

A Föld–ionoszféra üregrezonátor

SÁTORI G.[@], BÓR J., BARTA V., NAGY T., KOVÁCS K.

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai u. 6–8.

[@]E-mail: gsatori@ggki.hu

Az elektromosan jól vezető Föld felszíne és a szintén jól vezető, de disszipatív ionoszféra által közrefogott, szigetelőnek tekintett gömbréteg üregrezonátorként viselkedik a Föld kerületével összehasonlítható hullámhosszakon. Ezek a hullámhosszak az ún. ELF (Extremely Low Frequency) frekvenciatartomány (3 Hz – 3 kHz) legalsó sávjába (<100 Hz) esnek. Ezek a hullámok többször is képesek körbeszaladni a Föld körül mielőtt lecsillapodnak, s ezalatt a hullámok fázis-összeadódása és -kioltása következtében rezonanciavonalak jelennek meg a spektrumban ~8, ~14, ~20, ~26 Hz-nél stb. 8 Hz esetében kb. 0,5 s a lecsillapodáshoz szükséges idő. A másodpercenként mintegy 40–50 villámkisülés keltette elektromos impulzus biztosítja a Föld–ionoszféra üregrezonátor állandó gerjesztését. A leírója után Schumann-rezonancia (SR) néven ismertté vált jelenségkör (Schumann 1952) természetes és olcsó eszközként szolgál globális változások vizsgálatára. Integráló képessége robosztus becslést ad a Föld troposzférájában lejátszódó globális időjárási folyamatokról, a világ zivatartevékenységének idő- és térbeli változásán keresztül, valamint a Föld–ionoszféra üregrezonátor felső határoló régióját (ionoszférikus D tartomány) érő extraterresztrikus hatásokról, és indikátora lehet a globális zivatartevékenység üridőjárassal összefüggésbe hozható modulációjának. A whistlerek is villámok keltette elektromágneses hullámok a VLF (Very Low Frequency) frekvenciatartományban (~3–30 kHz), amelyek a Föld–ionoszféra hullámvezetőből kilépve, a földmágneses tér által meghatározott „vezető csatornába” történt befogásuk után speciális, ún. whistler-módusú terjedéssel eljutnak az egyik féltekéről a másikra, ahol a befogás konjugált talppontjában detektálhatók (lásd Lichtenberger és mtársai cikkét ebben a füzetben). Ez a cikk elsősorban a Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Observatórium SR-mérésein alapuló eredményeket foglalja össze.

Sátori, G., Bór, J., Barta, V., Nagy, T., Kovács, K.: The Earth–ionosphere cavity resonator

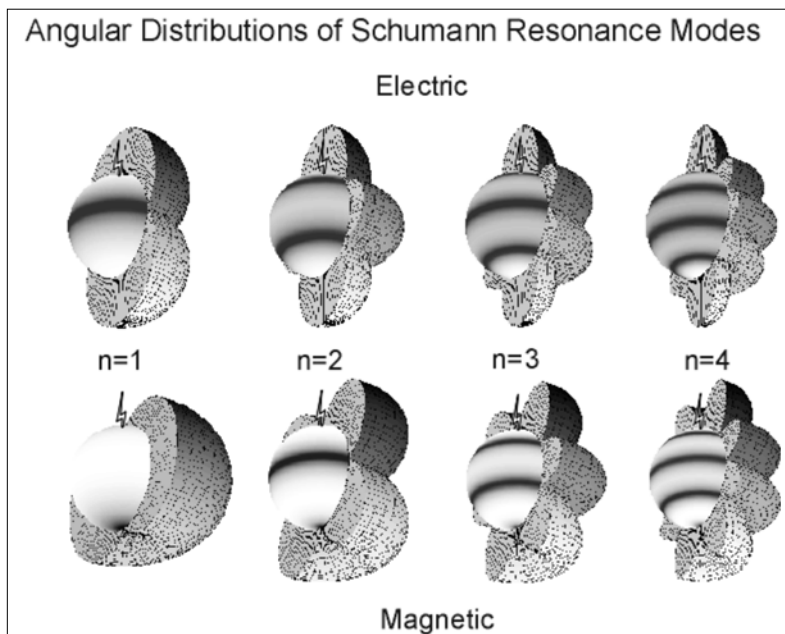
The electrically non-conductive air layer bordered by the highly conductive surface of the Earth and the highly conductive but dissipative ionosphere forms a spherical cavity resonator for the wavelengths comparable with the circumference of the Earth. These wavelengths are in the lowest frequency range (<100 Hz) of the ELF (Extremely Low Frequency) band (3 Hz – 3 kHz). These waves can circumnavigate around the Earth before the attenuation. The phase addition and cancellation can produce resonant line spectrum at ~8, ~14, ~20, ~26 Hz, etc. in the multiple propagation path. The time need for the attenuation is about 0.5 sec in case of 8 Hz. The lightning impulses occurring in 40–50/sec assures the continuous excitation of the Earth–ionosphere cavity. The resonance phenomenon is known as Schumann resonance (SR, cf. Schumann 1952) and can be considered as a natural and cheap investigation tool for studying global changes. Its integrative ability can give robust estimation on the global changes of climate in the troposphere by the space and time variation of global lightning activity and on the extraterrestrial influences in the ionospheric border-wall of the cavity as well as on the modulation of global lightning attributed to the space weather – Earth weather relationships. The whistlers are special electromagnetic waves also produced by lightning strokes in the VLF (Very Low Frequency) frequency band (3–30 kHz) which can escape from the ionosphere. They are trapped in conductive magnetic tubes and propagate from one hemisphere to the other one in the magnetosphere and can be detected at the conjugate point of the trap location (see Lichtenberger et al. in this issue). First of all this paper summarizes the results based on the SR observation in the Széchenyi István Geophysical Observatory at Nagycenk.

Beérkezett: 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

Bevezetés

A Föld–ionoszféra üregrezonátor elektromágneses saját-frekvenciáit leírója után nevezzük Schumann-rezonanciáknak (SR, vö. Schumann 1952). A Föld–ionoszféra hullám-vezető legegyszerűbb modellje két koncentrikus, elektro-

mosan vezető felülettel határolt vékony gömbréteg vákuummal a belsejében. Az ELF (Extremely Low Frequency) sávban (3 Hz–3 kHz), annak is az alsó részében (<100 Hz), a Schumann-rezonancia frekvenciatartományában, a hullámvezető magassága jóval kisebb a hullámhossznál, ezért csak a TM_0 (nulladrendű transzverzális mágneses) módus



1. ábra | Az első négy TM_0 normál módus elektromos és mágneses térkomponensének amplitúdóeloszlása, a pólusnál elhelyezett vertikális elektromos dipól forrással (Sentman 1995)

Figure 1 | Angular distributions of amplitudes of the electric and magnetic field components for the first four TM_0 normal modes with vertical electric dipole source at the pole (Sentman 1995)

terjedhet. A felszínen (az észlelőhelyen) az elektromos teret a radiális, a mágneses teret az azimutális komponensével szokás jellemezni (1. ábra), ugyanis a még zérustól különböző E_θ elektromos térkomponens elhanyagolható, négy nagyságrenddel kisebb E_r értékénél (Polk 1982).

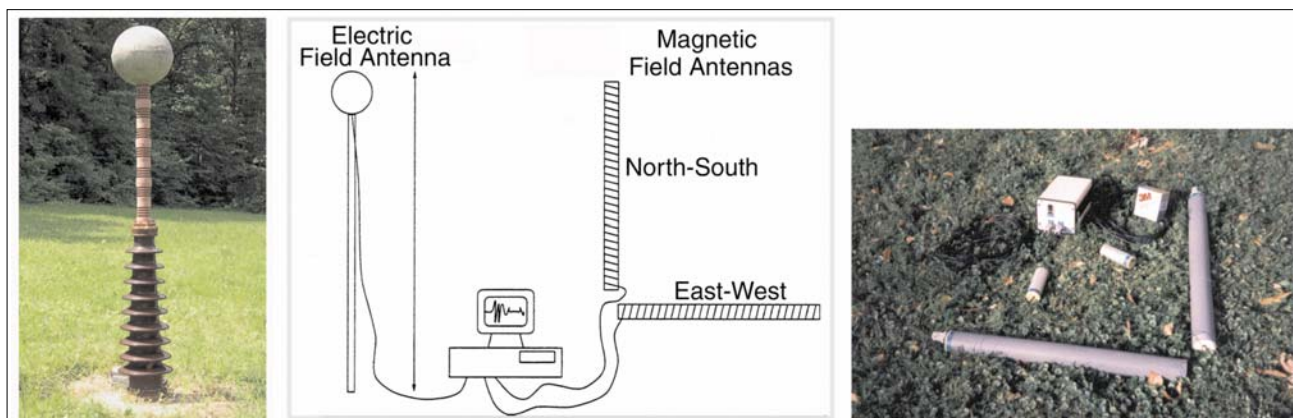
Az SR-jelenség első mért spektrális reprezentációját a rezonanciavonalak bemutatásával Balsler and Wagner (1960) munkája szolgáltatta.

Williams tanulmánya (1992) új lendületet adott az SR-jelenség kutatásához. Az SR-amplitúdót mint „trópusi hőmérőt” mutatta be abból a megfontolásból, hogy az SR-jelenség forrása, azaz a villámok keletkezése erősen hőmérsékletfüggő, különösen a trópusokon. Itt néhány tized °C hőmérséklet-emelkedés nagyságrendi növekedést okozhat a villámszámban.

SR mérőrendszer a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban

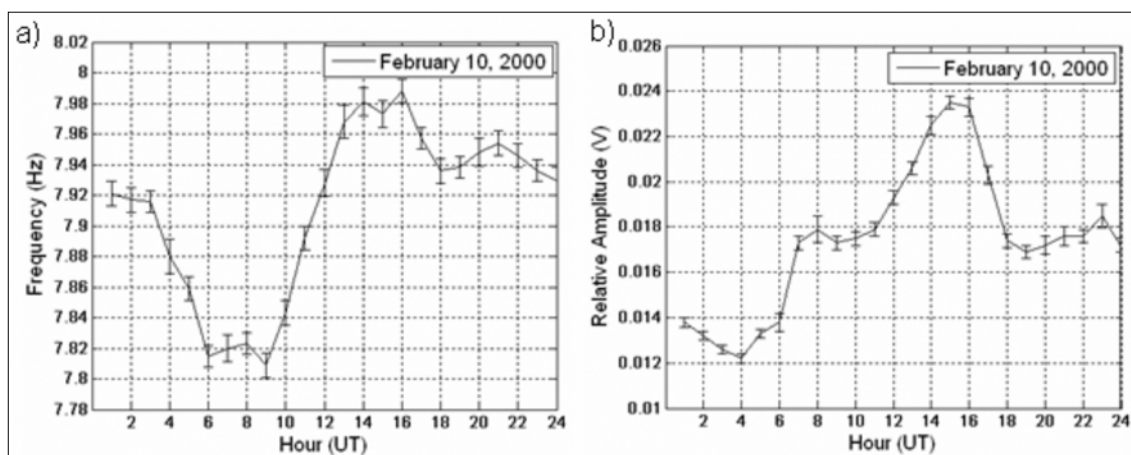
A számítástechnika hatalmas fejlődése is hozzájárult a korszerű digitális technikán alapuló folyamatos SR-mérések beindításához, többek között a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban, Nagycenk közelében, ahol a vertikális elektromos térkomponens mérése 1993-ban, majd a horizontális mágneses térkomponens regisztrálása 1997-ben elindult (Sátori et al. 1996) (2. ábra).

A vertikális elektromos térkomponens (E_r) mérése egy kapacitív gömbantenna szolgál, a horizontális mágneses térkomponens (H_θ) mérése két, földrajzi észak–déli és kelet–nyugati irányba tájolt, nagy menetszámú (500 000) indukciós szondával történik. A rendszer frekvenciaátviteli



2. ábra | A Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban SR mérőrendszere

Figure 2 | SR recording system in the Széchenyi István Geophysical Observatory at Nagycenk



3. ábra a) A frekvencia és b) a relatív amplitúdó napi változása 2000. február 10-én a vertikális elektromos térkomponens első módusára

Figure 3 a) Diurnal variation of the frequency and b) the relative amplitude for the 1st mode of the vertical electric field component in February 10, 2000

karakterisztikáját, amely gyakorlatilag 5 Hz és 30 Hz között van, az eredeti elképzeléseknek megfelelően az első három SR-módus (~8, ~14, ~20 Hz) vizsgálatára terveztük. A felerősített analóg jelek egy AD konverter bemenetére kerülnek, s az idősorok egy kvázi valós idejű spektrális analízist követően a spektrális paraméterek kerülnek tárolásra.

A komplex demoduláció nagyon alkalmas idősorok kiválasztott frekvenciáihoz, esetünkben az első három SR-módus pillanatnyi frekvenciájához tartozó amplitúdók és fázisok időbeli változásának vizsgálatára közel valós időben (Verő 1972, Sátori et al. 1996). A komplex hullámvektor paramétereinek (fázis, amplitúdó) meghatározása a kiválasztott frekvenciasávok centrális periódusának megfelelő időintervallumokban történik. A fázisváltozásnak az idő függvényében történő számítása megfelel a frekvencia időbeli változásának (elméletileg egy oktávon belül).

A 3. ábra az alkalmazott spektrális eljárás eredményét, a rezonanciafrekvencia és az amplitúdó napi változását mutatja a szórásértékekkel együtt egy kiválasztott napon, 2000. február 10-én.

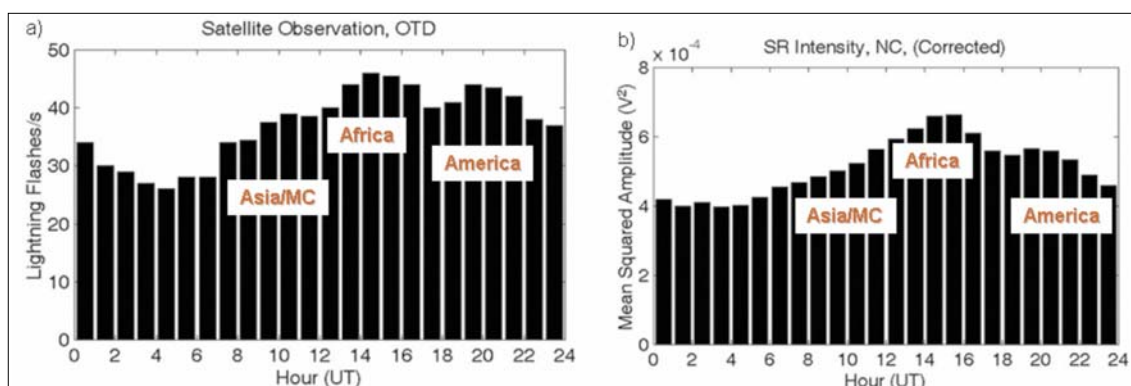
A 4.a ábra az OTD (Optical Transient Detector) műhold által megfigyelt villámszám napi eloszlását és a b) az

SR-intenzitás Nagycenken megfigyelt napi változását mutatja ugyanazon évek (1996–1999) átlagát tekintve. A napi eloszlás alakja nagyfokú hasonlóságot mutat a kétféle megfigyelés esetén, jelezve, hogy az SR-intenzitás elsősorban a globális zivatar-tevékenység leképezése. Jól kirajzolódik a három nagy trópusi zivatar-régió (Dél-Amerika, Afrika, Délkelet-Ázsia/Indonézia) maximális aktivitásának megfelelő csúcs világdőben (UT), ami helyi időben a kora délutáni óráknak felel meg az említett zivatar-régiókban.

Az átlagos napi frekvenciaalakzatok különbözők mindegyik módusra, és nyilvánvaló évszakos változást is mutatnak évről évre történő ismétlődéssel, ahogyan azt a 5. ábra mutatja (Sátori 1996).

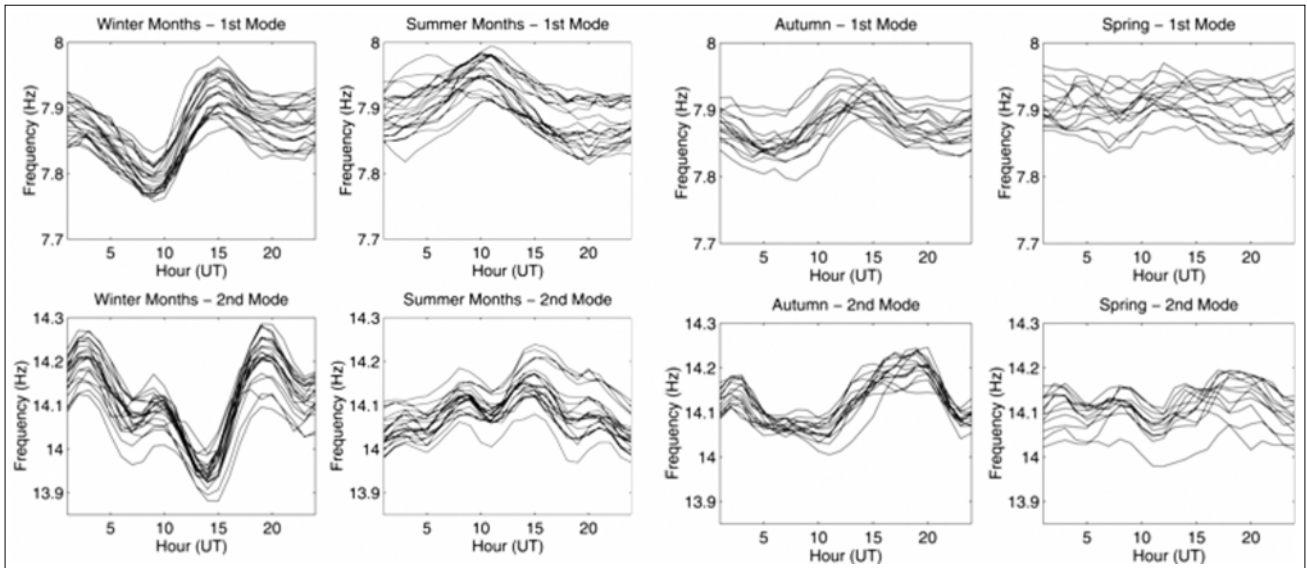
A féléves trópusi hőmérséklet-változás

Napjégyenlőségi hónapokban a trópusi régióban az egysejnyi felületre juttatott többlet napsugárzási energia egy ~1,5 °C-os, féléves hőmérsékleti hullámban jelentkezik áprilisi és októberi maximummal. E hőmérséklet-változás-



4. ábra A globális zivatar-tevékenység átlagos napi eloszlása világdőben: a) az OTD műhold optikai észlelése és b) a Nagycenken (NC) megfigyelt SR intenzitás alapján

Figure 4 Mean diurnal distribution of global lightning in universal time (UT): a) optical observation by OTD satellite and b) SR intensity recorded at Nagycenk (NC)

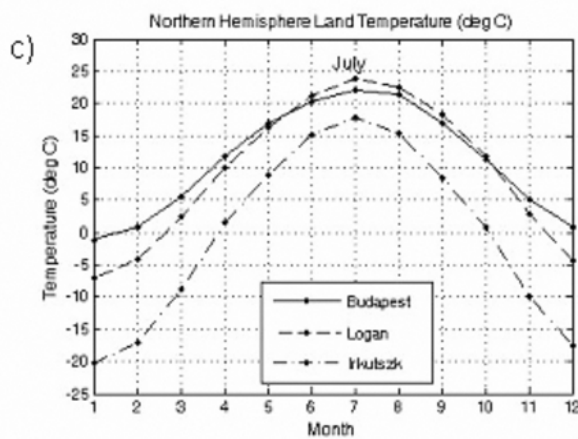
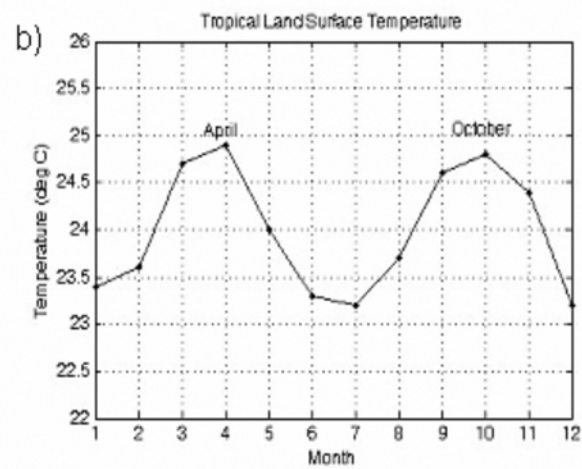
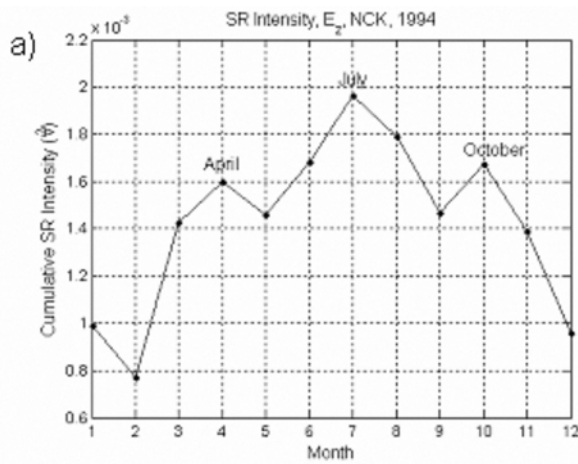


5. ábra | Az átlagos napi frekvenciaalakzatok évről évre történő ismétlődése azonos évszakban, azonos rezonanciamódusok esetén (felső sor: 1. módus; alsó sor: 2. módus; tél, nyár, ősz, tavasz)

Figure 3 | Mean diurnal frequency patterns repeated in the same seasons for the same resonance modes (upper row of plots: 1st mode; lower row of plots: 2nd mode; winter, summer, autumn, spring)

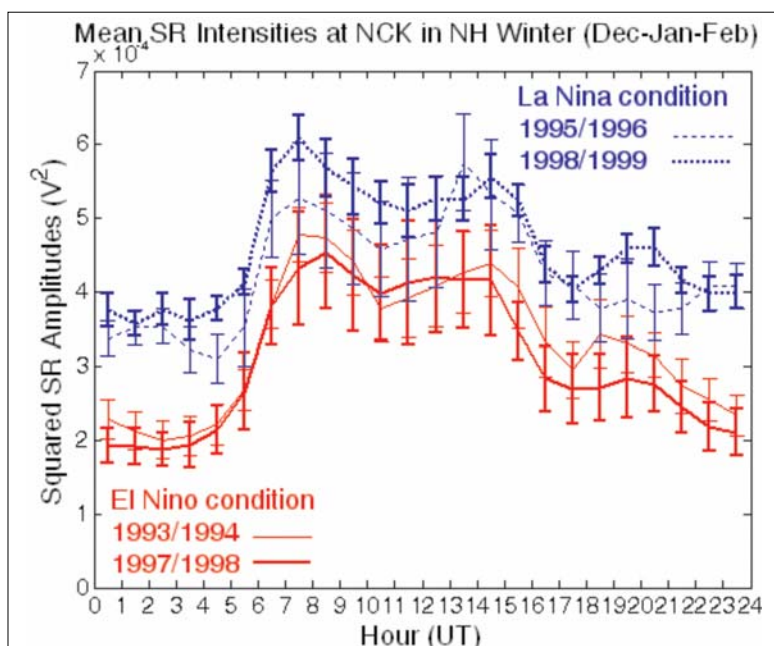
nak a szerepe a megnövekedett villámaktivitáson keresztül a Schumann-rezonanciák intenzitásváltozásában is tükröződik (Sátori and Zieger 1996) (6. ábra).

Az SR intenzitásmaximumok hónapjai összeesnek a trópusokon mért áprilisi és októberi hőmérsékleti maximumokkal, valamint az északi féltekén mért (három közepes széles-



6. ábra | a) Nagycenken mért kumulatív SR-intenzitás 1994 hónapjaiban, b) trópusi szárazföldi felszíni hőmérséklet az év hónapjaiban, c) az északi félteke közepes földrajzi szélességén elhelyezkedő három állomásán (Budapest, Logan, Irkutsk) mért átlagos felszíni hőmérséklet az év hónapjaiban

Figure 6 | a) Cumulative SR intensity at Nagycenken in the months, 1994, b) mean annual tropical land surface temperature variation, c) mean annual temperature variation in three stations (Budapest, Logan, Irkutsk) in the middle latitudes of the Northern hemisphere



7. ábra A vertikális elektromos térkomponens átlagos napi SR intenzitásváltozásai Nagycenknél, két hideg (La Niña) és két meleg (El Niño) ENSO epizód során, az északi félteke téli hónapjaiban (december, január, február)

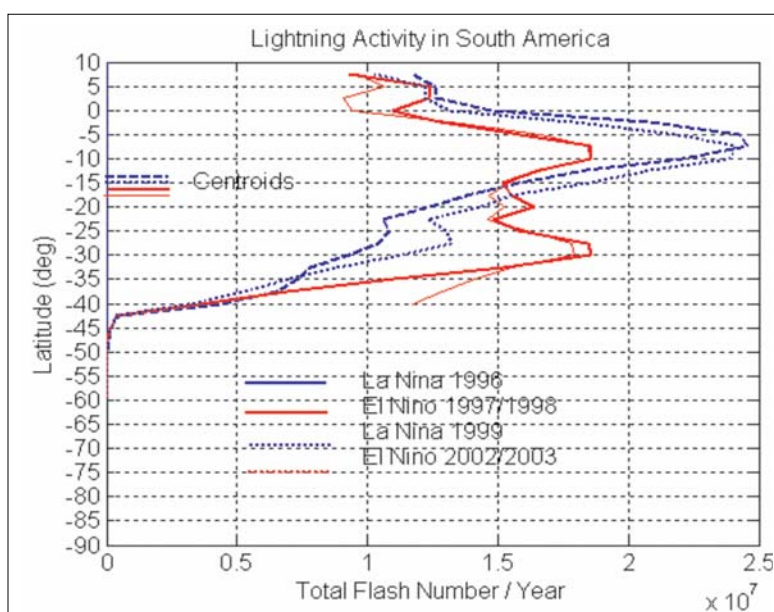
Figure 7 Mean diurnal SR intensity variations at Nagycenk in two cold (La Niña) és two warm (El Niño) ENSO episodes in Northern hemisphere winter months (December, January, February)

ségi állomáson: Észak-Amerika: Logan, Európa: Budapest, Ázsia: Irkutszk) júliusi hőmérsékleti maximummal.

Villámaktivitás az ENSO időkálán

Az ENSO (El Niño/La Niña Southern Oscillation) jelenség egy ciklikus éghajlati változás, amely meglehetősen sza-

bálytalanul ismétlődő időtartammal (kb. 2–5 évente) következik be a Csendes-óceán trópusi térségében. Egyik fő ismérve, hogy a meleg, El Niño fázisban a tengerfelszín hőmérséklete 2–4 °C-kal megnő, míg a hideg, La Niña időszakban néhány °C-kal lecsökken az átlaghoz képest a Csendes-óceán keleti medencéjének egyenlítői régiójában. Markáns változás következik be a légkörben is. Meleg időszakban a magas légköri nyomás jellemző a Csendes-óceán



8. ábra Zonális villámeloszlás Dél-Amerikában két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakban OTD/LIS mérések alapján valamint az eloszlások súlypontjának a földrajzi szélessége (Sátori et al. 2009b)

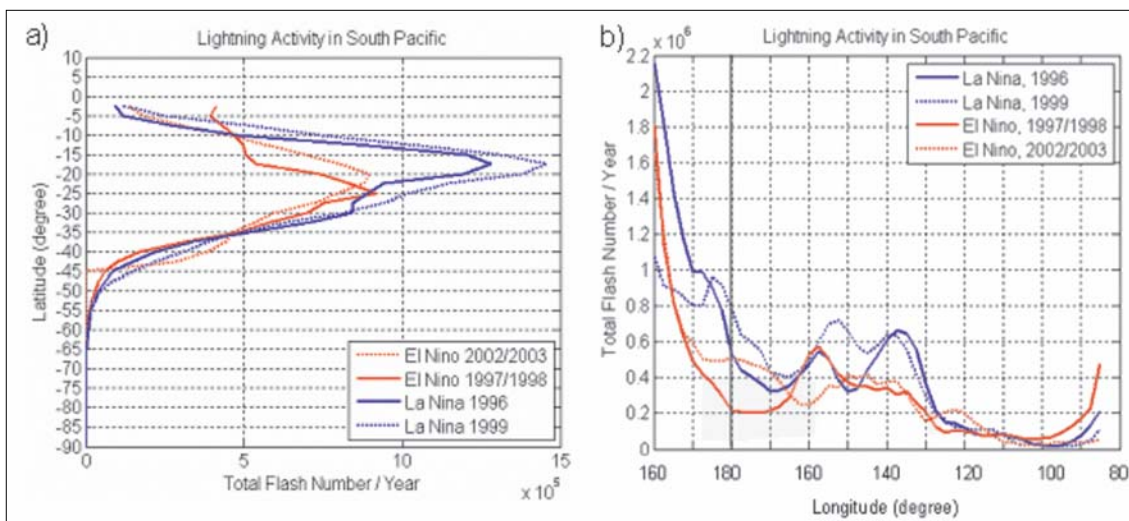
Figure 8 Zonal distribution of lightning activity in South America in two warm, El Niño and two cold, La Niña periods based on OTD/LIS observations and the geographical latitudes of the centroids of lightning distributions (Sátori et al. 2009b)

nyugati medencéjében, míg a hideg periódusban alacsony a légköri nyomás ebben a régióban. A Csendes-óceán térségében születő ENSO jelenség kihatással van a teljes földi éghajlat alakulására.

A 7. ábrán két hideg és két meleg ENSO periódus során, a téli hónapokban (december–január–február) mért átlagos napi SR intenzitásváltozás látható a vertikális elektromos térkomponensre vonatkozóan. Nem várt módon mindkét meleg, El Niño periódusban alacsonyabb SR intenzitásértékek adódtak, mint a két hideg, La Niña időszakban. Az

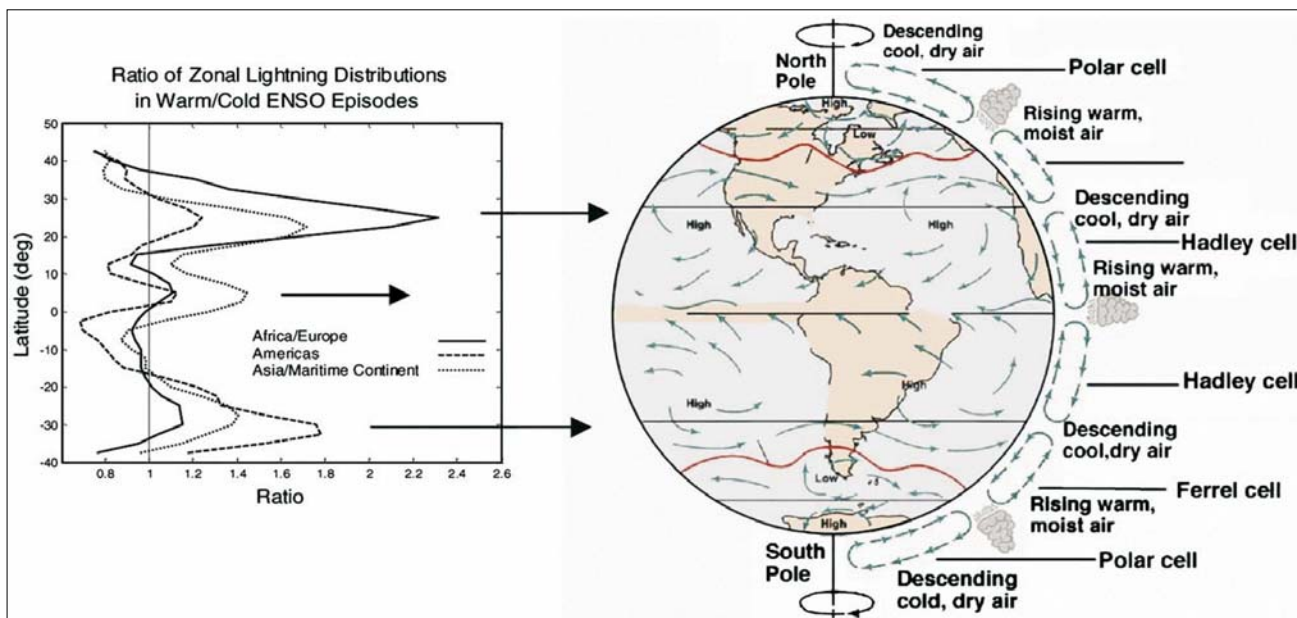
intenzitáscsökkenést egyaránt lehet a villámaktivitás tényleges csökkenésével vagy a forrás–észlelő távolságának a megnövekedésével vagy mindkettő bekövetkezésével magyarázni.

Az ENSO jelenség két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakában mért SR intenzitásváltozás értelmezéséből kiindulva, a globális villámaktivitás OTD/LIS műholdas mérésének széles körű analizálásával független bizonyítékát adtuk a globális villámaktivitás meridionális átrendeződésére az ENSO időskálán. Alátámasztottuk azt az SR-mérések



9. ábra | A villámaktivitás a) zonális és b) meridionális eloszlása a Csendes-óceán déli medencéjében két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakban

Figure 9 | a) Zonal and b) meridional lightning distribution in the south basin of Pacific in two warm, El Niño and two cold, La Niña periods



10. ábra | a) A villámaktivitás El Niño/La Niña időszakra vett arányainak zonális eloszlása a három nagy trópusi régiót (Dél-Amerika, Afrika, Dél-kelet-Ázsia) is tartalmazó földrajzi hosszúsági intervallumban. b) A globális, meridionális légköri cirkulációk (Hadley-, Ferrel-, Poláris-cirkuláció) sematikus ábrázolása a hideg, száraz levegőt szállító süllyedő és meleg, nedves levegőt szállító emelkedő régiók jelölésével

Figure 10 | a) Ratios of zonal lightning distributions in the three longitudinal ranges containing the three tropical chimney regions: South America, Africa and South-East Asia. b) The global meridional atmospheric circulations (Hadley, Ferrel, Polar cells) indicating the greatest relative changes in the regions of descending cool dry air and rising warm moist air

alapján tett megállapítást, hogy Dél-Amerikában (az Amazonas-medencében) és a Csendes-óceán (óceáni) térségben éppen a hideg, La Niña periódusokban gyakoribbak a villámok, ellentétben a szárazföldek zivatartermékenységével, ahol a villámaktivitás (régiónktól függően) növekvő tendenciát mutat a meleg, El Niño időszakokban, ahogyan azt a 8. és 9. ábra mutatja (Sátori et al. 2009b). Az is látható, hogy a zivatartermékenység súlypontja délebbre tolódik a meleg, El Niño időszakokban, mind Dél-Amerikában (8. ábra), mind a Csendes-óceán térségében (9. ábra).

Az OTD/LIS műholdas mérések analizisével az ENSO időskálán globális érvényű összefüggés vált nyilvánvalóvá a villámaktivitás változása és a nagy meridionális (Hadley-cirkuláció) és zonális (Walker-cirkuláció) légkörezések szinoptikus skálán süllyedő régióiban (10. ábra). A Walker-cirkuláció ENSO időskálán történő zonális áthelyeződése arra is ad magyarázatot, hogy miért a hideg, La Niña fázisban van több villám a Csendes-óceán térségében. Ugyancsak összefüggés adódott a globális villámaktivitás változásában hideg/meleg ENSO periódusokban a termális egyenlítőnél (Sátori et al. 2009b).

A Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriája

A Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali/éjszakai aszimmetriája, amely eltérő hullámvezető magasságot és vezetőképeséget jelent, kimutatható mértékű, frekvenciafüggő (módusszám) SR amplitúdó-, intenzitásváltozást okoz, és megkülönböztethető a forrás-észlelő távolság vagy a forrás-intenzitás változásából eredő amplitúdó-, intenzitásváltozásoktól.

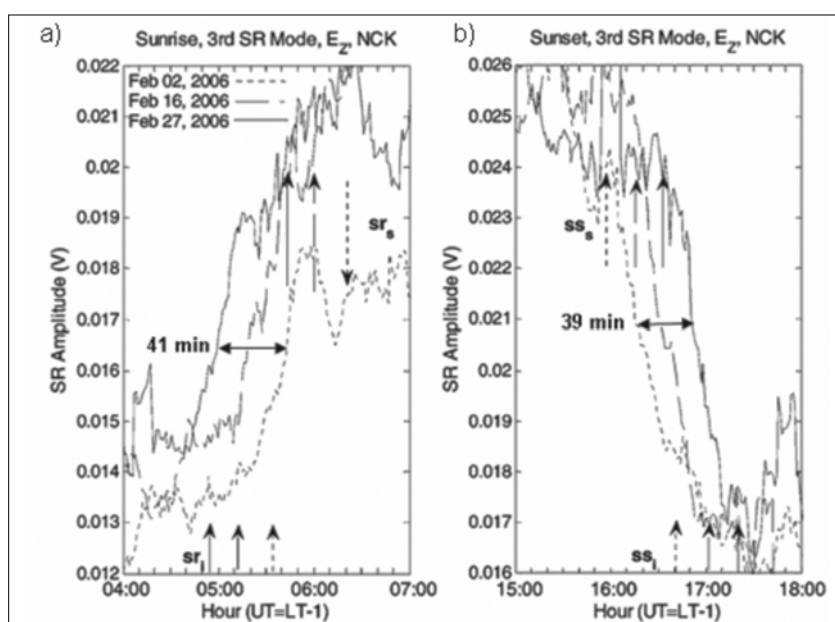
A 11. ábra a vertikális elektromos térkomponens harmadik módusának amplitúdóváltozását mutatja napfelkelte a) és naplemente b) körüli órákban három februári napon,

2006-ban. Az „sr_i” ionoszférikus napfelkelte, az „sr_s” felszíni napfelkelte időpontokat jelölik, az „ss_s” és „ss_i” jelzésű nyilak pedig a felszíni és ionoszférikus naplementeidőket mutatják. Február 2-án és 27-én 41 perc különbséggel kel fel a nap, és 39 perc különbséggel nyugszik le. Ez az időkülönbség jól beazonosítható mind a hirtelen amplitúdónövekedések idején az ionoszférikus napfelkeltét követően, mind a hirtelen amplitúdócsökkenések során az ionoszférikus naplementét megelőzően. Továbbá az is megállapítható, hogy az ionoszférikus napfelkeltekor bekövetkező hirtelen amplitúdónövekedés már befejeződik a felszíni napfelkelte előtt kb. 15–20 perccel, és a felszíni naplementét követően ugyancsak kb. 15–20 perccel később kezdődik a hirtelen amplitúdócsökkenés, amely az ionoszférikus naplementével fejeződik be. Ez azt jelenti, hogy az SR frekvenciatartományban történő hullámterjedés szempontjából meghatározó ionizációs/semlegesítődési folyamatok 25–30 perc alatt, azaz gyorsabban zajlanak le, mint a felszíni és 100 km magasságban bekövetkező napfelkelte/naplemente közötti időkülönbség.

A 12.a ábra mutatja a vertikális elektromos térkomponens amplitúdójának változását napfelkelte körüli órákban az első rezonanciamódusra. Látható, hogy az ionoszférikus napfelkeltekor (normalizálás időpontja) egymással szinkronban következik be a hirtelen, kb. 10–15%-ra becsülhető amplitúdó-növekedés, míg az ionoszférikus napfelkeltét megelőzően és a felszíni napfelkeltét követően véletlenszerű, zajos amplitúdó változások láthatók.

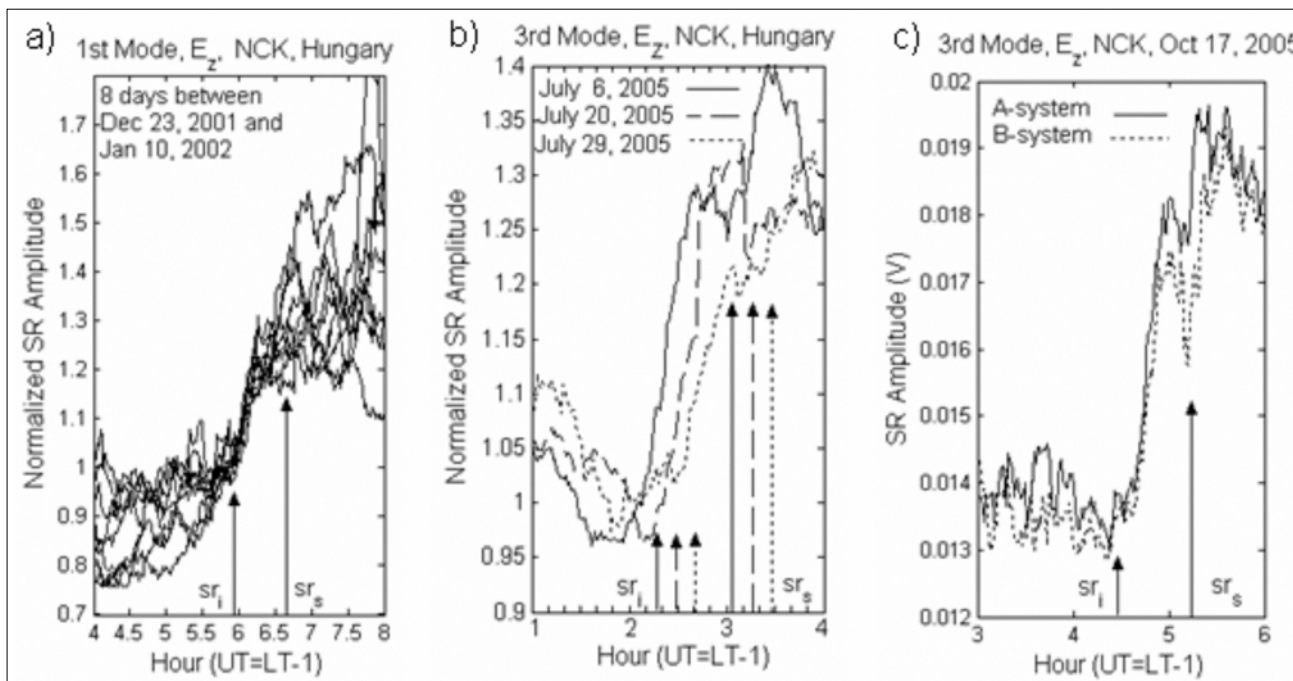
A 12.b ábrán kiválasztott három júliusi napon tapasztalt hirtelen amplitúdónövekedés bemutatása azt érzékelteti, hogy ez az elugrás akkor következik be, amikor a világ zivatartermékenységének minimuma van világidőben (02–03 UT), tehát nem beszélhetünk egyetlen forrásrégió aktivizálódásáról sem ezekben az órákban.

A 12.c ábrán bemutatott eredmény jelentősége abban van, hogy két, párhuzamosan működő SR-adatgyűjtő ered-



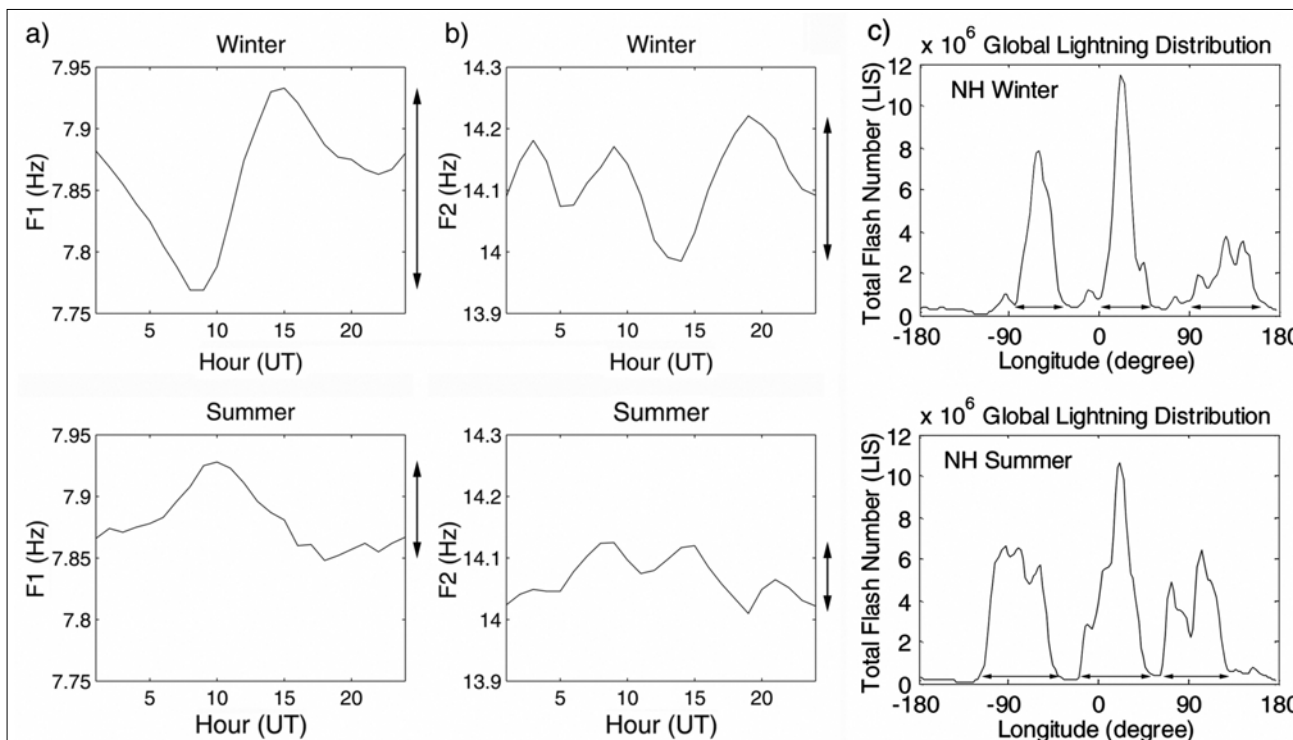
11. ábra A vertikális elektromos térkomponens harmadik módusának amplitúdóváltozása a) napfelkelte és b) naplemente) körüli órákban Nagycenk, 2006. február 2-án, 16-án és 27-én

Figure 11 Amplitude variation of the third mode of the vertical electric field component at around the hours of a) sunrise and b) sunset at Nagycenk in February 2, 16 and 27, 2006



12. ábra A vertikális elektromos tér amplitúdójának változása ionoszférikus (sr_i) és felszíni (sr_s) napfelkeltekor a) azonos napfelkelte időpontokban, b) amikor világidőben minimuma van a globális zivatartevékenységnek, c) két párhuzamosan futó mérőrendszer esetén részben átfedett időablakkal

Figure 12 Amplitude variations of the vertical electric field component at ionospheric (sr_i) and surface (sr_s) sunrise a) in the same sunrise time b) at the hours of minimum world lightning activity c) in case of two recording systems running parallel partly overlapped time windows



13. ábra A napi frekvenciaváltozás és ingadozásuk mértéke (függőleges nyilak) az északi félteke telén és nyarán Nagycenken a vertikális elektromos térkomponens: a) első módusában és b) a második módusában, valamint c) a LIS műhold által megfigyelt totális villámszám a három fő villámrégióban a hosszúság függvényében az északi félteke telének, valamint nyarának megfelelő évszakban. A vízszintes nyilacsókák a zonális kiterjedést jelölik (Sátori et al. 2009a)

Figure 13 Variation of the diurnal frequency range (DFR) for a) the 1st and for b) the 2nd E_z modes at NCK in NH winter and summer months marked by vertical arrows on the right hand side of each plot, and c) lightning distributions in the three main lightning regions with zonal diameters indicated by horizontal arrows in NH winter and summer months observed by LIS satellite (Sátori et al. 2009a)

ményét mutatja be azonos napfelkelte órákban. Az amplitúdóváltozások finom részleteiben van különbség az ionoszférikus napfelkelte előtti és a felszíni napfelkelte körüli/utáni órákban (ezen az időskálán már mondhatjuk, hogy nem a zivatarok, hanem a villámok, azaz a gerjesztés helyének véletlen volta következtében), de az ionoszférikus napfelkelte követő hirtelen amplitúdónövekedés „óramű” pontossággal szinkronban van egymással, jelezve a változás ionoszférikus eredetét.

A globális zivartartevékenység területi változása

A napi frekvenciatartomány szélessége (lásd nyilak) összefüggésben van a zivataros területek nagyságával (13.a, b ábra). Minél szélesebb ez a frekvenciasáv, annál kisebb területre korlátozódnak a zivatarok, és minél keskenyebb ez a sáv, annál nagyobb területet foglalnak el a zivatarok, ahogyan azt a LIS (Lightning Imagine Sensor) műholdról megfigyelt földrajzi hosszúság szerinti globális zivartareloszlás mutatja az északi félteke telének, valamint nyarának megfelelő évszakban a 13.c ábrán (Sátori et al. 2009a).

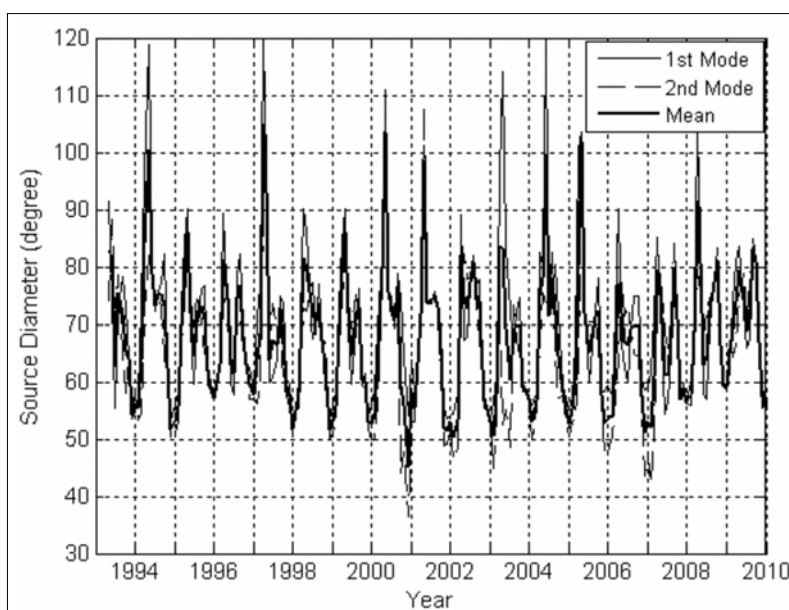
Nickolaenko and Rabinovitz (1995) kidolgozott egy algoritmust, amely a napi frekvenciaingadozás mértékét ($f_{\max} - f_{\min}$) kör alakú területté konvertálja. A nagyecenkai SR frekvenciamérések alapján előállítottuk a „forrás-átmérő” idősort mintegy másfél napeciklusnyi időszakra vonatkozóan is, amely globális zivartartevékenység területi változására ad robusztus becslést ezen az időskálán (14. ábra). A globális zivartartevékenység éves és féléves területi változása napciklussal összefüggő modulációt mutat (Sátori, Zieger 2003, Sátori et al. 2007a). Az éves területi változás a szárazföldek

eltérő arányából adódik az északi és déli féltekén. Az éves területi változás modulációjának a mértéke nő a növekvő naptevékenységgel, míg a trópusi–szubtrópusi eredetű féléves területi változás modulációja a galaktikus kozmikus sugárzás fluxusának ellenkező értelmű változását tükrözi a napciklus során, azaz naptevékenységi minimum éveiben domináns (1996 és 2008/2009). A villámaktivitás a 11 éves napciklusra szélességfüggő területi választ ad: $\sim 40^\circ$ É-i szélességnél magasabb szélességeken a zivataros területek mérete nő a fokozódó naptevékenységgel, míg a $\sim 40^\circ$ É-i és 40° D-i szélesség között a zivataros területek nagysága a galaktikus kozmikus sugárzás változását tükrözi. A kapott eredmény feloldást jelenthet a szakirodalomban található számos ellentmondó eredményre, amelyek némelyike a naptevékenység, mások a galaktikus kozmikus sugárzás változása és a villámaktivitás közötti pozitív korrelációról számoltak be vagy nem tapasztaltak napciklussal összefüggő változást.

Schumann-rezonanciatranziensek és felső légköri elektrooptikai emissziók

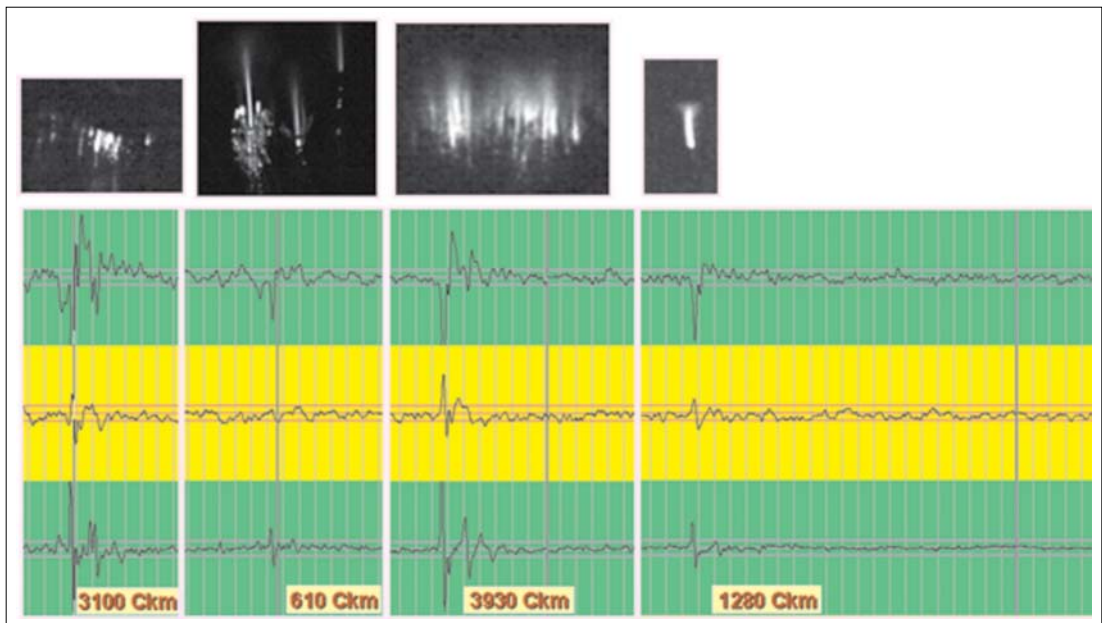
Az SR-tranziensek egyedi, energetikus villámok keltette elektromágneses impulzusok, amelyek koherens jelek formájában szuperponálódnak a vertikális elektromos és a két horizontális mágneses (É–D, K–Ny) térkomponens háttér SR-értékeire, ahogyan azt a 15. ábra mutatja.

Az SR-tranziensekből meghatározható a keltő villám polarizációja, földrajzi helye (beérkezés iránya és távolsága), valamint a töltésmomentum változása (15. ábra, alul). Az energetikus villámokat (néhány msec) számos esetben felső légköri elektrooptikai emissziók (FEOEM) is kísérik



14. ábra DFR ($f_{\max} - f_{\min}$)-ből levezetett zivatarforrás-átmérők változása 1993 és 2010 között az E_z térkomponens első két módusának frekvenciaértékei alapján, Nagyecenkén

Figure 14 Variations of the diameter of the thunder source regions between 1993 and 2010 deduced from DFR ($f_{\max} - f_{\min}$) values based on the frequency observations of the 1st and 2nd modes of the E_z field component



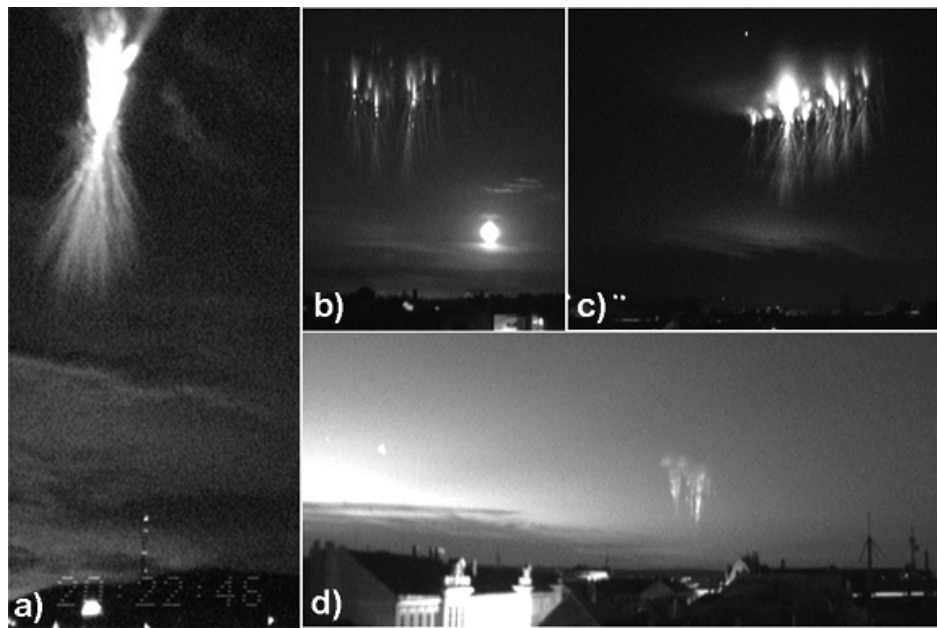
15. ábra Nagycenken regisztrált, energetikus villámok keltette SR-tranziensek a vertikális elektromos (legalul) és két horizontális mágneses térkomponensben a hozzájuk tartozó töltésmomentum-változások értékeivel, s e villámok felett megfigyelt felső légköri elektrooptikai emissziók: „vörös lidércek”

Figure 15 SR transients with charge momentum changes (CMC) excited by individual energetic lightning strokes recorded at Nagycenk in the vertical electric and the two horizontal magnetic field components (below) and „red sprites” in the upper atmosphere related to these lightnings (photos)

(15. ábra, felül). A FEOEM-ek tudományos kutatása csupán a múlt század végén kezdődött el, amikor véletlenszerűen, egy kamera tesztelése során kaptak lencsevégre egy „vörös lidérc”-et (Franz et al. 1990). Ez a látványos felvillanás (~10 msec) óriási térrészt tölt ki, mintegy 40 km-től 90 km magasságig, 10–15 km horizontális kiterjedéssel, külön-

böző alakzatok formájában, s szinte kizárólag pozitív felhő-föld villámkisüléshez kapcsolódnak.

A FEOEM-ek megfigyelése Közép-Európa térsége felett elsőként Sopronban valósult meg az MTA CSFK GGI épületének a tetejéről (Bór 2011). E látványos jelenségből mutat be egy csokrot a 16. ábra.



16. ábra Sopronból, az MTA CSFK, GGI épületének tetejéről megfigyelt felső légköri elektrooptikai emissziók: „vörös lidércek”. A felvételeket Bór József és Barta Veronika készítette

Figure 16 TLE-s (Transient Luminous Events): “red sprites” observed from the top of the building of the Geodetic and Geophysical Institute, Astronomical and Earth Science Research Centre, Hung. Acad. Sci. Picked up by József Bór and Veronika Barta

Köszönetnyilvánítás

A Schumann-rezonancia-mérőrendszer megépítése, fejlesztése, s az SR-adatokra épülő kutatások, valamint a felső légköri elektro-optikai észlelése a hazai (OTKA T4395, T023111, T034309, K72474; MŰI TP201, TP224) és nemzetközi (MAKA, NATO) kutatási alapok anyagi támogatásával valósult meg az elmúlt 20 év során.

A tanulmány szerzői

Sátori Gabriella, Bór József, Barta Veronika, Nagy Tamás, Kovács Károly

Hivatkozások

- Balser M., Wagner C. A., 1960: Observations of the Earth-ionosphere cavity resonances. *Nature (London)* 188, 638–641
- Bór J., 2011: Villámkisülésekhez társuló felsőlégköri elektro-optikai emissziók és Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálata, PhD-értekezés, NyME, Kitaibel Pál Doktori Iskola
- Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccippio D. J., Boeck W. L., Buechler D. E., Driscoll K. T., Goodman S. J., Hall J. M., Koshak W. J., Mach D. M., Stewart M. F., 2003: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research* 108 (D1), 4005, doi: 10.1029/2002JD002347
- Franz R. C., Nemzek R. J., Winckler J. R., 1990: Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System. *Science* 249, 48–51
- Melnikov A., Price C., Sátori G., Füllekrug M., 2004: Influence of solar terminator passages on Schumann resonance parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66, 1187–1194
- Nickolaenko A. P., Rabinowicz L. M., 1995: Study of the annual changes of global lightning distribution and frequency variations of the first Schumann resonance mode. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 1345–1348
- Polk C., 1982: Schumann Resonances. In: Hans Volland, Editor, *Handbook of Atmospherics*, Vol. I, CRC Press, Boca Raton Inc., FL, 111–179

- Sátori G., Szendrői J., Verő J., 1996: Monitoring Schumann resonances – I. Methodology. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 1475–1481
- Sátori G., 1996: Monitoring Schumann resonances – II. Daily and seasonal frequency variations. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 1483–1488
- Sátori G., Zieger B., 1996: Spectral characteristics of Schumann resonances observed in central Europe. *Journal of Geophysical Research* 101, 29663–29669
- Sátori G., Zieger B., 1999: El Niño-related meridional oscillation of global lightning activity. *Geophysical Research Letters* 26, 1365–1368
- Sátori G., Neska M., Williams E., Szendrői J., 2007b: Signatures of the non-uniform Earth-ionosphere cavity in high-time resolution Schumann resonance records. *Radio Science* 42/2, RS2S10, doi: 10.1029/2006RS003483
- Sátori G., Mushtak V., Williams E., 2009a: Schumann Resonance Signature of Global Lightning Activity. In: Betz H. D., Schumann U., Laroche P. (szerk.) *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. Berlin: Springer – Business Media B. V. (ISBN:9781402090783), 347–386
- Sátori G., Williams E., Lemperger I., 2009b: Variability of global lightning activity on the ENSO time scale. *Atmospheric Research* 91, 500–507
- Schumann W. O., 1952: Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung, A*, 7, 6627–6628
- Sentman D. D., 1995: Schumann Resonances. In: *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 1, Volland H. (szerk.), CRC Press, London, p. 276
- Verő J., 1972: On the determination of the magneto-telluric impedance tensor. *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica* 7, 333–351
- Williams E. R., 1992: The Schumann resonance: A global tropical thermometer. *Science* 256, 1184–1187