

GRMLJAVINSKI OBLAK CUMULONIMBUS (Cb) - ELEKTRIČNI GENERATOR

Thundercloud cumulonibus (Cb) - electric generator

BOŽENA VOLARIĆ

Geofizički zavod Zagreb, Horvatovac b.b.

Prihvaćeno: 10.5.2010. u konačnom obliku: 30.9.2010.

Sažetak U radu se razmatra grmljavinski oblak Cumulonimbus (Cb) kao električni dipol i njegovo sudjelovanje u izgradnji atmosferskog električnog polja. Razmatranje je ograničeno na Cb s elektrostatskim unutarnjim stanjem tj. stanjem bez vremenske promjene i količine i prostorne raspodjele naboja Q unutar oblaka. Oblak kao cjelina može mijenjati prostorne koordinate, ali unutarnji električni odnosi moraju ostati konstantni. Indirektna metoda koju je uveo C.T.R. Wilson – a zatim se razvijala trudom mnogih istraživača – otkriva električnu strukturu Cb-a kao njen odraz u atmosferskom prizemnom električnom polju E_R i u promjenama tog polja ΔE_R , izazvanih pojavom Cb-a. Pomoću pojednostavljene predodžbe, prilagođene kompleksnoj situaciji u oblaku s obzirom na njegovo prostorno protezanje značajnih razmjera i silovitim termodinamičkim procesima unutar oblaka izvedene su elektrostatske relacije za procjenu količine naboja Q , sadržanih u polovima Cb-a i njihovih visina H iznad tla. Pri tome su obuhvaćeni, osim bipolarnog i tripolarni Cb s posebnim osvrtom na oblik prizemnog grmljavinskog polja u odnosu na pomoćni pozitivni centar q , koji je poput džepa utisnut u područje negativnog naboja pri dnu uz bazu oblaka. Proveden je izračun za bipolarni Cb temeljem vrijednosti rezultantnog prizemnog grmljavinskog polja E_R , izmjerenih samo na jednoj lokaciji u kombinaciji s empirijskim spoznajama.

Ključne riječi: električni dipol, grmljavinski oblak Cb, indirektna metoda, električna struktura oblaka : bipolarni i tripolarni Cb, grmljavinsko polje, grafička metoda električne slike.

Abstract. The ground electrostatic field induced by a thundercloud Cumulonimbus (Cb) represented by an electric dipole has been studied. In the process only electrostatic approach has been applied without taking into account time and space changes inside the cloud. However, the position of the entire cloud changes relatively to the observation point. The charge concentrated at the poles of the thunderstorm dipole as well as the altitude of the dipole have been computed from mathematical relations deduced from electrostatic laws. In the process the real conditions - the special dimensions of the cloud and formidable thermodynamic processes inside the cloud - had to be simplified.

Key words: electric dipole, thundercloud (Cb), indirect method, thunderstorm electrostatic field, thundercloud field, graphic method of electrical image.

1. UVOD

U minulih otprilike dva i pol stoljeća, otkako je B. Franklin eksperimentalno dokazao električnu narav munje, brojni su istraživači proučavali nastanak, razvoj i rasap oblaka vertikalnog razvoja, zvanog Cumulonimbus (Cb), smatrajući ga izvoristom atmosferskog električneta. Naročito brojna istraživanja potječu iz tropskih krajeva, gdje su procesi osobito burni uslijed velike količine toplinske energije i vo-

dene pare akumulirane u zračnim masama, koje sudjeluju u termodinamičkim procesima unutar Cb-a.

2. DINAMIKA STRUJANJA U CB-U

Već u početnoj fazi razvoja Cb se sastoji od jednog ili više aktivnih centara tzv. *ćelija*. To su uska međusobno odvojena područja promjera oko 1-1.5 km. Odlikuju se naglašenom mikrofizikalnom, električnom i konvektivnom

aktivnošću sa snažno razvijenim uzlaznim i silaznim strujama zraka. Pri dnu ćelije uzlazna brzina strujanja iznosi oko $3-5 \text{ ms}^{-1}$, na većim visinama oko $10-20 \text{ ms}^{-1}$, dok u snažno razvijenom Cb-u i do 40 ms^{-1} .

U ćelijama je strujanje skoro laminarno, jedino na rubovima im nastaje jaka turbulencija. Uzlazno kao i silazno strujanje je mahovito s izrazito snažnim kratkotrajnim udarima.

Visina protezanja Cb-a ovisi o temperaturnoj stratifikaciji atmosfere. Često dopire i do 10-15 km, pa i više, osobito u tropima, gdje koji put zahvaća i donju granicu stratosfere.

Svaka ćelija u svom životnom ciklusu prolazi kroz tri faze razvoja. U prvoj, u fazi *nastajanja* uzlazno strujanje zauzima cijelu ćeliju. U drugoj, u fazi *zrelosti* pored uzlaznog u ćeliji se uspostavlja i silazno strujanje praćeno grmljavinama i mogućom oborinom. U trećoj, u fazi *rasipanja* zamire uzlazno strujanje. Cijelu ćeliju zauzima silazno strujanje uz pljuskove oborina praćene grmljavinom.

Cb može istodobno sadržavati i po nekoliko ćelija u različitim stadiju razvoja. Naziva ih se stoga *višećelijskim* za razliku od *jednoćelijskih* Cb-a samo s jednom ćelijom. Među njima posebno mjesto zauzima *superćelijski* Cb. Sastoji se od jedne jedine, ali neobično snažno razvijene ćelije - *super ćelije*, koja se ističe razarajućim, orkanskim vjetrom s obiljem munja i neobično postojanom, snažno rotirajućom uzlaznom strujom. Katkada je superćelija praćena jakom tučom neobično velikih zrna. Superćelijski Cb je često izvorom tornada.

S obzirom na silovitost superćelijskih procesa počelo se postavljati pitanje - kako spominje MacGorman sa suradnicima (2005., str.2584) navodeći razmišljanja nekih istraživača - da li je ispravno električna svojstva superćelija izražavati i mjeriti istim mjerilom kao i ostalih grmljavinskih ćelija odnosno ne postoje li ipak neke osnovne razlike u njenoj električnoj strukturi i razvoju.

3. KRONOLOGIJA OTKRIĆA ĆELIJA

Bilo je pojedinačnih, ali nepotpunih istraživanja o sistemu strujanja u Cb-u, pa se niže iznijeti redosljed otkrića ćelija može smatrati prihvatljivim.

U Europi zasluga za otkriće ćelija u Cb-u pripada prvenstveno športašima-jedriličarima. Oni su pri športskom jedrenju došli do mnogih spoznaja o strukturi Cb-a. Naročito mnogo podataka sakupljeno je prilikom jedriličarskog natjecanja 1938. u dolini rijeke Rohne. Natjecateljima vrijeme nije bilo sklono s obzirom na učestale grmljavinske procese, ali zato je uvid u sistem strujanja unutar Cb-a bio plodonosan. Na sveopće iznenađenje ustanovilo se da snažno konvektivno strujanje ne zaprema cijelu unutrašnjost Cb-a već je ograničeno na uska, međusobno odvojena područja. U prvi mah su ih nazvali "dimnjaci" (der Schlot). Izraz je prihvaćen, čak je u početku uveden u stručnu njemačku literaturu (Wichmann, 1950. str.48 i 1953. str. 190.; Siedentopf, 1950. str. 30).

S druge strane, u SAD-u (Florida i Ohio) provedeno je 1946. i 1947. istraživanje grmljavinskih oblaka u velikim razmjerima (Thunderstorms Project). Sudjelovale su meteorološke civilne i vojne ustanove (USA Weather-Bureau, University of Chicago, Army Airforce, NACA¹, US Navy). Proljetanjem kroz Cb pomoću 5 dvomotornih aviona i 12 vojnih pilota ustanovljena su u Cb-u relativno uska, prosječno oko 1.5 km široka, zasebna područja vrlo aktivna u pogledu termodinamičkih i električnih procesa. Nazvana su "ćelije" (cell) kako navodi H. Byers (1953. str.4-6) sa Sveučilišta Chicago, vođa spomenutog istraživačkog programa.

U početku nazivi nisu bili usuglašeni, pa primjerice Workman-Reynolds (1953. str. 146) ih označuju kao "thunderstorms cell", a Malan (1964. str. 3) zbog sličnosti s opažanjima u fluidu, zagrijavanom odozdo, naziva ih "Bénardove ćelije", dok Golde (1977., Vol. 1 str. 54) napominje da atmosferska konvektivna strujanja često postaju organizirana kao heksagonalne ćelije analogno laboratorijskim eksperimentima Thompson-a i Bénard-a.

Tijekom vremena pojmovi su raščišćeni pa je danas općenito prihvaćen naziv "ćelija".

4. KRATKI PRIKAZ NEKIH TEORIJA GRMLJAVINSKOG ELEKTRICITETA

Munje su oduvijek privlačile pažnju i znatiželju čovjeka, naročito znanstvenika. Na pitanje kako nastaju pokušavalo se odgovoriti raznim teorijama. Spomenut ćemo neke poznatije.

¹ NACA-National Advisory Committee for Aeronautics (osnovan 1915., ukinut 1958. i prelazi u NASA)

J. ELSTER i H. GEITEL-ova teorija *influenције* temelji se na djelovanju već postojećeg atmosferskog električnog polja u kombinaciji s naglim sudaranjem električno polariziranih kapljica, različitih veličina. Veća kaplja kiše, padajući kroz atmosfersko električno polje, koje je vertikalno usmjereno prema tlu, sustiže manju kapljicu. Ova pri sudaru, u trenutku dodira odskoči od veće odnoseći nešto influenciranog pozitivnog naboja s njene donje polovice. Gravitacijskom sedimentacijom većih, negativno nabijenih kaplja i manjih s pozitivnim nabojem nastaje bipolaran oblak *pozitivnog polariteta*, tj. pri vrhu oblaka se nalazi pozitivni naboj, a pri dnu negativan. (Prema Fleming-u (1949., str. 667) polarizirani naboj manjih kapljica se može zanemariti budući da iznosi svega $3E \cdot r^2/4$, gdje je E iznos jakosti električnog polja, a r polumjer kapljice.

C. T. R. WILSON-ova teorija *influenције* također se zasniva na ideji da atmosfersko električno polje daje poticaj za grmljavinske procese, ali prema Wilsonu uz sudjelovanje *atmosferskih* iona. Kaplje kiše, električno polarizirane, padajući kroz ioniziranu atmosferu selektivnim nakupljanjem iona postaju negativno nabijene uz uvjet da je $v > k_+ E$, gdje v označava relativnu brzinu padanja kaplje, k_+ pokretljivost pozitivnih iona, dok je E jakost električnog polja. Pozitivni polaritet oblaka - nastao gravitacijskom sedimentacijom - odgovara Wilsonovoj predodžbi o električnoj strukturi Cb-a, koju je izgradio proučavajući prizemno električno polje.

G. C. SIMSON-ova teorija *raskidanja* velikih kaplja kiše zahtijeva u oblaku snažno i mahovito uzlazno strujanje. Za raskidanje kaplje promjera $d > 5,5$ mm potrebna je brzina uzlazne struje oko 8 ms^{-1} s kolebanjem $\pm 3 \text{ ms}^{-1}$. Temeljem Lenardova efekta, nakon raskidanja kaplje pri snažnim, mahovitim udarima uzlazne struje, na većem ostatku rasprsnute kaplje ostaje pozitivni naboj. Sićušne kapljice, istrgnute s površine veće kaplje odnose elektrone iz njenog vanjskog dvostrukog, električnog sloja, koji nastaje na površini vode djelovanjem molekularnih sila. Ovom teorijom se tumači elektricitet oborina pljuskovitog karaktera. Također i postanak malog, sporednog, pozitivnog pola uz bazu Cb-a. Polaritet oblaka međutim suprotan je Wilsonovoj predodžbi, ali što je važnije i sondaži oblaka.

Usprkos tome, općenito se smatra da Simpsonovim povezivanjem termodinamičkih i elek-

tričnih procesa u grmljavinskom oblaku, posebice otkrićem koincidencije između područja određenog električnog polariteta i određenih temperaturnih područja, započinje nova era u shvaćanju grmljavinskog elektriciteta (Müller-Hillebrand, 1954.).

W. FINDEINSEN-ova teorija *krhotina* leda povezuje mikrofizikalnu strukturu oblaka i početne procese elektrizacije u oblaku, uzrokovane promjenama agregatnog stanja vode. *Pozitivni* se naboj javlja pri *sublimaciji*, naročito pri naglom *zaleđivanju* pothlađenih kapljica vode u dodiru s ohlađenim tijelom, a *negativni* pri *resublimaciji*, dok je *kondenzacija* i *topljenje* leda *bez električnog* učinka. Uvažavajući sistem strujanja i vertikalnu temperaturnu razdiobu, obilježena su u oblaku područja s prevladavajućim procesima, vezanim uz pojedinu fazu vode. Ujedno su time označena i područja s većinskom količinom naboja određenog predznaka. Dobivena električna struktura Cb-a potvrđena je sondiranjem i odgovara pozitivnom polaritetu oblaka.

E. WALL-ova teorija se zasniva na *prirodnom* električnom svojstvu atmosferskih kristala leda koji su prirodno *električki polarizirani* duž glavne heksagonalne osi. Kristal leda radi svojeg oblika pada kroz ioniziranu atmosferu vertikalno u smjeru svoje glavne osi. Pri tome kako Wall pretpostavlja *vjerojatno* s pozitivnim polom na donjoj bazi kristala. Selektivnom ionizacijom svježiji se kristal - dok još nije izgubio prirodnu polarizaciju - negativno nabija i to bez sudjelovanja vanjskog električnog polja. Proces najjače ionizacije leži u temperaturnom području između -10 °C do -15 °C u kojem je najaktivniji i porast kristala uslijed najvećih razlika u zasićenju vodenom parom iznad vode ili leda. Gravitacijskom sedimentacijom negativno nabijenih kristala leda i pozitivnih atmosferskih iona nastaje bipolaran oblak pozitivnog polariteta.

J. FRENKEL-ova teorija ne priznaje postojanje atmosferskog električnog polja već smatra da je električno stanje atmosfere posljedica procesa kojima se u oblaku uspostavlja električno polje na koje se prigodimice priključuje grmljavinska elektrizacija kao specijalan slučaj. *Ionizirana* se atmosfera zamišlja kao *koloidna* otopina, a *elementi* oblaka tj. kapljice kiše i kristalići leda, kao *koloidne* čestice. Primjenom poznate činjenice iz elektrokemije koloidnih otopina o afinitetu vode prema ne-

gativnim ionima - bez obzira da li je voda u tekućoj ili krutoj fazi - elementi oblaka postaju negativno nabijeni. Djelovanjem konvektivnog strujanja i gravitacijske sedimentacije nastaje bipolarni oblak i tek tada se u atmosferi uspostavlja električno polje, a zatim i ostale pojave atmosferskog elektriciteta.

E. J. WORKMAN i S. R. REYNOLDS-ova teorija temelji se na laboratorijskoj spoznaji o pojavi *električnog potencijala* pri zaleđivanju razrijeđene vodene otopine na mjestu *dodira led-tekućina*. Veličina i predznak potencijalne razlike ovisi o koncentraciji i vrsti otopljene tvari. U većini testiranih otopina led dobiva *negativan* naboj. Na istovjetan način i u atmosferi se javlja razlika potencijala kod zaleđivanja pothlađenih kapljica vode na zrnu tuče pri njihovom sudaranju. Zaleđi se međutim samo dio pothlađenih kapljica prethodno smočivši površinu zrna tako da ono postaje mokro pa na mjestu dodira led-voda nastaje električni napon. Ostatak kapljica koji se nije uspio zalediti odskoči od zrna tuče kao snop raskidanih sitnih kapljica odnoseći pozitivan naboj, nastao pri sudaru. Negativni se naboj ugrađuje u sloj ledenog plašta koji se pri sudaru zaledio na zrnu tuče slično kako se ugrađuje u laboratoriju pri zaleđivanju otopine NaCl ili CaCO₃. Bipolarni oblak nastaje prostornim odvajanjem negativnih zrna tuče i pozitivnih kapljica djelovanjem gravitacijske sile.

Većina grmljavinskih teorija, prethodno iznijetih kao i one brojne, a ne spomenute zbog ograničenog prostora, temelji se na jednom od dva osnovna principa: *induktivni* i *neinduktivni* mehanizam nabijanja. U oba slučaja pretpostavljaju se *oborinski elementi* kao sudionici u mehanizmu nabijanja s tom razlikom što induktivni ovisi o vanjskom električnom polju.

Kako laboratorijski eksperimenti pokazuju induktivno nabijanje postaje značajno samo ako električno polje postigne jakost barem 10 kVm⁻¹. Neinduktivni procesi stoga postaju sve interesantniji u istraživanju grmljavinskog elektriciteta.

Neki autori predlažu *konvektivni* mehanizam nabijanja koji *ne ovisi* o oborinskim elementima. Osnovna im je zamisao da *pozitivni prostorni naboj* - obično prisutan u atmosferi - transportiraju uzlazne struje u oblak, gdje ioni prijanjaju na *elemente oblaka* koji na taj način postaju nosioci naboja.

Drugi pak autori, također na temelju eksperimenata, zamišljaju mehanizam nabijanja pomoću *slobodnih elektrona* kojih ima u atmosferi i koji velikom brzinom prijanjaju uglavnom na molekule kisika (O₂) i dušičnog dioksida (NO₂). Uzlazne struje zraka zatim tako nabijene molekule unose u oblak, gdje one dolaze u doticaj s *elementima oblaka* prenoseći na njih negativan naboj.

Uz pretpostavku da svaki mehanizam nabijanja može u određenoj situaciji doprinijeti elektrizaciji oblaka, niti jedan se od njih stoga potpuno ne odbacuje. U skladu s tim kao važniji procesi nabijanja smatraju se: električna influencija, difuzija, termoelektricitet, kontakt elektricitet, elektrokemijski procesi kao i oni koji uključuju promjene agregatnog stanja vode, posebice zaleđivanje, ali i mehaničko raskidanje bilo kapljica bilo kristalića leda.

Prema dosadašnjim saznanjima o procesima unutar Cb-a najvjerojatnijom se smatra pretpostavka da elektrizacija oblaka nastaje prijenosom naboja pri sudaru solike i kristalića leda uz obavezno prisustvo pothlađenih kapljica vode sadržanih u oblaku i to pri određenoj temperaturi, relativnoj vlazi i relativnom gibanju solike u odnosu na kristaliće leda i okolni zrak.

Kako navode Berdeklis i List (2001., str. 2751.), Reynolds sa suradnicima istražujući mehanizam nabijanja sudaranjem solike i kristalića leda otkriva već 1957. vezu između naboja i temperature. Takahashi 1978. i Jayaratne sa suradnicima 1983. proširuju Reynoldsovo otkriće novim saznanjima, ali se njihovi rezultati iz neobjašnjivih razloga međusobno bitno kvantitativno razlikuju. Tek 2001., nakon što su Berdeklis i List otkrili da je relativna vlažnost dominantan čimbenik u mehanizmu nabijanja pri sudaru solike i kristalića leda, objašnjeni su nesporazumi prethodnih istraživača. Na temelju svojeg otkrića Berdeklis i List (2001., str.2761.) koncipiraju novi grmljavinski model za jednočelijski Cb, u kojem prikazuju osim vertikalnih profila naboja i temperature još i relativne vlažnosti, kao i međusobni odnos tih veličina.

5. ELEKTRIČNO POLJE U OBLAKU

Izgradnja električnog polja u oblaku odvija se u dva koraka. Prvim se naboj *prenosi* (transfer) uslijed djelovanja mehanizma nabijanja, a drugim se naboj *odvaja* (separation) u prosto-

ru uslijed relativnog gibanja nosioca naboja suprotnog polariteta.

U prostornom odvajanju naboja sudjeluje kao glavni pokretač ili gravitacijska energija ili energija gibanja prouzročena intenzivnom konvekcijom u oblaku.

Prema nekim izračunima prosječna grmljavinska ćelija nema dovoljno raspoložive gravitacijske energije potrebne za izbijanje munja u atmosferi.

Konvektivna se energija naprotiv lako proizvodi intenzivnim uzlaznim i silaznim strujanjem u oblaku, pa se sve više uvažava njeno sudjelovanje u izgradnji grmljavinskog generatora.

Tijekom vremena grmljavinska se istraživanja pretežno usmjeravaju na elektrokemijsko nabijanje i konvektivno prostorno odvajanje naboja, iako je bilo ozbiljnih kritika, pogotovo na proces odvajanja naboja u oblaku. Pitalo se naime kako je moguće da silazno odnosno uzlazno strujanje razlikuje naboje suprotnog polariteta, tj. na koji način silazne struje odabiru *samo* ili u najboljem slučaju *uglavnom* nosioce *negativnog* naboja, a uzlazne *pozitivnog* (Wählin, 1986., str. 73.).

6. ELEKTRIČNA STRUKTURA CB-A

Razdioba naboja je osnovno električno svojstvo grmljavinskog oblaka. Mnogi su istraživači stoga nastojali utvrditi mu električnu strukturu.

C.T.R. Wilson je - kako je već spomenuto - istražujući prizemno električno polje i njegove promjene uslijed električnog izbijanja u atmosferi prvi spoznao bipolarnu strukturu Cb-a, što je i objavio u svojim pionirskim radovima početkom dvadesetog stoljeća.

G.C. Simpson sa suradnicima prvi je izmjerio direktno u oblaku jakost električnog polja uređajem zvanim altielektrograf². Potvrdio je Wilsonovu spoznaju o bipolarnosti Cb-a. Ujedno je otkrio da katkada postoji još i mali sporadični pozitivni centar, utisnut poput džepa pri dnu negativnog naboja uz bazu oblaka u području jakih oborina, nedaleko mjesta gdje uzlazne struje prodiru u oblak.

Godinama se u struci prihvaćala bipolarnost odnosno tripolarnost Cb-a unatoč sve brojnijim novim rezultatima koji su ukazivali na električnu višeslojnost grmljavinskih oblaka.

Nova su sondiranja oblaka ipak pomalo istiskivala dotadašnja uvjerenja. Tako se radi provjere ponovno analiziraju mjerenja Simpsona i suradnika. U 49% slučajeva nisu odgovarala modelu za tripolarni grmljavinski oblak. Istom metodom analizirani su i sondažni podaci novijeg datuma, izmjereni preciznijim modernim uređajima. Neslaganje se pokazalo čak u 86% slučajeva. Tada se konačno napušta uvjerenje o tripolarnoj strukturi grmljavinskog oblaka (Rust-Marshall, 1996.).

Prema novijim istraživanjima električna struktura grmljavinskih oblaka složenije je naravi. Razlikuje se naime vertikalni raspored naboja unutar uzlaznog strujanja od rasporeda u najbližoj mu okolini. Uzlazno strujanje pokazuje *četveroslojnost*, gdje su četiri međusobno odvojena sloja različitog polariteta poredani jedan iznad drugog, dok se u neposrednoj blizini, ali izvan uzlaznog strujanja očituje *šesteroslojnost* u vertikalnom rasporedu naboja. U oba slučaja najniži sloj je pozitivan s razlikom da se u uzlaznoj struji nalazi na većoj visini, što je vjerojatno posljedica većih uzlaznih brzina (Stolzenburg et al., 1998., sl. 3).

7 METODE ISTRAŽIVANJA

Električna struktura grmljavinskog oblaka Cb-a može se istraživati direktnom ili indirektnom metodom. Prva se temelji na mjerenjima izvođenim direktno u oblaku, a druga na proučavanju prizemnog električnog polja lijepoga vremena i njegovih promjena, nastalih uslijed prisustva Cb-a.

Indirektna metoda se primjenjuje zbog svoje jednostavnosti ne zahtijevajući dodatne mjerne uređaje, dok je direktna zahtjevnija glede instrumentarija, a mjerenja su često i otežana nepovoljnim uvjetima unutar oblaka.

Budući da indirektna metoda na jednostavan način ukazuje na procjenu količine i raspodjele naboja u Cb-u, iznijet ćemo je u glavnim crtama.

7. INDIREKTNNA METODA

Kod njene primjene pretpostavljaju se statički električni uvjeti u oblaku odnosno, pretpostavlja se da nema promjena količine naboja Q u pojedinom polu oblaka niti po vremenu niti po razmještaju unutar oblaka, tj. konstantna je količina naboja Q kao i visina H iznad tla.

² Altielektrograf je sondažni balon koji nosi uređaje za registraciju električnih i meteoroloških elemenata u grmljavinskom oblaku.

Oblak kao cjelina može mijenjati položaj, ali bez unutarnje promjene električnih odnosa.

Uz takove pretpostavke pri istraživanjima se koriste zakoni elektrostatike, ali se uvjeti u Cb-u pojednostavljaju.

Pretpostavlja se da se radi o bipolarnom odnosno tripolarnom Cb-u, što se zbog jednostavnosti uobičajilo u istraživanjima atmosferskog elektriciteta. Tako primjerice iz istog razloga Berdeklis-List (2001) prikazujući najnovije rezultate za vertikalni profil Cb-a s obzirom na električno stanje, temperaturu i relativnu vlažnost koriste tripolarni model iako je tripolarnost oblaka odbačena kao nerealna.

Prihvatanjem iznijetih razloga može se reći: Cb je električni, vertikalni dipol, što znači:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (1)$$

gdje je Q količina naboja pojedinih centara dipola, smještenih vertikalno jedan iznad drugog.

Nadalje, pretpostavlja se točkasti naboj ili u najpovoljnijem slučaju sferno jednoliko raspodijeljeni naboj svakog pojedinog centra.

Električno polje točkastog naboja Q na udaljenosti r prikazuje relacija

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot \mathbf{r}_0}{r^2} \quad (2)$$

gdje je \mathbf{r}_0 jedinični vektor u smjeru polja \mathbf{E} , dok je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$).

Električno polje dipola je vektorska suma električnih polja \mathbf{E}_1 i \mathbf{E}_2 , naboja Q_1 i Q_2 koncentriranih u polovima dipola.

U izgradnji električnog polja grmljavinskog dipola sudjeluje, osim naboja iz polova oblaka, još i inducirani naboj, nastao na tlu djelovanjem Cb-a.

Smjer grmljavinskog polja uobičajilo se određivati grafičkom metodom *električne slike* u kojoj ulogu inducirani naboj na tlu preuzima imaginarni naboj Q' , smješten *ispod* tla na *istoj* udaljenosti H na kojoj se *iznad* tla nalazi grmljavinski naboj Q . Time se nije poremetilo grmljavinsko polje, jer je oblik i tijek električnih silnica ostao nepromijenjen.

Opisana grafička metoda dobila je ime po analogiji s optičkom pojavom virtualne slike iza površine ravnog zrcala, pa je imaginarni naboj Q' ispod površine tla nazvan električnom slikom naboja Q u grmljavinskom oblaku.

Tlo, kao električki vodljiva i aproksimativno uzeto ravna ploha, predstavlja ravninu simetrije između naboja Q i Q' .

Pojedini naboj Q_n grmljavinskog oblaka, kao i pripadni mu imaginarni naboj Q'_n sudjeluju u izgradnji resultantnog grmljavinskog polja \mathbf{E}_R samo s vertikalnom komponentom, dok im se horizontalne komponente međusobno poništavaju.

Vertikalna komponenta električnog polja \mathbf{E}_n iznosi

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_n}{r_n^2} \cdot \sin\alpha_n \quad (3)$$

gdje je $\sin\alpha_n = H_n / r_n$, tj. omjer visine H_n na kojoj se nalazi naboj Q_n iznad tla i udaljenosti r_n od naboja Q_n do točke mjerenja P, dok je r_n određen izrazom: $r_n^2 = H_n^2 + D^2$, u kojem D označuje horizontalnu udaljenost uzduž tla od točke mjerenja P do vertikalne projekcije naboja Q_n na tlo u točki 0.

U skladu s iznesenim, jakost polja \mathbf{E}_R grmljavinskog vertikalnog dipola pozitivnog polariteta iznosi

$$\mathbf{E}_R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2 \cdot Q_1}{r_1^2} \cdot \sin\alpha_1 - \frac{2 \cdot Q_2}{r_2^2} \cdot \sin\alpha_2 \right] \quad (4)$$

gdje se faktor 2 pojavljuje zbog imaginarnih naboja.

Daljnjom kombinacijom trigonometrijske funkcije $\sin\alpha_n$ i veličina H_n , r_n i D , relacija (4) poprima oblik

$$\mathbf{E}_R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2 \cdot Q_1 \cdot H_1}{(D^2 + H_1^2)^{3/2}} - \frac{2 \cdot Q_2 \cdot H_2}{(D^2 + H_2^2)^{3/2}} \right] \quad (5)$$

u kojoj su sve veličine izražene u jedinicama SI sustava, uz napomenu $H_1 > H_2$.

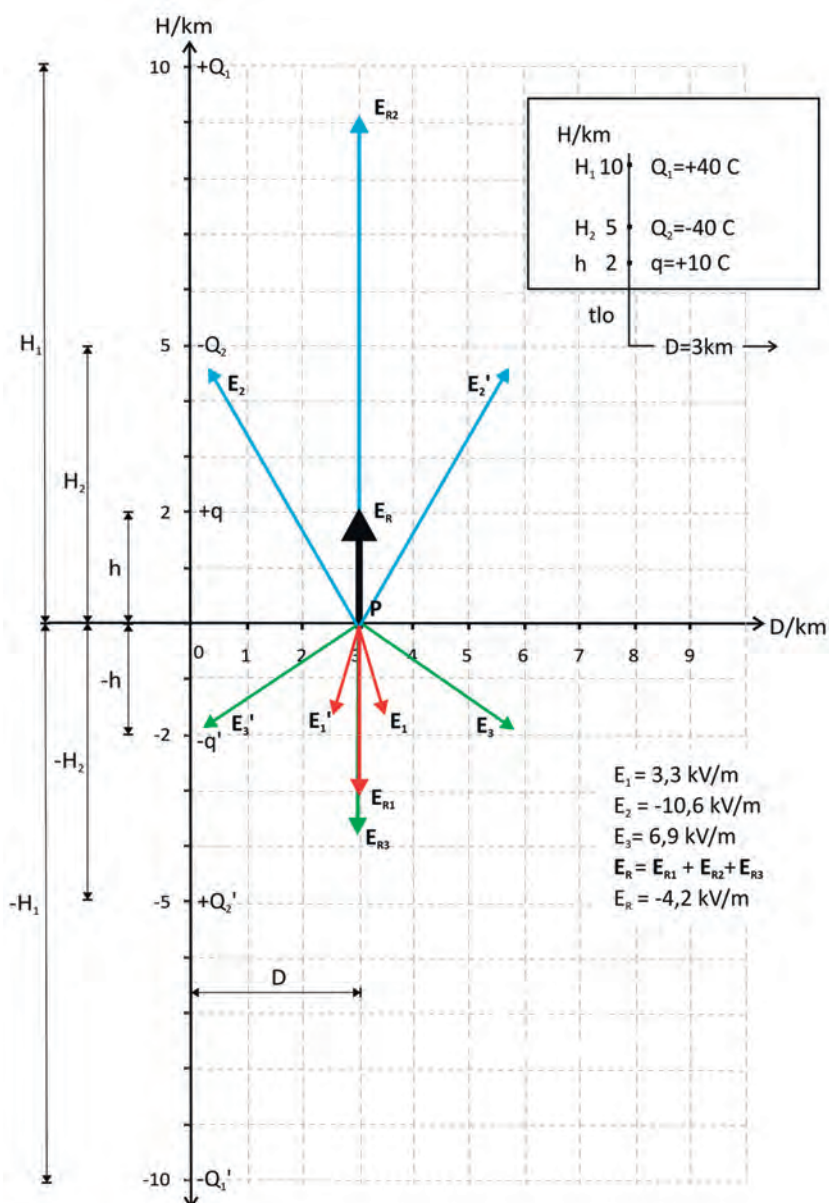
Uvrstivši potom u relaciju (5) brožani iznos faktora $1/4\pi\epsilon_0$ koji u SI jedinicama iznosi $9 \cdot 10^9$, a veličine H i D izraziti u kilometrima, tada relacija (5) glasi

$$E_R = \left[\frac{2 \cdot Q_1 \cdot H_1}{(D^2 + H_1^2)^{3/2}} - \frac{2 \cdot Q_2 \cdot H_2}{(D^2 + H_2^2)^{3/2}} \right] \cdot 9 \cdot 10^3 \text{ Vm}^{-1} \quad (6)$$

U slučaju tripolarnog Cb-a, relaciji (6) se dodaje treći član $2 \cdot q \cdot h / (D^2 + h^2)^{3/2}$, kojim se unosi pomoćni pozitivni centar q smješten pri dnu negativnog naboja uz bazu oblaka na visini h . Pri tome je $H_2 > h$.

8. ODREĐIVANJE SMJERA GRMLJAVINSKOG POLJA E_R

Grmljavinsko se prizemno polje, kako je rečeno, sastoji od električnog polja lijepog vremena koje se samo prividno povlači i individualnog doprinosa svakog odvojenog centra naboja u Cb-u. Zbog zanemarivo malog doprinosa električnog polja lijepoga vremena, grmljavinsko prizemno polje može se uzeti da je $\sum E_{Rn}$, gdje suma obuhvaća električna polja svih centara naboja unutar oblaka.

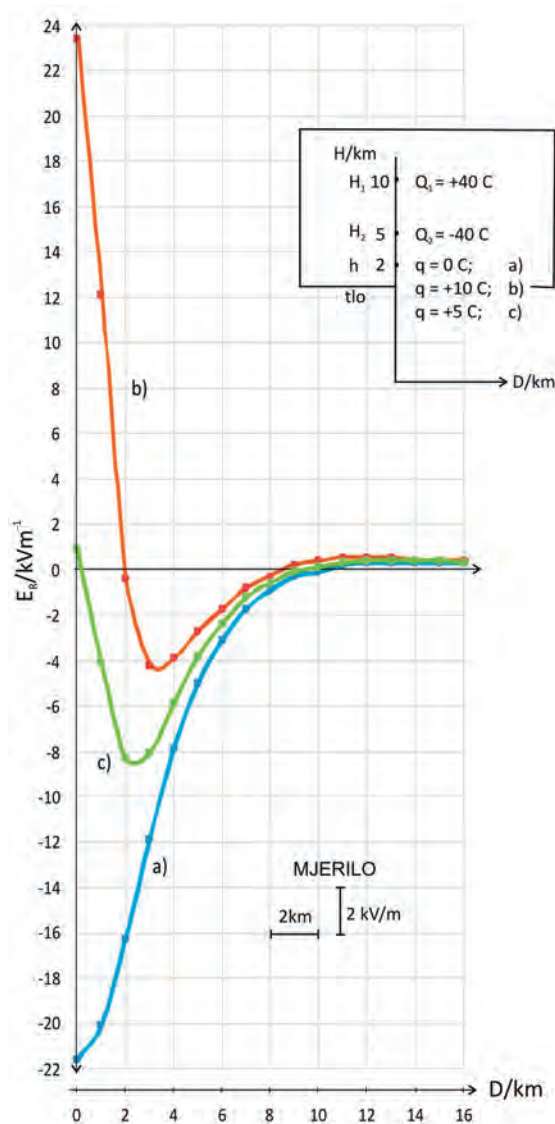


Slika 1. Rezultantno prizemno grmljavinsko polje određeno je grafičkom metodom električne slike prema modelu grmljavinskog oblaka ucrtanog u gornjem desnom uglu slike.

Figure 1. The resulting electrostatic field induced by the Cb at ground level. The method of electrical imaging was applied using the thundercloud model given in the upper right corner of the picture.

Smjer rezultatnog prizemnog grmljavinskog polja E_R određuje se postepeno za svaki odvojeni centar naboja. Na slici 1. prikazano polje tripolarnog Cb-a izrađeno je metodom električne slike prema teorijskom modelu grmljavinskog oblaka naznačenog u gornjem desnom uglu slike sa centrima naboja Q_1 , Q_2 i q na visinama H_1 , H_2 i h .

Grmljavinsko polje na slici 1. usmjereno je od tla prema oblaku, tj. ima negativan smjer. Jači-



Slika 2. Jakost prizemnog grmljavinskog polja E_R kao funkcija horizontalne udaljenosti D . [vrijednosti su izračunate pomoću relacije (6)].

Figure 2. The intensity of the electric field at ground level E_R as a function of horizontal distance D . [values are calculated by equation (6)].

na mu iznosi $E_R = -4.2 \text{ kV m}^{-1}$ prema relaciji (6) u koju je uvršten treći član za pomoćni pozitivni centar q .

9. VERTIKALNI ELEKTRIČNI PROFIL CB-A

Uspoređujući visinska mjerenja grmljavinskog polja, izvedenih direktno u oblaku, s teorijskim podacima kojima se također u oblaku razmatra funkcionalna veza grmljavinskog polja s visinom, utvrđena je velika sličnost između eksperimentalnog i teorijskog prikaza električnog vertikalnog profila Cb-a, što potvrđuje ispravnost teorijske spoznaje.

Sličnost je, međutim, samo *kvalitativna*, jer izostaje brojčana podudarnost. Naime, zapisi mjernih instrumenata kojima se mjerilo direktno u Cb-u, rijetko su pokazivali jačinu polja iznad 10^4 V m^{-1} , dok su teorijske vrijednosti i 10 puta veće, prekoračujući često 10^5 V m^{-1} .

Ta razlika slijedi iz kompleksnih odnosa koji vladaju u Cb-u, a koji su znatno pojednostavljeni pri odabiru fizikalnih zakona za proučavanje električnog stanja u oblaku. Pretpostavka o točkastim centrima naboja grmljavinskog dipola odnosno o jednoličnoj sfernoj raspodjeli naboja u pojedinom centru, kao i pretpostavka o vertikalnom smještaju jednog centra iznad drugog tek približno odgovaraju realnosti.

Uz to, burno uzlazno-silazno strujanje, kao i horizontalno smicanje pojedinih dijelova oblaka pod utjecajem vjetra uzrokuju veliku prostornu i vremensku varijabilnost električnih uvjeta u Cb-u, a što je teško, skoro i nemoguće obuhvatiti teorijskim izračunom.

K tome treba pribrojiti i malu vjerojatnost da su mjerni instrumenti pri dizanju kroz oblak prolazili upravo kroz centre grmljavinske aktivnosti ili barem u njihovoj blizini, gdje su električna polja najjača, iako se takova pretpostavka uvažava pri teorijskom izračunu.

Očigledno je da sve iznesene činjenice sustavno umanjuju kvantitativnu podudarnost eksperimentalnih i teorijskih podataka, pa stoga ne iznenađuje što izostaje preciznija brojčana suglasnost među njima.

Međutim, ponovno treba istaknuti da nabrojene teškoće ipak nisu prekrile uočljivu kvalitativnu sličnost što potvrđuje njenu realnost.

Tablica, 1. Doprinos pojedinih centara naboja Q_1 , Q_2 i q u izgradnji rezultantnog prizemnog električnog polja E_R za grmljavinske oblake sa slike 2. kod raznih udaljenosti D .

Table 1. Resulting electrostatic field on the ground calculated for charges $+Q_1$, $-Q_2$ and $+q$ at various horizontal distances D for thunderclouds from figure 2.

Km	BIPOLARAN kVm ⁻¹ $E_R = E_{R1} + E_{R2}$			TRIPOLARAN kVm ⁻¹ $E_R = E_{R1} + E_{R2} + E_{R3}$			
	$Q_1 = +40$ C	$Q_2 = -40$ C		$q = +10$ C		$q = +5$ C	
D	E_{R1}	E_{R2}	E_R	E_{R3}	E_R	E_{R3}	E_R
0	+7,2	-28,8	-21,6	+45,0	+23,4	+22,5	+0,9
1	+7,1	-27,2	-20,1	+32,2	+12,1	+16,1	-4,0
2	+6,8	-23,1	-16,3	+15,9	-0,4	+8,0	-8,3
3	+6,3	-18,2	-11,9	+7,7	-4,2	+3,8	-8,1
4	+5,8	-13,7	-7,9	+4,0	-3,9	+2,0	-5,9
5	+5,2	-10,2	-5,0	+2,3	-2,7	+1,2	-3,8
6	+4,5	-7,6	-3,1	+1,4	-1,7	+0,7	-2,4
7	+4,0	-5,7	-1,7	+0,9	-0,8	+0,5	-1,2
8	+3,4	-4,3	-0,9	+0,6	-0,3	+0,3	-0,6
9	+3,0	-3,3	-0,3	+0,5	+0,2	+0,2	-0,1
10	+2,5	-2,6	-0,1	+0,3	+0,3	+0,2	+0,1
11	+2,2	-2,0	+0,2	+0,3	+0,5	+0,1	+0,3
12	+1,9	-1,6	+0,3	+0,2	+0,5	+0,1	+0,4
13	+1,6	-1,3	+0,3	+0,2	+0,5	+0,1	+0,4
14	+1,4	-1,1	+0,3	+0,1	+0,4	+0,1	+0,4
15	+1,2	-0,9	+0,3	+0,1	+0,4	+0,1	+0,4
16	+1,1	-0,8	+0,3	+0,1	+0,4	0,0	+0,3
18	+0,8	-0,6	+0,2	+0,1	+0,3	0,0	+0,2
20	+0,6	-0,4	+0,2	0,0	+0,2	0,0	+0,2
25	+0,4	-0,2	+0,2	0,0	+0,2	0,0	+0,2
30	+0,2	-0,1	+0,1	0,0	+0,1	0,0	+0,1
35	+0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

10. ODNOS GRMLJAVINSKOG POLJA E_R I UDALJENOSTI D

Približavanjem odnosno udaljavanjem Cb-a od mjesta mjerenja grmljavinskog polja mijenja mu se jačina pokazujući funkcionalnu vezu s horizontalnom udaljenošću D . Kod nekih udaljenosti D , nazovimo ih kritičnim vrijednostima D_{kr} , mijenja se dapače i smjer polja, a ne samo jačina.

Međusobnu ovisnost ovih dviju veličina (D i E_R) za bipolarni oblak prikazuje slike 2. Ujedno donosi i dva primjera tripolarnog oblaka s različitim količinom pozitivnog naboja u pomoćnom centru q , kako bi se što zornije očitovao njegov utjecaj na prizemno grmljavinsko polje (slike 2b i 2c).

Podaci za Q_n i H_n kako u svojoj knjizi navodi Uman (2001.) potječu od Malana. Da bi pokazao spregu naboja Q_n i pripadnih im visina H_n na slici 2. Malan je odabirao Q i H tako da pri određenim udaljenostima D dobije jakost pri-

zemnog grmljavinskog polja E_R izmjerenih za vrijeme grmljavinskih oluja u Južnoj Africi.

Prizemno električno polje bipolarnog Cb-a kod $D=0$ km negativno je s usmjerenjem od tla prema bazi oblaka. Jačina mu iznosi: $E_R=-21,6$ kVm⁻¹ (slika 2a).

Naprotiv, prizemno električno polje tripolarnog Cb-a kod iste udaljenosti $D=0$ km je pozitivno s usmjerenjem od baze oblaka prema tlu. Jačina mu iznosi: $E_R=+23,4$ kVm⁻¹ (slika 2b).

Brojčano su oba polja približno jednaka kod $D=0$ km, ali su suprotnog smjera što je posljedica djelovanja pomoćnog pozitivnog centra ($q=+10$ C) tripolarnog Cb-a. Utjecaj mu je međutim kratkog dometa i uskoro prestaje. Naime, kritična horizontalna udaljenost iznosi $D_{kr}=2$ km i kod te udaljenosti spomenuto polje tripolarnog Cb-a postaje negativno i ubrzo kod $D_{min}=3$ km postiže najveći negativni iznos: $E_{min}=-4,2$ kVm⁻¹.

I u slučaju tripolarnog Cb-a s manjom količinom pozitivnog naboja u pomoćnom centru ($q=+5$ C), električno polje je kod $D=0$ km pozitivno (sl.2c) iako je vrlo oslabljeno ($E_R=+0,9$ kVm⁻¹). Kritična horizontalna udaljenost je manja od pola kilometra ($D_{kr}=0,3$ km). Polje postiže najveću negativnu vrijednost već kod $D_{min}=2$ km u iznosu: $E_{min}=-8,3$ kVm⁻¹.

Djelovanje pomoćnog pozitivnog centra q dominantno je samo u neposrednoj blizini oblaka. Kritična horizontalna udaljenost D_{kr} , koja pokazuje domet njegove dominantnosti, funkcija je količine pozitivnog naboja sadržanog u pomoćnom centru q , što potvrđuje usporedba krivulja b) i c) na slici 2.

Radi uvida koliko pomoćni pozitivni centar q sudjeluje u izgradnji rezultatnog grmljavinskog polja E_R , prikazan je u tablici 1. njegov doprinos E_{R3} , kao i glavnih centara naboja Q_1 i Q_2 s pripadajućim poljima E_{R1} i E_{R2} , za sva tri oblaka sa slike 2.

Prema tablici (1.) u izgradnji rezultatnog prizemnog grmljavinskog polja $E_R=+23,4$ kVm⁻¹ tripolarnog Cb-a kod $D=0$ km najveći doprinos daje pomoćni pozitivni centar s količinom naboja $q=+10$ C. On naime na visini $H=2$ km daje polje $E_{R3}=+45,0$ kVm⁻¹ i doprinosi oko šest i pol puta više nego glavni pozitivni centar Q_1 s poljem $E_{R1}=+7,2$ kVm⁻¹, na visini $H=10$ km, a oko jedan i pol puta više nego negativni centar Q_2 s poljem $E_{R2}=-28,8$ kVm⁻¹.

Međutim, djelovanje pomoćnog pozitivnog centra q je lokalnog karaktera i prostorno je ograničeno, pa već kod $D=2$ km prema tablici 1. doprinos mu je otprilike trostruko manji ($E_{R3}=+15,9$ kVm⁻¹), ali još uvijek je u odnosu na glavni pozitivni centar Q_1 u znatnoj prednosti ($E_{R1}=+6,8$ kVm⁻¹).

Naprotiv, negativni centar Q_2 s poljem $E_{R2}=-23,1$ kVm⁻¹ već kod $D=2$ km nadmašuje pomoćni pozitivni centar q ($E_{R3}=+15,9$ kVm⁻¹) i postaje glavni sudionik u izgradnji grmljavinskog prizemnog polja što i ostaje sve do otprilike $D\approx 10$ km, gdje se doprinosi centara Q_2 i Q_1 donekle brojčano izjednače ($E_{R2}=-2,6$ kVm⁻¹, a $E_{R1}=+2,5$ kVm⁻¹).

U slučaju tripolarnog oblaka s manjom količinom pozitivnog naboja u pomoćnom centru ($q=+5$ C) drugačiji su odnosi, što se očituje manjom jačinom rezultatnog prizemnog grmljavinskog polja ($E_R=+0,9$ kVm⁻¹ kod $D=0$ km). Iako, pomoćni pozitivni centar q kod $D=0$ km znatno doprinosi izgradnji prizemnog grmljavinskog polja ($E_{R3}=+22,5$ kVm⁻¹), ipak doprinos negativnog centra Q_2 je veći ($E_{R2}=-28,8$ kVm⁻¹), pa već na $D=0$ km postaje glavni sudionik u izgradnji, što i ostaje sve do otprilike $D\approx 10$ km. Doprinosi glavnih centara Q_1 i Q_2 donekle se brojčano izjednačuju kao i u prethodnom primjeru kod otprilike $D\approx 10$ km.

Utjecaj Cb-a na atmosfersko električno polje potpuno prestaje u sva tri slučaja otprilike na

Tablica 2. Značajke grmljavinskog polja tripolarnog Cb-a sa slike 2b i 2c:

E_0 = jakost polja kod $D_0=0$ km
 D_q = domet pomoćnog pozitivnog centra
 D_{min} = udaljenost kod koje E postiže minimum
 E_{min} = najveći iznos negativnog polja kod D_{min}
 D_{kr} = kritična udaljenost

Radi usporedbe dodana je i krivulja a) na slici 1.

Table 2. Characteristics of the thundercloud field for the Cb from figure 2b and 2c:

E_0 = field intensity at $D_0=0$ km
 D_q = range of the positive auxiliary centre
 D_{min} = the distance corresponding to E_{min}
 E_{min} = maximum negative field intensity at D_{min}
 D_{kr} = critical distance

The curve a) in Figure 1. is added for comparison.

Kriv.	E_0 kV/m	D_q km	E_{min} kV/m	D_{min} km	D_{kr} km
b)	+23,4	1,8	-4,2	3	8,5
c)	+0,9	0,2	-8,4	2	9
a)	-21,6	-	-	-	10

udaljenosti $D \approx 35$ km (tablica 1.). Nakon normalizacije električnih odnosa u atmosferi, tj. razgradnjom Cb-a, ponovno se zapaža električno polje lijepoga vremena, koje je samo prividno bilo nestalo. Zapravo ga je prekrilo nadmoćnije grmljavinsko polje, ali u povoljnijim prilikama očituje se opet, budući da je stalno i neprekidno prisutno u atmosferi kako je istaknuto u prethodnim poglavljima.

Navedeni primjeri pokazuju ne samo da oblik prizemnog grmljavinskog polja E_R otkriva električnu narav Cb-a, nego označuje i njegovu električnu strukturu ukazujući na bipolarni ili tripolarni Cb (slika 2.). Oblik donekle ukazuje i na količinu naboja koncentriranog u centrima oblaka, posebice u pomoćnom centru q .

Djelovanje pomoćnog pozitivnog centra - toliko značajnog za oblik prizemnog grmljavinskog polja - donosi doduše tablica 1., ali nedostaju pojedinosti o prostornom mu djelovanju, stoga su prikazani u tablici 2.

Tablica (2) kazuje: jačem pozitivnom pomoćnom centru q odgovara u prizemnom grmljavinskom polju jače pozitivno polje E_0 , veći domet djelovanja D_q , negativno polje slabijeg intenziteta s najvećim negativnim iznosom E_{\min} , na većoj horizontalnoj udaljenosti D_{\min} , te ponovnu uspostavu pozitivnog polja na manjoj kritičnoj udaljenosti D_{kr} .

Izneseni podaci zapravo ukazuju na odmjeraivanje pomoćnog pozitivnog centra q i negativnog Q_2 .

Često su u početku različiti oblici prizemnog grmljavinskog polja unosili zabunu, ne uklapajući se u predodžbu o djelovanju bipolarnog Cb-a. Ukazivali su na tripolarni Cb iako se u početnoj fazi istraživanja električne strukture oblaka nije ni slutilo o mogućoj tripolarnosti Cb-a.

11. NUMERIČKA PROCJENA KOLIČINE NABOJA Q I VISINE H

Na temelju izmjerenih vrijednosti prizemnog električnog polja i relacije (6) izračunavaju se, ili točnije, procjenjuju se veličine Q i H .

Budući da relacija (6) sadrži nekoliko nepoznanica potrebno je za njeno rješavanje više simultanih mjerenja električnog polja iz neposredne okolice Cb-a. Međutim, pri sređivanju tih mjerenja nastaju teškoće, što je posljedica navedene idealizacije procesa u Cb-u. Unatoč

tome istraživači grmljavinskog elektriciteta često su prisiljeni - uostalom kao i većina istraživača ostalih prirodnih pojava - pojednostaviti uvjete kako bi dobili uvid u zbivanja unutar Cb-a i mogućnost procjene :

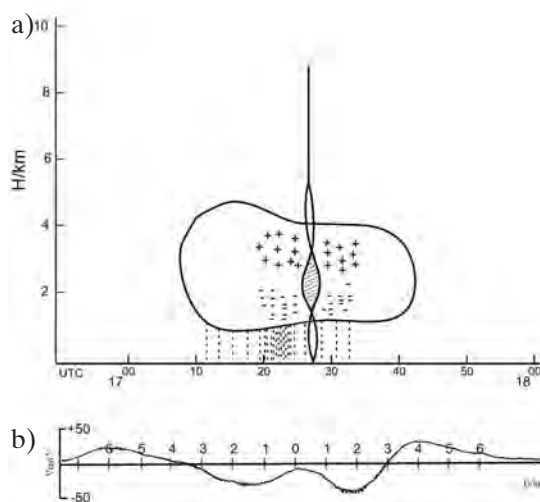
- jačine procesa,
- visine na kojoj se procesi odvijaju,
- količine naboja koji sudjeluje u grmljavinskim procesima.

U nedostatku potrebnog broja simultanih mjerenja često se koristi empirijski podatak o međusobnom odnosu visina H_1 i H_2 koji kazuje da se njihove razlike uglavnom kreću unutar granica

$$1 \text{ Km} < H_1 - H_2 < 4 \text{ km} \quad (7)$$

što u kombinaciji s izmjerenim podacima grmljavinskog polja E_R samo s jedne lokacije može poslužiti da se upotrebom relacije (6) procijeni količina naboja Q i visina H .

Takav pokušaj donosi slijedeći izračun koristeći registraciju prizemnog električnog grmljavinskog polja E_R , prikazanu na slici 3a prema Simpson i Scrase (1937.) dobivenu tijekom njihovih istraživanja na opservatoriju KEW blizu Londona.



Slika 3. Gornji dio slike (3a) prikazuje sondu oblaka, a donji (3b) registraciju prizemnog grmljavinskog polja za vrijeme grmljavinske oluje: kod približavanja i udaljavanja Cb (Simpson i Scrase 1937).

Figure 3. Sounding of the thundercloud (upper part of the figure). Recording of the electrical field of the approaching and receding thundercloud (lower part) (Simpson and Scrase, 1937).

Autori opisuju nadolazeći Cb kao osamljeni, relativno kompaktni oblak slabijeg intenziteta. Tek na početku, u ranom stadiju njegova razvoja, čula se samo jednom slaba grmljavina, kažu autori i to bez sijevanja. Poslije, ni jednom nije bilo ni optičkih ni akustičnih pojava, koje bi ukazivale na električno izbijanje u oblaku.

Značajno je, što u registraciji prizemnog grmljavinskog polja nije zabilježen nikakav znak u vezi s takovim procesima. Stanje Cb-a može se stoga označiti približno kao elektrostatsko, uvažavajući sve prethodno spomenute aproksimacije. Na temelju sondažnih mjerenja autori su Cb označili kao bipolaran iako, kako sami napominju, registracija prizemnog polja u dijelu negativnih vrijednosti ukazuje na prisutnost pomoćnog pozitivnog centra. Točniju oznaku skale za horizontalnu udaljenost D autori nisu označili, pa je na slici 3b skicirana naša procjena u kojoj smo se koristili napomenama autora, naročito one da je centar grmljavinske aktivnosti prolazio oko 1 km južnije od mjesta motrenja u 17 sati i 25 minuta.

Potom su očitane vrijednosti:

Primicanje Cb-a:

$$E_{\max} \approx 25 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_{\max} \approx 6 \text{ km}$$

$$E_0 \approx 0 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_0 \approx 4 \text{ km}$$

Odmicanje Cb-a:

$$E_{\max} \approx 25 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_{\max} \approx 3 \text{ km}$$

$$E_0 \approx 0 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_0 \approx 2 \text{ km}$$

Srednjaci im iznose:

$$E_{\max} = 25 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_{\max} \approx 5 \text{ km}$$

$$E_0 = 0 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kod } D_0 = 3 \text{ km}$$

Ako se uzme za razliku visina prema nejednadžbi (7)

$$H_1 - H^2 \approx 1 \text{ km},$$

tada rješenje relacije (6) daje za srednje vrijednosti E_0 i D_0 :

$$H_1 = 2,67 \text{ km i } H_2 = 1,67 \text{ km},$$

uz već ranije prihvaćenu pretpostavku o jednakosti apsolutnih iznosa naboja Q_1 i Q_2 .

Zatim, pomoću dobivenih vrijednosti H_1 i H_2 , te srednjih vrijednosti E_{\max} i D_{\max} , rješenje relacije (6) glasi:

$$Q = 43 \text{ C},$$

što, prema prethodno spomenutoj pretpostavci znači :

$$Q_1 = +43 \text{ C i } Q_2 = -43 \text{ C}$$

Usprkos naznake na registraciji prizemnog grmljavinskog polja na slici 3b da je možda u pitanju tripolarni Cb, ipak je u prethodnom izračunu korištena relacija (6) za bipolaran oblak, smatrajući prema tablici 1. da je na udaljenosti $D \approx 5 \text{ km}$ zanemariv utjecaj pomoćnog pozitivnog centra. Njegovo se djelovanje moglo snažnije očitovati samo u neposrednoj blizini, što predstavlja područje duljine 6 km tj. područje između $D=4 \text{ km}$ u primicanju, te $D=2 \text{ km}$ u odmicanju. Dobiveni rezultati za nepoznanice Q i H mogu se stoga smatrati prihvatljivima naročito jer se procijenjene visine H_1 i H_2 uklapaju u sondažna mjerenja na slici 3a.

12. DISKUSIJA

Rezultati procjene za veličine Q i H , predočeni u prethodnom poglavlju, dobiveni su spajanjem empirijskih i teorijskih spoznaja, zasnovanih na predodžbi o elektrostatskoj ravnoteži unutar Cb-a. Predmet razmatranja je dakle elektrostatsko polje nastalo stacionarnim nabojem Q , lociranim u grmljavinskom oblaku na stalnoj visini H iznad tla.

Valja ukazati da se poremećeni uvjeti u Cb-u odrazuju u prizemnom grmljavinskom polju, što potvrđuje i jednostavna analiza relacije (6) na kojoj se temelji teorijski dio istraživanja električne strukture Cb-a.

Uz uvjet da je $D \gg H$, relacija (6) poprima oblik

$$E = \frac{2QH}{D^3} = \frac{M}{D^3} \quad (8)$$

u kojoj Q predstavlja cjelokupni naboj grmljavinskog oblaka, a produkt $2QH=M$ označuje električni moment dipola naboja Q i njegove imaginarne slike Q' .

Poremeti li se elektrostatska ravnoteža u Cb-u gibanjem naboja Q , nastaju promjene i električnog momenta M , te u konačnici prema relaciji (8) i promjene prizemnog elektrostatskog polja.

Gibanjem naboja Q formira se u oblaku električna struja oko koje nastaje magnetsko polje,

a promjena u jačini struje - što se očito zbiva u Cb-u - uspostavlja promjenljivo magnetsko polje, što se izmjenično nastavlja budući da između električnog i magnetskog polja postoji neraskidiv odnos međusobnog djelovanja.

Taj proces rezultira emisijom elektromagnetskih valova, koji se šire u prostoru brzinom svjetlosti.

Prema tome izbijanjem munje nije uništeno elektrostatsko grmljavinsko polje, dapače pridružuje mu se učinak magnetskog polja, kao i učinak emisije elektromagnetskih valova.

Registracije prizemnog grmljavinskog polja pokazujući nagle i vrlo intenzivne promjene uslijed izbijanja munje, potvrđuju da se polje u tom slučaju sastoji od više komponenata. Uglavnom se ističu tri, pa se polje može prikazati kao zbroj triju komponenata

- elektrostatske E_s , iznosa $E_s = \frac{M}{D^3}$

- induksijske ili magnetske E_i , iznosa $E_i = \frac{1}{cD^2} \left(\frac{dM}{dt} \right)$

- radijacijske E_r , iznosa $E_r = \frac{1}{c^2D} \left(\frac{d^2M}{dt^2} \right)$

odnosno rezultatno polje kao:

$$E_R = E_s + E_i + E_r,$$

u kojoj komponente prikazuju trenutačne i simultane vrijednosti grmljavinskoga polja, gdje t označuje vrijeme, a c brzinu svjetlosti.

U ovom radu se, kako je već istaknuto u više navrata, razmatrala jedino elektrostatska komponenta E_s budući da ona pruža velike mogućnosti za proučavanje električne strukture grmljavinskog oblaka pomoću mjerenja samo prizemnog elektrostatskog polja, ne zahtijevajući pri tome specijalne dodatne uređaje. Stoga se ta metoda još i danas koristi, unatoč modernizaciji i velikim tehničkim mogućnostima ostalih načina istraživanja. K tome može poslužiti i kao jednostavna procjena rezultata i onda, ako postoji mogućnost preciznih mjerenja.

13. ZAHVALA

Za unos slika srdačno zahvaljujem dipl. ing. Ines Ivančić, višem stručnom suradniku u Seizmološkoj službi RH, kao i dipl. ing. E. Vuji-

ću, znanstvenom novaku pri Geofizičkom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu, za pomoć kod prepisivanja i uređenja teksta osobnim računalom.

LITERATURA

Berdeklis P. and R. List, 2001: The Ice Crystal-Graupel Collision Charging Mechanism of Thunderstorm Electrification, *J. Atm. Sci.*, 58, 2751–2770.

Brook, M., and T. Ogawa, 1977: The Cloud Discharge, 191–230 (in R.H.Golde : *Lightning*, Vol.L., Academic Press, London, 496 pp.).

Brook, M. and N. Kitagawa, 1960: Electric-Field Changes and Designe of Lightning-Flash Counter, *J. Geoph. Res.*, 65, 1927–1931.

Byers, H.R. and R.R.Braham, Jr., 1953: Thunderstorm Structure and Dynamics, 46-65 (in *Thunderstorm Electricity*, edit.H.R.Byers, Univ. Chicago Press, 344 pp.).

Davis, M.H., M.Brook, H.Christian, B.G.Heikes, R.E.Orville, C.G.Park, R.G.Roble and B.Vonnegut, 1983: Some Scientific Objectives of a Satellite-Borne Lightning Maper. *Bull. Am. Met. Soc.*, 64, 114–119.

Elster, J. and H. Geitel, 1971: Clouds particles rebounding from hydrometeors in polarizing electric fields, 521 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).

Ette, A.I.I. and G.O. Olaofe, 1982: Theoretical Field Configurations for Thundercloud Model with Volume Charge Distributions. *PAGEOPH*, 120, 117–122.

Findeinsen, W., 1971: Electrification associated with the collision and fracture of ice crystals, 539 and 546 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).

Fleming, J.A., 1949: *Terrestrial Magnetism and Electricity*, Dover Publications, New York. 794.

Frenkel, J., 1971: A theory of the fundamental phenomena of atmospheric electricity, 522 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).

- Golde, R.H., 1977: *Lightning*. Vol. I., Academic Press, London, 496.
- Jacobson, E.A. and E.P.Krieder, 1976: Electrostatic Field Changes Produced by Florida Lightning. *J. Atm. Sci.*, 33, 103–117.
- Johnson, J. 1954: *Atmospheric Electricity* (in *Physical Meteorology*, Marblehead, Chapter 9), 275–319.
- Kano, M., 1954: A Note on the Workman-Reynolds Theory of Thunderstorm Charge Generation. *Papers in Meteorology and Geophysics*, Vol.V, No 1, 48–53.
- Lang, T.J., I.J.Miller, M.Weisman, S.A.Rutledge, L.J.Barker III, V.N.Bringi, V.Chandrasekar, A.Detwiler, N.Doesken, J.Helsdon, C.Knight, P.K.Rehbiel, W.A.Lyone, D.MacGorman, E.Rasmussen, W.Rison, W.R.Rust and R.J.Thomas, 2004: The severe thunderstorm electrification and precipitation study. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 85, 1107–1125.
- Lopez, R.E. and R.I.Holle, 1986: Diurnal and Spatial Variability of Lightning Activity in North Eastern Colorado and Central Florida during the Summer. *Mon. Weat. Rev.*, 114, 1288–1312.
- MacGorman, D.R. and W.D.Rust, P.Krehbiel and W.Rison, E.Bruning, K.Wiens, 2005: The Electrical Structure of Two Supercell Storms during STEPS. *Mont. Weat. Rev.*, 133, 2585–2607.
- Malan, D.J., 1964: *Physics of Lightning*. English Univ. Press, 176.
- Mason, B.J., 1953: A Critical Examination of Theories of Charge Generation Thunderstorms. *Tellus*, V, 4, 446–460.
- McLain, D.K. and M.A.Uman, 1971: Exact Expression and Moment Approximation for the Electric Field Intensity of the Lightning Strokes. *J. Geoph. Res.*, 76, 2101–2105.
- Müller-Hillebrand, D., 1954: Charge generation in Thunderstorms by collision of ice crystals with graupel, falling a vertical electric field. *Tellus*, VI, 4, 367–381.
- Ogawa, T. and M.Brook, 1969: Charge distribution in thunderstorm clouds. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 95, 513–525.
- Orville, R.E. and D.W.Spencer, 1979: Global Lightning Flash Frequency. *Mon. Weat. Rev.*, Vol.107, 934–943.
- Rust, W.D. and T.C.Marshall, 1996: On abandoning the thunderstorm tripole-charge paradigm. *J.Geoph.Res.*, 101, 23499–23504.
- Siedentopf, H.,1950: *Konvektionsströmungen in Laboratoriumsversuch und in der Erdatmosphäre*, 42-58 (in H.Israel: *Das Gewitter Akadem.Verlagsgesellschaft*, Leipzig, 249 pp.).
- Simpson, G. and F.J.Scrase, 1937: The Distribution of Electricity in Thunderclouds. *Proc. R. Soc., Ser,A*, 161, 309–352.
- Simson, G.C., 1971: A theory of the fundamental phenomena of atmospheric electricity, 524 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).
- Stolzenburg, M., 1994: Observations of High Ground Flash Densities of Positive Lightning in Summertime Thunderstorms. *Mon. Weat. Rev.*, 122, 1740–1750.
- Stolzenburg, M., T.C.Marshall, W.D.Rust and B.F.Smull, 1994: Horizontal Distribution of Electrical and Meteorological Conditions across the Stratiform Region of a Mesoscale Convective System. *Mon. Weat. Rev.*, 122, 1777–1797.
- Stolzenburg, M. and T.C.Marshall, 1994: Testing models of thunderstorm charge distributions with Coulomb's law, *J. Geoph. Res.*, 99, 25921–25932.
- Stolzenburg, M., W.D.Rust, B.F.Smull and T.C.Marshall, 1998: Electrical structure in thunderstorm convective regions. 1. Mesoscale convective systems. *J. Geoph. Res.*, 103, 14059–14078.
- Stolzenburg, M., W.D.Rust and T.C.Marshall, 1998: Electrical structure in thunderstorm convective regions, 2. Isolated storms, *J. Geoph. Res.*, 103, 14060–14096.
- Stolzenburg, M., W.D.Rust and T.C.Marshall, 1998: Electrical structure in thunderstorm convective regions. 3. Synthesis. *J. Geoph. Res.*, 103, 14097–14108.

- Uman, M.A., 2001: *The Lightning Discharge*. Dover Publications, INC, New York, 377 pp.
- Wählin, L., 1986: *Atmospheric Electrostatics*. John Wiley – Sons Inc., New York, 130 pp.
- Wall, E., 1950: Die Gewittervorstellung, 74-84 (in H.Israel: *Das Gewitter Akadem. Verlagsgesellschaft, Leipzig*, 249 pp.).
- Wichmann, H., 1950: Gewitterprobleme, 42-58 (in H.Israel: *Das Gewitter Akadem. Verlagsgesellschaft, Leipzig*, 249 pp.).
- Wichmann, H., 1953: Zur Theorie des Gewitters. *Arch. Meteor. Geoph. Bioklim., Ser. A, Bd,V*, 187–230.
- Williams, E.R., 1989: The Tripole Structure of Thunderstorms, *J. Geoph. Res.*, 94, 13151–13167.
- Wilson, C.T.R., 1971: Wilson's process of charging by selective ion capture, 521–522 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).
- Workman, E.J. and S.E. Reynolds, 1953: Structure and Electrification, 139–149 (in *Thunderstorm Electricity*, edit. H.R.Byers, Univ. Chicago Press, 344 pp.).
- Workman, E.J. and S.E. Reynolds, 1971: Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous and their possible relationship to thunderstorm electricity, 526 (in B.J. Mason: *The physics of clouds*, 1971, Clarendon Press, Oxford, 671 pp.).