

Úloha III.P ... bleskem

9 bodů; průměr 5,20; řešilo 46 studentů

Na čem závisí šířka kanálu blesku v bouři? Vytvořte kvantitativní model.

Karel narazil na tvrzení o hromosvodu Sky Tower.

Naším cílem je odhadnout průměr bleskového kanálu podle různých parametrů. Než se pustíme do číselných výpočtů, zkusme se nejdříve podrobněji podívat na průběh a vlastnosti blesku a kvalitativně odhadnout, jaké parametry by mohly mít na tloušťku bleskového kanálu vliv.

Kvalitativní popis

Jednoduše řečeno, blesk je elektrický výboj mezi oblakem a zemí. Vzniká tak, že ve speciálním oblaku typu Cumulonimbus probíhá separace náboje, takže se různé části oblaku nabíjejí různě. Základní model, se kterým budeme v tomto řešení pracovat, je, že spodní část oblaku se nabíjí záporně, zatímco horní část se nabíjí kladně. Ve skutečnosti se mohou v oblaku vyskytovat ještě další menší nábojová centra, která však pro jednoduchost zanedbáme.

Bleskových výbojů existuje několik různých typů. Přibližně 90 % se jich odehrává v rámci oblaku mezi jeho nábojovými centry, případně mezi nábojovými centry dvou sousedních oblaků. Tyto blesky však nejsou příliš dobře prozkoumané a nejsou pro člověka na zemi takovým rizikem. My se budeme zabývat známějšími blesky typu oblak-země, kterých také mohou být dva různé druhy. Obvyklejší (téměř z 90 %) jsou záporné blesky, které, jak jejich název napovídá, vycházejí ze záporného nábojového centra směrem k zemi. Méně časté jsou pak kladné blesky, které vycházejí z kladného nábojového centra a vyskytují se například v okamžiku, kdy vlivem velkého větru se toto centrum nachází přímo nad zemí bez odstínění záporným nábojovým centrem. Tyto blesky obvykle mají vyšší proud a mohou se vyskytnout, kvůli jejich původu ve vysoko položeném kladném nábojovém centru, i v okamžiku, kdy již bouřka přímo nad daným místem neprobíhá. Také mohou být doprovázeny i dalšími jevy jako nadoblačními blesky. My se však pro jednoduchost budeme zabývat pouze typickými zápornými blesky typu oblak-země.

Podívejme se na jednotlivé etapy časového vývoje blesku. I když máme oblak s oddělenými nábojovými centry, je napětí mezi oblakem a zemí asi desetkrát menší, než je průrazné napětí vzduchu. Příčina prvopočátku výboje je stále nejasná, pravděpodobně průrazné napětí lokálně snižují spršky částic kosmického záření způsobující ionizaci a korónové výboje na špičkách ledových krystalků. Jakmile je však výboj v této počáteční fázi nastartován, dochází k vývoji *vůdčívho výboje*, který postupuje po krocích z oblaku směrem k zemi, ionizuje kanál a po své délce distribuuje záporný náboj z oblaku, přičemž se během této cesty také může větvit.

Jakmile se vůdčí výboj přiblíží k zemi, vyrazí mu od země naproti *vstřícný výboj*. Když dojde k jejich propojení, šíří se směrem vzhůru takzvaný *zpětný výboj*, který vyrovnává potenciálový skok a neutralizuje bleskový kanál. Potom může ionizovaným kanálem protékat ještě takzvaný *udržovací proud* o velikosti maximálně jednotek kiloampérů. Pokud zůstal v oblaku ještě dostatek náboje, může po několika desítkách milisekund dojít k dalšímu vůdčímu výboji stejným nebo podobným kanálem a poté k *následnému zpětnému výboji*. Tento proces se může několikrát opakovat, průměrný počet zpětných výbojů na jeden blesk je 3 až 5, byly však zaznamenány blesky až s 20 zpětnými výboji.

Nyní se zamysleme, jaké parametry by mohly mít na tloušťku bleskového kanálu vliv. Vzhledem k tomu, že bleskem protékají velké proudy, měl by tloušťku kanálu určitě ovlivňovat proud. Jeho velikost bude závislá na několika parametrech, zejména na nashromážděném náboji v oblaku, na výšce nábojových center i na počáteční vodivosti vzduchu, která je ovlivněna například

tlakem, teplotou a vlhkostí. Dále bude určitě bleskový kanál ovlivněn vlastnostmi země pod ním, jako je nadmořská výška, vodivost podloží nebo typ zástavby.

Podívejme se tedy konkrétněji na fyzikální jevy, které ovlivňují tloušťku kanálu. Obecně předpokládáme, že tloušťku ovlivňují vlivy, které ji chtějí zvýšit a vlivy, které ji chtějí snížit, přičemž skutečná tloušťka je taková, při které se tyto vlivy vyrovnají. Co tedy může působit na rozšíření bleskového kanálu? Především to, že čím je kanál tlustší, tím má menší elektrický odpor, a tedy tím lépe jím může proud procházet. Dále také bude rozšiřování kanálu způsobovat termální expanze a difúze zahřátého kanálu do okolí. Co naopak tloušťku kanálu omezuje? Určitě nedostatek elektrického náboje na ionizování velké oblasti prostoru. Poté také magnetické pole generované proudem, který kanálem protéká, a které zajišťuje v kanálu tlak několika atmosfér.

Kvantitativní odhad

Nyní se pokusíme jednotlivé vlivy zkoumat kvantitativně v několika různých modelech. Vzhledem ke komplikovanosti iniciační fáze a vývoje vůdčího výboje se těmito částmi nebudeme zabývat a vezmeme nábojovou hustotu vůdčího výboje jako parametr.

Tabulka 1: Parametry negativního blesku typu oblak-země, data z Rakov a Uman (2003).

| Veličina | vůdčí výboj | zpětný výboj | udržovací proud |
|----------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| doba trvání | 35 ms | 70 – 80 μ s | 100 ms |
| proud | 100 – 200 A | 30 kA | 100 – 200 A |
| teplota kanálu | 10 000 K | 30 000 K | – |
| celkový náboj | 5 C | – | – |
| přenesený náboj | – | 5 C | 10 – 20 C |
| elektrický potenciál | 5 MV | – | – |
| šířka kanálu | – | 1 – 2 cm | – |

Model 1 – zpětný výboj, daná teplota a proud V tomto prvním nejjednodušším modelu se budeme zabývat zpětným výbojem, kde tloušťku kanálu odhadneme z rovnosti magnetického tlaku, který kanál stlačuje, a termálního tlaku, který ho rozpíná. Nejprve si vyjádříme magnetický tlak, který má obecně podobu

$$p_b = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (1)$$

kde B je velikost magnetické indukce a μ_0 je permeabilita vakua. Nyní se pokusíme vyjádřit magnetické pole z proudu, který kanálem prochází. K tomu využijeme Ampérův zákon

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I,$$

ze kterého vyjádříme magnetické pole na povrchu kanálu s poloměrem r , kterým prochází proud I , jako

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (2)$$

Nyní kombinací vztahů (1) a (2) vyjádříme magnetický tlak jako

$$p_b = \frac{I^2 \mu_0}{8\pi^2 r^2}.$$

Ten dáme do rovnosti s termálním tlakem $p_T = nkT$, kde n je hustota částic, k je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota v kelvinech. Dostáváme vztah

$$\frac{I^2 \mu_0}{8\pi^2 r^2} = nkT,$$

ze kterého vyjádříme poloměr r jako

$$r = \sqrt{\frac{I^2 \mu_0}{8\pi^2 nkT}}, \quad (3)$$

kdy po dosazení hodnot I a T z tabulky 1 a $n = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ vypočítané z molárního objemu ideálního plynu za standardních podmínek (1013 hPa, 0 °C) dostáváme hodnotu $r \approx 1,13 \text{ mm}$.

Pomocí této úvahy jsme tedy odvodili vztah (3), ze kterého vyplývá, že průměr bleskového kanálu roste s proudem, což bychom intuitivně očekávali, ale naopak klesá s teplotou kanálu, což je mírně proti intuici. Zároveň předpokládáme, že proud a teplota nejsou nezávislé parametry, ale jsou vzájemně svázány, což se pokusíme vystihnout ve druhém modelu. Další věcí, kterou se budeme snažit v dalších modelech napravit, je výsledný poloměr, který nám vyšel přibližně o řád nižší než dle tabulkových hodnot 1.

Model 2 – rovnovážná teplota Jak plyne z předchozích výpočtů, kanál během zpětného výboje má přibližně o řád menší průměr než bychom očekávali. Navíc vzhledem k tomu, že zpětný výboj trvá jenom krátce, je většina přeneseného náboje způsobena udržovacím proudem. Protože doby trvání tohoto proudu jsou poměrně dlouhé (desítky milisekund), budeme bleskový kanál považovat za rovnovážný. Zkusíme tedy spočítat jeho šířku, pokud veškeré zahřívání průchodem proudu I je přeměněno na záření kanálu jakožto černého tělesa. Vyzařovaný výkon je roven

$$P_{\text{out}} = 2\pi r l \sigma T^4,$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota. Výkon proudu je pak ohmický výkon daný vztahem

$$P_{\text{in}} = UI = RI^2,$$

kde odpor kanálu vyjádříme pomocí vodivosti Σ jako $R = l/(\Sigma S)$, kde l je délka kanálu, $S = \pi r^2$ je plocha jeho průřezu a r je hledaný poloměr. Vodivost kanálu Σ pak závisí na teplotě a stupni ionizace plazmatu. Pro kanál blesku můžeme její hodnotu odhadnout na $\Sigma = 3 \cdot 10^4 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$.

Pro výkon procházejícího proudu tedy dostáváme vztah

$$P_{\text{in}} = \frac{I^2 l}{\pi r^2 \Sigma}.$$

Porovnáním těchto výkonů dostaneme

$$\sigma T^4 = \frac{I^2}{2\pi^2 r^3 \Sigma},$$

¹Microphysics of Atmospheric Phenomena, Boris M. Smirnov, Springer Atmospheric Sciences, 2017

ze kterého můžeme vyjádřit poloměr jako

$$r = \sqrt[3]{\frac{I^2}{2\sigma\pi^2\Sigma T^4}}.$$

Pohledem na udržovací proud z tabulky 1 a teploty kanálu 10 000 K (předpokládáme, že už od zpětného výboje kanál trochu vychladl, ale ne moc, abychom stále měli plně ionizované plazma, pro které platí použitý vztah pro vodivost) dostáváme $r = 0,3$ mm, tedy ještě méně než v předchozím modelu. Dosazením hodnot pro zpětný výboj ($T = 30\,000$ K a $I = 30$ kA) dostáváme poloměr $r = 3,2$ mm, tedy větší než předtím. Ve skutečnosti ani v jedné z těchto situací není kanál v rovnováze, ale pro zpětný výboj se stále zahřívá, tedy poloměr je menší, naopak při udržovacím proudu kanál chladne, tedy je poloměr větší. Obě vypočtené hodnoty jsou však menší než očekávaný poloměr.

Vidíme, že opět jsme dostali poloměr kanálu úměrný proudu, je to tedy jedna z nejpodstatnějších veličin. Navíc pro dobu trvání ve zlomcích sekundy už začíná hrát roli také difúze, kterou rozebereme v dalším modelu.

Model 3 – termální difuzivita Vzhledem k tomu, že udržovací proud trvá již poměrně dlouhou dobu a teplotní rozdíly mezi bleskovým kanálem a okolím jsou extrémní, zkusíme uvažovat další jev, kterým je tepelná difúze. Ve výpočtu budeme následovat postup v knize *Microphysics of Atmospheric Phenomena*.² Nejprve si z Ohmova zákona vyjádříme proud bleskem jako

$$I = \pi r^2 \Sigma E,$$

kde E je elektrické pole. Dále vyjádříme rozpínání kanálu pomocí koeficientu termální difúze χ jako

$$r^2 = 4\chi\tau,$$

kde τ je doba trvání výboje. Kombinací těchto dvou výrazů dostaneme pro termální difúzi

$$\chi = \frac{I}{4\pi E\tau\Sigma},$$

z čehož už můžeme vyjádřit poloměr bleskového kanálu

$$r = \sqrt{\frac{I}{\pi E\Sigma}}.$$

Dosazením hodnot $E = 20$ kV·m⁻¹, $\Sigma = 3 \cdot 10^4$ S·m⁻¹ a příslušných proudů dostáváme $r = 4,0$ mm pro zpětný výboj a $r = 0,2$ mm pro udržovací proud, tedy velmi podobné hodnoty jako v předchozím modelu.

Závěr

Prozkoumali jsme několik zjednodušených modelů blesků s různými výsledky pro odhad jeho poloměru, avšak všechny byly přibližně o řád nižší než očekávané hodnoty. To může být dáno tím, že plazma v pozorovaném kanálu není homogenní, ale do měřené tloušťky v řádu cm přispívá nezanedbatelnou měrou takzvaný *korónový* výboj v okolí kanálu.

²*Microphysics of Atmospheric Phenomena*, Boris M. Smirnov, Springer Atmospheric Sciences, 2017

Jak jsme očekávali, jeden z největších vlivů na tloušťku kanálu má velikost procházejícího proudu. Dosazovali jsme typické hodnoty proudu v řádu desítek kA pro zpětný výboj, avšak maximální dosažené hodnoty mohou být až desetkrát vyšší.³ Kromě toho jsme považovali tento proud v daném úseku výboje blesku za konstantní, avšak skutečný blesk je velmi dynamický proces, tedy proud ani teplota konstantní nejsou a ani nemusí být dosažena žádná z použitých podmínek rovnováhy. Skutečný blesk také není přímá spojnice mraku a země, ale různě se zakřivuje a větví, což přidává bleskovému kanálu další odpor a kapacitu.

Jelikož materiálem uvnitř kanálu je plazma s teplotou vyšší, než je teplota na povrchu Slunce, závisí mnoho jeho termálních i elektrických vlastností na vlastnostech plazmatu, jako je stupeň ionizace, srážková frekvence a účinný průřez srážek částic uvnitř plazmatu. Ty ovlivňují elektrickou vodivost a tepelnou kapacitu, tedy i teplotu plazmatu, která se navíc může lišit pro elektrony a pro ionty. Rychlé změny proudů navíc generují vlny v širokém spektru elektromagnetického pole, které odnášejí nezanedbatelnou část energie a díky kterým můžeme blesky z dálky detekovat a měřit některé jejich vlastnosti (viz například detekční síť WWLLN⁴ nebo EUCLID⁵). Přesný model by tedy vyžadoval velmi pokročilé modelování plazmatu, pro řádový odhad tloušťky kanálu v řádech milimetrů až centimetrů nám však stačil poměrně jednoduchý popis.

Kateřina Rosická
kacka@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

³https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Extreme%20Values%20of%20Lightning%20Parameters_A.%20Smorgonskiy%20et%20al.pdf

⁴<https://wwlln.net/>

⁵<https://www.euclid.org/>