

Változóban a Föld-képünk

LICHTENBERGER JÁNOS, E. FERENCZ ORSOLYA

ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet, Űrkutató Csoport, spacerg@sas.elte.hu

BODNÁR LÁSZLÓ*, FERENCZ CSABA#, STEINBACH PÉTER‡

*BL-Electronics, Solymár

#MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutatócsoport, ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoport

‡MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutatócsoport

Lektorált

Kulcsszavak: whistler, ionoszféra, hullámterjedés, űridőjárás

Az alacsony, poláris pályán keringő műholdak, mint például a francia DEMETER műhold, egyedülálló lehetőséget kínálnak a Föld ionoszférájának elektromágneses feltérképezésére, az ionoszférán keresztül a műholdig terjedő, úgynevezett töredék-whistlerek detektálásával és elemzésével. Az elemző módszerek a Maxwell-egyenleteknek előmágnesezett plazmában, impulzus gerjesztés esetén kialakuló UWB-megoldásain alapulnak, és az ionoszférikus hullámterjedési kép megújítását teszik lehetővé. A szélessávú földfelszíni és műholdas mérési adatbázis egyidejű elemzése számos, a whistlerek keletkezésére és terjedésére vonatkozó nyitott kérdés megválaszolását segíti elő, meghatározva az alsó ionoszféra szerepét a szubionoszférikus és plazmaszférikus impulzus-terjedés jelenségében.

1. Bevezetés

A Föld felső légköréről alkotott fizikai kép – környezetünk sok más eleméről szerzett ismerethez hasonlóan – az elmúlt száz évben gyökeresen megváltozott. A 19-20. század fordulójáig ballonos expedíciók méréseire alapozva a tudományos közfelfogás a meteorológiai jelenségeknek helyet adó légköri tartományok (troposzféra, sztratoszféra) felett üres világűrt tételezett fel. A század első évtizedeinek rádiós kísérletei – köztük is az első, G. Marconi transzatlanti jeltovábbítása 1901-ben – adtak kísérleti igazolást arra a már korábbi feltevésre, hogy a felső-légkörben, nagy magasságban az elektromos áramot is vezetni képes, szabad töltések tömege van jelen.

A földi környezetnek a mintegy 90 km és 800~1000 km magasságok közti tartománya, az *ionoszféra* bolygónk plazmakörnyezetének alsó régiója, jellegzetes átmeneti tartomány. Itt dominánsan a Nap elektromágneses, illetve részecske sugárzásainak ionizáló hatása hozza létre és tartja fenn a részleges ionizáltságot. Azonban a semleges légkör és a szilárd Föld elektromos folyamataival is szoros csatolást mutat. A Föld ionizált felsőlégköre (ionoszféra, magnetoszféra) fizikai folyamatairól – az egyre több űreszköz in-situ mérései ellenére – mindmáig döntően rádiós kísérletekkel, hullámterjedési vizsgálatokkal szerzünk ismeretet.

A földfelszínen vagy műhold fedélzetén rögzített, a felsőlégköri, ionoszférikus vagy magasabban lévő plazmában terjedő villamos jelek elemzésével lehetőségünk van pontosítani és új elemekkel bővíteni ismereteinket felsőlégköri környezetünkről, amely közeg kulcsszereplő a Naptól a Földre jutó energia közvetítésében.

2. Űridőjárás hatása a magaslégkörben

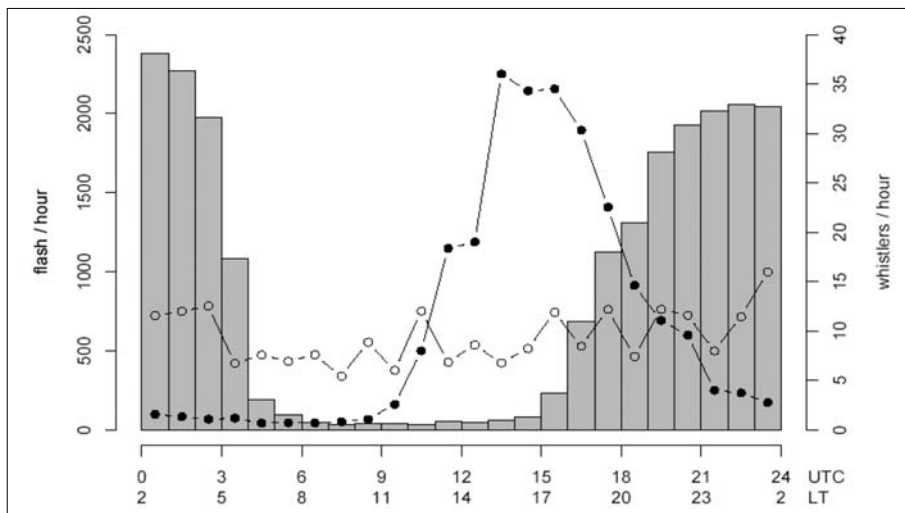
A Nap, ami egyfelől évmilliárdos skálán is meglepően egyenletes sugárzással biztosítja bolygónkon az élet

fennmaradását és fejlődését, folyamatosan változást mutató, dinamikus csillag. A Nap által az űrbe kisugárzott energia mértéke a reguláris (kváziperiodikus), tehát előre tervezhető változások mellett sokrétű, irreguláris jelleget is mutat az elektromágneses és a részecske-sugárzásban egyaránt. A Nap dinamikus, periodikus, kváziperiodikus és szabálytalan változásait *naptevékenységnek* nevezzük. A Nap folyamatos elektromágneses sugárzása és részecskeárama (napszél) intenzív naptevékenységkor egy szinte minden jellemzőjében felerősödött sugárzásként éri Földünket [1].

Az olykor gyorsan változó arcát mutató Nap környezetünkre gyakorolt hatását az utóbbi években kezdtük csak jobban megismerni, intenzíven vizsgálni. Azt az igen összetett folyamatot, ami egy-egy naptevékenységet követően (az energia útját a Naptól a Földre követhetve) a bolygóközi térben, a földi mágneses térben, a felsőlégkörben (sugárzási övek, ionoszféra), a meteorológiai folyamatokban, végül pedig az élő és élettelen (például a civilizációs infrastruktúra) világban lezajlik, *űr-időjárásnak* nevezzük.

A földi ionoszféra állapota döntően az ionizáló hatás intenzitásától függ, így nem véletlen, hogy a naptevékenység lassú és gyors változásai – hasonlóan a teljes bioszféra működéséhez – egyaránt megmutatkoznak rajta, ebben az esetben az ionizáltság megváltozott mértékeként. Az átlagostól eltérő állapotú közeg a megváltozott terjedési tulajdonságokon keresztül a plazmát harántoló villamos jeleken is kimutatható.

A felsőlégkör modellezése és elektromágneses monitorozása hozzásegít például ahhoz, hogy – a Napot és a napszelet a bolygóközi térben megfigyelő űrszondák (pl. SOHO) által idejekorán adott jelzések alapján – egy-egy naptevékenységnek űr-időjárás hatását, annak lefutását és mértékét becsülni tudjuk, mielőtt az ténylegesen bekövetkezne. Az elektromágneses monitorozás egyik kulcsa a *whistlerek* és whistler-szerű jelenségek folyamatos észlelése és az adatok értékelése.



1. ábra
Tihanyban (ELGI Obszervatórium) rögzített whistlerek és a mágneses konjugált dél-afrikai régióban a villámok gyakoriságának napszak szerinti változása. A whistlerek az oszlopdiaagram jelzi, a szárazföld (●) és a tenger (○) feletti villámokat külön görbe mutatja.

3. Az alsó-ionoszféra szerepe a whistler terjedésének kialakulásában

A whistlerek keltéséről, plazmában történő terjedéséről az elterjedt, általánosan ismert leírás a 60-as évek óta érdemben nem változott. E szerint – vázlatosan – a villámok keltette szélessávú elektromágneses impulzusok az ionoszférába léphetnek, majd azt harántolva a magnetoszférában (plazmában) terjednek. E jelek alacsony frekvenciás jelrészének, a whistlereknek időben változó frekvenciájú jelalakját az anizotróp földi plazmakörnyezetben terjedésük során a diszperzió okozza. A plazmaszférában terjedő VLF jel (whistler), több más alacsony frekvenciás plazmahullám mellett fontos szereplője a sugárzási övek energikus részecskéi és az alsóbb légkör közötti energia csatolásnak.

A korábbi évek whistler kutatásai érdemben feltáratlanul hagyták, hogy a villám típusa (CC: felhő-felhő, CG: felhő-föld, illetve IC: felhőn belüli) játszik-e szerepet a whistler gerjesztésben; milyen feltételek mellett tud (a földfelszín mentén gyakran nagy távolságra terjedő jel) az alsó-ionoszférába belépni; mi az ionoszférikus terjedés jellege (iránya); a magnetoszféra mely sajátossága teszi lehetővé, hogy whistlerek (felszíni észlelések szerint) földmágneses erővonal mentén visszajutnak a felszín környezetébe; van-e „szűrő” szerepe az ionoszférának a felfelé, illetve a felszín felé terjedő whistlerek esetében. Az egymást kiegészítő földi és műhold-fedélzeti mérések és a legújabb kutatások, jelfeldolgozási eljárások a fenti nyitott kérdések egy részére választ adnak.

4. Az automatikus whistler detektálás tanulságai

A whistler, földfelszínen vagy műholdon regisztrálva, tömegesen előforduló jelenség. Megbízható vizsgálatokban alapvető a nagy esetszámra támaszkodó statisztika, amelyet – a manuális feldolgozás kis határfoka miatt – egyedül az automatikus eseménydetektálás tud biztosítani. A világon egyedülálló AWDA jelfeldolgozó rendszer [2] alkalmazásával valóban folyamatos jelész-

lelést, jeldetektálást és feldolgozást lehet megvalósítani, azaz a korábbi évek esetszámánál több nagyságrenddel (!) nagyobb whistlert lehet elemezni, e mellett a whistlerek kigyűjtése is teljesebb – talán közel teljes – körű lett. Mágnesesen konjugált területek egyidejű villám- és whistleradatai alapján ismerjük a whistlerek napszak szerinti és éves gyakoriságát.

Abból, hogy a whistlerek időbeni gyakorisága nem tükrözi a villámokét (lásd az 1. ábrát) fontos következtetés, hogy a villám-kisülés szükséges, de bizonyosan nem elégséges feltétele whistlerek létrejöttének. A whistlerek keltéséről és terjedéséről teljesebb képet földi és fedélzeti regisztrátumok párhuzamos (szimultán), automatikus detektáláson alapuló elemzésével nyerhetünk. Ez ad a közeljövőben választ arra is, hogy az ionoszféra milyen szerepet játszik a whistler-jelenségkörben, s így az ionoszférában lezajló energiaátviteli folyamatokat is jobban megismerhetjük. Megrázó felismerés, hogy a villámszám növekedése nem eredményezi a whistlerek számának egyidejű növekedését.

5. Hullámterjedési jelenségek a DEMETER műhold felvételein

A francia tudományos program keretében fejlesztett és üzemeltetett DEMETER műhold a földi környezet monitorozásában új fejezetként tekinthető kis tömegű, úgynevezett mikroműholdak sorozatának egyik első tagja. Fedélzeti tudományos programját az elektromágneses tér komponenseinek széles frekvenciasávon rögzítése mellett aktív és passzív plazmafizikai kísérletek teszik teljesebbé (<http://demeter.cnrs-orleans.fr>). A műhold közel poláris pályahajlása és alacsony (ionoszférikus), közel állandó pályamagassága (kb. 710 km) elsőrangú eszközzé teszi a plazmakörnyezet alsó régióinak vizsgálatára. Az ionoszférát harántoló és műholdon rögzített, csak a troposzféra-műhold közötti úton terjedt, ún. „törredék-whistlerek” villámokéval összevethető gyakorisága és az ennél mintegy két nagyságrenddel ritkább, „egyugrású whistlerek” (a magnetoszférán át a konjugált területig jutott jelek) számában tapasztalható eltérés oka elsősorban a magnetoszférabeli terjedésben keresendő.

A DEMETER felvételeken detektált töredék-whistlerrek jelalakja nagy pontossággal reprodukálható az impulzusok anizotróp plazmában, mágneses térrel szöget bezáró terjedése esetére érvényes UWB hullámterjedési megoldással [3]. Az ionoszféra és a földmágneses tér rendelkezésre álló standard modelljei (IRI, IGRF) és a fedélzeti szélessávú regisztrátumok alapján a villám keltette impulzusok ionoszférában történő terjedésének térbeli jellegzetességéről először lehetett a pontos hullámterjedési megoldás alkalmazásával, a korábbi leírásoktól alapvetően eltérő képet alkotni. Azok az impulzusok, melyek jelentős utat megtéve több ezer km-t terjednek a földfelszín mentén, mielőtt belépnek a troposzférából a plazmaszférába (ekkor szférikusz a nevük) magukon hordozzák a vezetett terjedés módusképét [4]. Ezek a jelek sajátos, „szálkás” töredék-whistlerként jelentkeznek a műholdas adatokon (2/a. ábra). A DEMETER felvételein kimutatott jeltípus egyugrású whistlereken mindmáig ismeretlen. A hullámterjedésről és a plazmaközegről ma alkotott fizikai kép szerint hasonlóan megválaszolatlan az a folyamat, amely egy, az ionoszféra alatt vezetett módusokban terjedő impulzusnak csak egyes módusait engedi terjedni az alsó ionoszférában, ahogyan ez a műholdas felvételeken gyakran megfigyelhető (2/b. ábra).

A DEMETER program elsődleges tudományos célkitűzése a földi szeizmikus aktivitás és a felsőlégköri (ionoszférában kutatott) fizikai folyamatok, kiemelten is az elektromosság között esetleg fennálló kapcsolat keresése, térképezése. E perspektivikus kutatási iránynak a nagyléptékű légköri és szilárd kéregbeli áramrendszerek léte, ezek mágneses terének csatolása és a zömében kristályos litoszféra vezetőképességének és mechanikai feszültségterének (csak töredékesen feltárt) összefüggése ad elvi alapot. Az eddig végzett kutatások sokrétű, indikáció szintű igazolását, megerősítését adták ezen alapvető fontosságú terület további, intenzív művelésének. A DEMETER műhold szélessávú mágneses felvételeinek átlagolt zajspektrumán rengési eseményekkel térben és időben korreláló anomalisztikus jelenségeket azonosítottak francia kutatók. Az operatív üzemének, élettartamának közepén működő hold által eddig gyűjtött in-

dikációk rengéshez köthető jellegét csak a következő időszak további adatainak kiterjedt vizsgálata verifikálhatja.

6. Összegzés

A Föld e fontos részének, a felsőlégkörnek a működéséről korábban kialakított képünk változni kezdett. Az új műholdas mérések adatainak egyre több eddig ismeretlen jelenséget találunk, aminek következtében a Földről és annak fizikai környezetéről kialakított képünk bizonyosan megváltozik. Döntő fontosságú tehát, hogy minél pontosabb elméleti modellek megalkotásával és részletesebb monitorozással kövessük nyomon az e régióban lezajló folyamatokat.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott eredmények alapvetően a Magyar Űrkutatói Iroda (Informatikai és Hírközlési Minisztérium) támogatásával születtek meg, támogatva továbbá az MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutatócsoport, valamint az MTA és a már lezárult OTKA T037611 és F037603 szerződések által.

Irodalom

- [1] Bencze P. (2004), A naptevékenység és a rádióhullámok terjedése, Híradástechnika, LIX., 2004/5, pp.2–17.
- [2] Lichtenberger, J., Cs. Ferencz, D. Hamar, P. Steinbach, L. Bodnár (2004), Automatic whistler detection and analyzing system, Geophys. Res. Abs., Vol.6, 01390.
- [3] Cs. Ferencz, O.E. Ferencz, D. Hamar, J. Lichtenberger (2001), Whistler Phenomena. Short impulse propagation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.260.
- [4] E. Ferencz Orsolya, Ferencz Csaba (2004), Elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata különböző közegekben, Híradástechnika, LIX., 2004/5, pp.18–24.

2. ábra Az ionoszféra alatti terjedés módusképének nyomát mutató „szálkás” töredék-whistlerrek a DEMETER műhold VLF felvételének két részletén. Nem ismerjük annak okát, hogy egyes módusok miért terjednek tovább, míg mások nem.

