zeme (pozri kap. 3.4.1., viacnásobný výboj v hlavnom kanáli blesku) a nad oblaky. Systém balíka bleskov je závislý od rozdielu potenciálov elektrostatických polí (elektrické napätie pozadia U_p). Začne prebiehať usporiadanie nábojov pozdĺž kanálov jednotlivých výbojov (kap. 2.3), kde záporné ióny sa sústreďujú viac na stranu kladnej-

šieho pólu priestorového elektrického napätia pozadia U_p a kladné na opačnú stranu. Vrstvá hodnota $|U_{sml}|$ (9) pre ďalší spätný výboj.

- Výboje vnútri oblaku sa môžu zopakovať viackrát, pokiaľ podmienka pre spätný výboj v kanáli blesku nezankla (13). Spätný výboj prebehne pozdĺž predchádzajúceho iónového kanálu blesku a do ohniska (ohnísk) blesku sa presunie spolu celkový náboj Q_{st} (15), ktorý je menší, pretože pri nižšej hodnote elektrického napätia pozadia $|U_p|$ sa neaktivovali všetky predchádzajúce iónové kanály bleskov. Nové dráhy bleskových kanálov nemusia znovu kopírovať predchádzajúce dráhy kanálov.

3.4 Blesky oblak – zem (CG)

3.4.1. Blesky typu C–G+

Už počas inicializácie bleskovej činnosti (kap. 3.1) sa začal vytvárať rozdiel elektrických potenciálov (statickej elektriny) medzi spodnou časťou oblaku (hromadenie záporného náboja) a zemským povrchom. Dôsledkom sú prírodné javy, ako sršanie z vyvýšených bodov v teréne a niekedy aj tzv. Eliášov oheň. Taktiež aj záporne nabitú kvapku dažďa strácajú náboj. V tom čase sa pri zemi zvyšuje nehomogenita elektrického poľa, vytváranie kladných iónov v dôsledku sťahovania elektrónov do zeme vodivými vyvýšenými bodmi v teréne. Tieto kladné ióny (v podstate sa nemajú s čím rekombinovať, okrem so zápornými iónmi padajúcich zrážok) vynášajú hore vzostupné prúdy vzduchu. Vznikajú nehomogenity kladných nábojov v priestore medzi oblakom a zemou, ktoré sú podmienkou pre spájanie výbojových kanálov a ich vetvenie (Hippel 1963).

Vetvenie blesku v nehomogénom elektrickom poli postupuje od ohniska blesku elektrického multipólu na oblohe (CID kap. 3.3) k zemi. Vetvený blesk šíriaci sa k zemi zväčšuje pritom množstvo vlastného voľného záporného náboja, ktorý „pritéká“ v opačnej fáze do ohniska blesku. Toto množstvo je výrazne menšie ako množstvo záporného náboja periodicke pritekajúceho do ohniska blesku v rámci CID.

- Príliv záporného náboja do ohniska blesku zapríčini, že ohnisko sa stane zápornejším voči čelu vetví blesku šíriacich sa k zemi. V iónových kanáloch vetiev nastane najskôr tmavý a potom spätný výboj (kap. 2.2) a stanú sa plazmovými a viditeľnými. Ak čelo vetvy je dostatočne zápornejšie voči blízkej kladnejšej nehomogenite prostredia, spustí sa z kladnejšej oblasti ústretový výboj a spojí sa so záporným čelom (vodcom) prichádzajúcej vetvy. Nové čelo vetvy vznikne v mieste začiatku ústretového výboja. Celý tento mechanizmus sa nazýva „postupujúci vodca“ (stepped leader). Týchto ústretových výbojov môže byť aj viac a počet vetiev sa zväčší. V blízkosti zeme ústretové výboje (upward-moving discharges) prídu zväčša od viac vyvýšených bodov na zemi.
- Odliv záporného náboja z ohniska blesku zapríčini, že ohnisko blesku sa stane kladnejším voči čelu vetví blesku šíriacich sa k zemi. Do opätovného prílivu záporného náboja do ohniska blesku sa uskutočňuje usporiadanie nábojov pozdĺž kanálov vetví (kap. 2.3), ktoré sa stávajú iónovými (neviditeľnými) kanálmi. Javí sa to ako chvíľkové zastavenie šírenia vetiev blesku.
- Ak niektorá vetva blesku dosiahne vodivé spojenie so zemou, medzi ohniskom blesku v oblaku a zemou vznikne vodivé spojenie, najskôr tmavý a potom spätný výboj. Prejaví sa to rozžiarením ohniska blesku a aj kanálu blesku (Patúc 2009). Elektróny v kanáli môžu dosiahnuť rých-

lost skoro polovice rýchlosti svetla. Veľkosť prúdu v kanáli blesku, mohutnosť úderu, závisí na vodivosti zvodu do zeme. Vetva, ktorá vytvorí so zemou najvodivejšie spojenie, stane sa hlavným kanálom blesku. V jednotlivých bodoch vodičovej cesty vzniká úbytok napätia podľa Ohmového zákona. Zmena elektrického potenciálu v miestach vetvenia blesku je možnou príčinou zastavenia šírenia vetiev, ktoré nedosiahli zem, pretože spád potenciálu sa zníži pod prahovú (dostatočnú) úroveň preskoku elektrickej iskry vo vzduchu. Dokonca prichádza k zmene smeru toku prúdu vo vetve a záporný náboj (elektróny) sa z vetvy presunie do hlavného kanála a ďalej do zeme. Časť voľného záporného náboja z ohniska blesku rýchlo pretečie hlavným kanálom do zeme. To spôsobí ukončenie plazmového stavu hlavného kanála (aj kanálov všetkých vetiev, ktoré ešte nezanikli). Zostane len iónový hlavný kanál, pokiaľ ho pohyb vzduchu nerozptýli.

- Detailný a veľmi zaujímavý pohľad (čas 7:32) na kanál blesku, umelo vyvolaný pre výskum, je v filme *Universum: Blesky plné energie*.
- Všetky vetvy blesku pred dopadom na zem sú slabé výboje a aj silnejší dominantnejší výbojový kanál nemusí dosiahnuť zem. Zem dosiahne v priemere ešte asi 5 % slabých vedľajších úderov blesku v spáde elektrického potenciálu zväčša na hranici dostatočnosti (Méry 2007). Aj tu dôjde k zvýšeniu prúdu v ich kanáli, spätný výboj s obmedzeným prúdom oproti prúdu hlavným kanálom. Výbojový kanál vedľajšej vetvy s prúdom len niekoľko kA môže mať matnú a načervenanú farbu, červene zafarbený blesk so širokým výbojovým kanálom.
- Aká je situácia, keď napätie pozadia má hodnotu medzi hodnotami U_{pi} (5) a U_{pf} (13) z pohľadu pozorovateľa zo zeme? V sústave kanálov blesku na oblohe sa periodicky znova vytvorí podmienka pre nové naplnenie ohniska blesku záporným elektrickým nábojom (kap. 3.3). Ohnisko blesku sa stane dostatočne zápornejšie voči zemi pre tmavý výboj (dart discharge) zo zeme v ešte existujúcom bývalom iónovom kanáli hlavného kanála blesku. Opakuje sa proces blesku typu C–G+, ale s tým rozdielom, že už nie sú podmienky pre vznik vedľajších vetiev a spätný výboj prebehne jedným krokom medzi ohniskom blesku na oblohe a zemou a časť záporného náboja z ohniska sa vyprázdni do zeme. Takýchto elektrických výbojov cez hlavný kanál blesku do zeme môže vzniknúť za sebou údajne aj 50. Najčastejšie bývajú 2 až 3 výboje. Čas medzi výbojmi je krátky v rozmedzí stotina až desatina sekundy. Rozdielne údaje by sa mohli dať vysvetliť vlastnosťou ohniska blesku, nádrže voľného záporného elektrického náboja a frekvenciou kmitania elektrónov pozdĺž kanálov nesympetrického elektrického multipólu, stále existujúceho a slabnúceho dominantného kanálu na oblohe.



Obr. 2 Vetvený kladne nabitý CG blesk. Foto: Z. Černoch.

Fig. 2. Branched, positively charged CG lightning. Photo: Z. Černoch.

Naše oko nie je schopné rozoznať fázy blesku. Vidíme len mihotanie blesku pri viacnásobnom výboji. Príkladom rozdielneho opakovania výboja v hlavnom kanáli blesku je video (Patúc 2009) so spomalením desetinásobným. Sú tu dva prípady časovo rozdielneho opakovania výboja v hlavnom kanáli blesku. Na zamyslenie je druhý prípad, kedy pri počiatkovom údere blesku sa hlavný kanál silne rozžiaril (dobrý zvod bleskového prúdu do zeme).

V literatúre je často zmienka o ružencovom (perlovom) blesku, napríklad Štoll (1988): je typom blesku u ktorého možno pozdĺž hlavného kanálu blesku pozorovať rad svetelných guľičiek. Tieto guľičky môžu byť niekedy pozorovateľné i krátku dobu (1 až 2 s) po skončení vlastného výboja. Usudzuje sa, že guľičky tvoria rad oblúkových výbojov, určitým spôsobom podobných guľovému blesku, pri rozpade mnohonásobného výboja v hlavnom kanáli blesku v závere opakovania výbojov. Pri predpoklade, že okolité elektrické pole pozdĺž hlavného kanálu je pravidelne rozvrstvené (nehomogénne) a zvýraznené (napätie pozadia sa blíži k svojej dolnej hodnote U_{pf}), tak je možný rozpad hlavného kanálu vo vrstvách elektricky nehomogénneho prostredia, keď široké úseky hlavného kanálu majú nedostatok elektrónov na rekombináciu kladných iónov. Padajúce kvapky dažďa nesú záporný náboj (kap. 3.1) a ich rozklad a rekombinácia nábojov môže vyvolávať svetelné a zvukové efekty v plazmových úsekoch kanálu.

3.4.2. Blesky typu C+G–

Kladný blesk C+G– možno zaradiť do samostatného balíka bleskov. Za búrkou má nákova oblaku veľkú prevahu kladných iónov a pri povrchu zeme sa indukciou z vyvýšených bodov sršaním uvoľňujú záporné ióny. Zvyšuje sa tak zápornejší elektrický potenciál voči nákove. Zostupné prúdenie vzduchu zanáša vo vrstvách molekuly kladných iónov zo zadnej strany búrkového oblaku do nižších hladín ovzdušia a zvyšuje sa nehomogenita elektrického poľa. Ak rozdiel potenciálov elektrického napätia medzi vyvýšeným bodom

na zemi (ohniskom blesku) a najbližšou vrstvou kladných iónov je dostatočný na preskok iskry, môže sa začať lavínové vetvenie kanálov blesku smerom ku nárove. Pokiaľ za búrkou už nie sú nižšie vrstvy oblačnosti alebo je jasná obloha, zväčša mohutný ohlušujúci úder blesku sa javí ako „blesk z jasného neba“, zvlášť keď dominantný kanál blesku má šikmý smer. Pozri blesk od Kane Quinnell (Gembeč 2005). Keď kladný blesk dosiahne dobrý zvod do zeme, vzniká zvlášť mohutný spätný výboj s elektrickým prúdom v kanáli blesku aj nad 200 kA, ktorý môže mať vplyv na vznik nadoblačných výbojov. Časť záporného náboja (elektróny), pretečie zvodom do zeme. Zvýši sa podiel kladného náboja (kladné ióny) pri zemi voči nárove v dôsledku kompenzačného mechanizmu (kap. 2.3).

3.4.3. Gulové blesky

Inšpiráciou pre popis gulového blesku je kniha Štoll (1988).

K objasneniu tajomstva gulového blesku prispel aj záznam čínskych vedcov (Novinky 2014): Podarilo sa im urobiť digitálny záznam zrodu gulového blesku s vysokým rozlíšením a s pomocou spektroskopie a ďalších analýz rozobrať podmienky jeho vzniku. Potvrdili mimo iného predpoklad, že gulový blesk vzniká pri spaľovaní pôdy pri určitom zložení minerálov.

Elektrické výbojové dipóly v bleskových kanáloch sa správajú ako prúdové zdroje (kap. 3.3). Pri prerušení tohto zdroja v dôsledku nárazového prudkého zvýšenia elektrického odporu prostredia v ceste prúdu, sa následne uvoľní energia.

Slabý blesk môže udrieť do pôdy, kde nemá dobrý zvod do zeme. Záporný náboj výboja (elektróny) sa nemôže „rozlíteť“ (prudká zmena elektrického prostredia) a sústreďuje sa do uzavretej plazmovej gule s prebytkom elektrónov, ktorá potom akoby vystúpila zo zeme. Plazmová guľa, „obohatená“ chemickými reakciami z materiálu pôdy, má zásadný vplyv na životnosť gulového blesku (možno aj niekoľko sekúnd) a jeho farby. Plazma, tzv. štvrté skupenstvo hmoty, má niekoľko prírodných i umelých foriem (Vaňura 2009). Tvorí ju zhuk voľných elektrónov a iónov. Rotáciou získava plazma sféroidný, najčastejšie gulový tvar a magnetický „obal“. Rotujúcim plazmoidom je Slnko, na rozdiel od gulového blesku s prebytkom kladného náboja.

Smer a rýchlosť pohybu gulového blesku je daný tzv. výsledným spádom elektrického potenciálu medzi statickým elektrickým potenciálom gule a okolím. Ak sa stane výsledný spád potenciálu dostatočný (napríklad v blízkosti kovového zvodu do zeme), premení sa gulový blesk na obyčajný slabý čiarový výboj s deštruktívnymi účinkami.

Pri svojom pohybe gulový blesk prechádza cez nehomogénne elektrické prostredie, sprevádzané rekombináciou nábojov ústretovými výbojmi (iskrami) z tohto prostredia (kompenzačný mechanizmus kap. 2.3). Prebytok záporného náboja v gulovom blesku sa znižuje a nakoniec, pri nejakej kritickovej hodnote, gulový blesk ticho zanikne a zostane zápach po chemických procesoch počas jeho trvania.

3.5 Nadoblačné výboje

Sprajty sú súčasťou širokej a neustále sa rozširujúcej „rodiny“ tranzientných luminozných javov (TLE). Ich viacmenej náhodný experimentálny objav na počiatku 90. rokov 20. storočia bol potvrdením teoretických predpovedí ich existencie v prácach škótskeho nositeľa Nobelovej ceny za fyziku C. T. R. Wilsona.

Výskum všetkých týchto javov je na začiatku (Popek, Bednář 2012). Je zrejmé, že najvyššie vrstvy atmosféry sú dejiskom búrlivej súhry elektrických, svetelných a chemických dejov, ktoré musíme dôkladnejšie spoznať. Môžu ovplyvňovať nielen našu techniku, spoje a navigácie, ale priamo i náš život, ktorý je na stavu našej tenkej vrstvičky atmosféry osudovo závislý.

Informácie pre štúdium vzácných výbojov v hornej atmosfére (nadoblačné výboje) ako je červené halo (Elves), červení škriatkovia (Red Sprites) a modrý záblesk (Gnome) sú v (Popek, Bednář 2012; Sky-fite.tv 2015; Lyons 2000; Popek 2014; Ondrášková et al 2008). V oblasti elektrických výbojov a elektrických polí nad hornými časťami kumulonimbov, resp. búrkových buniek, asi treba hľadať reálne väzby a „spojovacie mostíky“ medzi troposférickou búrkovou elektrinou a úkazmi TLE, vyskytujúcimi sa niekedy už vo stratosfére, ale častejšie ešte vo vyšších hladinách atmosféry. Elektrické výboje vyvolávajú v okolitom elektrickom poli pulzné zmeny a podľa polarít týchto zmien v závislosti na vzdialenosti od zdroje blesku možno rozlišovať druhy bleskov (vnútorný blesk, záporný alebo kladný blesk do zeme, elektrické výboje smerujúce z hornej časti búrkových oblakov hore a pod.).

Ako je uvedené vyššie, elektrické výboje vnútri búrkového oblaku vyvolávajú v elektrickom poli pulzné zmeny. Búrkový oblak sa nachádza medzi dvoma „platňami zemského kondenzátora“ (kap. 4). Elektrické potenciály v samotnom búrkovom oblaku akoby plávali voči platňam zemského kondenzátora. Pri údere blesku z oblaku do zeme (dolnej platne zemského kondenzátora) sa presúva záporný náboj (elektróny) do zeme a dochádza k zníženiu rozdielu elektrického potenciálu medzi oblakom a zemou. Podľa Ohmového zákona toto zas zapríčini zvýšenie rozdielu potenciálu medzi oblakom a ionosférou (hornou platňou zemského kondenzátora). Tento zvýšený rozdiel elektrického potenciálu medzi oblakom a ionosférou s nepatrným časovým oneskorením vyrovnávajú (znižujú) nadoblačné blesky. Elektrický obvod medzi dvoma platňami zemského kondenzátora sa takto uzatvára.

Napätie medzi ionosférou a zemským povrchom kolíše v dennom chode nezávislom na polohe na zemi (Ondrášková et al. 2008), tak aj hodnotu zvýšenia rozdielu potenciálu medzi búrkovým oblakom a ionosférou ovplyvňuje denný chod. Potom je možné, že výskyt „škriatka“ je častejší pri nižšej a „modrého záblesku“ zas pri vyššej hodnote napätia medzi ionosférou a zemským povrchom.

Prípady vzniku nadoblačných bleskov vzhľadom ku smeru prúdu elektrónov v bleskových kanáloch vnútri búrkového oblaku:

- Odliv prúdu elektrónov z koncov vetiev výboja v hornej časti búrkového oblaku (zvyšuje sa podiel kladného náboja vo vrchnej časti oblaku) vytvára spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie vetvených výbojových kanálov (ďalších elektrických dipólov tzv. tendrils) vo zvislom smere v blízkej zápornejšej nehomogenite elektrického poľa nad búrkovým oblakom, a to nadoblačný červený škriatok (Red Sprites). Šírka výbojového kanálu sa s nadmorskou výškou v dôsledku znižujúcej sa elektrickej pevnosti prostredia náhle zväčšuje a červený škriatok nadobúda tvar medúzy. Tlmené kmitanie elektrónov vo výbojovom kanáli spôsobuje vyhasínanie „hlavy medúzy“. Vyzerá to, akoby sa červený škriatok pohyboval smerom dolu. Načervenavé sfarbenie fenoménu je od ionizovaných molekúl vodíka pri prechode elektrického prúdu (TV Spektrum, Vesmír III).

- Počas doby trvania červeného škriatka (škriatok) sa vytvára pri tlmenom kmitaní elektrónov vo výbojových kanáloch červeného škriatka nad búrkovým oblakom v dôsledku usporiadania elektrických nábojov v kanáli (kap. 2.3) oblasť záporného náboja (dolná hranica škriatka) a pod hranicou asi 75 km (horná hranica škriatka) oblasť kladného náboja. Ak sa stane táto oblasť dostatočne elektricky kladnejšia ako oblasť globálneho zemského kondenzátora v ionosfére (kap. 4), vytvorí sa „Spirites halo“, cez ktoré dôjde k presunu záporného náboja (elektrónov) z ionosféry do spodnej časti „Spirites halo“ a elektrické potenciály sa tým vyrovnávajú, čo ohraničuje dobu trvania hala.
- Príliv prúdu elektrónov do koncov vetiev výboja v hornej časti búrkového oblaku (zvyšuje sa tam podiel záporného náboja) vytvára spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie výbojových kanálov (ďalších elektrických dipólov) vo zvislom smere v blízkej kladnejšej nehomogenite elektrického poľa nad búrkovým oblakom, a to nadoblačný modrý záblesk (Gnome) alebo modrý výtrysk (Blue jet). Vyzerá to, akoby niektorá vetva vnútro-oblačného blesku pokračovala vo vetvení aj nad búrkovým oblakom. Následne, v dôsledku usporiadania elektrických nábojov v kanáli (kap. 2.3), sa vytvára vyššie nad oblakmi oblasť záporného náboja. Vzniká otázka, či aj tu nevzniká nejaké „Spirites halo“. Modré sfarbenie fenoménu je od ionizovaných molekúl dusíka pri prechode elektrického prúdu.
- Pulzné zmeny v elektrickom poli, v dôsledku kmitavých zmien elektrických prúdov vo výbojových kanáloch v búrkovom oblaku pod a nad ním, indukujú v ionosfére (okolo 100 km) pulzné elektrické napätie – zmenu spádu elektrického potenciálu a ďalšiu ionizáciu vzduchu vo vodorovnom smere. Ak je spád dostatočný, produkuje červené halo (Elves) v tvare kruhov. Dĺžka trvania červeného hala je menšia ako trvanie ostatných nadoblačných javov. Príčinou je postupné slabnutie elektromagnetického poľa pri tlmenom kmitaní v kanáloch bleskov. Príkladom opakovania elektrického výboja je (Popok 2012): Red spirites vznikajú často v rade za sebou, pripomína to mnohonásobný výboj v hlavnom kanáli blesku, ale tento krát opačne hore od vrchu oblakov (vizuálne tancujúci alebo pulzujúci červený škriatok). Existuje synchronizácia medzi opakovaním výbojov pod a nad búrkovým oblakom.

3.6 Ukončenie balíka bleskov

Počas „temného blesku“ a trvania balíka bleskov (kap. 3.2 až 3.5) bolo na oblohe vytvorené veľké množstvo nových (ústretových) kanálov elektrických výbojov. Celková statická energia W_{pic} sa zmenila na dynamickú – W_{pic} a preniesol sa celkovo náboj Q_{ppc} (7):

$$W_{pic} = W_{pp1} + W_{pp2} + \dots + W_{ppn} + \dots, \quad (16)$$

$$Q_{ppc} = Q_{pp1} + Q_{pp2} + \dots + Q_{ppn} + \dots. \quad (17)$$

Premiestnil sa celkový kompenzačný ekvivalentný náboj Q_{pce} (10)

$$Q_{pce} = Q_{p1e} + Q_{p2e} + \dots + Q_{pne} + \dots, \quad (18)$$

a zabezpečil v búrkovom oblaku v zlomku sekundy proces pre priestorové vyrovnanie (vybitie) nábojov, a to usporiadaním aniónov a katiónov pozdĺž každého n -tého kanálu blesku (kap. 2.3). Do ohniska blesku (miesta, kde začalo spojité vetvenie) sa presunul celkový náboj Q_{st} (15). Uvoľnila sa energia hlavne vo viditeľnej, tepelnej a akustickej forme

v podstate prechodom náboja Q_{st} ($Q_{st} \gg Q_{pce}$) kanálmi blesku.

Pri poklese hodnoty elektrického napätia pozadia U_{pl} pod určitú prahovú úroveň U_{pf} (13) všetky vybudované iónové kanály výboja v búrkovom oblaku sa rozpadnú v dôsledku pohybu vzduchu.

Prebehol pohyb elektrických nábojov. Pri údere blesku do zeme sa presunula časť záporného náboja z oblaku do zeme a časť záporného náboja počas nadoblačných bleskov z ionosféry do priestoru nad vrchnou časťou búrkového oblaku. Oblasť bývalého ohniska blesku v spodnej časti búrkového oblaku sa v dôsledku kompenzačného mechanizmu stala relatívne kladnejšou voči nárove a aj voči okolitej spodnej časti búrkového oblaku.

Vybudovanie nových iónových kanálov temného blesku a viditeľnej bleskovej činnosti môže nastať až po novom dosiahnutí hodnoty elektrického napätia pozadia, a to hodnoty inicializačného napätia pozadia U_{pi} (5). To je už začiatok nového balíka bleskov (kap. 3.2).

4. GLOBÁLNY ZEMSKÝ KONDENZÁTOR

Zemský povrch (Ondrášková 2008) tvorený prevažne výborne vodivou morskou vodou a ionosféra predstavujú dve sústredné guľové plochy, ktoré tvoria elektródy obrovského sférického kondenzátora a z hľadiska šírenia elektromagnetických vln vlastne aj sférický vlnovod. Sústavu Zem–ionosféra možno približne simulovať najjednoduchším náhradným obvodom, tvoreným paralelnou kombináciou kapacity 0.05 F a rezistencie 150 Ω (impedancia Z_{gg} obr. 1.1). Pokiaľ by neelektrické mechanizmy separácie nábojov (prevažne v troposfére), a tým aj búrková činnosť, prestali fungovať, behom charakteristického času rádu minút by akákoľvek elektrická aktivita ustala. Napätie medzi ionosférou a zemským povrchom kolíše medzi 150 a 400 kV (napätie U_g obr. 1.1) v denom chode nezávislom na polohe na zemi. Ionosféra je pri tom v neustálom pohybe, pôsobia na ňu kozmické vplyvy, vane v nej ionosférický vietor a tento jej nepokoj sa prejavuje rádiovými signálmi a poruchami šírenia rádiových vln. Na celej zemeguli prebehne za rok do 80 miliónov búrok, teda asi 200 000 denne. Pri výboji bleskov vznikajú tiež elektromagnetické vlny, ktoré sa prejavujú ako atmosférické poruchy pri rádiovom prenose. Tieto atmosférické poruchy môžu nastať i v prípade dažďa bez výskytu bleskov.

Vodivosť vzduchu (Hippel 1963) sa mení silne s výškou. Zhruba je o 2 rády väčšia vo výške 30 000 m oproti zemi, aby tiekol priemerný konštantný vertikálny prúd medzi ionosférou a zemou v oblasti búrok na zemeguli. Oproti minulosti vieme, že sú to nadoblačné elektrické výboje, ktoré sa podieľajú na zvýšenej priemernej elektrickej vodivosti vzduchu nad búrkovými oblakmi.

Podľa Kirchoffových zákonov priemerná hodnota prúdu (asi 1.5 kA), ktorým sa „zemský kondenzátor“ vybíja, musí sa rovnať priemernému prúdu, ktorým sa „zemský kondenzátor“ dobíja pri búrkovej činnosti na celej zemeguli. Tak to sú súčasťou „globálneho atmosférického elektrického obvodu“ nadoblačné elektrické výboje, výboje v búrkových oblakoch a obvod uzatvárajú úder bleskov do zeme.

V knihe Hippel (1963) je tiež zmienka, že príspevok prúdov bleskov udierajúcich do zeme je menší k priemernej hodnote prúdu, ktorým sa „zemský kondenzátor“ dobíja pri búrkovej činnosti na celej zemeguli. Možno konštatovať, že počas búrok a možno v slabšej miere aj počas preháňok a tiež aj pri frontálnych oblakoch, kde sa pri vertikálnych pohyboch

vzduchu zosiluje spád elektrického poľa, dajú sa pozorovať na povrchu zeme javy ako sršanie a niekedy aj tzv. Eliášov oheň, stahovanie elektrónov (záporného náboja) do zeme vodivými vyvýšenými bodmi v teréne a pritom vznik kladných iónov unášaných vetrom.

Počas búrky, vplyvom nadoblačných elektrických výbojov, vytvára sa nad oblakmi samostatná oblasť záporného elektrického náboja (kap. 3.5) a v nárove búrkového oblaku samostatná oblasť kladného elektrického náboja (kap. 3.4), z ktorej sa tiež po skončení búrky vybíja zemský kondenzátor.

Pri peknom počasí a aj hneď za búrkou sa globálny zemský kondenzátor vybíja. Nad vyvýšenými záporne nabitými bodmi na zemskom povrchu vznikajú a uvoľňujú sa záporné ióny. Mikro-preskokmi, pri riadiacom napätí U_g a aj v menšej miere podporou zostupného prúdenia vzduchu (posuvný prúd), kladný náboj sa presúva smerom k zemi. V okolí sa rekombináciou nábojov zvyšuje homogenita elektrického poľa.

5. MERANIE A SIMULÁCIA BALÍKA BLESKOV

Výbojová dráha (kanál blesku) predstavuje elektrický dipól, anténu, aj keď v trvaní zlomku sekundy, ktorá vyžaruje elektromagnetickú energiu (Ondrášková et al. 2008; Jirků 2010). Pre popisovanie a meranie vlastností takejto antény je možné použiť dostupnú literatúru – učebnicu, ako je Hottmar, Adamec (2014). Bleskové výboje v troposfére sú zdrojom rádiových vln zvukových frekvencií. V izolovaných elektricky vodivých sústavách (Bélaï 2006) elektromagnetické pole indukuje napätia rádovo desiatky až stovky kV. Najviac energie sa vyžiarí na nízkych frekvenciách v oblasti veľmi dlhých a dlhých vln v závislosti na dĺžke viditeľných žiariacich bleskových kanálov na oblohe. Aj počas inicializácie blesku vnútri oblaku (kap. 3.1) sa generuje žiarenie predovšetkým na výrazne vyšších frekvenciách v oblasti VKV (rádovo stovky MHz). Z uvedeného možno usudzovať, aká je dostatočná vzdialenosť D (6), budúca dĺžka elektrického dipólu, na preskok lokálneho elektrického výboja pri budovaní bleskových kanálov. Takto možno frekvenčne mapovať oblasti búrkovej činnosti, ale aj oblasti s relatívne pekným počasím (Ondrášková et al. 2008; Chum 2004). Balík bleskov začína lavínovou tvorbou krátkych bleskových kanálov temného blesku (Rozhlas 2013a). Viditeľný blesk na oblohe má aj niekoľko km. Každý balík bleskov vymedzuje začiatok (5) a koniec (13). U každého balíka bleskov môže prebiehať viacnásobný výboj v hlavnom (dominantnom) bleskovom kanáli a periodické elektromagnetické žiarenie na veľmi dlhých vlnách, ktorého dĺžka sa postupne skraca (kap. 2.3 tlmené kmitanie elektrónov pozdĺž plazmového kanálu výboja).

Novým pokrokom je analýza rádiových vln vytvorených kozmickým žiarením, prechádzajúcim oblasťou búrky (Ball 2015). Poskytuje nebyvalý pohľad na rozloženie a silu elektrického poľa v búrke

Ako predpokladal už W. O. Schumann (Ondrášková et al. 2008), zdroj energie pre vlastné kmity v rezonátore Zem-ionosféra, predstavuje globálna búrková činnosť (náhodné a nekoherentné atmosférické výboje). Výbojová dráha (kanál blesku) predstavuje elektrický dipól, anténu. Vždy je pravdepodobnosť, že nastane rezonancia, kmitanie nejakého dipólu na frekvencii zo schumannovského pásma frekvencií, príjem alebo odovzdávanie energie v oblasti rezonátora Zem-ionosféra a udržanie dipólu dlhšie pri živote i po skončení balíka bleskov. Otázkou je, ako by taký dipól (blesk) vyze-

ral na oblohe. Získanie energie z rezonátora Zem-ionosféra pre ľudstvo je problematické. Maximum elektromagnetickej energie výboje vyžarujú na frekvenciách 20 až 100 kHz, teda na schumannovské pásmo (ELF) pripadá nepatrná časť.

5.1 Priebeh procesu balíka bleskov

Pre budúcu simuláciu elektrického obvodu balíka bleskov na počítači vychádzame z obr. 1.1 a z údajov meraní a simulácie správania sa molekúl plynu, iónov v premenlivom elektrickom poli (Hippel 1963; Červeň 2005; Rakov, Uman 2003) v prostredí búrlivého pohybu vzduchu (Baťka 2014).

5.1.1. Pred preskokom iskry, inicializácia blesku

„Platne“ virtuálneho kondenzátora C_p sa nabíjajú triedeným priestorovým nábojom Q_{ie} (kap. 3.1) v equivalentnom obvode (obr. 1): $W_{pic} = (U_z - |U_p|) \cdot i \cdot t$, kde i je prúd, ktorým sa nabíja kondenzátor C_p a t je čas nabíjania kondenzátora C_p do preskoku iskry. Pri jednoduchom predpoklade $U_z \gg |U_p|$, $|Z_{cc}| \gg (|Z_{c1} + Z_{c2}|)$ a $(|Z_{c1} + Z_{c2}|)$ je konštantna, nabíjací prúd i možno pokladať za nekonštantný: $W_{pic} = (U_z^2 / (|Z_{c1} + Z_{c2}|)) \cdot t$ ale aj $W_{pic} = i^2 \cdot (|Z_{c1} + Z_{c2}|) \cdot t$

Prúd i , odvodený z množstva nábojov, ktoré pretekajú prostredím (14) za jednotku času ($i = dQ_{ie} / dt$), predstavuje tzv. prúd posuvný (Jirků 2010). Jeho šírenie je podstatne menšie ako rýchlosť šírenia elektriny (vodivého prúdu) vo vodiči ako aj v plazmovom kanáli blesku.

5.1.2. Po preskoku iskry

Po preskoku iskry (preskok iskry riadi premenlivá hodnota impedancie Z_{cc}), pôvodné napätie pozadia U_p , kde $|U_p| = U_{pi}$ sa kompenzovalo napätím U_{kp} , kde $|U_{kp}| = U_{pf}$, aby sa iskra skončila (10). Prebehol mechanizmus „vybitia“ ekvivalentného množstva náboja o veľkosti Q_{pe} v oblasti oblaku patriaceho balíka bleskov, kde Q_{pe} je časť náboja z Q_{ie} , ktorým sa predtým nabíja oblasť balíka bleskov počas inicializácie (kap. 3.1) na inicializačné napätie pozadia $|U_p| = U_{pi}$ pri premiestňovaní molekúl nábojov aniónov a katiónov prúdením vzduchu v equivalentnom (náhradnom) obvode balíka bleskov s prírastkovou energiou:

$$W_{pic} = Q_{ie} \cdot U_{pi},$$

pozri (16) a (17), potom $Q_{ppc} = Q_{ie}$.

Podľa (10) možno písať:

$$W_{pie} = Q_{pe} \cdot U_{pf},$$

pozri (18), potom $Q_{pce} = Q_{pe}$.

V plazmovom kanáli spätného výboja sa vyžiarila energia W_{pie} a pretiekol náboj (8): $Q_{st} = G_j \cdot Q_{pe}$.

5.1.3. Ideový podklad pre numerický výpočet, príklad

Nabitie fiktívneho kondenzátora C_p triedeným nábojom Q_{ie} na napätie U_{pi} počas inicializácie (kap. 3.1) prebehlo za dobu T_i priemerným posuvným prúdom $I_{ep} = Q_{ie} / T_i$. Pri skončení balíka bleskov (kap. 3.6), stúplo množstvo celkového náboja Q_i o kompenzačné náboje $Q_{pnc} = \Sigma Q_{pn}$ (11) a kleslo množstvo triedeného náboja Q_{ie} : $Q_{ie} = Q_{ie} - 2 \cdot Q_{pnc}$, pri priestorovej kompenzácii náboja (18). Tento pokles sa javí ako veľká pila na priebehu triedeného náboja Q_{ie} počas inicializácie.

Pri náboji Q_{ie} na kondenzátore C_p , pri preskoku iskry približne platí: $Q_{ie} = Q_{st} / G_j = T_d \cdot I_{st} / G_j$, kde T_d je doba trvania výboja blesku na oblohe, I_{st} je priemerný bleskový prúd, ktorý pritečie do ohniska blesku počas doby T_d . Ako

príklad môžeme uviesť: po dosadení $Ist = 200$ kA, $Gj = 10$, $Td = 10^{-4}$ s a $Ti = 120$ s, dostaneme $Qie = 2$ C. To znamená, že počas doby inicializácie blesku (kap. 3.1) sa musí kondenzátor Cp nabiť nábojom 2 C, aby do ohniska blesku na oblohe (kap. 3.2) mohol tiecť prúd 200 kA v čase 10^{-4} s, teda náboj 20 C. V našom zjednodušení je náboj Qie sústredený v 2 bodoch priestoru a kondenzátor Cp sa nabíjal priemerným posuvným prúdom 17 mA počas 2 minút. V príklade bol hrubo odhadnutý stupeň ionizácie iónového kanálu iskry Gj . Na presnosti tak dôležitého údaju záleží.

Skutočný výpočet priestorového triedeného náboja Qie (prúdu i) je nutné urobiť v zmysle atmosférickej dynamiky a elektrodynamiky (kap. 3.1 a 3.6). Priestor búrkového oblaku je možné rozdeliť na dostatočne malé, nábojovo homogénne objemové oblasti veľkosti M_h [m^3] s nábojom Qih . Potom (14) možno napísať:

$$Qi + Qr(Qi) = \sum_h (Qih + Qr(Qih)) = Qt + Qk, \quad (19)$$

kde sa v časových intervaloch sleduje pohyb množstva nábojov Qt a Qk z oblasti do oblasti a úbytok náboja rekombináciou $Qr(Qih)$ v každej objemovej oblasti. Vo zvolenom okamžiku sa robí výpočet hustoty kladného $Qih+$ a záporného $Qih-$ náboja [C/m^3], pričom pre objemové množstva nábojov Qih a triedeného Qeh platí:

$$\begin{aligned} Qih &= (|Qih+| + |Qih-|) \cdot M_h \text{ a } Qeh = \\ &= (|Qih+| - |Qih-|) \cdot M_h. \end{aligned} \quad (20)$$

Pre hodnotenie triediaceho mechanizmu nábojov (kap. 3.1) je celkové množstvo náboja $Qi = \sum_h Qih$ a triedeného $Qie = \sum_h |Qeh|$. Celý triedený náboj Qeh sústredíme do stredy objemovej oblasti a pokračujeme podľa (1) až (4). Množstvo triedeného objemového náboja Qeh je príslušne znižované, kompenzované (10) a objemové množstvo náboja Qih príslušne zvyšované (11) v priestore, kde sa vyskytne preskok elektrickej iskry.

Pre takto zavedený teoretický model urobiť postupne s poznatkami tejto analýzy a (Rakov, Uman 2003), parametrizácie pri rôznych meteorologických stavoch (Batka 2014), komparácie a overenie modelu s reálnymi (nameranými alebo modelovanými) parametrami bleskového výboja. Účelom výpočtu je aj zistiť potrebné množstvo celkového náboja Qi na spustenie balíka bleskov a v akom pomere sú množstvá nábojov vytvorené trením Qt a preskokmi iskier Qk na celkovom náboji Qi počas inicializácie balíka bleskov.

Overený numerický model prispeje k včasnému varovaniu pred búrkami vo vybudovanom systéme detekcie a lokalizácie bleskov (Řezáčová et al. 2007). Doteraz známe modely (Rakov, Uman 2003) trpia nedostatkom spoľahlivých informácií, hlavne pri inicializácii blesku.

6. VÍZIA K OCHRANE ČLOVEKA A MAJETKU PRED BLESKOM

Blesky sú nebezpečným javom pre spoločnosť, sú zodpovedné za množstvo úmrtí a za ekonomické škody. Pohľad na fotografie rozvetvených bleskov (napríklad galerie.bourky.com) je zaujímavý. Na niektorých je vidieť neuveriteľné množstvo slabých bleskov, ktoré udierajú do zeme. Môžeme vysloviť predpoklad, že počet slabých úderov vetiev blesku dosahujúcich zem v rovine úderu hlavného výboja je:

- priamo úmerný nehomogenite elektrického poľa, hlavne pri zemi, znížená hodnota dostatočného spádu elektrického potenciálu v dôsledku lokálnych ionizovaných priestorov,

- priamo úmerný veľkosti voľného elektrického náboja v ohnisku blesku a
- nepriamo úmerný vodivosti zvodu do zeme hlavného bleskového kanála.

Vodivosť zvodu hlavného bleskového kanála závisí od kvality uzemnenia budovy, no často je to úder do voľnej prírody, čo nemôžeme ovplyvniť.

Miesta, ktoré sú vo vyššej nadmorskej výške ako miesto úderu hlavného výboja, sú viac vystavené úderu vetvy slabého blesku, pretože sa nachádzajú vo vnútri „expandujúcej gule“ vetiev blesku, ktoré smerujú k zemi. Takáto situácia nastáva preto, lebo na hrebeni pohoria je povrch zväčša kameňistý, a tak je to zlý zvod pre blesk do zeme. Je to výstraha, aby sme sa nezdržovali na hrebeni hôr počas búry.

Miesta, ktoré sú nižšie položené ako pravdepodobné miesta úderom hlavného výboja, sú pomerne dobre zabezpečené pred úderom nejakého i keď slabého blesku. Nachádzajú sa pod „expandujúcou guľou“ rozvoja vetiev blesku. Toto expandovanie končí v okamihu vytvorenia hlavného kanála blesku. Možno povedať, že aj okolie veľmi dobre chránených výškových budov je tiež chránené zo strany výškovej budovy. Ak sú tie budovy rozostavené vhodným spôsobom, tak je to inšpirujúce.

Podnetná je úvaha súvisiaca s ochranou majetku a ľudí pred bleskom. Francúzski vedci zistili (Rozhlas 2013b), že pomocou impulzov laserových lúčov dokážu blesk nielen vyvolať, ale ho aj nasmerovať na určité miesto. To určité miesto nie je oblasť chráneného objektu, pretože by ho zväzdaný blesk do zeme kvôli vetveniu blesku pri zemi mohol poškodiť. Chránená oblasť pri laserovom lúči bude ďaleko väčšia, ako sa deklaruje pri klasickom bleskozvode, lebo umelo vytvorený kanál blesku zabráni vzniku vedľajších vetiev blesku vyššie nad zemou, ktoré by s určitou pravdepodobnosťou zasiahli vzdialenejšie objekty. Meraním gradientu elektrického poľa v mieste objektu sa určí, kedy laserový lúč vyslať. Tak, ako pri kozmickom žiarení, aj pri laserovom lúči vzniká iónový kanál, kde sú kladné a záporné ióny v podstate vedľa seba a takmer okamžite by sa rekombinovali. Len dostatočná veľkosť napätia $|Ujn|$ (8) dáva podnet k preskoku spätného výboja s novým kompenzačným usporiadaním iónov v iónovom kanáli (kap. 2.3). Dlhšia doba života iónového kanála môže „stihnúť“ jeho spojenie s ohniskom blesku v búrkovom oblaku.

Pred úderom blesku (kap. 3.4) sa nad zemou vytvárajú rôzne ionizované vrstvy, vlákna iónov (možno vytvorenými kozmickými časticami, špekulatívne mobilom) unášané vetrom. Tak sa môže stať, že slabý výboj udrie do nižšie položených častí budovy (Patúc 2012) alebo v otvorenej prírode aj v rovine hlavného úderu. Vieme, že bleskové kanály sa chovajú ako silné zdroje elektromagnetického žiarenia (Bélaï 2006), a že v neuzemnených vodivých sústavách dokážu naindukovať stovky kV napätia aj do vzdialenosti 2 km a zmeniť miesto úderu blesku.

7. ZÁVER

Napriek tomu, že je jedným z najviac známych a uznávaných prírodných javov, blesk zostáva stále pomerne nevyriešeným (Dwyer, Uman 2014; Popek, Bednář 2012). Pokrok je brzdený ťažkosťami pri implementácii priamych meraní vnútri búrok (Ball 2015). Okrem iného zostáva otázkou fyzikálny mechanizmus inicializácie blesku a priestorového vyrovnávania nábojov. Cieľom tejto analýzy je prispieť určitým spôsobom k riešeniu tejto otázky, fyziky blesku, pre mnohých príliš tajomného javu. Je to zaujímavý pohľad z pozície atmo-

sférickej dynamiky (Bařka 2014), elektrodynamiky (Červeň 2005), plazmovej a molekulej fyziky (Hippel 1963) na vznik a štruktúru bleskových výbojov.

Veľké množstvo údajov z meraní, podkladov vhodných pre numerický model výpočtu planetárnej cirkulácie elektrických nábojov, sa podarilo vedcom z Floridy (Rakov, Uman 2003; Universum: Blesky plné energie), ktorí sa zaoberajú ochranou pred bleskom. Sú tam rampy na vypúšťanie kozmických objektov, a tak sa zdá, že Florida je centrom výskumu a zhromažďovania údajov o bleskoch z celej zemegule.

Podakovanie:

Ďakujem J. Bednařovi a V. Hottmarovi za cenné rady a pripomienky.

Literatúra:

- BALL, P., 2015. Focus: Cosmic Rays as Thunderstorm Probes. *Physics*, Vol. 37, Issue 8. Dostupné také z WWW: <https://physics.aps.org/articles/v8/37>.
- BĚLAI, I., 2006. Priemyselné komunikačné systémy. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Slovenská technická univerzita v Bratislavě. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/Materi%C3%A1ly%20pre%20techniku%20VN/Texty%20MTVN/05%20Prep%C3%A4tia/Prev%C3%A1dzkov%C3%A9%20prep%C3%A4tia/ochrana%20koncov%C3%BDch%20zariadeni.pdf>.
- BAŘKA, M., 2014. Předpověď vývoje atmosféry objektivními metodami. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta university Karlovy. Dostupné také z WWW: <http://kfa.mff.cuni.cz/wp-content/uploads/2015/03/kniha.pdf>.
- ČERVEŇ, I., 2005. Fyzika po kapitolách, elektrostatické pole. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Slovenská technická univerzita v Bratislavě. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: http://files.gamepub.sk/Bakalar/F2!/F2%20z%20feinomore/Cerven/elektrostaticke_pole.pdf.
- DWYER, J., UMAN, M., 2014. The physics of lightning. *Physics Reports*, Vol. 534, Issue 4, s. 147–241.
- GEMBEK, M., 2005. Bouřě s kroupami 30. 5. 2005. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://udalosti.astronomy.cz/backup/boure20050530.htm>.
- HIPPEL, A. R., 1963. Molekulová fyzika hmoty. Edice: Teoretická knižnice inženýra. Praha: SNKL. 674 s.
- HOTTMAR, V., ADAMEK, B., 2014. Úvod do teórie šírenia elektromagnetických vln, antén a rádiových prijímačov. Žilina: Vydavateľstvá EDIS. 315 s. ISBN 978-80-5540-821-7.
- CHUM, J., 2004. Šírenie vln v zemské magnetosfére. Dizertační práce. Praha: České vysoké učení technické. Elektrotechnická fakulta. Katedra fyziky.
- JIRKŮ, J., 2010. Vlnové pojetí elektromagnetického pole. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://free-energy.xf.cz/teorie/vlna.pdf>.
- LYONS, W. L., 2000. Sprite chasing from the back porch [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.fma-research.com/Papers&presentations/spr-view-1.html>.
- MĚRY, L., 2007. Prvotné spracovanie údajov z detekčného systému SAFIR využitím algoritmu TOA. Bratislava, 2007. Diplomová práce. Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky. Vedoucí práce: Mgr. Marián Jurašek [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://diplomovka.sme.sk/zdroj/3194.pdf>.
- NOVINKY.CZ, 2014. Kulový blesk přišel o velkou část svého tajemství. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://novinky.cz/veda-skoly/324654-kulovy-blesk-prisel-o-velkou-cast-sveho-tajemstvi.html>.
- ONDRÁŠKOVÁ, A., ŠEVČÍK, S., ROSENBERG, L., KOSTECKÝ, P., 2008. Schumannove rezonance – Elektromagnetické „zvonenie Zeme (1. časť: História a teória). *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 53, No. 2, s. 89–104. Dostupné také z WWW: <http://dml.cz/dmlcz/141712>.
- PATŮC, J., 2009. Búrka 26. 6. 2009 Žilina. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <https://www.youtube.com/watch?v=OnYbKsG5kD8>.
- PATŮC, J., 2012. Rozbor jednoho úderu blesku do panelového domu. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné z WWW: <http://zdroje.elektrika.cz/book/rozbor-jednoho-uderu-blesku-do-paneloveho-domu/>.
- POPEK, M., 2012. Pozorování nadoblačných blesků v roce 2012. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://www.astro.cz/clanky/ukazy/pozorovani-nadoblacnych-blesku-v-roce-2012.html>.
- POPEK, M., 2014. Pozorování blesku v horních vrstvách atmosféry. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://www.astro.cz/clanky/ukazy/pozorovani-blesku-v-hornich-vrstvach-atmosfery.html>.
- POPEK, M., BEDNAŘ, J., 2012. Přechodné světelné úkazy související s bouřkovou činností. *Meteorologické zprávy*, roč. 65, č. 6, s. 168–173. ISSN 0026-1173. Dostupné také z WWW: http://www.amaterskameteorologie.cz/files/popek_bednar_1.pdf.
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A., 2003. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univerzity Press [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: https://books.google.sk/books?id=TuMa51Aa3RAC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_ge_summary_r#v=onepage&q&f=false.
- ROZHLAS.CZ, 2013a. Temný blesk předchází viditelnému. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: http://www.rozhlas.cz/leonardo/zpravy/_zprava/temny-blesk-predchazi-viditelnemu--1206072.
- ROZHLAS.CZ, 2013b. Laser ukáže cestu bleskům. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/laser-ukaze-cestu-bleskum--1040361.
- ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-1505-1.
- SKY-FIRE.TV, 2015. Sprites, Blue Jets, Elves and Superbolts [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://sky-fire.tv/index.cgi/spritesbluejetselves.html>.
- ŠTOLL, I., 1988. Tajemství kulového blesku. Praha: Horizont. 192 s. ISBN 40-033-88.
- UKAZY.ASTRO.CZ. 20110526Humlnet_Blesky-trutnov-2336selc.jpg [fotografie]. Dostupné z WWW: http://ukazy.astro.cz/upload/20110526Humlnet_Blesky-trutnov-2336selc.jpg. Formát: 1 200 × 900.
- Universum: Blesky plné energie [Universum: Lightning reloaded] [dokumentární film]. Režie Alfred Vendl. Rakousko, 2010.
- VAŇURA, J., 2009. Plazmový výboje zimní, letní, v těle člověka a kulový blesk. [online]. [cit. 10. 10. 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.wmmagazin.cz/view.php?cisloclanek=2009070003>.

Lektoři (Reviewers): Ing. Jan Mikeš, Ph.D., prof. RNDr. Jan Bednař, CSc.