

TDK DOLGOZAT

**Az űridőjárás és a
 kozmikus sugárzás kapcsolata**

KISVÁRDAI IMRE

Csillagászat MSc.

I. évfolyam



Témavezetők:

FORGÁCSNÉ DR. DAJKA EMESE

ELTE Csillagászati Tanszék

GÓRA BARBARA

ELTE Csillagászati Tanszék

DR. SIMON MACKOVJAK

SAV Department of Space Physics

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
2024**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. A kozmikus sugárzás és a neutronesemények	2
1.2. A Lomnici-csúcson található neutrondetektor	3
2. A felhasznált adatok és alkalmazott módszerek	4
2.1. Adatfeldolgozás	5
2.2. Az adatsorokban megfigyelhető különleges események	7
2.3. Események azonosítási és kiválasztási eljárása	8
2.4. Események megerősítésére használt adatbázisok	9
2.5. Az alkalmazott statisztikai módszer	9
2.6. A Forbush-csökkenések illesztése	10
3. A megfigyelt különleges események és effektusok	14
3.1. Űridőjárási események bemutatása	14
3.2. Russell-McPherron effektus	17
4. Eredmények	19
4.1. Statisztikai vizsgálatok és korreláció más űridőjárási adatsorokkal	19
4.2. TGE-k azonosítása	22
4.3. Forbush-események eloszlása és tulajdonságai	23
5. Összegzés	26
6. Kitekintés	31
Hivatkozások	33

1. Bevezetés

A kozmikus sugárzás vizsgálatának mind a tudomány, mind a gyakorlat szempontjából nagy jelentősége van. Több olyan detektor és észlelőhálózat is működik a világ számos helyén, ahol a kozmikus sugárzás által keltett másodlagos sugárzás vizsgálatával keresik a választ a tudósok olyan kérdésekre, hogy honnan származnak a kozmikus sugárzás részecskéi, milyen fizikai mechanizmusok állnak az ilyen nagy energiával rendelkező részecskék gyorsítása mögött, milyen összetételű pontosan. Természetesen már számos elmélet és modell is napvilágot látott ezek magyarázatára, azonban sok más elmülethez hasonlóan, ennek is vannak gyenge pontjai, amik további kutatásokat tesznek szükségessé.

Emellett azt is fontos megjegyeznünk, hogy a kozmikus sugárzás kutatása nem csak az elméleti tudósok számára fontos, hanem a mindennapi életünkben is jelen van és hatással is lehet rá. A földi élővilágot folyamatosan érő háttérsugárzás több, mint tíz százaléka a kozmikus részecskék által kiváltott másodlagos sugárzásból származik, melyek lehetnek – hasonlóan a kozmikus részecskékhez – töltöttek is. Ezek a töltött részecskék akár a mindennapokban használt elektronikai eszközeinkben is okozhatnak problémát, de a magasan keringő műholdak fedélzeti számítógépeit is veszélyeztethetik, illetve az űrállomások asztronautáit is (Mewaldt, 1996; Panasyuk, 2001; Schwadron et al., 2010).

Hazánkban jelenleg nincsenek a kozmikus sugárzás vizsgálatára irányuló mérések, de több kutatóhelyen is foglalkoznak a témához kapcsolódó vizsgálatokkal. Az ELTE Csillagászati Tanszékén a napaktivitással és a hozzájuk kapcsolódó jelenségekkel – mint napkitörés és koronaanyag-kidobódások – foglalkoznak, amik számottevően járulhatnak hozzá a kozmikus sugárzás részecskéinek gyorsítási és terjedési mechanizmusához. Egy másik kutatóhely hazánkban a Wigner Fizikai Kutatóközpont, ahol különböző űrmissziók részecskedetektorainak fejlesztésében vesznek részt, illetve az űrmissziók adatainak elemzésével járulnak hozzá a Nap körüli térrész mágneses tulajdonságainak megismeréséhez, illetve az ott lévő plazmakörnyezet feltérképezéséhez. Emellett már régóta ismert a kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata, melyről a Lockwood (1971); Barouch and Burlaga (1975); Cane (2000) tanulmányokban is olvashatunk.

Az itt bemutatott kutatómunkához felhasznált kozmikus sugárzás fluxus mérési adatokat a Lomnici-csúcson elhelyezett neutronmonitor mérései adják. Mint azt a korábbiakból is látni lehet a napaktivitás és a kozmikus sugárzás közötti kapcsolat felismerése nem újkeletű, de a Lomnici detektor adataival az utóbbi évtizedben nem jelentek meg ilyen jellegű extenzív, hosszú mérési időszakokra kiterjedő vizsgálatok. Ezen detektor adataira támaszkodó eddigi eredményeket olvashatunk Kudela et al. (1993, 2000); Kudela and Brenkus

(2004); Kudela and Langer (2009) munkáiban, amelyekben a neutronmonitor kialakítása és méréstechnikája, illetve a mérési adatok 2007-ig terjedő vizsgálata került kifejtésre.

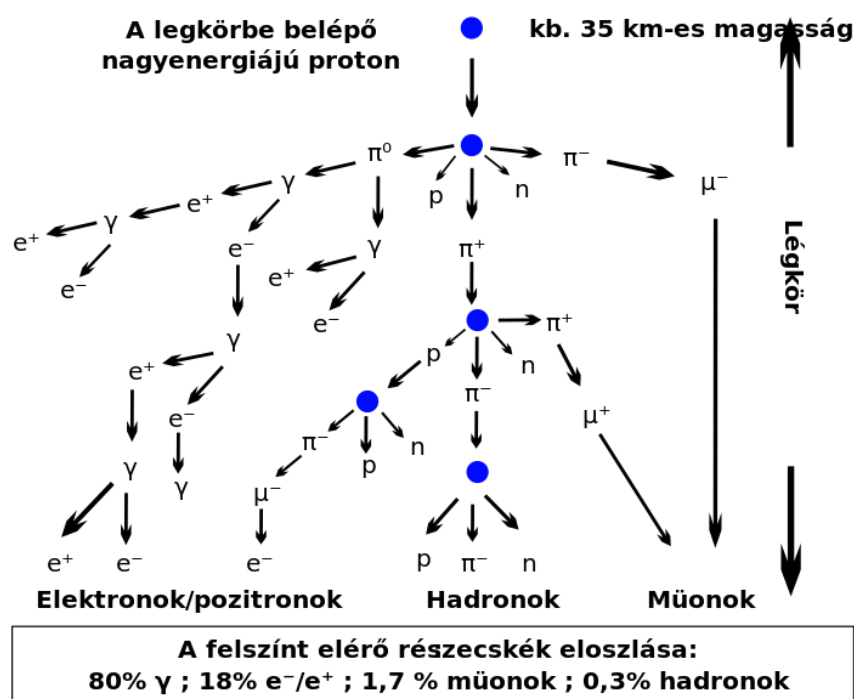
1.1. A kozmikus sugárzás és a neutronesemények

Földünk légkörét nemcsak porszemcsék vagy nagyobb sziklák, azaz meteorok érik el, és nemcsak a csillagok távoli sugárzása fotonok formájában, hanem nagy sebességű részecskék is. Ezeket a részecskéket összefoglaló néven kozmikus sugárzásnak nevezzük, melyek elsődleges forrása a Nap. Ugyanakkor ahogy egyre nagyobb energiájú részecskéket detektálunk, fel kellett ismerjünk, hogy ezen részecskéket már sokkal extrémebb folyamatok kell hogy gyorsítsák, és egyre távolabbi objektumokat kell keresnünk forrásként. Ha csoportosítani szeretnénk a kozmikus sugárzást, akkor a három fő típust alapvetően az őket létrehozó asztrofizikai folyamatok alapján különíthetjük el:

- Szoláris kozmikus sugárzás: a Napból származó főleg protonokból és elektronokból álló sugárzás, melynek intenzitását és összetételét a Nap aktivitása határozza meg. Az ilyen típusú részecskék jellemzően a 100 MeV - 500 MeV energiatartományba esnek (Miroshnichenko et al., 2001).
- Galaktikus kozmikus sugárzás: a Naprendszeren kívülről érkező, főleg protonokból, héliumatommagokból és nehezebb atommagokból álló sugárzás, melynek terjedését és spektrumát a galaxis mágneses mezője befolyásolja. Energiaszintjük általában a 0,5 és 100 GeV közötti tartományban van (Swordy, 2001; Mewaldt, 1994).
- Ultra-nagy energiájú kozmikus sugárzás: ezek az Univerzum legnagyobb energiájú részecskéi, amelyek energiája akár a 10^{20} eV-ot is elérheti; az eredetük még nem tisztázott, de valószínűleg extragalaktikus forrásokból származnak, például aktív galaxismagokból, kvazárokból vagy gammakitörésekből (Aab et al., 2020).

Az eddigiekből láthattuk, hogy a kozmikus sugárzás részecskéi tehát a világűrből érkező nagyenergiájú részecskék. Amikor ezek a részecskék belépnek a Föld légkörébe, akkor az azt alkotó atomokkal és molekulákkal ütköznek, másodlagos részecskéket hozva létre. Ezek a másodlagos részecskék alkotják az ún. kozmikus eredetű részecske-záporokat, melyek végül eljutnak a földfelszínig (lásd 1.1).

Ezen másodlagos részecskék között vannak neutronok is, amelyek semleges részecskék, nincs töltésük, így nem térülnek el a Föld mágneses mezejében. Ezeket a neutronokat tudjuk detektálni különböző neutronmonitorokkal, mint amilyen például a Lomnici-csúcson elhelyezett neutrontetektor is. A detektált neutronok száma és energiája természetesen



1.1. ábra. A kozmikus sugárzás által kiváltott légköri részecske-zápor felépítése.

függ az elsődleges kozmikus sugárzás intenzitásától és összetételétől, de befolyásolja a földi légkör állapota és összetétele is.

1.2. A Lomnici-csúcson található neutrontetektor

A Lomnici-csúcson (Szlovákia, 49,40°É, 20,22°K, 2 634 m tengerszint feletti magasságban) található neutronmonitor (LMKS) folyamatos, 42 éves adatai lehetővé teszik a kozmikus sugárzás fluxusában fellelhető hosszú távú trendek vizsgálatát a körülbelül 4 GeV feletti energiatartományban. Emellett az 1981 óta rendelkezésre álló órás felbontás és a 2001 óta rendelkezésre álló perces felbontás lehetővé teszi a neutronmonitor mérési eredményeit befolyásoló rövid időintervallumon lejátszódó események vizsgálatát is. Az állomáson összesen 8 cső végez folyamatos méréseket, amelyek közül 6 darab látható az 1.2 ábrán. Ennek köszönhetően lehetőségem nyílt átfogóan elemezni az LMKs neutronmonitor által rögzített adatokat több megközelítésből. Mivel a mérő-, illetve adatrögzítőeszköz több felújításon és fejlesztésen is átesett, először homogenizálni kellett az adatsort. Ezután kiválasztottam és elemeztem a neutronmonitor által rögzített legjelentősebb eseménytípusokat a neutronfluxus szélsőséges értékein és az események fontos típusainak egyedi mintázatain alapulva. Ezen listán belül háromféle eseményt különböztettem meg: (i) Forbush-csökkenések, (ii) talajszint-közeli sugárzástöbblet (ground level enhan-

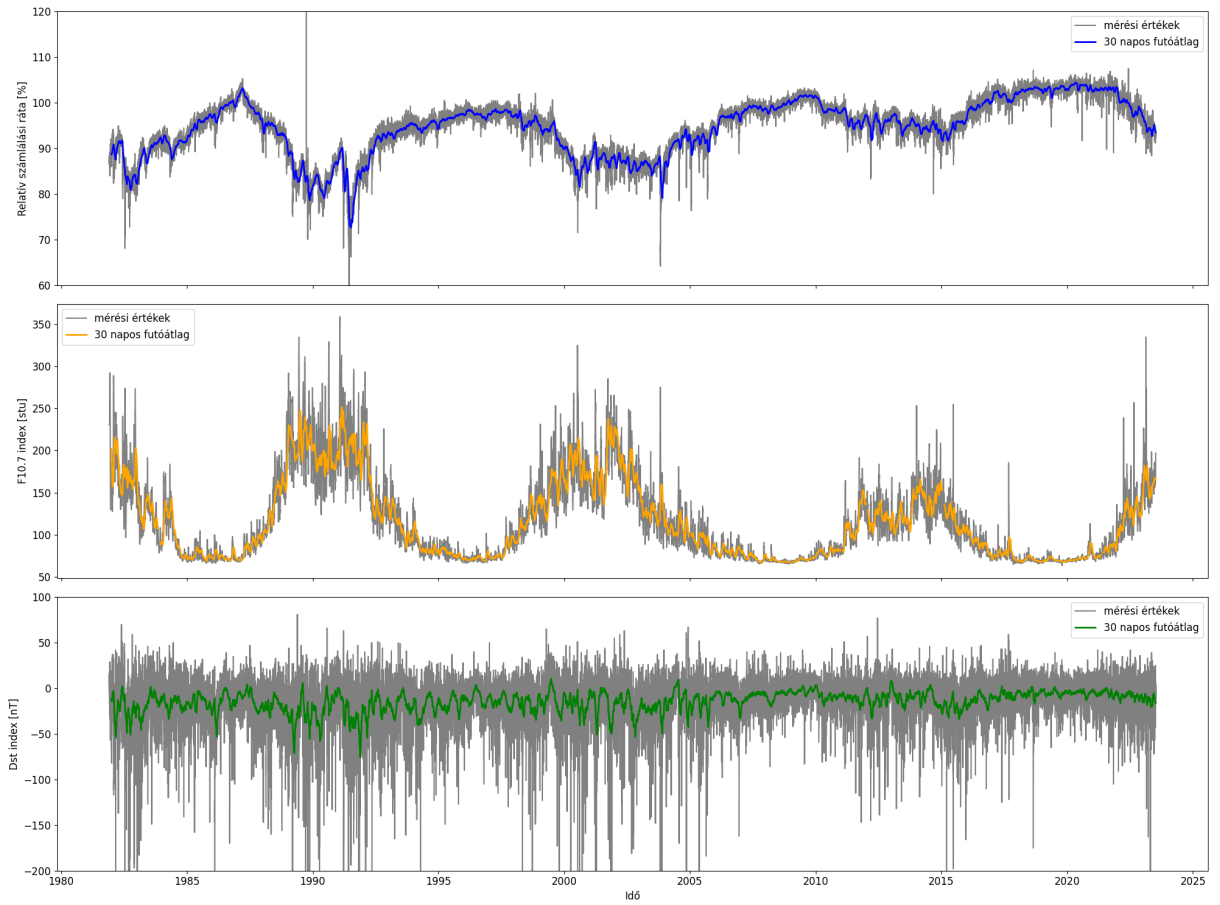
cement/GLE) és (iii) viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (thunderstorm ground enhancement/TGE).



1.2. ábra. Saját készítésű kép a neutrontektorról 2023.08.04-én. A képen 6 cső látható a nyolcból, illetve az őket körülvevő szigetelő réteg.

2. A felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

A Lomnici neutronmonitor adatain kívül számos más adatsort is használtam a vizsgálathoz. A neutronfluxus változásainak úridőjárási vonatkozásait elemezve az F10.7 indexet vettem alapul a napaktivitás idősoraként, amely a Nap 10,7 cm-en kibocsátott sugárzásfluxusának értéke. Ez az index kiválóan korrelál a napfolt-relatív számmal, amely a napaktivitás konvencionális mutatója, de az F10.7 érzékenyebb a napkitörésekre, így azokkal jobban korrelál, mint a napfolt-relatív szám. A másik hosszú időszakot felölelő általam alkalmazott idősor a Dst (Disturbance storm time) index, amely a Föld globális mágneses mezejének ekvatoriális komponensének zavarait írja le az átlagszinthez képesti eltéréssel (amelyet a 0 érték jelöl) nanoteszlában megadva. A vizsgálatokhoz a Dst indexet arra a célra használtam, hogy a földi globális mágneses tér változásait elemezzem a neutronesemények alapján észlelt napaktivitás tükrében.



2.1. ábra. *Felső panel:* a neutronmonitor által a Lomnici-csúcson mért folytonos adatok időszora. *Középső panel:* a F10.7 napaktivitási index. *Alsó panel:* a Dst geomágneses mező állapotát jellemző index. Minden bemutatott index esetén megjelenítettem színes görbével a 30 napos futóátlagokat is. A színekódolás csak a vizualizáció javítása és a paraméterek közötti megkülönböztetés célját szolgálja.

2.1. Adatfeldolgozás

A kozmikus sugárzás fluxusának mérése a Lomnici-csúcson 1957-ben kezdődött. Az óránkénti adatokat rendszeresen archiválják 1968. február 1-je óta. Sajnos az 1981 előtti adatok nyilvánosan nem férhetők hozzá (Kudela et al., 2000), azonban nagyobb időfelbontással egyébként is csak 1981 decemberétől érhető el az új 8 csöves NM64 neutronmonitor installációjával, amely lehetővé tette a 1 óránál rövidebb időtartamú anomáliák észlelését is. Így 1982-től 5 percenkénti adatok, majd 1984-től 1 perces adatfelbontás érhető el (Kudela et al., 2000). Az elérhető műszerekről részletes leírás található a Kudela et al. (2000) és Chum et al. (2020) tanulmányokban. Mint azt már korábban is említettem a kozmikus sugárzás által keltett légköri kaszkád érzékeny a légkör aktuális állapotára, ezért fontos korrigálni például a helyi légköri nyomásra. Ezt a korrekciót lehetővé teszi a detektor mellé

telepített nyomásmérő műszer, így a nyomáskorrigált adatok számítása is 1982 óta történik. A neutronmonitor adatai 2001-től nyilvánosan elérhetők egy webfelületen keresztül. Az aktuális mérési adatok öt perces időfelbontással visszamenőleg egy napig érhetőek el, az órás felbontású adatok pedig a legutóbbi 30 napról grafikus és digitális adatformában is megtalálhatók a <http://neutronmonitor.ta3.sk> weboldalon, valamint a nemzetközi együttműködéssel létrejött neutronmonitor Database <https://www.nmdb.eu/data/> oldalon is. A jelenlegi mérések mellett a Szlovák Tudományos Akadémia Űrfizikai Intézetének weboldalán az archívum tartalmazza az óránkénti adatokat 1982 januárjától 2013 decemberéig. A mérési eredményeiket relatív mértékegységben adják meg. Az elérhető adatokban és az ebben a tanulmányban bemutatott százalékokat arra az értékre normalizálták, amely az 1986 szeptemberi értékek átlaga (1745,2 számlálás óránként). Az adatok a terület szakirodalmi konvenciója miatt kerülnek százalékos formátumban közlésre.

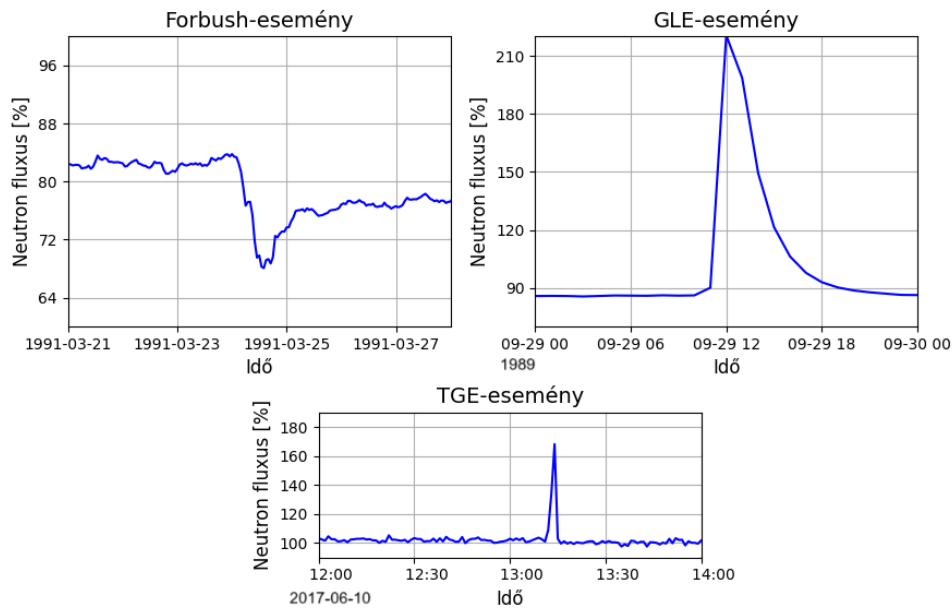
Egy folytonos és egységes formátumú, hiánytalan és hibamentes adatsor eddig nem állt rendelkezésre a teljes 42 éves időszakról (1981 decemberétől 2023 júliusáig) az LMKS mérőkészülékén végrehajtott különböző mérés technikai és feljegyzéstechnikai változások miatt. Ezek a változások és fejlesztések különféle adatformátumokhoz vezettek az évek során, így szükség volt azok egységesítésére, amelynek lépéseit a következőkben ismertetem.

Az adatkészleteket egységes dátumformátumra hoztam és a neutronmonitor négy legérzékenyebb csövének átlagos mérési értékeit kivontam az adatsorból, a további munkám során pedig végig ezt az értéket használtam. A következő lépésben lineárisan interpoláltam az adatokat az elenyésző mennyiségű hiányzó mérési adat helyén. Miután elkészítettem a mérési átlagok első feldolgozáson átesett adatait, nyomáskorrekciós függvényt alkalmaztam rájuk, amelyet a következőképpen határoztam meg Kudela et al. (2017) alapján:

$$N_{\text{kor}} = N_{\text{nyers}} e^{\beta(p-p_m)} \quad (2.1)$$

ahol N_{kor} a neutronok számának nyomáskorrigált értékeit jelenti, N_{nyers} a korrigálatlan, nyers mérési adatokat, β a Kudela et al. (2017) által számított regressziós együttható, p a környező légnyomás értéke hPa-ban, és p_m a Lomnici-csúcson mért légnyomásértékek átlaga.

Az egységes és folytonos idősor vizuális ábrázolása, amely tartalmazza az összes 1981-től 2023-ig mért adatot, és korrigálva van a környezeti légnyomásra, látható a 2.1. ábrán. A teljes feldolgozott neutron fluxus adatsor elérhető a <https://zenodo.org/records/10790916> referálható adatbázisban. Összehasonlítási célokra ugyanezen időszakra az F10.7 és a Dst adatsorok is meg vannak jelenítve. Az úridőjárási indexeket az OMNIWeb



2.2. ábra. A neutronmonitor idősorában azonosítható különleges események; *bal felső ábra*: Forbush-csökkenés (FD), *jobb felső ábra*: talajszint-közeli sugárzástöbblet (GLE), *alsó ábra*: viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE)

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (King and Papitashvili, 2005) biztosította számomra. Ezen három paraméter statisztikai elemzésének módszereit ismertetem a 2.5. fejezetben, az eredményeket pedig a 4. fejezetben mutatom be. De mielőtt ezekre rátérnék, szeretném felhívni a figyelmet néhány különleges, az átlagtól eltérő eseményre is, melyeket a neutronmonitor rögzített az adatsorokban.

2.2. Az adatsorokban megfigyelhető különleges események

Az itt bemutatásra kerülő eseményeket egyelőre csak az adatok szintjén mutatom be, a hozzájuk kapcsolódó fizikai folyamatokba később nyújtok betekintést. Az alábbiakban felsorolom az idősorban azonosított különleges eseményeket, melyek a 2.2. ábrán láthatóak.

- **Forbush-csökkenés (FD – Forbush decrease)**: Ebben az esetben az adatsorban azt látjuk, hogy a kozmikus sugárzás fluxusa átmenetileg lecsökken a korábbi átlagos szinthez képest. A jelenség átlagosan 5-10 napos időskálán zajlik le, ahol az intenzitás-csökkenés egy rövid, pár óráig tartó időszak alatt következik be (Jämsén et al., 2007). A csökkenések amplitúdója legtöbbször néhány százalékos, de időnként akár több tíz százaléknyi is lehet. Szintén fontos jellemzője az FD jelenségnek,

hogy globálisan megfigyelhető, azaz a földön elhelyezett más neutrondetektorok is rögzítik (Forbush, 1937, 1938).

- **talajszint-közeli sugárzástöbblet (GLE – ground level enhancements):** Ezek az események a kozmikus sugárzás intenzitásában egy hirtelen bekövetkező és igen intenzív növekedésként mutatkoznak az idősorban. Az általános kozmikus sugárzás háttér fokozatos ingadozásaitól eltérően a GLE-k rövid és éles csúcsokat mutatnak, néhány százaléktól pár tíz százalékig terjedő amplitúdóval. Mint említettem, a hirtelen fluxusnövekedés igen rövid időskálán, 10 perctől egy-két óráig tarthat, míg a lecsengési fázis már sokkal lassabb, hosszabb időskála (Belov and Eroshenko, 1996; Bieber et al., 2004; Kudela and Langer, 2009; Berrilli et al., 2014; Battarbee et al., 2018).
- **viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE – thunderstorm ground enhancements):** Ezek olyan események, amelyek nagyon rövid időskálán játszódnak le, általában pár percen keresztül figyelhetők csak meg. A TGE-ket a neutronok fluxusának növekedése jellemzi a háttérszinthez képest a mérőállomás környezetében, amely általában nem haladja meg a tíz százalékot a legtöbb TGE esemény során (Chum et al., 2020). Ugyanakkor dokumentáltak olyan eseteket is, amikor a TGE-k a háttérszintet a többszörösére növelték (Dwyer and Uman, 2014; Chilingarian et al., 2010). Ezek a jelenségek főként magas hegytetőkön vagy alacsonyabb magasságokon manifesztálódnak vagy akár téli viharok során a japán tengerpart mentén (Chilingarian et al., 2011; Kuroda et al., 2016; Šlegl et al., 2022). A TGE-k tulajdonságairól és mechanizmusairól további leírást találhat például Khaerdinov et al. (2005); McCarthy and Parks (1985); Shah et al. (1985); Babich et al. (2014); Enoto et al. (2017) munkáiban.

2.3. Események azonosítási és kiválasztási eljárása

A következőkben szeretném bemutatni, hogy a felhasznált adatok esetében milyen módszerrel válogattam ki azokat az eseményeket, amik eltértek az átlagos jelszinttől, és milyen kritériumok alapján csoportosítottam őket. Az adatok feldolgozásához saját fejlesztésű Python kódot használtam, melynek működése a következő:

- Minden adatponton kiszámolja, hogy a 24 órával később rögzített mérési érték 5%-nál nagyobb mértékben különbözik-e a jelenlegi értéktől.
- Ha nem, akkor ezt nem tekinti különleges esemény időpontjának.

- Ha igen, akkor az adott esemény előtti 24 órás intervallumot vizsgálva megállapítja, hogy az esemény előtt a kiugró értékhez képest magasabb vagy alacsonyabb értékek jelennek meg a mérések nyugalmi szintjén.
- Ha az esemény előtti nyugalmi szint magasabb értékeket képvisel, mint az esemény során mért szélsőérték, akkor ezt az eseményt egy Forbush-csökkenésnek kategorizálja és a további 24 órás "előreugrásokat" 24 óra erejéig megszakítja.
- Ha az esemény előtti nyugalmi szint alacsonyabb értékeket képvisel, mint az esemény során mért szélsőérték, akkor ezt az eseményt egy GLE-ként kategorizálja és a további 24 órás "előreugrásokat" 24 óra erejéig megszakítja.

2.4. Események megerősítésére használt adatbázisok

Az 1. fejezetben bemutatott és ismertetett űridőjárási eseménytípusokhoz tartozó, a Lomnici neutronmonitor adataiból azonosított és elkülönített események megfelelő kategorizálásához és megerősítéséhez számos nyilvánosan elérhető adatbázist használtam fel.

Az általam detektált GLE-k esetében a szakirodalomban gyakran előforduló, Oului Egyetem munkatársai által létrehozott és frissített katalógust vettem alapul, amely 1956-tól kezdődően a mai napig 74 db GLE-t tartalmaz és a következő linken érhető el: <https://gle.oulu.fi/#/>.

A Forbush-csökkenéseket az IZMIRAN projekt nemzetközi adatbázisával vettem össze, amely a globális neutronmonitor hálózat detektorainak adatait kombinálva alkotott egy globális Forbush-csökkenésekre vonatkozó katalógust: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>.

A TGE események megerősítéséhez a Lomnici-csúcson, a neutronmonitor detektorai mellett található elektromos térerősség mérő adatait használtam, amelyek képesek rögzíteni a viharfelhőkben létrejövő elektromos tér anomáliákat. Emellett a publikusan elérhető villámtérképek archívumát is megvizsgáltam az események időpontjaiban, amelyeken zivatarok megjelenését figyeltem: <https://map.blitzortung.org>.

2.5. Az alkalmazott statisztikai módszer

Tekintettel arra, hogy az elemzett adatkészlet a Lomnici-csúcsi neutronmonitoroktól egy folytonos, kiváló minőségű, 42 éves időtartamú adatsor, elsőként azt szerettem volna ellenőrizni, hogy hosszú távú lineáris kapcsolatok állnak-e fenn hasonlóan pontos és megbízható indexekkel, amelyek az űridőjáráshoz és a napaktivitáshoz kapcsolódnak. E célból

úgy döntöttem, hogy a Pearson-korrelációs tesztet alkalmazom, mivel ez egy széles körben használt és pontos módszer két független változó – a és b – közötti korreláció mérésére. A teszt eredménye egy ρ korrelációs együttható, amely az adott két változó közötti kapcsolat típusát és erősségét mutatja meg. A Pearson-korrelációs együttható számítása az alábbi módon történik a 2.2 egyenlet szerint (Cohen et al., 2009):

$$\rho(a, b) = \frac{\sum(a - m_a)(b - m_b)}{\sqrt{\sum(a - m_a)^2 \sum(b - m_b)^2}} \quad (2.2)$$

A fenti egyenletben m_a és m_b az a és b változók átlagát jelölik. A ρ értéke -1-től +1-ig terjedhet. Ha $0 < \rho \leq 1$, akkor a két változó között pozitív lineáris korreláció áll fenn, ha $\rho = 0$, akkor nincs korreláció, és a $-1 \leq \rho < 0$ értékekre a korrelációt negatív lineáris korrelációnak tekinthetjük (Cohen et al., 2009). Az $|\rho| \geq 0.7$ értékekre a korrelációt erősnek tekinthetjük (Schober et al., 2018). Ezen statisztikai tesztet nem kizárólag a folytonos 42 éves adatkészleteken hajtottam végre, hanem olyan időintervallumokon, amelyek bizonyos típusú úridőjárási eseményeket rögzítenek, például Forbush-csökkenéseket és GLE-ket. Az említett eseménytípusokba tartozó vizsgált idősorok szelekciójának menetét a 2.3. fejezetben tárgyaltam.

A további, illesztett paraméterek közötti vizsgálatokhoz a Cramér-féle V kontingencia tesztet végeztem el, mivel a Pearson-teszttől eltérően itt kevesebb feltételezés szükséges az adatsorokról illetve a kapcsolatokról. Nem feltételezünk például lineáris kapcsolatot a tesztrel és az adatokban található erős szórásra és kilógó adatpontokra is kevésbé érzékeny. Az együttható számításának képlete (Wu et al., 2013):

$$V = \sqrt{\frac{\frac{\chi^2}{n}}{\min(k - 1, r - 1)}} \quad (2.3)$$

ahol, χ^2 a Khi-négyzet együttható, n a minta elemszáma, k és r pedig az oszlopok és sorok számát jelöli. A V értéke 0 és 1 közötti lehet, a 0 az két minta közötti asszociáció hiányát, 1 pedig függvénytípusú kapcsolatot jelöl.

2.6. A Forbush-csökkenések illesztése

Az olyan jellemzők, mint például az amplitúdó vagy a Forbush-csökkenés időtartama, a nyers adatokból nehezen és kis pontossággal határozhatók csak meg, emiatt szerettem volna illesztések segítségével növelni az eredményeim pontosságát. Így a gondosan kiválogatott Forbush-csökkenések tulajdonságait – mint például az amplitúdó, a minimum elérésének időpontja és a jelenség hossza – illesztések segítségével határoztam meg. A

jobb illesztések elérésének érdekében egy 10 órás futóátlaggal simított adatsorral dolgoztam. Fontos megemlíteni, hogy jelen dolgozatban az illesztéseket egyelőre csak az 5%-os Forbush-csökkenésekre végeztem el, és természetesen a jövőben tervben van ezen eredményeket kiterjeszteni a 4%-os leválogatásra is. A 3%-os csökkenésekre valószínűleg az illesztéseket már nem fogom tudni alkalmazni, hiszen ezeknél az eseményeknél már egyéb jelenségek is bekerülhetnek a leválogatásba, valamint ennél a szintnél már nehezebb elkülöníteni az adatsor sajátosságait a zajtól. A Forbush-csökkenésekről elmondható, hogy lefolyásuk közel sem mondható szimmetrikusnak, hiszen a csökkenés nagyon rövid időtartam alatt végbemegy (jellemzően néhány óra, 1 nap), míg az alapszintre való visszatérés sokkal hosszabb időt vesz igénybe (több napos, hetes időskála). Ezen okok miatt egy hagyományos Gauss-függvény nem alkalmas az illesztésre, ezért egy módosított Gauss-függvényt használtam, melyet a Forgács-Dajka et al. (2021) tanulmányban definiáltak az alábbi formában:

$$p(x) = A \exp \left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2} \right) \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{n(x - m)}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] + b \quad (2.4)$$

ahol A az amplitúdó, m a minimum elérésének helye (függ a kivágott adatsor hosszától), σ a félértékszélesség, n alakparaméter (a görbe ferdeségét írja le), b pedig az y tengely menti eltolást adja meg.

Itt rögtön meg is említeném, hogy bár a leválogató algoritmus összesen 117 darab 5%-os Forbush-csökkenést azonosított, az illesztések során gyorsan nyilvánvalóvá vált, hogy ezek között akadnak olyan események is, amelyek nem feltétlenül rendelkeznek a Forbush-csökkenésekre jellemző alapvető tulajdonságokkal, sokkal inkább valamilyen egyéb zavarok okozhatták ezen eseményeknél a csökkenést. Az ilyen problémás eseteket az illesztő algoritmus sem tudta kezelni, így ezeket kihagytam a további statisztikai vizsgálatokból (erre láthatunk egy példát a 2.5. ábrán). Végezetül így összesen 77 esetben bizonyult jónak az illesztés, majd innentől ezen események illesztésből megkapott paramétereivel folytattam a munkát. Fontos megjegyezni, hogy az illesztésekből visszkapott amplitúdó értékek valójában mindig kisebbek, mint az adatsor valódi minimum értékei, hiszen a simítás és illesztés kiküszöböli a túlságosan kiugró értékeket, emiatt előfordulhat, hogy az így kapott amplitúdók nem feltétlenül 5%-os csökkenést mutatnak. Mint az a fentebb felsorolt függvényparaméterekből is látszik, az illesztésekből közvetlenül nem kaptam vissza a csökkenések teljes időtartamát. Ugyanakkor lehetőség van az illesztett görbe felhasználásával közvetett módon meghatározni ezt a jellemzőt is, melyhez szükség van egy jól definiált alapszintre, amelytől lehet mérni a Forbush-csökkenés kezdetét. A neutronmonitor adatok jellemzően magas zajszintje és a detektoronként eltérő érzékenységi szint miatt a szakiro-

dalomban nem található egy egyéges alapszint, vagy akár egy alapszint megállapításához egységesen alkalmazott módszer, így ebben a dolgozatban a következőkben ismertetett elveket alkalmaztam a meghatározáshoz.

- Kiszámoltam az illesztett görbe második centrális deriváltját ($f''(x)$) az alábbi módon:

$$f''(x) \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (2.5)$$

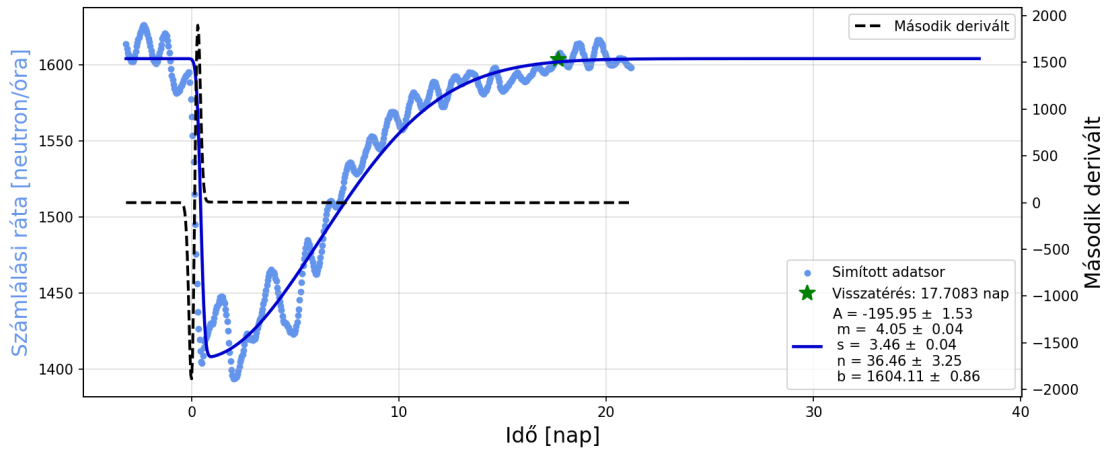
ahol $f(x)$ a deriválni kívánt függvényt jelöli, h pedig a használt lépésköz. A második centrális derivált függvény minimumértéke megadta a Forbush-csökkenés kezdőpillanatát, ezzel együtt az alapszintet, amihez képest mérhető a változás.

- A kezdőpont ismeretében ezt a pontot tekintettem 0. időpillanatnak.
- Betoltam az illesztett görbét az időtengely mentén a nullába.
- Az illesztett görbét kiterjesztettem 38 napra.
- Megkerestem, hogy mikor tér vissza az alapszinthez nagyon közeli állapotra (0,1%-on belülre) az illesztett görbe, mellyel megkaptam a Forbush-csökkenések időtartamát is.
- Végül meghatároztam azt is, hogy mennyi idő alatt éri el az alapszintről a minimum értéket az illesztett görbe.

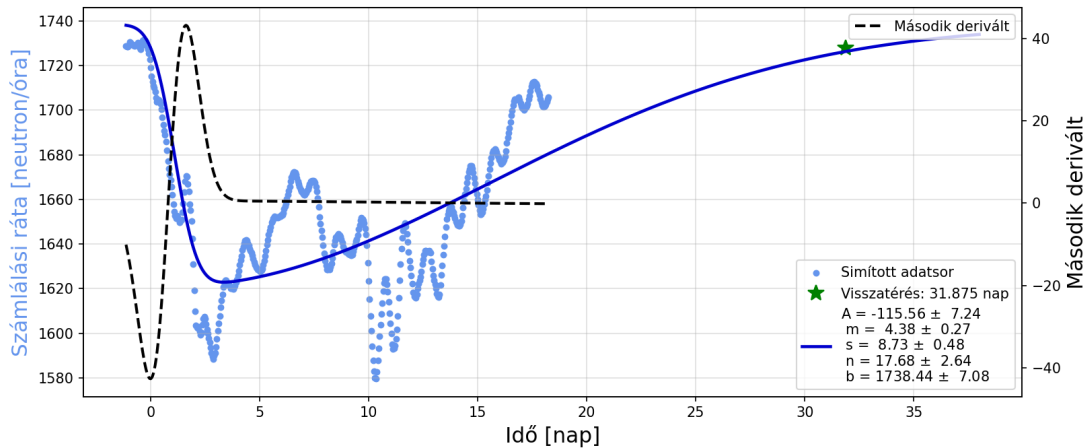
Itt megjegyezném, hogy néhány esetben előfordult, hogy a kiterjesztett 38 napos intervallum alatt sem tért vissza a megadott alapszinthez közeli állapotra az illesztett függvény. Az ilyen esetekben nem érdemes tovább kiterjeszteni az intervallumot, ugyanis a Földön mérhető neutronfluxust többféle fizikai folyamat is befolyásolhatja (melyek számos, időben változó fizikai paraméterrel rendelkeznek), melyek következtében a neutronfluxusban fellelhető jelenségek vizsgálatánál nem lehetséges egy mindenkori alapszintet definiálni, célszerűbb ezért aktuális alapszinteket használni.

Az új alapszint lehet a kiinduló alapszinthez képest alacsonyabb, ugyanakkor időnként előfordulhat az is, hogy magasabb új alapszinttel folytatódik az idősor.

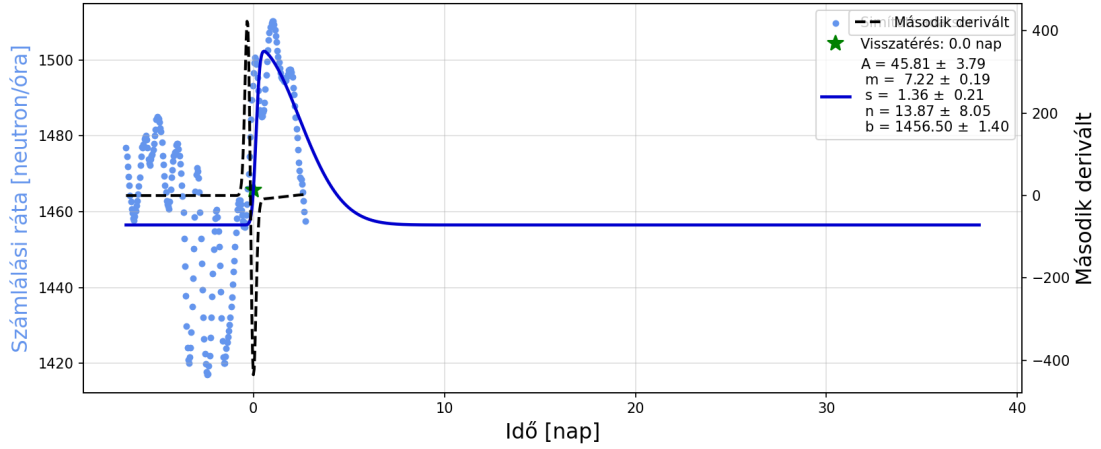
A könnyebb átláthatóság kedvéért bemutatok 3 példát a fentiekben ismertetett illesztésekről, melyek közül az egyik "szép" Forbush-csökkenéshez tartozik (2.3. ábra), melynek illesztése is zökkenőmentesebb; majd egy másik csökkenést, melynél sok más egyéb jelenség is megmutatkozik látszik az adatsorban, melyek jelentősen megnehezíthetik az illesztések kivitelezését (2.4. ábra); végezetül egy harmadik esetet, ahol nem sikerült az illesztés (2.5. ábra), így az ehhez hasonlóak nem kerültek be a további statisztikai vizsgálatokba.



2.3. ábra. Az ábrán a számítási ráta (detektált neutron/óra) időbeli változását láthatjuk kék pontokkal jelölve egy "szép" Forbush-csökkenés esetében, a kék folytonos vonal az illesztett módosított Gauss-függvényt szemlélteti, míg szaggatott fekete vonallal az illesztett görbéből számolt második centrális derivált függvényt ábrázoltam. Az ábrán zöld csillag jelöli azt a pontot, amikor a görbe visszatért a meghatározott alapszinthez közeli értékre. A jobb alsó sarokban láthatjuk az illesztési paramétereket is a hibákkal együtt.



2.4. ábra. A fenti ábrán egy kevésbé "szép" Forbush-csökkenést látunk, melyen megfigyelhető, hogy körülbelül a 3. és 10. nap között valamilyen egyéb, a detektált neutronszám növekedését okozó mechanizmus is jelen volt az adatsorban. Ez az effektus máris azt eredményezte, hogy az illesztés kevésbé jól illeszkedik ebben az esetben a simított görbéhez, mint mondjuk a fentebb bemutatott 2.3. ábrán. Az ábrán használt jelölések teljesen meg-
egyeznek a 2.3. ábrán használtakkal.



2.5. ábra. Az ábrán egy rossz illesztés tipikus példáját mutatom be, az ilyen és ehhez hasonló illesztések nem kerültek be a további elemzésekbe. Az ábrán lévő jelölések meg- egyeznek a 2.3. ábránál leírtakkal. Látható, hogy ebben az esetben a Forbush-csökkenést detektáló algoritmus valóban észlelt csökkenést az adatsorban, de az adatpontok erőteljes ingadozása miatt az illesztő algoritmus a növekedést találta meg, a csökkenést pedig a simítás ellenére sem sikerült megilleszteni.

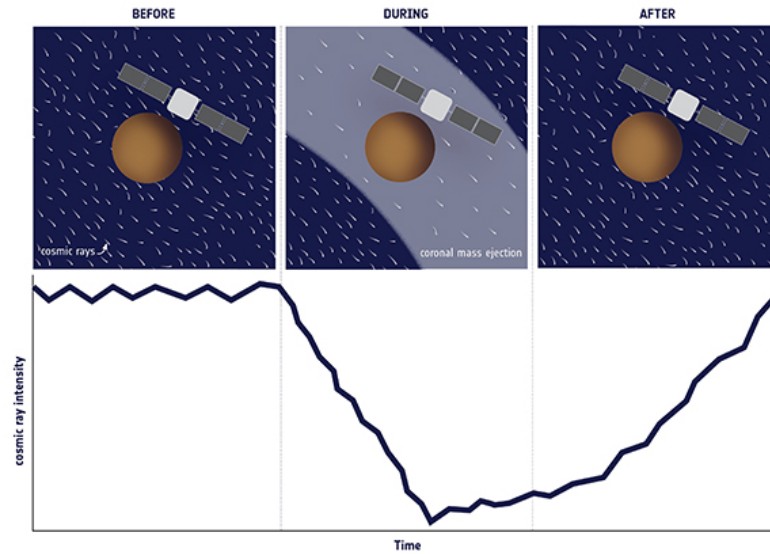
3. A megfigyelt különleges események és effektusok

3.1. Űridőjárási események bemutatása

A következőkben áttekintjük, hogy milyen fizikai folyamatok okozhatják azokat a különleges, átlagtól eltérő eseményeket, amelyeket a neutronmonitor adatsorában talál- tam. A három eseménytípus a Forbush-csökkenés (FD), a talajszint-közelbeli sugárzástöbblet (GLE) és a viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE) volt, melyek közül az első kettő szoláris eseményekhez köthető, míg az utolsó lokális, meteorológiai változásokhoz.

A Forbush-csökkenés esetében a neutroneseményekben egy csökkenést észlelünk, mely- nek során a csökkenés gyorsabban, a visszaállás lassabban zajlik, így a jelenség teljes idő- skálája 5-10 nap körül mozog (3.1. ábra).

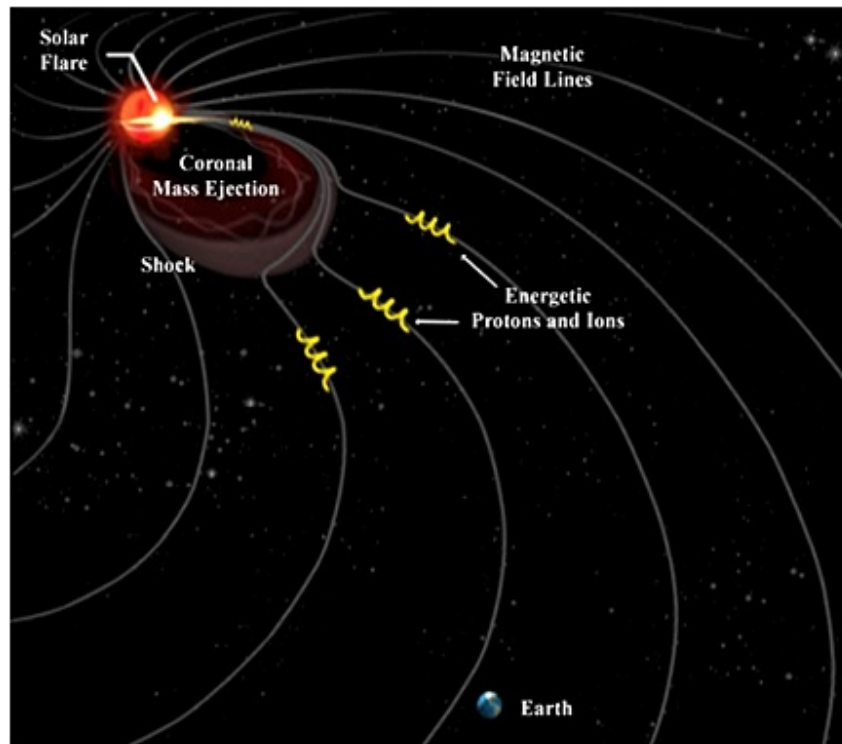
Az intenzitáscsökkenések háttérében Forbush (1937, 1938) munkái alapján a geomág- nes mező torzulásai állnak. Ezeket a zavarokat a napkitörések, koronakidobódások, nagy sebességű plazmaáramlások vagy más aktív folyamatok után a Napon vagy közvetlen kör- nyezetében végbemenő lökéshullámok terjedése kényszerítik ki, melyek a bolygóközi térben is továbbterjednek. A kiváltott mágneses zavarok visszaverik vagy szétszórják a helioszfé- rán keresztül haladó kozmikus sugárzás egy részét, mintegy leárnyékolva ezzel a fluxus egy bizonyos hányadát. Fontos megjegyeznünk azonban, hogy FD-k geomágneses zavarok nélkül is megfigyelhetők, illetve a különböző geomágneses zavarok által kiváltott eltérő



3.1. ábra. A Forbush-csökkenést előidéző koronaanyag-kidobódás (coronal mass ejection – CME) hatásának sematikus ábrázolása. Forrás: <https://sci.esa.int/web/solar-system/-/59397-cosmic-ray-drop>

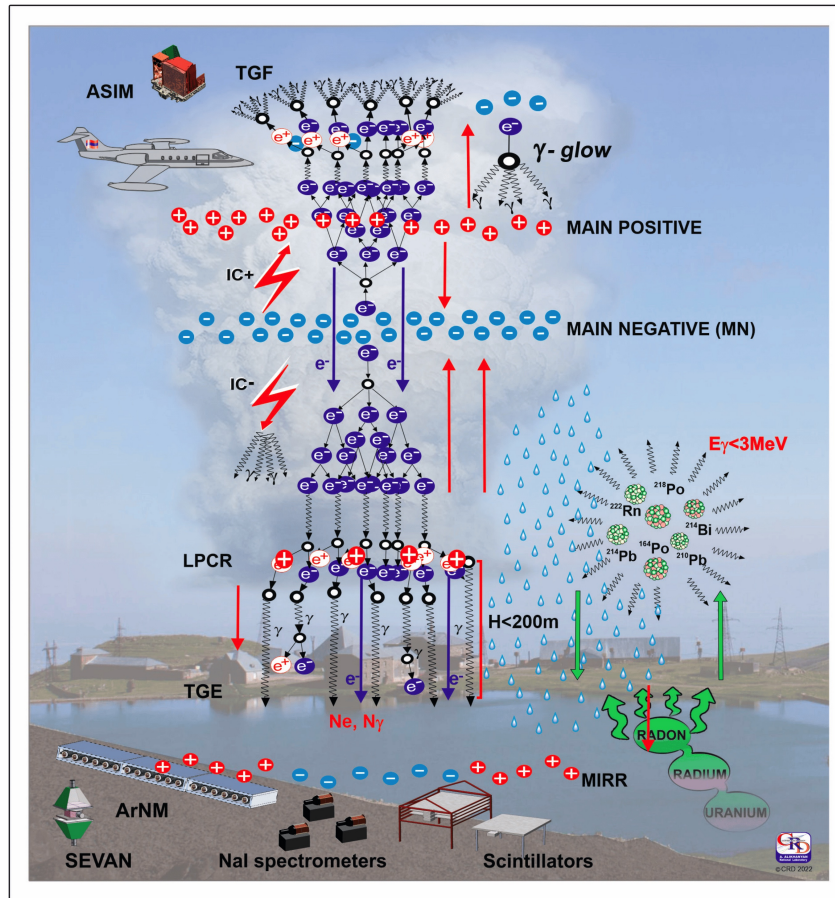
FD-k esetében sem teljesen tisztázott a pontos fizikai folyamat. Az intenzitás-csökkenésről, illetve a mögöttes fizikáról további részleteket olvashatunk Lockwood (1971); Storini (1990); Cane (2000); Lingri et al. (2022) munkáiban.

A talajszint-közeli sugárzástöbblet a földi detektorok által rögzített kozmikus sugárzás intenzitásának hirtelen megnövekedése. A GLE-k mindig nagy napkitörésekhez kapcsolódnak, de az akár több tíz GeV-os részecskéket, azaz SEP-eket előidéző gyorsulási mechanizmus nem ismert pontosan (3.2. ábra). Ami megkülönbözteti a GLE-ket az átlagos SEP eseményektől, az az, hogy a Föld felszínét is eléri a részecskéi, így közvetlen hatással vannak a földi környezetre. A GLE-kkel kapcsolatos SEP-fluxusokat gyakran két különböző spektrális fázis jellemzi: egy lágyabb fázis, amelyet a megaelektronvolt (MeV) tartományba tartozó közepes energiájú részecskék dominálnak, és egy keményebb fázis, ahol a gigaelektronvolt (GeV) tartományba tartozó nagyenergiájú részecskék dominálnak. Az LMKS neutronmonitor adatokon csak a GLE-k kemény fázisát lehet észlelni a 4 GeV-es levágási ridegségnek köszönhetően. A hasonló keletkezési mechanizmusok ellenére nem minden esetben figyelhetők meg együtt a GLE-k és a Forbush-csökkenések, sőt az esetek többségében egyszerre csak az egyik látható a neutronmonitorok adataiban. Ennek és a két jelenség között fennálló pontos fizikai kapcsolatoknak a magyarázata még nem tisztázott a szakirodalomban (Belov and Eroshenko, 1996; Bieber et al., 2004; Kudela and Langer, 2009; Berrilli et al., 2014; Battarbee et al., 2018).



3.2. ábra. Szoláris eredetű nagyenergiás részecskék (solar energetic particles), azaz SEP-ek kialakulásának egy lehetséges modellje. Forrás: <http://spaceweather.uma.es/solarstorms.html>

A viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (3.3. ábra) esetén az neutronfluxusban megfigyelhető emelkedés nagyon rövid időskálán játszódik le, általában pár percen keresztül figyelhetők csak meg. A TGE-k eredetének nincs kapcsolata villámlási eseményekkel, sőt egyes vizsgálatok alapján, a közelben bekövetkező villámcsapásokkor megszűnnek (Kudela et al., 2017; Chum et al., 2020). A TGE-k előfordulásának korrelációja erős a magas elektromos térerősség értékekkel, amely arra utal, hogy potenciális eredetük a viharban keletkező relativisztikus elektron-lavina (relativistic avalanche of runaway electrons – RREA) fékezési sugárzása lehet, ahogy azt Gurevich et al. (1992) javasolta. Egy másik lehetőség, hogy a villámkisülésben vagy annak környezetében történik a részecskekeletkezés. Azonban annak ellenére, hogy a villámkisüléseket jelenleg erős részecskegyorsítóként tartják számon, annak fizikai mechanizmusa, hogy a kisülés hogyan hoz létre nagyszámú relativisztikus részecskét, még mindig vita tárgyát képezi, illetve, ahogy korábban is említettem, egyes vizsgálatok alapján a TGE események megszűnnek villámcsapáskor.

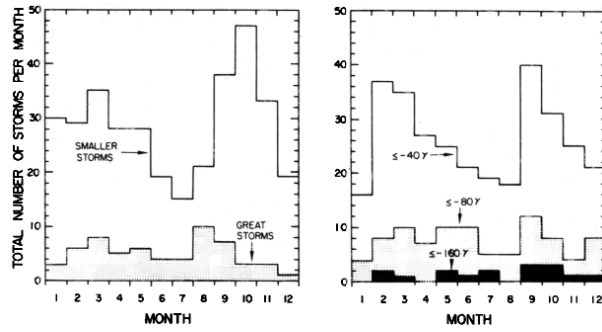


3.3. ábra. Zivatarhoz kapcsolódó töltött struktúrák és részecskeáramlások, illetve részecskeelavínák. A piros nyilak a légköri elektromos mezőket és a villámokat mutatják. Forrás: Chilingarian (2023)

3.2. Russell-McPherron effektus

A neutronmonitorok által mért kozmikus sugárzás fluxusában a legkönnyebben észrevehető és legkarakterisztikusabb periódus a körülbelül 11 éves napciklus által keltett jelenség. Ez a periódus a Nap aktivitásának ciklikus változásaihoz kapcsolódik, amelyek befolyásolják a Földre érkező kozmikus sugárzás mennyiségét. A napi ingadozásokat a nyomáskorrigáció eliminálja, így a napcikluson kívül más periodikus jel nem gyakorol erős befolyást a neutronmonitorok méréseire. Ugyanakkor a szabálytalan előfordulású, Nap eredetű geomágneses viharok éves eloszlása érdekes mintázatot mutat: a geomágneses viharok jelentősen nagyobb gyakorisággal fordulnak elő napéjegyenlőségek idején, mint a téli vagy nyári napfordulók körüli időszakokban.

Ezt a jelenséget először átfogóan Russell and McPherron (1973) vizsgálta, és a nevét a két szerző, Russell és McPherron után kapta. A Russell-McPherron effektus mögött álló pontos fizikai mechanizmus nem teljesen tisztázott, azonban a jelenség hátterében a földi



3.4. ábra. *Bal panel:* Az észlelt erős és gyenge geomágneses viharok éves eloszlása 1875-től 1927-ig, Chapman and Bartels (1940) adatai alapján. *Jobb panel:* Az észlelt geomágneses viharok éves eloszlása, a Dst indexben legalább -40, -80 és -160 nT-ás csökkenéseket elérő viharokat figyelembe véve 1958-ban és a 1961-69-es időszakban (Russell and McPherron, 1973).

mágneses mező és az interplanetáris mágneses tér (IMF, Interplanetary Magnetic Field) kölcsönhatása állhat. Napéjegyenlőség idején a Föld mágneses tengelyének dőlése és a Nap-Föld térbeli elhelyezkedése olyan konfigurációt hoz létre, amely lehetővé teszi az IMF kedvezőbb irányultságát a geomágneses aktivitás szempontjából. Ennek eredményeként a Nap eredetű energikus részecskék könnyebben átjuthatnak a Föld mágneses mezején, ami fokozza a geomágneses aktivitást.

Az effektus globális jellegű, és működése mindkét féltéken megfigyelhető, bár kisebb különbségek léteznek az eloszlás mintázatában, például a maximumok és minimumok időpontjait illetően. Az IMF délies irányultsága (B_s komponense) kulcsszerepet játszik a geomágneses viharok erősségében és gyakoriságában. Amikor az IMF délies irányú, az mágneses újrapcsolódást eredményez a magnetopauzánál, amely elősegíti a részecskék bejutását a magnetoszférába, és ezzel geomágneses aktivitást vált ki.

A Russell-McPherron effektust az általam kiválogatott Forbush-csökkenések vizsgálatával és a Lomnici neutronmonitor adataival is elemzem a 4. fejezetben. Habár a neutronmonitor adatainak használata nem nyújt teljes képet a geomágneses tér állapotáról, az adatok pozitív korrelációt mutatnak a globális geomágneses mezőt jellemző Dst indexszel, különösen mágneses viharok idején (Kisvárdai et al., 2025). Ez lehetővé teszi a geomágneses aktivitás indirekt vizsgálatát a neutronmonitor adatain keresztül.

Az effektust elsőként leíró eredeti cikkben található az 3.4. ábra, amely egyértelműen bemutatja a féléves periódus jelenlétét a geomágneses viharok eloszlásában (Russell and McPherron, 1973). Az elméletet tovább erősítik későbbi kutatások is, például az IMF szezonális változásai és a földi mágneses térrel való kölcsönhatás mechanizmusainak részletesebb megértése (Jeong and Oh, 2022). Ezek az eredmények fontos lépést jelentenek a

	F10.7	Dst	Eltolt Dst
Neutronfluxus (teljes időtartam alatt)	-0.743 (99,9%)	0.306 (99,9%)	0.314 (99,9%)
Neutronfluxus (FD)	-0.744 (99,9%)	0.555 (99,9%)	0.589 (99,9%)
Neutronfluxus (GLE)	-0.254 (99,9%)	0.340 (99,9%)	-

4.1. táblázat. Pearson-módszerrel kiszámított korrelációs együtthatók a megadott adatso-
rok között elvégzett teszt esetén. A teljes időtartam alatti neutronfluxus azt jelenti, hogy
összehasonlítottam az egész 42 évnyi kozmikus sugárzás mérési idősort az F10.7 és a Dst
indexekkel. Elvégeztem a korrelációs tesztet a Forbush-csökkenések, a GLE-k és a TGE
események időszakaira, ezeket az FD, GLE és TGE jelölésekkel jelöltem. Az utolsó oszlop-
ban alkalmazott időeltolások pontos értékeit a főszövegben adom meg. Minden korrelációs
együttható mellett az adott értékhez tartozó szignifikancia szint látható. GLE-k esetében
nem végeztük el az időeltolással vett korreláció vizsgálatát, mivel a GLE események pár
órás időtartama összehasonlítható az időeltolás legkisebb mértékével.

geomágneses aktivitás időbeli mintázatának és a Föld mágneses környezetének mélyebb
megértésében.

4. Eredmények

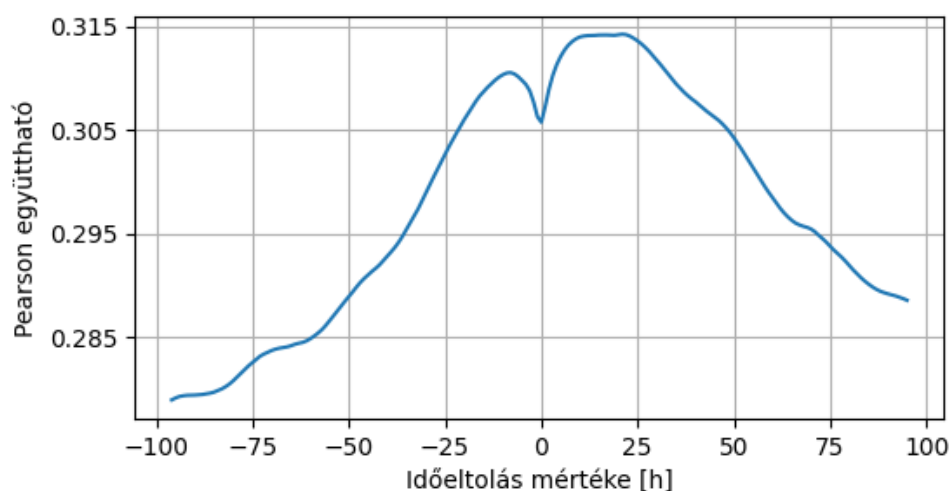
4.1. Statisztikai vizsgálatok és korreláció más űridőjárási adatso- rokkal

A statisztikai vizsgálat célja, hogy az űridőjárást alakító különböző fizikai folyamatok
közötti lehetséges kapcsolatokat tudjak azonosítani. Ennek részét képezi a napaktivitás, a
geomágneses tér és a kozmikus sugárzás fluxusa közötti lehetséges korrelációk keresése a
Pearson-féle statisztikai módszer segítségével. Ehhez az detektorból kinyert nyers adatok
feldolgozáson estek át, melyet részletesen ismertettem a 2. fejezetben.

Elsőként a három idősort korreláltattam egymással, azaz a neutronfluxust – melyet
a kozmikus sugárzás kelt – először a napaktivitással összefüggő 10,7 cm-es rádiófluxus-
sal, majd a Föld globális mágneses mezejében megfigyelhető regisztrált eltérésekkel. Mint
ahogy azt a 2.5. fejezetben leírtam, az alkalmazott statisztikai módszer eredményeként egy
együtthatót kapunk, melynek értéke egyrészt jelzi, hogy az idősorok mennyire „futnak”
együtt, illetve az együttható előjele a korreláció és antikorreláció viszonyáról ad felvilá-
gosítást. Eredményeimet a 4.1. táblázatban foglaltam össze. Ez alapján látható, hogy a
Pearson korrelációs együttható értéke $-0,743$ a neutronfluxus és a Nap rádiósugárzása
között, amely azt jelzi, hogy a két idősor között antikorreláció figyelhető meg, illetve a két
adatsor közötti lineáris kapcsolat elég erős. Ugyanezt a módszert alkalmazva a neutronf-
luxus és a Dst index között, a korrelációs együttható értékére $0,306$ -et kaptam, ami egy

korrelációt mutat, de a két adatsor között lazább a kapcsolat, mivel a Pearson-együttható értéke közelebb van nullához. Emellett a táblázatban feltüntettem az adott korrelációs együttható szignifikancia szintjét is, ez alapján látható, hogy 99,9%-os valószínűségi szint mellett állíthatjuk, hogy a fent említett adatsorok között valamilyen lineáris kapcsolat áll fent. Emellett a Pearson-féle korrelációs együttható négyzete megegyezik a determinációs együttható értékével, ha a változók között lineáris függvénykapcsolatot feltételezünk. Ennek segítségével megállapíthatjuk, hogy a függő változó varianciájának mekkora része magyarázható a független változóval mérhető kapcsolata által. A determinációs együttható a kapcsolat erősségét %-os formában határozza meg. Ez alapján a kozmikus sugárzásban bekövetkező változásokat 55,20%-os mértékben magyarázza a Nap rádiósugárzásában bekövetkező változás, ami, mint ahogy azt már korábban is említettem, a napkitörésekkel áll szoros kapcsolatban.

Következő lépésként a különleges eseményeket tettem vizsgálataim tárgyává. Ehhez a két, nagy valószínűséggel szoláris eseményhez köthető Forbush-csökkenéseket és GLE-k eseteit elemeztem. Ahogy azt a 2. fejezetben már említettem, az algoritmus által kiválasztott eseményeket a megfelelő adatbázisok (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>, <https://gle.oulu.fi>) segítségével is verifikáltam. Ezután arra voltam kíváncsi, hogyha csak a különleges eseményekre koncentrálok, szorosabb lineáris kapcsolatot találok-e az úridőjáráshoz köthető indexekkel, vagy sem. Ezért az FD-k esetében az események szélsőértékeit körülvevő 4 napos időintervallumot vágtam ki a neutronfluxus adatsorából, míg a GLE-k esetében az esemény rövidebb jellege miatt csak 1 naposat. Természetesen mind a Nap rádiófluxusa, mind a Föld globális mágneses mezejében bekövetkező változások esetében is az ezekhez társítható időtartamokat vettem csak figyelembe. Az eredményeket a 4.1. táblázatban tüntettem fel, ahol látható, hogy a lineáris kapcsolat szorosabb megléte az F10.7 indexszel nem változott jelentősen, de a Dst index esetében a korábbi lazább lineáris kapcsolat szorosabbnak mondható. Ez alapján elmondható, hogy a kiválogatott időintervallumban bekövetkező neutronesemények jobban köthetőek a Föld globális mágneses mezejében bekövetkező változásokhoz. Ehhez a vizsgálathoz még fontosnak érzem megjegyezni az adatsorok időbeli felbontásának különbségét, ami nagy valószínűséggel erősen befolyásolja az eredményeket. Ez elsősorban a GLE-k esetében fontos, ahol maga a jelenség rövid időskálán játszódik le (pár óra). A neutronesemények és a Dst index adatainak időfelbontása 1 óra, míg a Nap rádiósugárzásának adatsora napos időfelbontással rendelkezik. A 2.1. ábrán látható példa az adatsorok időfelbontása közötti különbségre, ahol ebben a vizsgálatban az órás felbontást a rádiófluxus esetében úgy kaptam, hogy ugyanazt az értéket vettem minden órában az adott napon. Ezért valószínű-



4.1. ábra. A grafikon a Pearson együttható változását mutatja a neutronmonitor és a Dst adatkészletek közötti korrelációs tesztelés eredményeként, a Dst adatokra alkalmazott időeltolás mennyiségétől függően. A pozitív eltolás a jövőbeni Dst értékek jelenlegi neutronmonitor mérési értékeivel való korrelációját eredményezi.

nek tartom, hogy a korrelációs index emiatt sem változott jelentősen a FD-k és az F10.7 adatsorok elemzése esetében, míg a GLE-knél rosszabb lett. Ez utóbbi állítás további vizsgálatokat igényel, melyet a jövőben úgy szeretnék megvalósítani, hogy a neutron-monitor adatsorát "lerontom" napos felbontásra és úgy alkalmazom a fent említett vizsgálatokat.

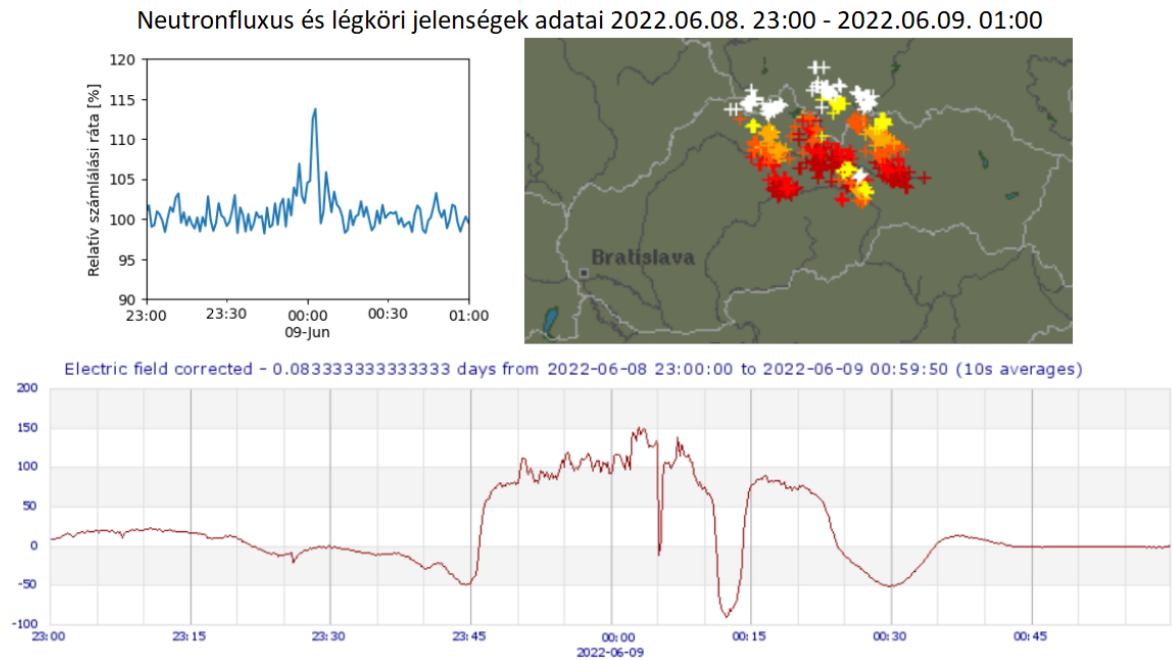
Utolsó lépésként az idősorok közötti időeltolás korrelációra gyakorolt hatását vizsgáltam. Az időeltolások tesztelésének motivációja a neutronfluxus adatsor prediktív potenciáljának feltárása a Dst indexre vonatkozóan. Közvetetten a korrelációs együttható változása az eltolással leírja a jelenlegi neutronfluxus és a későbbi globális geomágneses zavarok kapcsolatát. A 4.1. ábrán látható, hogy hogyan változik a Pearson-féle korrelációs együttható értéke attól függően, hogy a földi geomágneses zavarok idősorát mennyire toltam el a neutronmonitor eseményeihez képest. A maximális időeltolás ± 96 óra volt. Az ábrán látható, hogy a korrelációs index abban az esetben éri el a maximumát (és nem egy értéknél, hanem az ábrán egy plató látható), ha az időeltolás 7 és 21 óra között van. Ez tehát azt jelentheti, hogy a neutronesemények 7-21 órával hamarabb következnek be, mint a Föld globális mágneses mezejében a zavarok. Ennek fizikai magyarázata abban kereshető, hogy azok a részecskék, amik kiváltják a neutroneseményeket, tipikusan relativisztikus vagy ahhoz közeli sebességgel rendelkeznek, míg a geomágneses mezőben bekövetkező zavarokat a Napból kilökődő mágneses „plazmacsomagok”, koronaanyag-kidobódások, azaz CME-k okozzák, melyek tipikus sebessége 500-2000 km/s (Weygand et al., 2011; Parker, 1958; Mertsch, 2020). Ez a sebességkülönbség magyarázhatná a jelenséget, de még továb-

bi vizsgálatokat igényel, mivel ez egy elég széles időtartamot jelent. Egyrészt vizsgálni szeretném még a lehetséges fizikai okokat, másrészt a statisztikai módszer korlátait is.

4.2. TGE-k azonosítása

1981 és 2017 között összesen egy darab TGE eseményt rögzítettek a szakirodalomban, amely Chum et al. (2020) munkájában került közlésre. Az általam végzett vizsgálatok a 2017 és 2023 június közötti időszakra is kiterjednek és az új adatok között a különleges események azonosítására alkalmazott Python programommal felfedeztem három darab további TGE eseményt. Ezen események 2022.05.03., 2022.06.08. és 2022.06.09. napokon következtek be. Időskálájuk a pár perces tartományba esik, amely kizárja, hogy GLE-ként lehessen őket kategorizálni, azonban a szakirodalomban eddig megjelent TGE-k tipikus lefutására jellemző karakterisztikákat sem mutatnak a görbéik. A nem egyértelmű kategorizálhatóság szükségessé tette megerősítő vizsgálatok elvégzését. Ebben a munkában még nem statisztikai módszerekkel végeztem az események alatti neutronfluxus korreláltatását más adatokkal, az összehasonlítás manuálisan történt. A használt adatok pedig nem úridőjáráshoz köthető mérésekből származnak, mert nem szoláris eseményekhez köthetők a TGE események, hanem légköri jelenségekhez. A Lomnici-csúcson felszerelt elektromos térerősségmérő berendezés adatsora mellett a térségben bekövetkezett villámlásokat szemléltető radartérképet vettem figyelembe a vizsgálathoz a TGE-k lezajlásainak megfelelő időszakokból, ahogy ezt a 4.2. ábrán bemutatom.

Az ábrán megjelenített adatok alapján látható, hogy a TGE-vel egy időben erős anomáliák jelentek meg a térerősség mérések értékeiben, illetve, hogy az azonos időszakban a Lomnici-csúcs és környéke egy viharfelhővel volt körülvéve. Hasonló jelenségek figyelhetők meg az adatsorokban a többi két feltételezett TGE idején is. Ezek a megfigyelések erősen arra utalnak, hogy az azonosított rövid élettartamú, nem szoláris eredetű különleges események a neutronfluxusban valóban TGE események voltak. A mérési hibák lehetőségeit is vizsgálva ellenőriztem a neutronmonitor csöveinek egyéni méréseit a TGE-k közben. A 8 cső közül mindegyik jelentős, rövid ideig tartó növekedéseket mutat a mérési értékekben, ezáltal kizárható a ritkán előforduló, de lehetséges meghibásodása egy detektorcsőnek. Az általam azonosított és itt bemutatott események értékes hozzájárulások a légköri nagyenergiás folyamatok intenzív fejlődésben lévő szakirodalmához, mivel ezen események rendkívül érdekes karakterisztikákat mutatnak, amelyek magyarázata további kutatásokat igényel.



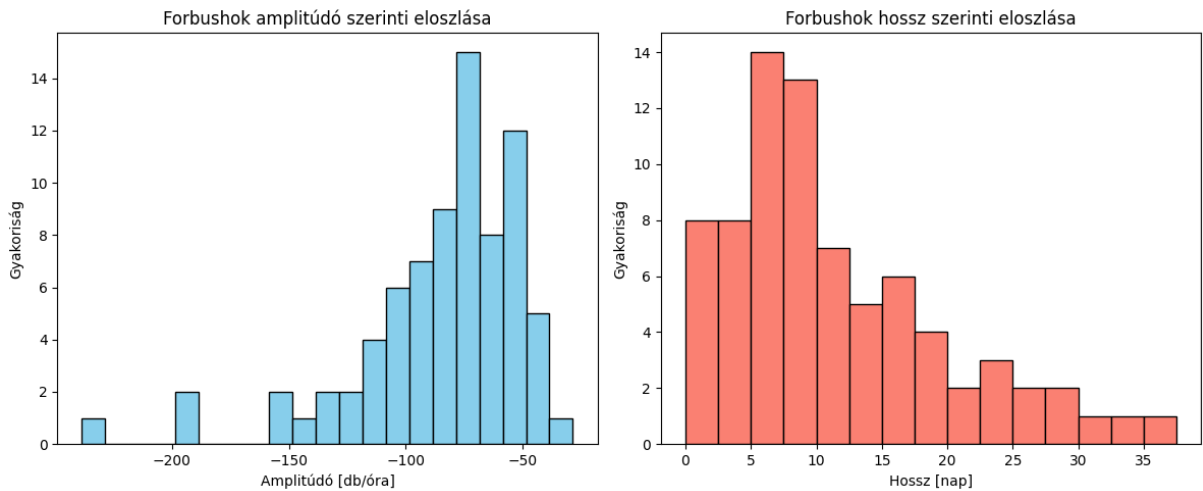
4.2. ábra. Az ábrán megjelenített adatok mind a 2022.06.08. 23:00-tól 2022.06.09. 01:00-ig terjedő időszakra vonatkoznak. *Bal felső ábra:* A Lomnici neutronmonitor által mért neutronfluxus, *Jobb felső ábra:* Szlovákia radartérképén megjelenő villámlások az adott időszakban, *Alsó ábra:* a Lomnici-csúcson lévő elektromos térerősségmérő adatsora.

4.3. Forbush-események eloszlása és tulajdonságai

A továbbiakban a Forbush-csökkenések különböző tulajdonságainak statisztikai vizsgálatait végeztem el.

Az illesztések eredményeiből kinyert amplitúdó és eseményhossz értékek eloszlását elemeztem először. Ehhez egy hisztogramot készítettem (4.3. ábra), majd az illesztett Forbush-eseményeket a 42 évnyi kozmikus sugárzás mérések görbéjére raktam a saját időpontjaiknak megfelelő adatpontokra illesztve, annak érdekében, hogy megvizsgáljam, mutatkozik-e bármilyen korreláció a pontok elhelyezkedésében.

Ferde Gauss-eloszlást láthatunk az amplitúdó és hossz értékekben is az összes illesztett Forbush-csökkenést magába foglaló mintaelem halmazt illetően a 4.3. ábrán. A minták átlaga, mediánja és tapasztalati szórása az amplitúdókra és a hosszakra vonatkozóan a 4.2 táblázatban található. A 4.4. ábrán a neutron fluxusban észlelt csökkenések előfordulási gyakorisága nagyobbak látszik szoláris maximumok idején. Minimumok időszakában szinte alig volt detektálható 5%-os amplitúdónál intenzívebb esemény. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a szélsőségesebb, a minimum és maximum között jelentősebb különbséget mutató ciklusokban erősebb, hosszabb Forbush-csökkenéseket tapasztalunk.



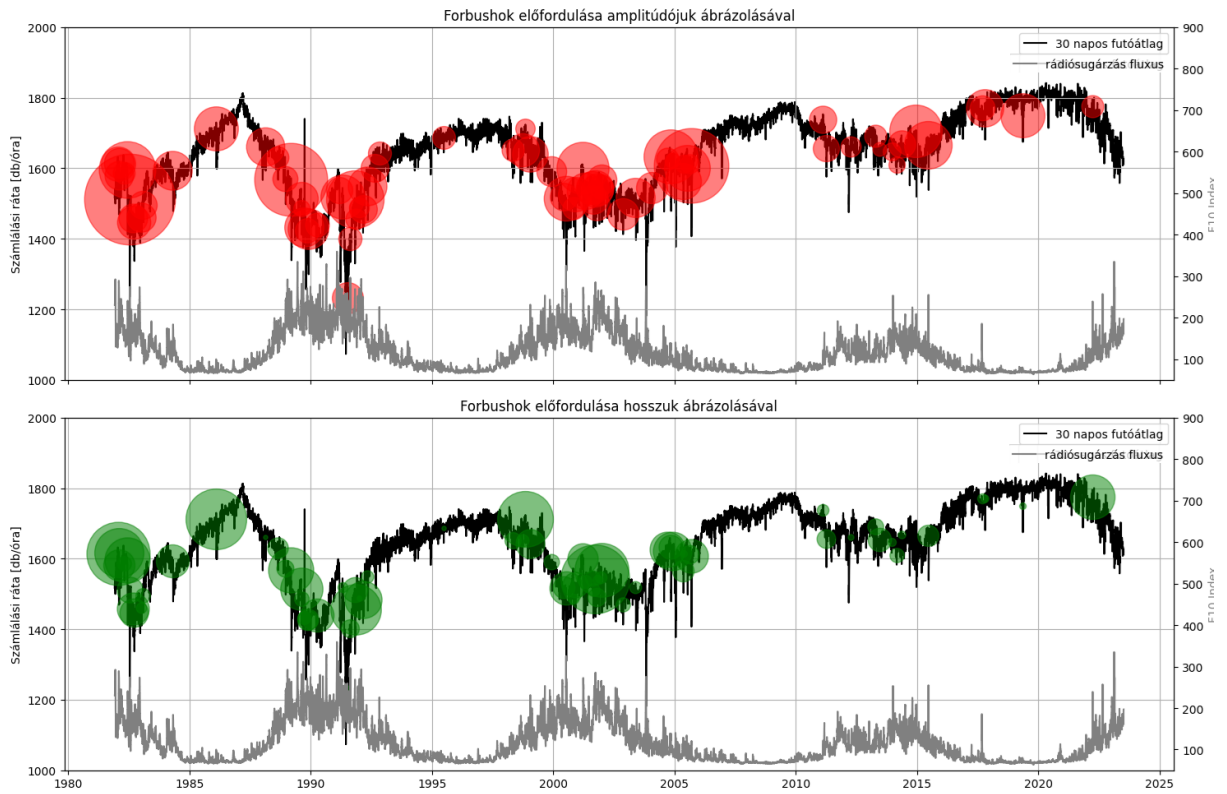
4.3. ábra. A két ábra függőleges tengelyén az adott intervallumba eső értékek gyakorisága látható, a vízszintes tengelyen pedig az intervallumok értékei, a jobb oldali ábrán az amplitúdókkal (negatív értékekkel, mivel csökkenésekről beszélünk), a bal oldalin pedig a hosszal.

	Átlag	Medián	Tapasztalati szórás	Várható érték
Amplitúdó	-87.40	-78.74	39.69	[73.07-100.89]
Hossz	12.54	9.58	9.42	[9.78-15.30]

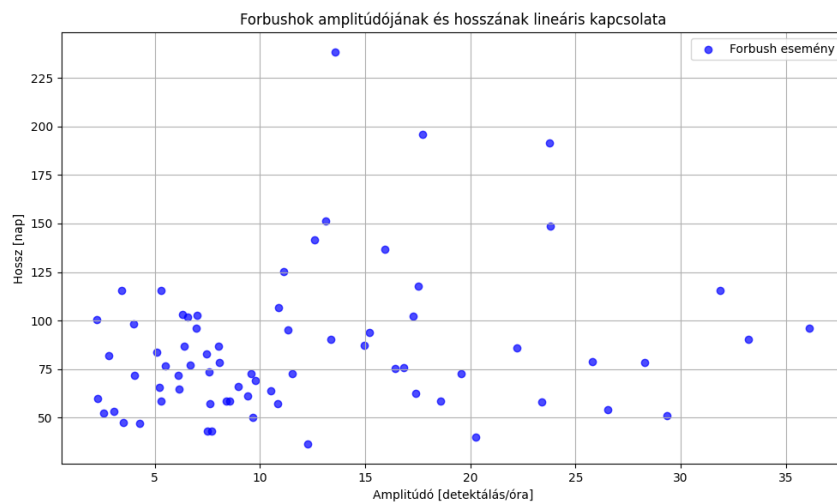
4.2. táblázat. A Forbush-csökkenések illesztett paramétereiből kinyert amplitúdó és hossz-értékek átlaga, mediánja, szórása és az ezekből származtatott várható értékeik. A becslt várható értékek 95%-os konfidenciaintervallumon a táblázat utolsó oszlopában található.

Az ábrán bemutatott adatponthalmazokkal elvégeztük a Cramér-próbaként ismert statisztikai vizsgálatot, amely két adatsor közötti asszociáció erősségét hivatott vizsgálni. Az eredményképpen kapott Cramér-féle V kontingencia együttható értéke az amplitúdó-hossz értékekre 0.366 lett, amely egy közepesen erős kapcsolatnak minősül. A nem függvényszerű kapcsolat eredménye, hogy azonos amplitúdó értékekkel előfordulhatnak egészen széles hossz-tartományba eső események. Tovább vizsgálva a Forbush-események eloszlását, hónapokra csoportosítottam a detektált események időpontjait. Egy halmazba soroltam például a tetszőleges év januárjában történt Forbush-csökkenéseket, ugyanígy a februáriakat, és így tovább. Ezek alapján készítettem a 4.6. ábrán látható hisztogramokat. A hisztogramokhoz meghatározott 5%, 4% illetve 3%-os amplitúdó határokat a 2. fejezetben leírtak alapján határoztam meg.

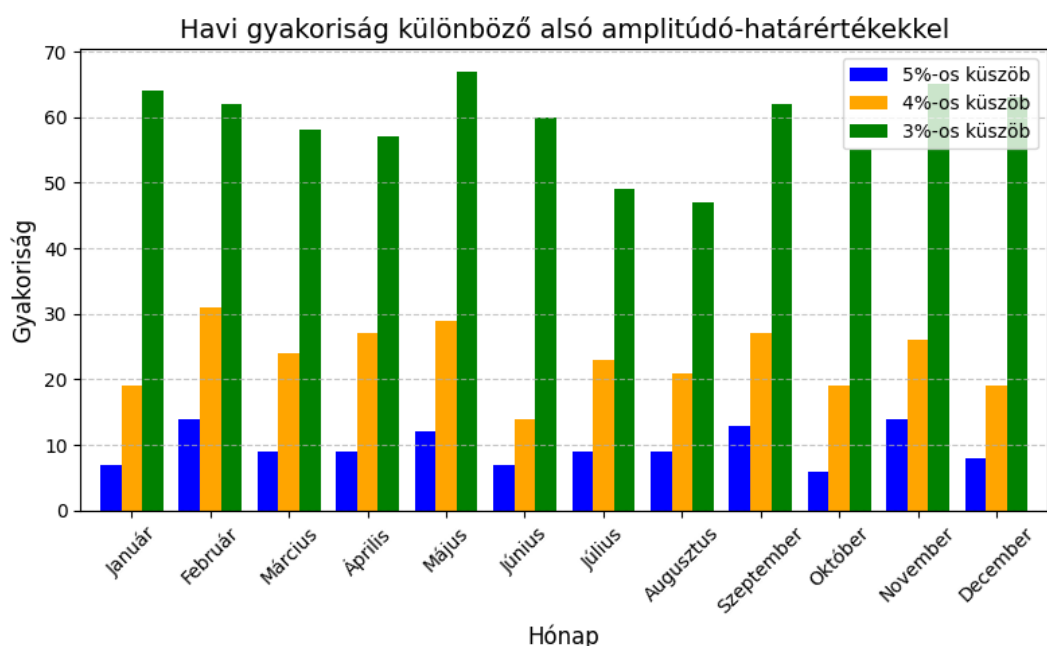
Azt is meg szerettem volna vizsgálni, hogy a Forbush-csökkenéseknél felfedezhető-e korreláció az adott eseményre illesztett görbe amplitúdója és a hossza között. Ennek érdekében készítettem el a 4.5. ábrát.



4.4. ábra. Mindkét panel feketével jelölt háttérgörbéje a kozmikus sugárzás fluxus 42 évnnyi, órás felbontású adatsora. Erre raktam fel körökkel jelölve a saját kezdőidőpontjaiknak megfelelő helyre a Forbush-csökkenéseket, a körök mérete pedig a felső panelen az amplitúdójukkal (piros körök), az alsón a hosszukkal arányos (zöld körök). A szürke görbe a Nap rádiósugárzás fluxusának időszora, a napsiklusok könnyebb vizualizálásának érdekében. A bal oldali függőleges skála a kozmikus sugárzás értékekhez, míg a jobb oldali a rádiófluxushoz tartozik.



4.5. ábra. Az ábra függőleges tengelyén a Forbush-esemény hossza, a vízszintesen az amplitúdója szerepel.



4.6. ábra. Az ábra hisztogramján a legalább 5%, 4% és 3%-os amplitúdóval rendelkező Forbush-csökkenések eloszlása látható hónapokra bontva, a relatív gyakorisággal a függőleges tengelyen (normalizálva a legnagyobb mintaelemszámú hónap elemszámával). Az oszlopok színezése kék, sárga és zöld a legalább 5%, 4% illetve 3%-os amplitúdóval rendelkező Forbush-események esetén.

Az ábráról látszik, hogy az 5% és 4%-os alsó határral rendelkező csökkenések esetén kivehető a Russell-McPherron effektus jelenléte és az események jobban koncentrálódnak a napéjegyenlőségek időszakaira, mint a napfordulókéra. A kettő közül a középső panelen (amely a 4%-os küszöböt tartalmazza) egyértelműbben jelenik meg a minta, ez azonban a nagyobb elemszámnak tudható be. A 3%-os, jobboldali hisztogramon az elemszám még nagyobb, azonban a féléves ciklus nem figyelhető meg tisztábban, mint a középső panelen.

A 3.4. és 4.6. ábrán látható különbségek oka valószínűsíthetően az eltérő adatsorok alkalmazása. Az általunk használt neutronmonitor adatok nem reprezentálják tökéletesen a geomágneses tér állapotát, a geomágneses Dst index és a kozmikus sugárzás fluxusa közötti korreláció nem erős.

5. Összegzés

Az általam kifejlesztett algoritmussal kiválasztott és Okike (2020) által leírt kritériumok szerint, valamint a világszerte elhelyezkedő neutronmonitor hálózat segítségével verifikált események azt mutatják, hogy a Lomnici neutronmonitor állomás hasznos eszköz a kozmikus sugárzás fluxusának gyakori típusú változásainak rögzítésének és elemzésének

szempontjából, mint például a Forbush-csökkenések és a GLE-k. A közepes levágási ridegség tartományban való elhelyezkedése miatt az állomás értékes része a neutronmonitorok globális hálózatának, mivel az általa gyűjtött adatok segítenek meghatározni a bizonyos űridőjárási események során keletkezett részecskék pontos energiaszintjét. Ha az eseményt az LMKS neutronmonitor észleli, az azt jelenti, hogy a részecskéknek legalább 4 GeV energiája van. A részecskék energiaszintje tovább pontosítható a magasabb levágási ridegséggel rendelkező NM-eken mért kozmikus sugárzás változásainak vizsgálata révén, mint például a ROME (6,3 GeV) vagy az ATHN (8,5 GeV) (Storini et al., 2005; Mavromichalaki et al., 2015).

A gyűjtött Forbush-csökkenések mindegyike megerősített eset, amelyeket több neutronmonitor állomás a neutronmonitor Database-be integrált adatai alapján igazoltam. A kozmikus sugárzás, a Dst és a F10.7 indexekkel végzett statisztikai korrelációs tesztek azt mutatják, hogy a Forbush-csökkenések idején a kozmikus sugárzási mérési adatok és a Dst index közötti korreláció jelentősen nő az adatsorok normál időszakaihoz képest. Az F10.7 indexszel való korrelációban nem tapasztaltam szignifikáns változást. Ezenkívül azt találtam, hogy a Dst és a kozmikus sugárzási adatkészletek közötti 7 órás időkéscsltetés további jelentős javulást eredményez a korrelációban (0,555-ről 0,589-re), ahogyan azt a 4.1. táblázatban is láthatjuk. Ez az időeltolás pozitív hatással van a készletek általános korrelációjára is, ha azokat teljes egészében vizsgáljuk, ami magyarázható az interplanetáris tér fizikai állapotának és összetételének változásait vezérlő bonyolult mechanizmusokkal.

A Napból származó napszél által okozott mágneses térvavarokban részt vevő SEP-ek sebessége 500-2000 $\frac{km}{s}$, míg a galaktikus kozmikus sugár részecskéinek tipikusan relativisztikus vagy ahhoz közeli sebességük van (Weygand et al., 2011; Parker, 1958; Mertsch, 2020). Ennek a sebességkülönbségnek a következménye, hogy a zavart területeken áthaladó kozmikus sugárzás részecskék előbb érkeznek el hozzánk, mint azok a részecskék, amelyek a mágneses zavart ténylegesen okozzák. Mivel, ahogy korábban ismerttettem, a galaktikus kozmikus sugarak érzékenyek a Napból származó mágneses diszturbanciákra, és információval szolgálnak egy mágneses viharról jóval azelőtt, hogy az elérné a Földet, és befolyásolná a geomágneses teret, ezzel pedig a Dst indexet. A Dst index és a kozmikus sugárfluxus adatsorok közötti 7 órás eltolódás reális értéknek látszik az ismerttetett mechanizmusok kontextusában.

A Föld körüli térség mágneses és sugárzás viszonyainak előrejelzése különösen fontos a műholdak és űrhajók elektromos komponenseinek és az űrmissziókon vagy akár a sarkvidéki régiók felett nagyobb magasságokban történő repüléseken résztvevő személyzet védelme érdekében, mivel őket a geomágneses tér nem teljes mértékben védi a beérkező sugárzás-

tól (Mavromichalaki et al., 2011; Storini et al., 2005; Chakraborty and Morley, 2020). A növekedett sugárzásmennyiség jelentős zavart okozhat ezekben a technológiákban és komoly egészségügyi kockázatokat jelenthet az emberi szervezet számára. Ezért kritikus erőfeszítéseket tenni az ilyen veszélyes események pontosabb előrejelzésére. Statisztikai elemzéseim és az adatsorok közötti lehetséges időeltolás azt sugallja, hogy a kozmikus sugárzási fluxus méréseket fel lehet használni előrejelző modellek építéséhez (pl. gépi tanulási technikák felhasználásával) a potenciálisan veszélyes sugárzásszintek néhány órával előre történő előrejelzésének érdekében viszonylag nagy pontossággal. A készletek prediktív erejének további elemzésének és ezen előrejelző modellekhez használható effektív megoldások kifejlesztésének irányába tett további erőfeszítések javadalmazónak tűnnek a jövőre nézve.

A 4.1. táblázatban bemutatott eredményeket nézve nem meglepő, hogy a kozmikus sugárzási fluxus korrelációja a F10.7 és a Dst indexekkel nem javult, ha csak azokat az időszakokat vizsgáltam, amikor GLE események zajlódtak. Azt várjuk, hogy az F10.7 index értékeinek növekedése időben legalább néhány óras eltéréssel követi a neutronmonitor adatokban bekövetkező növekedéseket. Ez az időeltérés a magasabb értékeket a másik készletben normál értékekkel korreláltatja, ami rontja a korrelációs együtthatót. Ugyanez a helyzet a TGE események közbeni korrelációkkal is, de itt a gyenge korreláció mögött más okok húzódnak. Itt nem várunk korrelációt az adatsorok között, mivel a TGE-k hajtóméchanizmusai nem befolyásolják az F10.7 és a Dst indexeket, csak a neutronmonitor adatokat (Chilingarian et al., 2020; Kolmašová et al., 2022; Chilingarian et al., 2023). Ezen érvelés háttérének további leírását megtalálja a 3. fejezetben.

Az 4.2. ábrán látható jelenséghez hasonló detektálások típusának meghatározása nem triviális probléma. Annak a valószínűsége, hogy két egymást követő TGE vagy GLE következik be ilyen kis időbeli különbséggel, rendkívül alacsony, azonban a görbék vizuális profiljaik nagyon hasonlítanak a TGE eseményekre (Chilingarian et al., 2022; Svechnikova et al., 2021). Ezen időintervallumokat részletesen elemeztem a Lomnici-csúcsi neutronmonitor adataiban minden számlálócsőre külön bontva, és erős egyezést találtam az egyéni méréseik között. Ez kizárja annak a lehetőségét, hogy egyetlen csőben mérési hiba forduljon elő (ismeretes, hogy a hélium-cső különösen hajlamos a véletlenszerű ugrásokra) és manipulálja az egész adathalmazt ezáltal. A SEVAN (a Lomnici-csúcs tetején lévő alsó energiatartományú neutronmonitor, amely magas pontossággal észleli a TGE-ket (Chilingarian et al., 2018)) és a szomszédos elektromos térerősségmérő rendszerek is rendkívül rendellenes mintázatokat mutattak a megegyező időszakokban végzett méréseikben. Ezek a körülmények lehetővé teszik számomra, hogy arra a következtetésre jussak, hogy az

2022-06-08 és 2022-06-09 napokon bekövetkező események nagy valószínűséggel TGE-k. Ha a valóság megegyezik a javaslataimmal, akkor ezek az újonnan felfedezett események növelik az LMKS neutronmonitorról jelentett TGE-k számát 1-ről (2017-ben) 4-re, és értékes mintákat adnak a jövőbeli elemzésekhez.

A lomnici neutronmonitor adataiban fellelhető TGE-események azonban csak a TGE-k legfelső (és igen ritkán elért) energiatartományába eső eseményeket reprezentálják. Ezt a Lomnici-csúcson található másik neutronmonitor, a SEVAN adatai alapján tudjuk, amely egy jelentősen alacsonyabb, 10-500 MeV energiatartományban észlel beérkező neutronokat (Kollárik et al., 2016). A dolgozatban bemutatott négy TGE-esemény a SEVAN által is detektálásra került és igen intenzív eseményként jelenik meg. A műszerek mellett elhelyezett elektromos térerősségmérő is rendkívül erős gradiensket mért, amely tovább igazolja, hogy ezek a TGE-k valószínűleg egy különlegesen erős viharfelhő jelenléte miatt képződtek.

A Forbush-csökkenések és GLE-k közötti, 3. fejezetben taglalt fizikai kapcsolat természete a szakirodalomban még mindig nem teljesen tisztázott. Azonban ennek hiányában nehéz értelmeznünk, hogy a GLE eseményeket miért nem kizárólag Forbush-csökkenések idején észlelhetjük, hiszen a két jelenség hajtómechanizmusa nagyon hasonló. Számos lehetséges oka van az együttes megfigyelések hiányának: (1) nincs tényleges fizikai kapcsolat a két jelenség között és a kettő együttes észlelése véletlenszerűen történhet; (2) van fizikai kapcsolat közöttük, azonban a hatása elenyésző más befolyásoló paraméterekkel szemben; (3) van jelentős kapcsolat a két jelenség között, de a Forbush-csökkenéseken alapuló kutatásokat nehezítő alacsony mintaelem szám túl alacsonnyá teszi a jel/zaj arányt. Ennek a kérdésnek a felderítésére további kutatómunkák eredményeire lesz szükség. Az ebben a dolgozatban Forbush-csökkenéseken elvégzett statisztikai vizsgálatok elősegíthetik az ilyen típusú későbbi vizsgálatok eredményességét.

Számításaim nem veszik figyelembe a geomágneses mező lokális anomáliáit - legyenek azok állandók vagy ideiglenesek - így például a Lomnici-csúcson észlelt kozmikus sugárzás fluxus jelentősége a globális úridőjárás szempontjából egy további elemzéseket igénylő téma. Azonban erős bizonyítékok léteznek a neutronmonitorok lokális méréseinek egymással való kapcsolatára szerte a Földön. Az NMDB-n nyilvánosan elérhető adatsorok a nemzetközi neutronmonitorok hálózatát foglalják magukba. A világ különböző pontjain található neutronmonitorok adatait összevetve nyilvánvaló, hogy az ebben a munkában vizsgált úridőjárás jelenségtípusok (FD-k, GLE-k) jó közelítéssel egy időben jelennek meg a különböző állomásokon. Egy adott jelenség adott neutronmonitor általi észlelésének feltétele természetesen az, hogy a neutronmonitor olyan területen helyezkedjen el, amelynek

a belépési energiaküszöbe elég alacsony ahhoz, hogy az eseményt alkotó részecskék át tudjanak hatolni a geomágneses mezőn és elérjék a detektorokat. Egyedül ez a természetes jelenség eredményez különbséget a különböző detektorok mért értékein (Beer, 2000).

Amplitúdó- és hosszérték eloszlásait tekintve (4.3. ábra) a legalább 5%-os Forbush-csökkenések által alkotott mintaelem halmaz egy ferde Gauss-eloszlást mutat. Ennek oka az lehet, hogy a kisebb értékek felé haladva egy erős levágást ad a műszerek véges érzékenysége és az algoritmusaim pontatlansága, amely ilyen értéktartományokban egyre jobban ellehetetleníti az események pontos detektálhatóságát, így a mintaelemek között nem jelennek meg az egyébként a valóságban nagyobb mennyiségben előforduló kisebb események. A 4.4. ábrát vizsgálva a Lomnici neutronmonitor által detektált események űridőjárási eredetét és szoros kapcsolatát a napaktivitással megerősíti a Forbush-események eloszlása a napciklusokat illetően. A legerősebb Forbush-csökkenések a maximumok köré tömörülnek és több, illetve intenzívebb események figyelhetők meg a szélsőségesebb értékeket mutató ciklusok esetén (az ábrán a korábbi ciklusok).

A 4.3. fejezetben bemutatott eredmények közül először a Russell-McPherron effektussal kapcsolatos eredményt szeretném részletesebben tárgyalni. A 4.6. ábrán megjelenített havi eloszláson a 4%-os Forbush-csökkenéseknél azonosítani vélem az effektust, míg az 5% és 3%-os küszöbértékekkel szelektált események esetén a minta nem vehető ki a hisztogramból szembetűnően. Ennek okának főleg az algoritmus kis amplitúdójú események azonosítása esetén fellépő pontatlanságát feltételezem a legalább 3%-os eseményeknél, ugyanis a 2.3. fejezetben leírt algoritmus ilyenkor az adatsorban természetesen, zajként fellépő változásokat is hajlamos űridőjárási eseményként detektálni. Így az azonosítani kívánt szezonális effektus elveszik a zajban. Ilyen kis amplitúdó értékekkel rendelkező eseményeknél talán emiatt is célszerű inkább mágneses zavarokról beszélni, mintsem konkrét Forbush-eseménynek nevezni ezeket. Az 5%-nál nagyobb amplitúdóval rendelkező események esetén csak a nagyon intenzív események kerültek bele az elemzett mintába, így itt sem jelenik meg egyértelműen az effektus. A 3.4. és 4.6. ábrán látható különbségek oka valószínűsíthetően az eltérő adatsorok alkalmazása is. Az általunk használt neutronmonitor adatok nem reprezentálják tökéletesen a geomágneses tér állapotát, ami megmutatkozik abban is, hogy a geomágneses Dst index és a kozmikus sugárzás fluxusa közötti vizsgált korreláció sem volt erős.

6. Kitekintés

Ebben a munkában bemutattam a Lomnici-csúcon található NM64 neutronmonitorral végzett 42 évnyi kozmikus sugárzásmérést tartalmazó általam feldolgozott adatsort. Ilyen adatkészlet eddig nem volt elérhető az időszakos mérés technikai változások miatt kialakult különböző formátumok és véletlenszerű mérési hibák vagy hiányzó mérési értékek miatt. A 2. fejezetben általánosan áttekintettem az adatsort, hogy azonosítsam az érdekes egyedi eseményeket, és átfogó áttekintést nyújtsak a neutronmonitor által rögzített űridőjárási jelenségekről a jelenlegi szakirodalom alapján a 3. fejezetben. A különleges események azonosítására saját fejlesztésű programot használtam, amely a 2. fejezetben ismertetett módszerrel végzi a detektálást és a kategorizálást. A tanulmány ezen fejezetében három különböző TGE-t feltételeztem azonosítani az adatokban, amelyek jelentős növekedést eredményeznének a Lomnici neutronmonitor által észlelt megerősített esetekben.

Ezenkívül bemutattam a statisztikai elemzésem eredményeit is. Ezen tesztek eredményei egy erős antikorrrelációt mutatnak a kozmikus sugárzási fluxus és az F10.7 adatok között, ami -0.743 -as Pearson-együtthatóval jellemezhető. Különösen fontos megjegyezni, hogy a Dst-kozmosz sugárzási fluxus párosítás esetén szignifikáns pozitív korrelációt figyeltem meg, amely az előzetes elképzeléseknek megfelel, és más neutronmonitor állomások is felhasználó tanulmányok is hasonló eredményre jutottak. Ezek az eredmények összeegyeztethetők azokkal a várható fizikai kapcsolatokkal, amelyek befolyásolják a méréseket. Emellett az antikorrreláció ténye régóta ismert és alátámasztott a szakirodalom által is (Panasyuk, 2001; Schwadron et al., 2010; Barouch and Burlaga, 1975; Lockwood, 1971), hasonlóan a korrelációs kapcsolathoz a geomágneses mező zavarai (Forbush, 1954, 1937, 1938). Azonban a Lomnici-csúcsra telepített neutronmonitor adataival még nem végeztek ennyire hosszú időszakot felölelő és a teljes mérési időszakra kiterjedő különböző űridőjárási vonatkozásokra irányuló statisztikai elemzéseket. Továbbá kimutattam, hogy a korreláció erősebb a Dst indexszel Forbush-csökkenések idején és tovább erősödik a Dst indexre alkalmazott 7-21 órás időeltolással, amely a Dst index és a neutronmonitor adatok közötti Pearson-együtthatót $0,589$ -re növeli a Forbush-csökkenések idején.

A számításaim összhangban vannak a jelenleg elterjedt hipotézisekkel az űridőjárási eseményeket irányító bonyolult mechanizmusokról és az interplanetáris mágneses tér állapotát befolyásoló tényezőkről, ahogy azt a 4. fejezetben ismertettem. Az űridőjárás kutatása hozzájárul a különféle tudományos és technológiai kihívások jobb megértéséhez és megoldásához. A helioszféra fizikája bonyolult jelenségek rendszere, és még mindig nem teljesen értett ez a komplex rendszer; ezért ezeknek a témáknak a további kutatása

kulcsfontosságú a társadalom számára fontos későbbi technológiai fejlesztések lehetővé tételéhez. A saját akadémiai képességeim is jelentős mértékben fejlődtek a kutatómunkámnak köszönhetően, amely során elsajátítottam a Python programnyelvvel alkalmazható statisztikai, adattudományi és adatvizualizációs módszereket, valamint az űridőjáráshoz szükséges specifikus fizikai ismereteket és a korszerű szakirodalomban fellelhető információkat.

A kutatásom alapvető lépésként szolgál azokhoz a későbbi projektekhez, amelyek a legkorszerűbb numerikus módszereket igyekeznek az űridőjárás területén hasznosítani. Kimutattam, hogy a Föld felszínén végzett neutronmonitor mérések erős potenciállal bírnak, hogy előrejelző modellek alapjául szolgáljanak, amelyek akár gépi tanulási technikákat alkalmazhatnak a veszélyes űridőjárási események előrejelzésére. A bemutatott eredmények jelentős tudományos jelentőséggel bírnak, és a munkám ösztönző lehet a Lomnici neutronmonitor által gyűjtött megbízható adatok felhasználására, amelyek pontos és releváns betekintést nyújtanak a Földet érintő események hátterébe.

További terveim között szerepel annak vizsgálata, hogy egyes esetekben a Forbush-csökkenések közben a Nap rádiósugárzás fluxusában miért nem figyelhetők meg anomáliák. Ez a kérdés azért érdekes, mivel a Földre érkező kozmikus sugárzás fluxus csökkenését Forbush-események idején a Nap kitörései és CME-k okozzák, amelyekkel nagyon erősen korrelál a rádiósugárzás fluxusa, így minden esetben várnánk változásokat ennek mérési értékeiben. Valószínűsíthetően a jelenség hátterében az F10.7 index nem megfelelő időfelbontása állhat, de ezt további vizsgálatokkal lehet csak megerősíteni. Ezen kívül később más neutronmonitorok adataival együtt szeretném korreláltatni a Lomnici adatokat a különböző indexek űridőjárási események idején mért értékeivel, mivel ez fontos információt szolgáltat a beérkező kozmikus sugarak energiaszintjéről, hiszen a detektorok alsó energiaküszöbe helyenként más.

A Forbush-események és a geomágneses térben fellelhető változások kapcsolatát is mélyebben vizsgálnám további kutatásaim során. Ennek motivációját nyújtja a geomágneses térben régóta igazolt lokális anomáliák és a neutronmonitorok erre vonatkozó ismeretlen érzékenysége. Érdekes a továbbiakban a neutronmonitorok nemzetközi hálózatából több detektort is hasznosító, a mérőállomások adatainak földrajzi szélesség és hosszúság szerinti variációit vizsgálni. Az említett témák jobb megértése hozzásegíthet minket a jövőben egy űridőjárási eseményekről alkotott pontosabb tudományos képhez és egy világszinten sztenderdizált neutronmonitor hálózathoz.

Hivatkozások

- Alexander Aab, Pedro Abreu, Marco Aglietta, Justin M Albury, Ingomar Allekotte, Alejandro Almela, J Alvarez Castillo, Jaime Alvarez-Muñiz, R Alves Batista, Gioacchino Alex Anastasi, et al. Features of the energy spectrum of cosmic rays above 2.5×10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory. *Physical Review Letters*, 125(12):121106, 2020.
- Leonid P Babich, Evgenii I Bochkov, Igor M Kutsyk, and Hamid K Rassoul. Analysis of fundamental interactions capable of producing neutrons in thunderstorms. *Physical Review D*, 89(9):093010, 2014.
- E Barouch and LF Burlaga. Causes of Forbush decreases and other cosmic ray variations. *Journal of Geophysical Research*, 80(4):449–456, 1975.
- Markus Battarbee, J Guo, Silvia Dalla, R Wimmer-Schweingruber, Bill Swalwell, and DJ Lawrence. Multi-spacecraft observations and transport simulations of solar energetic particles for the May 17th 2012 event. *Astronomy & Astrophysics*, 612:A116, 2018.
- Jürg Beer. Neutron monitor records in broader historical context. *Space Science Reviews*, 93(1):107–119, 2000.
- AV Belov and EA Eroshenko. Proton spectra of the four remarkable GLEs in the 22nd solar cycle. *Radiation Measurements*, 26(3):461–466, 1996.
- Francesco Berrilli, Marco Casolino, Dario Del Moro, Luca Di Fino, Marianna Larosa, Livio Narici, Roberto Piazzesi, Piergiorgio Picozza, Stefano Scardigli, Roberta Sparvoli, et al. The relativistic solar particle event of May 17th, 2012 observed on board the International Space Station. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4:A16, 2014.
- JW Bieber, JM Clem, ML Duldig, PA Evenson, JE Humble, and R Pyle. Latitude survey observations of neutron monitor multiplicity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A12), 2004.
- Hilary V Cane. Coronal mass ejections and Forbush decreases. *Space Science Reviews*, 93(1-2):55–77, 2000.
- Shibaji Chakraborty and Steven Karl Morley. Probabilistic prediction of geomagnetic storms and the Kp index. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 10:36, 2020.
- Sydney Chapman and Julius Bartels. Geomagnetism, vol. II: Analysis of the data, and physical theories. *Geomagnetism*, 1940.

- A Chilingarian, A Daryan, K Arakelyan, A Hovhannisyan, B Mailyan, L Melkumyan, G Hovsepyan, S Chilingaryan, A Reymers, and L Vanyan. Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. *Physical Review D*, 82(4):043009, 2010.
- A Chilingarian, V Babayan, T Karapetyan, B Mailyan, B Sargsyan, and M Zazyan. The sevan worldwide network of particle detectors: 10 years of operation. *Advances in Space Research*, 61(10):2680–2696, 2018.
- A Chilingarian, G Hovsepyan, T Karapetyan, G Karapetyan, L Kozliner, H Mkrtchyan, D Aslanyan, and B Sargsyan. Structure of thunderstorm ground enhancements. *Physical Review D*, 101(12):122004, 2020.
- A Chilingarian, G Hovsepyan, D Aslanyan, T Karapetyan, Y Khanikyanc, L Kozliner, D Pokhsranyan, B Sargsyan, S Soghomonyan, S Chilingaryan, et al. Thunderstorm ground enhancements: Multivariate analysis of 12 years of observations. *Physical Review D*, 106(8):082004, 2022.
- A Chilingarian, G Hovsepyan, T Karapetyan, D Aslanyan, S Chilingaryan, and B Sargsyan. Genesis of thunderstorm ground enhancements. *Physical Review D*, 107(10):102003, 2023.
- Ashot Chilingarian. Thunderstorm ground enhancements measured on aragats and progress of high-energy physics in the atmosphere. *Atmosphere*, 14(2), 2023. ISSN 2073-4433. doi: 10.3390/atmos14020300. URL <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/2/300>.
- Ashot Chilingarian, Gagik Hovsepyan, and Armen Hovhannisyan. Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads. *Physical review D*, 83(6):062001, 2011.
- J Chum, R Langer, J Baše, M Kollárik, I Strhárský, G Diendorfer, and J Ruzs. Significant enhancements of secondary cosmic rays and electric field at the high mountain peak of lomnický štít in high tatras during thunderstorms. *Earth, Planets and Space*, 72:1–20, 2020.
- Israel Cohen, Yiteng Huang, Jingdong Chen, Jacob Benesty, Jacob Benesty, Jingdong Chen, Yiteng Huang, and Israel Cohen. Pearson correlation coefficient. *Noise reduction in speech processing*, pages 1–4, 2009.

- Joseph R Dwyer and Martin A Uman. The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4): 147–241, 2014.
- Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Yoshihiro Furuta, Kazuhiro Nakazawa, Takayuki Yuasa, Kazufumi Okuda, Kazuo Makishima, Mitsuteru Sato, Yousuke Sato, Toshio Nakano, et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*, 551(7681):481–484, 2017.
- Scott E Forbush. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Physical Review*, 51(12):1108, 1937.
- Scott E Forbush. World-wide cosmic ray variations, 1937–1952. *Journal of Geophysical Research*, 59(4):525–542, 1954.
- SE Forbush. On cosmic-ray effects associated with magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 43(3):203–218, 1938.
- E. Forgács-Dajka, L. Dobos, and I. Ballai. Time-dependent properties of sunspot groups - i. lifetime and asymmetric evolution. *A&A*, 653:A50, 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202140731. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140731>.
- AV Gurevich, GM Milikh, and R Roussel-Dupre. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165(5-6): 463–468, 1992.
- Jaesik Jeong and Suyeon Oh. Seasonal trends of the cosmic ray intensity observed by 16 neutron monitors for 1964–2020. *Advances in Space Research*, 70(9):2625–2635, 2022.
- T. Jämsén, I.G. Usoskin, T. Rähkä, J. Sarkamo, and G.A. Kovaltsov. Case study of forbush decreases: Energy dependence of the recovery. *Advances in Space Research*, 40(3): 342–347, 2007. ISSN 0273-1177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.025>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707001123>.
- NS Khaerdinov, AS a Lidvansky, and VB Petkov. Cosmic rays and the electric field of thunderclouds: Evidence for acceleration of particles (runaway electrons). *Atmospheric Research*, 76(1-4):346–354, 2005.
- J. H. King and N. E. Papitashvili. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly wind and ace plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A2), 2005. doi: 10.1029/2004JA010649.

- Imre Kisvárdai, Filip Štempel, Lukáš Randuška, Šimon Mackovjak, Ronald Langer, Igor Strhárský, and Ján Kubančák. Analysis of 42 years of cosmic ray measurements by the neutron monitor at lomnický štít observatory. *Earth and Space Science*, 12(1):e2024EA003656, 2025. doi: <https://doi.org/10.1029/2024EA003656>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2024EA003656>. e2024EA003656 2024EA003656.
- Marek Kollárik, Karel Kudela, Ronald Langer, and Igor Strhárský. First results from the measuring equipment sevan on lomnický štít: Possible connections with atmospheric phenomena. 2016.
- Ivana Kolmašová, Ondřej Santolík, Jakub Šlegl, Jana Popová, Zbyněk Sokol, Petr Zacharov, Ondřej Ploc, Gerhard Diendorfer, Ronald Langer, Radek Lán, et al. Continental thunderstorm ground enhancement observed at an exceptionally low altitude. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(12):7959–7973, 2022.
- K Kudela and R Brenkus. Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(13-14):1121–1126, 2004.
- K Kudela, MA Shea, DF Smart, and LC Gentile. Relativistic solar particle events recorded by the lomnický stit neutron monitor. In *23rd International Cosmic Ray Conference, Vol. 3, held 19-30 July, 1993 at University of Calgary, Alberta, Canada. Edited by DA Leahy, RB Hicks, and D. Venkatesan. Invited, Rapporteur, and Highlight Papers. Singapore: World Scientific, 1993., p. 71*, volume 3, page 71, 1993.
- K Kudela, J Chum, M Kollárik, R Langer, I Strhárský, and J Baše. Correlations between secondary cosmic ray rates and strong electric fields at lomnický štít. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20):10–700, 2017.
- Karel Kudela and Ronald Langer. Cosmic ray measurements in high tatra mountains: 1957–2007. *Advances in Space Research*, 44(10):1166–1172, 2009.
- Karel Kudela, Marisa Storini, Mirjam Y Hofer, and Anatoly Belov. Cosmic rays in relation to space weather. *Space Science Reviews*, 93(1-2):153–174, 2000.
- Y Kuroda, S Oguri, Y Kato, R Nakata, Y Inoue, C Ito, and M Minowa. Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds. *Physics Letters B*, 758: 286–291, 2016.

- D. Lingri, H. Mavromichalaki, M. Abunina, A. Belov, E. Eroshenko, I. Daglis, and A. Abunin. Precursory Signals of Forbush Decreases Not Connected with Shock Waves. *Solar Physics*, 297(2):24, February 2022. doi: 10.1007/s11207-022-01951-4.
- John A Lockwood. Forbush decreases in the cosmic radiation. *Space Science Reviews*, 12(5):658–715, 1971.
- H Mavromichalaki, Athanasios Papaioannou, Christina Plainaki, C Sarlanis, G Souvatzoglou, M Gerontidou, M Papailiou, E Eroshenko, A Belov, V Yanke, et al. Applications and usage of the real-time neutron monitor database. *Advances in Space Research*, 47(12):2210–2222, 2011.
- H Mavromichalaki, M Gerontidou, P Paschalis, A Papaioannou, E Paouris, M Papailiou, and G Souvatzoglou. Recent research applications at the athens neutron monitor station. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 632, page 012071. IOP Publishing, 2015.
- M McCarthy and GK Parks. Further observations of x-rays inside thunderstorms. *Geophysical research letters*, 12(6):393–396, 1985.
- Philipp Mertsch. Test particle simulations of cosmic rays. *Astrophysics and Space Science*, 365(8):135, 2020.
- RA Mewaldt. Galactic cosmic ray composition and energy spectra. *Advances in Space Research*, 14(10):737–747, 1994.
- Richard A Mewaldt. Cosmic rays. *Macmillian Encyclopedia Of Physics*, 1, 1996.
- Ivanovich Miroshnichenko, Leontiï et al. *Solar cosmic rays*, volume 260. Springer, 2001.
- O. Okike. Forbush decreases: Algorithm generated dataset. *Data in Brief*, 33:106463, 2020. ISSN 2352-3409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106463>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340920313457>.
- Mikhail I Panasyuk. Cosmic ray and radiation belt hazards for space missions: An introductory overview. *Space Storms and Space Weather Hazards*, pages 251–284, 2001.
- EN Parker. Origin and dynamics of cosmic rays. *Physical Review*, 109(4):1328, 1958.
- CT Russell and RLhttps McPherron. Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of geophysical research*, 78(1):92–108, 1973.

- Patrick Schober, Christa Boer, and Lothar A Schwarte. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5):1763–1768, 2018.
- Nathan A Schwadron, AJ Boyd, K Kozarev, M Golightly, H Spence, LW Townsend, and Mathew Owens. Galactic cosmic ray radiation hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycles 23 and 24. *Space Weather*, 8(5), 2010.
- GN Shah, H Razdan, CL Bhat, and QM Ali. Neutron generation in lightning bolts. *Nature*, 313(6005):773–775, 1985.
- Jakub Šlegl, Ronald Langer, Tomáš Brunclík, Petr Mašek, Igor Strhářský, Iva Ambrožová, Jaroslav Chum, and Ondřej Ploc. Spectrometry of high-energy photons on high mountain observatory lomnický štít during thunderstorms. *Radiation Protection Dosimetry*, 198(9-11):623–627, 2022.
- M Storini. Galactic cosmic-ray modulation and solar-terrestrial relationships. *Il Nuovo Cimento C*, 13:103–124, 1990.
- M Storini, K Kudela, EG Cordaro, and S Massetti. Ground-level enhancements during solar cycle 23: results from svirco, lomnický štít and larc neutron monitors. *Advances in Space Research*, 35(3):416–420, 2005.
- EK Svechnikova, NV Ilin, EA Mareev, and AA Chilingarian. Characteristic features of the clouds producing thunderstorm ground enhancements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(9):e2019JD030895, 2021.
- SP Swordy. The energy spectra and anisotropies of cosmic rays. *Space Science Reviews*, 99(1-4):85–94, 2001.
- James M Weygand, WH Matthaeus, S Dasso, and MG Kivelson. Correlation and taylor scale variability in the interplanetary magnetic field fluctuations as a function of solar wind speed. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A8), 2011.
- Bo Wu, Liangpei Zhang, and Yindi Zhao. Feature selection via cramer’s v-test discretization for remote-sensing image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5):2593–2606, 2013.