

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 25 (1997/1998)

Številka 6

Strani 322-330

Gregor Bavdek:

NEVIHTA – NARAVNI VISOKONAPETOSTNI SPEKTAKEL

Ključne besede: fizika, nevihta, strela, nevihtni oblaki, strelodod, razelektritev.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/25/1354-Bavdek.pdf>

© 1998 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

NEVIHTA – NARAVNI VISOKONAPETOSTNI SPEKTAKEL

Blíža se čas, ko nam bodo soparne in vroče poletne dni popestrili popoldanske nevihte in nalivi. Glasna predstava na nebu gotovo vzbudi zanimanje v slehernem človeku, kaj šele v naravoslovcu.

V prazgodovini je človek strele in bliskanje povezoval z jezo bogov. Stari Grki so sposobnost metanja bliskov pripisovali Zevsu, v kitajski mitologiji pa ima bog groma Lei Tsu celo pomočnico – boginja Tien Mu z dvema zrcaloma, ki ju drži v rokah, skrbno usmerja bliske. Tudi predmeti, ki so bili posredno povezani z bliski, npr. zaradi udara strele sprijeti kosi peska, naj bi imeli mistično vrednost. Odvrčali naj bi namreč nadaljnje udare strele; drobcem takšnih kosov, raztopljenim v vodi, pa so azijska plemena pripisovala zdravilno moč.

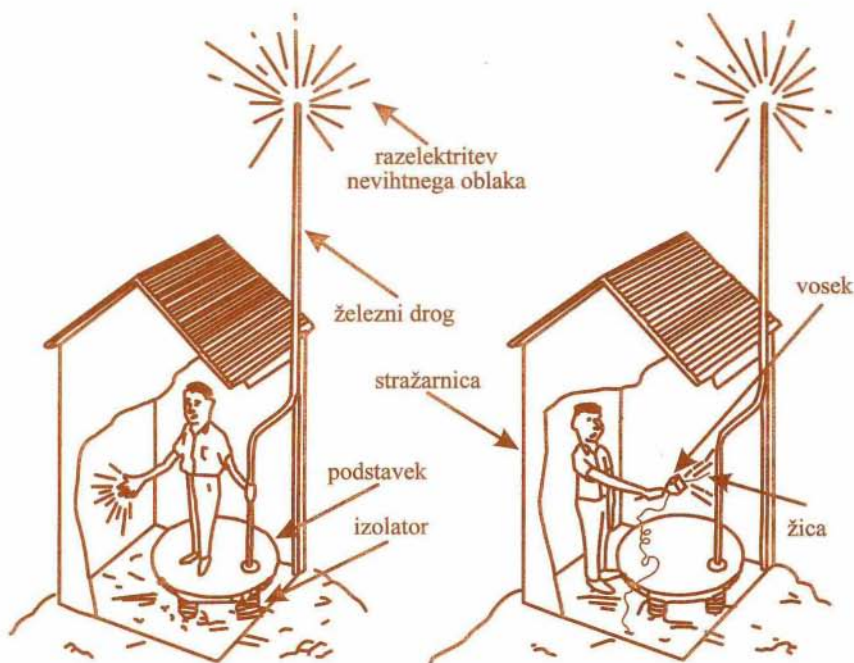
Zgodba o Benjaminu Franklinu

Misel, da ima strela enako naravo kot iskrenje naelektrenih teles, je vznikla šele na začetku 18. stoletja. Preučevanja nevihtnih pojavov se je prvi lotil Benjamin Franklin, danes znan predvsem po izumu strelovoda. Poskusi z leydenskimi steklenicami in ploščatim kondenzatorjem so ga napeljali na misel, da Zemlja in oblaki sestavljajo velik kondenzator. Čeprav se je znanosti aktivno posvečal le sedem let, je Franklin zaslovel s *poskusom z uto* in s *poskusom z zmajem*. Dognal je, da koničasti prevodnik odvaja naboj z naelektrenega telesa hitreje kot topo zaključeni prevodnik.

Da bi ugotovil, ali so nevihtni oblaki naelektreni, si je zamislil poskus z uto: Na vrh hriba je postavil leseno uto, dovolj veliko, da je v njej lahko stal človek na izoliranem podstavku (slika 1). Skozi streho ute je s tega podstavka vodil železni drog, dolg okrog 10 metrov, ki je bil na koncu priostren. Podstavek je med dežjem moral ostati dovolj suh in tako izoliran od okolice, da se je na njem stoječi človek, ki se je z eno roko držal železnega droga, lahko dovolj naelektril. Ob prihodu nevihtnih oblakov nad uto so mu zato iz iztegnjene druge roke švigale iskre.

Če bi se morda komu zdel opisani poskus prenevaren, je ponudil Franklin še varnejšo različico. Človek naj bi stal na tleh ute, v roki pa bi držal voščeno palico, na kateri je pritrjena žica. En konec žice bi bil ozeumljen, druga pa bi približeval železnemu drogu in iz njega izvabljal iskre (slika 1).

Še bolj drzen pa je bil poskus z zmajem (slika 2). Z njim bi se bilo moč še bolj približati naboju oblaka. Navaden otroški zmaj je Franklin navezal na tanko vrv, ki je mokra od dežja seveda prevajala. Na spodnji



Slika 1.

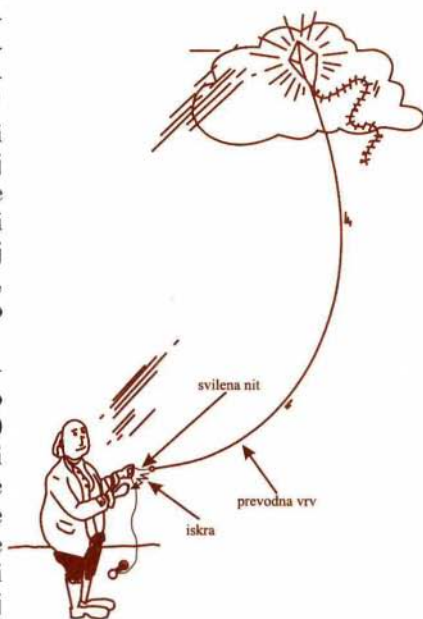
konec te vrvi je privezal nekaj deset centimetrov dolgo svileno nit, ki je dež ne namoči. Tako roka, s katero je pridrževal zmaja, ni prišla v stik z mokro vrvjo. Ko se je nad zmajem peljal nevihtni oblak, se je zmaj naelektril. Franklin se je z drugo roko previdno približal koncu mokre vrvi in na roko so mu preskakovale iskre.

Poskusa sta podprla tezo o naboju oblaka ter sorodnost strele s preskokom iskre med električno nabitimi telesi v laboratoriju.

Franklin je spoznal, da sta obe omenjeni pripravi prenašali naboj z oblaka v zemljo, in to na razmeroma varen način. Tako se je rodila ideja strelovoda: na streho visokih zgradb je potrebno pritrditi na zgornjem koncu priostreno kovinsko palico in jo povezati z dobro ozemljenim večjim kosom kovine. Današnji strelovodi se v ničemer ne razlikujejo od Franklinovega. Enega takšnih je Franklin pritrdil tudi na svojo hišo, da je z njim ugotavljal naboj oblakov in spoznal, da so ti v večini primerov negativno nabiti.

Strelovod so hitro sprejeli tudi v Evropi, a so pri razlagi delovanja spregledali nekaj, kar je Franklina zelo motilo. Omenjali so namreč le, da strelovod varno "ujame" strelo ter s tem prepreči škodo, ki bi nastala, če bi strela udarila v kaj drugega, npr. hišo ali drevo. Nihče pa ni omenil, da ima strelovod tudi preventivno vlogo, saj odvaja naboj z oblakov tudi brez preboja (strele), s čimer zmanjšuje možnost, da bi do nastanka strele sploh prišlo.

Lahko bi rekli, da je bil Franklin eden večjih srečnežev, saj je ob vsem igranju z nevihtami leta 1790 umrl naravne smrti. Tudi v Evropi je vzbudil veliko zanimanje za pojave v zvezi z nevihto. Eden prvih, ki se je lotil ponovitve poskusa z uto, je bil ruski fizik Richmann. Žal pa ni imel tolikšne sreče kot Franklin, saj je v kovinski drog njegove ute udarila strela in ga ubila.



Slika 2.

Nastanek nevihtnega oblaka

Satelitski podatki kažejo, da je v vsakem trenutku na Zemlji aktivnih okrog tisoč neviht, večina od njih v majhnih in srednjih geografskih širinah in le tedke v polarnih področjih.

Sestavni deli neviht so kumulonimbusi, oblaki, ki nastanejo z močno konvekcijo in ki jih spremljajo sunki vetra ter dež, včasih pa tudi toča ali sneg. Nevihtni oblaki so posledica atmosferske nestabilnosti. Te nastanejo, ko pride hladen zrak v stik s toplim in vlažnim zrakom ter ga izpodrine in dvigne. Nevihte z močnimi vetrovi se tako pojavijo vzdolž hladne fronte, ki pred seboj potiska tople zrak.

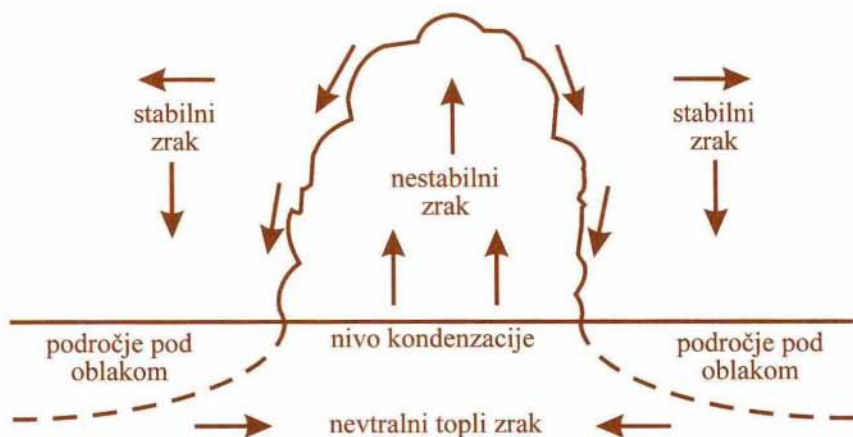
Nevihtni oblaki so kot veliki toplotni stroji, delovna snov v njih pa je vodna para. Oddajajo mehanično delo v obliki vodoravnih in navpičnih vetrov ter električno delo na prostih nabojih, ki povzročajo razelektritve – strele. Poleg tega povzročajo padavine; dež in točo, ki padata z dna, ter sneg, ki pada z vrha oblaka. Prav snežni kristali na vrhu oblaka

nazadnje omogočijo, da se ozračje umiri, in sicer tako, da odbijejo večji del Sončevega sevanja v vesolje, s tem pa onemogočijo nadaljnje segrevanje zemeljskega površja in nastajanje novih oblakov.

Praviloma je koncentracija vodne pare, ki je poleti potrebna za nastanek nevihte, vsaj 7 g pare na kilogram zraka. Pozimi pa so bliske opazili tudi, ko koncentracija pare v zraku ni presegala 4 g na kilogram zraka.

Bliski se redkeje pojavijo v kumulusih, globokih manj kot 3 km, pogosteje pa v večjih, z globino do 20 km. Aktivni nevihtni oblaki vzdolž hladnih front so dolgi od nekaj kilometrov do več sto kilometrov. Temperatura zraka in agregatno stanje vode na dnu in vrhu oblaka ne vplivata bistveno na naelektritev oblaka. Zanimivo je, da ob nastanku oblaka kljub temperaturi nižji od 0°C voda običajno ne zmrzne, ker je zelo čista. Tako ostane podhlajena vse do temperature -40°C , pri kateri šele zmrzne. Povprečna življenjska doba takšnih nevihtnih oblakov je zelo različna – od manj kot ene ure do več dni.

Za naboj oblaka sta pomembna predvsem zadostna količina vodne pare in vertikalna nestabilnost ozračja. Spodnji del ozračja postane nestabilen, če se temperatura zniža za več kot $9,8^{\circ}\text{C}$, ko se dvignemo za en kilometer. Večina energije, ki jo zemeljsko površje prejme od Sonca, segreva spodnje plasti ozračja, kjer se lahko opoldne zrak segreje celo za 1°C v eni sekundi. Gostota toplejših spodnjih slojev postane manjša od višjih, zaradi česar pride do navpičnih vetrov (slika 3). Zračni pritisk z naraščajočo višino pada, zato se dvigajoči zrak razteza in pri tem ohlaja.



Slika 3.

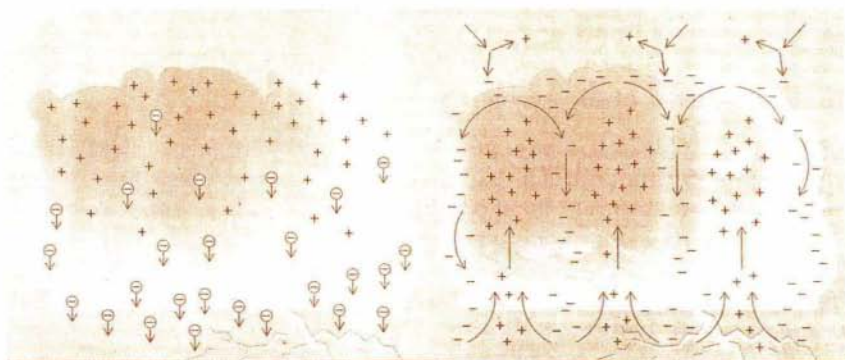
Ko temperatura pade pod rosišče, se na prašnih delcih v zraku pričnejo kondenzirati vodne kapljice, ki tvorijo viden oblak. Od tu naprej rastejo kapljice z nadaljnjo kondenzacijo zelo hitro in kmalu dosežejo velikost $10\ \mu\text{m}$ ter koncentracijo nekaj sto kapljic na kubični centimeter; to pomeni približno 1 do 2 g tekoče vode na kubični meter zraka.

Gostejši suh zrak, ki obkroža oblak, se prične ugrezati zaradi primanjkljaja zraka pri tleh (ta se pod sredino oblaka dviguje zaradi konvekcije). Velikost področja, nad katerim se zrak dviga, meri običajno od 300 do 2000 metrov. Področje, kjer se zrak spušča in obkroža dvigajoči se steber zraka, ima obliko kolobarja in je običajno manjše. Tako nastane znotraj navzgor in zunaj navzdol usmerjeni tok zraka. Na njenem stičišču pride do strižnih sil, ki povzročajo lokalne turbulence, kjer se notranji, z vlago nasičeni zrak, in zunanji hladni zrak premešata. Vlaga iz bolj vlažnega zraka pri tem izpari, zaradi česar se mešanica ohladi, to pa povzroči še hitrejše spuščanje.

Za spodobno nevihto moramo oblake še naelektriti. O tem govorita naslednji hipotezi.

Prva je *padavinska hipoteza*. Večje dežne kaplje, zrna toče in kosmiči snega hitro padejo iz oblaka, medtem ko drobni snežni kristali in fino razpršena voda ostanejo v oblaku. Ob trkih pride do prenosa negativnega naboja z razpršene vode in majhnih kristalov na padajoče kaplje in zrna ledu, pozitivni naboj pa ostane na manjših kristalih, ki se obdržijo v oblaku (slika 4). Na ta način postane zgornji del oblaka pozitivno naelektrjen, spodnji pa negativno. Takšen oblak, s pozitivnim nabojem zgoraj in negativnim spodaj, tvori pozitivni električni dipol.

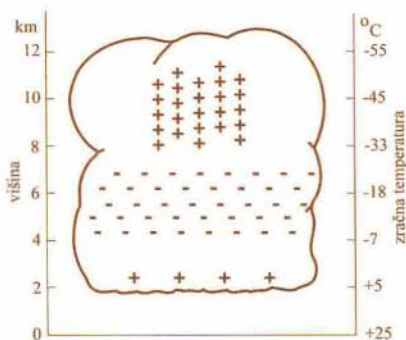
Druga je *konveksijska hipoteza* in je precej sorodna delovanju Van de Graaffovega generatorja, kjer tekoči trak, na katerega prši naboj s tankih osti, dovaja naboj v notranjost kovinske krogle. Po konveksijski hipotezi se oblak "napaja" z nabojem iz dveh ločenih zunanjih virov. Prvi vir so kozmični žarki, ki povzročajo ionizacijo zračnih molekul nad oblakom. Drugi vir pa je močno električno polje nad ostrimi objekti na zemeljski površini, kjer točkovna razelektritev prav tako povzroča ionizacijo zraka. Nastajajo pozitivni ioni, ki jih topel zrak zaradi konvekcije dvigne v oblake, podobno kot gumijasti trak v Van de Graaffovem generatorju (slika 4). V vrhnjem področju oblaka potem ti pozitivni ioni privlačijo negativne, ki so nastali zaradi vpliva kozmičnih žarkov. Negativni ioni vstopijo v oblak ter se hitro oprimejo vodnih kapljic in zrn toče, ki na dnu oblaka tvorijo negativno območje, in zasenčijo pozitivni vrh oblaka.

padavinska
hipotezakonvekcijjska
hipoteza

Slika 4.

Z natančnejšimi meritvami so ugotovili, da je osrednje področje oblaka naelektreno negativno, območje nad njim pa pozitivno. Prav na dnu oblaka se nahaja še drugo, manjše področje pozitivnega naboja (slika 5).

Namenimo nekaj besed lastnostim posameznih področij. Osrednje negativno področje je zelo ploščato – visoko je le kak kilometer, medtem ko njegove vodoravne razsežnosti merijo več kilometrov. Nahaja se na višini približno 6 km, kjer je temperatura okrog -15°C . Gornje področje pozitivnega naboja je razpršeno in se lahko razteza tudi do nekaj kilometrov v višino. Spodnje pozitivno nabito področje pa je tako majhno, da je njegovo električno polje večkrat zasenčeno zaradi večjega Zemljinega negativnega naboja.



Slika 5.

Zemlja je proti ozračju negativno nabita z nabojem približno $5 \cdot 10^5$ As. Z nabojem, kakršnega ima Zemlja, bi lahko napolnili približno 10 000 avtomobilskih akumulatorjev. Toliko naboja steče skozi hišno 100 W žarnico v 12 dneh, če je prižgana nepretrgoma. Ta naboj povzroča navzdol proti tlem usmerjeno električno polje z jakostjo okrog

130 V/m. Večina pozitivnega naboja se nahaja v spodnjih delih atmosfere, zaradi česar jakost električnega polja ob lepem vremenu z višino hitro pada. Zgornji del atmosfere ima glede na Zemljo potencial približno 300 kV.

Razelektritev v obliki strele

Kaj se torej z oblakom dogaja potem, ko je nabit? Ko jakost električnega polja na določenem področju okrog oblaka ali znotraj njega preseže prebojno jakost zraka, pride do električnega preboja, ki ga vidimo kot udar strele. V trenutku se pretoči naboj nekaj 10 As. Toliko naboja se pretoči skozi 100 W hišno žarnico v pol minute, to je v 500 000-krat daljšem času. Trenutni tok pri takšnem preboju meri običajno okrog 20 000 A, včasih pa preseže tudi 200 000 A. (Po hišni napeljavi tečejo tokovi do 20 A.) Debelina kanala strele je približno 5 cm in vsebuje večinoma plazmo kisikovih in dušikovih ionov pri temperaturi okrog 25 000°C. Tlak v kanalu doseže nekaj deset barov. Navedene vrednosti za tok, temperaturo in tlak so maksimalne in so dosežene v nekaj mikrosekundah, potem pa zaradi padca toka padejo na polovične vrednosti v približno 50 μ s. Napetost pred prebojem doseže nekaj 100 milijonov voltov. Elektrostatična energija se ob udaru strele spremeni v svetlobo, infrardeče sevanje (ki poskrbi, da se zrak v neposredni bližini kanala strele močno ogreje), ostalo elektromagnetno energijo (ki povzroča radijske motnje) in akustično energijo (grmenje). Zvok se v zraku širi s hitrostjo okrog 340 m/s – ta podatek nam pomaga oceniti oddaljenost strele. Izračunamo jo tako, da izmerimo čas, ki preteče od takrat, ko smo zagledali blisk, do takrat, ko zaslišimo grmenje, in ga pomnožimo s 340 m/s.

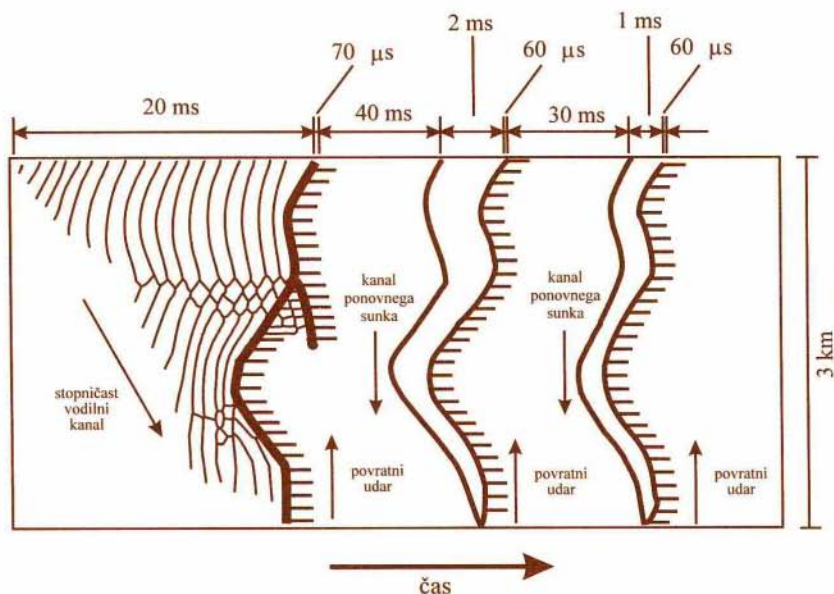
Večina razelektritev v obliki strel se zgodi znotraj oblaka ali med oblaki, manj pa med oblaki in zemljo. Zdi se, da je za slednje odgovorno prav majhno pozitivno naelektreno območje pod velikim negativno nabitim območjem v sredini oblaka.

Oglejmo si časovni potek razelektritve *oblak–zemlja* (slika 6). Če bi bilo moč predvideti, kdaj bo strela udarila, bi časovni potek lahko posneli. Zaslonko fotoaparata bi odprli kakšnih 50 ms pred udarom strele in fotoaparat zelo hitro zavrteli okrog navpične osi.

Na dnu oblaka se najprej pojavi utripajoč stopničast vodilni kanal, usmerjen proti zemlji, ki se vsakih 50 μ s obnovi in podaljša za približno 50 m ter se približuje zemlji. Ta kanal ima premer od 1 do 2 cm in se v času svojega nastanka večkrat razcepi. Skozenj steče tok okrog 100 A in se v približno 20 ms pretoči približno 2 As naboja. Ko se kanal približuje zemlji, se na njej influencira naboj nasprotnega predznaka in električno

polje se povečuje. Ko je vodilni kanal le še kakih 50 m oddaljen od tal, se z zemlje pojavi nov, navzgor usmerjen vodilni kanal. Ko se kanala dotakneta, je oblak kratko sklenjen z zemljo in pride do povratnega udara. Povratni udar pobere večino naboja, ki se je nakopičil v zraku okoli vodilnega kanala. Tedaj med oblakom in zemljo steče maksimalni tok, ki strelo najbolj osvetli. Kanal se osvetli od spodaj navzgor s približno tretjino svetlobne hitrosti ($1 \cdot 10^8$ m/s). To je glavna razelektritev.

Po glavni razelektritvi se v razmaku okrog 40 ms pojavi še več sunkov (ponavadi trije do štirje), ki skupaj trajajo približno 0,2 s. Proti zemlji se po prej nastalem glavnem kanalu poženejo z dvema tretjinama svetlobne hitrosti ($2 \cdot 10^8$ m/s). Kanal se pri teh sunkih ne cepi, v zraku pa odloži kako As več naboja kot prvotni vodilni kanal. Vsakemu posameznemu sunku sledi povratni udar. Na skici so označene približne časovne in prostorske razsežnosti.



Slika 6.

Približno 20% razelektritev oblak–zemlja udari v zemljo na več mestih. To se zgodi zato, ker se kasnejši sunki pojavijo šele po več kot 100 ms, ko je prvotni vodilni kanal že zabrisan, in se zato pojavijo novi.

Podobno, le v obratni smeri, poteka razelektritev *zemlja–oblak*. Razlika je le v tem, da se, ko vodilni kanal doseže spodnje plasti oblaka, ne pojavi povratni udar, ampak se poveča tok in z njim intenziteta svetlobe kanala. Omeniti velja, da so razelektritve v smeri z zemlje proti oblakom bolj pogoste v bližini visokih koničastih zgradb.

In kako ločimo med razelektritvama *oblak–zemlja* in *zemlja–oblak*? Preprosto – pri prvi se strela kot iglice na smreki razrašča navzdol, pri drugi pa navzgor.

Zaščita pred udarom strele

Kadar strela zadene človeka, povzroči opekline in poškodbe tkiva, ne nujno pa tudi smrti. Težji zapleti so prenehanje dihanja in trepetanje ali celo ustavitve srca.

Daleč najboljša obramba pred strelo je varno zavetišče. To je lahko hiša ali notranjost kakršnegakoli kovinskega ogrodja, npr. avta, ki deluje kot Faradayeva kletka. Če nas nevihta ujame na prostem, se postavimo v položaj, ko smo čim nižji in se hkrati s čim manjšo površino dotikamo tal. Prav tako bo verjetnost za udar strele precej manjša, če ne bomo mokri.

Novejše raziskovanje

Pri raziskovanju neviht igrajo dandanes pomembno vlogo simulacije z visokonapetostnimi generatorji v laboratorijih in postopki, s katerimi je mogoče umetno izzvati strelo. Eden takih postopkov je izstreljevanje raket, ki za seboj puščajo prevodno sled ali je nanje privezana tanka in lahka žica. Drug način pa temelji na ionizaciji zračne poti od zemlje do oblaka z laserjem (točneje s kombinacijo dveh laserjev: enega, ki deluje v ultravioletnem, in drugega, ki deluje v vidnem delu spektra).

Potek naelektritve oblaka danes še ni zadovoljivo pojasnjen. Vedenje zračnih mas z različnimi temperaturami je kaotično, zato je spremljanje njihovega gibanja, ob dodatni prisotnosti zračne vlage in električnih nabojev, vse prej kot enostavno. Ko bomo za vse to imeli modele, ki bodo uspešno pojasnjevali zapleteno dogajanje, pa verjetno ne bo več daleč čas, ko bomo lahko energijo strele tudi koristno izrabili.

Za zdaj pa si privoščimo samo ogled veličastne brezplačne predstave, ki jo uprizori narava. Pri tem pa naj nas njena lepota ne zavede toliko, da bi pozabili na njeno moč, ki nas lahko tudi ubije.