



GEOFIZIKAI OBSZERVATÓRIUMI KÖZLEMÉNYEK

SZÉCHENYI ISTVÁN GEOFIZIKAI OBSZERVATÓRIUM,
NAGYCENK

2020. ÉV



FÖLDFIZIKAI ÉS ŪRTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET
SOPRON
2022

GEOFIZIKAI OBSZERVATÓRIUMI KÖZLEMÉNYEK

FÖLDFIZIKAI ÉS ŪRTUDOMÁNYI
KUTATÓINTÉZET

2020. ÉV

SZÉCHENYI ISTVÁN GEOFIZIKAI OBSZERVATÓRIUM
IAGA KÓD: NCK

Szerkesztők

Bozóki T., Buzás A., Szabóné André K.

Közreműködők/Szerzők

Bozóki T.	Bór J.	Buzás A.	Döbrentei L.
Hegedűs T.	Jäger Z.	Kis Á.	Kuslits L.
Lemperger I.	Molnár Cs.	Molnár T.	Novák A.
Piri D.	Sátori G.	Szabó Cs.	Szabóné André K.
Szalai S. M.	Szendrői J.	Wesztergom V.	Zelkó Z.

SOPRON

2022

A kiadvány beszerezhető:

FÖLDFIZIKAI
ÉS
ŰRTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET
9400 Sopron, Csatkai Endre u. 6-8.

HU–ISSN 2939-5054

Felelős kiadó: **Dr. Wesztergom Viktor**

igazgató

9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8.

Tel.: +36-99-508-350

A kiadványban szereplő adatok, ábrák és táblázatok reprodukálhatók
a forrásműre való megfelelő hivatkozás mellett.

A kiadvány megjelenését a Petőfi Irodalmi Múzeum támogatta.



Petőfi
Kulturális
Ügynökség



Tartalomjegyzék

Előszó	5
Közeli fák kivágásának hatása a mért légköri elektromos potenciálgradiens értékekre – <i>Buzás A. és Bór J.</i>	7
ELF zajteszt a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban – <i>Bozóki T., Bór J., Piri D., Novák A. és Molnár Cs.</i>	16
A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban zajló ELF mérések automatikus megjelenítése – <i>Szabóné André K., Bozóki T., Bór J., Szabó Cs. és Sători G.</i>	21
Geomágneses megfigyelő rendszer a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban – <i>Lemperger I., Szendrői J., Szabó Cs., Kuslits L., Kis Á., Szalai S.M., Molnár Cs. és Wesztergom V.</i>	28
Felsőléggköri elektro-optikai jelenségek távvezérelt észlelése Bajáról – <i>Bór J., Hegedüs T., Jäger Z., Molnár T., Molnár Cs., Szabó Cs., Szabóné André K., Zelkó Z. és Döbrentei L.</i>	37

Előszó

A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumot a Nemzetközi Geofizikai Év (1957-58) során alapították. Az observatórium egyike az első olyan magyar létesítményeknek, amelyeket a szilárd Föld, a felső légkör és a Föld körüli térség geofizikai vizsgálatának szenteltek. Az observatórium Sopron közelében található, a Fertő tó déli partján, a Fertő-Hanság Nemzeti Park területén. A kutatási infrastruktúra célja az elektromágneses (EM) terek és azok változásának földfelszín közelében, széles frekvenciatartományban történő folyamatos megfigyelése.

Az újtechnológiák használatának terjedése és a felszíni kritikus infrastruktúrák fokozódó kitettsége megkívánja a Föld plazmakörnyezetének egyidejű, observatóriumi és űreszközökön végzett megfigyelését. A naptevékenységgel összefüggő, olykor szélsőséges, gyors változások úridőjárás néven váltak ismertté. A több napciklust átfogó observatóriumi adatok lehetőséget biztosítanak a Nap és a Föld közötti energiacsatlás hosszú periódusú változásainak kutatására.

A kutatási infrastruktúra magában foglal tellurikus és geomágneses megfigyelő rendszereket, légköri elektromos és EM tér méréseket, villámdetektáló, ionoszféraszondázó eszközöket, radar interferometriai földmegfigyelést támogató reflektorokat és egy kiegészítő meteorológiai állomást.

Az egyedülállóan hosszú geomágneses adatsorok lehetővé teszik a Föld külső magjában lévő geomágneses főtér egyenértékű forrásainak vizsgálatát. Az indukált áramú (tellurikus) megfigyelési adatokkal kiegészített geomágneses idősorok segítségével az ionizált felső légkör külső forrásáram rendszerei megbízhatóan rekonstruálhatóak. Továbbá, a recens mágneses és elektromos mérések külső referenciaként szolgálnak a magnetotellurikus mélyszondás geofizikai kutatási módszerhez.

A légköri elektromossághoz és a villámaktivitáshoz kötődő mérések lehetővé teszik a klímaváltozás indikátoraiként elismert regionális és globális zivatar-tevékenység monitorozását. Az egyedi villámkisülésekből származó jelek pedig a plazmaszférapillanatnyi állapotának diagnosztizálására használhatóak.

Az observatórium az INTERMAGNET tagja, ami egy geomágneses observatóriumokból álló, globális hálózat. Ennek keretében nagy időbeli felbontású (1 Hz) geomágneses adatok kvázi valós időben kerülnek feltöltésre a központi szerverre, illetve az observatórium honlapján is megjelenítésre kerülnek. A DPS-4D ionoszonda automatikusan továbbítja az általa mért adatokat a Globális Ionoszférikus Rádió Observatórium (GIRO) rendszerbe, ami a világszerte zajló ionoszonda méréseket gyűjti egybe. Ezeket az adatokat az ionoszféra elektronsűrűség változásának és

az ionoszférában zajló plazmamozgás vizsgálatára használjuk regionális és globális skálán.

Az obszervatóriumban működik a LINET villámdetektáló hálózat egyik állomása, amely hozzájárul az Európában zajló villámtevékenység valós időben történő feltérképezéséhez. A légköri elektromos mérési adatok kvázi valós időben megjelennek az obszervatórium honlapján. Az obszervatórium tagja az Automatikus Whistler Detektáló és Analizáló Hálózatnak (AWDANet), olcsó és hatékony módszert biztosítva a belső magnetoszféra hideg plazma eloszlásának rutinszerű becslésére.

Közeli fák kivágásának hatása a mért légköri elektromos potenciálgradiens értékekre

BUZÁS ATTILA^{1,2*} ÉS BÓR JÓZSEF¹

¹Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

²Földtudományi Doktori Iskola, Természettudományi Kar, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Absztrakt

A nagyeceni Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban (NCK) található légköri elektromos potenciálgradiens (PG) mérésektől keletre elhelyezkedő facsoport 2020. február 24-én kivágásra került. A fák kivágásának a PG mérésre gyakorolt hatását egy elektrosztatikus numerikus modell segítségével mértük fel. Továbbá tanulmányunkban elemeztük a 2017 és 2021 között mért nagyeceni PG adatokat is. Azt találtuk, hogy a PG akár 52%-kal is megnőtt a fák kivágását követően. A numerikus modellszámítások nagyobb, 78%-os növekményt jeleztek. A 2017 és 2021 között mért PG évszakos változásának elemzése megerősítette, hogy ez a növekedés nem a természetes évszakos változás eredménye, továbbá hogy ennek az anomáliának a legvalószínűbb oka az árnyékoló hatás csökkenése a fák kivágása miatt.

Kulcsszavak: légköri elektromosság, légköri elektromos potenciálgradiens, elektrosztatikus árnyékoló hatás, atmoszféra–bioszféra csatolás, numerikus modellezés.

Bevezetés

A légköri elektromos potenciálgradiens (PG) a vertikális légköri elektromos térerősség ellentettje, mértékegysége a Vm^{-1} . A PG egy széleskörűen monitorozott fizikai mennyiség, általában a földfelszín közelében (kb. 1–3 m magasságban) mérik geofizikai és meteorológiai obszervatóriumokban szerte a világon (Nicoll és társai, 2019). A PG az egyik fő paramétere az ún. Globális Légköri Elektromos Áramkör (GLEK)

*Levelező szerző: Buzás Attila (buzas.attila@epss.hu)

Hivatkozás: Buzás A. és Bór J. (2022): Közeli fák kivágásának hatása a mért légköri elektromos potenciálgradiens értékekre. *Geofizikai Obszervatóriumi Közlemények 2020*, 7-15. <https://doi.org/10.55856/gok2020.1>

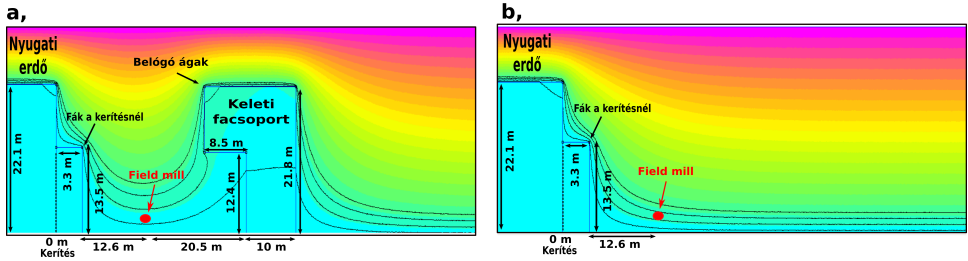
egyenáramú részének. A GLEK a földfelszín az alsó ionoszférával összekötő elektromos áramok globális keretrendszere (Rycroft és társai, 2012). A PG egyúttal egy sokoldalúan felhasználható diagnosztikai eszköz a földtudományokban, mivel képes a GLEK-ben és a földi éghajlati rendszerben lezajló globális változások, valamint úridőjárás folyamatok visszatükrözésére (Rycroft és társai, 2012).

A nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban (NCK) 1961-ben kezdődtek meg a PG mérések Bencze Pál és Márcz Ferenc geofizikusok felügyeletével egy helyi fejlesztésű, potenciálkiegyenlítésen alapuló, radioaktív ionizáló forrást tartalmazó műszer segítségével (Bencze & Márcz, 1981). A rendszeres karbantartás és a heti rendszerességű műszerkalibráció biztosította az adatok kiváló minőségét az évtizedek során egészen napjainkig. 1998-ban egy másik, szintén helyi fejlesztésű radioaktív anyagot tartalmazó műszert telepítettek a PG szimultán mérésére. Végül 2013-ban egy korszerűbb műszer, egy Boltek EFM-100 field mill kezdte meg működését (Bór és társai, 2020).

A fák elektrosztatikus árnyékoló hatása

Közeli tárgyak, mint például egy fém pózna vagy élő fák torzítják a környező légköri elektromos tér ekvipotenciális felületeit, csökkentve ezzel a közelben mérhető PG értékét (Lees, 1915). Ezt a jelenséget elektrosztatikus árnyékolásnak hívják és nagyban hozzájárult a nagycenki PG adatokban megfigyelt hosszú távú csökkenéshez (Márcz & Harrison, 2003; Williams és társai, 2005; Buzás és társai, 2021). A nagycenki PG mérések egy facsoportokkal és erdővel körülvett tisztáson helyezkednek el. Az idők folyamán, ahogy a fák egyre magasabbra nőttek, az árnyékoló hatásuk is egyre szignifikánsabbá vált, ezzel még inkább csökkentve a felszín közelében mért PG-t. Annak érdekében, hogy korrigálhassuk ezt a nemkívánatos árnyékoló hatást egy véges elemes numerikus modellt készítettünk. A modell részletes leírása megtalálható a Buzás és társai (2021) tanulmányban.

2020. február 24-én a PG méréstől keletre elhelyezkedő facsoport kivágásra került. Ezen esemény hatásának számszerűsítésére a numerikus modell geometriáját megváltoztattuk úgy, hogy a keleti facsoportot eltávolítottuk a modelltől (1. ábra). A két különböző konfigurációjú modell (keleti facsoporttal és anélkül) elemzésével az árnyékoló objektumok geometriájában bekövetkezett változás mért PG értékekre gyakorolt hatása meghatározható (1. ábra).



1. ábra. Modell geometria a keleti facsoport 2020. február 24-én történt kivágása előtt (a) és után (b).

Adatok és módszerek

Jelen tanulmányban a Boltek EFM-100 field mill által 3 m-es magasságban mért, a fák árnyékoló hatására nem korrigált szép idő PG adatokat használtuk fel. Az adatokat nem korrigáltuk a műszer elhelyezkedéséből fakadó geometriai torzításra sem. A szép idő PG adatok olyan PG adatok, amelyeket úgynevezett szép idő körülmények között rögzítettek, vagyis olyan időszakokban, amikor a helyi időjárási körülmények PG-re gyakorolt hatása elhanyagolható (Harrison & Nicoll, 2018; Nicoll és társai, 2019). Mivel nem álltak rendelkezésünkre kiegészítő meteorológiai adatsorok a szép idő körülmények megbízható meghatározására, a PG adatok szép idő szelekciójára egy a PG adatok előjelen és nagyságán alapuló statisztikai módszerrel használtunk. Első lépésben a negatív PG értékeket hanyagoltuk el, mivel a negatív PG a szép idő követelményeknek nem megfelelő, ilyen értelemben "rossz időre" utal (Harrison & Nicoll, 2018). Továbbá a nagy pozitív PG értékek is rossz időjárási körülményekkel (pl.: alacsony magasságú elektromosan töltött felhők a mérőhely közelében vagy közvetlenül felette) függnek össze. Ezen megfontolásból csak azokat a pozitív előjelű PG adatokat tekintettük szép idő adatoknak, amelyek a teljes PG adatsor mediánjától való abszolút eltérések eloszlásának mediánjának az ötszörösénél kisebbek (Lucas és társai, 2017). A szép idő korrekciót az eredeti, nagy időbeli felbontású, azaz 2 Hz-en rögzített PG adatokon hajtottuk végre. Ezt követően órás átlagokat képeztünk a nagy időbeli felbontású szép idő PG adatokból és ezeket az órás átlagokat használtuk aztán az elemzések során.

A fakivágás várható hatását a mérőhelyre tervezett két, különböző geometriájú modell segítségével határoztuk meg. A modellezett PG értékeket kiszámítottuk az EFM-100 field mill mérőfejének helyén és magasságában a két különböző modell esetén (1. ábra). E két modellezett PG érték hányadosa elvileg a fakivágás előtt és

után mért PG értékek hányadosát tükrözi.

Mivel a fákat egyazon napon vágják ki, ezért az okozott változásnak azonnal meg kellene jelennie a PG adatokban. A PG természetes napi változása azonban elfedheti a kisebb különbségeket, így előnyösebb egy statisztikai megközelítés. A PG természetes évszakos változása (Chalmers, 1967, pp. 168–169) viszont határt szab a fakivágás előtti és utáni vizsgálandó időszakok hosszának. Kompromisszumos megoldásként a fakivágás előtti és utáni 14 nap szép idő PG adatait és az azokból képzett statisztikai mérőszámokat használtuk fel az összehasonlításban.

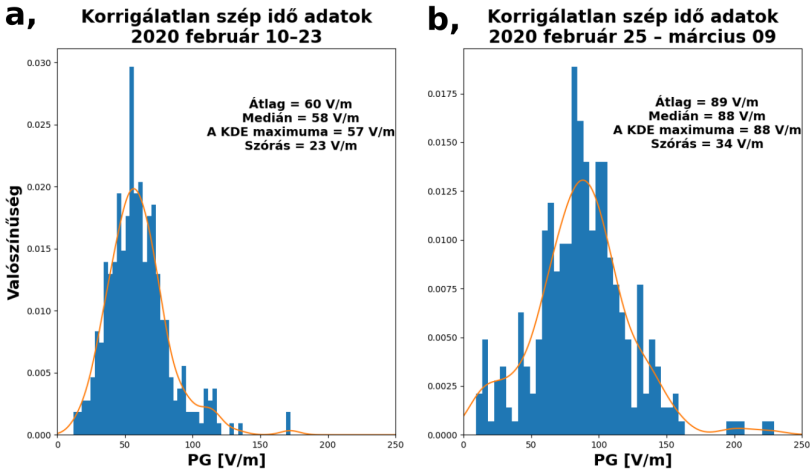
Annak érdekében, hogy a fakivágás nagycenki PG-re gyakorolt hosszabb távú hatásait is vizsgáljuk, kiszámítottuk a 2017 és 2021 közötti szép idő PG évszakos menetét (havi átlagokat képeztünk). Ezáltal tanulmányozhatók a különböző évek megegyező időszakaiban mért PG értékek a fakivágás előtről és utánról.

Eredmények

A keleti facsoport kivágása előtti és utáni geometriát tükröző numerikus modellek alapján kiszámított modellezett növekedés a PG-ben +78% a Boltek EFM-100 field mill helyén (1. ábra).

A 2. ábrán láthatóak a PG adatok hisztogramjai a keleti facsoport 2020-ban történt kivágása előtti és utáni két hétből. A fák kivágása előtti két hét (2020. február 10–23) PG adatainak átlaga, mediánja és a Gauss-féle magfüggvénnyel közelített eloszlásuk maximuma 60 Vm^{-1} , 58 Vm^{-1} és 57 Vm^{-1} (2/a. ábra és I. táblázat). Azonban a fák kivágását követő két hét (2020. február 25 – március 09) PG adataiból származtatott átlag, medián és a Gauss-féle magfüggvénnyel közelített eloszlás maximuma 89 Vm^{-1} , 88 Vm^{-1} és 88 Vm^{-1} (2/b. ábra és I. táblázat). Ez egy 29 Vm^{-1} (+48%), 30 Vm^{-1} (+52%) és 31 Vm^{-1} -es (+54%) növekedésnek felel meg az átlagot, a mediánt és a Gauss-féle magfüggvénnyel közelített eloszlás maximumát tekintve.

Annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy a PG adatokban tapasztalt növekedést nem a PG természetes évszakos változása okozta, kiszámítottuk az előző három év (2017, 2018 és 2019) és 2021 azonos időszakainak PG átlagait (I. táblázat). A PG csökkent 2017-ben, 2019-ben és 2021-ben, illetve stagnált 2018-ban a február 10–23 és a február 25 – március 09 időszakokban, vagyis a 2020-as fakivágás előtti és utáni adott évbeli két-két hetes időszakok között. Ehhez képest a PG drasztikusan nőtt 2020 ugyanazon időszakaiban. Ez alátámasztja a megállapítást miszerint a PG a keleti facsoport kivágása következtében nőtt meg 2020-ban a



2. ábra. A keleti facsoport 2020-ban történt kivágása előtti (a) és utáni (b) két hét PG adatainak hisztogramjai. A narancssárga folytonos vonalak a PG adatok Gauss-féle magfüggvénnyel közelített eloszlásait jelölik, ami a PG adatok valószínűségi sűrűségfüggvényének egy közelítése.

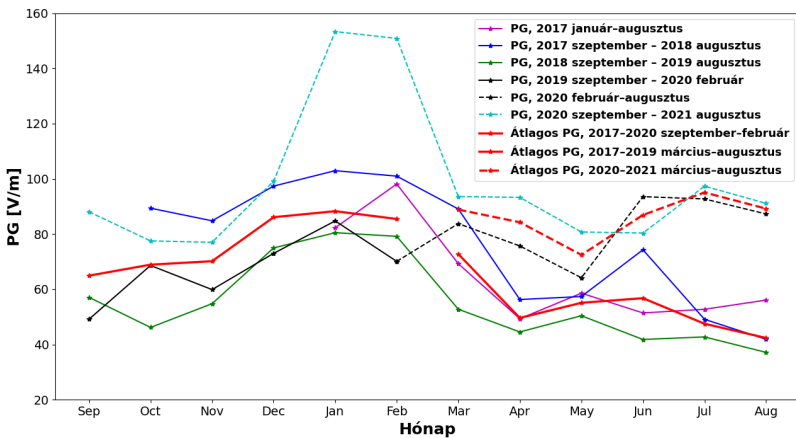
csökkent elektrosztatikus árnyékoló hatás miatt (I. táblázat).

I. táblázat. A február 24-i fakivágás előtti és utáni 14 napból származó PG adatok átlagai a 2017–2021-es években.

	Átlag az adott évben				
	2017	2018	2019	2020	2021
PG, február 10–23 [V/m]	99	95	79	60	158
PG, február 25 – március 09 [V/m]	73	99	67	89	92
Százalékos változás	-26%	+4%	-15%	+48%	-71%

Az északi féltekei szárazföldi állomásokon mért PG éves minimuma nyáron, míg maximuma télen van (Chalmers, 1967, pp. 168–169). A 2017, 2018, 2019 és 2021-ben mért PG követi ezt az évszakos változást (3. ábra). Azonban nem ez a helyzet

2020-ban. A nagyecenki PG 2020-ban csökkenni kezdett februárban, de nem csökkent tovább márciusban. 2020 márciusában egy számottevő növekedés tapasztalható a PG-ben, ami nem felel meg a szabályos évszakos változásnak (3. ábra). Ennek a növekedésnek a legvalószínűbb oka a keleti facsoport kivágása február 24-én. Továbbá 2020 februárját követően a PG magasabb, mint 2017–2019-ben az adott időszakban és ez igaz 2021-re is (3. ábra). 2020-ban egészen februárig a PG jól megfelelt az előző évek átlagainak, mígnem márciustól az adatok inkább a következő évek átlagaihoz állnak közel. 2017–2018 telén kiugróan magas értékeket mért a field mill a következő évek adataihoz képest, aminek az okát eddig még nem sikerült felderíteni.



3. ábra. A nagyecenki PG évszakos változása 2017 és 2021 között. Az adott évek adatait szeptembertől augusztusig ábrázoltuk, hogy jobban látható legyen a február végi fakivágás (ami így a x-tengely közepénél helyezkedik el) előtti és utáni időszakból származó értékek közötti különbség.

A keleti facsoport kivágása okozta modellezett PG növekedés (+78%) felülbecsüli a mért növekményt (+48–52%) (I. táblázat). Azért, hogy ezt a változást hosszabb időskálán is tanulmányozni tudjuk, kiszámítottuk a 2017 és 2021 közötti havi PG átlagok százalékos különbségeit (II. táblázat). A szeptember és február közötti hónapok esetében a 2017 és 2020 közötti havi átlagokat hasonlítottuk össze (az első folytonos piros vonal a 3. ábrán) a 2020–2021-ben mért havi átlagokkal (szaggatott cian színű görbe a 3. ábrán). A március és augusztus közötti hónapok esetében a 2017 és 2019 közötti havi átlagokat hasonlítottuk össze (a második

II. táblázat. A fakivágás utáni időszakból származó havi PG átlagok százalékos változása a fakivágás előtti időszakhoz képest. A 2017 és 2021 közötti időszakból származó adatokat vettük figyelembe. Részletek a szövegben.

Hónapok	Jan	Feb	Már	Ápr	Máj	Jún	Júl
Százalékos különbség	+75%	+73%	+26%	+69%	+31%	+56%	+97%
Hónapok	Aug	Szep	Okt	Nov	Dec	Átlag	
Százalékos különbség	+98%	+66%	+14%	+16%	+21%	+53%	

folytonos piros vonal a 3. ábrán) a 2020–2021-ben mért havi átlagokkal (szaggatott vörös színű görbe a 3. ábrán) (II. táblázat). A havi százalékos különbség igen változónak mutatkozott az év során, nyáron és január–februárban magasabb, míg az év végén alacsonyabb értékek jellemzik (II. táblázat). A havi százalékos különbségek átlaga +53%, jó egyezést mutat a két héttel a fakivágás előtről és két héttel a fakivágás utánról vett PG adatokból származtatott +(48–52)%-os értékkel (2. ábra; I. és II. táblázat). A 2017 január és 2018 augusztus közötti kiugróan magas PG értékek megnövelték a 2017–2019-es átlagot és így csökkentették a havi átlagok közti százalékos különbséget (3. ábra; II. táblázat).

Összegzés és konklúziók

A nagycenki PG mérésektől keletre található facsoportot 2020. február 24-én kivágták. Ez az esemény számottevő, 48–52%-os növekedést okozott a PG értékekben a fakivágás előtti és utáni két hét adatai alapján (2. ábra; I. táblázat).

A fakivágást követő ezen növekedés a PG-ben nem a természetes évszakos változás része, ugyanis a PG csökkent ebben az időszakban 2017, 2019 és 2021-ben is (3. ábra; I. táblázat).

A PG évszakos változása 2020-ban nem követi a természetes évszakos változást (3. ábra). 2020-ban a PG nem kezd el csökkenni február után. Épp ellenkezőleg, számottevő növekedést mutat február és március között. Ezt a jelenséget minden valószínűség szerint a keleti facsoport 2020. február 24-i kivágása okozta csökkent elektrosztatikus árnyékoló hatással magyarázhatjuk.

A numerikus modellezés eredményeképpen kapott százalékos növekedés a PG értékekben +78%, ami nagyobb, mint a mért növekedés (48–52%). Figyelembe véve azonban, hogy a természetes évszakos változás következtében a PG számottevően

csökken az évek abban az időszakában és a PG értékeknek egyébként is nagy a szórása, a modellezett és a mért százalékos növekedés közti egyezés elfogadható. A 2020–2021-es és a 2017–2019-es havi átlagok közti százalékos eltérés is igen nagy változatosságot mutat +14%-tól (októberben) +98%-ig (augusztusban) (II. táblázat). A 2017 január és 2018 augusztus közötti nagy PG értékek csökkentik az átlagos százalékos növekedést ezzel növelve a modellezett és a mért értékek közti különbséget (3. ábra).

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás a magyar Nemzeti, Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával jött létre (pályázat azonosítószáma: K115836).

Irodalomjegyzék

- Bencze, P. & Márcz, F. (1981). The geophysical observatory near Nagycenk II. Atmospheric electric and ionospheric measurements. *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica*, 16, 353–357
- Bór, J., Sători, G., Barta, V., Szabóné-André, K., Szendrői, J., Wesztergom, V., Bozóki, T., Buzás, A., & Koroncay, D. (2020). Measurements of atmospheric electricity in the Széchenyi István Geophysical Observatory. Hungary, *History of Geo- and Space Sciences*, 11, 53–70, <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>
- Buzás, A., Barta, V., Horváth, T., & Bór, J. (2021). Revisiting the long-term decreasing trend of atmospheric electric potential gradient measured at Nagycenk, Hungary, Central Europe. *Annales Geophysicae*, 39, 627–640, <https://doi.org/10.5194/angeo-39-627-2021>
- Chalmers, J. A. (1967). *Atmospheric Electricity* (2nd ed.). United Kingdom, London: Pergamon Press, 515 p.
- Harrison, R. G., & Nicoll, K. A. (2018). Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179, 239–250, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.008>
- Lees, C. H. (1915). On the Shapes of Equipotential Surfaces in the Air near Long Walls or Buildings and on their Effect on the Measurement of Atmospheric Potential Gradients. *Proceedings of the Royal Society A*, 91(631), 440–451, <https://www.jstor.org/stable/93515>

- Lucas, G. M., Thayer, J. P., & Deierling, W. (2017). Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(2), 1158–1174, <https://doi.org/10.1002/2016JD025944>
- Márcz, F., & Harrison, R. G. (2003). Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagyecenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew. *Annales Geophysicae*, *21*(11), 2193–2200, <https://doi.org/10.5194/angeo-21-2193-2003>
- Nicoll, K. A., Harrison, R. G., Barta, V., Bór, J., Brugge, R., Chillingarian, A., Chum, J., Georgoulas, A. K., Guha, A., Kourtidis, K., Kubicki, M., Mareev, E., Matthews, J., Mkrtychyan, H., Odzimek, A., Raulin, J.-P., Robert, D., Silva, H. G., Tacza, J., Yair, Y., & Yaniv, R. (2019). A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *184*, 18–29, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.003>
- Rycroft, M. J., Nicoll, K. A., Aplin, K. L., & Harrison, R. G. (2012). Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *90–91*, 198–211, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.03.015>
- Williams, E., Markson, R., & Heckman, S. (2005). Shielding effects of trees on the measurement of the Earth’s electric field: Implications for secular variations of the global electrical circuit. *Geophysical Research Letters*, *32*(19), L19810, <https://doi.org/10.1029/2005GL023717>

ELF zajteszt a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban

BOZÓKI TAMÁS^{1*}, BÓR JÓZSEF¹, PIRI DÁNIEL¹, NOVÁK ATTILA¹ ÉS
MOLNÁR CSABA¹

¹Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

Absztrakt

2020. július 9-én részletes zajvizsgálatot végeztünk a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban a nagyon alacsony frekvenciájú (VLF; 3-30 kHz) és az extrém alacsony frekvenciájú (ELF; 3 Hz - 3 kHz) sávban, az obszervatóriumban működő különböző elektromos berendezések által keltett elektromágneses zajok felmérése céljából. Egy körülbelül 3 órás tesztidőszak folyamán egyesével leállítottuk az obszervatórium méréseit, az épületek áramellátását, valamint a napelemek és az akkumulátorok töltését, végül pedig néhány percre megszakítottuk a közeli Fertőboz községből érkező fő áramellátást is. A tesztidőszakra egy pár, akkumulátorról működtetett indukciós magnetómetert telepítettünk, melyek az ELF sávú zajban bekövetkezett változásokról szolgáltatott információt. Bár az obszervatóriumban lévő belső zajforrások kiküszöbölésével az ELF sávú zajszennyezés csökkent, úgy tűnik, hogy az obszervatóriumon kívülről származó zajforrások túl erősek, és elsősorban ezek nehezítik meg a Schumann-rezonanciák helyi megfigyelését a mágneses térben. Ezért egy új helyszínt kell keresnünk egy állandó mágneses ELF állomás számára.

Kulcsszavak: Extrém alacsony frekvenciák, Schumann-rezonanciák, ELF zajszennyezés.

Motiváció

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban (SZIGO) az indukciós tekercsekkel végzett légköri mágneses méréseket különböző, mesterséges eredetű zajok

*Levelező szerző: Bozóki Tamás (bozoki.tamas@epss.hu)

szennyeznek, melyek megakadályozzák a Schumann-rezonanciák (SR-ák) észlelését (Sátori és társai, 2013; Bór és társai, 2020). Ezt a zajszennyezést általában az obszervatórium közelében futó vasútvonalnak tulajdonítjuk, melyet jóval az obszervatórium létesítése után villamosítottak. 2020 nyarán a felújított VLF antenna újbóli felszereléséhez kapcsolódóan elektromágneses zajok részletes felmérését végeztük el. Ez a felmérés lehetővé tette, hogy újra megvizsgáljuk az ELF sávú zajok eredetét, mely által lehetővé vált az obszervatórium területéhez köthető belső- és külső eredetű ELF sávú zajok elkülönítése.

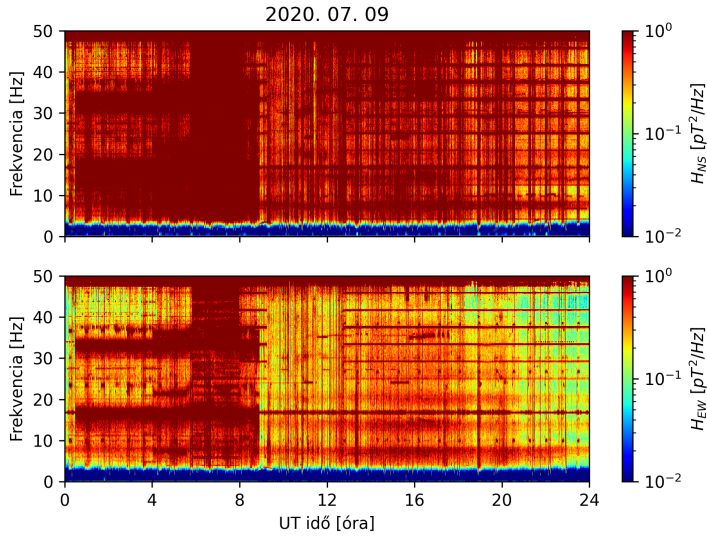
A tesztmérések leírása

Az obszervatórium közelében egy pár indukciós magnetométert helyeztünk el ideiglenesen, melyekkel 2020. július 7. és 13. között végeztünk méréseket. A mintavételi frekvenciát 500 Hz-re állítottuk be. A mérés akkumulátorról működött, ami a tesztidőszak alatt is biztosította a folyamatos áramellátást. A körülbelül 3 órás zajvizsgálatra 2020. július 9-én került sor, világidőben (UT) 08:45 és 11:30 között. Az obszervatórium rendszeres méréseit, az épületek áramellátását, valamint a nap-elemeket és az általuk töltött akkumulátorokat egyenként lekapcsoltuk ebben az időszakban. Végül a közeli Fertőboz faluból érkező fő áramellátást is megszakítottuk 6-7 percre 11:22 és 11:29 UT között.

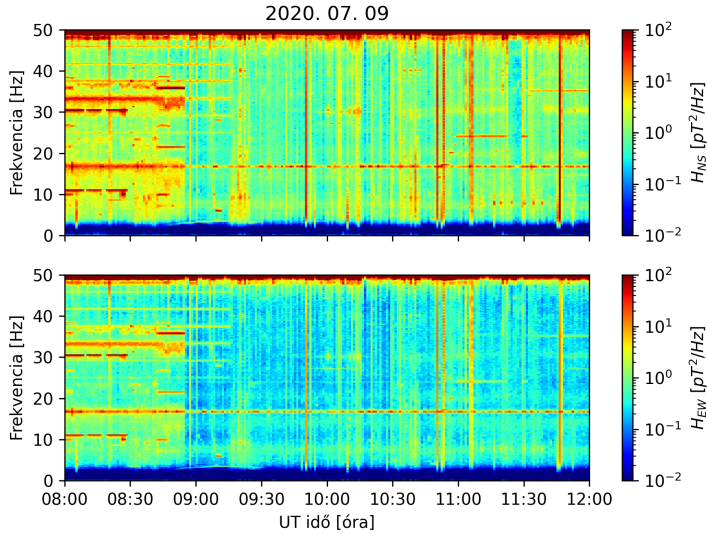
Eredmények

Az 1. ábra a H_{NS} (észak-déli) és H_{EW} (kelet-nyugati) térkomponenseknek megfelelő dinamikus spektrumokat mutatja a zajvizsgálat napján. Látható, hogy a mérések erősen zajszennyezettek. A zajszennyezés a H_{NS} térkomponensben jelentősebb, mint a H_{EW} térkomponensben. Az utóbbiban halványan látható a SR mintázat, leginkább éjfél előtt, amikor a zajszennyezés a legalacsonyabb ezen a napon. A zajvizsgálat során, amely 08:45 és 11:30 UT között zajlott, megfigyelhető bizonyos keskenysávú zajok (például 30 Hz körül) csökkenése. Egy intenzív, szélessávú zaj, amely mindkét térkomponensben jelen volt, szintén eltűnt 9:00 UT körül, de nem világos, hogy ennek volt-e köze a zajvizsgálathoz, ugyanis a zaj a teszt befejezését követően nem jelent meg újra.

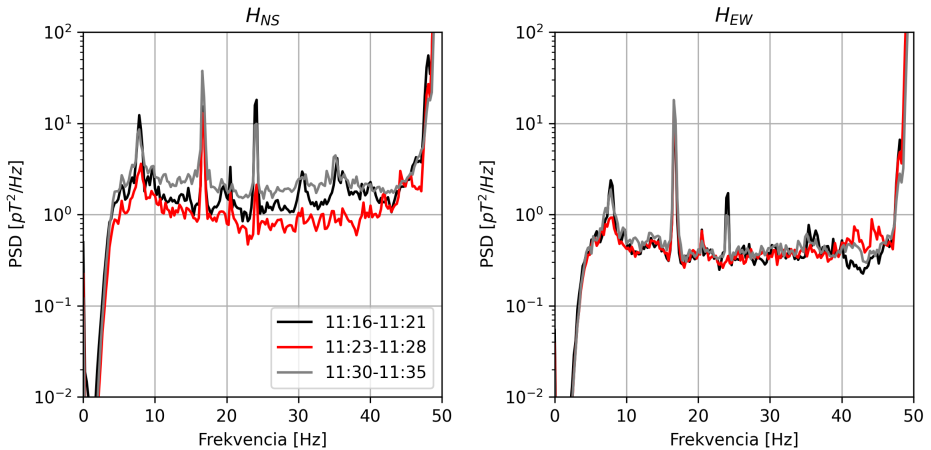
A 2. ábra a tesztidőszakra nagyított nézetet mutatja. Ezen az ábrán a színskála felső határát módosítottuk, hogy az erősebb zajok struktúrája láthatóbb legyen. A SR frekvenciák a tesztidőszak alatt felismerhetőbbek a H_{EW} térkomponensben, de halványan megjelennek a H_{NS} térkomponensben is. A zajszennyezés azonban még



1. ábra. A H_{NS} (felső panel) és H_{EW} (alsó panel) térkomponenseknek megfelelő dinamikus spektrumok 2020. július 9-én. A zajvizsgálat 08:45 UT-kor kezdődött és 11:30 UT-kor ért véget.



2. ábra. Az 1. ábrának megfelelő dinamikus spektrumok a 8:00 - 12:00 UT időszakra.



3. ábra. 6 perces időintervallumban átlagolt teljesítménysűrűség (PSD) spektrumok, melyek az obszervatórium áramellátásának teljes leállása előtti (11:16-11:21 UT), alatti (11:23-11:28 UT) és utáni (11:30-11:35 UT) időintervallumoknak felelnek meg 2020. július 9-én.

mindig magas mindkét térkomponensben. Megjegyzendő, hogy 11:30 UT körül a H_{NS} térkomponens dinamikus spektrumában egy keskeny idősáv látható, melynek zajszennyezettsége jelentősen csökkent. Úgy tűnik, hogy ez az időintervallum pontosan egybeesik az obszervatórium áramellátásának teljes lekapcsolásával, amely 11:22 és 11:29 UT között történt. Az ELF zajviszonyok vizsgálatához a teljes leállás előtt (11:16-11:21 UT), alatt (11:23-11:28 UT) és után (11:30-11:35 UT) 6 perces intervallumokra átlagoltuk a spektrumokat (3. ábra). Egyértelmű, hogy az obszervatórium áramellátásának teljes megszakítása jelentősen csökkentette a H_{NS} térkomponens zajszennyezettségét. A SR sávok azonban még mindig nem igazán látszódnak a spektrumban ebben az időintervallumban sem. A fennmaradó zajszennyezésnek az obszervatóriumon kívülről kell származnia, valószínűleg a közeli villamosított vasútvonallal összefüggésben. Másrészt a H_{EW} térkomponens zajszintje gyakorlatilag azonos mindhárom időintervallumban, ami arra utal, hogy az obszervatórium belső zajforrásai irányspecifikusak.

Megállapíthatjuk, hogy még az obszervatórium összes belső zajforrásának kiküszöbölésével sem tudunk tiszta ELF spektrumokat kapni (ami önmagában is egy komoly, és jelen pillanatban megoldatlan technikai kihívást jelent), ezért egy új helyszínre van szükség az állandó mágneses ELF állomás számára, ahol a Schumann-

rezonanciákat alacsony zaj mellett lehet detektálni.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) NKFIH-K115836 számú projektje támogatta.

Irodalomjegyzék

- Bór, J., Sántori, G., Barta, V., Szabóné-André, K., Szendrői, J., Wesztergom, V., Bozóki, T., Buzás, A., & Koroncay, D. (2020). Measurements of atmospheric electricity in the Széchenyi István Geophysical Observatory, Hungary. *History of Geo- and Space Sciences*, 11(1), 53-70, <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>
- Sántori, 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*, 34, 255-292, <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9222-6>

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban zajló ELF mérések automatikus megjelenítése

SZABÓNÉ ANDRÉ KAROLINA^{1*}, BOZÓKI TAMÁS¹, BÓR JÓZSEF¹,
SZABÓ CSONGOR¹ ÉS SÁTORI GABRIELLA¹

¹Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

Absztrakt

2020. július óta a Nagycenk közelében található Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban (SZIGO, IAGA kód: NCK) mért extrém alacsony frekvenciás (ELF) adatok automatikusan megjelennek az obszervatórium honlapján (<http://nckobs.hu/data/sr/>). Az automatikusan generált ábrákon a H_{NS} , H_{EW} és E_Z térkomponensek dinamikus spektrumai, illetve az első három Schumann-rezonancia (SR) módus amplitúdója és frekvenciája jelenik meg. Ez utóbbi mennyiségeket a komplex demoduláció módszerével, az E_Z mérésből számoljuk. Ez a fontos fejlesztés lehetővé teszi a mérések állapotának folyamatos nyomonkövetését. A nyilvánosság számára jelenleg csak az aktuális nap ábrája érhető el, viszont a kutatóintézet munkatársai hozzáférnek az archivált ábrákhoz is. A weblap látogatói statisztikája azt mutatja, hogy számottevő az érdeklődés a méréseink iránt.

Kulcsszavak: Schumann-rezonancia, extrém alacsony frekvencia, adatfeldolgozás, adatmegjelenítés.

Motiváció

A SZIGO-ban a globális elektromos áramkör váltóáramú jelenségeinek, különösen a Schumann-rezonanciák (SR-ák), folyamatos monitorozása az 1990-es évek elején kezdődött egy gömbantenna telepítésével (Sátori és társai, 1996, 2013; Bór és társai, 2020). A rendszer 1996-ban két indukciós magnetométerrel egészült ki. Az első három SR módus modális frekvenciáinak és amplitúdóinak meghatározására a

*Levelező szerző: Szabóné André Karolina (szabone.a.karolina@epss.hu)

komplex demoduláció algoritmust találtak a legmegfelelőbbnek. 2003-ig csak az így kapott spektrális paramétereket archiválták. 2003-ban a rendszer továbbfejlesztésével már a nyers idősorok tárolása is lehetővé vált.

Az utóbbi években a mérőrendszer elöregedése miatt egyre több és több probléma volt a mérésekkel. Emiatt felmerült az igény a mérések folyamatos monitorozására. Az áttekinthető ábrák általában standard, ingyenesen elérhető produktumnak számítanak más geofizikai obszervatóriumokban (pl. Sodankylä Geophysical Observatory, <https://www.sgo.fi/>). Ezért úgy döntöttünk, hogy kifejlesztjük a saját programunkat, ami automatikusan megjeleníti az ELF adatainkat az obszervatórium honlapján.

Megvalósítás

Az automatikus ábrázoló program 10 percenként dolgozza fel a nyers adatfájlokat. Ezeket az .fw4 kiterjesztésű adatfájlokat egy Symmetric Research (SymRes) 4 csatornás adatgyűjtőből kapjuk. Egy ütemezett batch fájl elindít egy Python programot, ami végrehajtja a komplex demodulációt és dinamikus spektrumokat számol 10 perc hosszú adatsorokból. A feldolgozott időszak vége mindig 5 perccel korábban van, mint a program futásának kezdete. A dinamikus spektrumok spektrális paraméterei 10 másodperces időablak és 5 másodperces eltolás alkalmazásával számíthatók. Ezt követően a program az 1 perces átlagokat írja ki .csv fájlokba. Mindhárom adatcsatornához külön fájl tartozik. Az első három SR módus amplitúdóját és frekvenciáját csak az E_z komponensből számoljuk a komplex demoduláció algoritlussal. Ezek az adatok egy negyedik .csv fájlba kerülnek. A program a .csv fájlkat minden nap elején létrehozza és a nap folyamán 10 percenként hozzáfűzi az újabb adatokat. A program utolsó része a .csv fájlokban lévő adatok beolvasása és ábrázolása.

A mágneses tér észak-déli (angolul North-South, rövidítve: NS) komponensét még az eredeti, 1996-ban telepített indukciós tekercs méri. 2016 novemberétől a kelet-nyugati (angolul East-West, rövidítve: EW) komponensét egy LEMI-120 mágneses antenna regisztrálja, ugyanis az eredeti antennát ki kellett cserélni. Fontos különbség, hogy a két antenna eltérő érzékenységgel és átviteli karakterisztikával rendelkezik. Annak érdekében, hogy mindkét antennából érkező jelről megfelelő képet kapjunk, a dinamikus spektrumot bemutató ábrán eltérő színskálát alkalmazunk. A színskála legnagyobb értéke a H_{NS} komponensét regisztráló régi antenna esetében 57%-kal nagyobb, mint a H_{EW} komponensét regisztráló új LEMI antenna

esetében.

Az automatikusan generált ábrán öt al-ábra látható (1. ábra). Az első három a H_{NS} , H_{EW} és az E_z térkomponensek dinamikus spektrumát mutatja, az utolsó kettő pedig a komplex demoduláció eredményét: az E_z térkomponensből számolt amplitúdókat és frekvenciákat. Az első három SR módus frekvenciája sorban nagyjából 7, 9; 14, 1; illetve 20 Hz. Ahhoz, hogy egy grafikonon ábrázolhassuk ezeknek az idősorait, három y tengelyt használunk, amelyeket különböző színnel jelölünk. Az ábrán a feliratok angol nyelvűek, mivel az obszervatórium honlapja is angol nyelvű.

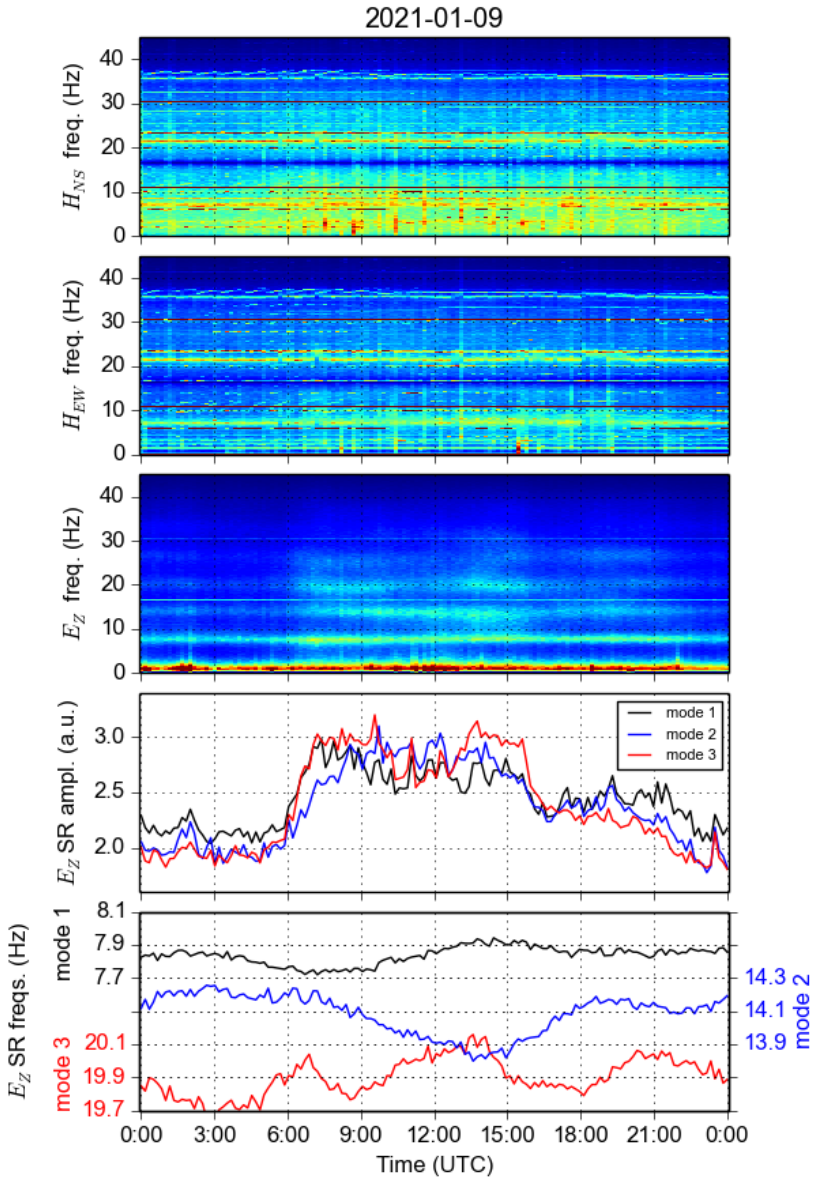
Az ábra mindig ugyanolyan néven van elmentve egy .png fájlba. A képfájl FTP kapcsolaton keresztül felkerül az nckobs.hu-ra és megjelenik a honlapon. A nap végén, amikor az ábrán már egy teljes nap adatai szerepelnek, az ábra másik néven is elmentődik, amely név már tartalmazza az adott nap dátumát. Ez a fájl is feltöltődik az nckobs.hu-ra belső használatra, illetve egy NAS tárhelyre is az archivált .fw4 adatfájlok mellé.

A programot úgy állítottuk be, hogy ha a komplex demodulációval nem lehet meghatározni az amplitúdókat és frekvenciákat, akkor egy figyelmeztető e-mailt küld arról, hogy elveszett a gömbantenna jele. A program akkor is küld emailt, ha helyreállt a jel.

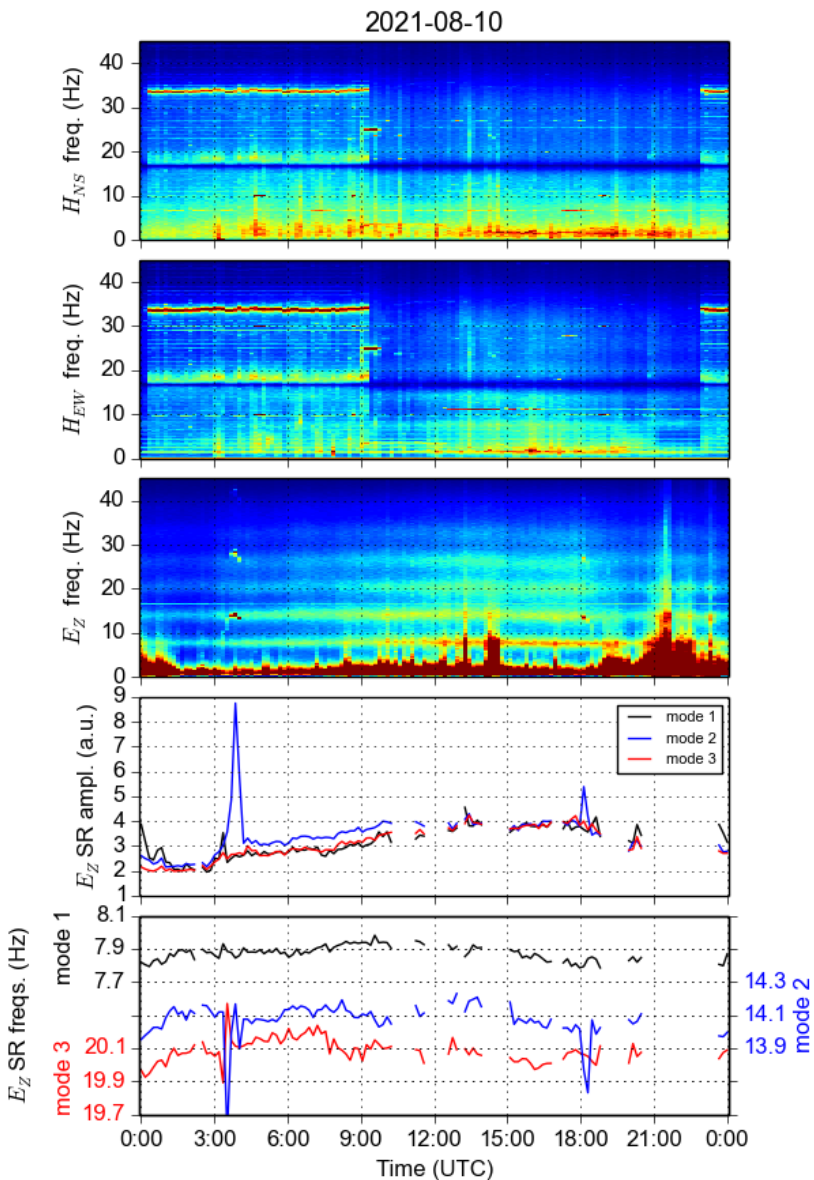
Az ábráról leolvasható információk

Az ábra elsődleges szerepe az, hogy segít figyelemmel kísérni a SR mérések állapotát. A színskálákat úgy állítottuk be, hogy jól látszódnak a SR csúcsok amikor csendesek a helyi körülmények (pl. nincs erős szél, csapadék, közeli zivatarok, amelyekben erős elektromos aktivitás zajlik az ELF sávban is). Ha a helyi körülmények zavartak, akkor a SR csúcsok nem láthatók a nagy zaj miatt. Ezekben az esetekben a komplex demoduláció nem tud megfelelően működni és hibás értékeket produkál vagy nem ad eredményt. Emiatt az automatikus adatfeldolgozó kód által generált ábrákon lévő görbék és értékek nem tekinthetők referenciának. Az adatokat és eredményeket ellenőrizni kell, mielőtt bármiféle módon értelmeznénk őket vagy bármilyen következtetést le lehetne vonni belőlük.

A felső három panelen látható dinamikus spektrum (1. ábra) jól mutatja, hogy a SZIGO-ban a vertikális elektromos térkomponensben a SR-ák nagyon jól mérhetőek. A szokásos természetes és a kevés mesterséges zavartól eltekintve a SR jelenség jól felismerhető. A mesterséges eredetű zavarok egyik jellemzője, hogy hirtelen kezdődnek és hirtelen érnek véget. Elsődlegesen ez segít elválasztani a mesterséges



1. ábra. A SZIGO-ban, 2021. január 9-én mért Schumann-rezonancia adatokat bemutató, automatikusan generált ábra.



2. ábra. A SZIGO-ban, 2021. augusztus 10-én mért Schumann-rezonancia adatokat bemutató, automatikusan generált ábra.

és természetes zajokat egymástól, mivel ez utóbbiak felfutása és lecsengése általában fokozatos. Az E_z jelben az egyik zavaró, mesterséges zaj forrása az obszervatórium elektromos áramhálózatában található inverter. A SZIGO-ban ugyanis működik egy napelemes rendszer. Ez a mesterséges zaj általában hajnalban és szürkületkor figyelhető meg, amikor még, illetve már nem jut elég fény a napelemekre és az akkumulátorokról való működés folyamatosan ki-be kapcsolódik (2. ábra).

Az 1. és a 2. ábra egyaránt mutatja, hogy a SZIGO-ban a horizontális mágneses mező erősen szennyezett keskeny- és szélessávú zajokkal. Emiatt a SR-ák az idő nagy részében nem értékelhetők ki megfelelően ezekben a jelekben. Néha, pár órás időszakokban a zajszint alacsony, így az első vagy a második SR módus kivethető a H_{EW} térkomponens dinamikus spektrumában (2. ábra). Ez azt mutatja, hogy az ELF sávú zajszintek a SZIGO-ban irányfüggőek. Valószínűleg horizontális elektromos áramok okozzák az erős zajt a mágneses térben a SZIGO-ban. Ezek az elektromos áramok a talaj felső rétegeiben vízszintesen folyhatnak, és forrásuk nagy valószínűséggel az obszervatóriumtól alig néhány km-re délre futó villamosított vasútvonalak forgalmát kiszolgáló villamosenergia-rendszer tökéletlen, szivárgó földelése.

Látogatói statisztika

Ebben a bekezdésben bemutatunk néhány érdekes információt a honlapunk (<http://nckobs.hu/data/sr/>) látogatóiról. A bemutatott adatokat 2021. szeptember 9-én összegeztük. A látogatottságot egy ingyenes szolgáltatás, a clicky.com használatával követjük nyomon. A 2021. augusztus 13. és szeptember 9. közötti 28 napos időszakban 1149-en látogatták meg a honlapunkat az intézetből származó megtekintéseket nem számítva. A látogatók száma mellett a követőprogram a látogatók földrajzi elhelyezkedéséről is gyűjti az információt. A 28 napos időszak során a legtöbb látogató magyarországi volt (1054, 92%). Külföldről is voltak érdeklődők, mégpedig a következő országokból (a látogatók száma zárójelben szerepel minden ország neve után): Szlovákia (17), Ausztria (16), Románia (14), Egyesült Királyság (12), Németország (9), USA (6), Horvátország (5), Szerbia (5), Csehország (4), Franciaország (2), Belgium (1), Hollandia (1), Írország (1), Spanyolország (1) és Svájc (1). A látogatók nagy száma igazolja, hogy méréseink iránt jelentős az érdeklődés.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K115836-os számú OTKA pályázata támogatta.

Irodalomjegyzék

- Bór, J., Sántori, G., Barta, V., Szabóné-André, K., Szendrői, J., Wesztergom, V., Bozóki, T., Buzás, A., & Koroncay, D. (2020). Measurements of atmospheric electricity in the Széchenyi István Geophysical Observatory, Hungary. *History of Geo- and Space Sciences*, 11(1), 53-70, <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>
- Sántori, 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*, 34, 255-292, <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9222-6>
- Sántori, G., Szendrői, J., & Verő, J. (1996). Monitoring Schumann resonances – I. Methodology. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58(13), 1475-1481, [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00145-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00145-X)

Geomágneses megfigyelő rendszer a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban

LEMPERGER ISTVÁN^{1*}, SZENDRŐI JUDIT¹, SZABÓ CSONGOR¹, KUSLITS
LUKÁCS¹, KIS ÁRPÁD¹, SZALAI SÁNDOR M.¹, MOLNÁR CSABA¹ ÉS
WESZTERGOM VIKTOR¹

¹Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

Absztrakt

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban (SZIGO) már több, mint hat évtizede folyik a felszíni geoelektromos és geomágneses tér megfigyelése. Az Obszervatórium a geomágneses megfigyelő állomásokat tömörítő nemzetközi hálózat, az INTERMAGNET egyik legjobb minősítéssel kitüntetett tagja, melyet a folyamatos és nagy pontosságú adatszolgáltatás révén érdemelt ki (www.intermagnet.org). A geomágneses megfigyelő rendszer nemrégiben újult meg, illetve egészült ki egy redundáns digitalizáló-adatgyűjtő-szerver lánccal, melynek révén a fluxgate magnetóméter analóg jelét két független rendszer digitalizálja, rendezi ASCII fájlalba, valamint továbbítja egy-egy adatszerveren telepített SQL adatbázisba. A geomágneses indukció révén az előbbihez szervesen kapcsolódó fizikai mennyiség, a geoelektromos tér mérésére szolgáló rendszer a közeljövőben szintén megújul, melynek eredményeképpen egy nagyobb dinamikatarományt, jobb felbontásban leképező rendszer kerül beüzemelésre. Az alábbiakban az újonnan telepített geomágneses mérőrendszer kerül bemutatásra, valamint néhány, az új rendszerrel, az elmúlt 12 hónapban regisztrált SSC esemény.

Kulcsszavak: geomágneses megfigyelés, INTERMAGNET.

Bevezetés

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban a '60-as évek elején készült el két épület, mágneses tekintetben semleges építőanyagok felhasználásával. Az egyik a

*Levelező szerző: Lemperger István (lemperger.istvan@epss.hu)

folytonos geomágneses regisztrálásnak helyt adó ún. *relatív ház*, míg a másik az abszolút geomágneses elemek meghatározására szolgáló *abszolút ház*. A H (horizontális komponens), D (deklináció) és Z (vertikális összetevő) geomágneses elemek folyamatos megfigyelése és az abszolút értékek heti rendszerességű meghatározása 1960 júliusában kezdődött. Ekkor két darab, fotópapírra regisztráló, La Cour típusú dán variométer képezte a műszerpark alapját, valamint két QHM (quartz-horizontalmagnetometer), egy BMZ (balance-magnetic-zero), egy mágneses deklinatórium és egy Föld induktor (Askania). Ez a műszeregyüttes szolgált a geomágneses tér meghatározására egészen 1989-ig, mikortól az abszolút értékek megfigyelése alapját egy vektor proton magnetométer képezte. 1991-től ugyanez egy proton magnetométer (ELSEC 820) és egy triaxiális fluxgate magnetométer alkalmazásával kerül meghatározásra. Ugyancsak 1991-től a relatív változások folyamatos rögzítését a BGS által telepített ARGOS rendszer végezte s az első néhány évben az analóg jel fotópapírra rögzítése is üzemben maradt.

A geomágneses adatsorok 1961-től kezdődően minden évben, a földi áram megfigyelésekkel együtt, kiadvány formájában is megjelentek. A tellurikus adatok a geomágneses variációk értelmezésében fontos szerepet játszanak, közvetlen információt szolgáltatva az utóbbiak felszín alatti indukciós hatásáról. A számított helyi lineáris geomágneses aktivitási indexek 7 nT-s lépésekben mérték a felszíni mágneses tér időablakra eső változékonyságát. Az obszervatóriumi jelentésekben a geomágneses elemek havi és éves átlagértékei jelentek meg.

Az Obszervatórium 1993-ban vált a geomágneses megfigyelő állomásokat tömörítő INTERMAGNET hálózat tagjává, mely szigorú követelményeket támaszt a továbbított adatok minősége, folytonossága és megbízhatósága tekintetében. Az adatok az első években a METEOSAT műholdon keresztül kerültek továbbításra, majd később napi rendszerességgel, email tartalom formájában jutottak el az ún. GIN (geomagnetic information node) szerverekig. A geomágneses adatsorok az INTERMAGNET oldaláról CD-ROM, illetve közvetlen adatletöltés révén bárki számára elérhetőek.

Az Obszervatórium IAGA kódja NCK, földrajzi koordinátái alább: $\Phi = 47^{\circ}38'$ (N), $\lambda = 16^{\circ}43'$ (E),

Tengerszint fölötti magasság = 153.70 m,

McIllwain L = 1.9.

A percnkénti mintavételezés idővel elégtelennek bizonyult az ionoszférikus folyamatok felszíni megnyilvánulásainak vizsgálata céljára, valamint a magnetoszférikus forrásjelenségek elemzése, azonosítása tekintetében. Szükségessé vált a rendszer to-

vábbfejlesztése, hogy az Observatórium továbbra is az INTERMAGNET közösség fontos tagját képezhesse.

A geomágneses mérőrendszer továbbfejlesztése

Egy megbízható, pontos és hosszú távon is adathiány mentes mérést garantáló mérőrendszer felállítása csak az alkotórészek alapos és körültekintő megválasztása révén valósítható meg. A lánc első tagja maga a befogadó épület, amely eredetileg is a célnak megfelelően szigorú feltételek mellett épült, csak mágneses szempontból semleges építőanyagok, építőelemek felhasználásával. A **relatív ház** tetőszerkezete 2020-ban került felújításra.

A rendszer magját a DTU Space által gyártott **FGE fluxgate magnetométer** alkotja, mely évtizedek óta megbízhatóan, stabil alapvonal mellett működik jónéhány INTERMAGNET obszervatóriumban világszerte. Az FGE analóg kimenete, mely a három mágneses komponens pillanatnyi értékével arányos feszültség mellett a detektor és a szenzor helyén mérhető hőmérsékletről is információt nyújt, a mérőlánc következő eleme, melynek kimenete az A/D konverter bemeneti jelét képezi. A **SYMRES USB8CH** csatornánként független 24 bites valós idejű folyamatos adatgyűjtést tesz lehetővé, DC-10 kHz mintavételi frekvencián, jelen esetben 20 Hz-es mintázási gyakoriság mellett alkalmazva. A differenciális analóg bemenetek ± 4 V értékeken futnak telítésbe. A digitalizáló egység USB porton keresztül kommunikál az adatgyűjtő számítógéppel és a digitalizált mérési minták mellett a pillanatnyi GPS időt is továbbítja. Az adatok az adatgyűjtő **BeagleBone Black** mikroszámítógépen kerülnek feldolgozásra és tárolásra 5 percnyi adatsor méretű ASCII fájlok formájában. A rendszer szoftver mellett a **DVM** biztosítja az adatgyűjtés praktikus testreszabását, a pipelined architektúra pedig lehetővé teszi további adatfeldolgozó, illetve adatbáziskezelő modulok közbeiktatását, biztosítva annak lehetőségét, hogy a hardver-szoftver együttes alkalmazását a legkülönbözőbb adatgyűjtő rendszerek kialakítására. A mikroszámítógép operációs rendszere és az adatgyűjtő szoftver a hosszútávú folytonos regisztrálás biztosítása érdekében 16 GB ipari felhasználásra szánt SD kártyáról fut. A gyári adatgyűjtő modulok láncolata a konkrét alkalmazásnak megfelelően kiegészítésre és további bővítésre került egy **INTERMAGNET GIN-be történő adattovábbítást biztosító modullal**, valamint egy helyi szerverre történő másodpercenkénti **SQL táblába töltést ellátó szkripttel**. Ez utóbbi a naptári napoknak megfelelő táblába tölti a 24 óránál régebbi adatokat, valamint az aktuális mintákat egy 24 órányi adatsort tartalmazó táblába helyezi el.

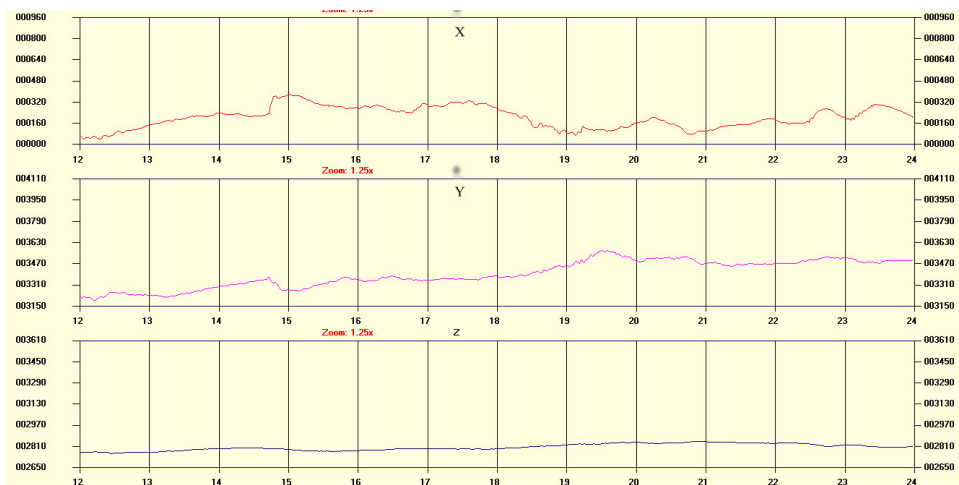
Kiemelt geomágneses események

A (Storm) Sudden Commencement (SSC) néven ismert jelenség a geomágneses északi komponensben beálló hirtelen változás formájában figyelhető meg, amely egy geomágneses vihar kezdetét jelöli, vagy egy legalább órás időtartamú fokozott aktivitású időszak elején azonosítható. A Sudden Commencement és a Solar Flare Effect (SFE) események geomágneses obszervatóriumok magnetogramjain azonosítható koherens változások alapján kerülnek meghatározásra. Az állomások nevei és azok három karakterből álló azonosító kódja az IAGA Bulletin 32. számában található az állomások éves geomágneses adataival együtt. 1966 januárja előtt ezek az adatok a Journal of Geophysical Research-ben jelentek meg rendszeresen, míg 1966-70 között a negyedévente megjelenő Solar-Geophysical Data közölte. 1970 decemberétől a geomágneses események azonosításához elegendő, ha legalább öt obszervatórium adatai alapján igazolható, s havi rendszerességgel kerül leközlésre. 2007-től az SSC események az ebroi obszervatórium adatai alapján kerülnek azonosításra (Curto és társai, 2007).

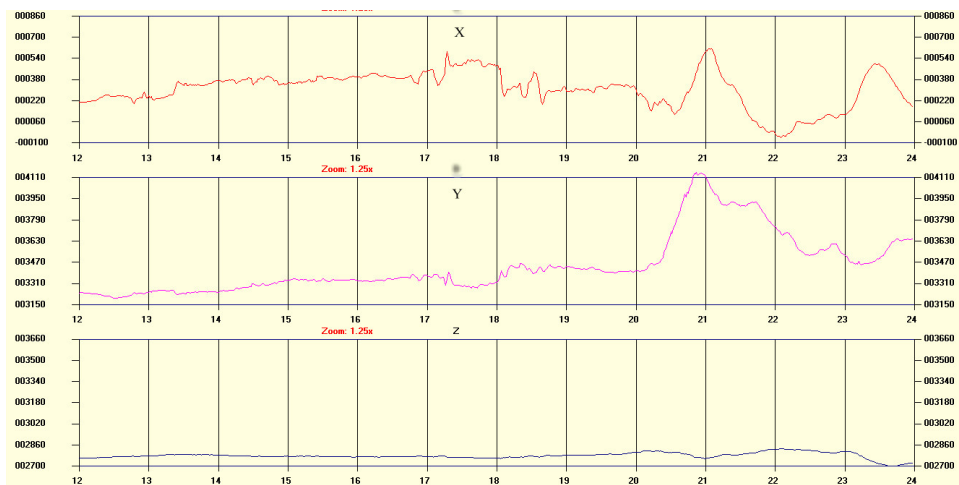
Az elmúlt 12 hónapból hét azonosított eseményhez tartozó regisztrátum részletet jelenít meg az 1-7. ábra, amelyek a SZIGO regisztrátumain is egyértelműen igazolhatók, valamint az I. táblázat listázza ezek fontosabb jellemzőit.

I. táblázat. Legalább öt geomágneses obszervatórium regisztrátumán azonosított SSC események az elmúlt 12 hónapból.

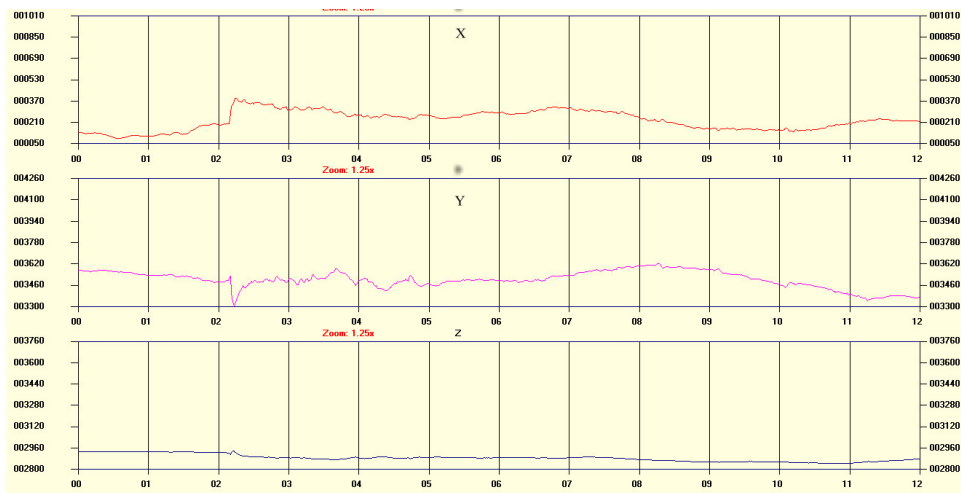
YYYY	MM	dd	hh	min	Amplitúdó (nT)					Értékelés				Típus	
2020	10	19	14	41	13.4	9.5	14.7	21.1	22.1	3	2	2	2	3	SSC
2020	10	23	13	20	7.3	7.3	11.4	11	10.8	0	1	1	1	1	SSC
2020	12	10	2	9	20.2	18.5	19.5	25.1	21.8	3	3	3	3	3	SSC
2021	5	12	6	37	27.7	25.5	20.7	46.3	36.4	2	3	2	3	3	SSC
2021	5	26	12	44	13.1	25.1	17.9	20.8	26.9	3	3	3	3	3	SSC
2021	6	2	13	30	8.8	9.8	11.6	13.3	14.8	1	1	2	3	2	SSC
2021	8	27	1	14	12.4	12.8	17.5	12.1	15.7	2	1	1	1	2	SSC



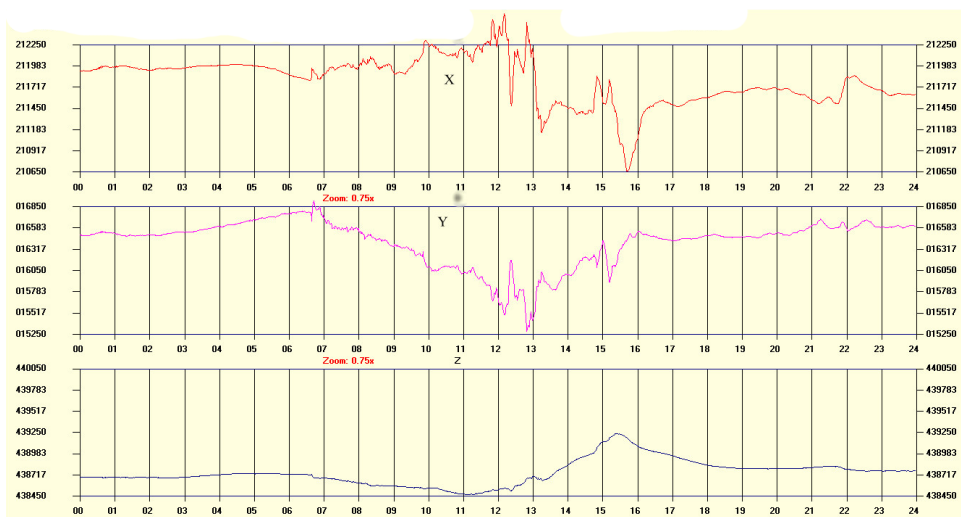
1. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2020.10.19. (H , +13.9 nT).



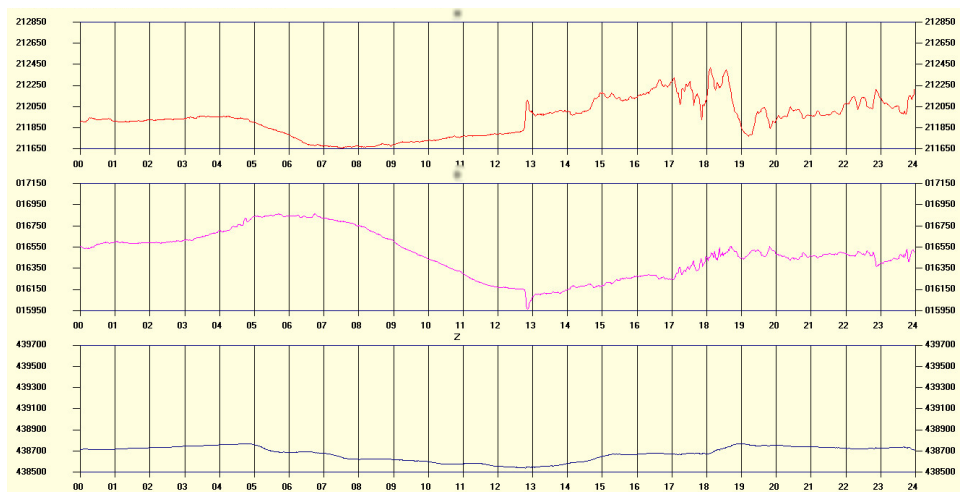
2. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2020.10.23. (H , +10.2 nT).



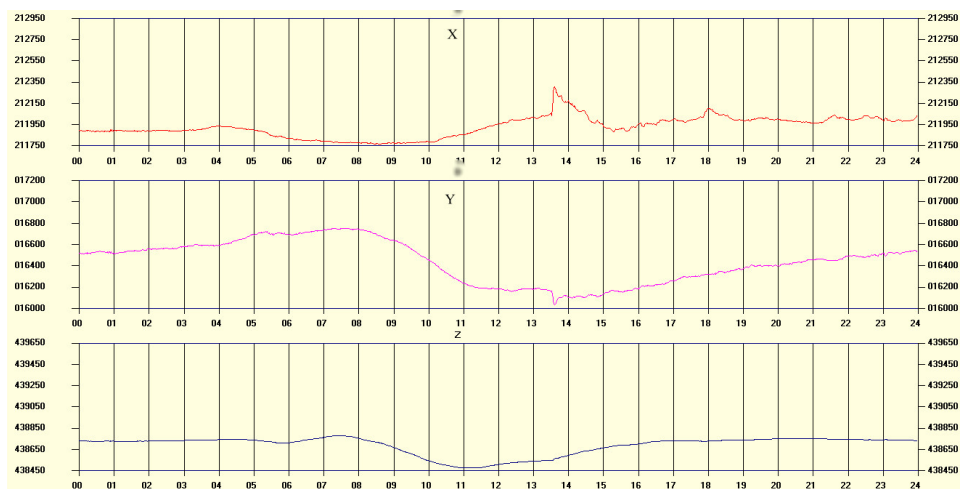
3. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2020.12.10. (D, -22.4 nT).



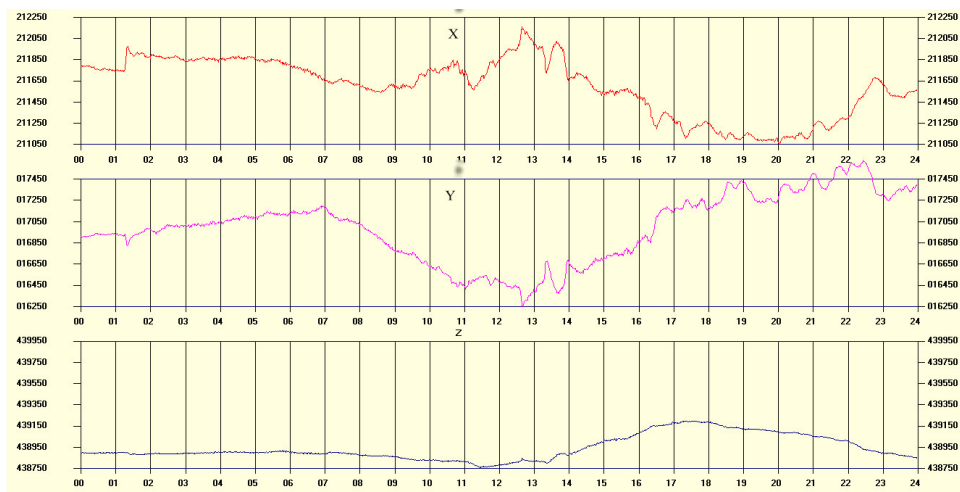
4. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2021.05.12. (D, $+26.0$ nT).



5. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2021.05.26. (H , $+29.1$ nT).



6. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2021.06.02. (H , $+27.6$ nT).



7. ábra. A SZIGO geomágneses regisztrátumán azonosított SSC – 2021.08.27. (H , +24.2 nT).

Jövőbeli kilátások

A Wigner FK és a FI együttműködése eredményeként a SZIGO területén folyamatban van egy unikális laboratórium kialakítása (Erdős és társai, 2019a,b). A beruházás célja olyan laboratóriumi környezet létrehozása, amelyben a felszíni geomágneses tér aktív kompenzálás és passzív árnyékolás együttes alkalmazásával néhány 10 pT nagyságrendre csökken a helyi kb. 48.000 nT-ról. Az aktív kompenzáló tekercsrendszer alkalmazása lehetővé teszi, hogy a földi főtér mellett az ionoszférikus áramrendszerek viszonylag kis amplitúdójú dinamikus felszíni mágneses terét is eliminálni tudjuk. A valós idejű, nagy pontosságú, helyi másodperces geomágneses adatok folyamatos elérésének lehetősége nélkül mindez nem lenne megvalósítható. Ezen túl az Observatórium geomágneses és tellurikus adatsorai a közeljövőben már az Űridőjárási Adatközpont (Space Weather Data Center) szerverein is elérhetőek lesznek. A tellurikus mérőrendszer modernizálása szintén az observatóriumi műszerpark egyik folyamatban lévő fejlesztése. Az új adatgyűjtő rendszer nagyobb mintavételi frekvenciát és kibővített dinamikatartományt tesz lehetővé a korábbihoz képest, valamint az adatrendszer távoli elérése is az eddigitől eltérő platformon valósul meg.

Irodalomjegyzék

- Curto, J. J., Araki, T., & Alberca, L. F. (2007). Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification. *Earth, Planets and Space*, 59, pp. i–xii, <https://doi.org/10.1186/BF03352059>
- Erdős, G., Hevesi, L., Lemperger, I., Nagy, J., Nemeth, Z., & Westergom, V. (2019, May 20-22). *Installation of an Electromagnetic Test Facility in Hungary* [Paper presentation]. 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC, Budapest, Hungary. <https://doi.org/10.23919/AeroEMC.2019.8788935>
- Erdős, G., Hevesi, L., Kuslits, L., Lemperger, I., Lichtenberger, J., Nemeth, Z., U. Nagy, L., Veres, M., & Westergom, V. (2019, April 24-26). Mágneses Nulltér Laboratórium (ZBL) létrehozása. [Paper presentation] In: *Magyar Űrkutatási Fórum 2019 - Az előadások összefoglalói*. Magyar Űrkutatási Fórum 2019, Sopron, Magyarország. http://urforum.ggki.hu/docs/MUF2019_abstract_book_final.pdf#page=29

Felsőléggörbi elektro-optikai jelenségek távvezérelt észlelése Bajáról

BÓR JÓZSEF^{1*}, HEGEDÜS TIBOR², JÄGER ZOLTÁN², MOLNÁR TIBOR¹,
MOLNÁR CSABA¹, SZABÓ CSONGOR¹, SZABÓNÉ ANDRÉ KAROLINA¹,
ZELKÓ ZOLTÁN² ÉS DÖBRENTAI LÁSZLÓ³

¹Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

²Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriuma, Baja

³Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (ELKH CSFK), Budapest

Absztrakt

A felsőléggörbén előforduló elektromos eredetű emissziók (FEOEM) optikai észlelése céljából egy távról vezérelhető megfigyelőrendszert telepítettünk Baján 2014-ben. E jelentés tartalmazza a rendszert alkotó eszközök típusát, a valós idejű eseményészleléshez és rögzítéshez használt szoftverek leírását és beállításait, valamint ismertetjük a sikeres megfigyelésekhez alkalmazott eljárás menetét. Ezen kívül áttekintjük a 2020-ig rögzített észleléseket is. A hét év során 1648 FEOEM felvétel készült, amelyek 92.7%-a vörös lidércet, 6.4%-a lidércudvar, összesen 3 felvétel pedig gyűrűlidércet tartalmaz. A legtöbb vörös lidércet júniusban észleltük, a lidércudvarok tekintetében pedig a szeptember volt némileg eseménydúsabb a vizsgált időszakban.

Kulcsszavak: felsőléggörbi elektro-optikai emissziók, vörös lidérc, optikai észlelés, távvezérlés.

Bevezetés

A zivatarfelhők teteje és az ionoszféra közötti légrétegben megfigyelhető, különféle morfológiájú és dinamikájú, egy másodpercnél rövidebb idő alatt lejátszódó fényjelenségek létét többnyire a 80-as évek második felében, illetve a 90-es években igazolták. E jelenségek zivatarcellák elektromosan aktív területei fölött, a felsőléggörbén

*Levelező szerző: Bór József (bor.jozsef@epss.hu)

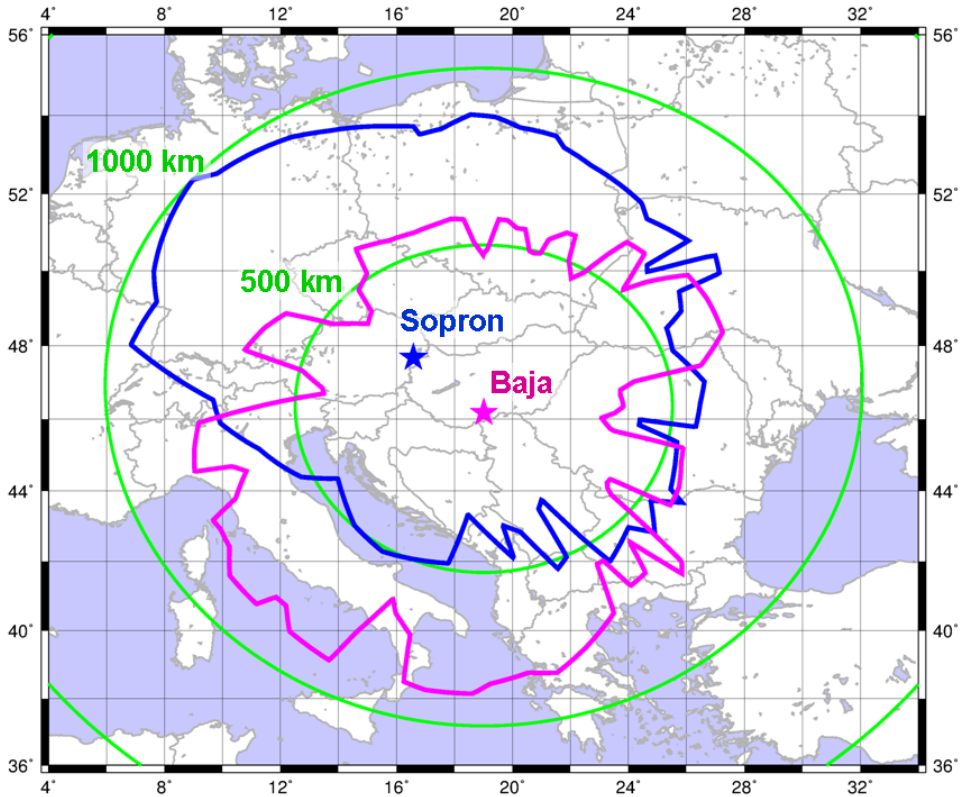
bekövetkező elektromos kisülések során keletkező fényemissziók. Mivel az ezeket kiváltó folyamatok közvetlenül köthetők a zivatarfelhőkben lejátszódó intenzív töltés-szétválasztáshoz és gyors töltésátrendeződésekhez (pl. villámkisülések), e jelenségkörbe tartozó eseményeket Felsőlégi Elektro-Optikai Emisszióknak (FEOEM), az angol szakirodalomban Transient Luminous Event (TLE) nevezzük. A FEOEM jelenségkörbe tartozó változatos emissziók (vörös lidérc – red sprite, lidércudvar – sprite halo, kis/kék/óriás nyaláb – blue starter / blue jet / gigantic jet, gyűrűlidérc – ELVES) kialakulására és tulajdonságaira vonatkozó jelenlegi ismereteink összefoglalása a szakirodalomban fellelhető (Bór & Barta, 2011; Pasko és társai, 2012; Singh és társai, 2012; Surkov & Hayakawa, 2020).

A FEOEM-ek vizsgálatával a különösen intenzív villámok és töltésszállító folyamatok tanulmányozhatók, és jobban megismerhetők a légkör alsóbb és felső rétegeiben, illetve ezek között bekövetkező kémiai és fizikai-elektrodinamikai csatolási folyamatok (Singh és társai, 2011; Gordillo-Vázquez & Pérez-Invernón, 2021). Ez indokolja, hogy több kontinens számos régiójában folynak FEOEM megfigyelések, illetve néhány űrmisszió dedikált feladatai közé tartozik e jelenségkör észlelése (Hsu és társai, 2017; Neubert és társai, 2019; Arnone és társai, 2020).

Hazánkban a tudományos kutatást szolgáló, szervezett FEOEM észlelések 2007-ben indultak Sopronban (Bór és társai, 2009; Bór, 2009; Bór és társai, 2018). A soproni állomásról jól belátható a FEOEM észlelések szempontjából releváns magasságtartomány (kb. 90 km-ig) Közép-Európa fölött (1. ábra), beleértve Magyarországot, Szlovákiát, a Cseh Köztársaságot, Ausztriát, Németország dél-keleti részét, Lengyelország déli részét, Szlovéniát, Horvátországot, Szerbia és Bosznia északi részét és Románia nyugati szélét (Bór és társai, 2009). Különösen ősszel és télen azonban a zivatartevékenység a mediterrán térségbe tolódik (Arnone és társai, 2020). Annak érdekében, hogy ebben az időszakban növeljük a megfigyelhető területet dél felé, az ország déli szélén, Baján létesítettünk egy újabb észlelőállomást 2014-ben (1. ábra). E jelentésben ismertetjük, hogy milyen eszközök alkotják ezt a második észlelőrendszert, bemutatjuk az észleléshez és az események rögzítéséhez használt programokat és alkalmazásokat, továbbá leírjuk az észlelések menetét. Ezt követően a megfigyelések megkezdésétől 2020-ig rögzített észleléseket tekintjük át.

Az észlelőállomás: Csillagászati Obszervatórium, Baja

Az obszervatórium (46.180278° N, 19.010833° E, 110 m tengerszint fölött) 4 km-re található Baja központjától egy kb. 4 ha-os védett területen, ahol a fényszennye-



1. ábra. Lefedettségi terület 50 km-es magasság fölötti észlelések esetén.

zés mértéke alacsony. Az obszervatórium épülete 1981-ben készült el. A kutatók állandó munkavégzés helyszínékként 1986-tól használják. A tudományos kutatások középpontjában innentől kezdődően Baján a felsőlégkör tanulmányozása áll, amelyhez műholdas észleléseket használnak fel (Ill, 1983). 1985 és 1992 között az obszervatórium egyetlen távcsöve egy 40 cm-es Cassegrain tükrös műszer (a Szegedi Tudományegyetem tulajdona) volt, amellyel kettős csillagokat (eclipsing binaries) figyeltek meg (Hegedüs és társai, 1992). Az obszervatórium következő nagy távcsövéét (50 cm, $f/8.4$, RC) 1995-ben állították fel. Egy új, nagy látószögű tükrös távcső fejlesztése 2005-ben kezdődött meg. Ez a műszer lett az ország első robotizált, SDSS szűrőrendszerrel felszerelt fotometrikus távcsöve, amelyre egy új, a Szegedi Egyetemen kidolgozott észlelési kezdeményezés, a BASSUS szupernóva program épült (Vinkó és társai, 2012). Ez vezetett el végül ahhoz, hogy 2020-ban egy új, 80 cm-es $F/7$ RC robot távcső kerülhessen az obszervatóriumba. Baján a kutató-



2. ábra. Csillagászati Observatórium, Baja, a tetőn a FEOEM kamerával (nagyítva látható a beágyazott képen).

si tevékenység jelenleg főként szupernóvákra, a kettős és a több napos rendszerek tulajdonságainak a tanulmányozására fókuszál (Mitnyan és társai, 2018). Az asztrofizikai témájú kutatásokon túlmenően az obszervatóriumban folyó tudományos munka multidiszciplináris kutatásokra is kiterjed, mint amilyenek pl. a meteormegfigyeléseken alapuló vizsgálatok, vagy (folytatólagosan) a felsőlégkör fizikai-kémiai tulajdonságainak a vizsgálata. A 2. ábra mutatja az obszervatórium épületét a tetőre szerelt FEOEM kamerával.

Az észlelőrendszer elemei

A Baján működő rendszer sok tekintetben hasonló a sopronihoz (Bór és társai, 2009), de nem teljesen ugyanaz. A kamera azonos típusú: Watec 902H2 Ultimate 1/2", CCIR. A kamera alkalmazott konfigurációja gyenge fényerejű események észlelését támogatja úgy, hogy a felvételek közben viszonylag kevésbé zajosak és így a téves eseményriasztások száma alacsonyan tartható. Ez a kézi erősítés tapasztalaton alapuló beállításával érhető el. Az észlelőszoftver beállításainál tárgyaljuk, hogy hogyan állapítható meg, hogy a beállítás optimális-e. A kamerán alkalmazott további beállítások: elektronikus zár (electronic shutter) kikapcsolva, az automata

exponálás (auto exposure, AE) pedig a 8-as pozícióra állítva, ahol az exponálási index (exposure index, EI) nincs figyelembe véve és a zársebesség a legalacsonyabb, azaz 1/50 s.

A bajai kamera Tamron 12VG412ASIR (F=1.2) aszférikus, infravörös-korrigált objektívvel szerelt. A fókusz távolságot úgy állítottuk be, hogy a látómező kiterjedése (vízszintesen 48°, függőlegesen 35°) hasonló legyen a soproni kamerához. Ez a beállítás jó kompromisszumnak bizonyult ahhoz, hogy viszonylag széles azimut tartományt tudjunk megfigyelni úgy, hogy közben az események elég részletgazdagon jelenjenek meg a felvételeken. A kamera analóg videójelére egy időjel megjelenítő egység (TIM-10) fekteti rá a GPS vevő által szolgáltatott, ezredmásodperc pontosságú időbélyegeket, hogy minden fél képkocka 20 ms tartamú expozíciós idejének kezdetét és végét pontosan ismerhessük. Az analóg jeleket végül egy Leadtek WinFast VC100XP PCI kártya digitalizálja 720 × 576 pixel felbontásban.

Az észlelés folyamán az egymás után következő digitalizált képkockák elemzésével valós időben határozza meg az UFO Capture eseményészlelő szoftver (2.22-es verzió), hogy feltűnt-e mentésre érdemes jelenség a képmezőben. Egyrészt, egy esemény felismerése 15 vagy több pixel egyidejű felfényesedéséhez kötött. A felfényesedést az alkalmazott beállítás szerint egy-egy pixelnek a folyamatosan monitorozott fényességi alapszintet legalább 5%-kal meghaladó kivilágosodása jelenti. Egy esemény észleléséhez a teljes képre összesített felfényesedett szint és az automatikusan utánkövetett észlelési szint között legalább 2 egységnyi különbség meglétét írtuk elő. A tapasztalat szerint a kamera erősítése akkor optimális, ha a szoftverben az észlelési szint 40-45 egység körül van normál megfigyelés idején, amikor nincs észlelt esemény.

A kamera CCD-jébe néha becsapódó kozmikus részecskék jó pár pixel erős felfényesedését okozhatják, ami azonban csak egy képkockán jelenik meg. Hogy csökkentsük a kozmikus részecskék okozta téves eseményriasztások számát, a normál eseményészleléshez előírtuk még, hogy a felfényesedés legalább 2 képkockáig fennmaradjon ('Min(frm)' parameter), ugyanakkor az ezt a fényességet ennyi ideig megtartó pixelek minimális számát ('detect size' parameter) mindössze 2-re állítottuk. Így a képen kis méretű, de tovább látható eseményeket is rögzíteni tudunk. A képmezőnek a megfigyelés szempontjából nem érdekes részeit (pl. épületek, fák vagy az időbélyeg által elfoglalt rész) és a hibás pixeleket kizártuk az aktív kiértékelésből, továbbá bekapcsoltuk a sötét objektumok ('dark object mask' 2-es szintre állítva) és a lassan mozgó objektumok (pl. repülőgépek, paraméterezés: 'highest speed'=15, 'size'=15) követése funkciókat. Engedélyeztük a szcintilláló objektumok követé-

se funkciót (paraméterezés: 'level'=105, 'speed'=2, 'size'=5), amely segítségével a csillagok helyzetét követni lehet. Ez felhasználható a későbbi kiértékelés során a kamera irányának a pontosabb meghatározásához. Egy saját fejlesztésű alkalmazás segítségével azonos kameraállásban rögzített több felvétel összehasonlításával a szcintilláló objektumok között azonosítjuk a csillagokat, amelyek helyzete időben változik a képmezőben a kvázi-statisztikus szcintilláló objektumokkal ellentétben (pl. levelek becsillanása). Esemény észlelése esetén a szoftver az észlelési időpont előtti és azutáni 10-10 képkockát videoklip formájában menti egy adatfájllal és az aktuális kép-maszkot, valamint a szcintilláló pixeleket tartalmazó fájlokkal együtt későbbi elemzéshez.

Az észlelőrendszer távvezérlése

Az alkalmazott optikával az égboltnak egyszerre csak egy része fér bele a kamera látóterébe. Az észlelőhelytől különböző irányban és távolságban zajló zivatartevékenység fölötti légtér ezzel a rendszerrel úgy figyelhető meg, hogy egy forgatóbillentő számolyra (pan-tilt unit, PTU) helyeztük a kamerát. Egy saját fejlesztésű, időjárásálló, távolról vezérelhető kamerapozicionáló megoldás prototípusát telepítettük Bajára. A rendszer alapja egy Videotec PTH-355P típusú PTU, amelyben a számolyt egyenáramú motorok mozgatják, és az aktuális forgatási és billentési szög analóg kimenetek jelei alapján meghatározható. Ehhez az eszközhöz készült egy vezérlő elektronika, amely összekapcsolja a PTU-t a vezérlő számítógéppel és lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy szükség szerint lekérdezze illetve megváltoztassa a számoly helyzetét. Az azimut és a horizont fölötti emelkedési szög 0.1° pontossággal állítható be. Az elektronika képes ezen kívül ki- és bekapcsolni a kameraház fűtését (pl. párasodás megakadályozása céljából), illetve az objektív íriszének a vezérlése (DC auto iris) ideiglenesen leválasztható a kamerától és az írisz teljesen nyitva vagy zárva tartható. Az automatikus íriszvezérlés hasznos funkció, amely megvédi a kamera CCD-jét a hosszú ideig tartó erős fény degradáló hatásától. A vezérlés ideiglenes átvétele ugyanakkor előnyös olyan helyzetekben, amikor egyébként a kamera válaszideje lassú lenne, vagy egy zavaró erősebb fényforrás a kép egy részén zárná az íriszt, miközben a látómező másik részén esetleg halványabb események megjelenése várható. Meg kell jegyeznünk, hogy a PTU csak 338° fokban forgatható. Ennek ellenére a teljes 360° -os környezet megfigyelhető, mivel a látószög olyan széles, hogy a két szélső azimut pozícióban a két látómező még át is fed. A PTU vezérlő elektronikájának minden funkciója a vezérlő/adatgyűjtő számítógéppel való

soros összeköttetésen keresztül elérhető RS232 terminálprogram használatával.

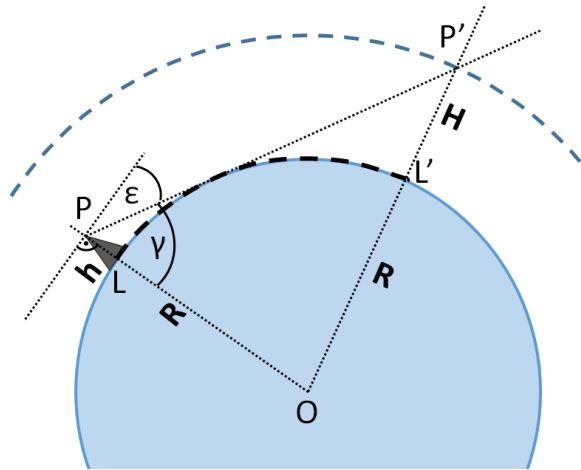
Az adatgyűjtő számítógépnek (PC), a kamerának és a többi hardver elemnek nem szükséges állandóan bekapcsolva lennie. Az áramellátás szabályozása céljából egy internethálózaton keresztül, webes felület segítségével, a többi eszköztől függetlenül vezérelhető kapcsolóegységet fejlesztettünk ki. A kapcsolóegység egy SR-201 típusú, kétrelés vezérlőlapkát használ, amely funkcionalitását úgy terjesztettük ki, hogy 8 különböző készüléket lehessen vele kapcsolni.

Az észlelőrendszerben az áramkapcsoló kivételével minden eszközt végsősoron egy PC segítségével vezérelhetünk. Ide tartozik többek között a kamera pozíciójának, az objektív íriszének és a kameraház fűtésének a beállítása, de az eseményészlelő szoftver futtatása és konfigurálása is. Maguk az észlelések, valamint a hozzátartozó segédfájlok és az észlelési napló is alapvetően ezen a PC-n található meg, továbbá az észlelt események előzetes feldolgozásának néhány lépése is ezen a számítógépen történik. Mindez megkívánja, hogy az észlelő a számítógép minden kapcsolódó szolgáltatásához és programjához közvetlenül hozzáférjen. A tapasztalat szerint ennek a kívánalomnak a TightVNC alkalmazás stabil működéssel és optimális internetes sávszélesség-felhasználással kiválóan megfelel. A kamera erős nappali fénytől való megóvása érdekében egy PHP programnyelven implementált program készült, amely képes az észlelőrendszerben mind a szoftveres, mind a hardver komponensek szabályos lekapcsolására automatikusan a napfelkelte eljövetelekor.

Az észlelések menete

A FEOEM-ek észlelése éjszaka lehetséges, amikor a szórt napfény nem fedi el a felsőlégköri elektromos gerjesztések közben keletkező, viszonylagosan kis számú fotont. A FEOEM-ek elektromosan fokozottan aktív zivatarfelhők fölött jelennek meg (Pasko és társai, 2012), így elsődlegesen azt szükséges felderíteni, hogy ilyen zivatarok található-e azon területen belül, amely fölött az eseménytípust illetően releváns magasságtartomány (vörös lidérceknél kb. 50-90 km) megfigyelhető az adott észlelőhelyről. Az ilyen területeket olyan felvételek alapján lehet behatárolni, amelyeken a horizont látható. Miután a kamera irányát meghatároztuk a látómezőben található csillagok és a csillagtérkép illesztésével a felvétel készítésének az időpontjában, az azimut függvényében felvesszük a horizonthoz tartozó emelkedési szögeket. Ezek a műveletek praktikusán az UFO Analyzer program segítségével végezhetőek el. Az emelkedési szögekhez ezután kiszámítható az a legnagyobb távolság, amelyen belül valamely adott magasság fölé láthatunk az észlelőhelyről (3. ábra). Fontos, hogy

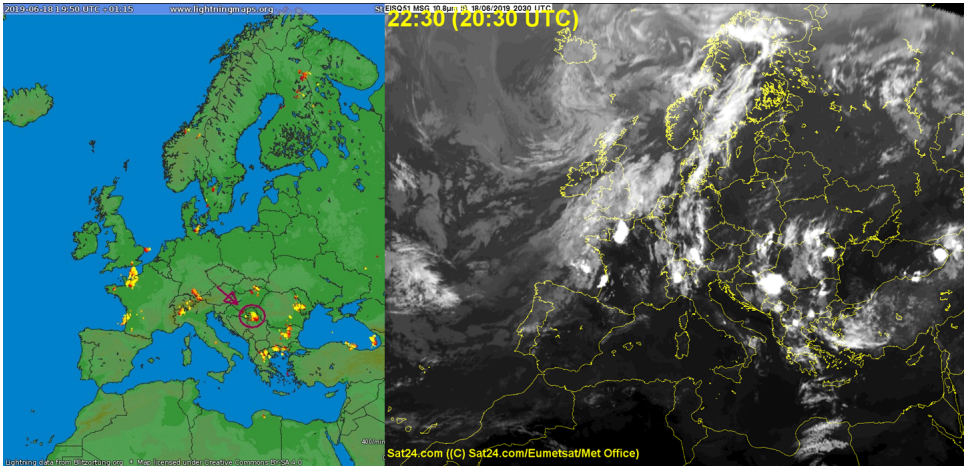
a számításnál a Föld görbületét figyelembe kell venni. Az azimut függvényében a kiszámolt távolságok jelölik ki a megfigyelhető terület határát (1. ábra).



3. ábra. Az észlelőhelyről (P , h tengerszint feletti magasságban) annak az LL' földfelszíni távolságnak a meghatározása, amelyen belül H tengerszint feletti magasság fölé láthatunk. A Föld sugara R , ϵ a látható horizont elevációs szöge P -ben. Először a γ szöget kell kiszámolni, ami után a $POP'\Delta$ megoldható és a LOL' szög meghatározható a koszinusz tétel felhasználásával.

Az aktív zivatarok kialakulása előrejelezhető. Előrejelzés található pl. az European Storm Forecast Experiment projekt (Estofex, 2021) weboldalán. Az adott időpontban ténylegesen aktív zivatarok azonosíthatók kvázi-valósidőben frissülő vilámtérképeken, amelyeket több szolgáltató is online elérhetővé tesz (BlitzOrtung, 2021; LightningMaps.org, 2021; Meteorologix, 2021) (4. ábra, bal oldali panel).

A felhőzet tetejének hőmérsékletét jelző infravörös (IR) műholdképek (AllMetSat, 2021) szintén segítenek az észlelések tervezésében. Egyrészt a zivatarok kialakulása és fejlődése jól követhető az IR képsorozaton. Az aktív zivatarcellákban erős a feláramlás, amely során a nagy nedvességtartamú légtömegek a felsőbb légrétegekbe jutva kiterjednek, lehűlnek és a vízgőz kicsapódása következtében felhőelemek keletkeznek. Ez a folyamat lokalizáltan megjelenő és viszonylag gyorsan kiterjedő világos, azaz hideg foltok formájában érhető tetten a felhőtető-hőmérséklet képeken (Schmetz és társai, 1997) (a 4. ábra jobb panelje). Másrészt ezek a képek azt is megmutatják, hogy húzódik-e felhőzet a megfigyelőhely és a megfigyelendő térség között. Az ilyen felhők akadályozzák a rálátást és akár teljesen el is lehe-

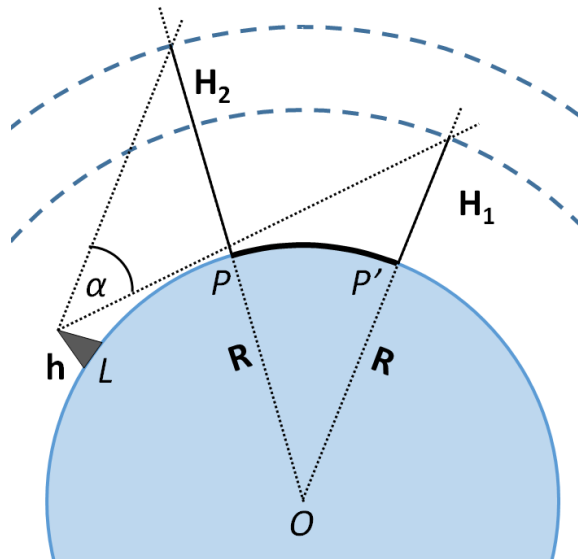


4. ábra. Információk aktív zivatarok helyének meghatározásához. **Balra:** valós idejű villám térkép a BlitzOrtung/Lightningmaps.org weboldaláról. Megjelöltük a Bajáról is észlelt FEOEM-ek szülő zivatargóciát. **Jobbra:** ugyanebben az időben készült Meteosat infravörös felvétel, amely a felhőtető hőmérsékleteket mutatja.

tetleníthetik az észlelést. Mindazonáltal a felhőzet dinamikusan változik és mozog, azonkívül nem is feltétlenül egybefüggő. A tapasztalat szerint FEOEM-ek adott esetben észlelhetők a felhőzet résein, sőt akár vékonyabb felhőkön keresztül is. A megfigyelőhelyen mindenesetre jó látási viszonyok szükségesek. Ennek a megállapításához Baján segítséget nyújt egy különálló égből kamera. A nagy távolságú észlelések várható jósága megítélhető a FEOEM kamera élőképen alacsony emelkedési szögeknél látható csillagok számából is. Minél több csillag látható, annál jobb a láthatósági feltételek.

A vörös lidérc (red sprite) a földfelszínről leggyakrabban észlelt típusa a FEOEM-eknek (Arnone és társai, 2020). A kamerát ennek megfelelően elsősorban vörös lidérc észlelésekre optimalizáltan állítottuk be. Vörös lidérc megjelenését túlnyomó többségben pozitív polaritású, intenzív felhő-föld (+CG) villámkisülések okozzák (van der Velde és társai, 2014). Ezek az emissziók jellemzően (de nem kizárólagosan) a zivatarok késői, érett fázisában alakulnak ki a konvektív zónák melletti rétegfelhőzet (stratiform region) felett (Soula és társai, 2015; Bór és társai, 2018; Wang és társai, 2019). A konvekciós cellák helye és ezzel együtt a rétegfelhőzet kiterjedtsége és elhelyezkedése becsülhető műholdas IR felvételek alapján is, a rétegfelhőzet legmegbízhatóbban mégis kompozit meteorológiai radarképek alapján

deríthető fel. Az Eumetnet weboldalán[†] elérhetőek ehhez használható radarképek (Saltikoff és társai, 2019).



5. ábra. Egy α látószögű kamerával mindig csak csak egy véges PP' távolságtartomány fölött lehetséges a H_1 és H_2 közötti magasságtartomány megfigyelése.

A gyakorlatban az észlelő először azt ellenőrzi, hogy van-e potenciálisan FEOEM keltő zivatar a megfigyelhető területen belül. Ha legalább egy ilyen akad és a helyi láthatósági feltételek megfelelőek, akkor az észlelő a kamerát a legígéretesebb zivatar felé forgatja úgy, hogy lehetőleg mind az aktív cella, mind a hozzátartozó réteghélfőzetű tartomány a látómezőben legyen. A kamera emelkedési szögét (eleváció) úgy kell beállítani, hogy a megfigyelt terület fölött a 100 km-es magasság alatti légréteg minél vastagabb szelete legyen benne a látómezőben (5. ábra).

A mindenkori észlelő naplózza az adott éjszakán, hogy van-e FEOEM-ek keltésére potenciálisan alkalmas zivatar a megfigyelhető terület fölött, továbbá minden olyan körülményt feljegyez, ami az észlelés sikerességét befolyásolhatja (pl. kilátást blokkoló felhőzet, elégtelen helyi látási viszonyok, az észlelőrendszer valamely elemének a meghibásodása). Amennyiben történik észlelés, az észlelőrendszer automa-

[†]<https://www.eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/opera-radar-animation>

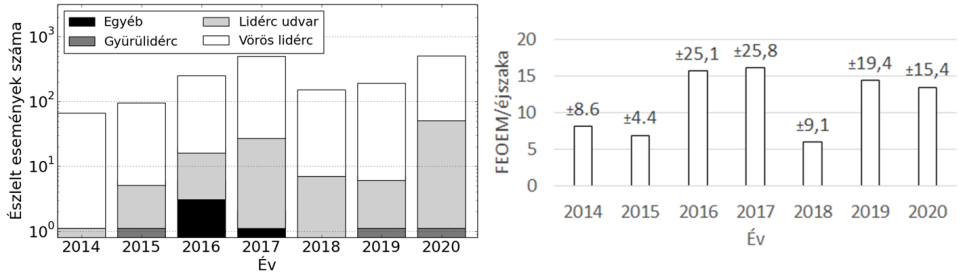
tikusan naplózza a vezérlő utasításokat és a kamera PTU-ról lekérdezett helyzetét. Minden rögzített videoklip mellé az UFO Capture program elmenti a szcintilláló pixeleket tartalmazó képet, a videoklipből generált fényességtartott (brightness peak-hold) képet, valamint a programbeállításokat és az esemény főbb adatait tartalmazó .xml kiterjesztésű adatfájlt.

Az előfeldolgozás során a rögzített videókat egyenként ellenőrizzük, hogy azonosítsuk a FEOEM-eket tartalmazó felvételeket. Ezekből a jelenségek megjelenési időpontját kiolvassuk megfigyelt zivataronként, azon belül pedig olyan időszakokra bontva, amikor a FEOEM-ek megjelenése gyakori. Az ilyen periódusokat legalább 30-40 perces olyan időszakok választják el, amelyek alatt nem jelennek meg újabb FEOEM-ek. A villámtevékenység lokalizáltságának a függvényében 0.5° - 1° pontossággal behatároljuk az adott időszakban FEOEM-eket keltő villámaktivitás kiterjedését a térképen. Ehhez az adott időtartam alatt észlelt összes villámot feltüntető villámtérképet használunk.

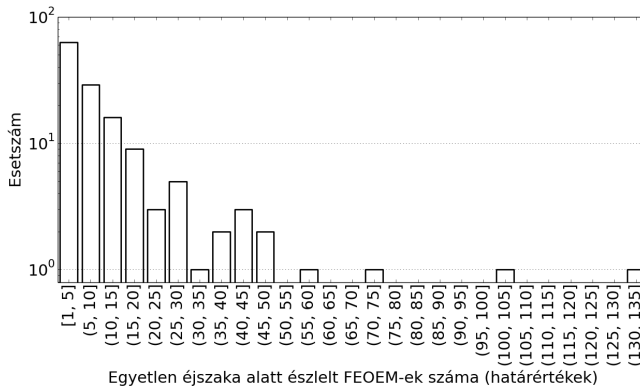
A 2014 és 2020 közötti észlelések áttekintése

A Bajáról történő észlelések első 7 éve alatt összesen 1648 különböző FEOEM-et rögzített a kamera. Ezek túlnyomó többsége vörös lidérc volt (1535), emellett szép számú lidérc udvar (106) is található az események között. Mindössze 3 gyűrűlidércet sikerült megfigyelni, valamint 4 további esetben nem sikerült a jelenség típusát egyértelműen meghatározni. A 6. ábra bal panelén az egyes években észlelt események számát láthatjuk. Fontos megjegyezni, hogy az egyes években különböző számú éjszakán volt sikeres észlelés, ezért a sikeres megfigyeléssel járó éjszakák szerint átlagolt FEOEM/éjszaka mennyiség valamivel jobban tükrözi a FEOEM előfordulások általános alakulását a különböző években. Ez látható a 6. ábra jobb panelén. Megfigyelhető, hogy a szórások szinte mindig nagyobbak, mint az átlag, ami jelzi, hogy a megfigyelt események éjszakánkénti száma nem normális eloszlású mutató.

Valóban, ezeket a statisztikákat torzítják azok a ritkán előforduló zivatarok, amelyek kiugróan nagyszámú FEOEM megjelenését okozzák (7. ábra). A tárgyalt 7 év alatt két alkalommal fordul elő, hogy egy éjszaka száznál több FEOEM-et rögzített a bajai kamera: 2016. szeptember 5-én (102 esemény) valamint 2017. augusztus 10-én (132 esemény). A 7. ábrán látható hisztogram egyértelműen tükrözi az egy zivatar által keltett FEOEM-ek számának eloszlására talált hatványfüggést (Arnone és társai, 2020).

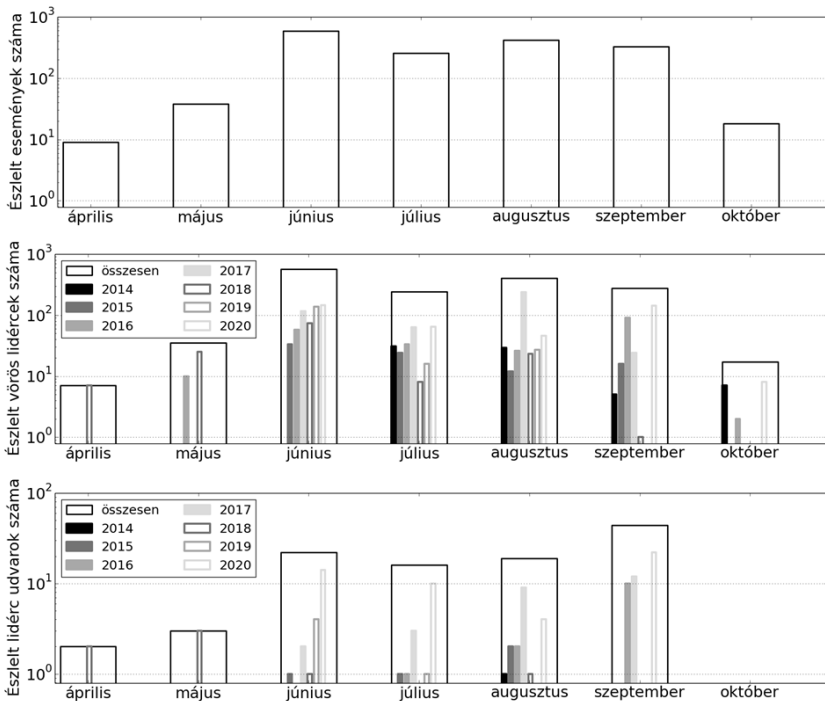


6. ábra. Éves átlagos FEOEM észlelésszámok Bajáról 2014 és 2020 között. **Balra:** Az események száma (logaritmus skálán ábrázolva) és típusa. **Jobbra:** sikeres észlelési éjszakákon a megfigyelt FEOEM-e átlagos száma a különböző években. Az ilyen éjszakák száma 2014-ben 9, 2015-ben 13, 2016-ban 15, 2017-ben 29, 2018-ban 24, 2019-ben 13, míg 2020-ban 34 volt. Az oszlopok fölött a szórásokat tüntettük fel.



7. ábra. A 2014 és 2020 között egy-egy éjszaka alatt Bajáról észlelt FEOEM-ek számának eloszlása. Az esetszámok logaritmusát ábrázoltuk.

Júniustól szeptemberig szinte mindegyik évben voltak észlelések 2014 és 2020 között, így az észlelt események számának hónapok közötti megoszlása leginkább az évnek ebben az időszakában tárgyalható (8. ábra). Látható, hogy a legtöbb FEOEM-et júniusban sikerült rögzíteni és ezek között is a vörös lidércnek a száma dominál. Az augusztusi érték csupán a 2017-es, extrém sok FEOEM-et kiváltó zivatar miatt ugrik ki. A 8. ábra középső és alsó panelei mutatják, hogy a vörös lidércel ellentétben a lidérc udvarok számát tekintve nem igazán emelhető ki egyetlen hónap sem. Itt is a szeptemberi, látszólag kiugró érték a 2020-as év szeptemberének

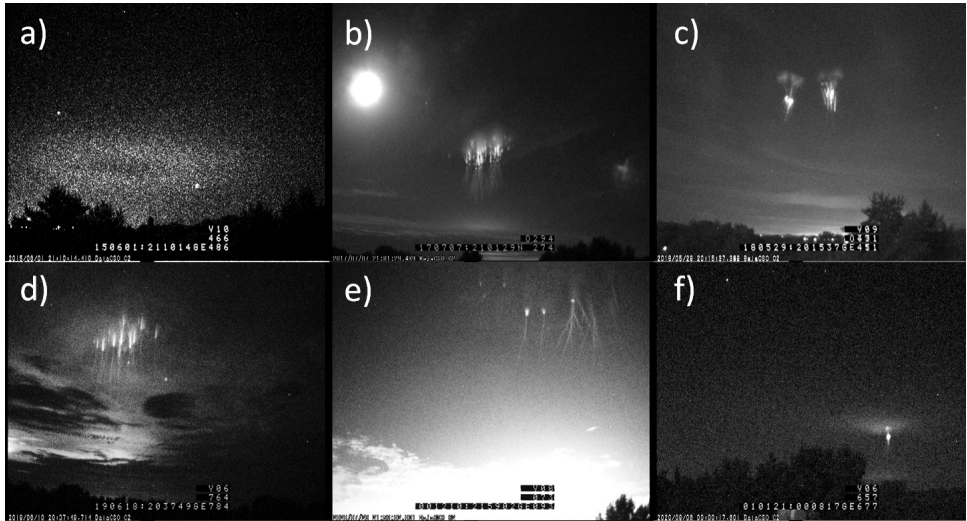


8. ábra. A 2014 és 2020 között Bajjáról megfigyelt FEOEM-ek száma hónapok szerinti bontásban. **Felül:** minden FEOEM. **Középen:** vörös lidércek. **Alul:** lidérc udvarok.

kiemelkedően aktív zivatartevékenységének köszönhető, amikor is 22 lidércudvart figyeltünk meg. A kétféle FEOEM típus észlelési számainak hónapok szerint eltérő változása arra utal, hogy a nyarat követő koraőszi zivatarokban, ahogy a villámaktivitás területileg délebbre tolódik (Arnone és társai, 2020; Kotroni & Lagouvardos, 2016), megváltozhatnak a villámkisülések tulajdonságainak a statisztikai (Rakov & Uman, 2007, 2.8 és 8. fejezetek). A 9. ábrán a rögzített FEOEM-ek közül látható néhány szép példa.

Összefoglalás

Célzottan a FEOEM-ek tudományos kutatását támogató, második hazai észlelő-állomás Baján létesült a Szegedi Tudományegyetem Bajai Csillagászati Observatóriumában 2014-ben. A telepítéstől 2020-ig 1648 FEOEM-ről készült felvétel a megfigyelhető terület fölött Közép-Európában. A rögzített fényjelenségek túlnyomó többségben vörös lidércek, de 106 lidérc udvar is szerepel a felvételeken. Három gyű-



9. ábra. Néhány, Bajjáról megfigyelt FEOEM. **a)** gyűrűlidérc 2015. jún. 1. 21:10 UTC, **b)** vörös lidérc csoportja a Holddal, 2017. júl. 7. 21:01 UTC, **c)** répa alakú vörös lidérc, 2018. máj. 29. 20:15 UTC, **d)** vörös lidérc csoportja közel Bajárhoz, 2019. jún. 18. 20:37 UTC, lásd még a 4. ábrát, **e)** kisméretű oszlop lidérc fényes és hosszú indákkal, 2020. júl. 26. 21:59 UTC, jól látható az időbélyegben a hetek számát nyilvántartó változóban a túlsordulási hiba (GPS week number rollover error), **f)** répa alakú vörös lidérc és lidérc udvar, 2020. szept. 6. 00:08 UTC, a képen szintén helytelen dátummal ugyanazon hiba miatt.

rűlidérc típusú emisszió is része az eseményhalmaznak. Mind a megfigyelt FEOEM-ek teljes száma, mind az egy-egy éjszaka alatt rögzített események átlagos száma évről évre számottevően változik. Az észlelők rendelkezésre állásának az egyenetlenségei, a változékony helyi látási viszonyok és maguknak a FEOEM-eket keltő zivataroknak az előfordulási és intenzitásbeli változatossága is közrejátszik ebben. A tapasztalat ettől függetlenül azt mutatja, hogy a legtöbb vörös lidércet Bajjáról júniusban lehetett megfigyelni, míg a lidércudvarból eddig a legtöbbet összességében szeptember hónapban észleltük Bajjáról.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott eredmények elérését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH, K115836 sz. projektje támogatta.

Irodalomjegyzék

- AllMetSat (2021). https://hu.allmetsat.com/kepek/sat24_europe_ir.php, *Utoljára letöltve: 2021. nov. 15.*
- Arnone, E., Bór, J., Chanrion, O. et al. (2020). Climatology of Transient Luminous Events and Lightning Observed Above Europe and the Mediterranean Sea. *Surveys in Geophysics*, 41, 167–199, <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09573-5>
- BlitzOrtung (2021). <https://www.blitzortung.org>, *Utoljára letöltve: 2021. nov. 15.*
- Bór, J., Sători G., & Betz H.D. (2009). Observation of TLEs in Central Europe from Hungary Supported by LINET. *AIP Conference Proceedings*, 1118(73), <https://doi.org/10.1063/1.3137716>
- Bór J. & Barta V. (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, 151-177, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.10.008>
- Bór, J., Zelkó, Z., Hegedüs, T., Jäger, Z., Mlynarczyk, J., Popek, M., & Betz, H.D. (2018). On the series of +CG lightning strokes in dancing sprite events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 11,030–11,047, <https://doi.org/10.1029/2017JD028251>
- ESTOFEX (2021). <https://www.estofex.org>, *Utoljára letöltve: 2021. nov. 15.*
- Gordillo-Vázquez, F.J., & Pérez-Invernón, F.J. (2021). A review of the impact of transient luminous events on the atmospheric chemistry: Past, present, and future. *Atmospheric Research*, 252, 105432, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105432>
- Hegedüs, T., Szatmáry, K., & Vinkó, J. (1992). Light-curve and O-C Diagram Analysis of RZ Cassiopeiae. *Astrophysics and Space Science*, 187, 57-74., <https://doi.org/10.1007/BF00642687>
- Hsu, R.-R., Su, H.-T., Chen, A. B.-C., & Kuo, C.-L. (2017). Selected results from the ISUAL/FORMOSAT2 mission. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic sciences journal*, 28, 525-544, <https://doi.org/10.3319/TAO.2016.08.23.01>

- Ill M. (1983). *A felsőlégkör szerkezete a műholdak fékeződése és fedélzeti mérések alapján*. [Doktori disszertáció, Magyar Tudományos Akadémia], Baja. REAL-d. <http://real-d.mtak.hu/1039/>
- Kotroni, V. & Lagouvardos, K. (2016). Lightning in the Mediterranean and its relation with sea-surface temperature. *Environmental Research Letters*, 11(3), 034006, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034006>
- LightningMaps.org (2021). <https://www.lightningmaps.org>, *Utoljára letöltve: 2021. nov. 15.*
- Meteologix (2021). <https://meteologix.com/hu/lightning/europe>, *Utoljára letöltve: 2021. nov. 15*
- Mitnyan, T., Bódi, A., Szalai, T., Vinkó, J., Szatmáry, K., Borkovits, T., Bíró, B.I., Hegedüs, T., Vida, K., & Pál, A. (2018). The contact binary VW Cephei revisited: Surface activity and period variation. *Astronomy and Astrophysics*, 612, A91, 14 p., <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731402>
- Neubert, T., Østgaard, N., Reglero, V. et al. (2019). The ASIM Mission on the International Space Station. *Space Science Reviews*, 215, 26, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0592-z>
- Pasko, V.P., 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, <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9813-9>
- Rakov, V.A. & Uman, M.A. (2007). *Lightning: Physics and Effects*. New York, USA: Cambridge University Press, ISBN 9781107268555
- Saltikoff, E., Haase, G., Delobbe, L., Gaussiat, N., Martet, M., Idziorek, D., Leijnse, H., Novák, P., Lukach, M., & Stephan, K. (2019). OPERA the Radar Project. *Atmosphere*, 10(6), 320, <https://doi.org/10.3390/atmos10060320>
- Siingh, D., Singh, R.P., Singh, A.K. et al. (2012). Discharges in the Stratosphere and Mesosphere. *Space Science Reviews*, 169, 73–121, <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9906-0>
- Singh, A.K., Siingh, D., Singh, R.P., & Mishra, S. (2011). Electrodynamical Coupling of Earth's Atmosphere and Ionosphere: An Overview. *International Journal of Geophysics*, 2011, 971302, <https://doi.org/10.1155/2011/971302>

- Schmetz, J., Tjemkes, S.A., Gube, M., & van de Berg, L. (1997). Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT. *Advances in Space Research*, 19(3), 433-441, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00051-3)
- Soula, S., Defier, E., Füllekrug, M., van der Velde, O., Montanya, J., Bousquet, O., Mlynarczyk, J., Coquillat, S., Pinty, J.-P., Rison, W., et al. (2015). Time and space correlation between sprites and their parent lightning flashes for a thunderstorm observed during the HyMeX campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 11552–11574, <https://doi.org/10.1002/2015JD023894>
- Surkov V.V. & Hayakawa M. (2020). Progress in the Study of Transient Luminous and Atmospheric Events: A Review. *Surveys in Geophysics*, 41, 1101-1142, <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09597-2>
- van der Velde, O.A., Montanyà, J., Soula, S., Pineda, N., & Mlynarczyk, J. (2014). Bidirectional leader development in sprite-producing positive cloud-to-ground flashes: Origins and characteristics of positive and negative leaders. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 12755–12779, <https://doi.org/10.1002/2013JD021291>
- Vinkó, J., Sárneczky, K., Takáts, K., Marion, G.H., Hegedüs, T., Bíró, I.B., Borokovits, T., Szegedi-Elek, E., Farkas, A., Klagyivik, P., Kiss, L.L., Kovács, T., Pál, A., Szakáts, R., Szalai, N., Szalai, T., Szatmáry, K., Szing, A., Vida, K., & Wheeler, J.C. (2012). Testing supernovae Ia distance measurement methods with SN 2011fe. *Astronomy & Astrophysics*, 546, A12, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220043>
- Wang, Y., Lu, G., Ma, M., Zhang, H., Fan, Y., Liu, G., Wan, Z., Wang, Y., Peng, K-M, Peng, C., Liu, F., Zhu, B., Ni, B., Gu, X., Chen, L., Yi, J., & Zhou, R (2019). Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China. *Earth and Planetary Physics*, 3, 111-125, <http://doi.org/10.26464/epp2019015>

