

Razelektritve v ionosferi

Rudi Čop¹

Povzetek

Vpliv vesolja na Zemljo je poleg sončnega obseva, vpada meteorjev, oblakov in polarnih sijev v mezosferi okoli magnetnih polov viden še kot sij svetlobe v ionosferi in razelektritve v njej. V članku je predstavljeno tlenje svetlobe v ionosferi in zaradi tega tlenja vidno zaznavanje težnostnih valov v zgornjih plasteh ozračja. Osnovni načini razelektritev v ionosferi TLE (Transient Luminous Event) so razloženi na poenostavljen način: da strele med robovi oblakov in tlemi inducirajo električno napetost tudi v ionosferi. Močne vremenske nevihte v troposferi so generatorji električnih tokov v atmosferi in vplivajo tudi na zgornje plasti ozračja. Raziskave teh pojavov so uspešne šele v zadnjih dveh desetletjih z razvojem ustreznih merilnih instrumentov in s pomočjo vesoljske tehnike.

Ključne besede: ionosfera, sij svetlobe v atmosferi, razelektritve v ionosferi

Key words: ionosphere, atmospheric light glow, electric discharges in ionosphere

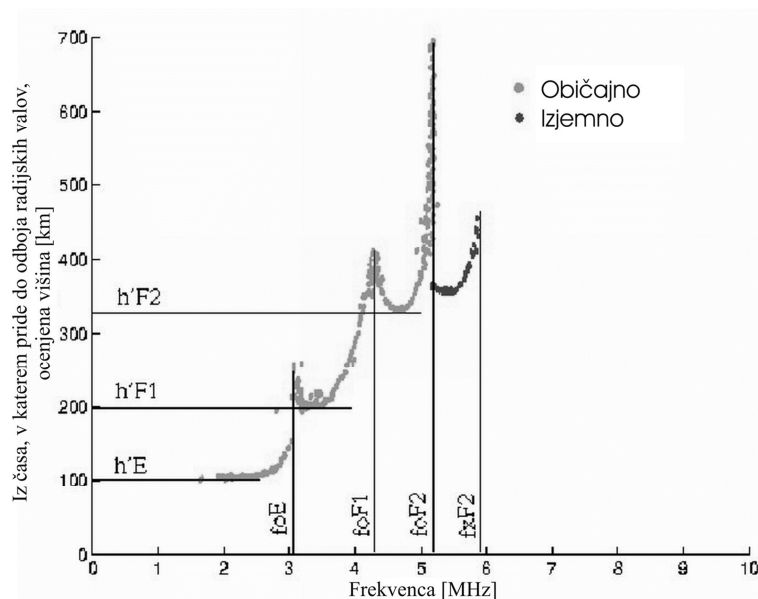
Ionosfera

Ionosfera se razprostira na višini od 50 do 1000 km v zemeljski atmosferi in predstavlja manj kot en odstotek vse njene materije. Sestavlja jo več plasti, od katerih se odbijajo radijski valovi (IUPAC, 1997; Handbook, 1985; Anderson & Fuller-Rowell, 1999). Čim višje so te plasti, tem toplejše so. Zaradi ionizirajočega sevanja Sonca, ki ionizira molekule zraka pri ustrezno nizkem zračnem tlaku, je ionosfera sestavljena iz hladne plazme. V njej obstajajo prosti elektroni ob naelektrenih ionih, ki se le počasi rekombinirajo. Zaradi naelektrenih delcev v ionosferi nastajajo v zgornjih plasteh atmosfere tudi električni tokovi.

Najnižja plast ionosfere je plast D, ki sega od okoli 50 km do okoli 90 km nad zemeljsko površino. Nanjo najbolj vplivajo visoko energijski žarki X, ki jih seva Sonce. Ionosferska plast E je med 90 in 150 km iznad zemeljske površine in nastaja zaradi sončevih žarkov X daljše valovne dolžine. Nad 150 km je ionosferska plast F, ki doseže največjo koncentracijo prostih elektronov v zgornji plasti F, v plasti F2 na višini okoli 600 km. Ta plast je ionizirana predvsem zaradi sončevih ekstremnih ultravijoličnih žarkov. Vrh ionosfere je na višini 1000 km, vendar ni prave razmejitve med njo ter višje ležečo plazmosfero in magnetosfero. Okoli zemeljskih magnetnih polov je močan izvor ionizacije sončni veter, ki v ionosferi ustvarja polarni sij.

Plasti ionosfere D in E odbijata dolge in srednje radijske valove in zato omogočata radijske komunikacije na velike razdalje. Kratki radijski valovi se odbijajo od ionosferske plasti F (Slika 1). Ultra kratki radijski valovi, mikrovalovi in svetloba imajo prekratko valovno dolžino, da bi se odbijali od ionosfere. Pri prehodu te vrste elektromagnetnih valov se v njej le lomijo. Tako odboj radijskih valov kot lom mikrovalov v ionosferi je odvisen od njenih zelo spremenljivih lastnosti, ki so pod vplivom izvorov njene ionizacije: sevanja Sonca in jakosti sončnega vetra. Zato se lastnosti ionosfere preko dneva in skozi letne čase ciklično spreminjajo, prav tako pa preko celotnega enajstletnega cikla sončeve aktivnosti.

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje/Sicciole



Slika 1 - Tipični ionogram vertikalnega radijskega sondiranja ionosfere (Bamford, 2000). Označene so višine posameznih plasti ionosfere za običajne kritične frekvence in za dodatno izjemno kritično frekvenco f_{xF2} sloja F2

V ionosferi se zelo spremenijo razmere ob nenadnih izbruhih na Soncu in ob času geomagnetnih neviht. Zaradi spremembe koncentracije prostih elektronov v ionosferi se zaradi difuzije spremeni smer in jakost zračnih tokov v njeni sicer električno nevtralni okolici. Ti ionosfero odnašajo vzdolž silnic zemeljskega magnetnega polja. Ker se lastnosti geomagnetnega polja krajevno spreminjajo, se krajevno spreminja tudi turbulenca ionosfere. Zaradi tega sta tako odboj radijskih valov kot lom mikrovalov v ionosferi odvisna od časa in kraja njihovega oddajanja ali sprejemanja. Posebno težko pa so obvladljive majhne anomalije v njenem vrtnčenju (ionospheric scintillation), ki so posebej pomembne pri določanju položaja visoke točnosti s pomočjo navigacijskih sprejemnikov GNSS (Global Navigation Satellite System).

Razelektritve v ionosferi

Razelektritve v ionosferi niso navadne strele v zgornjih plasteh atmosfere, temveč so ti pojavi vezani na lastnosti hladne plazme. Te vrste razelektritev ali dogodki TLE (Transient Luminous Event) so podobne razelektritvam v fluorescentnih ceveh in obsegajo različne oblike razelektritev v zgornjih plasteh atmosfere. Nastajajo visoko nad nevihtnimi oblaki, običajno v zaključnem obdobju neviht. Sprožijo jih strele v troposferi med oblaki in zemeljsko površino s pozitivnimi nosilci električnega naboja. S prostim očesom lahko dogodke TLE opazimo zelo redko in to le v izjemnih okoliščinah, ko se vidi nad najbolj aktivne dele nevihtnih oblakov. Ker je njihova svetlost enaka svetlosti šibkega polarnega sija, jih lahko opazimo le v temni noči in izven naselij. Število teh zelo kratkotrajnih razelektritev v ionosferi je le odstotek od števila razelektritev v troposferi. Dogodki TLE so dobro dokumentirani šele v zadnjih dveh desetletjih kot posledica razvoja dovolj hitrih video kamer za nočno snemanje. S pomočjo opazovalnih satelitov, ki krožijo okoli Zemlje, pa je bilo ugotovljeno, da je teh dogodkov na vsej Zemlji v enem letu preko dveh milijonov (Williams, 2001; Savtchenko & Mitzeva, 2007, Chen et al., 2008).



Slika 2 - Razelektritev v ionosferi nad jugozahodnim delom Slovenije, posneta na observatoriju GEOS v Weiningenu v Švici 9.11.2013 ob 17:44:23 UTC uri (Spinner, 2014)

Prve razelektritve v ionosferi so opazili kot kratkotrajne rdeče-oranžne bliske (Red Sprites). Prva poročila o njihovem obstoju objavljena v znanstveni literaturi segajo v leto 1886 (MacKenzie & Toynbee, 1886; Iwanski et al., 2009), teoretično pa so bili predvideni pred devetdesetimi leti (Wilson, 1924; Pasko et al., 2002). Prvič so jih povsem slučajno posneli raziskovalci iz Univerze v Minnesoti leta 1989. Od takrat se je nabralo že zelo veliko njihovih fotografij in filmov, posnetih s površine Zemlje (Slika 2), iz letal in iz vesoljskih plovil (Yair et al., 2005).

Raziskovanje razelektritve v ionosferi se je iz začetnega dokumentiranja teh dogodkov razširilo na meritve njihovih optičnih spektrov (Heavner et al., 2013), radijskih valov ter zelo dolgih in ekstremno dolgih elektromagnetnih valov. Gostoto elektronov v teh razelektritvah merijo z radarji, ki delujejo v področju decimetrskih radijskih valov (Tsumoda et al., 1998). Proučujejo spremljajoče akustične pojave, elektrokemične reakcije (Parra-Rojas et al., 2013; Pasko, 2007) in povezave teh razelektritve s strelami v troposferi (Heavner, 2000). Raziskavam razelektritve v ionosferi so namenjeni nekateri vesoljski programi (Chern, 2003). V fazi priprave pa je vesoljski program, ki je načrtovan za ugotavljanje vpliva dogodkov TLE na magnetosfero (Hebert et al., 2012; Pinçon, 2014). Že dalj časa pa so v teku projekti za širjenje znanja o teh pojavih (Lyons & Schmidt, 2004).

Ovalne razelektritve različne svetlosti in običajno v rdeči barvi svetlobe (Red Sprites) se iz vrha močnih nevihtnih oblakov razprostirajo v ionosfero v višino do 90 km nad zemeljsko površino. Njihov najsvetlejši del je na višini od 65 do 75 km, pod tem delom pa so modri pasovi, ki se v obliki lovka spuščajo na višino 40 km. Zaradi različnih oblik se ta vrsta razelektritve v ionosferi deli v različne razrede. Najpogosteje se te razelektritve pojavljajo v skupinah na širšem območju ali pa se združujejo v snope. Trajajo od 3 do 10 mili sekund. So sicer najprej odkrite razelektritve v ionosferi, vendar ne tudi najbolj pogoste.

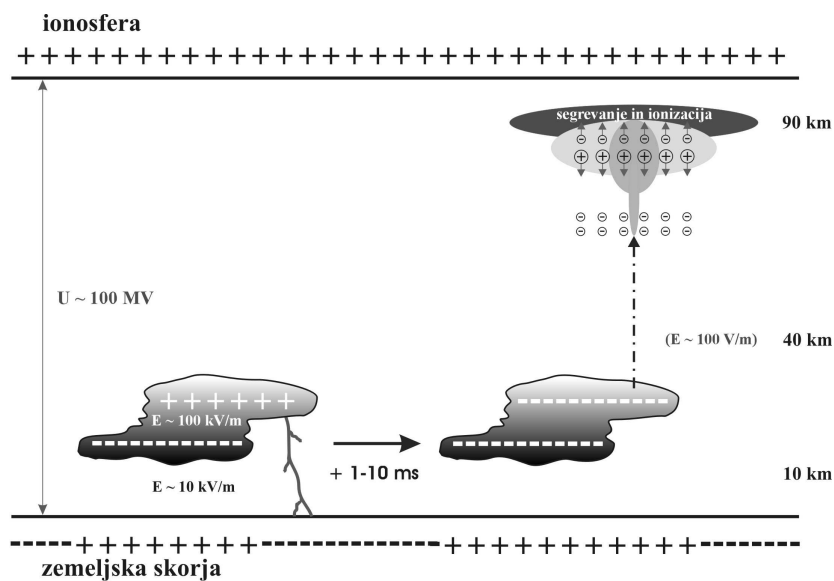
Najpogostejše so ozke obročaste razelektritve, ki so izjemno svetli in kratkotrajni bliski visoko v ionosferi širine do 400 km, imenovane ELVES (Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources). Poleg samega bleska, ki traja manj kot eno mili sekundo, so te vrste razelektritve v ionosferi tudi močan izvor

elektromagnetnih valov zelo nizkih frekvenc. Te vrste dogodek TLE je bil prvič posnet iz vesolja nad Francosko Gvajano leta 1990.

Ozke konične razelektritve se iz električno aktivnega jedra neviht širijo v ionosfero v obliki ozkih modrih stožcev (Blue Jets) širine okoli 15 kotnih stopinj (Pasko, 2003). Te razelektritve napredujejo s hitrostjo okoli 100 km/s do višine od 40 do 50 km nad zemeljsko površino. So svetlejši od ovalnih razelektritev in niso neposredno povezani z razelektritvami v troposferi. Ta vrsta dogodkov TLE je najmanj pogosta in je bila prvič fotografirana iz vesolja nad Avstralijo leta 2007.

Osnovna razlaga razelektritev v ionosferi

Razelektritve v ionosferi se dogajajo več kot petkrat višje od višine nevihtnih oblakov. Skupine močnih nevihtnih oblakov MCS (mesoscale convective system) so sicer večje kot oblaki lokalnih neviht, vendar manjše kot ekstremni tropski cikloni. Te skupine nevihtnih oblakov so lahko podolgovate in ravne oblike ali pa v bolj ali manj zakrivljenem loku. Oblikujejo se v bližini vremenskih front in trajajo tudi po več ur. V Evropi se najpogosteje pojavljajo v drugi polovici avgusta in v septembru v območju zahodnega dela Sredozemskega morja in v povprečju obsegajo okoli 9000 km² (Morel & Senesi, 2002). Na kontinentalnem delu Evrope so prisotne v njenih gorskih predelih. Njihova najbolj običajna smer potovanja je proti vzhodu ali severovzhodu in to v popoldanskem času.



Slika 3 - Ilustracija razelektritve naboja v mezosferi zaradi strele med vrhom nevihtnega oblaka in zemeljsko površino

Osnovno razlago nastanka razelektritev v ionosferi podaja teorija, ki jo je razvil v dvajsetih letih preteklega stoletja škotski fizik in meteorolog Charles T. R. Wilson (Pasko et al., 1996; Hu et al., 2007; Pasko, 2007). Ta teorija izhaja iz raziskav pri razvoju plinskih elektronskih cevi. Ugotovili so, da je prebojna trdnost plinov ali jakost električnega polja, pri katerem sicer neprevodni plin zaradi ionizacije postane prevoden, proporcionalna njihovi gostoti.

Za nastanek razelektritve v ionosferi pa je poleg upadanja prebojne trdnosti zraka z naraščajočo višino pomembno še inducirano elektrostatično polje nad nevihtnim oblakom, ki od njegovega vrha proti ionosferi pojenja z naraščajočo višino h kot $1/h^3$. Obenem pa eksponentno pojenja prebojna trdnost zraka, ker tako upada njegova gostota. To zmanjševanje prebojne trdnosti zraka je hitrejše kot pa pojemanje elektrostatičnega polja nevihtnega oblaka. Zato elektrostatično polje visoko v atmosferi preseže prebojno trdnost v že zelo redkem zraku, s čemer se vzpostavijo pogoji za električni preboj.

Poleg navidezno elektrostatične povezave med vrhom oblaka in ionosfero je za nastanek razelektritve v ionosferi pomembno še pospeševanje prostih elektronov (Pasko et al., 2012; Qin et al., 2013). Ti prosti elektroni nastajajo ob ionizaciji zaradi kozmičnega sevanja energije od 0,1 do 1 MeV. Pospešuje jih močno inducirano elektrostatično polje, ki ga povzroči strela s pozitivnimi nosilci električnega naboja ob vrhu oblaka na višini z in zemeljsko površino (Slika 3). Po poenostavljenem modelu se to strelo obravnava kot vertikalni dipol z momentom $Q \cdot z$. Pri veliki večini strel ta dipolni moment ne presega 100 Ckm, pri preboju strel s pozitivnimi nosilci električnega naboja nevihtnih oblakov in zemeljsko površino, pa ta moment naboja presega vrednost 1000 Ckm, kar zadošča za razelektritev v ionosferi (Paras & Rai, 2012). Teoretične razlage nastanka razelektritev v ionosferi so bile potrjene tudi z eksperimenti v laboratorijih (Williams, 2001).

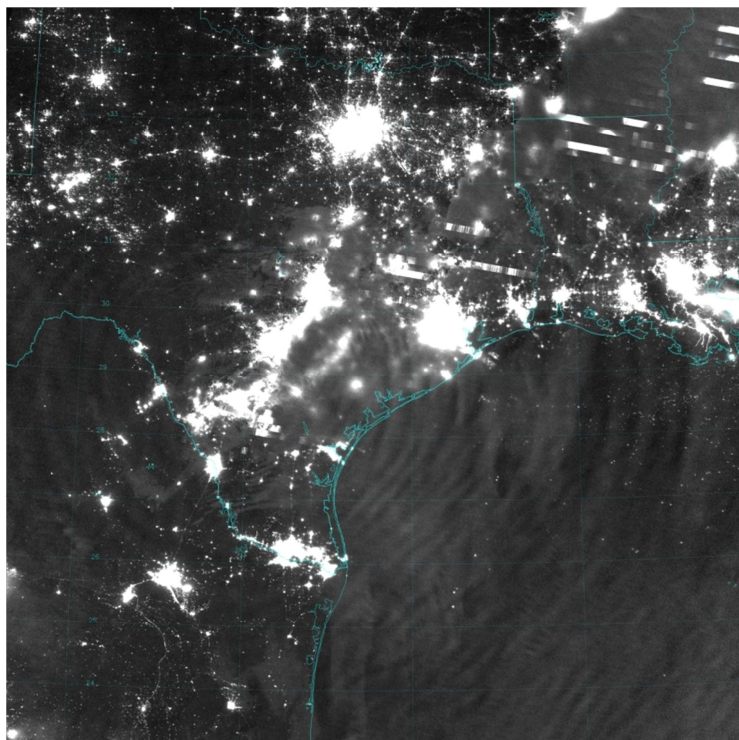
Elektromagnetni valovi ekstremno nizkih frekvenc

Raziskave v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja so pokazale, da ob udaru strel, ki povzročajo razelektritve v ionosferi, nastajajo predvsem ekstremno dolgi elektromagnetni valovi ELF (Extremely low frequency) v frekvenčnem področju od 3 Hz do 300 Hz (Barr et al., 2000; Inan et al., 2010). Zaradi resonančne pojave, Schumannovih resonančnih frekvenc, se valovi ELF ojačajo v naravnem valovodu med zemeljsko površino in ionosfero (Ohkubo et al., 2005). Zato ti valovi obstajajo dlje kot razelektritve v ionosferi in tudi ne pojenjajo dosti z oddaljevanjem od svojega izvora. Prav na osnovi proučevanja ionosferskih razelektritev s pomočjo sprejemnikov ELF je bilo ugotovljeno, da se intenzivnost teh razelektritev spreminja s sončnimi cikli (Sato, 2003; Reddy, 2014).

Dodatne raziskave so tudi pokazale (Siingh et al., 2009), da so izvor valov ELF električni toki, ki tečejo vzdolž razelektritev v ionosferi, in ne strele med nevihtnim oblakom in zemeljskim površjem. Vrh jakosti spektra imajo ti valovi frekvence okoli 40 Hz.

Sij v ionosferi in težnostni valovi zaradi udarov strel

Udari strel v troposferi, najnižji plasti atmosfere, ki sega do 8 pa do kakšnih 16 km visoko, povzročajo v višje ležečih plasteh atmosfere spremembe temperature in tlaka. To povzroča tudi dvig težišča ozračja, od katerega se zaradi segrevanja zraka širijo težnostni valovi v atmosferi (Atmospheric Gravity Waves), ki so podobne narave kot valovi na površini morij (Williams, 2009). Nastajajo v stabilnih plasteh tekočin ali plinov zaradi vzgona in teže. V ozračju so lahko vidni tudi zaradi sija svetlobe v visokih plasteh atmosfere (Slika 4). Ta svetloba je v zelo šibki zeleni barvi, v najpogostejši barvi svetlobe polarnih sijev. Iz vesolja so ti valovi vidni kot koncentrični krožni valovi (Seaman, 2014). Težnostni valovi so pomembni zaradi razumevanja gibanja zraka v ozračju, prenosa energije med različnimi plastmi ozračja ter ustvarjanja pogojev za različne kemične reakcije in prenos njihovih produktov.



Slika 4 - Težnostni valovi, ki so nastali zaradi močne nevihte in so vidni zaradi tleče svetlobe v tanki zgornji plasti mezosfere. Valove je posnel ameriški satelit Suomi-NPP nad zvezno državo Teksas (ZDA) 4. aprila 2014 ob 08:13 UTC (Seaman, 2014)

Sij v zgornjih plasteh atmosfere je zelo šibka emisija svetlobe, ki je prisotna preko celega dne. Zaznamo pa jo le ponoči in to v posebnih okoliščinah. Nastaja zaradi različnih procesov in v temni noči povzroča nepopolno temo. Luminiscenco povzročajo kozmični žarki, ki v termosferi zadevajo v zelo redke atome zraka in jih pri tem vzbujajo. Izvor sija v ionosferi je tudi kemoluminiscenca, ki nastaja najpogosteje ob vezavi kisika in dušika z ioni hidroksila OH. Najpogostejši izvor tleče svetlobe v zgornjih plasteh atmosfere pa je rekombinacija ionov nazaj v nenabite delce. Molekule ionizirajo ultravijolični žarki Sonca, ko pa se rekombinirajo, se sprošča energija (Observations, 1960; Miller et al., 2012). V gostejših plasteh se zaradi te energije poveča notranja energija zraka, v redkejših pa se sproščajo tudi fotoni vidne svetlobe. Še posebno izrazit je tak izvor v tanki plasti med mezosfero in termosfero okoli 90 km nad površino Zemlje, ki sveti v spektru rumene svetlobe natrija.

Zaključek

Razelektritve v ionosferi so posledica srednje velikih in velikih neviht v troposferi. So del sistema zemeljskih električnih tokov, ki so bili do sedaj nepoznani.

Poleg močnih emisij elektromagnetnih valov ekstremnih dolžin v frekvenčnem področju od 3 Hz do 300 Hz pa strele v troposferi povzročajo tudi razelektritve v ionosferi, sevanje žarkov gama (Reddy, 2014; Ringuette et al., 2014) in ustvarjajo antimaterijo v obliki pozitronov, ki odletavajo v vesolje (NASA's, 2014). To pomeni, da strele vplivajo na srednje in zgornje plasti atmosfere in tudi na biosfero bolj kot se je o tem vedelo pred začetkom raziskav razelektritev v ionosfero pred dvema desetletjema. Pri meritvah

sprememb zemeljskega magnetnega polja pa je to znanje potrebno pri razlagi merilnih rezultatov (Čop et al., 2013), kar omogoča boljšo izbiro merilnega mesta kot ga narekujejo priporočila mednarodnih organizacij IAGA in INTERMAGNET (Paliska et al, 2010).

Literatura

- Anderson, D. Fuller-Rowell, T. (1999). The Ionosphere. SE-14. Space Environmental Center, Boulder.
- Bamford, R. The Oblique Ionospheric Sounder. (2000). Project Final Report. Rutherford Appleton Laboratory; Radio Communication Research Unit, Chilton.
- Barr, R. Llanwyn, D. J. Rodger, J. C. (2000). ELF and VLF radio waves. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1689-1718.
- Chen, B. A. et al. (2008). Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. *Journal of Geophysical Research*, 113, A08306.
- Chern, L. J. (2003). Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 647– 659.
- Čop, R. Molov, G. Deželjin, D. (2013). Vpliv neviht na geomagnetne meritve na Gori nad Ajdovščino. 18. Strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 105-110.
- Handbook of Geophysics and the Space Environment. (1985). Scientific editor Adolph S. Jursa. United States Air Force; Air Force Geophysics Laboratory, Springfield.
- Heavner, J. M. (2000). Optical Spectroscopic Observations of Sprites, Blue Jets, and Elves: Inferred Microphysical Processes and their Macrophysical Implications. Doctoral thesis. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks.
- Heavner, J. M. et al. (2013). Sprites, Blue Jets, and Elves: Optical Evidence of Energy Transport Across the Stratopause. *American Geophysical Union: Geophysical Monograph*, 123, 69-81.
- Hebert, P. et al. (2012). Taranis MCP: a joint instrument for accurate monitoring of Transient Luminous Event in the upper atmosphere. ICSO 2a – Imagers & Radiometers. International Conference on Space Optics, Ajaccio (Corse).
- Hu, W. Cummer, A. S. Lyons, A. W. (2007). Testing sprite initiation theory using lightning measurements and modeled electromagnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 112, D13115.
- Inan, S. U. Cummer, A. S. Marshall A. R. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *Journal of Geophysical Research*, 115, A00E36.
- IUPAC Compendium of Chemical Terminology (The Gold Book). (1997). Second Edition. Edited by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Science, Oxford.
- Iwanski, R. et al. Meteorological Study of the First Observation of Red Sprites from Poland. *Acta Geophysica*, 2009, 57 (3), 760-777.
- Lyons, A. W. Schmidt, D. M. (2004). The discovery of red sprites as an opportunity for informal science education. American Meteorological Society, 13th Symposium on Education, Boston (US).
- MacKenzie, Toynbee, H. (1886). Meteorological phenomena, *Nature*, 33, 26.
- Miller, D. S. et al. (2012). Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (39), 15706-15711.
- Morel, C. Senesi, S. (2002). A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II: Characteristics of European mesoscale convective systems. *Quartaly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 1973–1995.
- NASA's Fermi Catches Thunderstorms Hurling Antimatter into Space (2014). http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html (Pridobljeno 25.09.2014)
- Observations of the Night Airglow; 1 July 1957 – 31 December 1959. (1960). *Annals of the International Geophysical Year 1957-1958, Volume XXIV*. Editor I. G. Yao. Pergman, Oxford.

- Ohkubo, A. et al. (2005). VLF/ELF spheric evidence for in-cloud discharge activity producing sprites. *Geophysical Research Letters*, 32, L04812.
- Paliska, D. Čop, R. Fabjan, D. (2010). The Use of GIS-based Spatial Multi-criteria Evaluation in the Selection Process for the New Slovenian Geomagnetic Observatory Site. *Annales Ser. hist. nat.* 20 (1), 1-8.
- Paras, K. M. Rai, J. (2012). Electrical parameters of red sprites. *Atmosfera*, 25 (4), 371-380.
- Parra-Rojas, C. F. Luque, A. Gordillo-Vázquez, F. J. (2013). Chemical and electrical impact of lightning on the Earth mesosphere: The case of sprite halos. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 1–25.
- Pasko, P. V. Inan, S. U. Bell, F. T. (1996). Sprites as luminous columns of ionization produced by quasi-electrostatic thundercloud fields. *Geophysical Research Letters*, 23 (6), 649-652.
- Pasko, P. V. et al. (2002). Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, 416, 152-154.
- Pasko, P. V. (2003). Electric jets. *Nature*, 423, 927-929.
- Pasko, P. V. (2007). Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges. *Plasma Sources Science Technology*, 16, S13–S29.
- Pasko, P. V. Yair, Y. Kuo, C.-L. (2012). Lightning Related Transient Luminous Events at High Altitude in the Earth's Atmosphere: Phenomenology, Mechanisms and Effects. *Space Science Reviews*, 168, 475–516.
- Pinçon, J.-L. (2014). TARANIS – a Satellite for the Study of TLEs and TGFs. XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman (US).
- Qin, J. Celestin, S. Pasko, P. V. (2013). Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 1–16.
- Reddy, F. (2014). Fermi Improves its Vision for Thunderstorm Gamma-Ray Flashes. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt (US). http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/vision-improve.html (Pridobljeno 25.09.2014)
- Ringuette, R. et al. (2014). Gamma-rays Associated with Nearby Thunderstorms at Ground Level. XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman (US).
- Sato, M. (2003). Global Lightning and Sprite Activities and Their Solar Activity Dependences. Dissertation. Tohoku University; Department of Geophysics; Graduate School of Science, Sendai (Japan).
- Savtchenko, A. Mitzeva, R. (2007). Sprites and parent thunderstorms. Black Sea School on Plasma Physics. I. Zhelyazkov, ed. *BSSPP Proceedings*, 1, 115-128.
- Seaman, C. (2014). Severe Weather in the Mesosphere. Suomi NPP; VIIRS Imagery and Visualization Team Blog. <http://rammb.cira.colostate.edu/projects/npp/blog/index.php/uncategorized/severe-weather-in-the-mesosphere/> (Pridobljeno 7. 10.2014)
- Siingh, D. et al. (2009). Thunderstorms, lightning, sprites and magnetospheric whistler-mode radio waves. Banaras Hindu University, Department of Physics, Atmospheric Research Laboratory, Varanasi (India).
- Spinner, R. (2014). AW: Request. From: roger.spinner@geos-weiningen.ch, To: rudi@artal.si. Wed, Sep 3, 2014 at 8:23 AM.
- Tsunoda, R. T. et al. (1998). Evidence of a high-altitude discharge process responsible for radar echoes at 24.4 MHz, *J. Atmos. Solar Terr. Physics*, 60 (7), 957–964.
- Williams, R. E. (2001). Sprites, Elves, and Glow discharge Tubes. *Physics Today*, November, 1-7.
- Williams, J. *The AMS Weather Book; The Ultimate Guide to America's Weather.* (2009). University of Chicago, Chicago.
- Wilson, C. T. R. (1924). The electric field of a thundercloud and some of its effects. *Proc. Phys. Soc. London*, 32D-37D.
- Yair, Y. et al. (2005). Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission. *Geophysical Research Letters*, 32 (L02801).