

Bozóki Tamás

A Schumann-rezonancia *mint kutatott jelenség és mint kutatási eszköz*

Bevezetés

Wienfried Otto Schumann 1952-ben publikálta úttörő munkáját¹, melyben elméleti úton megjósolta a tökéletes vezetőnek tekinthető földfelszín és a jól vezető ionoszféra között kialakuló elektromágneses rezonanciát. A jelenséget, melyet a felfedező tiszteletére Schumann-rezonancia (SR) néven ismer a tudományos világ, 1960-ban kísérleti úton is kimutatták.² A Schumann-rezonancia az elmúlt bő 60 évben a Föld körüli térség megismerésének fontos kutatási területévé vált. Vizsgálatában Magyarország is aktív szerepet vállal a Magyar Tudományos Akadémia soproni Geodéziai és Geofizikai Intézetében folyó tudományos munka révén. Dr. Sători Gabriella kezdeményezésére a nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban 1994-től folyamatos az SR adatok regisztrálása (1. ábra).³

Kezdetben a kutatások a Schumann-rezonanciára, mint megértendő jelenségre irányultak, mára azonban egyre gyakrabban mint kutatási eszköz jelenik meg további jelenségek vizsgálatához. Legjelentősebb alkalmazási területei olyan globális jelenségek, mint a klíma- és az űridőjárás-kutatás, melyek a Schumann-rezonancia révén akár egyetlen magyarországi mérőállomás



1. ábra A nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban (SZIGO) Schumann-rezonancia antennája.

¹ SCHUMANN 1952.

² BALSER 1960.

³ SÁTORI 2009.

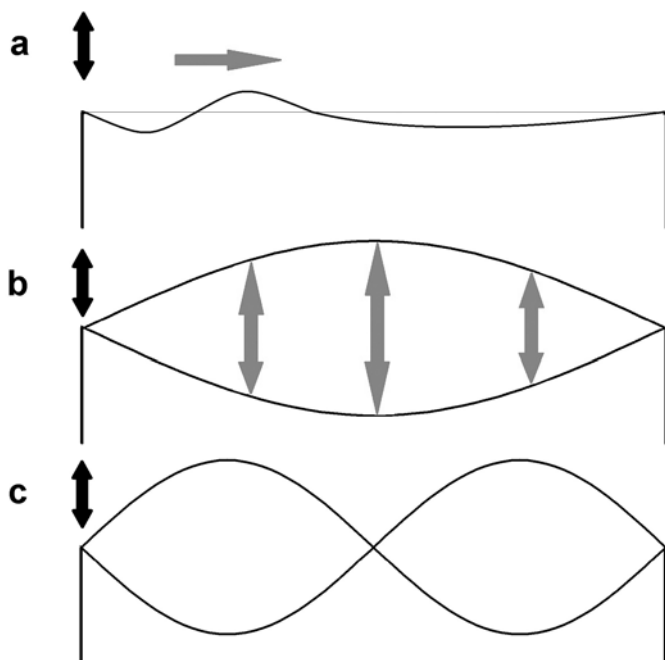
adatai alapján is vizsgálhatóvá válnak. Jelen tanulmány első része igyekszik összefoglalót nyújtani a legérdekesebb kutatási eredményekből, kitérve jelenleg is folyamatban lévő vizsgálatokra és a jövőbeli alkalmazás perspektíváira. A tanulmány második része egy aktuális kutatásba enged betekintést, amely a geomágneses viharok Schumann-rezonanciára gyakorolt hatását hivatott tisztázni.

A Schumann-rezonancia jelensége és alkalmazásai

A mindennapokban számtalan periodikus vagy közel periodikus (kvázi-periodikus) változás figyelhető meg, mint például a nappalok-éjszakák váltakozása, a tengerek hullámzása, a növények virágzása, az árapály, a madarak vándorlása stb. Amennyiben egy időben periodikus változás térben is terjed, a jelenséget hullámnak nevezik, amely egy tömegtranszport nélküli energiaterjedési forma. Tudományos munkák egyik leggyakrabban előforduló jelensége a hullám, de miért kiemelten jelentőségű a tudományos világ számára? A válasz egészen egyszerű, de annál fontosabb: azért mert információt hordoz a közegről, amelyben terjed. Erre az egyik legkézenfekvőbb példa a Föld belsejének megismerése. Mai tudásunk a Föld belsejéről szinte kizárólag hullámoknak, még hozzá földrengés-hullámoknak köszönhető. A Föld felszínének közelében kipattanó földrengések szeizmikus hullámai a Föld belsején végighaladva akár a Föld átellenes pontján is mérhetőek, hordozván a terjedési közegről hozott információt.⁴

A hullámok egy speciális csoportját alkotják az állóhullámok, melyeket más néven rezonanciának is neveznek. A jelenség klasszikus fizikai modellje egy kifeszített kötélen, melynek egyik vége szabályozható periódusidővel mozoghat (2.a ábra). A kötélen átellenes, rögzített pontjáról a periodikus mozgás által gerjesztett hullámok visszaverődnek. Kitértetett gerjesztési periódusidőknél, az úgynevezett rezonancia frekvenciáknál, az ellentétes irányba haladó hullámok felerősítik egymást (konstruktív interferencia lép fel), és kialakul az állóhullám, melynek elnevezése utal az alapesetben terjedő hullámformák „megállására”. Nagy amplitúdóval rezgő duzzadóhelyek és mozgás nélküli csomópontok alakulnak ki (2.b és 2.c ábra). Ebben az elrendezésben a kötélen hossza a hullámhossz (a térbeli periodicitás legkisebb távolsága) egész számú többszöröse. Az első- vagy alaplómódusban a hullámhossz megegyezik a kötélen hosszával (2.b ábra), a második módusban a fele (2.c ábra), a harmadikban a harmada stb. Hasonló jelenség játszódik le különböző sípokban, ahol a levegő sűrűsödési és ritkulási helyei alkotnak ehhez hasonló térbeli szerkezetet.

⁴ GALSA 2014.

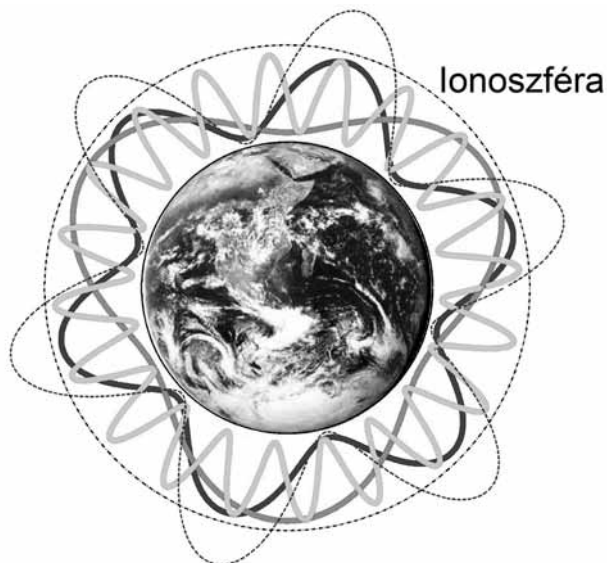


2. ábra Két végén rögzített kötélen terjedő hullám (a), kialakuló állóhullám alapló módus (b) és második módus (c). Az állóhullámban nagy amplitúdóval rezgő duzzadóhelyek és lényegében mozdulatlan csomópontok figyelhetők meg.

A kialakuló állóhullám strukturát alapjaiban befolyásolja a végpontok kialakítása, vagyis a peremfeltétel, melynek két alapvető típusa különíthető el: a rögzített és a szabad végpont. Rögzített végpont törvényszerűen állóhullám csomópontot jelent, míg szabad vég esetén duzzadóhely alakul ki a kötéel végén.

A Schumann-rezonancia igencsak speciális állóhullám mintázatot alakít ki, amely három fő okra vezethető vissza: (1) az egyszerre jelen lévő elektromos és mágneses tér, (2) a periodikus határfeltétel és (3) a földfelszín-ionoszféra magasság kicsinyisége a Föld sugarához képest. Elektromágneses (EM) hullámokban, mint például a látható fény, a mágneses és az elektromos tér egyszerre, de egymásra merőleges síkokban hullámszik, miközben mindkét síkra merőleges irányban terjed. Az EM hullámokat leíró Maxwell-egyenletekből következik, hogy elektromágneses állóhullámokban az elektromos tér csomópontjában

a mágneses térnek duzzadóhelye, míg duzzadóhelyén a mágneses térnek csomópontja alakul ki. Schumann-rezonancia esetén igen speciális állóhullám peremfeltétel valósul meg, mivel a Föld körül körbehaladó elektromágneses hullám újra önmagával találkozik és ezáltal saját magával kerül interferenciába. Így azok a módusok erősödnek fel, melyek hullámhossza osztója a Föld kerületének. A földfelszín és az ionoszféra közötti semleges, szigetelő légkörrel kitöltött térrészt üregrezonátornak nevezik. Az SR harmadik speciális tulajdonságának levezethető következménye, hogy csakis az úgynevezett TM_0 módus alakulhat ki, melyben a mágneses tér függőleges komponense zérus. Így egy Schumann-rezonancia mérőállomás egy horizontális, elektromos teret és két vertikális, mágneses teret mérő egységből áll. Mivel az állóhullám hullámhossza a Föld kerületének nagyságrendjébe esik, frekvenciája az úgynevezett ELF (Extreme Low Frequency) tartományban (3 Hz – 3000 Hz) található. Az elméleti úton is meghatározható rezonancia frekvenciák körülbelül 8, 14, 20, 26 Hz-nél stb. figyelhetőek meg (3. ábra).



3. ábra Vázlatos ábra a földfelszín-ionoszféra üregrezonátorban kialakuló állóhullámokról.

Ebben a frekvenciatartományban a hullámok igen kis csillapítással képesek terjedni az üregrezonátorban.

Földünk légkörének egyik lehetséges osztályozása elektromos vezetés szempontjából történik. Megkülönböztethető az elektrosztatikai és az elektrodinamikai tartomány, azaz a semleges és a vezető légkör. Körülbelül 60-70 km-es magasságban a vezetőképesség ugrásszerűen megnövekszik, amely az elektrodinamikai tartomány és egyben az ionoszféra alját jelenti. Ezalatt a magasság alatt a légkör elektromosan szigetelőnek tekinthető. Fontos hangsúlyozni, hogy mindez azonban nem jelenti az elektromos jelenségek teljes hiányát ebben a tartományban. Mivel a hagyományos értelemben vett időjárási jelenségek ebben a tartományban játszódnak le, a semleges légkör elektromos jelenségei a geofizikusok mellett a meteorológusok fontos kutatási területe. Az elektrodinamikai tartományban lejátszódó folyamatokat, ettől elkülönítendő, úridőjárási eseményeknek nevezik.

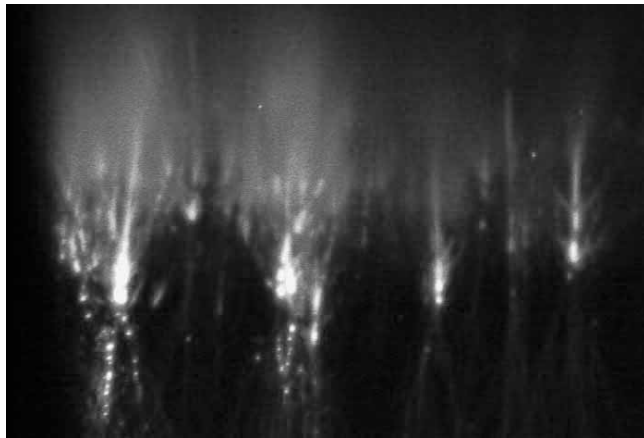


4. ábra A Föld egyik legextrémebb jelensége: a villámlás.

A leglátványosabb légköri elektromos jelenség természetesen a villámlás (4. ábra), amely a Föld egyik legextrémebb jelensége. Belső hőmérséklete összemérhető a Nap fotoszférájának hőmérsékletével, a 30.000 Kelvint is eléri. 10-30 ezer Amper árama 10^9 - 10^{10} Joule energiát szállít. Kevésbé ismert, hogy villámok nem csak a földfelszín és a felhők között jöhetnek létre, hanem két felhő vagy egy felhő és az ionoszféra között is. Az utóbbiak közé tartoznak a több 10 km-es magasságú vörös lidércek (5. ábra). A Földön másodpercenként körülbelül 50-60 villámkisülés történik, melyek elektromágneses hullámokat keltenek. Egy villámimpulzus egyszerre jelent gerjesztést az egész elektromágneses frekvenciatartományban, melyek közül a kis csillapodással terjedő ELF hullámok jutnak el nagy távolságokra is. Ebből a tartományból pedig az önmagával konstruktív interferenciába lépő Schumann-rezonancia hullámok emelkednek végül ki (6. ábra).

A legnagyobb kisülések egyedi jelként is kitérnek az ELF regisztrátumokból, beérkezési irányuk meghatározható. Egy krakkói kutatócsoport 2006-ban sikeresen „követte le” egy a Földközi-tenger mentén haladó zivatargóc helyzetének

változását lengyelországi mérési adatokból.⁵ Bór József soproni kutatónak az ELF-ből meghatározott beérkezési irányok szisztematikus hibájából Sopron környékének földtani szerkezetére sikerült következtetnie.⁶



5. ábra A vörös léderc.

A Schumann-rezonancia egyik, ha nem a legfontosabb tulajdonsága a globalitás. Magyarországi adatsorból lehetővé válik a Kongói-medence és az Amazonas-medence klímájának összehasonlítása⁷, vagy a Csendes óceáni passzátszél sebességének meghatározása.⁸ Az SR kutatások igazi fellendülését egy 1992-es Science cikk hozta meg⁹, amely kapcsolatot mutatott ki a globális átlaghőmérséklet és a Schumann-rezonancia amplitúdója és frekvenciája között. Innentől kezdve az SR nemcsak mint kutatott jelenség, hanem mint kutatási eszköz vált ismertté a tudósok között. Az egyik legkézenfekvőbb felhasználási lehetőség a villámlással és ezáltal a zivatarokkal való kapcsolatának köszönhető. Az SR frekvencia megmutatja az aktív zivatarközpont napi változását a három nagy zivatarrégió, Afrika, Dél-Amerika és a Pacifikum között, vizsgálható a zivatarközpontok helyének szezonális átrendeződése csakúgy, mint a zivatarral borított területek nagyságának változásai.¹⁰ Így válik egy

⁵ NIECKARZ 2009.

⁶ BÓR 2016.

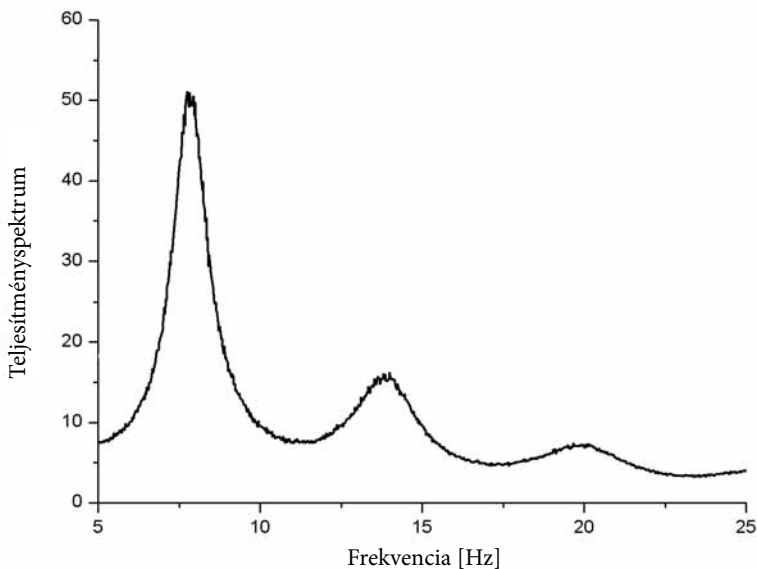
⁷ WILLIAMS 2004.

⁸ SÁTORI 1999.

⁹ WILLIAMS 1992.

¹⁰ SÁTORI 2011.

nehezen megfogható fizikai jelenség a klímakutatás egyik sok és értékes információval szolgáló eszközévé.



6. ábra Teljesítményspektrum az ELF frekvenciatartományból (Hornsund, 2015. Március 5.), melyben megjelenik az első három Schumann-rezonancia-csúcs.

A villámkisüléshez hasonlóan látványos jelenség az aurora vagy sarki fény, amely már egy űridőjárási jelenség látványos lenyomata. Ekkor a napszélben lévő megnövekedett számú töltött részecske a pólusok környezetében bejut a légkörbe, ütközik a semleges légkör molekuláival, melyek az így szerzett gerjesztési állapotból látható fény kisugárzásával kerülnek vissza eredeti állapotukba. Az űridőjárás monitorozása korunk elengedhetetlen feladatává vált az űrkorszak beköszöntével. A Föld körül keringő műholdak száma mára eléri a tízezret, melyek nagymértékben ki vannak szolgáltatva a Föld körüli térségben lejátszódó folyamatoknak, és ezáltal a GPS, a mobil hálózat, a TV adás stb is. Kiemelt kockázatot jelent a napkitörések során az űrbe kerülő óriási mennyiségű töltött plazma, amely elektromos teret, elektromos áramot indukál. A modern kor legnagyobb, halálos áldozatokat is követelő napkitörését 1859-ben élte át az emberiség. Az elektromos eszközök elterjedésének hajnalán összesen körülbelül 10-20 távirókezelő vesztette életét az áramcsapás

következtében. Elképzelni is nehéz, mekkora károkat okozna egy ekkora csapás a mai világban. A Schumann-rezonancia spektrális paramétereiben (frekvencia, amplitúdó, jósági tényező) egyértelműen megjelennek űridőjárási folyamatok „lenyomatai”¹¹, mint a rezonátor felső határoló felületét érő hatások. Így az SR ismét hasznos kutatási eszközzé válik.

Geofizikai kutatások gyakran használnak úgynevezett inverziós eljárásokat. A feladat lényege, hogy egy tetszőleges mért jelből kísérletet tesznek a jel forrásának előállítására. A Schumann-rezonanciával foglalkozó tudósok egyik nagy álma és közeljövőbeli feladata a zivatarok globális eloszlásának invertálása. A ma rendelkezésre álló műholdas adatokkal szemben ez a módszer folyamatos, az egész Földre kiterjedő lefedettséget biztosítana és jóval költség-hatékonyabb is lenne. Kifejlesztése jelenleg is folyamatban van, a munkában a soproni kutatócsoport is aktívan közreműködik.

A Schumann-rezonancia kutatások egy igencsak érdekes szegmense a műholdakra szerelt mérőműszerek adatainak elemzése. A Föld ionoszférájához hasonló elektromosan jól vezető burok minden légkörrel rendelkező égitest (bolygók, holdak) esetén kialakul, így amennyiben van bármilyen elektromágneses hullámforrás az adott objektumon, akkor elviekben kialakulhat Schumann-rezonancia.¹² Ilyen forrás a Marson a porviharokban keletkező elektromosság. A mérések által információhoz juthatunk a bolygó légkörének és ionoszférájának összetételéről, szerkezetéről, vagy akár a bolygó belsejének szerkezetéről is.^{12,13} Érdekes eredményeket publikált 2003-ban Simoes professzor, a NASA kutatója, aki jóval az ionoszféra fölött haladó műholdak mért jelében is felfedezte a Schumann-rezonanciára jellemző spektrális szerkezetet, amely egy „szivárgó” üregre utal.¹⁴ Ennek modellezése is a mai tudomány kihívásai közé tartozik.

Az Schumann-rezonancia rendkívül széles felhasználási lehetősége egyben nehézséget is jelent. A globális zivatar-eloszlás megfigyeléséhez elengedhetetlen az üreget ért külső hatások pontos ismerete és *vica versa*. Magyarán képesnek kell lenni szétválasztani a forrás eredetű változásokat és a külső hatásokat. Ez igencsak bonyolult feladat, amely leginkább egy független mérési módszerrel lehetséges. Azonban minél jobban megértjük az SR jelben megfigyelhető változásokat, annál nagyobb biztonsággal azonosíthatjuk be az újabb és újabb

¹¹ SÁTORI 2016.

¹² SIMOES 2008.

¹³ KULAK 2013.

¹⁴ SIMOES 2011.

jelenségeket. További nehézséget jelent, hogy sokszor egy adott jelenségcsoport, például kozmikus külső hatások összeadódva figyelhetőek meg. Az SR spektrális paramétereknek többek között napi, szezonális, éves és 11 éves napciklus szerinti változása is van. Utóbbi kozmikus eredetű (legalább is első meg gondolásra), míg a többi elsősorban forrás eredetű változás, a zivatartevékenység globális átrendeződéséből adódik. Viszont felvetődhet, vajon nincs-e a zivatartevékenységnek is 11 éves periodicitása. Ennek megállapítása pusztán SR adatokból rendkívül nehézkes.

Ugyancsak komoly problémának mutatkozott a nappali-éjszakai asszimmetria SR-re gyakorolt hatásának kimutatása. Régóta bizonyított tény, hogy az ionoszféra nappali oldala több 10 km-el közelebb helyezkedik a földfelszínhez, mint az éjszakai oldal. Ennek oka, hogy az ionoszférában lévő megnövekedett töltött (ionizált) részecske sűrűséget a napból érkező elektromágneses sugárzás hozza létre, amely azonban 80-90 km alatt a sűrű légkör miatt gyorsan megszűnik. Ezt a folyamatot nevezik rekombinációnak. Míg a nappali oldalon a nap folyamatosan „újratermeli” az ionizált részecskéket, az éjszakai oldalon megtörténik a rekombináció és csak 80-90 km magasan jelennek meg az ionoszféra töltött részecskéi. Magától értetődőnek tűnik, hogy ennek meg kell jelennie az SR spektrális paramétereiben. Kimutatása mégis nagyon nehéznek bizonyult, mivel az így létrejövő változás jóval kisebb, mint két mérőállomáson egyszerre mért jelének egyéb okokból adódó különbsége. Ez azért volt érdekes, mert egyszerre mért nappali és éjszakai jelek paramétereiben szeretnék volna kimutatni a két oldal közti különbséget. A probléma megoldása végül más meg gondolással sikerült. Egyetlen állomás egy éves adatsorát ábrázolva kiviláglott a nappalok hosszának változása.¹⁵

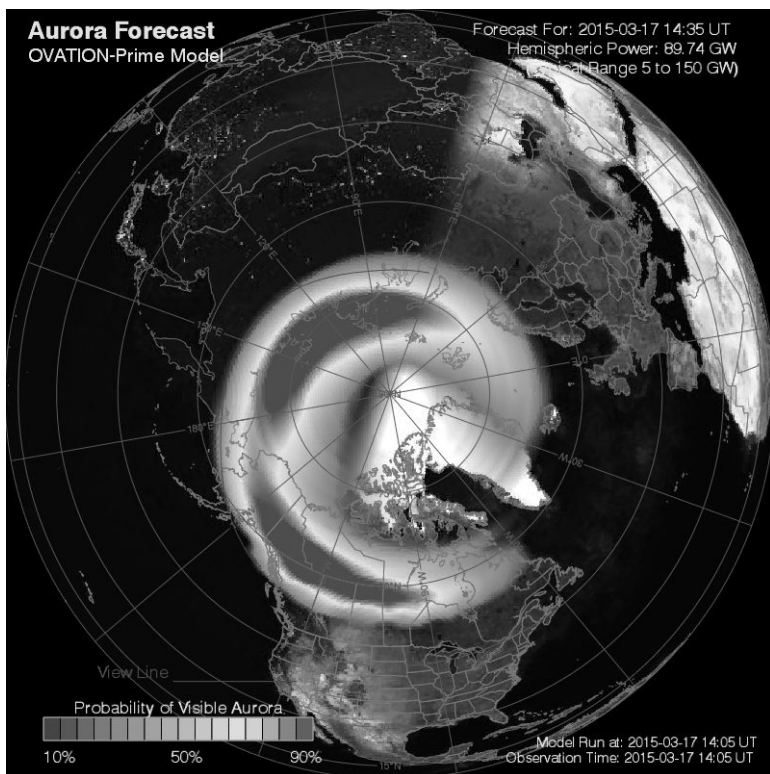
Geomágneses viharok Schumann-rezonanciára gyakorolt hatása

A Schumann-rezonancia, különösen poláris régiókban, erős 11 éves periodicitást mutat. Mivel a napból EM sugárzás és részecskék formájában is érkezik energia, közel sem egyértelmű, hogy milyen csatolási mechanizmus felelős ezért a jelenségért. Ráadásul mind a sugárzásoknak, mind a részecskéknek nagyon különböző hatások lehet energiájuk szerint, mely széles skálán mozog.

A kérdés a megválaszolásához, témavezetőm, Dr. Satori Gabriella javaslatára, egy rövidebb időskálán lejátszódó hasonló folyamat, a geomágneses viharok hatásának vizsgálatába kezdtünk. Geomágneses viharok során a napból érkező megnövekedett számú részecskék a pólusok területén egészen az ionoszféra

¹⁵ MELNIKOV 2004.

aljáig juthatnak, melyet kiszóródásnak is neveznek. Ehhez kapcsolódóan sarki fény is megfigyelhető (7. ábra). A lejutó részecskék ionizálják a felső légkört, ezáltal mélyebbre tolva az ionosféra alsó határát. A kiszóródás elsősorban a vihar utófázisában valósul meg, amely akár több napig is elhúzódhat. A folyamatot számos alacsonyan keringő műhold is vizsgálja, melyek adatai szabadon elérhetőek.



7. ábra A Szent Patrik eseményhez (geomágneses vihar) várt sarki fény a Föld északi féltekén.

Az általunk kiválasztott geomágneses vihar 2015. március 17-én az úgynevezett Szent Patrik esemény, melyet az tesz igazán alkalmassá a vizsgálatok elvégzésére, hogy a műholdas mérések alacsony röntgen és ultraibolya sugárzási szintet, valamint alacsony nagyenergiás proton fluxust detektáltak erre az időszakra. Így amennyiben a Schumann-rezonancia paramétereiben változás

figyelhető meg, az nagy valószínűséggel kiszóródó elektronok következménye. Kutatásunkhoz komoly nemzetközi kollaboráció alakult, melynek köszönhetően hat különböző, egymástól távoli állomásról használhattunk adatokat (1. táblázat). Mindez lehetővé teszi, hogy a geomágneses viharok szélességfüggő hatását vizsgáljuk, amire korábban még nem volt példa. A kutatás során a WWLLN (World Wide Lightning Location Network) globális villámdetektálási adatbázis segítségével a forrás eredetű változások kiszűrésre kerülnek.

Üzemeltető ország	Helyszín	Földrajzi koordináták
Lengyelország	Hornsund (Spitzbergák)	É 77,0 K 15,6
Lengyelország	Belsk	É 51,8 K 20,8
Lengyelország	Hylaty	É 49,2 K 22,5
Magyarország	Nagyecnk	É 47,6 K 16,7
Izrael	Mitzpe Ramon	É 30,6 K 34,
India	Maitri (Antarktisz)	D 70,77 K 11,72

1. táblázat A kutatás során felhasznált adatokat szolgáltató állomások

A kutatás reményeink szerint megmutatja a Schumann-rezonancia használhatóságát poláris kiszóródás vizsgálatára, közelebb visz az SR amplitúdó 11 éves periodicitás okának felderítéséhez, hozzájárul a zivatartevékenység-eloszlás inverzió további fejlesztéséhez, valamint alapjául szolgál egy későbbi globális üregmagasság inverzió előkészítéséhez. Mindez kulcsfontosságú lehet a Schumann-rezonancia további kutatásokhoz való felhasználhatóságához. Végezetül azt emelném ki, hogy mind a klímakutatás, mind az űridőjárás monitorozása az Európai Unió kiemelt tudományos céljai között szerepel. A kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma Új Nemzeti Kiválóság Programja támogatta.

Szakirodalom

- BALSER 1960. BALSER, M., Wagner, C. A.: Observation of the Earth-ionosphere cavity resonances. In: *Nature*, 188. (1960).
- BÓR 2016. BÓR, J., et al: Systematic deviations in source direction estimates of Q-bursts recorded at Nagycenk, Hungary, In: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121. (2016).
- GALSA 2014. Galsa, A., Süle, B.: A lemeztectonika motorja, In: *Természet világa*, 7. (2014).
- KULAK 2013. KULAK, A., et al.: An Analytical Model of ELF Radiowave Propagation in Ground-Ionosphere Waveguide With a Multilayered Ground. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61. (9) (2013).
- MELNIKOV 2004. MELNIKOV, A., et al.: Influence of solar terminator passages on Schumann resonance parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66. (2004).
- NIECKARZ 2009. NIECKARZ, Z., et al.: Day-to-Day Variation of the Angular Distributin of Lightning Activity Calculated from ELF Magnetic Measurements. In: *AIP Conference Proceedings*, 1118. (1) (2009).
- SÁTORI 1999. SÁTORI, G., Zieber, B.: El Nino-related meridional oscillation of global lightning activity. In: *Geophysical Research Letters*, 26. (1999).
- SÁTORI 2011. SÁTORI, G.: Schumann-rezonancia, mint globális változások jelzőrendszere (Doktori értekezés) (2011).
- SÁTORI 2009. SÁTORI, G.: A Schumann-rezonanciák, mint a globális változások jelzőrendszere, In: *Magyar Tudomány*, 9. (12) (2009).
- SÁTORI 2016. SÁTORI, G., et al.: Effect of energetic solar Emissions on the Earth-Ionosphere Cavity of Schumann Resonances. In: *Surv. Geophys*, 37. (4) (2016).
- SCHUMANN 1952. SCHUMANN, W. O.: Über die strahlungslosen Eigenwingungen einer leitenden Kugel, die von Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. In: *Zeitschrift für Naturforschung*, 7. (1952).
- SIMOES 2008. SIMOES, F., et al.: The Schumann resonance: A tool for exploring the atmospheric environment and the subsurface of the planets and their satellites. In: *Icarus*, 194. (30) (2008).
- SIMOES 2011. SIMOES, F., et al.: Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere. *Geophysical Research Letters Space Sciences*, 38. (22) (2011).

- WILLIAMS 1992. WILLIAMS, E. R.: The Schumann resonance: A global tropical thermometer. In: *Science*, 256. (1992).
- WILLIAMS – SÁTORI 2004. WILLIAMS E. R., SÁTORI, G.: Lightning, thermodynamical and hydrological comparison of the two tropical continental chimneys. In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66. (2004).