

Rozhledy matematicko-fyzikální

Jan Bednář; Jaroslav Kopáček; Michal Žák

Oblačná elektřina – od zemského kondenzátoru ke kulovému blesku

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 95 (2020), No. 4, 21–37

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/148563>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2020

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Oblačná elektřina – od zemského kondenzátoru ke kulovému blesku

*Jan Bednář, Jaroslav Kopáček, Michal Žák
Katedra fyziky atmosféry MFF UK, Praha*

Do třetice přinášíme další ukázkou z knihy Jak vzniká počasí [1], tentokrát zaměřenou na „elektřinu v oblacích“. V článku může čtenář hledat odpovědi mimo jiné na otázky: Jak si můžeme z hlediska elektřiny představit Zemi a její atmosféru? Proč jsou různé části oblaků různě elektricky nabitý? Co (ne)víme o kulovém blesku? Se svolením autorů a nakladatelství Karolinum byl text pro potřeby našeho časopisu upraven.



Úvod

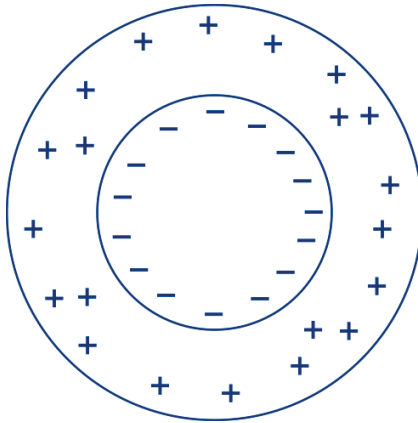
V odborné literatuře se obvykle rozlišují dva základní typy podmínek pro elektrické procesy probíhající v zemské atmosféře. První z nich bývá v anglosaské literatuře označován *fine weather conditions*, což se do češtiny zpravidla překládá jako podmínky klidného ovzduší, a znamená situaci s jasnou oblohou nebo jen s málo významnou oblačností, beze srážek, bez výskytu mlhy, silného větru apod. Protikladem je anglosaský termín *disturb weather conditions*, v překladu zpravidla uveden jako podmínky bouřlivého počasí, odpovídající především výskytu výrazné oblačnosti, zejména pak bouřkových oblaků. Protože atmosféra a zemský povrch jsou převážně nabitы elektrickými náboji opačné polarity, vytváří se v atmosféře přibližně vertikálně orientované elektrické pole, jehož intenzita dosahuje u zemského povrchu za podmínek klidného ovzduší nejčastěji hodnot kolem $130\text{--}140 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Náboj zemského povrchu je přitom záporný (stejněho znaménka jako náboj elektronu), zatímco atmosféra nese převahu kladného náboje. V určitých případech, především pod základnami bouřkových oblaků, však elektrická pole zesilují řádově až na desítky tisíc $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ a jsou orientována opačně než za podmínek klidného ovzduší.

Země jako kondenzátor

Elektrická vodivost vzduchu v troposféře (ve spodní části atmosféry) je velmi malá (i když nikoli přímo nulová) a vzduch zde můžeme považovat za technicky dobré dielektrikum. V důsledku zvětšující se ionizace vzduchu s výškou však působením kosmického záření roste i elektrická vodivost vzduchu. Ve výškách přibližně $50\text{--}60 \text{ km}$ bývá vzduch již natolik elektricky vodivý, že jednotlivé myšlené kulové plochy obepínající Zemi zde můžeme považovat ve vztahu k elektrickému potenciálu za ekvipotenciální plochy. Vrstvy atmosféry zhruba nad výškou 50 km se pak v příslušné odborné literatuře někdy označují jako *elektrosféra*.

Na základě právě uvedeného lze zkonstruovat jednoduchý model elektrické struktury soustavy zemský povrch – atmosféra, a to v podobě gigantického sférického kondenzátoru (viz obr. 1), který je – v příslušné abstrakci – tvořen dvěma opačně nabitými vodivými kulovými plochami, konkrétně záporně nabitým zemským povrchem a kladnou elektrosférou, oddělenými vzdušnou vrstvou s dostatečně malou elektrickou vodivostí. Protože však elektrická vodivost vzduchu nikdy není zcela nulová a v atmosféře existuje přibližně vertikálně orientované elektrické pole,

musí atmosférou vertikálně stále protékat elektrické proudy, které přivádějí k zemskému povrchu kladný náboj a vybíjejí tak daný sférický kondenzátor. Kvantitativní rozbory této skutečnosti jednoznačně ukazují, že tímto způsobem by relativně rychle, tj. s relaxační dobou řádově ne více než desítky minut, došlo k vybití kondenzátoru, neutralizaci záporného náboje zemského povrchu a zániku vertikálně orientovaného elektrického pole v atmosféře. Jako relaxační dobu v tomto případě uvažujeme čas, za který by hustota povrchového rozložení záporného elektrického náboje na zemském povrchu klesla na $1/e$ výchozí hodnoty (e je základ přirozených logaritmů, $e \approx 2,718$). Protože však elektrické pole v ovzduší je z dlouhodobého a velkoprostorového hlediska stálé, musí existovat opačně působící nabíjecí mechanismus generující záporný náboj zemského povrchu. Jak uvidíme z dalšího, takový mechanismus lze spatřovat v projevech oblačné elektřiny, zejména pak při bouřkové činnosti. Konkrétní mechanismy, přivádějící k zemi z dolních partií oblaků převážně záporný elektrický náboj, jsou především hrotové (bodové) výboje a blesky.



Obr. 1: Zemský sférický kondenzátor

Na rozdíl od obecné fyzikální literatury se v odborné literatuře z oblasti atmosférické elektřiny zpravidla volí opačná orientace elektrického pole, tzn., že siločáry vycházejí ze záporného elektrického náboje a směřují k náboji kladnému. Důvodem je to, aby základní atmosférické elektrické pole odpovídající uvedenému modelu sférického kondenzátoru za podmínek klidného ovzduší mohlo být uvažováno jako kladné, tj. s orientací siločar zdola nahoru.

Tři oblačné typy z hlediska elektřiny

Oblaky se v atmosféře projevují charakteristickými elektrickými efekty. Pokud jde o velikosti koncentrací elektrického náboje, způsob jeho prostorového rozložení a intenzitu elektrického pole uvnitř oblaků, lze přibližně rozlišovat tři oblačné typy:

1. *Relativně slabé elektrické projevy u vrstevnatých nesrážkových oblaků*, kdy koncentrace elektrického náboje a elektrická pole uvnitř oblaku jsou řádově srovnatelné s poměry v bezoblačném vzduchu. Z hlediska vnitřní struktury se v tomto případě oblačná vrstva nejčastěji skládá ze dvou opačně nabitých dílčích vrstev, přičemž případy, kdy dolní z těchto vrstev je záporné a horní kladně nabitá, a případy opačné polarity oblaku jsou přibližně stejně pravděpodobné. Vyskytují se však vcelku běžně i oblaky tvořené pouze jednou elektricky nabitou vrstvou nebo naopak oblaky s více takovými střídajícími se vrstvami či oblaky téměř elektricky nenabitě.

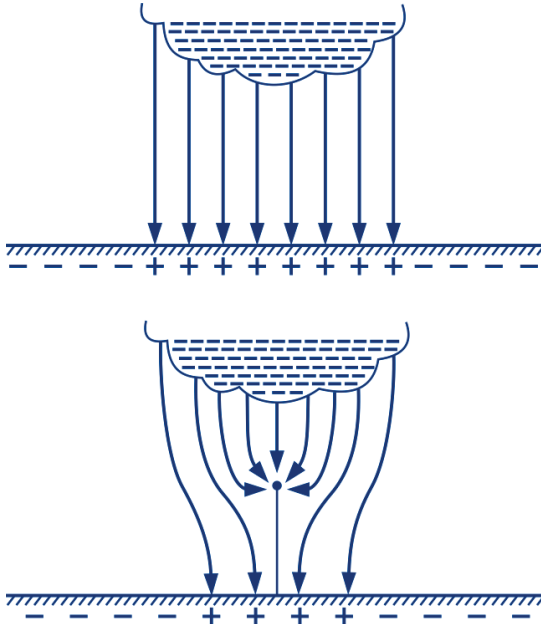
2. *Silnější elektrické projevy vrstevnatých srážkových oblaků*, tj. především smíšených oblaků druhu nimbostratus – Ns. V tomto případě již nad ostatními typy rozložení elektrického náboje převládá (nikoli však výlučně) bipolární struktura, kdy v dolní části oblaku je koncentrován záporný a v horní části kladný elektrický náboj. Koncentrace elektrického náboje a elektrická pole uvnitř oblaku bývají přitom asi o řád větší, než je tomu v bezoblačné atmosféře.

3. *Projevy bouřkové elektřiny vyskytující se u oblaků druhu cumulonimbus – Cb*, kdy bipolární struktura se záporným nábojem v dolní části oblaku a kladným nábojem v jeho horní části je již výlučná a elektrická pole uvnitř oblaků i pod nimi bývají alespoň o dva řády větší ve srovnání s bezoblačným ovzduším (viz obr. 2). Záporný náboj ve spodní části bouřkového oblaku způsobuje indukování („vytvoření“) kladného elektrického náboje na zemském povrchu, což má za následek, že pod bouřkovými oblaky, ale někdy i pod nebouřkovými mohutnějšími srážkovými oblaky se zemský povrch jeví ve srovnání se svým běžným záporným nabitím jako anomálně kladný. Orientace elektrického pole pod oblačnou základnou je pak přirozeně opačná, než je tomu např. za podmínek klidného ovzduší.

Mechanismy vzniku center kladného a záporného náboje

Jednoznačně vysvětlit mechanismus vzniku vzájemně separovaných center kladného a záporného náboje v oblacích není jednoduché. V pod-

statě nebyla dosud vytvořena jednotná teorie, která by beze zbytku vysvětlovala relativně slabé elektrické charakteristiky nesrážkových oblaků, silnější elektrické projevy u oblaků, z nichž mohou vypadávat srážky trvalejšího charakteru, i nápadné elektrické efekty v bouřkových oblacích. Všeobecně se předpokládá, že při separování elektrických nábojů opačných znamének v oblacích nepůsobí pouze jediný výlučný mechanismus, ale spíše jde o spolupůsobení většího počtu faktorů, jejichž dílčí příspěvky se z kvantitativního hlediska mohou podstatně měnit v závislosti na různých podmínkách.



Obr. 2: Elektrické siločáry pod bouřkovým oblakem, na dolní části obrázku deformace jejich pole při hrotovém výboji

Historicky dosáhla značné publicity *Wilsonova teorie*, pocházející ve své výchozí verzi z r. 1929, která vychází z toho, že v obvykle se vyskytujícím vnějším elektrickém poli v atmosféře jsou padající dešťové kapky elektricky polarizovány, přičemž jejich horní části nesou záporný a dolní části kladný náboj. Za předpokladu, že rychlost pádu kapek je větší než rychlost pohybu kladných atmosférických iontů směrem dolů k záporně nabitému zemskému povrchu, budou padající kapky zachycovat převážně

záporné ionty, a to na své dolní kladně nabitě části, čímž dojde k jejich celkově zápornému nabíjení. Ve spodních partiích oblaku se potom soubory padajících kapek projevují jako záporné centrum elektrického náboje, zatímco nahoře zůstává po zachycení alespoň části přítomných záporných iontů převaha náboje kladného. Takto lze kvalitativně zdůvodnit vznik horního kladného a dolního záporného centra elektrického náboje v oblaku, ale na kvantitativní vysvětlení velikostí elektrických nábojů v bouřkových oblacích právě popsaný mechanismus zdaleka nestačí.

Kromě toho se ukazuje, že elektrická pole jsou v bouřkových oblacích zpravidla natolik silná, že nemůže být splněn předpoklad o větší rychlosti pádu kapek ve srovnání s rychlostí dolů se pohybujících kladných iontů. Na druhé straně však i v kontextu současných znalostí nelze vyloučit, že mechanismus uvažovaný v právě zmiňované teorii má určitý reálný význam, a to zejména u oblaků se slabšími elektrickými projevy. Je zřejmé, že analogické procesy je možné uvažovat i v souvislosti s ledovými částicemi přítomnými v oblacích. K tomu můžeme zmínit *Wallovu teorii* z roku 1948. Její autor usuzoval, že ledové krystalky v atmosféře mohou být elektricky polarizovány samy o sobě a vnější elektrické pole působí pouze jejich souhlasnou orientaci v prostoru (tzv. orientační polarizace).

Dvě skupiny teorií vycházející z přítomnosti pevné fáze vody

Protože silné elektrické efekty v oblacích jsou prakticky vždy spojeny s intenzivními srážkotvornými procesy a s vypadáváním srážek, což zpravidla předpokládá smíšený charakter oblaků, je třeba největší váhu zřejmě přisuzovat teoriím vycházejícím z přítomnosti pevné fáze vody, tj. ledových částic v oblacích. Tyto teorie můžeme v zásadě rozdělit do dvou skupin, z nichž první je *založena na termoelektrických vlastnostech ledu*, zatímco druhá *vychází z elektrických dějů při intenzivním obalování oblačných ledových částic přechlazenou vodou*, což probíhá za teplot pod 0°C .

V objemovém elementu ledu je určitá část molekul H_2O disociována a vyskytují se pak zde anionty OH^- a kationty vodíku H^+ , které jsou ve srovnání s OH^- natolik pohyblivější, že elektrické efekty vyplývající z termického pohybu aniontů OH^- lze vcelku zanedbat. Představme si nyní ledovou tyčinku, jejíž dva konce udržujeme při různých teplotách. Kationty H^+ budou působením termické difuze větší měrou přecházet na chladnější konec, který se tak bude kladně nabíjet, zatímco na svém teplejším konci tyčinka ponese v důsledku toho přebytek záporného náboje.

V bouřkovém oblaku můžeme předpokládat, že relativně velké ledové částice zachycují podstatně více přechlazených vodních kapiček, a více se tedy na svém povrchu zahřívají uvolňováním tepla při jejich namrzání než drobné ledové částičky. U nich se proces zachycování přechlazených kapek vody uplatňuje minimálně, neboť částice srovnatelných rozměrů se ve vzdušném proudu spíše vzájemně obtékají. Při vzájemných přibližně pružných nárazech se pak na okamžik dostává do kontaktu relativně teplejší povrch velkých ledových částic s chladnějším povrchem menších ledových krystalků a úlomků ledu, což způsobí, že velké elementy se nabíjejí záporně, zatímco malé částice kladně. Velké ledové částice mohou padat tak velkou rychlostí, že propadávají dolů někdy i přes vzestupné vzdušné proudy a ve spodní části oblaku se pak jeví jako dolní záporné centrum. Kladně nabitě menší částice jsou však unášeny vzhůru a vytvářejí horní kladné centrum elektrického náboje.

Ve druhé skupině teorií se předpokládá, že proces zachycování přechlazených vodních kapiček na povrchu oblačných ledových částic může být natolik intenzivní, že zachycená přechlazená voda nestačí okamžitě zmrznout a led se pak přechodně obaluje vrstvičkou přechlazené vody. Laboratorní pokusy i teoretické závěry ukazují, že pokud se na ledové podložce při teplotách pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vytvoří vrstvička přechlazené vody obsahující chemické příměsi typické pro oblačnou vodu (zejména různé rozpustěné soli), dochází k zápornému nabíjení ledu a ke kladnému nabíjení obalové vrstvy přechlazené vody. V bouřkovém oblaku, kde vždy působí silná turbulence a dochází k četným vzájemným srážkám oblačných částic, mohou z obalové blány obsahující přechlazenou vodu odstříkovat drobné kladně nabitě vodní kapičky, které pak působením vzestupných vzdušných proudů směřují do horní části oblaku. Záporně nabitě větší elementy však propadávají dolů, neboť rychlost jejich pádu převyšuje rychlost vzestupných proudů vzduchu. Obdobně bývá někdy pozorováno záporné nabíjení větších ledových částic i při okamžitém namrzání přechlazených vodních kapiček, kdy je kladný náboj vynášen do okolí prostřednictvím odlétávajících jemných úlomků ledu.

Všechny právě zmíněné mechanismy separování elektrických nábojů opačného znaménka v oblacích mají společné jednoduché schéma, které je možno rozdělit na dvě fáze:

1. *Větší srážkové elementy* se z určitého důvodu vysvětlovaného příslušnou teorií nabíjejí záporně, zatímco v jejich okolí se v důsledku toho vytváří převaha kladného náboje.

2. *Vlastní mechanické separování elektrických nábojů je v podstatě způ-*

sobeno zemskou gravitací za spolupůsobení vzestupných vzdušných proudů v oblaku. Velké elementy padají dolů, v dolní části oblaku se pak jeví jako záporné centrum. Nahoře zůstává převaha kladného náboje v podobě kladných iontů, popř. převážně kladně nabitých malých přechlazených vodních kapiček nebo menších ledových částic, které padají menší rychlostí, než je rychlost vzestupných proudů vzduchu v oblaku.

Kromě těchto tzv. *gravitačních teorií* lze v odborné literatuře nalézt i teorie další, s obvykle přisuzovaným menším významem, kde je vliv zemské gravitace substituován relativními pohyby ve vzestupných a sestupných proudech vzduchu v bouřkovém oblaku. Některé z nich uvažují i případný vliv hrotových výbojů, o nichž pojednáváme v bezprostředně následujícím textu.

Pro úplnost je na tomto místě vhodné zmínit i skutečnost, že kromě dvou hlavních center elektrického náboje (horního kladného a dolního záporného) se v bouřkovém oblaku zpravidla vyskytuje i podstatně menší, tzv. podružné centrum kladného náboje, lokalizované do oblasti základny oblaku a prostorově i časově vázané na intenzivní vypadávání srážek za podmínky, že oblačná základna se nalézá pod nulovou izotermou. Předpokládá se, že toto centrum vzniká mechanismy spojenými s táním ledových elementů v padajících srážkách a s okamžitým rozpadáním takto vzniklých objemových elementů kapalné vody.

Celkově je možno shrnout, že projevy bouřkové elektřiny předpokládají silné mechanismy generování oblačných center separovaného kladného a záporného elektrického náboje, které vyžadují bouřlivé narůstání ledové fáze v bouřkových oblacích. V mezích všech současných znalostí dané problematiky se lze domnívat, že termodynamické podmínky pro takové procesy se v reálné troposférické oblasti zemské atmosféry mohou typicky vyskytnout právě v souvislosti s velmi mohutnými vertikálními pohyby vzduchu podmíněnými silnou atmosférickou konvekcí.

Hrotové (bodové) výboje

Za běžných podmínek v atmosféře představují přibližně vertikálně tekoucí elektrické proudy pohyb iontů vzniklých zpravidla působením kosmického nebo v blízkosti zemského povrchu radioaktivního záření. Elektrony po svém odtržení od atomů a molekul jsou při srážkách s dalšími molekulami na nich obvykle zachycovány, neboť nemají kinetickou energii postačující k tomu, aby při nárazu způsobily novou ionizaci, tzv. ionizaci nárazem. V dostatečně silném elektrickém poli však volný elektron může během časového intervalu mezi svým uvolněním z dané molekuly

a první srážkou s další, obvykle elektricky neutrální molekulou získat natolik velkou kinetickou energii, aby molekulu, do níž narazí, ionizoval nárazem, tj. způsobil na ní nové odtržení elektronu a vznik dalšího iontu. Obdobně mohou působit i další elektricky nabitě částice, např. ionizované molekuly nebo jejich shluky, které však vzhledem ke své podstatně menší pohyblivosti mají ve srovnání s volnými elektrony slabší ionizační schopnost. Elektron uvolněný při zmíněném nárazu z původně elektricky neutrální molekuly pak dále působí ionizaci nárazem a počet vzniklých iontů lavinovitě roste.

Uvažujme nyní elektrické pole mezi oblakem, v jehož spodní části je koncentrován relativně velký záporný náboj, a zemí, na níž je tímto záporným nábojem indukován kladný elektrický náboj. Elektrické siločáry jsou přibližně vertikálně orientovány a tato situace je schematicky znázorněna na horní části obr. 2. Do takto charakterizovaného elektrického pole vložíme pak elektrický vodič natolik malých rozměrů, abychom ho v daném přiblížení mohli považovat za bod (hrot), který je uzemněn, tj. vodivě spojen se zemským povrchem, a má s ním proto stejný elektrický potenciál. V okolí tohoto uzemněného hrotu jsou pak elektrické siločáry deformovány tak, jak je zřejmé z dolní části obr. 2. Tímto způsobem vzniká v bezprostředním okolí daného uzemněného hrotu zesílené elektrické pole („zhuštěné elektrické siločáry“), čímž mohou být v některých případech vytvořeny podmínky pro ionizaci nárazem. Okolo zmíněného hrotu se pak vytváří oblak iontů, z něhož jsou uzemňujícím svodem odváděny k zemskému povrchu ty částice, jež nesou vzhledem k zemi náboj opačného znaménka, tj. v zobrazeném případě záporný náboj. Ten se pak po zemském povrchu vzhledem k jeho vysoké elektrické vodivosti prakticky okamžitě rozestře.

Pro bodový uzemněný vodič nalézající se v určité výšce nad zemí existuje jistá kritická hodnota velikosti intenzity původního elektrického pole, při níž v jeho bezprostředním okolí nastává vlivem zhuštění elektrických siločar ionizace nárazem a vytváří se tam hrotový výboj. Takováto podmínka bývá splněna pod základnami bouřkových a podobných oblaků, a to často i tehdy, neprojevuje-li se právě elektrická aktivita v podobě blesků.

Ideální dokonale uzemněné bodové vodiče můžeme v přírodě najít jen zřídka. S přiměřeně menší účinností však obdobným způsobem vznikají příslušné výboje za vhodných podmínek na vrcholcích stromů, keřů, koncích větví, hrotech jehličí apod. Přirozeně účinnější mohou být některé objekty antropogenního původu, jako např. vrcholky stožárů, věží atd.

Silné hrotové výboje, lokálně podmíněné intenzivní ionizací nárazem, jsou provázeny i zvukovými efekty (typicky určitým druhem praskání) a někdy i dobře patrnými zrakovými vjemy spočívajícími v jiskření a sršení různých, zejména kovových hrotů, špiček stožárů, bání věží apod. U nás bývá tento úkaz lidově označován jako *Eliášův oheň*, *Eliášovo světlo*, *oheň sv. Eliáše* apod. Z odborného terminologického hlediska jde o druh tzv. *koronárního výboje*. Intenzita hrotových výbojů a výraznost právě zmíněných jevů je úměrná rozdílu elektrického potenciálu mezi uzemněným bodovým vodičem a okolním vzduchem, což je totéž co rozdíl potenciálů mezi zemským povrchem a hladinou ovzduší, v níž se uvažovaný bodový vodič nalézá.

Jako historickou zajímavost lze uvést, že na principu odsávání elektrického náboje z dolní části bouřkových oblaků prostřednictvím hrotových výbojů byl v podstatě založen již v polovině 18. století *bleskosvod* (*hromosvod*) *Prokopa Diviše*.

Jinou zajímavostí může být to, že zde zmíněné české lidové označování příslušného úkazu obvykle chybně navozuje souvislost se starozákonním prorokem Eliášem. Cizojazyčné ekvivalenty však vesměs obsahují jméno Elmo, což neodpovídá vlastnímu jménu Eliáš, ale představuje jednu ze dvou variant italského překladu jména Erasmus (Elmo, Erasmo). Zde skutečně jde o Erasma z Antiochie, uváděného též jako Erasmus z Formie, křesťanského světce a mučedníka z doby římského císaře Diokleciána (uváděný rok umučení 303). Ten byl zejména ve středomořské oblasti ve středověku uctíván námořníky a vzýván při bouřích na moři jako ochránce před úderem blesku, což souviselo s legendisticky popisovanou událostí z jeho života (záchrana lodi po úderu blesku do stožáru).

Hrotové (bodové) výboje se nesporně významně podílejí na přívodu záporného náboje k zemskému povrchu a tím významně přispívají k dobíjení dříve zmíněného zemského sférického kondenzátoru. Při menší pozornosti by se však čtenář příslušné odborné literatury mohl někdy domnívat, že v ní ohledně kvantifikace tohoto procesu naráží na rozporná tvrzení. Lze nalézt závěry, že hrotové výboje jsou v tomto směru účinnější než blesky, jindy je možné setkat se s tím, že právě blesky dodávají zemi většinu k ní přitékajícího záporného náboje. Zde je však vždy nutno brát ohled na kontext popisované situace.

Je zřejmé, že nejrůznější objekty přirozeného i umělého (antropogenního) původu, které lze v jistém přiblížení považovat za realizaci hrotů s elektricky vodivým svodem k zemskému povrchu, a nalézající se tedy na stejném elektrickém potenciálu jako zemský povrch, mohou účinně

odsávat z atmosféry elektrický náboj opačného znaménka, než odpovídá aktuálnímu nabití zemského povrchu. Tento proces zřejmě může se slabší, ale dostatečnou účinností probíhat i tehdy, kdy zesílené elektrické pole v bezprostředním okolí daného hrotu ještě nedosahuje intenzity potřebné k tomu, aby přímo vznikla ionizace nárazem. V širším slova smyslu zde můžeme uvažovat o svého druhu tiché formě hrotového výboje. K příslušnému přenosu záporného náboje shora k zemskému povrchu pak dochází ve značném prostorovém i časovém rozsahu pod základnami oblaků, které nesou ve své spodní části dostatečně velký záporný náboj, což odpovídá mohutnějším srážkovým oblakům, i když ještě nemusí jít o elektricky aktivní bouřkové oblaky. Jde-li tedy o dlouhodobé a velkoprostorové bilancování přenosu záporného elektrického náboje k zemskému povrchu mechanismy odpovídajícími hrotovým výbojům za celého spektra k tomu vhodných meteorologických situací, potom v celkové bilanci přinášejí tyto mechanismy k zemskému povrchu podstatně více záporného náboje než blesky. Naproti tomu za časově omezené situace, odpovídající v dané lokalitě aktuálnímu průběhu bouřky, platí mezi velikostmi přenosů záporného náboje k zemskému povrchu uskutečňovaných prostřednictvím hrotových výbojů a blesků relace opačná.

Blesky

V případě blesku jde v zásadě o *silný jiskrový výboj* buď mezi centry elektrického náboje opačné polarity uvnitř bouřkového oblaku druhu cumulonimbus – Cb (zpravidla mezi centrem kladného náboje v horní části oblaku a centrem záporného náboje v jeho dolní části), nebo mezi jedním tímto centrem (nejčastěji dolním záporným) a zemským povrchem. V prvním případě se obvykle mluví o *vnitrooblačném (vnitřním) blesku*, ve druhém o *blesku do země*. Vyskytují se však běžně i vnitřní blesky mezi elektrickými centry různých konvekčních cel uvnitř složitých komplexů multicelárních bouřkových oblaků. Kladné blesky do země se významněji objevují buď při velkém sklonu vertikální osy bouřkového oblaku, kdy horní centrum kladného náboje je vůči poloze dolního záporného centra značně horizontálně posunuto, nebo v pozdních fázích bouřky, kdy elektrická aktivita dolního záporného centra je předchozími blesky do země již značně vyčerpána. Na rozdíl od hrotových výbojů, které probíhají v omezených objemech vzduchu v bezprostředním okolí elektricky vodivých předmětů malých rozměrů vodivě spojených se zemským povrchem, jde v případě blesku o elektrický výboj spojený s vysokou ionizací vzduchu ve značném prostorovém rozsahu.

První hlavní viditelná fáze blesku je tvořena *vůdčím výbojem* (vůdcem blesku, angl. leader – odtud dnes v češtině někdy používané označení líder blesku), jenž vytvoří opticky dobře patrný kanál vysoce ionizovaného a zahřátého vzduchu, jímž pak po určitý časový interval protéká elektrický proud. Vůdčí výboj často postupuje po jistých krocích (stepped leader), což lze vysvětlit tak, že na jeho dráze dochází k poklesu gradientu potenciálu pod určitou kritickou hodnotu a pohyb výboje se pak na několik mikrosekund až milisekund zastavuje. Během tohoto času však intenzita elektrického pole znovu naroste a výboj pokračuje dále. Dle podoby tohoto krokování se rozlišují blesky *typu alfa* a *typu beta*. V případě blesků *typu alfa* odpovídá délka jednotlivých kroků řádově desítkám až několika stovkám metrů, převažuje vertikální struktura blesku, trvání kroku řádově odpovídá mikrosekundám a rychlost postupu vůdce řádově dosahuje až $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U blesků *typu beta* bývají počáteční rychlosti pohybu vůdce řádově $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, rychle však klesají, a to alespoň o řád, blesk je bohatě horizontálně větvený s relativně dlouhými kroky, které se však směrem dolů většinou opticky zkracují.

Průměry kanálů ionizovaného vzduchu dosahují podle výsledků četných pozorování několika mm až většího počtu cm, v některých případech až dm. Podle intenzity jednotlivých pozorovaných spektrálních čar plynů tvořících vzdušnou směs lze soudit, že teploty v kanálech blesků krátkodobě dosahují až hodnot kolem 30 tisíc kelvinů.

Vývoj a vnitřní struktura blesku

Pokud jde o podrobnější popis vývoje a vnitřní struktury individuálního bleskového výboje, věnujme se typickému případu blesku mezi dolním záporným centrem a zemským povrchem (záporný blesk do země). Zprvu se vytváří ještě bez optické patrnosti jakýsi *předvýboj*, kdy se ve vzduchu formují „kanálky“ svádějící k zemi záporný náboj, a takto vzniknou podmínky pro vůdčí výboj. Příčinou obvyklého větvení právě zmíněných vodivých kanálků je často silná prostorová nehomogenita elektrického pole. V některých (méně častých) případech se však takto uplatní pouze jeden dominující kanál předvýboje, čímž posléze vznikne nevětvený (čárový) blesk. Jsou-li na zemi podmínky pro dostatečně intenzivní indukování kladného náboje, formují se směrem vzhůru obdobné, ale obvykle kratší kanálky vedoucí vzhůru do oblaku kladný náboj, čímž se vytváří tzv. *vstřícný výboj*. Propojením obou právě zmíněných typů kanálků posléze vznikne hlavní výbojový kanál, jímž ze spodní záporně nabitě části bouřkového oblaku rychle k zemi protéká záporný náboj.

Vzápětí dojde k tzv. zpětnému výboji, jenž představuje časovou fázi vývoje blesku, kdy dojde k propojení toku záporného náboje k zemi a toku kladného náboje směřujícího od země vzhůru. S tím bezprostředně souvisí ohřátí kanálu blesku až na zmíněné teploty kolem 30 tisíc kelvinů, což se projeví velmi výrazným zjasněním příslušné části bleskového kanálu. Ve zformovaném plazmovém kanálu pak může právě popsany děj elektrického výboje několikrát opakovaně proběhnout. Jeden takový dílčí výboj trvá maximálně milisekundy, obdobné jsou i časové intervaly mezi těmito dílčími výboji. Lidské oko není schopno jednotlivé dílčí výboje od sebe odlišit; příslušnému pozorovateli se často pouze vytváří dojem mihotání blesku. Při dobrých podmínkách pro zrakové pozorování daného bleskového výboje lze někdy sledovat i lokální trsovité výboje v oblasti velkého gradientu elektrického potenciálu na rozhraní mezi záporným oblačným nábojem a zdola přiváděným kladným nábojem. Těmito trsovitými výboji bývá vzhůru tekoucí kladný náboj neutralizován a dochází pak k plnému obnovení toku záporného náboje k zemskému povrchu.

Různé podoby blesků

Podle vzhledu se např. rozlišují:

- *blesk čárový (šípový)*, vyskytující se nejčastěji mezi oblakem a zemí, jehož viditelný kanál není větven,¹⁾



¹⁾Fotografie blesků byly převzaty ze stránek:
<https://www.meteopress.cz/vysvetleni/blesky/>

FYZIKA

- *blesk rozvětvený*, vyskytující se mezi oblakem a zemí, ale i uvnitř oblaku, často s velmi bohatým větvením, přičemž optická intenzita rozvětvených dílčích kanálů směrem od hlavního kanálu zpravidla slábne,



- *blesk perlový (čočkový)*, vzácněji se vyskytující typ s opticky přerušovaným kanálem, což však může být způsobeno i pozorováním přes husté a prostorově nehomogenní vypadávání srážek,



- *blesk plošný*, kdy kanál blesku je pozorovateli skryt uvnitř oblaku, přičemž je zrakově vnímáno pouze osvětlení oblaku zevnitř,



- *blesk stuhový*, vyskytující se řídce, s výrazně širším opticky patrným kanálem, což bývá vysvětlováno ovlivněním vnímání kanálu silným větrem.



Kulový blesk

Vzácným jevem vyskytujícím se při bouřkách je *kulový blesk*. Mívá sférický tvar o průměru od několika cm až v některých extrémních pří-

padech 1–2 m, projevuje se světélkováním v různých barvách, volně se vznáší ve vzduchu nebo se snáší shora dolů. Někdy mizí explozí, jinde se tiše rozplyne, vniká do budov nejčastěji komíny nebo okny a má přitom destruktivní účinky, při dotyku působí popáleniny. Původ tohoto jevu není dosud zcela objasněn, lze soudit, že jde o určitou formu existence plazmy v atmosféře, někteří autoři se např. domnívali, že může jít o určité shluky plazmy vzniklé „svinutím“ kanálů obyčejných blesků. Dnes nejvíce uplatňovaná představa však spočívá v tom, že kulový blesk vzniká při úderu běžného blesku do takového místa na zemském povrchu, kde je v důsledku složité struktury půdy a jejího podloží omezena možnost dostatečně účinného prostorového rozptýlení elektrického náboje přineseného na zem bleskem. V prostorově omezeném objemu bezprostředně pod povrchem pak dojde k bouřlivým procesům, jimiž se vytvoří přibližně kulový útvar plazmy, jenž posléze jakoby vystoupí ze země do vzduchu. Dochází přitom i k dílčímu spalování složek půdy, což se projevuje na barvě daného kulového blesku. Určitým problémem při tomto vysvětlení však může být to, že zmíněné omezení elektrické vodivosti půdy v předpokládaném místě úderu původního blesku snižuje možnosti rozvinutí vstřícného výboje a svým způsobem pak snižuje pravděpodobnost iniciačního bleskového úderu do daného místa. Existují však příslušná zdůvodnění, např. v podobě svedení blesku nějakým existujícím (přírodním nebo umělým) svodem nebo v důsledku úzkého pilíře vysoce elektricky vodivé horniny k zemskému povrchu. V každém případě však právě zmíněná skutečnost může dobře odpovídat relativně malé četnosti výskytu kulových blesků.

Zvukovým průvodním projevem blesku je hřmění (hrom). Jeho zdrojem je tlaková vlna vzniklá náhlým zvětšením objemu vzduchu v kanálu blesku při jeho krátkodobém ohřátí na teploty dosahující desítek tisíc kelvinů.

Blesky jsou zdrojem i radiových signálů, tzv. *atmosfériků*, zkráceně *sféríků*, které při výskytu bouřek (někdy i relativně dosti vzdálených) např. ruší poslech rozhlasu. Jde o signály elektromagnetického vlnění, jež vzniká při pohybu elektrických nábojů přenášených blesky. Vzhledem k tomu, že změny rychlosti tohoto pohybu obvykle nevytvářejí jednoduché periody, má toto vlnění charakter vcelku nepravidelných pulzů, které např. po rozložení do Fourierova rozvoje obsahují široký rozsah frekvencí. Sledování výskytu a struktury atmosfériků může takto poskytovat cenné informace o rychlostech pohybu elektrického náboje v bles-

cích a o jejich struktuře. Sledování atmosféríkú může rovněž poskytnout cenné informace o aktuálním stavu vysoké atmosféry (ionosféry), neboť ten významně souvisí s podmínkami jejich šíření na velké vzdálenosti.

Ke sledování blesků na vzdálenosti řádově desítek až stovek km se dnes využívají sítě bleskových detektorů, které reagují na lokální změny elektromagnetického pole způsobené jednotlivými bleskovými výboji. Výsledná informace pak může být mj. jistou analogií radiolokačního sledování bouřek a umožňuje např. rozlišovat vnitřní blesky od blesků do země včetně určení jejich polarity. Do takové sítě organizované ve střední Evropě je zapojen i Český hydrometeorologický ústav.

Literatura

- [1] Kopáček, J., Bednář, J., Žák, M.: *Jak vzniká počasí*. Karolinum, Praha, 2020.

Mechanický akumulátor

Pavel Pokorný, Ústav matematiky, VŠCHT Praha

Úlohy na hledání maxima nebo minima určité funkce jsou často velice důležité a praktické. V článkách [1] a [2] jsme se zabývali otázkou, jak dostříknout co nejdále. V tomto článku se podíváme na podobnou úlohu: jak navrhnout mechanický akumulátor, aby pojal co nejvíce potenciální energie.

Podobně jako u elektrického akumulátoru sloužícího k uchování, tedy akumulaci elektrické energie, můžeme mechanickou energii uchovávat v zařízení, které bychom mohli nazvat *mechanický akumulátor*. V případě kinetické energie poslouží rotující setrvačnick. A v případě potenciální energie tíhové je asi nejznámější případ závaží u starých hodin zvaných pendlovky (obr. 1 vlevo). Obsluha hodin ručně vytáhne závaží do horní polohy a tím dodá systému mechanickou energii, která slouží k pohonu hodinového stroje. Pro uchování mnohem většího množství mechanické energie lze použít přečerpávací nádrž, např. u elektrárny Dlouhé stráně v Hrubém Jeseníku (obr. 1 vpravo).