

1. ábra. Az űridőjárás jelenségeit összefoglaló infografika (Forrás: [1], a magyar felirat a szerző munkája)

Kis Árpád*

A geomágneses viharok anatómiája és következményeik

BEVEZETÉS

A Föld mágneses bolygó, vagyis olyan égitest, amely saját kiterjedt mágneses térrel rendelkezik, amelyet magnetosz-

férának nevezünk. [2] Ez a kiterjedt mágneses tér megakadályozza, hogy a Naptól érkező űridőjárás hatásai (mint pl. a napszél) közvetlenül elérjék a Földet, vagyis egyfajta védőpajzsként viselkedik. Ugyanakkor a földi magnetoszféra

ÖSSZEFOGLALÁS: A tanulmány részletesen bemutatja a geomágneses vihar keletkezési folyamatát és fő fázisait. A szerző ismerteti a skálázási lehetőséget – amely az „enyhe” (G1) fokozattól a „rendkívüli” (G5) fokozatig terjed –, illetve a geomágneses vihar lehetséges következményeit. Vizsgálja a geomágneses vihar esetén kialakuló kéregáramok keletkezési mechanizmusát, és a jelenség által okozott veszélyeket. Végül áttekintést ad néhány történelmi jelentőségű geomágneses viharról, és bemutatja az azok kapcsán megfigyelt jelenségeket.

ABSTRACT: The study presents in detail the course of the geomagnetic storm, its main phases, and the possibility of scaling, and also highlights the possible consequences of the geomagnetic storm. It examines the mechanism of generation of crustal currents in the event of a geomagnetic storm and the dangers they cause. Finally, it provides an overview of some historically significant geomagnetic storms and presents the phenomena observed in connection with them.

KULCSSZAVAK: űridőjárás, geomágneses viharok, koronaanyag-kidobódás, flar, kéregáramok

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

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

érzékenyen reagál az űrből érkező hatásokra, amelyek megváltoztathatják a szerkezetét és a kiterjedését. A Föld mágneses terének hirtelen történő és nagyarányú megváltozását, megváltozását geomágneses viharoknak nevezzük. [3] A geomágneses vihar kiváltó oka, forrása központi csillagunk, a Nap felszínén lejátszódó folyamatokban keresendő, mint amilyen pl. a koronaanyag-kidobódás (coronal mass ejection – CME).

Egy geomágneses vihar alkalmával a földi mágneses tér megváltozása átmeneti jellegű, vagyis egy bizonyos idő elteltével a földi mágneses tér visszatér a „normál” állapotába, abba az állapotba, amelyben a vihar kitörése előtt volt.

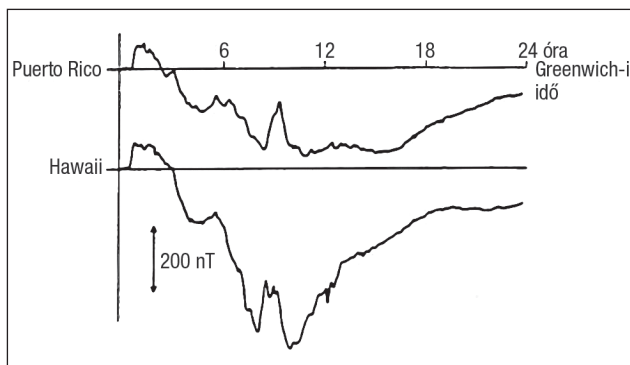
A GEOMÁGNESES VIHAR KIALAKULÁSA ÉS FÁZISAI

Egy geomágneses vihar kezdetét általában az a jelenség jelzi, amikor a CME következtében kilökött anyagfelhő eléri a Földet. Az érkező anyag sűrűsége és sebessége is általában jelentősen nagyobb mértékű, mint a napszélé. Ezért fokozott nyomást fejt ki a földi magnetoszférára, és összenyomja azt a Nap felőli oldalon, pontosabban azon a részen, ahol az anyagfelhő eléri a földi magnetoszférát. Ha ezt a folyamatot egy földi telepítésű mágneses műszerrel megfigyeljük, akkor azt látjuk, hogy a geomágneses vihar kezdetén hirtelen megugrik, megnövekszik a földi mágneses tér értéke, vagyis egy kis csúcs (20–50 nT növekedés) jelenik meg a mágneses adatokban. Ezt a jelenséget „viharszerű hirtelen kezdetnek” (sudden storm commencement – SSC) [3] nevezik, amely a vihar kezdetét jelzi, és a geomágneses vihar első fázisa. (2. ábra.)

A második fázisban – amely a geomágneses vihar fő fázisa –, a mágneses tér értékének gyors ütemű, és számottevő (általában 50 nT-át meghaladó) csökkenése figyelhető meg. Ennek oka, hogy a geomágneses viharok esetén kialakuló és felerősödő úgynevezett gyűrűáram a földi mágneses tér ellenében hat, ezáltal csökkenti azt. A fő fázisra jellemző, hogy általában 2–8 órán keresztül tart, de nagyobb viharok esetén időtartama a 24 órát is meghaladhatja. A geomágneses vihar nagysága a csökkenésértékekkel jellemezhető. Az 50 és 100 nT közötti csökkenés általában közepes vihart, a 100 és 250 nT közötti csökkenés erős/intenzív vihart, míg a 250 nT-át meghaladó csökkenés „szupervihart” jelent.

Érdemes megjegyezni, hogy a földi mágneses tér értéke a földfelszínen mérve nagyságrendileg az Egyenlítőtől a sarkokig 30 000 nT és 65 000–70 000 nT közötti értékű (a legnagyobb érték a sarkok környékén mérhető). Ehhez

2. ábra. Egy geomágneses vihar regisztrátuma a Föld két különböző pontjáról (Puerto Ricoról és Hawaiiról) történt megfigyelés nyomán [3]



képezt a geomágneses viharok által okozott változás a normál értékhez képest ezrelékekben, extrém esetben százalékokban mérhető, azonban hatásuk jelentős lehet.

A fő fázis elmúltával a földi mágneses tér értéke lassan visszaáll az eredeti állapotra. Ezt a jelenséget helyreállási vagy elmúlási fázisnak (recovery phase) nevezzük. Ez a leghosszabb szakasz, időtartama 8 órától több napig is terjedhet, amíg a csendes időszakra jellemző érték lassan visszaáll.

Megjegyezzük, hogy nincs minden viharok fő fázisa, és az is megtörténhet, hogy az SSC-t nem követi mágneses vihar.

A GEOMÁGNESES VIHAROK OSZTÁLYOZÁSA, INDEXEK

Amikor a geomágneses vihar erősségéről beszélünk, szükségessé válik egy viszonyítási alap, egy viszonyítási rendszer és annak meghatározása, hogy pontosan mit is nevezünk „erősnek”. A National Oceanic And Atmospheric Administration – NOAA¹ úgynevezett „űridőjárási esemény osztályokat” [4] vezetett be. Az osztályozás célja, hogy megkönnyítse a tájékozódást az űridőjárás jelenségeivel és hatásaival kapcsolatban, illetve könnyen átlátható összefoglalást adjon a jelenség erőssége és a várható hatások között. Az osztályozás tartalmaz továbbá egy statisztikai várható értéket is az esemény bekövetkezésének lehetőségéről, amely nyilvánvalóan nem jóslást jelent, hanem mindössze az eddig észlelt események statisztikáját mutatja be.

Az osztályozás (1. táblázat) alkalmas arra, hogy pontosan definiálja a geomágneses vihar erősségét, amely a skálán az „enyhe” (G1) fokozattól a „rendkívüli” (G5) fokozatig terjed. Az egyes fokozatokat nem véletlenszerűen állapították meg, hanem szorosan hozzárendelték a konkrétan mérhető, geomágneses aktivitást kifejező Kp-indexhez², amely a geomágneses háborgatottság mértékének megállapítására szolgál. Ennek értelmében a G1 fokozat Kp = 5 értékeknek, míg a G5 fokozat a Kp = 9 értékek felel meg. Ebből következik, hogy a Kp = 4 értéken, és alatta nem beszélünk geomágneses viharról.

Érdemes figyelembe venni, hogy a Kp és a G értékek közötti megfeleltetés mérhető és egzakt, azonban a „hatás” és „gyakoriság” oszlopban leírtak inkább egy általános becslés és valószínűség kifejezésére szolgálnak, amit kellő óvatossággal és fenntartással érdemes kezelni. Egy geomágneses vihar alkalmával létrejövő hatások sok egyéb paramétertől (mint pl. a napszak és a helyi adottságok) is függenek, ezért mindezekre – globális paraméterek alapján – nagyon nehéz pontos becslést adni.

Ugyanakkor a táblázat tartalma alkalmas arra, hogy átfogó képet adjon a geomágneses viharok erősségéről, hatásairól és gyakoriságáról, és jól szolgálja az általános tájékozódást. Érdemes lenne egy hasonló, Magyarország helyi adottságaira és a helyben mért adatokra alapozott hazai skálázás kidolgozása és szabványszerű alkalmazása.

A GEOMÁGNESES VIHAR KÖVETKEZMÉNYE: A GEOMÁGNESESEN INDUKÁLT ÁRAMOK

Középiskolai tanulmányainkból tudjuk, hogy a változó mágneses tér hatására elektromos tér jön létre; ezt a jelenséget nevezzük elektromágneses indukciónak. Ezen a jelenségen alapul a generátorok működése is, ezért a jelenséget dinamóelvnek is szokás hívni. Az indukált elektromos tér töltésmozgást idéz elő, és amennyiben ez egy vezetőben történik, akkor áram jön létre, vagyis áram indukálódik a vezetőben.

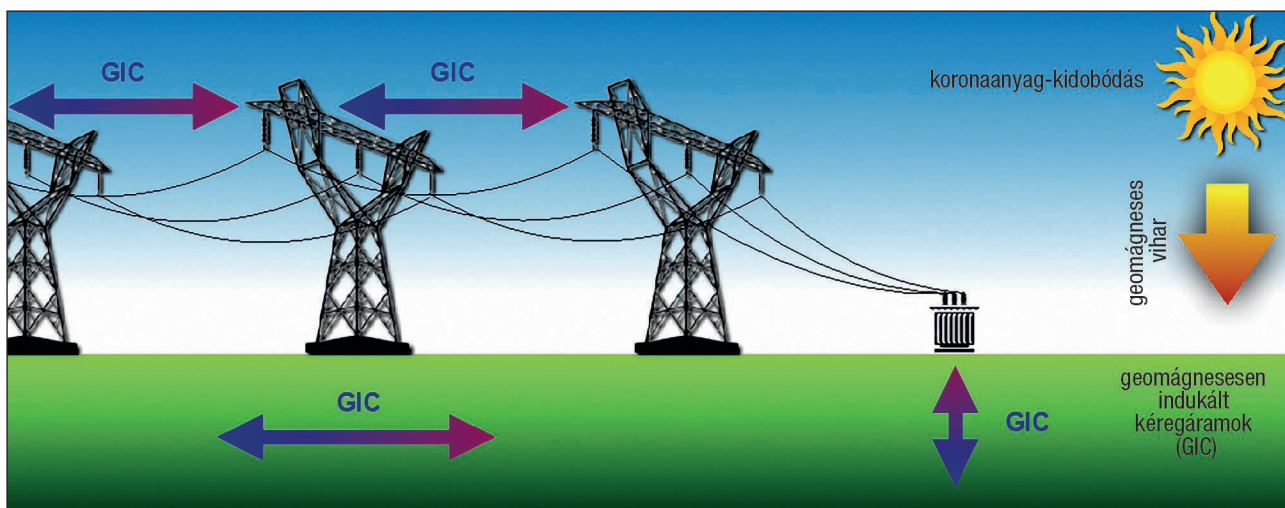


1. táblázat. A geomágneses viharok NOAA által bevezetett és alkalmazott besorolása, a fokozatok leírása, hatásai és gyakoriságuk (A szerző szerkesztése a [4] alapján)

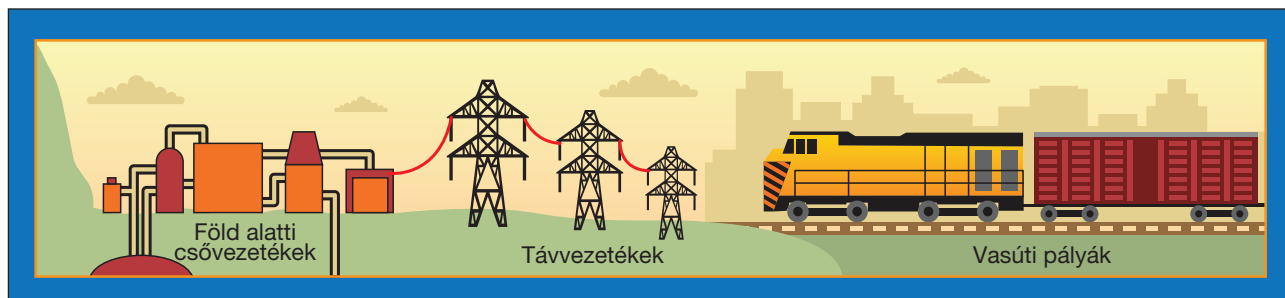
Besorolás	Leírás	Hatás	Gyakoriság
G1	Enyhe	Energiaellátó rendszerek: gyenge áramingadozások fordulhatnak elő. Űrtevékenység: lehetséges kisebb mértékű hatás a műholdműveletekre vonatkozóan. Egyéb rendszerek és hatások: a vándorló állapotok tájékozódását negatívan befolyásolja egy ilyen erősségű geomágneses vihar; erősebb geomágneses vihar esetén a hatás értelemszerűen még erősebb. Az északi fény jellemzően magas szélességi fokokon látható (pl. Michigan és Maine északi részének magasságában).	1700 esemény egy napciklus alatt, ciklusonként 900 napon át.
G2	Mérsékelt	Energiaellátó rendszerek: a magas szélességi fokon található elektromos hálózatoknál feszültségriasztások léphetnek fel, a hosszan tartó viharok a transzformátorok károsodását okozhatják. Űrtevékenység: szükségessé válhat a földi irányítás korrekciós intézkedése, a fékeződés változása befolyásolhatja a pályá-előrejelzéseket. Egyéb rendszerek és hatások: a HF-tartományú rádiókommunikáció zavara a magasabb szélességi fokokon lehetséges, az északi fény New Yorkban és Idahóban is megfigyelhetővé válik (jellemzően 55°-os geomágneses szélesség környékén).	600 esemény egy napciklus alatt, ciklusonként 360 napon át.
G3	Erős	Energiaellátó rendszerek: feszültségkorrekcióra lehet szükség, egyes védelmi eszközök téves riasztásokat jelezhetnek. Űrtevékenység: felszíni elektromos feltöltődés fordulhat elő a műholdak alkatrészein, a fékeződés növekedhet az alacsony Föld körüli pályán lévő műholdakon, és korrekciókra lehet szükség az orientációban fellépő problémák miatt. Egyéb rendszerek és hatások: időszakos műholdas navigációs és alacsony frekvenciájú rádió navigációs problémák léphetnek fel, a HF-rádió kommunikációban zavar keletkezése valószínű. Az északi fény olyan alacsony szélességi fokokon is megjelenhet, mint Illinois és Oregon (jellemzően az 50°-os geomágneses szélességen).	200 esemény egy napciklus alatt, ciklusonként 130 napon át.
G4	Komoly	Energiaellátó rendszerek: széles körben fellépő feszültség-ingadozási problémák léphetnek fel, és előfordulhat, hogy a védelmi rendszerek kulcsfontosságú eszközöket iktatnak ki a hálózatból. Űrtevékenység: felszíni elektromos feltöltődés léphet fel, problémák a követésben. Orientációs problémák esetén korrekció válik szükségessé. Egyéb rendszerek és hatások: a keletkező indukált áramok rácsatolódnak a fém csővezetésekre, és megzavarhatják azok működését. A HF rádió kommunikáció megszakadhat, szaggatottá válhat. A műholdas navigáció órákon át megbízhatatlanná válhat. Megszakadhat az alacsony frekvenciájú rádió kommunikáció. Az északi fény megjelenése Alabama és Észak-Kalifornia magasságában, jellemzően a 45°-os geomágneses szélesség környékén (itt található Magyarország is).	100 esemény egy napciklus alatt, ciklusonként 60 napon át.
G5	Rendkívüli	Energiaellátó rendszerek: széles körben jelentkező feszültség-ingadozás, és rendszerproblémák jelentkezhetnek. Az elektromos hálózatban teljes összeomlás vagy időszakos áramkimaradás léphet fel. A transzformátorok meghibásodhatnak. Űrtevékenység: kiterjedt felületi elektromos feltöltődés, orientációs problémák, az űreszközzel való kommunikációs nehézség és követési problémák jelentkezhetnek. Egyéb rendszerek és hatások: a csővezetésekre csatolódoó áram elérheti a több száz amper erősséget, a HF rádió kommunikáció helyenként megszűnhet 1-2 napig, a műholdas navigáció több napon keresztül elérhetetlenné válhat, az alacsony frekvenciájú rádió kommunikáció több órára megszűnhet. Az északi fény megjelenése várható Floridában és Dél-Texas területén (jellemzően a 40°-os geomágneses szélességen).	4 esemény egy napciklus alatt, ciklusonként 4 napon át.

A földkéreg (az óceánok, a tengerek és a szárazföld együttesen) vezetőként viselkedik, ezért a geomágneses vihar alkalmával gyorsan változó mágneses tér hatására

töltések mozdulnak el a földkéregben, amelyben áram indukálódik. Ezeket a szakirodalom geomágnesesen indukált áramoknak, vagy pontosabban: geomágnesesen indu-



3. ábra. A geomágnesesen indukált kéregáram a földelési pontokon keresztül képes rácsatolni a villamos hálózat különböző szakaszaira [5]



4. ábra. A GIC-ek valójában bármilyen fémből készült és hosszú struktúrára rácsatolódnak, legyen az felszíni vagy a föld alá temetett kőolaj- és gázvezeték, a villamos hálózat szakasza vagy vasúti sín [6]

kált kéregáramoknak (Geomagnetically Induced Currents – GIC) nevezi.

A keletkező áram erősségét nyilvánvalóan meghatározza a földi mágneses tér változásának a mértéke és a változás sebessége is: nagyobb változásnál intenzívebb áram várható, és a gyorsabb változás szintén erősebb áramot hoz létre. A helyi geológiai viszonyok is befolyásolják a létrejövő áram erősségét, hiszen az Ohm-törvény értelmében a keletkező áram erőssége fordítottan arányos azon közeg ellenállásával, amelyben az áram folyik. A helyi geológiai viszonyok azonban nemcsak az áram erősségét, hanem a terjedési irányát is befolyásolják: az áram természetesen ott áramlik, ahol a közeg ellenállása a legkisebb. És pontosan ebben rejlik a GIC-ek veszélye, ugyanis számukra az ember készítette hosszú, fémből készült létesítmények és hálózatok – a távvezetékek, vagyis a villamos hálózat, a gáz- és olajvezetékek, illetve a vasúti hálózatok stb. – mindegyike kiváló vezető képességű alternatív útvonalat jelent. Fontos megjegyezni, hogy a GIC-ek gyakorlatilag egyenáramoknak tekinthetők, ezzel ellentétben a távvezeték-hálózatban továbbított áram váltóáram; a földelési pontokon keresztül a GIC éppen ezért tud rákapcsolódni a hálózatra.

TÖRTÉNELMI GEOMÁGNESES VIHAROK

A CARRINGTON-ESEMÉNY (1859.)

Képzeljük el, hogy az éjszaka közepén arra ébredünk, hogy világos van. Mintha felkelne a nap. Olyan erős a fény, hogy Görögországban az emberek újságot tudnak olvasni a vö-

röses megvilágításban, Magyarországon még ennél is erősebb fény figyelhető meg. Éjfél nap? Nem, csak az északi fény, az Aurora Borealis világítja meg az éjjeli égboltot. Hihetetlenül hangzik? Nos, mindez megtörtént, méghozzá 164 évvel ezelőtt, annyi pontosítással, hogy az Amerikai Egyesült Államokban a Sziklás-hegység környékén lakókat ébresztette fel a fény éjszaka, és a reggeli újságot a különös fényben Kubában olvashatták az emberek...

Ez volt a nevezetes „Carrington-esemény”, amelynek során a sarki fény szokatlanul alacsony földrajzi szélességeken, és a világ több pontján tapasztalt megjelenését [8]

5. ábra. 1859. szeptember 1-én R. C. Carrington egy különösen nagy és fényes fler-t figyelt meg, amely egy nagy napfoltból indult ki. A képen Carrington³ saját készítésű rajza látható az eseményről [7]

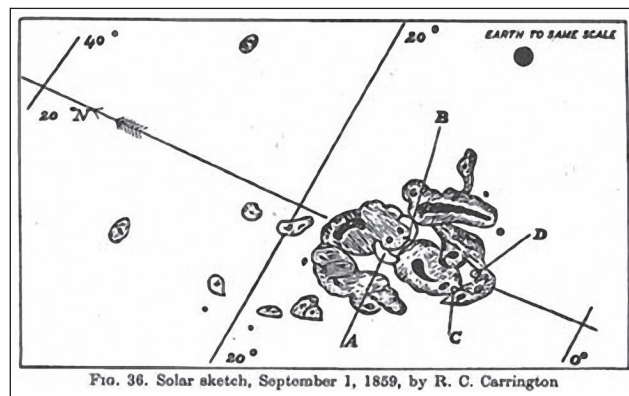


FIG. 36. Solar sketch, September 1, 1859, by R. C. Carrington

a legnagyobb geomágneses vihar követte, amit valaha is sikerült megmérni az emberiség történelme folyamán. A Dst-érték⁴ elérte az -1760 nT-át [9]. A korábbiakban említettük, hogy a 250 nT-át meghaladó csökkenés esetén már szuper viharról beszélünk, ehhez képest a -1760 nT igencsak jelentős érték.

Az 1859-es év kapcsán nem beszélhetünk fejlett technológiáról. Nem volt villamos hálózat, nem létezett még műhold, TV, rádió és internet, amelyek igazán ki lettek volna téve egy geomágneses vihar hatásainak. Volt azonban táviró-szolgáltatás, amely az Egyesült Államokban igen fontos szerepet töltött be, hiszen ez volt akkoriban az egyetlen módja a hírek és magánüzenetek gyors és hatékony továbbításának.

A táviró operátorai annak idején azt észlelték, hogy számos vonal nem működött, nem lehetett üzeneteket továbbítani, ugyanakkor olyan erős áram folyt a vezetékeken, hogy attól lehetett tartani, hogy a platinaérintkezők megolvadnak, miközben „tűzsugár” ömlött ki az áramkörökből. Egy technikus komoly áramütést kapott, amikor a feje közel került egy földvezetékhez. Egy szemtanú szerint egy ív alakú szikrakísülés indult el az áramütést szenvedő technikus fejéről a távirókészülék felé. Olyan állomásokon, ahol vegyszeres távirópapírt használtak arról számoltak be, hogy több esetben meggyulladt a papír. Hasonló esetekről több táviró állomáson is beszámoltak. [11]

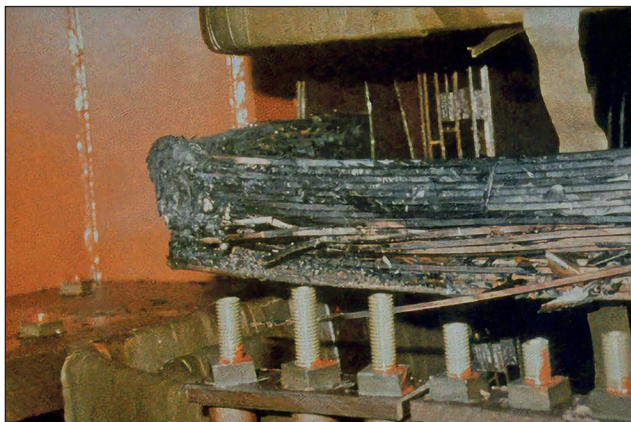
Az észlelt jelenségek magyarázata egyértelmű: a geomágneses vihar alkalmával indukált kéregáramok rácsatolódtak a táviróvezetésekre, és ezzel túlterhelték azt, hiszen a tervezettnél jóval nagyobb áramok folytak a rendszerben.

A korabeli újságok gazdasági veszteségekről is beszámoltak, ugyanis egy olyan időszakban keletkezett kimaradás a hírközlésben, amikor arra nagy volt az igény.

QUÉBEC, KANADA (1989.)

1989. március 10-én és 12-én két különálló CME-t figyeltek meg a Nap felszínén. A koronaanyag-kidobódások következtében március 13-án, 01:27-kor (UT) egy erős geomágneses vihar érte el a Földet. Összeomlott Québec villamos hálózata (pontosabban a James Bay hálózat), és létre jött egy elsötétülés (blackout), amely során közel 7 millió ember 9 órán keresztül áram nélkül maradt. A hálózat összeomlása rendkívül rövid idő alatt, alig 90 másodperc alatt történt. A későbbi vizsgálat kiderítette, hogy a meghibásodást olyan kéregáramok okozták, amelyek rácsatolódtak a hálózatra, a transzformátorállomások (ok) meghibásodását okozták – „kiégették” azokat. (6. ábra)

6. ábra. A New Jersey-i (Amerikai Egyesült Államok) Salem One nukleáris erőmű transzformátoráról készült fotó az 1989-es mágneses vihar következményeként létrejövő túlhevülés és olvadás után [12]



Az áramkimaradást csak azért lehetett ilyen rövid idő alatt megszüntetni, mert sikerült átirányítani az áramellátást egy alternatív hálózatra, kikerülve a sérült transzformátorállomást, amelynek javítása az eseményt követően több hétig tartott. Valójában csak a szerencsén múlt, hogy a meghibásodás nem terjedt át a többi tartományra és az Amerikai Egyesült Államokra is: az észak-amerikai hálózat több pontján ugyanis számottevő feszültségingadozást regisztráltak a hálózatban, és kevésen múlt, hogy az ingadozás nem lépte át a kritikus határértéket, ami már maradó meghibásodást okozott volna más állomásokon is.

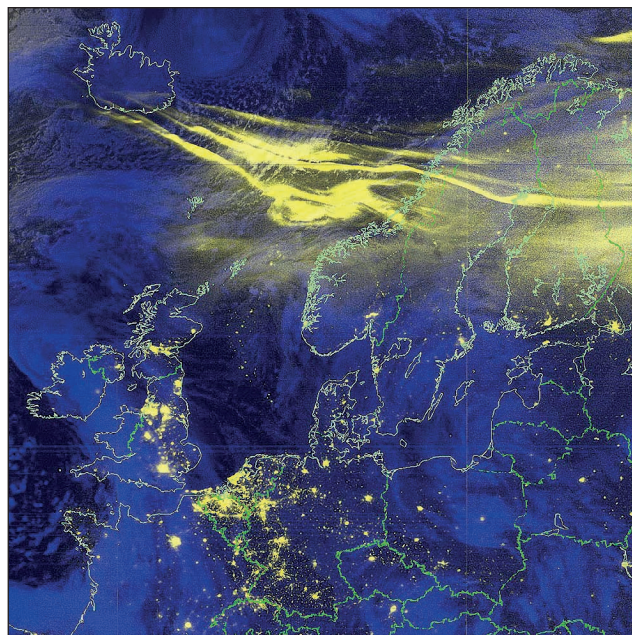
A québeci eset az úridőjárás hatásainak egy olyan iskolapéldájaként vonult be a tudomány és a technika történetébe, amely ráirányítja a figyelmet a kritikus infrastruktúra úridőjárás hatások által jelentett sebezhetőségére. Érdekes, hogy ugyanabban az évben, augusztus 16-án egy másik geomágneses vihar következményeként leállt a torontói tőzsde. [13]

Valójában nem meglepő az intenzív naptevékenység az 1989-es évben, mert abban az évben volt a 22. napciklus maximuma, amely egyébként is intenzív napciklusként jellemezhető.

A „HALLOWEEN VIHAROK” (2003.)

A 2003-as évet intenzív naptevékenység jellemezte, amely nyilvánvalóan kötődik a 23-as napciklus maximumához. A naptevékenység intenzitásának csúcsát egy sor fler és CME-esemény jellemezte, amelyek október közepe és november eleje között, különösen október 28–29. között voltak megfigyelhetők. A „Halloween viharok” elnevezés egyrészt az időpontra utal (november 1. Halloween, azaz mindenszentek ünnepe), míg a többes szám azt jelzi, hogy a következmény nem csupán egyetlen geomágneses vihar volt, hanem több esemény is egymás után.

7. ábra. A DMSP műhold által 2003. október 30-án készített kompozit kép. Jól megfigyelhető az intenzív északi fény, különösen a skandináv országok felett [14]



2. táblázat. Azonosított kockázati forgatókönyvek input érték adatai [16] alapján, részlet a jelentésből

Forgatókönyv	Alforgatókönyv	A forgatókönyvben érintett társadalmi értékek								Súlyzott átlag
		Haláleset	Sérülés és betegség	Természet és környezet tartós károsodása	Pénzügyi és anyagi veszteségek	Társadalmi zavargás	Mindennapi életben jelentkező zavarok	Meggyengült nemzeti kormányzóképeség	Meggyengült területi igazgatás	
5.1. Mágneses viharok	2. Erősség: Erős	A	A	Nem	C	E	E	D	D	E
5.4 Szoláris sugárviharok vagy szoláris elektromos részecskékkel kapcsolatos események	1. Szoláris eredetű, nagyon magas elektromos töltésű részecskékitörés, amely eléri a Föld légkörét	Nem	Nem	Nem	A	A	C	C	C	C
5.5. Szoláris rádiókitörések	1. Szoláris eredetű természetes rádiókitörés (például Napkorona anyag kilövellések esetén)	Nem	Nem	Nem	A	Nem	Nem	C	C	C

* A 2. táblázat betűjeleinek definíciói: A: az eseményre utaló konkrét jel nincs és bekövetkezése nem valószínűsíthető; B: az eseményre utaló konkrét jel nincs, bekövetkezése túlzóan valószínűsíthető; C: az eseményre utaló konkrét jel nincs, de bekövetkezése valószínűsíthető; D: az esemény bekövetkezése nagyon valószínűsíthető; E: az esemény bekövetkezésére utaló konkrét jel.

A „Halloween viharok” nemcsak egy (vagy több, egymást követő) geomágneses vihar következményét mutatják meg, hanem az úridőjárás által okozott következmények egész tárházát, amelyeket az alábbiakban sorra veszünk.

A GOES-rendszer⁵ rögzíti a legnagyobb flert, amelyet X45 erősségűnek becsülnek, és amelyet korábban X28-as erősségűnek határoztak meg a GOES detektorainak telítődése miatt.

Zavar lépett fel több mint 20 műhold működésében. Ebben az összesítésben nem szerepelnek a katonai műholdak, mivel ez utóbbi eszközökről nincsenek nyilvánosan elérhető adatok. A NASA műholdjainak mintegy fele érintett volt, egy japán műhold teljesen működésképtelenné vált.

Súlyos zavarok támadtak a HF rádióösszeköttetésben, amelyek többek között a légitársaságok kommunikációját lehetetlenítették el. Az amerikai Federal Aviation Administration ekkor adott ki először figyelmeztetést arról, hogy a repülőgépen utazók sugárzási veszélynek lehetnek kitéve.

A villamos hálózat zavara következtében a svédországi Malmö elsötétült. Dél-Afrikában meghibásodott egy transzformátorállomás a GIC okozta túlterhelés miatt – hasonló módon „kiégett”, mint ’89-ben a québeci transzformátor –, itt azonban a hatás késleltetett volt [15]. Az esemény oka mindkét esetben a geomágnesesen indukált kéregáramok (GIC) rácsatolódása volt a villamos hálózatra.

Az Egyesült Államokban a parti őrség – megbízhatatlansága miatt – időlegesen lezárta a LORAN⁶ navigációs rendszert.

A Himalája területén tartózkodó hegymászók nem tudták használni műholdas telefonjaikat, a kommunikáció lehetlenné vált.

A „Halloween viharok” hatása érdekes módon olyan jelentőségű, amely túllépett a kizárólag a Földet érintő hatásokon: az esemény ugyanis a Mars bolygó felszínén tartózkodó Mars Odyssey sugármérő egységében is meghibásodást idézett elő.

KATASZTRÓFÁVÉDELEM: KOCKÁZATI DIAGRAM

A BM Katasztrófavédelem „Jelentés Magyarország nemzeti katasztrófavédelem értékelésének felülvizsgálatáról – a nemzeti katasztrófavédelem értékelés releváns összefoglalása” című jelentésében [16] igen pozitív ténynek tekinthető, hogy e dokumentum részletesen foglalkozik az úridőjárás hatásaival.

Az úridőjárás jelentette kockázatok és azok következményei táblázatba foglaltnak jelennek meg. A dokumentum „kockázati diagram” ábráján (a jelentés 55. oldalán) a mágneses viharesemény a „katasztrófális”, vagyis a legnagyobb súlyosságú, és a „valószínű” gyakoriságú zónában szerepel, amely teljesen megfelel a szakirodalomban található elemzéseknek. (2. táblázat)

Azzal, hogy a hazai katasztrófavédelem komolyan foglalkozik az úridőjárás okozta hatások kockázatával, a világ országainak élvonalba tartozik, mert beépíti a potenciális kockázatok közé az úridőjárás okozta hatásokat is. (Ez a preventív veszélyelemzés egyelőre nem része a nemzetközi gyakorlatnak.)



ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott tudományos tények és tapasztalatok arra engednek következtetni, hogy a geomágneses viharok (és a többi űridőjárási jelenség) káros hatásokat és komoly károkat okoznak a Föld ökoszisztémájában, társadalmában és kiépített technikai rendszerében. Az űridőjárás, különösen a geomágneses vihar kockázataival és következményeivel napjainkban már komoly tanulmányok foglalkoznak. Ezek az elemzések behatóan vizsgálják az űridőjárási hatások következményeit, megállapításaik referenciaként tekinthetők. Ilyen például a Schulte et al., 2014 [17] által készített tanulmány, amelynek megállapítása szerint egy, az 1989-es québecihez mérhető esemény gazdasági hatása – egy teljes évre vetítve – 2,4–3,4 trillió dollárnyi veszteséggel érne fel. A teljes gazdasági sokk 50%-a olyan országok gazdaságában lenne érezhető, amelyek kívül esnek a geomágneses vihar határán. Összességében ez a globális GDP 3,9–5,6%-os csökkenést okozná, ami összemérhető a háborúval, az extrém pénzügyi válság és klímaváltozás okozta negatív hatásokkal. Mindezek alapján egyértelmű, hogy a Föld országainak fel kell készülnie a geomágneses viharok és a más űridőjárási jelenségek által okozott hatásokra.

HIVATKOZOTT IRODALOM

[1] Forrás: NASA Scientific Visualization Studio <https://svs.gsfc.nasa.gov/4923> (Letöltve: 2023.3.20.);

[2] Kivelson, M. G., Russel, Ch. T. Introduction to Space Physics Cambridge University Press, USA, 1995;

[3] Cserepes L., Petrovay K. Kozmikus fizika Egyetemi jegyzet Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Bp. 2001. <https://mek.oszk.hu/00500/00559/>;

[4] The NOAA Space Weather Scales <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (Letöltve: 2023.3.20.);

[5] Tozzi, R., De Michelis, P., Coco, I., Giannattasio, F. A Preliminary Risk Assessment of Geomagnetically Induced Currents over the Italian Territory 2020. <http://www.swico.it/2020/10/07/a-preliminary-risk-assessment-of-geomagnetically-induced-currents-over-the-italian-territory/> (Letöltve: 2023.3.20.);

[6] NASA: Geomagnetically Induced Currents <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/gicinfographicfinal.pdf> (Letöltve: 2023.3.20.);

[7] 159 Years Ago, A Geomagnetic Megastorm <https://spaceweatherarchive.com/category/space-weather/> (Letöltve: 2023.3.19.);

[8] Geophysical Institute Of The University Of Alaska: A Study of the Aurora of 1859 by D. S, Kimball Scientific Report No. 6 NSF Grant No. Y/22.6/327 April 1960 <https://scholarworks.alaska.edu/bitstream/handle/11122/3607/GI%20Reports%20109.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;

[9] Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Lakhina G. S., Alex S. The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859 *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 108, No. A7, 1268, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009504>;

[10] Kerékgyártó Zita. Szoláris eruptív jelenségek jellemzői a bolygóközi térben Szakdolgozat Debreceni Egyetem Természettudományi Kar, Debrecen 2002. p. 17.;

[11] Klein, Ch. A Perfect Solar Superstorm: The 1859 Carrington Event; <https://www.history.com/news/a-perfect-solar-superstorm-the-1859-carrington-event> (Letöltve: 2023.3.19.);

[12] http://www.solarsystemcentral.com/solar_storm_page.html (Letöltve: 2023.3.19.);

[13] Dayton, L. Solar storms halt stock market as computers crash 1989 <https://www.newscientist.com/article/mg12316812-400-solar-storms-halt-stock-market-as-computers-crash/> (Letöltve: 2023.3.20.);

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/2003_Halloween_solar_storms (Letöltve: 2023.3.20.);

[15] Thomson, A. W. P., Gaunt, T., Cilliers, P., Wild, J. A., Opperman, B., McKinnell, L. A., Kotze, P., Ngwira, C.M., Lotz, S. I. Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids *Advances in Space Research* 45(9):1182-1190 https://www.researchgate.net/publication/222557718_Present_day_challenges_in_understanding_the_geomagnetic_hazard_to_national_power_grids#fullTextFileContent (Letöltve: 2023.3.18.) <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.023>;

[16] Jelentés Magyarország nemzeti katasztrófakockázat-értékelésének felülvizsgálatáról – a nemzeti katasztrófakockázat-értékelés releváns összefoglalása Melléklet a 7/2018. évi (XII.17.) KKB határozathoz pp. 47–50. <https://www.katasztrofavedelem.hu/application/uploads/documents/2019-09/64108.pdf> (Letöltve: 2023.3.19.);

[17] Schulte in den Bäumen, H., Moran, D., Lenzen, M., Cairns, I., Steenge, A. How severe space weather can disrupt global supply chains, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2749–2759, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2749-2014>, 2014.

JEGYZETEK

- 1 A Space Weather Prediction Center (SWPC) a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) laboratóriuma és időjárás-előrejelző központja a Colorado állambeli Boulderben. Az SWPC folyamatosan figyel és előrejelzi a Föld űrkörnyezetét, napelemes földi információkat szolgáltatva. Az SWPC az űridőjárási riasztások és figyelmeztetések hivatalos forrása az Amerikai Egyesült Államokban.
- 2 A K-index egy kvázi logaritmikusszám, amelynek értéke 0 és 9 között lehet. A hivatalos, az egész bolygóra vonatkoztatott „Kp” (K planetari) indexet a földgolyó számos helyén található mérőállomások által szolgáltatott egyedi „K” értékek súlyozott figyelembevételével számolják ki. (A szerk.)
- 3 Richard Christopher Carrington (1826. május 26. – 1875. november 27.) angol amatőr csillagász, akinek 1859-es csillagászati megfigyelései kimutatták a napkitörések létezését.
- 4 A Dst-indexet 1957-től alkalmazzák az Egyenlítő környéki mágneses zavarok jellemzésére. Értéke a mágneses viharok alatt fellépő egyenlítői gyűrűáram erősségétől függ. Azt mutatja meg, hogy mekkora a gyűrűáramot alkotó részecskék összenergiája. A Dst értéke nyugodt napokon –20 - +20 nT, míg erős viharok esetén –450 nT lehet. Az indexet az Egyenlítő környéki obszervatóriumok a mágneses tér horizontális komponense alapján határozzák meg. [10]
- 5 A (Synchronous Meteorological Satellite) SMS műholdprogramként indított projekt a NOAA tulajdonába és kezelésébe kerülve GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) program néven ismert. Az Egyenlítő felett különböző pozíciókban helyezkedő 17 műhold a változó igényeknek megfelelően készíti a felvételeket a Földről.
- 6 A LORAN (long range navigation) a hosszú távú navigáció rövidítése, egy hiperbolikus rádió navigációs rendszer, amelyet az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztettek ki a második világháború idején. Először az Atlanti-óceánon átkelő hajókonvojokhoz, majd nagy hatótávolságú járőrrepülőgépekhez használták.