

1. ábra. Az űridőjárás hatásai a modern technológiára (Forrás: A szerző szerkesztése az ESA/Science Office, CC BY-SA 3.0 IGO [12] alapján)

Kis Árpád*

Az űridőjárás jelenségei és az emberi tevékenységre gyakorolt hatásai

Az időjárás és az időjáráshoz köthető jelenségek, mint például az eső, a szél, a vihar és a havazás mindenki számára jól ismert, hétköznapi fogalmak, amelyek évszázadok alatt végzett megfigyelések nyomán alakultak ki. Ma már tudományosan megalapozott ismeretekkel rendelkezünk arról, hogy miként jönnek létre ezek a jelenségek, hogyan fejlődnek és milyen hatásokat okoznak, így

előrejelzésük az informatika robbanásszerű fejlődésével párhuzamosan pontosabbá vált. Számos esetben kidolgozott az is, hogy az időjárás negatív hatásaira milyen eszközökkel, milyen technológiával és hogyan tudunk reagálni, megvéde adott esetben értékeinket és fontos létesítményeket. Sok példát hozhatunk az időjárás viszontagságai elleni védelem standardizálására, amikor kötelező jelleggel,

ÖSSZEFOGLALÁS: Az űridőjárás kutatása az űrkutatás tudományágainak viszonylag új területe. Az űridőjárás hatásaival napjainkban egyre gyakrabban kell számolnunk, a modern technológiai eszközök és a kritikus infrastruktúra ugyanis fokozottan sérülékenyek az űridőjárás hatásaira. A szerző tanulmányában áttekinti az űridőjárás forrásait és folyamatait, összefoglalja a modern technológiára gyakorolt fontosabb hatásokat és következményeket, valamint kitér a védekezés lehetőségére is.

ABSTRACT: Space Weather is a relatively new area of Space Science, the effects of which we have to reckon with more and more these days. Modern technological devices and critical infrastructure are especially vulnerable to the effects of Space Weather. In our study, we review the sources and processes of space weather, we summarize the most important effects and consequences on modern technology, and we also cover the possibility of protection.

KULCSSZAVAK: űridőjárás, geomágneses viharok, koronakidobódás, fler, kéregáramok

KEY WORDS: Space Weather, geomagnetic storms, coronal mass ejection, flare, Geomagnetically Induced Currents

* ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Űrkutatás-Űrtechnológia Szervezeti Egység vezető, űrkutatás fejlesztéséért felelős igazgatóhelyettes. ORCID: 0000-0003-1841-7202



vagyis szabvány által írjuk elő, hogy mikor, milyen esetben, pontosan milyen szabványok szerint készüljön el a védekezés. Például, egy épület tervezésénél figyelembe kell venni a szabványban rögzített, adott területre jellemző klimatikus viszonyokat (szélsebesség, csapadékmaximum, csapadékinzitás, hőmérsékleti szélsőségek stb.) a szélterhelés, a fűtési rendszer, az esővíz elvezetése, vagy a villámhárító rendszer hatékony tervezése érdekében.

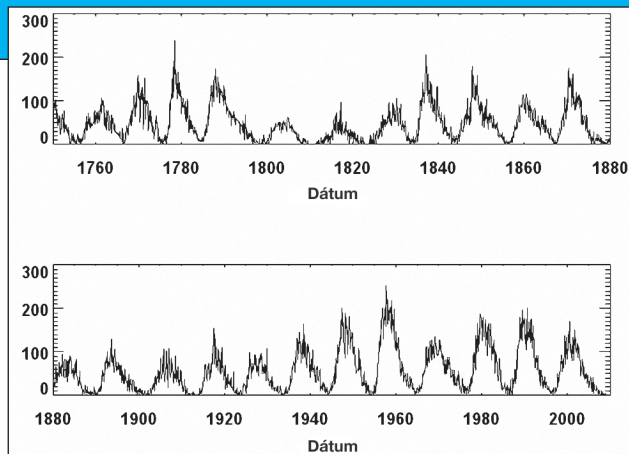
Az űridőjárás [1] fogalma meglehetősen új keletű, hiszen alig pár évtizede kezdtük használni olyan világűrbeli érkező fizikai jelenségek gyűjtőfogalmaként, amelyek számos esetben komoly hatásokat tudnak okozni a Föld közvetlen környezetében, a légkörben és a Föld felszínén. Korábban ugyanis azt gondoltuk, hogy a világűr – mint a magyar megnevezése is mutatja – egy olyan üres terület, amelyben anyag csak igen nagy távolságokra és koncentráltan található (lásd csillagok, bolygók, amelyek igen távol vannak egymástól, néha üstökösök és más kisebb égitestek, például aszteroidák található elvélve). Így aztán a tudományos közösséget komoly meglepetésként érte az a felfedezés, hogy a bolygóközi tér egyáltalán nem üres, éppen ellenkezőleg: kitölti egy ritka anyag, amit plazmának, pontosabban űrplazmának nevezünk. További meglepetést okozott annak felismerése, hogy az űrplazma nem állandó állapotú közeg. Vannak ugyanis nyugodtabb időszakok, de léteznek olyanok is, amelyeket bolygóközi viharok, mágneses és elektromágneses hullámok, és nagy sebességű töltött részecskékből álló anyagfelhők áramlása jellemez. A nyugodt és viharos időszakok váltakozása indokolja az űridőjárás [2] elnevezést, mert változékonysága miatt hasonlít a földi időjáráshoz.

Az űridőjárás tanulmányozása – mivel a világűrben, a bolygóközi térben zajlik –, lehetne pusztán érdekes tudományos téma, de kiderült, hogy az űridőjárás jelenségei számottevően befolyásolhatják a földi környezetünket is, különös tekintettel az általunk használt technológiákra. Az űridőjárás következtében geomágneses vihar jöhet létre a Földön, megzavarhatja a GPS-jeleket, befolyásolhatja a nagyfrekvenciájú (HF) rádiókommunikációt, zavarhatja a műholdakkal való kapcsolatot, és nagy erősségű áramokat, úgynevezett kéregáramokat hozhat létre a földkéregben, amelyek rácsatlakozva nagyfeszültségű villamos hálózatokra komoly meghibásodásokat okozhatnak, hogy csak a fontosabb hatásokat említsük, de a lista messze nem teljes.

Az űridőjárással kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy a hatásaival szemben történő védekezés eszközei jelen idő szerint még nem állnak rendelkezésünkre, de komoly erőfeszítés zajlik ezen a területen mind nemzetközi, mind hazai téren. A munkának komoly következményei várhatók többek között a kritikus infrastruktúra védelme, és az általános védelmi tevékenységek körében. Ezért nemzetvédelmi szempontból is fontosak a kutatások, amelyek az elméleti és a gyakorlati alkalmazások területén folynak. A továbbiakban részletesen tárgyaljuk az űridőjárás forrásait és az űridőjárás által okozott hatásokat.

AZ ŰRIDŐJÁRÁS FORRÁSAI

Az űridőjárás jelenségek elsődleges forrása egyértelműen központi csillagunk, a Nap működésében keresendő. A Nap folyamatosan változó, dinamikus rendszer [3], amelynek működésében megkülönböztetünk aktív és csendesebb időszakokat magába foglaló úgynevezett napciklusokat; ezek időtartama megközelítőleg 11 év. A szoláris maximumnak nevezett időszakban, amikor a Nap az aktív fázisában van, meghatározóan nagyszámú napfolt (aktív régió) jelenik



2. ábra. A napfoltok számának alakulása (függőleges tengely) az évszámok függvényében [4]

meg a Nap felszínén, a szoláris minimum alkalmával azonban gyakran megesik, hogy napfolt egyáltalán nem jelentkezik. A napciklusokat (1755-től kezdődően) sorszámokkal azonosítják, a jelenlegi napciklus e számozás szerint a soron következő 25. ciklus, amelynek maximuma 2025–2026-ra várható. Egy napciklust meghatároz a ciklus idején észlelt napfoltok száma (ezeket évente számolják össze), amely végső soron kifejezi az aktivitás intenzitását. Jól látható (2. ábra), hogy a napfoltok száma ciklusonként nagymértékben eltérhet, és ez azért fontos, mert az űridőjárás jelenségek szoros kapcsolatban állnak a Nap aktivitásának intenzitásával, és így a napfoltok számával.

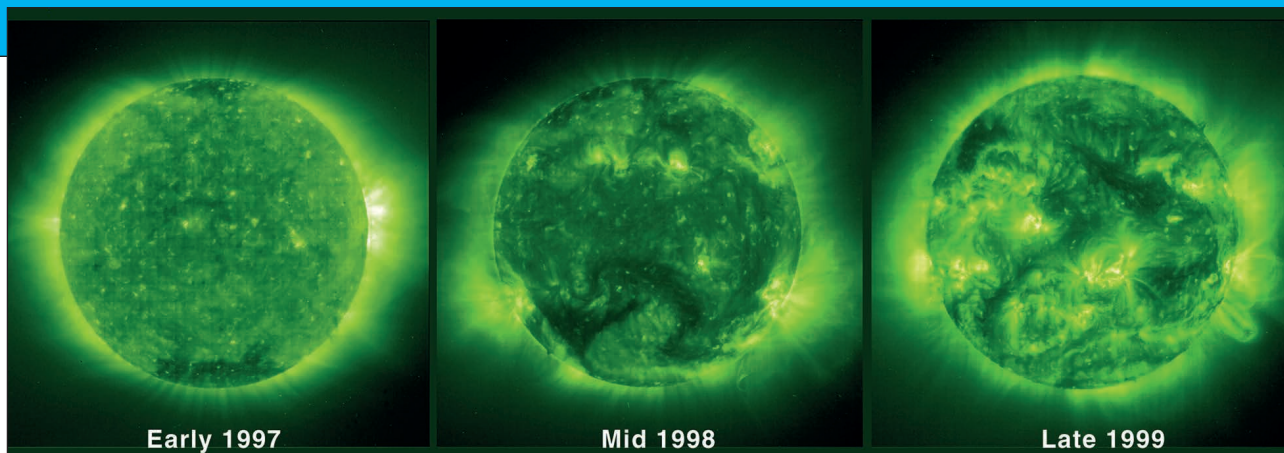
A napfoltok jól megfigyelhető területek, mert a Nap felszínén sötét foltokként jelennek meg, ugyanakkor az EUV-(extrém ultrabolya) és a röntgensugárzás-tartományban jól látszik, hogy ezek igen aktív területek (3. ábra). A Nap felszínéhez képest mért sötétebb foltok megjelenése azzal magyarázható, hogy ezen a területen nagyon erős mágneses fluxus alakul ki, amelyet úgy képzelhetünk el, mint a szoros csokorba összefogott mágneses erővonalakat. A napfoltcsoportokhoz köthető, mágneses térben lezajló gyors változások legvalószínűbb forrásai az olyan erőteljes űridőjárás jelenségek, mint például a szoláris flerek (jelentését lásd lejjebb – a szerk.), a koronakidobódások (coronal mass ejection – CME), vagy a sugárzási viharok és a rádiókitörések (fast radio bursts – FRBs). Ezek a jelenségek összefüggésben állnak egymással, például a nagyobb intenzitású flereket sokszor CME-k is kísérik.

Fontosságuk miatt a napciklusokat (és az azokhoz köthető napfoltok számának időbeli alakulását) megpróbálják különféle modellek felhasználásával előre jelezni, amelyekkel az űridőjárás események várható gyakorisága is megbecsülhető. [6]

FLEREK ÉS CME-K (KORONAKIDOBÓDÁSOK/NAPKITÖRÉSEK) [7]

Flerek nevezük a Nap felszínén megfigyelhető gyors, néhány perc alatt létrejövő erős felvillanást, illetve kifényesedést. Az elnevezés az angol „flare” szómagyarítás, amely szó szerint fellobbanást, felvillanást jelent. Ezen kifényesedő területek jobbra kis területekre koncentrálnak, és jellemzően 30–60 percig tartanak, miközben lassan elhalványulnak. A kifényesedés nemcsak az optikai tartományban figyelhető meg, hanem a kemény röntgen⁻¹ és a gamma-sugárzás tartományban is, a két utóbbi sugárzás az űridőjárás szempontjából fontos tényező. Továbbá a flereket gyakran rádiókitörések is kísérik.

A CME-k, (4. ábra) vagy koronakidobódások (régebbi szóhasználattal: napkitörések) alkalmával a plazma és a hozzá kapcsolódó mágneses tér nagy mennyiségű kilöködése figyelhető meg a Nap koronájából. Ez egy olyan erup-



3. ábra. A Nap képe az EUV-tartományban, amelyet a SOHO műhold készített. Balról jobbra: a Nap képe szoláris minimum közelében, a Nap képe közepes aktivitás esetén, a Nap képe erős aktivitás idején [5]

tív, vagyis robbanásszerű esemény, amikor több milliárd tonnányi plazma hagyja el a Nap térségét, akár 3000 km/s-öt is elérő sebességgel. A nagy sebességű CME-k 15–19 óra alatt el is érhetik a Földünket. Nyilvánvalóan azoknak a CME-knek van jelentős űridőjárási hatása a Földre, amelyek a bolygónk felé irányulnak, és akár telibe is találhatják azt. A CME-k jellegzetesen a Naptól távolodva, méretben jelentősen kiterjedhetnek.

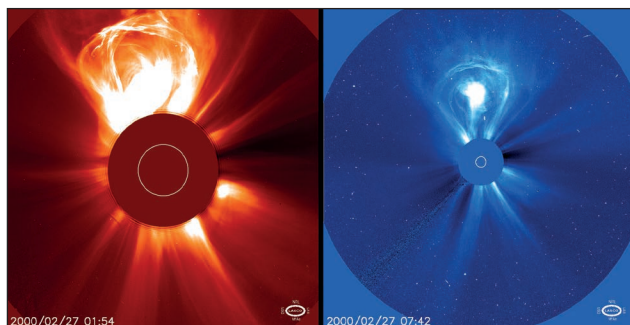
A nagyobb erejű, és emiatt az űridőjárás szempontjából veszélyesebb CME-k jellemzően olyan területekről indulnak ki, ahol erős, nagy energiájú, feszített mágneses tér koncentráltan van jelen. Ilyenek például a napfoltok, illetve a napfoltcsoportok aktív régiói. A különféle irányú mágneses terek összekapcsolódhatnak, ezt a jelenséget rekonnekciónak, vagy újrapcsolódásnak nevezzük. A mágneses tér más struktúrába rendeződik át, és ezáltal hatalmas mennyiségű elektromágneses energia szabadul fel, amely végül egy erős CME kialakulását hozhatja létre.

Gyakran megesik, hogy a jelenségek láncolatával van dolgunk, tehát a napfoltok megjelenését követheti azok mágneses terének és struktúrájának a kölcsönhatása, amelyből első lépésben fler, majd CME alakul ki.

A teljes láncolat pedig a következőképpen alakul: erősödő Nap-aktivitás → napfoltok megjelenése, számuk növekedése → a napfoltok mágneses terének a kölcsönhatása → fler → CME → űridőjárási hatások.

Természetesen a fenti láncolat egy igen leegyszerűsített kép, amelynek elsődleges célja az űridőjárás jelenségének az általános megértése. Nem tértünk ki arra, hogy flerek és CME-k többféle módon is kialakulhatnak, külön is létrejöhetnek, és ennek milyen módozatai vannak, illetve további fejlődésük eltérő lehet a bolygóközi térben [9], hiszen a je-

4. ábra. A SOHO műhold által 2000. február 27-én megfigyelt látványos CME. A „villanykörte” alakú kilöködést a LASCO (Large Angle and Spectrometric COronagraph) C2 (narancs) és C3 (kék) műszer készítette. A két műszer a látható fénytartományban rögzíti a képeket, de eltérő látószöggel és zársebességgel (a C2 esetében 26 másodperc, a C3 esetében 19 másodperc) [8]



lenlegi tanulmányoknak nem célja a különféle jelenségek pontos és részletes tudományos leírása.

A NAPSZÉL

Fontos megjegyezni, hogy a Naptól [10] (az előzőekben ismertetett eruptív, robbanásszerű eseményeken túl) folyamatosan, állandóan, gyakorlatilag minden irányban kiáramlik egy plazma halmazállapotú anyag, amelyet napszélnek nevezünk. A napszél kitölti az egész Naprendszer, vagyis az úgynevezett bolygóközi teret, a Naprendszer „üresnek” tekintett részét. A napszél olyan ritka sűrűségű űrplazma, amely elsősorban elektronokból és protonokból áll, és magával hordozza azt a mágneses teret is, amelyet a Naptól „örökölt”. [11] A napszél tehát egy olyan anyagáramlás, amelynek forrása a Nap, talán túlzó hasonlattal a Nap „légkörének” is tekinthető, és tulajdonképpen ebben a burokban helyezkedik el az egész Naprendszerünk. A napszél sebessége a Föld környezetében átlagosan 300–600 km/s, sűrűsége pedig néhány részecske (javarészt proton és elektron) köbcéntiméterenként. Ennek értelmében a Föld olyan, saját kiterjedt mágneses térrel (úgynevezett magnetoszférával) rendelkező bolygó, amelyik képletesen fogalmazva a napszél áramában „úszik”. A napszélhez kapcsolódó fizikai jelenségek ugyancsak űridőjárást alakító és befolyásoló tényezők.

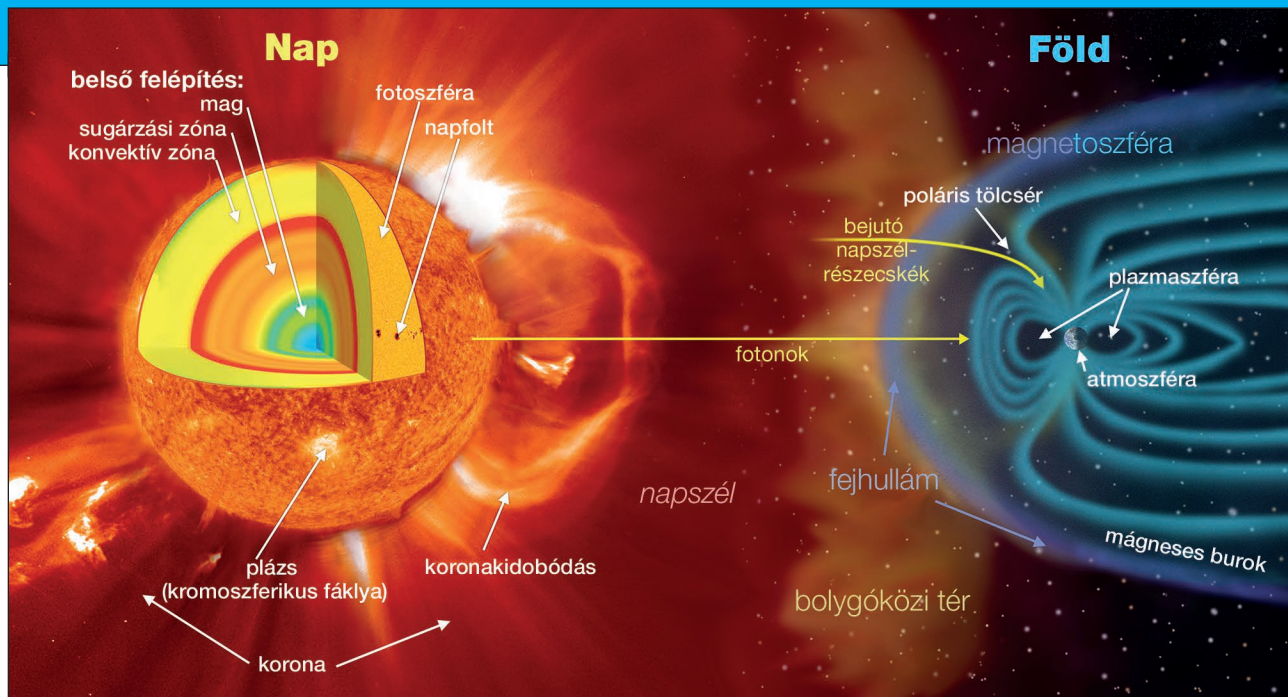
AZ ŰRIDŐJÁRÁSNAK A FÖLDRE ÉS A TECHNOLÓGIÁRA GYAKOROLT HATÁSAI

Az űridőjárás számos ponton képes befolyásolni a Föld közvetlen környezetét és az általunk használt technológiát. Ezek közül sorra vesszük azokat, amelyek a legfontosabbnak tekinthetők, különösen a technikai eszközökre gyakorolt hatásuk miatt. (1. ábra)

A GEOMÁGNESES VIHAR

A geomágneses vihar az egyik legjelentősebb űridőjárási jelenség, amelyhez a hatások széles spektruma köthető, ezért az első helyen kell említenünk. Mi történik egy geomágneses vihar idején? Említettük, hogy a Föld mágneses bolygó, vagyis erős, kiterjedt mágneses térrel rendelkezik, amely mintegy védőpajzsként öleli körül a Földet. Ez a magnetoszféra, amely meghatározott szerkezettel és régiókkal rendelkezik. A magnetoszféra dinamikus egyensúlyban van a napszéllel szemben: a mágneses tér energiája által kifizített magnetoszféra tartja távol a bolygótól a napszelet. Amikor azonban hirtelen erősebb hatás éri a magnetoszférát, akkor alakja, kiterjedése, a mágneses tér





5. ábra. (Forrás: a szerző szerkesztése a [17] alapján)

térerőssége megváltozik, összenyomódik, és szerkezeti változások alakulnak ki benne. A legnagyobb viharok a CME-khez köthetők, amelyek ekkor a megnövekedett plazmamyomás² mellett a beágyazott mágneses mezővel³ együtt érkeznek a Földre. A magnetoszférával történő kölcsönhatás energetikai szempontból is jelentős: szemléletesen fogalmazva, hatalmas mennyiségű energia töltődik be a magnetoszférába, és a Föld közvetlen környezetébe.

A jelenség a földi mágneses tér nagyfokú zavarával jár együtt. Ennek következtében intenzív áramok indulnak a magnetoszférában, változások jönnek létre a sugárzási övekben, és megváltozik az ionoszféra szerkezete és összetétele. Továbbá létrejöhet az ionoszféra és a felső légkör fűtése, felmelegedése is.

A földi észlelőállomásokon a geomágneses vihar jól látható módon jelentkezik, hiszen a mért mágneses értékek rövid idő alatt és nagymértékben megváltoznak. Egy geomágneses viharnek jellegzetes lefolyása figyelhető meg, és akár egy hétig is eltarthat, amíg visszaáll az egyensúlyi állapot. A geomágneses vihar jellemzésére szolgál például a Kp index⁴, amely geomágneses aktivitást kifejező index, amelyre a Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) előrejelzést is közzé tesz a weboldalán. [13]

IONOSZFÉRA-ZAVAROK

Az ionoszféra a Föld felső légköréhez tartozik, magassága általánosan 80 és 600 km közötti. A Naptól érkező sugárzás ionizálja az ebben a magasságban már igen ritka légkört, nevezetesen az itt található atomokat és molekulákat, létrehozva ezzel az elektronrétegeket különböző magasságokban. Az ionoszférának emiatt kialakul egy nyugodt időszakokra jellemző struktúrája. Az ionoszféra igen fontos a kommunikáció szempontjából, mert meghatározott frekvenciájú rádióhullámok visszaverődnek róla, ezáltal lehetővé téve a nagy távolságú rádiókommunikációt, míg más frekvenciájú rádióhullámok áthaladnak rajta, lehetővé téve a műholdakkal történő kommunikációt.

Erős flerek alkalmával jelentősen megnő a nagy energiájú sugárzások és nagy energiájú részecskék jelenléte. Ez elsősorban kemény röntgen- és gamma-sugárzást jelent, és abban az esetben, ha a flerből kiáramló részecskék nyálábjába etalálja a Földet, akkor még nagy energiájú pro-

tonokkal is számolnunk kell. Ezek érkezése esetén a szokottól eltérően megváltozik az ionoszféra sűrűsége és szerkezete, és sok esetben a hőmérséklete is. Ionoszférazavarok azonban létrejöhetnek geomágneses vihar kialakulása nélkül is.

A TECHNOLÓGIÁKRA GYAKOROLT HATÁSOK

A következőkben részletesebben tárgyaljuk azokat a veszélyeket és hatásokat, amelyeket az űridőjárás jelenségek a különféle technológiákra és technológiai rendszerekre okoznak. De miért is válik napjainkban egyre fontosabbá az, hogy ezzel a kérdéssel komolyan foglalkozzunk? A technológiánk fejlődése, különösen az űrtechnológia alapú eszközök használata és a digitális eszközök térnyerése fokozottan sérülékeny teszi az emberi civilizációt az űridőjárás hatásokkal szemben. A témában megjelenő számos tudományos publikációban konkrét becsléseket adnak egy nagyobb erősségű űridőjárás esemény várható gazdasági és társadalmi következményeire [14], sőt még arra is kiterjednek ezek a tanulmányok, hogy egy ilyen űridőjárás esemény hány évvel vetné vissza a fejlődést, illetve mennyi ideig tartana a jelenlegi állapot újraépítése.

GEOMÁGNESESEN INDUKÁLT KÉREGÁRAMOK ÉS A VILLAMOS INFRASTRUKTÚRA

Mágneses vihar esetén láthattuk, hogy a földi mágneses tér számottevően megváltozik, ezért erőssége is változik. Ismeretes, hogy változó mágneses térbe helyezett vezetőben feszültség, és ennek hatására áram indukálódik. Ezen az elven működik a dinamó is. A Föld esetében két nagy vezetőt találunk: az egyik a jól vezető ionizált felső légköri réteg, az ionoszféra, a másik pedig maga a földkéreg, illetve az óceánok, vagyis gyakorlatilag a Föld teljes felszíne. A földkéregben keletkező áramokat nevezzük geomágnesesen indukált kéregáramoknak (Geomagnetically Induced Currents – GIC). Ezek az áramok a földkéregben folynak, irányukat az határozza meg, hogy vezetőként milyen elektromos ellenállású rétegekben kell haladniuk. Nyilvánvalóan az áram a legkisebb ellenállású úton fog folyni, és ebben rejlik a veszélye. A GIC-ek ugyanis különösen hajlamosak rákapcsolódni a nagyfeszültségű villamos hálózatra, amivel komoly üzemzavart és adott esetben konkrét meghibáso-

dást is elő tudnak idézni. Ilyen esetek többször előfordultak a közelmúltban. Az egyik ilyen példa az 1989-es mágneses vihar következménye volt, amikor Quebec (Kanada) tartományban a hálózatra rácsatolóó áramok szó szerint kiégették az egyik transzformátorállomást, amelynek következtében elsötétülés (blackout) jött létre, vagyis a teljes villamos hálózat működésképtelenné vált. Az elsötétülés 9 órán át tartott, és több millió embert érintett, akiknek ezalatt sem fűtése, sem világítása nem volt. [10]

A GIC-ek számára nemcsak a villamos hálózat jelent kiváló kapcsolódási pontot, hanem a kőolajvezetékek is, amelyek számos alkalommal mértek már jelentős erejű kéregáramokat. Ezek jelenléte a kőolajvezetékeken gyors öregedéshez is vezet, mert jelentősen meggyorsíthatja a korróziós folyamatokat. A geomágneses vihar tehát egy állandó, potenciális veszélyforrás a kritikus infrastruktúrára nézve, emiatt nemzetbiztonsági szempontból is igen jelentős téma.

MŰHOLDAS KOMMUNIKÁCIÓ

A műholdas kommunikáció jellegzetessége, hogy a közvetített jelnek mindenféleképpen át kell haladnia az ionoszférán. A rádiójelek terjedését ezért a terjedési út mentén található közeg jellemzői határozzák meg. Az ionoszféra módosítja a rádiójeleket, fáziseltolódást, csoportképletetést és teljesítménycsökkenést okozhat, de ennél is lényegesebb hatás a jelek bizonyos fokú elnyelése és a szcintilláció. A műholdas kommunikációban jellemzően nagyfrekvenciás jeleket használnak, mint amilyen az UHF- (ultrahigh frequency) (300 MHz – 3 GHz) és az SHF- (super high frequency) (3–30 GHz) tartományok.

A rádióhullámok ionoszférán történő áthaladásának hatásai modellek használatával, és különféle mérnöki megoldásokkal mérsékelhetők és javíthatók. Úridőjárás események alkalmával azonban, amikor az ionoszféra erősen zavart állapotba kerül, előfordulhat részleges adatvesztés vagy a kommunikáció teljes elvesztése is. Ennek oka elsősorban az erőteljes szcintilláció, amelyet az ionoszférában az úridőjárás hatása miatt kialakuló kis méretű, igen változó sűrűségű struktúrák megjelenése okoz. Ezek a struktúrák a jel frekvenciájától függően megváltoztatják a jel amplitúdóját és fázisát, illetve megtörik a jel terjedési irányát. A jel összevissza verődik a struktúrák között, több útvonalon is haladhat, szóródhat ahhoz hasonlóan, ahogy egy hullámzó vízfelszínen megtörik és szóródik a napfény.

A vevőhöz érkező jel (ha eljut egyáltalán a vevőhöz) a fentiek következtében egy sor változáson megy át, és nem lesz más, mint az eredeti jel megtört és több úton érkező, időben eltolódott komponenseinek összegzése, pontosabban: interferenciája. Így tulajdonképpen a véletlen (az ionoszféra állapotán) múlik az, hogy az eredetileg sugárzott információ mennyiség hány százaléka jut el a vevőhöz.

GPS

A műholdas helymeghatározás esetében nagyon hasonló a helyzet ahhoz, mint amit a műholdas kommunikációnál tárgyaltunk. A Globális Navigációs Műholdrendszer (Global Navigation Satellite System – GNSS) esetében annyival bonyolódik a helyzet, hogy a vevőnek több műhold jelét kell vennie egyszerre, amelyek eltérő terjedési útvonalakon haladnak keresztül az ionoszférán. Erős úridőjárás hatás esetén súlyos mértékű szcintilláció léphet fel, amely megakadályozhatja azt is, hogy a GPS-vevő egyáltalán a jelhez kapcsolódhasson, így a pozicionálás teljesen lehetetlenné válik. Kisebb mértékű szcintillációnál „mindössze” a helymeghatározás megbízhatósága és pontossága sérül eltérő mértékben.

HF-RÁDIÓZÁS

Az 1–30 MHz közötti frekvenciát használó rádiókommunikációt nevezzük HF (high frequency), vagyis nagyfrekvenciás rádiózásnak. Ennek a kommunikációs formának fontos része, hogy a rádiójel zavarmentes időszakban, meghatározott útvonalon és formában verődik vissza az ionoszféráról. Amennyiben úridőjárás esemény következtében megváltozik az ionoszféra szerkezete és sűrűsége, az megváltoztatja a rádiójel útvonalát, sőt esetenként teljesen blokkolhatja a rádiójelek átvitelét. Ezáltal ilyenkor a HF-tartományú rádió-kommunikáció megbízhatatlanná válhat, és jelentős vagy teljes kommunikációs tartalomvesztés következhet be.

A HF-rádió-kommunikáció megbízhatatlanságát okozó ionoszféra-zavar többféleképpen is létrejöhet. A flerekből induló kemény röntgensugárzás mélyen behatolhat az ionoszférába, egészen az ionoszféra alsó részéig (kb. 80 km-re a Föld felszínétől), ahol ionizáló hatást kifejtve az ionoszféra D rétegét változtatja meg, elsődlegesen úgy, hogy megvastagítja azt, ezáltal megváltoztatva a réteg rádióhullám-visszaverő és -átviteli tulajdonságait. Nyilvánvalóan a flerek röntgensugárzásához kapcsolható rádió-kommunikációs zavar, vagy extrém esetben a teljes rádió-kommunikáció megszűnése a Föld nappali oldalán jöhet létre, és a legerősebb akkor, amikor a Nap a legmagasabban áll.

A másik lehetőséget a HF-tartományú rádió-kommunikáció megzavarására a nagy energiájú részecskék (Solar Energetic Particle – SEP) megjelenése jelenti, amelyek jellemzően ugyancsak flerekhez köthetők. Ezek a részecskék – hasonlóan a röntgensugárzásához – megvastagítják a D réteget, aminek az előzőekben leírtakkal megegyező hatása van. A földi mágneses tér erővonalai a sarkok felé vezetik ezeket a részecskéket, ezáltal hatásukat inkább a sarkok környékén fejtik ki, ezért a pólusok környékén gyakran ellehetetlenül a rádió-kommunikáció.

A HF-tartományt használják a légi közlekedésben, illetve több ország kormányügynökségei is, emiatt az úridőjárás események hatása a rádiózás biztonságára kiemelt jelentőségű.

MŰHOLDK FÉKEZŐDÉSE (SATELLITE DRAG)

Geomágneses viharok esetén a beérkező plusz energia képes a Föld felső légkörének (az ionoszférának) a hőmérsékletét és sűrűségét megnövelni. Emiatt a légkör tulajdonképpen kitágul, és ezáltal a sűrűbb rétegek magasabbra kerülnek. Az itt keringő műholdak ennek következtében fokozott ellenállással szembesülnek, amely erősebb fékeződést okoz, és jelentősen módosulhat a műholdak pályája. Ez különösen az alacsony, Föld körüli pályákon (LEO, Low Earth Orbit) keringő műholdakat érinti. A LEO-k jellegzetesen 180–1000 km között találhatóak. A napciklus aktív periódusában sokkal gyakrabban kell a különféle műholdaknál pályakorrekciót végrehajtani a fokozott ellenállás miatt, mint a szoláris minimum közelében.

EGYÉB HATÁSOK

Nem tárgyaltuk az úridőjárásnak a légkörre [16], és az élővilágra gyakorolt hatását, beleértve az emberekre gyakorolt hatást, ahogy azt sem, hogy egyes úridőjárás események konkrét fizikai veszélyt jelenthetnek a műholdakra és az űrszondákra, és időleges vagy végleges meghibásodásokat okozhatnak. Az emberekre gyakorolt hatásnál meg kell jegyezni, hogy az úridőjárás eseményeknél jelentkező megnövekedett sugárzás egészségi kockázati tényezőt jelent a repülőgépek személyzetére, valamint az űrhajósokra.



Nem elemeztük részletesen a flerekhez kapcsolható rádiókitöréseket sem, amelyek nem mások, mint széles frekvenciaspektrumú, és nagy intenzitású rádióhullám-csomagok, amelyek szintén megzavarhatják a rádiókommunikációt, és befolyásolhatják a radarok működését.

HOGYAN VÉDEKEZHETÜNK AZ ŰRIDŐJÁRÁS HATÁSAI ELLEN?

Az űridőjárás kozmikus esemény, amelyet sem befolyásolni, sem megállítani nem tudunk, legalábbis jelen ismereteink szerint. Azonban a hatásait tudományos kutatással, előkészületekkel és megfelelő műszaki tervezéssel jelentősen mérsékelhetjük. Fel kell készülnünk az ilyen események bekövetkeztére, mert amilyen mértékben fejlődik a technológiánk, olyan mértékben válunk egyre sebezhetőbbekké az űridőjárás hatásai nyomán.

A műholdas kommunikáció, a GPS, a villamos hálózat, a digitális technológia elterjedése egyre inkább a mindennapi élet részévé válik, amelyet védeni kell. A védelem részét képezi a földi környezet állandó megfigyelése, monitorozása. Nem véletlen, hogy az ESA (European Space Agency – Európai Űrgyűlönség) egyik központi eleme az űridőjárást megfigyelő és előrejelző hálózat kiépítésének terve és megvalósítása, amelyben Magyarország is aktív szerepet vállal az ESA opcionális programján keresztül.

A soproni ELKH⁵ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet obszervatóriumában folyamatosan figyelik és rögzítik a földi mágneses tér, a kéregáramok és az ionosféra adatait és állapotát; ezek ugyanis az űridőjárás szempontjából releváns adatok. A tervek szerint hamarosan elkészül az online felület, amelyen mindezek az adatok valós időben elérhetőek lesznek a hazai kutatói, katonai, kereskedelmi és ipari felhasználók számára is.

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Schwenn, R. Space Weather: The Solar Perspective. Living Rev. Sol. Phys. 3, 2 (2006). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2> https://link.springer.com/article/10.12942/lrsp-2006-2?affiliation&error=cookies_not_supported&code=0d8c7e75-9ad4-4ed6-92e1-cd8469a0e4ec <https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2> (Letöltve: 2023. 1. 12.);
- [2] Bencze Pál, Poór Attila. Bevezetés a Nap–Föld-fizikába: Űridőjárás Sopron, 2014. MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet p. 297. ISBN: 9789633341957;
- [3] Hédervári Péter. Csillagunk: a Nap, Magvető Kiadó, Budapest, 1980. ISBN: 963-271-143-2;
- [4] Forrás: <https://spaceweather.com/glossary/images2009/zurich.gif> (Letöltve: 2023.1.15.);
- [5] Forrás: <https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/tricomp.jpg> (Letöltve: 2023.1.15.);
- [6] Russell, H. A. A Historical Perspective on Coronal Mass Ejections 2006/10/01 Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series ISSN: 9781118666203 DOI: 10.1029/165GM03 (Letöltve: 2023.1.12.);
- [7] Kerékgyártó Zita. Szoláris eruptív jelenségek jellemzői a bolygóközi térben 2002 Debrecen <http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/dolg/Kerekgyarto.pdf> (Letöltve: 2023.1.12.);
- [8] Forrás: <https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/las02.jpg> (Letöltve: 2023.1.15.)
- [9] Gonzalez, W.D., B.T. Tsurutani, A.L. Clúa de Gonzalez: Interplanetary origin of geomagnetic storms, Space

- Sci. Rev., 88, 529-562, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005160129098> <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005160129098> (Letöltve: 2023.1.12.);
- [10] Kálmán Béla. A Nap légköre, Csillagászat (szerk.) Marik Miklós, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1989. ISBN 9630546574;
- [11] Kallenrode, May-Britt. Space Physics, Springer Berlin, Heidelberg, 2001. ISBN: 978-3-662-04445-2 <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04443-8>;
- [12] Forrás: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/01/Space_weather_effects (Letöltve: 2023.1.15.);
- [13] <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-forecast> (Letöltve: 2023.1.15.);
- [14] Schulte, H. et. al. How severe Space Weather can disrupt global supply chains Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 2, pp. 4463–4486, 2014 www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/2/4463/2014/ doi:10.5194/nhessd-2-4463-2014 (Letöltve: 2023.1.15.);
- [15] Phillips, T. The Great Québec Blackout 2021.03.12. <https://spaceweatherarchive.com/2021/03/12/the-great-quebec-blackout/> (Letöltve: 2022.12.31.);
- [16] Baranyi, T., Ludmány A. Relevance of the topologies of solar ejected plasmas in tropospheric processes, Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, 24-29 September 2001, Vico Equense, Italy. Editor: Huguetta Sawaya-Lacoste. ESA SP-477, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-749-6, 2002, pp. 423–426. <https://adsabs.harvard.edu/full/2002ESASP.477.423B> (Letöltve: 2023.1.12.);
- [17] Forrás: NASA Goddard Space Flight Center <https://svs.gsfc.nasa.gov/30481> (Letöltve: 2023.1.25.).

JEGYZETEK

- 1 A röntgensugárzás nagy energiájú elektromágneses sugárzás, amelynek hullámhossza a néhány száz 10 nanométer és a néhány száz 10 pikométer közé esik. A röntgensugárzás nagyobb hullámhosszú (így kisebb energiájú) része az elektromágneses spektrumban az ibolyántúli sugárzáshoz csatlakozik, ezt nevezzük lágy röntgensugárzásnak. A kisebb hullámhosszú (nagyobb energiájú) – kemény röntgensugárzásnak nevezett – tartomány a gamma-sugárzással szomszédos, részben azzal átfedésben. (A szerk.)
- 2 Plazmanyomás (plasma pressure): $p = n \cdot k_B \cdot T$ (ahol n számsűrűség, k_B : a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet). A mágneses nyomás (magnetic pressure), amely másként a mágneses tér energiasűrűsége: $p_{mag} = B^2/2\mu_0$. A kétféle nyomás aránya a plazma β , amely a plazma jellemzésére szolgáló paraméter. A napszél és a Föld mágneses terének találkozásánál például a napszél nyomásának a földi mágneses tér nyomása „áll ellen”, tehát egy dinamikus egyensúlyban van a két rendszer.
- 3 A plazma magával ragadja a Nap lokális mágneses terét, ami jelen van a kialakulásakor, és amely tér „befagy” a plazmába. Ez a plazmában található mágneses tér úgynevezett „frozen-in” állapot. Ugyanígy viselkedik a napszél plazmája is. [2]
- 4 A K-index egy kvázi logaritmikus szám, amelynek értéke 0 és 9 között lehet. A hivatalos, az egész bolygóra vonatkoztatott „Kp” (K planetary) indexet a földgolyó számos helyén található mérőállomások által szolgáltatott egyedi „K” értékek súlyozott figyelembevételével számolják ki. A magnetométerrel 3 órás ciklusokban végzett mérések értékei, összehasonlítva a mérési hely mágneses erőterében észlelt legnagyobb változás vízszintes komponensével adja ki az aktuális mérőszámot. A Kp-index jelentősen befolyásolja a GPS-vezérelt drónok működését. Általában 1–3 közötti indexérték mellett a repülés biztonságos, 4-es érték esetében már mérsékelt mágneses hatás jelentkezhet, így a GPS-jel zavara miatt a repülésben problémák léphetnek fel, 5-ös vagy annál magasabb érték esetén a repülés nem javasolt. (A szerk.)
- 5 Eötvös Loránd Kutatói Hálózat.