

BÓR JÓZSEF–HEGEDÜS TIBOR–JÄGER ZOLTÁN

Sikeres vöröslidérc-észlelések Bajáról

Mit hoz a 2015-ös évad?



Eredményessége igazolta a második magyarországi felsőlégköri optikai megfigyelőállomás létesítésének létjogosultságát Baján. A 2007 óta Sopronban működő észlelőrendszer kiterjesztéseként 2014 tavaszán a Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriumába telepítettük a második kamerát, amelynek feladata a Közép-Európa fölött a sztratoszférában és a mezoszférában előforduló, elektromos eredetű tranzienst léggörpoptikai jelenségek észlelése.

Vörös lidércek és társaik: a FEOEM-ek

A zivatarok elektromos aktivitásának a másodperc törtrésze alatt bekövetkező megnyilvánulásai a villámkisülések, amelyek intenzív hő- és hanghatásuk mellett rendkívül széles spektrumú elektromágneses sugárzást is kibocsátanak – ennek a látható tartományba eső része a kisülési csatorna vakító félfénylése. Eközben a szétválasztott elektromos töltések drasztikus átrendeződése következik be a zivatarfelhőben. Felhő-föld villámokat, vagy nagyobb távolságot átfogó felhővillámokat követően a zivatarfelhő egyes területein jelentős töltéstöbblet alakulhat ki, amelynek elektromos tere a töltésgóctól távolabb is számottevő lehet. E „maradék” elektromos tér erőssége a zivatarfelhőben, illetve normál léggörpoptikán általában nem ér el akkora értéket, amely egy újabb villámkisülés bekövetkeztéhez szükséges. Azonban 50–80 km magasan a felhők fölött, a mezoszférában a tengerszintnél nagyságrendekkel alacsonyabb légsűrűség és nyomás mellett a természetes elektromos gázkisülések kialakulásához szükséges kritikus térerősség érték is kisebb. Ezért fordulhat elő, hogy egy-egy intenzív villámot követően egy nagyobb töltésgóc fölött 50–70 km-rel természetes kisülések következhetnek be. Az ilyen kisülések egyik formáját kísérő, legfeljebb néhány századmásodpercig észlelhető fényfelvillanás a vörös lidérc (red sprite) [Bór és Barta, 2011].

A vörös lidérc volt az első, zivatarok elektromos tevékenységétől eredő troposzféra feletti fényjelenség, amelynek a létezését hiteles felvételekkel igazolták. Az első felfedezés után főleg az 1990-es és az ezredfordulót követő években sorra számoltak be különböző újabb optikai jelenségek észleléséről, amelyek a sztratoszférában és a mezoszférában jelennek meg (lidércudvar – sprite halo, gyűrűlidérc – elves, troll és palma lidérc – palm tree, valamint különböző kék és óriás nyalábok – blue/gigantic jets). E fényjelenségek közös tulajdonsága a rövid, túlnyomórészt egy másodpercnél jóval rövidebb optikai élettartam, továbbá hogy megjelenésük az elektromosan különösen aktív zivatarokban lezajló különböző töltésszétválasztási és töltésszállító folyamatok következménye. Ezért nevezzük ezeket összefoglalóan felsőlégköri elektro-optikai emisszióknak, röviden FEOEM-eknek (a szakirodalomban transient luminous events – TLEs) [Barta, 2011].

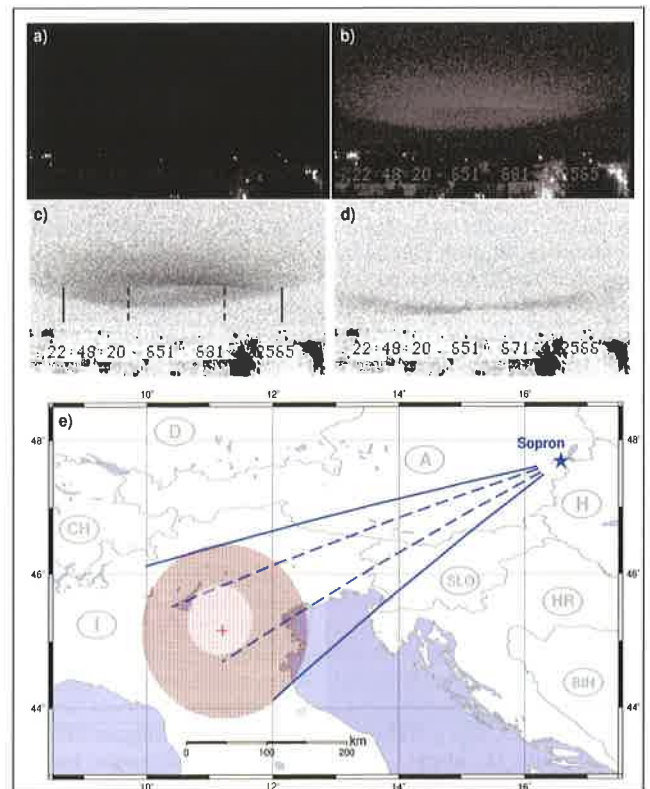
Érdekes is, szép is, de mire jó?

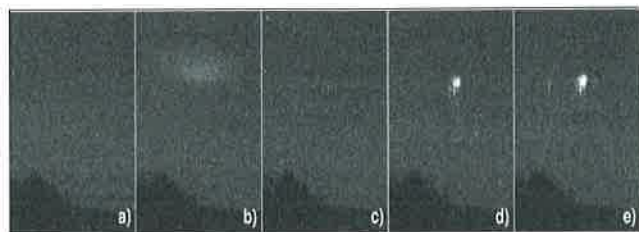
A FEOEM-ek jelentősége elsősorban az, hogy segítenek megismerni mind a kiváltó zivatarok és villámkisülések tulajdonságait, mind azoknak a légköri rétegeknek a sajátosságait amelyben megjelennek és/vagy amelyek a megjelenésükben szerepet ját-

szanak. Különösen a mezoszféra állapotának monitorozása jelent kihívást, mivel ebben a rétegben az alacsony sűrűségű atmoszféra nem ad kellő felhajtóerőt ballonok vagy repülőgépek számára, ugyanakkor a műholdak keringéséhez már túl nagy a közegellenállás fékező ereje. Ezt mutatja az is, hogy az atmoszférába érkező meteoritikus testek jelentős hányada ebben a rétegben izzik fel és ég el, mielőtt elérhetné a földfelszínt. A villámkisülések elektro-

1. ábra. Sopronból észlelt gyűrűlidérc 2014. július 18-án közép-európai idő szerint 00:48:20.651-kor. Az esemény első képkockája (a) eredeti felvételen, (b) digitális javított felvételen, illetve (c) javított és invertált felvételen. (d) Az esemény második képkockája javított és invertált felvételen. A képeken látható időbélyeg világitót (UTC) mutat.

A gyűrűlidércek optikai élettartama kevesebb, mint 1 ezredmásodperc. Ez az intervallum itt kivételesen éppen két képkockázatra esett, így a megjelenés időpontja ezredmásodperces pontossággal ismert. (e) A c) képen ábrázolt irányok és a gyűrűlidérc hozzávetőleges kiterjedése. Piros '+' jelzi a kiváltó villám helyét, amelyben a kisülési áram csúcserőssége 585 kA volt. (A villámok túlnyomó többségében a kisülési áram csúcserőssége 20 kA alatti.) A jelenség aszimmetriája arra utal, hogy a kisülési csatorna nem volt teljesen függőleges





2. ábra. Különálló lidércudvar és az azt követő vörös lidérc Baján rögzített, egymást követő videó képmozói. A képmozók expozíciós ideje 20-20 ms. A b) képen látható felvétel 2014. június 18-án, helyi időben 02:56:31.206-226 között készült. A lidércudvar teltő felhő-föld villám 02:56:31.219-kor következett be és benne az áramerősség csúcserőértéke +145 kA volt. A d) képmozón felfénylő vörös lidércet a 02:56:31.254-kor lecsapó, +74 kA-es felhő-föld villám váltotta ki

mágneses sugárzása és a zivatarok elektromos tere ugyanakkor kölcsönhatásban áll a Föld szabad töltött részecskékből álló plazmakörnyezetével. A villámlás közben keletkező alacsonyfrekvenciás rádióhullámok egy része a földfelszín és az ionoszféra alja által alkotott hullámvezetőben terjedve letapogatja a hullámvezető két határretegét [Price et al., 2007]. A valamivel magasabb frekvenciájú komponensek spektrális jellemzői a geomágneses erővonalak mentén haladva a Földtől távolabbi tartományok állapotára jellemző módon változnak meg [Lichtenberger et al., 2013].

Ezek a tulajdonságok a légköri elektromosságot alkalmassá teszik földi környezetünk állapotának és változásainak felmérésére, ami többek között az űridőjárási események (pl. napkitörések) lehetséges földi hatásainak a felmérésében, műholdas küldetések tervezésekor, illetve bolygónk energiamelegének tanulmányozásában játszik központi szerepet. A villámok ilyen alkalmazása azonban csak akkor valósulhat meg, ha a jelek forrástulajdonságait ismerjük és a környezet okozta hatásokat el tudjuk különíteni a mért adatokban. A villámok forrástulajdonságainak és a Föld-ionoszféra hullámvezető állapotának megismerését is szolgálja a FEOEM-ek vizsgálata, amelyben Magyarország is részt vesz.

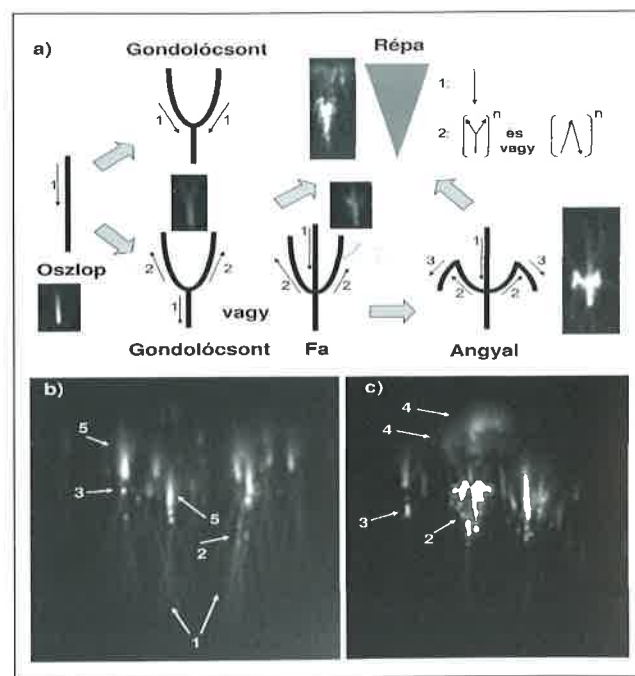
FEOEM-kutatás Magyarországon

Az MTA soproni székhelyű Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontjának Geodéziai és Geofizikai Intézetében folynak a témához kapcsolódó kutatások [Sátori et al., 2013]. A munka részét képezi a FEOEM-ek közvetlen, kamerákkal történő észlelése is. Sopronban egy kamera 2007 óta kémleli a Közép-Európa fölötti éjszakai égboltot a tavasztól késő őszi tartó zivataros időszakban, elektromos eredetű természetes gázkisülési jelenségek megfigyelése céljából. A távolról vezérelhető észlelőrendszer évente kb. 100-300 eseményt rögzít, amellyel a térségben működő néhány hasonló (nem magyarországi) FEOEM-megfigyelőhely között eddig a legeredményesebb volt.

A telepítés óta alig néhány gyűrűlidércet fényképezett a kameránk, annak ellenére, hogy a világűrbeli folytatott megfigyelések szerint ez az emissziótípus talán a leggyakrabban előforduló FEOEM-változat. A kisszámú észlelés egyik oka, hogy a gyűrűlidércet viszonylag halványak, ugyanakkor a leg-
rövidebb optikai élettartamúak. A kevesebb, mint 1 ezredmásodpercnyi felfénylésből csak kevés foton éri a kamera fényérzékeny chipjét, ami gyakran nem elég, hogy a rendszer észlelje az eseményt (1. ábra). A fényesebb gyűrűlidércet kiváltó legimpulzívabb és legnagyobb kezdeti áramerősségű villámok

gyakrabban fordulnak elő nyílt vízfelület (elsősorban tengerek és óceánok) fölött [Chen et al., 2008]. Közép-Európában már csak ezért is találkozhatunk ritkábban ezzel az emissziótípussal.

Valamivel gyakrabban, néhányszor 10 alkalommal került lenscevégre különálló lidércudvar, amely szintén a kiemelkedően impulzív villámok következménye (2. ábra). Ennél jóval gyakrabban mutatkozott ez az emissziótípus vörös lidércekkel együtt. A vörös lidérc testét alkotó kisülési csatornák a megfigyelések szerint kialakulhatnak a légkör olyan mezoszférikus inhomogenitásaiból is, amelyeket egy lidércudvar-típusú kisülés előgerjeszt [Kosar et al., 2013]. A vörös lidérc kialakulása így közvetlenül követi a lidércudvarét. Ilyen esetekben a két jelenség a 16-20 ezredmásodperces expozíciójú normál váltottoros video képmozókon nem különül el, hiszen a lidércudvar optikai élettartama alig 1-2 ezredmásodperc és a vörös lidérc kialakulása sem tart tovább néhány ezredmásodpercnél.



3. ábra. (a) Vörös lidérc jellemző alakjai és az ezeket kialakító kisülési frontok terjedésének irányai. A számok a kisülési frontok megjelenésének egymásutánosságára utalnak. (b)-(c) Vörös lidérc különböző gyakorisággal megfigyelhető alakjait: 1. indák (tendrils), 2. gyöngyök (beads) a lidérc indái mentén vagy a fényes testben, 3. foltok (spots) közvetlenül a fényes lidérc test alatt, 4. puffok (puffs), 5. parázlás (glow) a fényes test körül

A Közép-Európában rögzített FEOEM-ek túlnyomó többsége vörös lidérc. E FEOEM típus egyedei gazdag alakváltozatosságot mutatnak a gyűrűlidércet és a lidércudvarok állandó fánk, illetve folt formájához képest. Az utóbbi két emisszió megjelenése elsősorban arra utal, hogy a kiváltó villámban az áramlökés nagysága és időtartama meghaladott egy-egy megfelelő határértéket (amelyek több környezeti tényezőtől is függhetnek). A vörös lidérc alakja és különböző alakjait megjelenése azonban összefüggésben lehet a kiváltó villámban a kisülési áram erősségének változásával, illetve a zivatarfelhőben a töltések eloszlásával, a mezoszféra irregularitásaival, sőt akár az alsó ionoszféra állapotával is. Ezt támasztja alá az a nagy se-

bességű videofelvételek elemzéséből származó megfigyelés is, hogy a vörös lidérceket az éjszakai égboltra rajzoló kisülési frontok több hullámban jelenhetnek meg és ezeknek a hullámokban a kisülési frontok terjedési irányában általában különböző [Bór et al., 2013].

Az első néhány észlelési évben rögzített több száz soproni felvétel feldolgozásából származó első számottevő eredmény a térségben megjelenő vörös lidércek osztályokba sorolása az emisszió lényegi alakja szerint és a kisülési frontok jellemző szekvenciáinak alaki osztályokhoz való rendelése. Megtörtént a nem állandó alakú jegyek számbavétele és az események megjelenési tulajdonságainak statisztikai jellemzése is (3. ábra). Az eredmények rámutatnak például, hogy a vörös lidércek inkább csoportban jelennek meg, mint magányosan; a leggyakrabban előforduló alak az egyszerű oszlop, illetve a kevesebb elemet számláló csoportok között fordulnak elő a leghosszabb optikai élettartamú események [Bór, 2013].

Szintén mindössze néhány kivételes esetben egy ritka FEOEM-típusnak, a trollnak (a jelenség hasonló fizikai eredetű másik változata a pálmalidérc) a megjelenését is rögzítette a soproni kamera (4. ábra) [Mlynarczyk et al., 2015]. Ennek a létrejöttét a közvetlen előtte megjelenő vörös lidérc vagy óriás nyalábok



4. ábra. Sopronból észlelt komplex FEOEM-eseménysorozat fényesség tartott integrált felvétele 2013. augusztus 7-én közép-európai idő szerint 00:34:06.959 és 00:34:07.399 között rögzítve. A troll nyaláb megjelenése a kb. 400 ms alatt egymást követően feltűnt 4 vörös lidérc csoportot követve. A vörös lidércekhez képest halvány, ritka jelenséget a képen fehér ellipszis jelöli. A teljes komplex esemény összességében egy kb. 50 km x 150 km-es nagyságú terület fölött játszódott le

testében folyó áramok által módosított elektromos környezet teszi lehetővé. Önálló jelenségként nem figyelhető meg, ezért tartozik az ún. másodlagos FEOEM-ek közé. Megjelenése egyrészt a zivatarfelhőben működő töltésszétválasztó folyamatok intenzitására utal, másrészt azt mutatja, hogy a megelőző (általában összetett) vörös lidérc esemény nagyobb térrészben számottevő hatással volt a környezetre: gyakorlatilag ideiglenesen lejjebb szállította az ionoszféra alsó határteregét [Lee et al., 2012]. Az ilyen események jelzik, hogy a villámok és a zivatarvékenység hatása explicit módon megjelenhet a légkör különböző tartományaiban. E hatások jelentőségének és következményeinek felmérése a kapcsolódó kutatómunka egyik fő célkitűzése.

Észlelések 2014-ben

A tudományos kutatómunka két fő pillére a FEOEM-kutatás esetében is egyrészt észlelési és kísérleti adatok gyűjtése, másrészt a megfigyelések jellemzőinek fizikai modellek segítségével való értelmezése. A vörös lidércekhez hasonló, nem túl gyakran és könnyen megfigyelhető, ugyanakkor jellemzően változatos természeti jelenségek tulajdonságainak vizsgálatában nagy szerepe van a statisztikai módszereknek. Statisztikai elemzéssel megbízható eredmények azonban csak kellő számú észlelés esetén

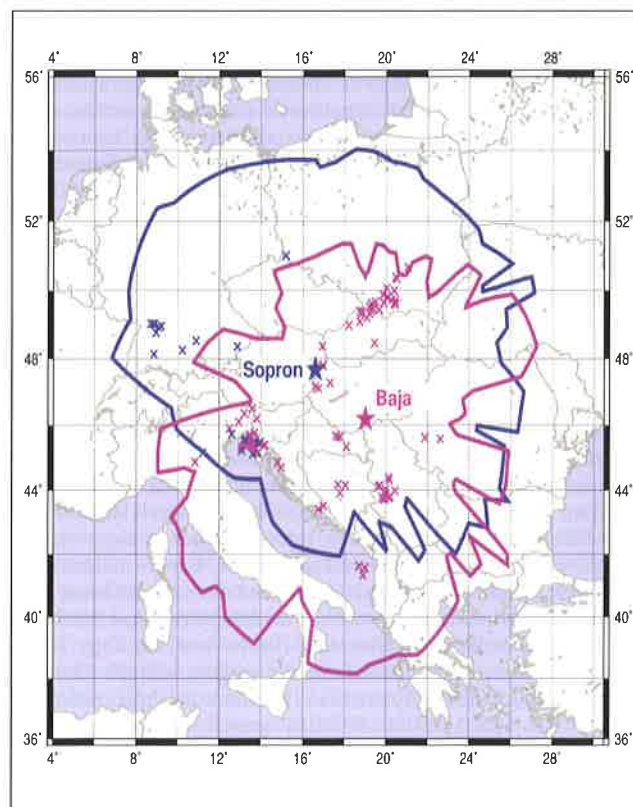
kaphatók. Ezért törekszünk arra, hogy a megfigyelési területen előforduló zivatarok fölött a FEOEM-előfordulásokat mind teljesebb mértékben dokumentáljuk.

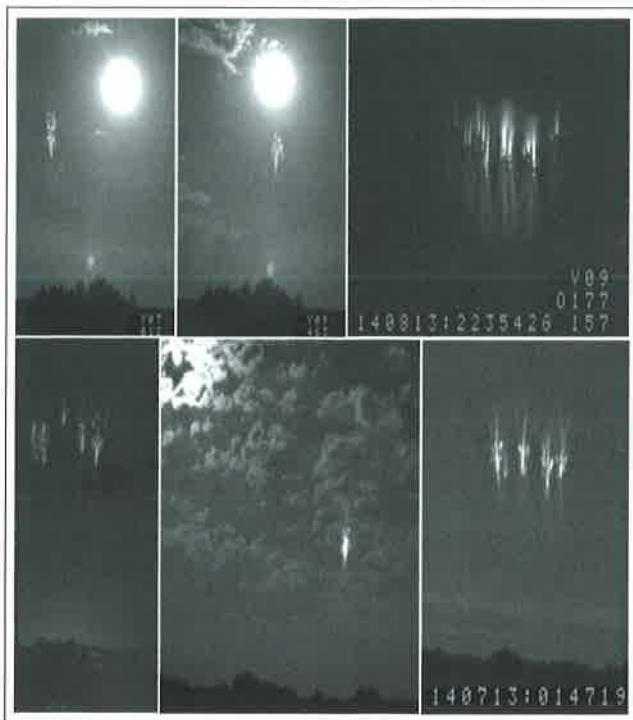
Sikeres észlelések végzéséhez azonban a megfelelő eszközpark és az emberi erőforrások mellett nem tervezhető feltételeknek is teljesülnie kell. Ilyen feltétel például a jó látási viszonyok megléte. A megfigyelőhely fölötti, illetve a megfigyelendő események irányában húzódó felhőzet és csapadék a tapasztalat szerint viszonylag gyakran korlátozza az észlelőt. Az ebből eredő hátrányt csökkentheti, ha ugyanazt a térrészt több észlelőhelyről is meg lehet figyelni.

Ebből a megfontolásból telepítettünk egy második, ugyancsak távolról vezérelhető optikai megfigyelőrendszert Bajára, a Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriumába. Az első soproni rendszer és az új kamera észlelési tartománya között jelentős átfedés van, ugyanakkor elsősorban dél-délnyugati irányban a bajai rendszernek köszönhetően Európa további területei fölött vált lehetővé a FEOEM-ek szervezett megfigyelése Magyarországról (5. ábra).

A 2014-es év időjárása nem volt kedvező FEOEM-észlelések végzéséhez. Amíg 2012-ben és 2013-ban június és szeptember között 299, illetve 309 FEOEM-et rögzített a soproni kamera, addig 2014 májusa és novembere között mindössze 32-t! A sikeres észlelések ilyen alacsony száma csak részben volt írható a 2014-ben egyébként általában is kevesebb zivataros nap számlájára. Ezt támasztja alá, hogy ugyanebben az időszakban a bajai rendszer 126 FEOEM-et észlelt (6. ábra) úgy, hogy a Baján rögzített események nagyobb része elvileg Sopronból is

5. ábra. Optikai észlelési tartomány Sopronból és Bajáról, amely fölött az 50-90 km-es magasságtartomány teljes egészében megfigyelhető. A tartományok határát jelző vonallal egyező színű keresztek az egyes állomásokról 2014-ben észlelt FEOEM-ek azonosított keltóvillámainak a helyét jelölik





6. ábra. Bajáról észlelt látványos vörös lidércek 2014-ben

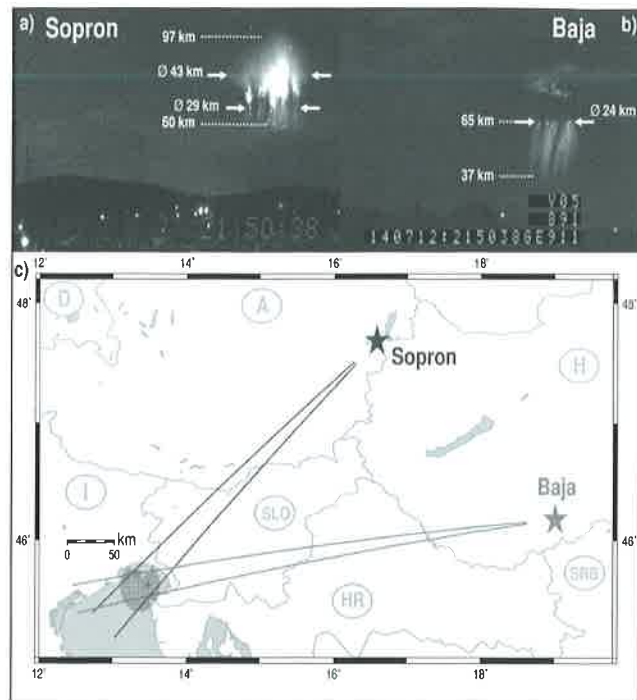
látható lett volna. Az új állomás kiemelkedő sikere önmagában is kétséget kizáróan igazolja a második rendszer felállításának a létjogosultságát.

A második észlelőegység felállításának azonban további előnyei is vannak. Ezek egyike, hogy ha legalább két megfigyelési helyről készült felvétel is rendelkezésre áll ugyanarról a jelenségről, akkor annak helye, magassága és kiterjedése geometriai háromszögelés segítségével minden közelítéstől mentesen pontosan meghatározható (7. ábra). Ezeknek az információknak kiemelkedő szerepük van a FEOEM-ek fizikai tulajdonságait leíró modellek pontosságának ellenőrzésében. A háromszögeléssel történő helymeghatározás a csillagászatban is elterjedt megoldás, pl. felfénylő meteorok, tűzgömbök pályájának a meghatározására és az ott alkalmazott eljárások felhasználhatók a FEOEM-felvételek kiértékelésénél is.

A munka folytatódik

FEOEM-észleléseinket 2015-ben és az elkövetkező években is szeretnénk folytatni. Az új felvételektől nemcsak azt reméljük, hogy az eddigi statisztikai kiértékelések eredményeinek megalapozottságát növelik, hanem további kutatómunka alapjául is szolgálnak. Európában több villámészlelő hálózat is működik, amely kiváló területi lefedettséggel és nagy biztonsággal észleli az egyes villámkisüléseket. Ezek a hálózatok a villámok földrajzi helyén kívül információt szolgáltatnak pl. a kisülési áram maximális értékére, a villám típusára (felhő-föld vagy felhőn belüli) vonatkozóan, illetve arról is, hogy felhő-föld villám esetén a zivatarfelhőben milyen előjelű töltésgóc vett részt a kisülési folyamatban. Ezeknek az információknak és a villám által kiváltott FEOEM optikai, illetve alaki tulajdonságainak az összehasonlításával megtalálhatók a villámok azon jellemzői, amelyek a felsőbb légrétegekben kiváltott különböző elektromágneses hatásokért leginkább felelősek.

A Magyarországról származó FEOEM-észleléseket rendszeresen továbbítjuk az EuroSprite európai adatbázisba is (www.electricstorms.net), ahol a többi európai észlelést kiegészítve egy átfogóbb, nemzetközi kutatási projekt részévé válnak. Az atmoszféra különböző rétegei közötti, zivatartevékenységhez köthető elektromágneses csatolási mechanizmusokat vizsgáló kezdeményezés (TEA-IS – Thunderstorm Effects on the Atmosphere-



7. ábra. Sopronból (a) és Bajáról (b) észlelt vörös lidércek 2014. július 12-én közép-európai idő szerint 23:50:38.921-kor +/-10 ms. A képeken látható időbélyeg világitót (UTC) mutat. A soproni felvétel bal szélén a 153 m magas tévétorony látható. A képeken az esemény geometriai háromszögelés után meghatározott kiterjedései és a látható részek magasságtartományai szerepelnek. c) A vörös lidérc helyének meghatározása háromszögeléssel. A Sopronból húzott irányok az a) képen az emissziók alsó látható részének fehér nyilakkal jelölt széleihez tartoznak. A Bajáról húzott irányok az emissziók alsó részének legmagasabb, szintén fehér nyíllal jelzett széleihez tartoznak. A folt mérete és elhelyezkedése az emisszió felső részén az a) képen fehér nyilakkal jelölt legnagyobb kiterjedésének felel meg. A '+' jelöli a vörös lidércet kiváltó, +107 kA csúcsáramú felhő-föld villámot, amelyet helyi időben 23:50:38.927-kor regisztráltak. A magas csúcsáram-érték és a nagy kiterjedésű diffúz parázslás kb. 80 km-es magasságban egyértelműen arra utal, hogy lidércudvar és vörös lidércek együttes megjelenését látjuk

Ionosphere System) a közeljövőben a Nemzetközi Úrállomásra telepítendő (ASIM) mérőegység, illetve az önálló TARANIS műhold észleléseihez kapcsolódó átfogó, földfelszínről és magából a légkörből (pl. ballonos mérésekkel) folytatott kiegészítő mérési kampányt koordinálja. A küldetések célja, hogy felmérjék az atmoszféra különböző rétegeinek szerepét a világtűr és a földfelszín közötti sugárzás és részecske transzportfolyamatokban a világtűrbeli és a Föld közeléből folytatott egyidejű észlelések összevetésével.

Mit hoz a 2015-ös év a FEOEM-ek közép-európai észlelésének terén? A kérdés nyitott. Annyi azonban bizonyos, hogy az előző év anomálian alacsony FEOEM-aktivitása után különös várakozással pásztázzák kameráink a soproni és a bajai horizontot. *

Köszönetnyilvánítás

Bór József köszönetet kíván mondani Döbrentei Lászlónak a bajai észlelérendszer összeállításában nyújtott segítségével. Az írás az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával (TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0015 számú „Föld-rendszer” projekt) készült. A témához kapcsolódó nemzetközi kutatási együttműködés az European Science Foundation TEA-IS programjának támogatásával vált lehetségessé.

Irodalom

- Barta Veronika, 2011, Káprázatos jelenségek a viharfelhők fölött, Természet Világa, 142. évfolyam, 7. szám
- Bór József, Barta Veronika, 2011, Vörös lidércek - gigantikus „tűzijáték” a felsőlégkörben, Fizikai Szemle, LXI. évfolyam 10. szám, pp. 343-349.
- Bór J., 2013, Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007-2009, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 92: pp. 151-177, doi: 10.1016/j.jastp.2012.10.008
- Bór József, Barta Veronika és Satori Gabriella, 2013, Szemelvények a felsőlégköri elektro-optikai emissziókkal kapcsolatos kutatások utóbbi eredményeiből, Űrtan Évkönyv 2012 / Asztronautikai Tájékoztató, 64. sz., pp. 91-95.
- Chen, Alfred B.; Kuo, Cheng-Ling; Lee, Yi-Jen; Su, Han-Tzong; Hsu, Rue-Ron; Chern, Jyh-Long; Frey, Harald U.; Mende, Stephen B.; Takahashi, Yukihiro; Fukunishi, Hiroshi; Chang, Yeou-Shin; Liu, Tie-Yue; Lee, Lou-Chuang, 2008, Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, J. Geophys. Res., 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101.
- Kosar, B. C., N. Y. Liu, and H. K. Rassoul, 2013, Formation of sprite streamers at subbreakdown conditions from ionospheric inhomogeneities resembling observed sprite halo structures, Geophys. Res. Lett., 40, 6282-6287, doi:10.1002/2013GL058294.
- Lee, L.-J., S.-M. Huang, J.-K. Chou, C.-L. Kuo, A. B. Chen, H.-T. Su, R.-R. Hsu, H. U. Frey, Y. Takahashi, and Lee, L.-C., 2012, Characteristics and generation of secondary jets and secondary gigantic jets, J. Geophys. Res., 117, A06317, doi:10.1029/2011JA017443
- Lichtenberger János, Mark A. Clilverd, Balázs Heilig, Massimo Vellante, Jyrki Manninen, Craig J. Rodger, Andrew B. Collier, Anders M. Jorgensen, Jan Reda, Robert H. Holzworth, Reinhard Friedel and Mea Simon-Wedlund, 2013, The plasmasphere during a space weather event: first results from the PLASMON project, J. Space Weather Space Clim., Volume 3, A23, doi: 10.1051/swsc/2013045
- Mlynarczyk, J., J. Bór, A. Kulak, M. Popek, and J. Kubisz, 2015, An unusual sequence of sprites followed by a secondary TLE: An analysis of ELF radio measurements and optical observations, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, doi:10.1002/2014JA020780.
- Price, C., O. Pechony, E. Greenberg, 2007, Schumann resonances in lightning research, Journal of Lightning Research 1: 1- 15.
- Satori, G., Rycroft, M, Bencze, P., Márcz, F., Bór, J., Barta, V., Nagy, T., Kovács, K., 2013, An Overview of Thunderstorm-Related Research on the Atmospheric Electric Field, Schumann Resonances, Sprites, and the Ionosphere at Sopron, Hungary, Surveys in Geophysics, Volume 34, Issue 3, 2013, Pages 255-292, doi: 10.1007/s10712-013-9222-6