

TDK DOLGOZAT

**A Lomnici-csúcsi neutron monitor
 kozmikus sugárzás fluxus
 méréseinek feldolgozása és elemzése**

KISVÁRDAI IMRE
*Földtudomány BSc.
III. évfolyam*



Témavezetők:

DR. SIMON MACKOVJAK
SAV Department of Space Physics

FORGÁCSNÉ DR. DAJKA EMESE
ELTE Csillagászati Tanszék

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
2023**

Kivonat

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet (CSFK, ELKH) támogatását, amit a demonstrátori program keretében nyújtott számomra, illetve az IAU-Visegrad Awards nagylelkű ösztöndíját, aminek keretein belül a kutatási projekt megvalósult.

Budapest, 2023. december 18.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. A kozmikus sugárzás és a neutron események	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. Az alkalmazott statisztikai módszer	9
3. A megfigyelt különleges események fizikai háttere	10
4. Eredmények	13
5. Összegzés és kitenkintés	19
Hivatkozások	22

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 minden elméletnek 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 sugárzásra 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 koronaanyagkidobódások foglalkoznak, amik számottevően járulhatnak hozzá a kozmikus sugárzás részecskéinek gyorsítási és terjedési mechanizmusához. Emellett már régóta ismert a kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata, melyekről az alábbi tanulmányokban is olvashatunk, lásd például Lockwood (1971); Barouch and Burlaga (1975); Cane (2000). 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.

Az itt bemutatott kutatómunka alapjait a Lomnici-csúcson elhelyezett neutron monitor adatainak vizsgálata adja. Jómagam úgy kerültem kapcsolatba a Lomnici Obszervatóriummal, hogy kiírásra került az IAU Visegrad Fund 2023-as ösztöndíjprogramja, ahol Dr. Simon Mackovjak – az egyik témavezetőm – hirdetett meg egy olyan projektet, ahol a neutron monitor adatainak elemzése volt a cél. Mint azt a korábbiakból is látni lehet a napaktivitás és a kozmikus sugárzás közötti kapcsolat felismerése nem újkeletű, de a

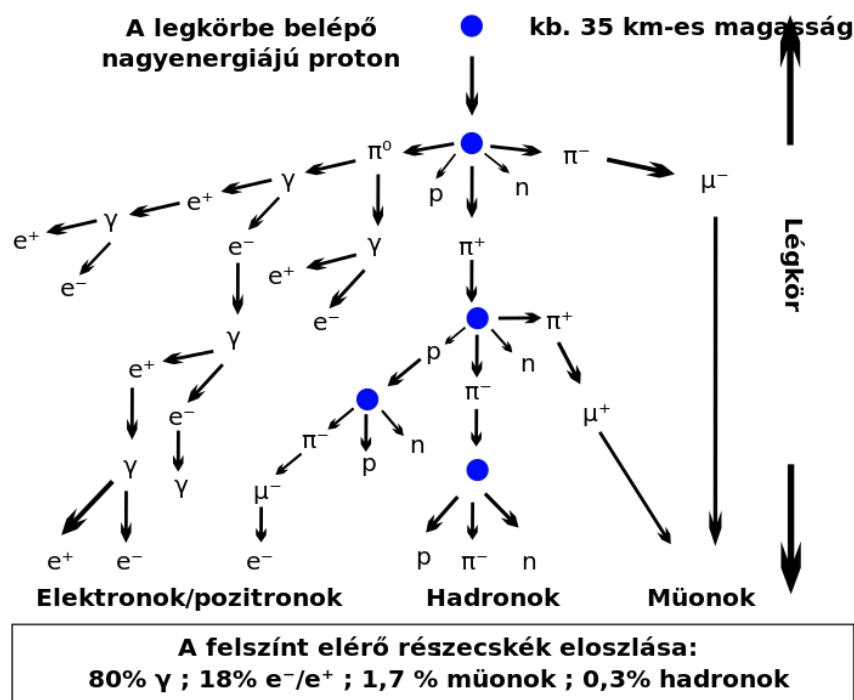
Lomnici detektor adataival az utóbbi évtizedben nem jelentek meg ilyen jellegű extenzív, hosszú mérési időszakokra kiterjedő vizsgálatok. Ezen detektor adataira támaszkodó eddigi eredményeket olvashatunk Kudela et al. (1993, 2000); Kudela and Brenkus (2004); Kudela and Langer (2009) munkáiban, amelyekben a neutron monitor kialakítása és mérés technikája, illetve a mérési adatok 2007-ig terjedő vizsgálata került kifejtésre.

1.1. A kozmikus sugárzás és a neutron események

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. Elsődleges forrásuk központi csillagunk a Nap, de 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 áll 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 elérhetik; 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. ábra).



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

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 neutron monitorokkal, mint amilyen például a Lomnici-csúcson elhelyezett neutrontetektor is. A detektált neutronok száma és energiája természetesen 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 neutron monitor (LMKS) folyamatos, 42 éves adatsora lehetővé teszi a kozmikus sugárzás fluxusának hosszú távú trendjeinek vizsgálatát a körülbelül 4 GeV feletti energiatartományban. Emellett a 1981 óta rendelkezésre álló órás felbontás és a 2001 óta rendelkezésre álló perces felbontás lehetővé teszi a neutron monitor mérési eredményeit befolyásoló rövid időintervallumon lejátszódó események vizsgálatát is. Az állomáson összesen 8 cső végez folyamatos méréseket, amelyek közül 6 darab látható a 1.2. ábrán. Ennek köszönhetően lehetőségünk nyílt átfogóan elemezni az LMKs neutron monitor által rögzített adatokat több megközelítésből. Mivel a mérő-, illetve adatrögzítő eszköz több felújításon és fejlesztésen is átesett, először homogenizálni kellett az adat-

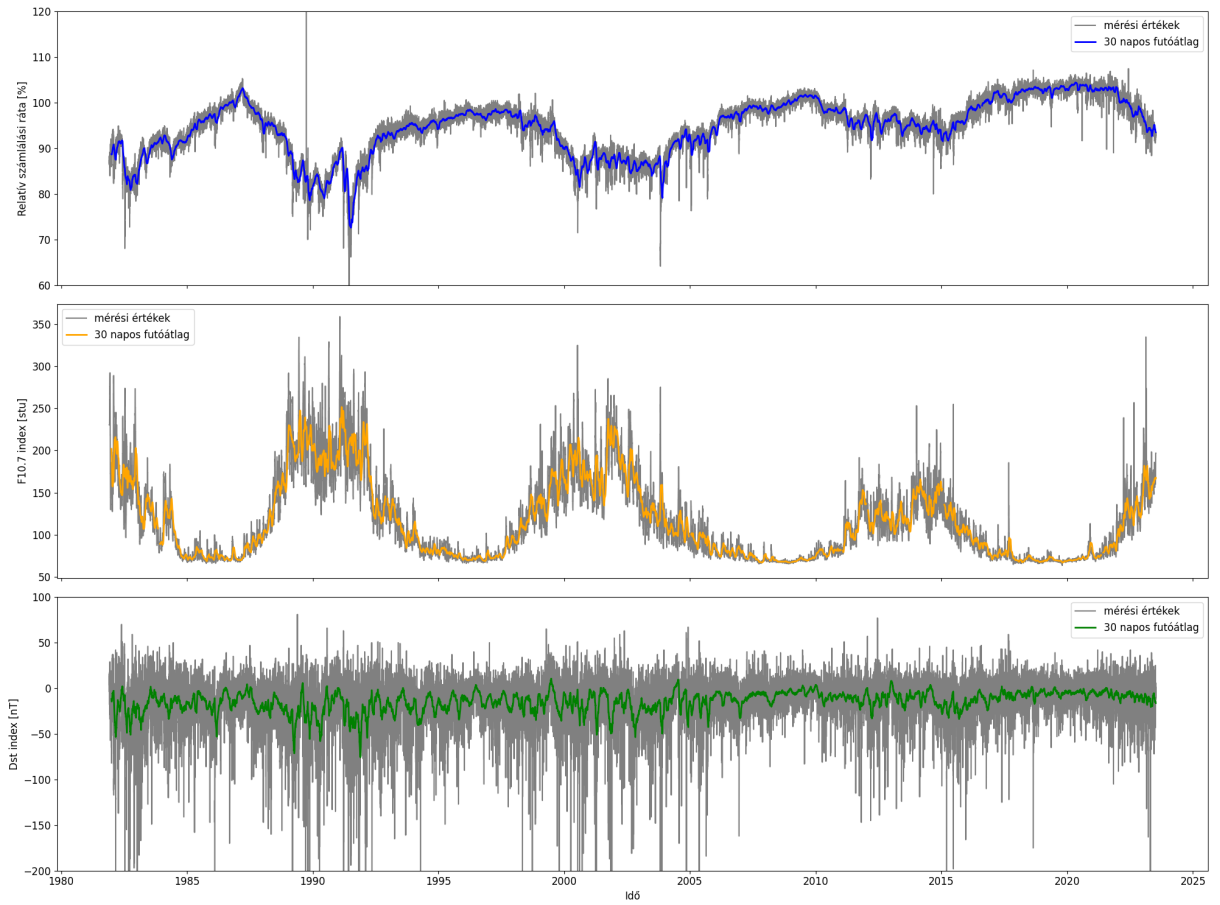
sort. Ezután kiválasztottuk és elemeztük a neutron monitor által rögzített legjelentősebb esemény típusokat a neutronfluxus szélsőséges értékein és az események fontos típusainak egyedi mintázatain alapulva. Ezen listán belül háromféle eseményt különböztettünk meg: (i) Forbush-csökkenések, (ii) talajszint-közeli sugárzástöbblet (ground level enhancement/GLE) és (iii) viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (thunderstorm ground enhancement/TGE).



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

2. A felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

A Lomnici neutron monitor adatain kívül számos más adatsort is használtunk a vizsgálathoz. A neutron fluxus változásainak úridőjárási vonatkozásait elemezve az F10.7 indexet vettük alapul a napaktivitás idősoraként, amely a Nap 10,7 cm-en kibocsátott sugárzás fluxusának 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 általunk alkalmazott idősor a Dst (Disturbance storm time) index, amely a Föld globális mágneses mezejének ekvatoriális komponensének zavarait írja le az átlag szinthez képesti eltéréssel (amelyet a 0 érték jelöl) nanoteszlában megadva. A vizsgálatokhoz a Dst indexet arra a célra használtuk, hogy a földi globális mágneses tér változásait elemezzük a neutron események alapján észlelt napaktivitás tükrében.



2.1. ábra. *Felső panel:* A neutron monitor 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 megjelenítettük 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. 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 neutron monitor 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 Kudela et al. (2000); Chum et al. (2020) munkáiban. 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 neutron monitor adatai 2001-től nyilvánosan elérhetők egy webfelületen keresztül. Az aktuális mérési adatok ötperces 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 Neutron Monitor 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.

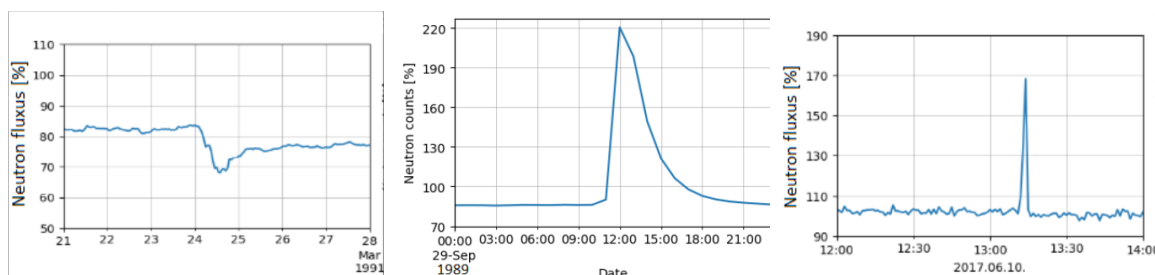
Egy folytonos és egységes formátumú, hiánytalan és hibamentes adatsor eddig nem állt rendelkezésre a teljes 42 éves időszakból (1981 decemberétől 2023 júliusáig) az LMKS mérőkészülékén végrehajtott különböző méréstechnikai és feljegyzéstechnikai változások miatt. Ezek a változások és fejlesztések különféle adatformátumokhoz vezettek az évek során, így szükség volt azok egységesítésére. Fontos hangsúlyozni, hogy a bemutatott munka nem az archívum adataival készült, hanem a neutron detektorokból közvetlenül kinyert adatokkal. Így azokon semmiféle korrekció és feldolgozás nem történt, ezért szükséges volt a következőkben leírt adatfeldolgozási lépéseket elvégezni.

Az adatkészleteket egységes dátumformátumra hoztam és a neutron monitor négy legérzékenyebb csövének átlagos mérési értékeit kivontuk az adatsorból, a további munkánk során pedig végig ezt az értéket használtuk. 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 határoztunk 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.



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

Összehasonlítási célokra ugyanezen időszakra az F10.7 és a Dst adatsorok is meg vannak jelenítve. Az űridőjárási indexeket az OMNIWeb <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (King and Papitashvili, 2005) biztosította számunkra. Ezen három paraméter statisztikai elemzésének módszereit ismertetjük a 2.4. fejezetben, az eredményeket pedig a 4. fejezetben mutatjuk be. De mielőtt ezekre rátérnénk, szeretnénk felhívni a figyelmet néhány különleges, az átlagtól eltérő eseményre is, melyek a neutron monitor rögzített az adatsorokban.

2.2. Az adatsorokban megfigyelhető különleges események

Az itt bemutatásra kerülő eseményeket egyenlőre csak az adatok szintjén mutatjuk be, a hozzájuk kapcsolódó fizikai folyamatokba később nyújtunk betekintést. Az alábbiakban felsoroljuk 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. A csökkenések amplitúdója legtöbbször néhány százalékos, de időnként akár több tíz százalékpont is lehet. Szintén fontos jellemzője az FD jelenségnek, hogy globálisan megfigyelhető, azaz a földön elhelyezett más neutron detektorok 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 növekedést mutat az idősorban. Az általános kozmikus sugárzás háttér fokozatos ingadozásaitól eltérően a GLE-k rövid és éles csúcsokat mutatnak,

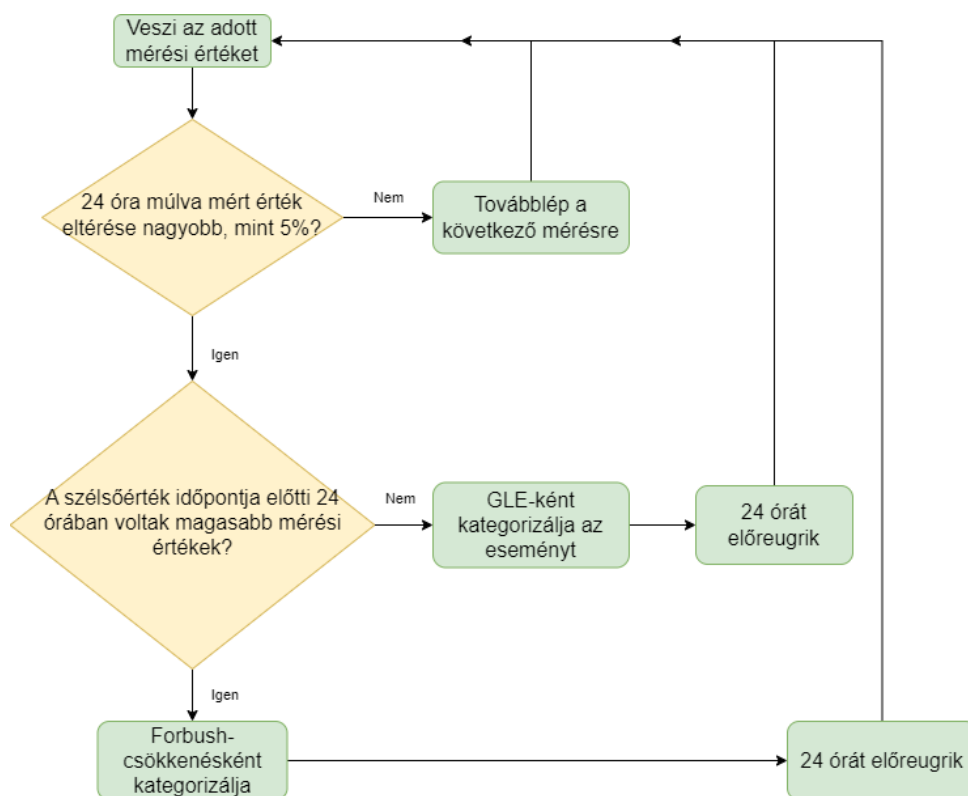
néhány százaléktól pár tíz százalékig terjedő amplitúdóval. Mint említettem a hirtelen fluxus növekedés igen rövid időskálán, 10 perctől egy-két óráig tarthat, míg a lecsengési fázis már sokkal lassabb, hosszabb időskála (Belov and Eroshenko, 1996; Bieber et al., 2004; Kudela and Langer, 2009; Berrilli 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-eket 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 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 szeretnénk bemutatni, hogy a felhasznált adatok esetében milyen módszerrel válogattuk ki azokat az eseményeket, amik eltértek az átlagos jelszinttől, és milyen kritériumok alapján csoportosítottuk őket. Az adatsorra saját fejlesztésű Python kódot alkalmaztunk, amelynek 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



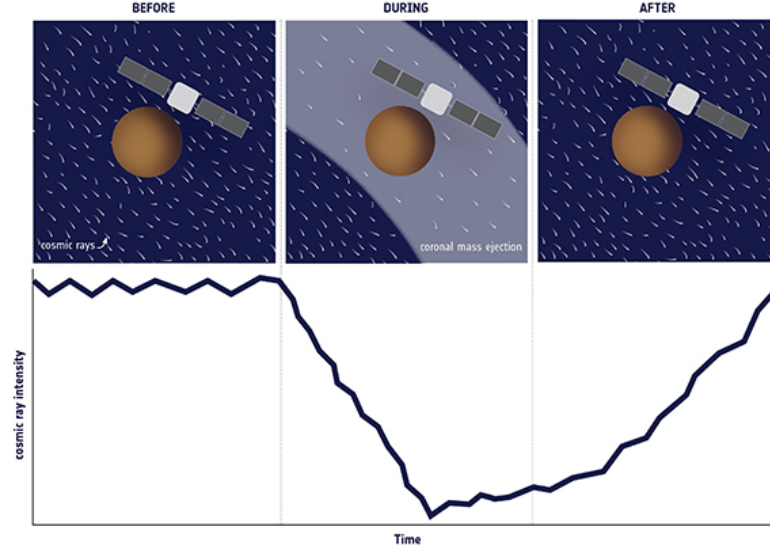
2.3. ábra. Az eseményazonosító programunk algoritmusának folyamatábrája.

- 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

A leírt algoritmus folyamatábráját a 2.3. ábra mutatja. Algoritmusunk segítségével azonosított feltételezett események megerősítése Forbush-csökkenések esetében a <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> katalógus, GLE-k esetében pedig a <https://gle.oulu.fi/#/> adatbázis alapján történt. A megerősített Forbush események végeleges száma 216 db, a GLE eseményeké 16 db lett az 1981 és 2023 közötti időszakból.

2.4. Az alkalmazott statisztikai módszer

Tekintettel arra, hogy az elemzett adatkészlet a Lomnici-csúcsi neutron monitoroktól egy folytonos, kiváló minőségű, 42 éves időtartamú adatsor, elsőként azt szeretnénk volna ellenőrizni, hogy hosszú távú lineáris kapcsolatok állnak-e fenn hasonlóan pontos és megbízható indexekkel, amelyek az úridőjáráshoz és a napaktivitáshoz kapcsolódnak. E célból úgy döntöttünk, hogy a Pearson-korrelációs tesztet alkalmazzuk, mivel ez egy széles körben használt és pontos módszer két független változó, a és b , közötti korreláció mérésére.



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

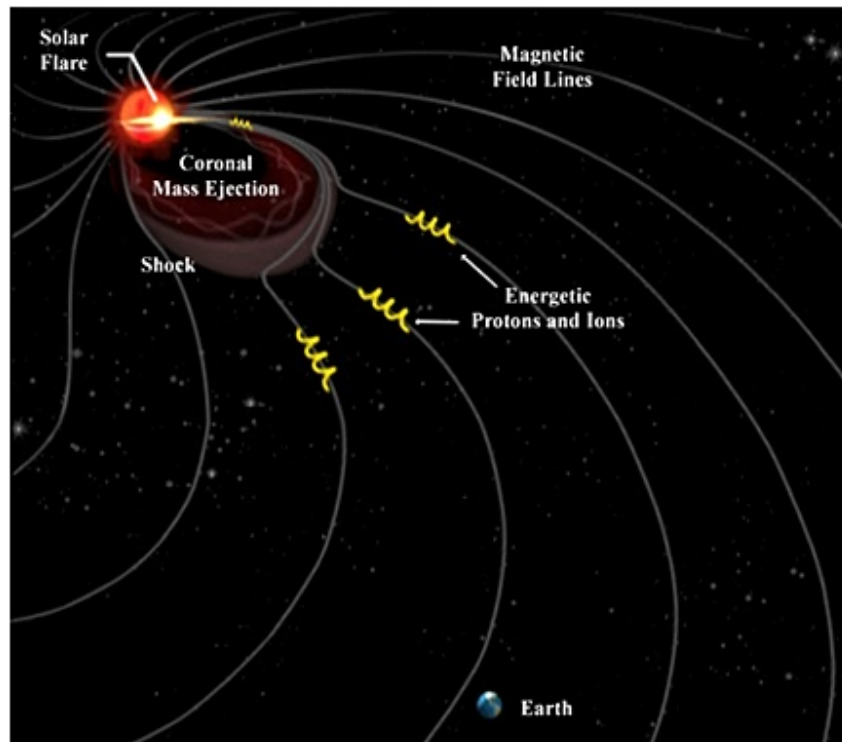
sére. A teszt eredménye egy ρ korrelációs együttható, amely az adott két változó közötti kapcsolat típusát és erősségét mutatja meg. A Pearson-korrelációs együttható számítása az alábbi módon történik a 2.2 egyenlet szerint (Cohen et al., 2009):

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

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 $|\rho| \leq 0.7$ értékekre a korrelációt erősnek tekinthetjük (Schober et al., 2018). Ezen statisztikai tesztet nem kizárólag a folytonos 42 éves adatkészleteken hajtottuk végre, hanem olyan időintervallumokon, amelyek bizonyos típusú űridőjárási eseményeket rögzítenek, például Forbush-csökkenéseket és GLE-ket. Az említett esemény típusokba tartozó vizsgált idősorok szelekciójának menetét a 2.3. fejezetben tárgyaltuk.

3. A megfigyelt különleges események fizikai háttere

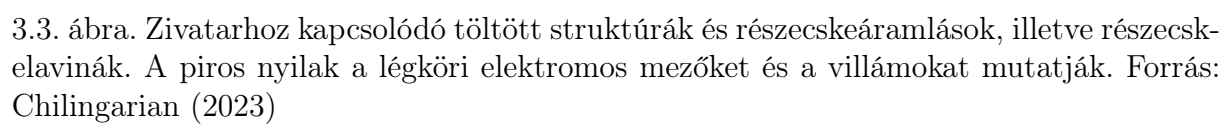
A következőkben áttekintjük, hogy milyen fizikai folyamatok okozhatják azokat a különleges, átlagtól eltérő eseményeket, amelyeket a neutron monitor adatsorában talál-



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

tunk. A három eseménytípus a Forbush-csökkenés (FD), a talajszint-közeli sugárzástöbblet (GLE) és a viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE) volt, melyek közül az első kettő szoláris eseményekhez köthetőek, míg az utolsó lokális, meteorológia változásokhoz.

A Forbush-csökkenés esetében a neutron eseményekben egy csökkenést észlelünk, melynek során a csökkenés gyorsabban, a visszaállás lassabban zajlik, így a jelenség teljes időskálája 5-10 nap körül mozog (3.1. ábra). Az intenzitás csökkenés hátterében Forbush (1937, 1938) munkái alapján a geomágneses mező torzulásai állnak. Ezeket a zavarokat a napkitörések, koronakidobódások, nagy sebességű plazmaáramlások vagy más aktív folyamatok után a Napon vagy közvetlen környezetében végbemenő lökéshullámok terjedése kényszerítik ki, melyek a bolygóközi térben is továbbterjednek. A kiváltott mágneses zavarok visszaverik vagy szétszórják a helioszférán keresztül haladó kozmikus sugárzás egy részét, mintegy leárnyékolva a fluxus egy részét. Fontos megjegyeznünk azonban, hogy FD-k geomágneses zavarok nélkül is megfigyelhetők, illetve a különböző geomágneses zavarok által kiváltott eltérő FD-k esetében sem teljesen tisztázott a pontos fizikai folyamat. Az intenzitás csökkentésére, 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 neutron monitor adatokon csak a GLE-k kemény fázisát lehet észlelni a 4 GeV-es levágási ridegségneknek 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 neutron monitorok 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).

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 részecskéket még mindig vita tárgyát képezi, illetve ahogy korábban is említettük egyes vizsgálatok alapján a TGE események megszűnnek villámcsapáskor.

4. Eredmények

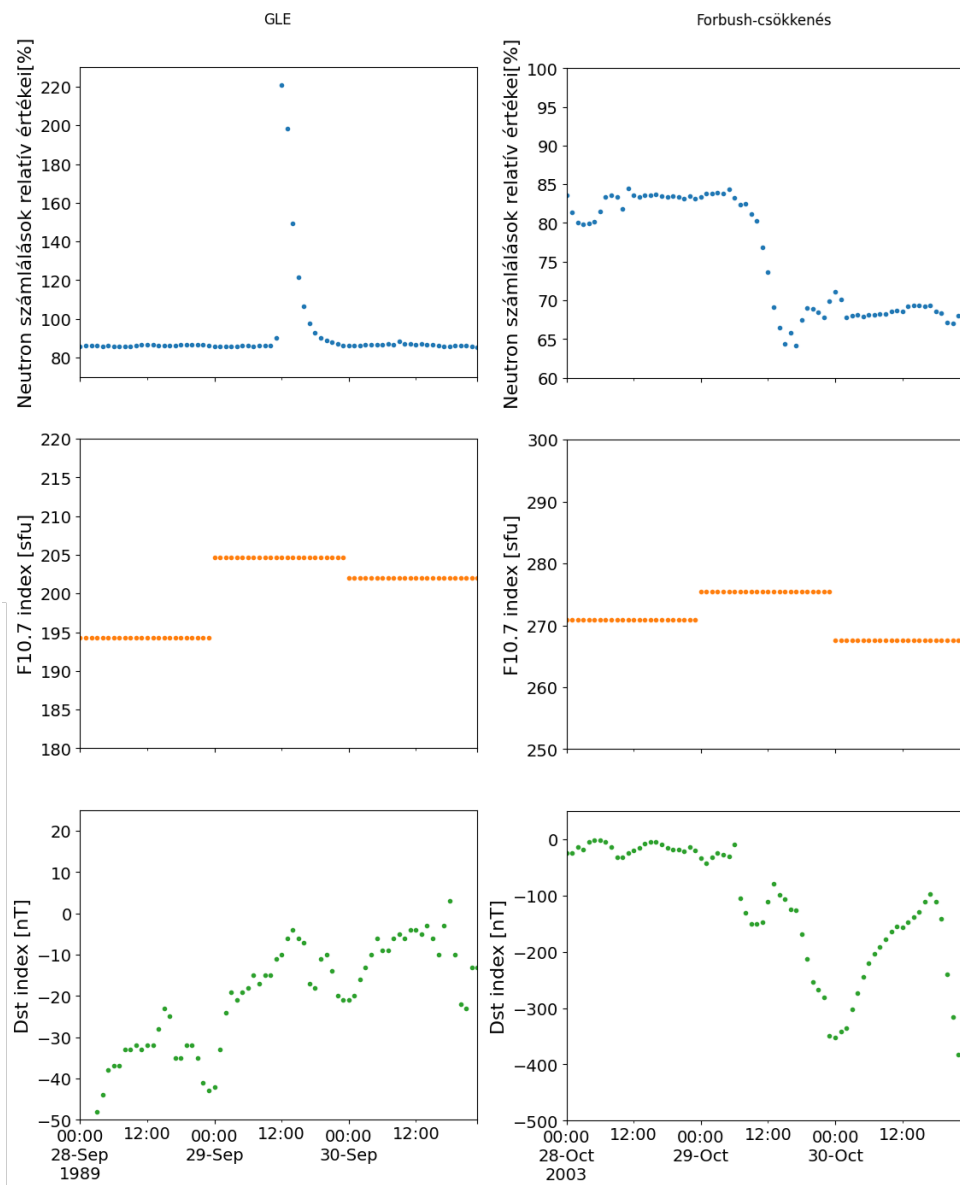
Statisztikai vizsgálatunk célja, hogy az űridőjárást alakító fizikai folyamatok közötti kapcsolatot azonosítsuk. Ennek részét képezi a napaktivitás, a geomágneses tér és a kozmikus sugárzás fluxusa közötti lehetséges korrelációk keresése a Pearson-féle statisztikai

	F10.7	Dst	Etolt 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 adatsorok között elvégzett teszt esetén. A teljes időtartam alatti neutronfluxus azt jelenti, hogy összehasonlítottuk az egész 42 évnyi kozmikus sugárzás mérési idősort a F10.7 és a Dst indexekkel. Elvégeztük a korrelációs tesztet a Forbush-csökkenések, a GLE-k és a TGE események időszakaira, ezeket a FD, GLE és TGE jelölésekkel jelöltük. Az utolsó két oszlopban alkalmazott időeltolások pontos értékeit a főszövegben adjuk meg. Minden korrelációs együttható mellett az adott értékhez tartozó szignifikancia szint látható.

módszer segítségével. Ehhez az detektorból kinyert nyers adatok feldolgozáson estek át, melyet részletesen ismertettünk a 2. fejezetben.

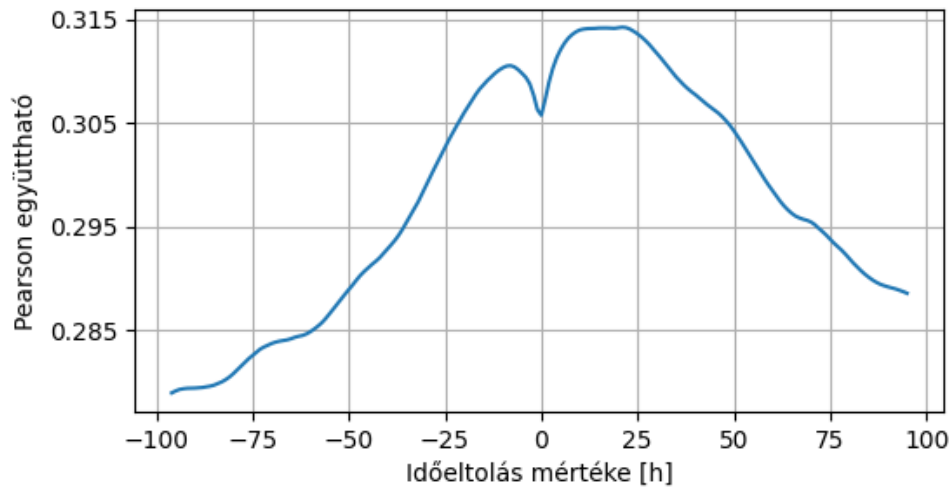
Elsőként a három idősort korreláltattuk egymással, azaz a neutronfluxust – melyet a kozmikus sugárzás kelt – először a napaktivitással összefüggő 10,7 cm-es rádiófluxussal, majd a Föld globális mágneses mezejében megfigyelhető regisztrált eltérésekkel. Mint ahogy azt a 2.4. fejezetben leírtuk az alkalmazott 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 felvilágosítást. Eredményeinket a 4.1. táblázatban foglaltuk 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 neutronfluxus és a Dst index között, a korrelációs együttható értékére $0,306$ kaptunk, ami egy korrelációt mutat, de a két adatsor között lazább a kapcsolat, mivel a Pearson-együttható értéke közelebb van nullához. Emellett a táblázatban feltüntettük 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 fenn. 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 említettük, a napkitörésekkel áll szoros kapcsolatban.



4.1. ábra. *Felső panelek:* Neutron fluxus értékei, *Középső panelek:* F10.7 index értékei, *Alsó panelek:* Dst index értékei. Az adatpontok az előző ábráktól eltérően nincsenek összekötve. A Nap rádiósugárzás indexének felbontása 24 órás, az adott napok minden órájában az adott napi mérési értéket alkalmaztuk.

Következő lépésként a különleges eseményeket tettük vizsgálatunk tárgyává. Ehhez a két, nagy valószínűséggel szoláris eseményhez köthető Forbush-csökkenéseket és GLE-k eseteit elemeztük. Ahogy azt a 2. fejezetben írtuk az algoritmus által kiválasztott eseményeket a megfelelő adatbázisok (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>, <https://gle.oulu.fi>) segítségével is verifikáltuk. Ezután arra voltunk kíváncsiak, hogyha csak a különleges eseményekre koncentrálunk, szorosabb lineáris kapcsolatot találunk-e az űridőjáráshoz köthető indexekkel, vagy sem. Ezért az FD-k esetében az események szélsőértékeit körülvevő 4 napos időintervallumot vágunk 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 vettük csak figyelembe. Az eredményeket a 4.1. táblázatban tüntettük 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 elmondhatjuk, hogy a kiválogatott időintervallumban bekövetkező neutron események jobban köthetőek a föld globális mágneses mezejében bekövetkező változásokhoz. Ehhez a vizsgálathoz még fontosnak érezzük 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 (pár óra). A neutron események és a Dst index adatainak időfelbontása 1 óra, míg a Nap rádiósugárzásának adatsora napos időfelbontással rendelkezik. A 2.3. ábrán látható példa az adatsorok időfelbontása közötti különbségre, ahol ebben a vizsgálatban az órás felbontást a rádiófluxus esetében úgy kaptuk, hogy ugyanazt az értéket vettük minden órában az adott napon. Ezért valószínűnek tartjuk, hogy a korrelációs index ezért 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 szeretnénk megvalósítani, hogy a neutron-monitor adatsorát „lerontjuk” napos felbontásra és úgy alkalmazzuk a fent említett vizsgálatokat.

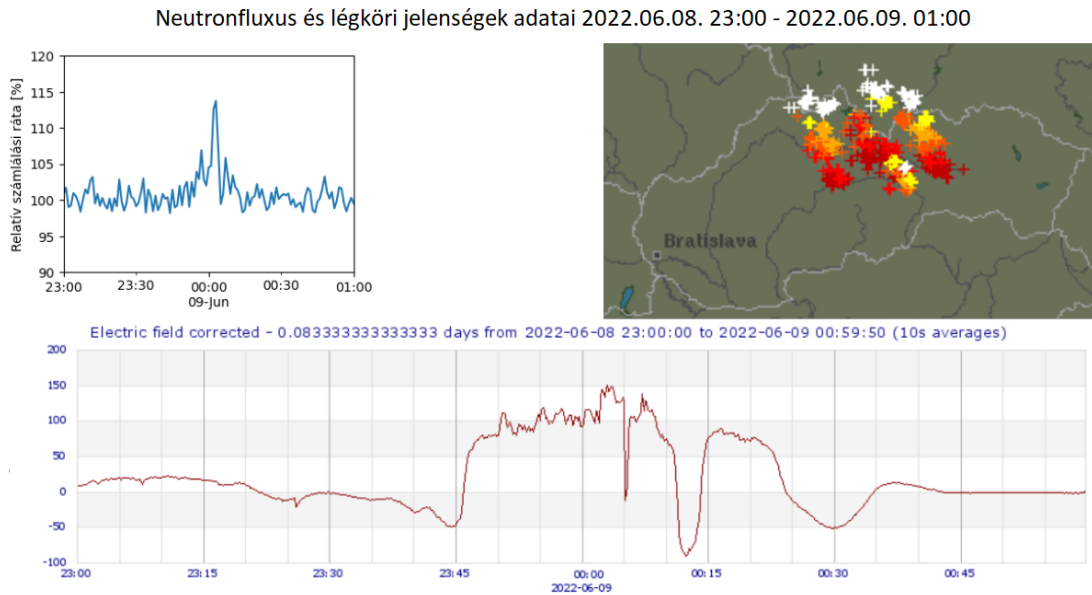
Utolsó lépésként az idősorok közötti időeltolás korrelációra gyakorolt hatását vizsgáltuk. Az időeltolások tesztelésének motivációja a neutronfluxus adatsor prediktív potenciáljának feltárása a Dst indexre vonatkozóan. Közvetetten a korrelációs együttható változása az eltolással leírja a jelenlegi neutronfluxus és a későbbi globális geomágneses zavarok kapcsolatát. A 4.2. ábrán látható, hogy hogyan változik a Pearson-féle korrelációs együttható értéke attól függően, hogy a földi geomágneses zavarok idősorát mennyire toltuk el a neutron monitor eseményeihez képest. A 4.1. táblázat utolsó oszlopában fel tüntetett értékek ehhez a vizsgálathoz kapcsolódnak, ahol a 7 órás időeltoláshoz tartozó



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

korrelációs együtthatót tüntettük fel. A vizsgálat során egyébként a maximális időeltolás ± 96 óra volt. A 4.2. ábrán az is 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 neutron események 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 neutron eseményeket 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 további vizsgálatokat igényel, mivel ez egy elég széles időtartamot jelent. Egyrészt vizsgálni szeretnénk még a lehetséges fizikai okokat, illetve a statisztikai módszer korlátait is.

Az eddigi eredményeink esetében a szoláris események által kiváltott változásokra koncentráltunk. Azonban a neutron monitor nem csak ilyen jellegű eseményeket rögzít, hanem minden, a magas légkörben lejátszódó és neutront létrehozó eseményt is. Erről részletesen írtunk a 3. fejezetben, ahol a különböző események mögötti fizikai okokat taglaltuk. Láthattuk, hogy a TGE, vagy a viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet meteorológiai jelenséghez, viharokhoz köthetőek. Ezért hasonlóan az előzőekben tárgyaltakhoz a TGE eseményeket is kiválogattuk. Chum et al. (2020) munkájában megtalálható, hogy



4.3. 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 neutron monitor által mért neutronfluxus, *Jobb felső ábra:* Szlovákia radartérképén megjelenő villámlások az adott időszakban, *Alsó ábra:* a Lomnici-csúcson lévő elektromos térerősségmérő adatsora.

az 1981 és 2017 évek közötti időszakban hány TGE eseményt detektáltak, és mikor. A 2. fejezetben részletesen leírt algoritmus segítségével a szakirodalomban található eseményeken túl a még további három TGE eseményt azonosítottunk, melyek nevesítve a következő napokra estek: (i) 2022.05.03, (ii) 2022.06.08. és (iii) 2022.06.09. Fontos felhívni a figyelmet arra, hogy ezen eseményeknél nem az órás, hanem a perces adatsorokat használtuk, ugyanis, mint ahogy azt a 3. fejezetben leírtuk ezen események időskálája pár perc. Egyrészt mivel ilyen rövid idő alatt zajlik le az esemény az kizárja, hogy GLE-ként lehessen őket kategorizálni, illetve ezek más neutron detektorok adatsoraiban sem jelennek meg. Mindezek ellenére a szakirodalomban eddig megjelent TGE-k tipikus lefutására jellemző karakterisztikákat sem mindig mutatnak ezek a görbék, ezért a nem egyértelmű kategorizálhatóság szükségessé tette megerősítő vizsgálatok elvégzését. Ebben a munkában még nem statisztikai módszerekkel végeztük az események alatti neutronfluxus korreláltatását más adatokkal, az összehasonlítás manuálisan történt meteorológiai eseményekkel, illetve a Lomnici-csúcson felszerelt elektromos térerősségmérő berendezés adatsorával. Egy ilyen manuális megerősítő példát láthatunk a 4.3. ábrán. A 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.

5. Összegzés és kitenkintés

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 sugárzástól 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 kell tenni az ilyen veszélyes események pontosabb előrejelzésére.

Jelen tanulmányban bemutatjuk a Lomnici-csúcson található NM64 neutron monitorral végzett 42 évnyi kozmikus sugárzás mérést tartalmazó általunk feldolgozott adatsorral készített vizsgálatokat. Szeretnénk kiemelni, hogy a saját fejlesztésű adatfeldolgozó eljárásnak köszönhetően a nyers adatokból kapott homogenizált és javított idősor eddig nem volt elérhető. Ennek oka az időszakos méréstechnikai változások miatt kialakult különböző formátumok, a véletlenszerű mérési hibák és/vagy hiányzó mérési értékek voltak, melyeket az új adatsorban már kiküszöböltünk. Emellett szintén saját fejlesztésű eljárások segítségével azonosítottunk különleges eseményeket, úgy mint a Forbush-csökkenést, a talajszint-közel sugárzástöbbletet és a viharok közelében kialakuló sugárzástöbbletet. Ezeket más szakirodalmi adatokkal is alátámasztottuk, illetve találtunk három, eddig nem azonosított TGE eseményt, amelyeket lokális adatsorokkal összevetve szintén alátámasztottunk.

Az adatfeldolgozáson kívül statisztikai vizsgálatokat is végeztünk. Tudjuk, hogy a szoláris eseményekkel, illetve az általuk kiváltott geomágneses zavarokkal való korreláció vagy antikorreláció már korábban is ismert volt a szakirodalomban (Panasyuk, 2001; Schwadron et al., 2010; Barouch and Burlaga, 1975; Lockwood, 1971; Forbush, 1954, 1937, 1938), de a Lomnici-csúcsra telepített neutron monitor adataival még nem végeztek ennyire hosszú időszakot felölelő és a teljes mérési időszakra kiterjedő különböző űridőjárási eseményekhez köthető statisztikai elemzéseket. A Pearson-módszer segítségével mi is kimutattuk az antikorrelációt a kozmikus sugárzás által kiváltott neutron események és a Nap 10,7 cm-es rádiósugárzása között. A geomágneses zavarok indexével lazább kapcsolatot találtunk, amikor a teljes adatsort felölelő vizsgálatot végeztük. Tanulmányoztuk annak lehetőségét is, hogy nő-e a kapcsolat abban az esetben, ha nem a teljes adatsort, hanem egy-egy kivágott

időintervallumát korreláltatjuk. Természetesen ebben az esetben a különleges események bekövetkezése volt a fontos. Ezen kiválasztott időszakok esetében a Forbush-csökkenések jobban kapcsolhatókká váltak a geomágneses viharokkal, míg a GLE-k esetében ez nem mondható el. A Nap rádiósugárzásával kapcsolatában kapott eredmények további vizsgálatot igényelnek, mivel az adatsor időfelbontása sokkal rosszabb, mint a neutronesemények esetében. Utoljára említjük azt az eredményünket, ahol az időeltolás hatását vizsgáltuk a neutron események és a geomágneses térben bekövetkező zavarok közötti korreláció esetében. Eredményeink alapján egy 7-21 órás időablakban a neutron események hamarabb következnek be, semmint a geomágneses térben zavarokat tapasztalnánk. Ezek az eredmények viszont további vizsgálatokat igényelnek.

A munkánk kimenetele összhangban van a jelenleg elterjedt hipotézisekkel az űridőjárási eseményeket irányító bonyolult mechanizmusokról és az interplanetáris mágneses tér állapotát befolyásoló tényezőkről. 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 megértett ez a komplex rendszer. Ezért ennek és a hozzá kapcsolódó témáknak a további kutatása kulcsfontosságú a társadalom számára, illetve fontos a későbbi technológiai fejlesztések lehetővé tételéhez. A saját akadémiai képességeim is jelentős mértékben fejlődtek a kutatómunkámnak köszönhetően, amely során elsajátítottam a Python programnyelvvvel alkalmazható statisztikai, adattudományi és adatvizualizációs módszereket, valamint az űridőjáráshoz szükséges specifikus fizikai ismereteket és a korszerű szakirodalomban fellelhető információkat.

A kutatásunk alapvető lépésként szolgál azokhoz a későbbi projektekhez, amelyek a legkorszerűbb numerikus módszereket igyekeznek az űridőjárás területén hasznosítani. Kimutattuk, hogy a Föld felszínén végzett neutron monitor mérések erős potenciállal bírnak, hogy előrejelző modellek alapjául szolgáljanak, amelyek akár gépi tanulási technikákat alkalmazhatnak a veszélyes űridőjárási események előrejelzésére.

További terveink 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 szorosan 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 neutron monitorok adataival együtt akarjuk korreláltatni a Lomnici adatokat a különböző indexek űridőjárási események idején mért értékeivel, mivel ez fontos infor-

mációkat szolgáltat a beérkező kozmikus sugarak energiszintjéről, hiszen a detektorok alsó energiaküszöbe helyenként eltérő.

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.
- 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.
- 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.

- 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 Rusz. 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.
- 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.
- 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.
- 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 štít 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 Strhářský, 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.

- 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, Leontii et al. *Solar cosmic rays*, volume 260. Springer, 2001.
- 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.
- 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.
- 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.