

Geomágneses indukció

ÁDÁM A., KIS Á., LEMPERGER I., NOVÁK A., PRÁCSER E.,
SZARKA L., WESZTERGOM V.[@]

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai u. 6–8.
[@]E-mail: wv@ggki.hu

A geomágneses tér napfizikai jelenségekkel összefüggő, rövid periódusú változásait összefoglalóan geomágneses aktivitásnak hívjuk. A Faraday-féle indukció törvénye alapján az időben változó geomágneses tér az elektromos vezetőnek tekinthető Földben áramokat indukál. Nagy geomágneses aktivitás, geomágneses viharok során az indukált elektromos tér olyan nagy lehet, hogy vezetékes információ- és energiaátviteli rendszerek működését veszélyeztetheti. Az európai kritikus infrastruktúra geomágneses indukcióval kapcsolatos veszélyeztetettségének vizsgálata az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban egy átfogó európai kutatási projekt keretében folyik. A jelen tanulmány a geomágneses aktivitás statisztikai elemzésének eredményeit és az intézetben készült európai geomágneses indukciós modellt mutatja be.

Ádám, A., Kis, Á., Lemperger, I., Novák, A., Prácsér, E., Szarka, L., Wesztergom, V.: Geomagnetic induction

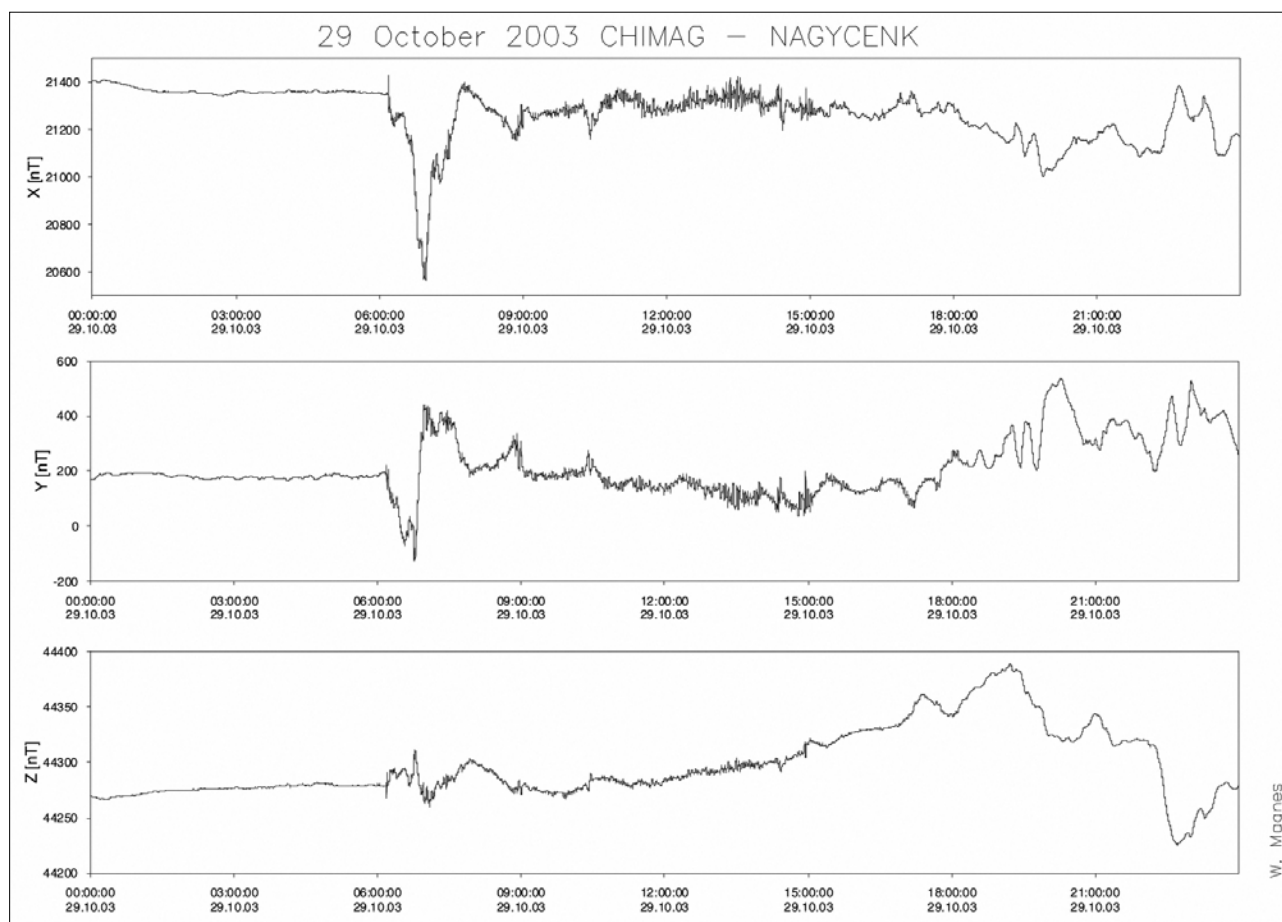
The term “geomagnetic activity” covers occurrence of short term variations of the geomagnetic field mainly due to solar wind – magnetosphere coupling. According to Faraday’s law of induction the time variation of geomagnetic field is associated with electric field of related amplitude and phase. Electric fields induced in the conductive Earth during intervals of high geomagnetic activity may cause harmful processes in the long conductors such as power transmission lines and telecommunication systems. Vulnerability of the so called critical infrastructure has been studied in the Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Hungarian Academy of Sciences, in the frame of a European research project. In this paper the results of statistical analysis of long term variation of geomagnetic activity and the geomagnetic induction model of the continental Europe are presented.

Beérkezett: 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

Bevezetés

Az, hogy a napviharok, a geomágneses viharok, a sarki fény lenyűgöző optikai jelensége és a földfelszín távoli pontjai között fellépő nagy elektromos potenciálkülönbségek között kapcsolat van, már a Carrington-eseményként ismert rendkívüli napkitörést követően bizonyossággá vált. Az 1859. szeptember 1-én bekövetkezett flert követően a geomágnesség történetének legnagyobb mágneses viharával és a közepes geomágneses szélességeket is betöltő sarki fény nyel egyidejűleg az akkorra már elég kiterjedt táviróhálózatban súlyos működési zavarok léptek fel. A technika történetének talán legnagyobb hatású napfizikai eredetű „balesete” 1989. március 13–14-én történt, amikor is egy geomágneses vihar során a kanadai Montrealban a Hydro Quebec erőmű meghibásodása következtében 9 órás teljes áramki-maradás volt, ami legalább 6 millió embert érintett. Svéd-

országban ugyanakkor 6 különböző, 130 kV-os rendszerben lépett fel jelentős feszültségesés. Csővezetékek katódpotenciálja ugyancsak a fenti időszakban gyakran a kritikus érték fölé emelkedett jelentősen megnövelve a korróziós folyamatok kockázatát. Az előző napciklus maximumára (2003) esett az ún. Halloween-esemény (*1. ábra*), amikor Skandinávia egy része borult sötétségbe. Annak hátterében, hogy egy-egy nagyobb napvihar és az azt követő geomágneses aktivitás nemcsak érzékelhetővé, hanem egyfajta kockázati tényezővé is vált, a geomágneses indukció jelensége áll. Az időben változó geomágneses térhez az indukció törvénye alapján elektromos tér kapcsolódik, a véges vezetőképességű altalajban Ohm törvényének megfelelően az elektromos tér hatására földi áramok vagy más néven tellurikus áramok alakulnak ki. Ezek az indukált áramok kis elektromos ellenállású, információ- vagy energiaátviteli távvezetékbe, csővezetékekbe azok földelési pontjain keresztül jutnak be.



1. ábra Halloween-esemény (SSC kezdetű vihar, MTA Széchenyi István Geofizikai Observatórium, 2003. 10. 29.)

Figure 1 Halloween-event (magnetic storm with SSC, Széchenyi István Geophysical Observatory of the Hungarian Academy of Sciences, 29. 10. 2003.)

A geomágneses viharok persze nemcsak a vezetékes rendszerekre jelentenek kockázatot, hanem – a Föld plazmakörnyezetében fellépő zavart viszonyok miatt – a vezeték nélküli távközlésre, navigációs rendszerekre és más műholdas technológiákra is. A katasztrofális következményekkel járó eseményeket követően világszerte megnőtt az igény a geomágneses viharokkal szembeni kiszolgáltatottság mérséklésére. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban 2011-ben az európai kritikus infrastruktúra védelmét szolgáló EURISGIC (EUropean RISK on Geomagnetically Induced Currents) program keretében elkezdődött az európai litoszféralemez indukciós modelljének megalkotása és az obszervatóriumi tellurikus adatok átfogó elemzése.

A geomágneses tér

Míg nehézségi erőtere minden tömeggel rendelkező testnek van, a mágneses tér kialakulásának, fennmaradásának speciális feltételei vannak. Mágneses terüket tekintve még az ún. Föld típusú bolygók is elég nagy eltéréseket mutatnak. A Vénusznak egyáltalán nincs mágneses tere. Ennek oka az lehet, hogy forgása rendkívül lassú. Másik szomszéd-

dunknak, a Marsnak ugyan van, de az a Földéhez viszonyítva csekély, a mai mágneses tere vélhetően már csak a szilárd kőzetek maradék mágnesezettségéből ered, a gyenge mágneses terét a napszél egészen a bolygó felszínéig nyomja össze.

A Föld légkörének külső határfelülete ott van, ahol a földi mágneses tér nyomása egyensúlyt tart a napszél aktuális dinamikai nyomásával. Ezt az egyensúlyi felületet hívjuk magnetopauzának. A magnetopauza olyan felület, melyen töltött részecskék csak különleges folyamatok révén juthatnak át, így egyfajta „buborékba” zárja a Föld légkörét olyan magasságban, ahol azt már a gravitáció képtelen lenne megtartani. Az ionizált felső légkörnek ezt a tartományát hívjuk magnetoszférának.

Eredetét tekintve a Föld mágneses terét három összetevőre bonthatjuk:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_f + \mathbf{B}_a + \mathbf{B}_v . \tag{1}$$

\mathbf{B}_f az ún. fő tér. Átlagos értéke a felszínen 50 000 nT, az egyenlítőn ~25 000 nT, míg a pólusok környékén ~70 000 nT erősségű. Eredetének magyarázatai közül a földmagbéli öngerjesztő MHD dinamómodellek vannak leginkább összhangban a megfigyelésekkel. \mathbf{B}_f maga sem állandó, lassú változásai az évszázados vagy szekuláris vál-

tozások. A jelenlegi geomágneses tér legjelentősebb jelenkori változásait a tér nyugati driftje, a dipólmomentum csökkenése, a dipóltér E -i irányú eltolódása jellemzik. A földkéreg kőzeteibe befagyott paleomágneses tér vizsgálatából tudjuk, hogy a geomágneses tér polaritása rendszeresen időközönként (néhány százezer évente) átfordul.

A hidromágneses dinamo első közelítésben, mintegy 90%-ban egy $8 \cdot 10^{22}$ A/m²-es mágneses dipóllal helyettesíthető, amelynek tengelye $11,5^\circ$ -os szöget zár be a Föld forgástengelyével. A dipóltér meghatározásának hibája 0,1%, a nem dipól összetevőé 2% körül van. A dipól térerősség az Egyenlítőnél megközelítőleg 24 000 nT, a mágneses pólusoknál 66 000 nT.

B_a : anomális tér. Kialakításában elsődleges szerepe van a ferromágneses anyagoknak és a velük összefüggő remanens mágnesezettségnek. Tekintve, hogy a földköpeny hőmérséklete a Curie-pont felett van, az anomáliák forrásai csak a kéreg, esetleg a felső köpeny lokális inhomogenitásai lehetnek. B_a maximálisan a B_f néhány százalékát teszi ki.

B_s : a fő térre szuperponálódó külső eredetű változások tartoznak ide. A mágneses tér külső eredetű változásainak legfőbb energiaforrása a napszél kinetikus energiája. A napszél kinetikus energiája a magnetopauzánál felületegységre vetítve hozzávetőlegesen egymilliomod része az elektromágneses sugárzás révén érkező energiának (Walker 1998). Az a felület, amelyen át a napszél és a földi mágneses tér közötti energiaátadás történik, pontosan nem ismert, de bizonyosan sok nagyságrenddel nagyobb, mint az elektromágneses sugárzás révén történő energiaátadásnál számba vehető felület. A bejutó energia jelentős része Joule-hő formájában disszipálódik. A fennmaradó energia ionoszférikus áramrendszerek, valamint magnetohidrodinamikus (MHD) hullámok közvetítésével jut el a Föld felszínére, ennek következtében a felszíni eloszlása egyenetlen. Magasabb geomágneses szélességeken az energiasűrűség több nagyságrenddel meghaladja a közepes szélességeken tapasztalható.

A geomágneses tér kis amplitúdójú, közel harmonikus változásait pulzációknak nevezzük, a megerősödött napszéllel összefüggő igen intenzív változásokat pedig geomágneses viharoknak. (Ezeket kívül természetesen még számos más jelenséget – tranzienszt és harmonikust egyaránt – lehet elkülöníteni, de ezek a napszél és a mágneses tér közötti energiacsatlás szempontjából kevésbé érdekesek.)

A geomágneses viharok jellemző időtartama néhány óra, de előfordulnak több napig tartó viharok is. A Nap nyitott mágneses erővonalai mentén szinte fékeződés nélkül kiáramló gyors napszélnyalábok vagy napkitörés során kilökődő plazmafelhő és a magnetoszféra közötti energiaátadás eredményezi ezt az erőteljes háborgást. Ha a Földet plazmafelhő találja el, akkor a viharok jellegzetes impulzusszerű kezdete van (SSC) (*I. ábra*). A viharok intenzitását a napszél sebessége és az interplanetáris mágneses tér együttesen határozza meg. Amplitúdójuk közepes szélességeken néhány száz, a sarkifény-övezetben néhány ezer nT is lehet. Az egész Földön hasonló morfológiájú viharok ekvivalens áramrendszeréhez tartozik az Egyenlítő fölött a magnetoszférában kialakuló ún. gyűrűáram.

A Naptól érkező részecskeáramlásból a mágneses térbe történő energiabetáplálási folyamat az erővonal-összekapcsolódás. A napszél energiájának egy része (alig néhány százalék) a bolygóközi mágneses tér és a magnetoszféra erővonalainak összekapcsolódása révén részecskegyorsítással kerül be a magnetoszférába. Erővonal-összekapcsolódás csak akkor jöhet létre, ha a bolygóközi mágneses térnek van Dél felé mutató komponense. Ez az energiabetáplálás határozza meg a mágneses tér háborgatottságának mértékét, azaz az általános geomágneses aktivitást.

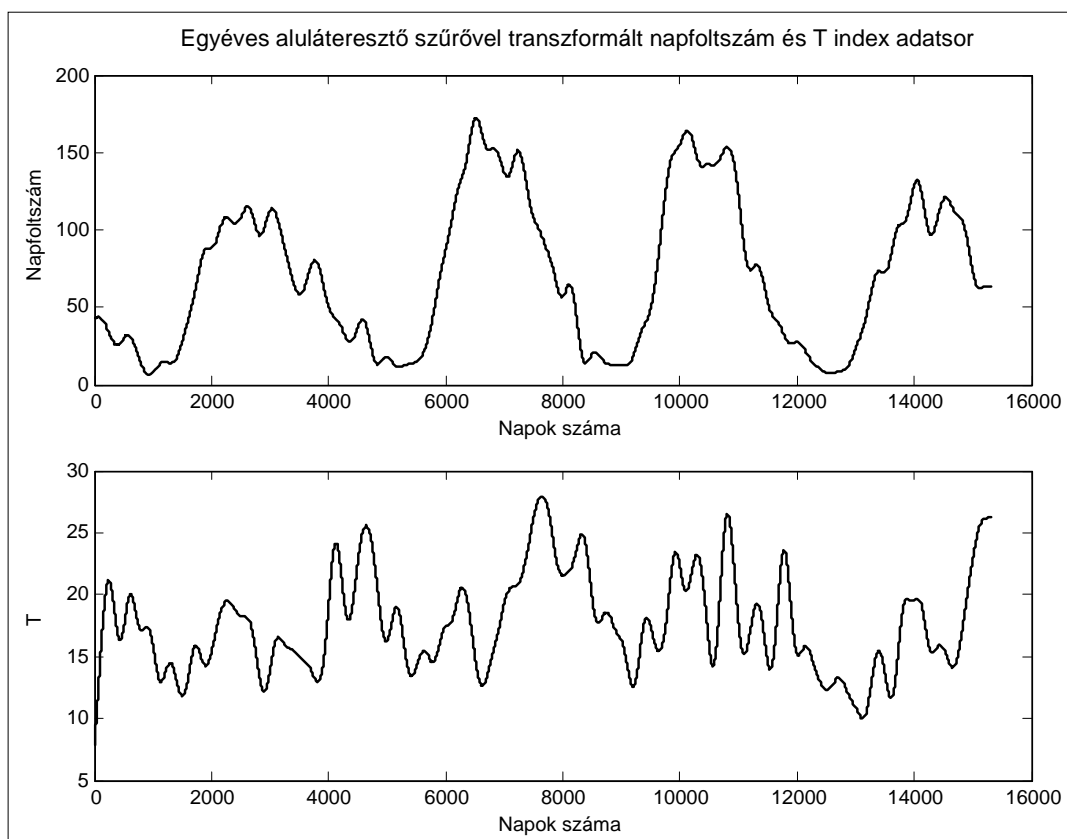
Ettől teljesen eltérő a pulzációk keletkezéséhez vezető energiabetáplálási folyamat. A geomágneses pulzációk meglehetősen széles spektrumú (1–0,001 Hz), ugyanakkor egymástól nagyon eltérő eredetű, többé-kevésbé szabályos, periodikus jelek. Szabályos szinuszos megjelenésük arra utal, hogy keletkezésük hátterében valamilyen rezonanciafolyamat áll. Közepes geomágneses szélességeken 20–30 s periódusú hullámok a leggyakoribbak. A változó amplitúdóval akár több órán keresztül is megfigyelhető folyamatos pulzációkat Pc-nek, az éjszaka jelentkező, 2–5 hullám alatt csillapodó, 1–150 s periódusú impulzív jeleket Pi-nek nevezzük.

A geomágneses tér változásait aktivitási indexekkel jellemezzük. Az aktivitási indexek közül a legismertebb az ún. K index (Bartels et al. 1939). Az MTA Széchenyi István Geofizikai Observatórium speciális aktivitási indexe a tellurikus regisztrátumból meghatározott T index. A geoelektromos vagy más néven tellurikus tér lényegében a geomágneses tér időderiváltja (Faraday-féle indukciós törvény alapján: $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$), ezért a T index a geomágneses indexekhez képest inkább a nagyobb frekvenciás változásokra érzékeny. Itt a nagyobb frekvencia alatt az ULF tartományba eső pulzációkat kell érteni.

A földi áramok nagy időbeli felbontású mérése 1957-ben kezdődött az observatóriumban. A T indexet egy 0-tól 9-ig terjedő skálán 3 órás intervallumokban a legnagyobb és legkisebb elektromos télerősség különbsége alapján számítjuk. A skála lineáris, a lépésköz 1,8 mV/km. A T index értékeit 1957-től egészen a 90-es évek elejéig analóg regisztrátum alapján határozták meg (a regisztrálás sebessége 25 mm/óra), jelenleg ennek az egyedülállóan hosszú regisztrátumnak a digitalizálása folyik.

A háromórás intervallum megfelelő időbeli felbontást biztosít a geomágneses jelenségek teljes körének vizsgálatához.

A naptevékenység jól meghatározott, átlagosan 11 éves periódusa jellemző a geomágneses tér és ezzel együtt a Föld plazmakörnyezete háborgatottságára is, de a geomágneses aktivitás szélsőértékei más források, valamint az energiacsatlás feltételeinek változása miatt jelentősen eltérhetnek a naptevékenység alapján várhatótól. A geomágneses indexek a geomágneses aktivitás többlépcsős növekedését jelzik az utolsó száz évben. Ezen belül is kiemelten aktív időszaknak bizonyult a jelenlegi napciklusban az elmúlt három-négy év. Történeti adatokból tudjuk, hogy a naptevékenység és vele együtt a geomágneses aktivitás nemcsak a napcikluson belül, hanem hosszabb időtávon vizsgálva is jelentősen változott.



2. ábra | 1 éves aluláteresztő szűrővel transzformált napfoltszám és T index adatsor az 1957–2008 időszakra
Figure 2 | Transformed sunspot number and T index data series for 1957–2008 time period, using one year low pass filter

A geomágneses aktivitás több jellegzetességére derült fény már eddig is az indexek spektrális és statisztikai analízise során (2. ábra). A napszél és a magnetoszféra kölcsönhatását jellemző geomágneses aktivitás követi a napciklust, de befolyásolja azt a Föld Nap körüli pályája és a Nap tengely körüli forgása is. A jól ismert – koronalyukak visszatéréséből adódó –, ~27 napos periódus mellett egy 13,5 napos periódus is megfigyelhető. Az éves periódus a Föld pályájának a Nap forgástengelyéhez viszonyított szögeltéréséből adódik. A geomágneses aktivitás 11 éves periódusa a naptevékenységi ciklussal korrelál, de az aktivitásban 3 csúcs jelenik meg. Ezek közül a legnagyobb a naptevékenységmaximumot követő 2-3. évben tapasztalható.

Az indukált áramok közelítő számítása

A gyakorlati magnetotellurikus (MT) kutatások során azzal a feltevéssel élünk, hogy a felszín elért EM hullámok (azaz a primer, ionoszférikus-magnetoszférikus eredetű ULF hullámok) síkhullámnak tekinthetők. Ez az egyszerűsítés abban az esetben fogadható el, ha a vizsgált térrész elég kicsi ahhoz, hogy a földfelszín görbületét elhanyagolhassuk, továbbá a primer források karakterisztikus mérete jóval meghaladja a vizsgált frekvenciatartományban adódó legnagyobb behatolási mélységet, illetőleg az azt jellemző ún. skinmélységet.

Egy tetszőleges féltér felszínén elektromos (**E**) és geomágneses (**H**) térerősségvektorok viszonyát a periódusfüggő, komplex impedanciatenzor (**Z**) írja le:

$$E_x(T) = Z_{xx}(T)H_x(T) + Z_{xy}(T)H_y(T), \quad (2)$$

$$E_y(T) = Z_{yx}(T)H_x(T) + Z_{yy}(T)H_y(T), \quad (3)$$

ahol T a periódusidő, Z_{ij} az impedanciatenzor komplex eleme.

Véges vezetőképességű homogén vagy a felszínnel párhuzamosan rétegzett féltér (1D szerkezet) esetén $Z_{xy} = -Z_{yx}$, $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, így:

$$E_x(T) = Z_{xy}(T)H_y(T), \quad (4)$$

$$E_y(T) = Z_{yx}(T)H_x(T). \quad (5)$$

A **Z** impedanciatenzor lényegében a közeg válaszfüggvénye, amely az alábbi összefüggésben van a homogén féltérben értelmezett ρ_a látszólagos fajlagos ellenállással:

$$\rho_{xy} = 0,2 T (E_x/H_y)^2 = 0,2 T |Z_{xy}|^2, \quad (6)$$

$$\mathbf{E} \text{ [mV/km], } \mathbf{H} \text{ [nT], } T \text{ [s],}$$

a fázis pedig:

$$\varphi = \tan^{-1}(\text{Im } Z_{xy} / \text{Re } Z_{xy}). \quad (7)$$

2D szerkezetek kutatására jól alkalmazhatók a geomágneses mélyszondázásokból kapott indukciós vektorok, amennyiben ugyanis a felszín alatt kitüntetett iránnyal egy áramvonal jön létre, annak a felszínen vertikális mágneses tere jelenik meg. Ilyenkor a feltételezett síkhullám horizontális mágneses komponensei részben a vertikális komponensbe transzformálódnak:

$$H_z(T) = X_{zx}(T)H_x(T) + X_{zy}(T)H_y(T). \quad (8)$$

X_{zx} és X_{zy} a periódusidőtől függő komplex mennyiségek, az ún. indukciós vektort pedig a

$$\mathbf{K} = (X_{zx}, X_{zy}) \quad (9)$$

összefüggéssel definiáljuk.

Amint ismert, két tetszőleges felszíni pont (A és B) közötti elektromos potenciálkülönbséget az alábbi vonalintegrál adja:

$$U = \int_A^B E(s)ds. \quad (10)$$

A két végpontjában földelt áramvezetőben (amely lehet, pl. egy csővezeték vagy egy nagyfeszültségű távvezeték elektromos modellje) a potenciálkülönbség hatására áram folyik. Numerikus számítások és hosszú obszervatóriumi tellurikus adatsorok azt mutatják, hogy nyugodt és közepes tevékenység esetén a felszíni elektromos tér nagyságrendje általában 10^{-3} – 10^{-2} V/km körül van. Az 1 V/km-t meghaladó amplitúdó nagy mágneses viharok során a sarkifény-régióban gyakori, de közepes geomágneses szélességeken nagyon ritka. Az 50 V/km amplitúdó a sarkifény-régióban is szélsőségesen nagynak tekinthető.

Az elektromos távvezetékek és az acélfalú csővezetékek jellemzően több száz km-es hosszával és 1 Ω körüli ellenállásával számolva a geomágneses indukció révén a vezetékben folyó indukált áram nagyobb viharok során a több száz A nagyságrendet is elérheti.

Csővezetékknél a földi áramok pedig csak ott tudnak a rendszerbe belépni, ahol a szigetelés megrongálódott, vagy mesterséges földelési helyek vannak, mint pl. szivattyúállomások esetében. A földelési helyeken – a váltakozó áramnak megfelelően – az áram hol a csővezetékbe a földbe, hol fordítva folyik, miközben az egyik félperiódusban a talajvízben disszociálódott H^+ - és OH^- ionokból és a csővezeték anyagából (Fe) az anódon $Fe(OH)_2$ és $Fe(OH)_3$ (közönséges rozsda) képződik. A korróziós folyamat jelentősége a frekvencia növekedésével csökken, egyenáramoknál a legnagyobb. Kritikussá akkor válik, ha a periódusidő elég nagy ahhoz, hogy a fémionok migráció révén az anódtól úgy eltávolodjanak, hogy az áramirány megfordulásakor (következő félperiódusban) oda nem jutnak vissza. Átlagos talajvízzel, mint elektrolittal számolva 1 A egyenáram egy év alatt mintegy 10 kg vasat képes a csővezeték falából a földbe szállítani.

Az ULF tartományba (10^{-4} Hz $< f < 10^{-1}$ Hz) eső indukált áramokat a villamosenergia-átvitelben alkalmazott 50–60 Hz-hez képest kvázi egyenáramoknak tekinthetjük. Az indukált áramok a háromfázisú transzformátorok földelési

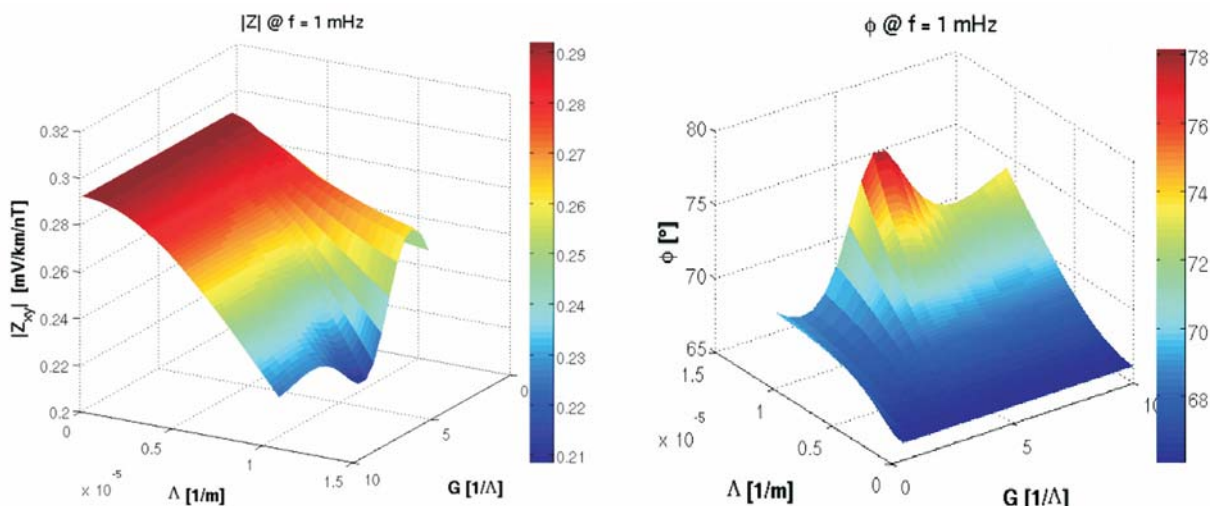
pontjain jutnak a rendszerbe és a transzformátorok részleges vagy teljes szaturációjához vezetnek. A részleges szaturáció miatt irányítástechnikai problémákat okozó felharmonikusok jelennek meg, szélsőséges esetben pedig a transzformátor túlfűtése annak teljes tönkremenetelét okozza. A felharmonikusok megjelenése elég gyakran megfigyelt jelenség, a transzformátorok leégése – mint pl. az 1989 évi kanadai eset – ritka, de rendkívül súlyos következményekkel járó esemény.

A magnetotellurikus 1D közelítés alapján végzett számítás kvalitatív becslést ad a geomágneses viharok által indukált áramok hatásának vizsgálatához, de a megfelelő műszaki védelem kialakításához, a tényleges veszélyhelyzetek előrejelzéséhez azonban egy komplex modellre van szükség. Az európai villamosenergia-hálózat magas integrált-ságú, sok pontban földelt rendszer, amely inkább hasonlít egy sűrű pókhálóra, mint lineáris áramvezetőre. Kiterjedése olyan nagy, hogy a Föld felszínének görbülete sem hanyagolható el. A geomágneses tér primer forrásainak sokfélesége (a sarkifény-elektrojtól a gyűrűáramig) elengedhetlenné teszi a primer források tényleges fizikai paramétereinek vizsgálatát. A magnetotellurikus tapasztalatok pedig azt mutatják, hogy az általaj elektromos paramétereinek horizontális és vertikális tagoltsága a helyi elektromos tereket olyan mértékben megváltoztatja, hogy számításokat csak az egész európai litoszféralemezre kiterjedő vezetőképesség modellen lehet végezni.

A geomágneses tér (ULF tartomány) primer forrásainak vizsgálata

A felszín alatti rétegekben kialakuló indukált áramok intenzitását és fázisát (azaz a mágneses változásokhoz viszonyított időbeli eltolódását) – adott elektromágneses (EM) forrás esetén – elsősorban a közegelemek fajlagos elektromos ellenállása és azok mélység szerinti eloszlása határozza meg. A magnetotellurikus módszer esetében a felszíni térváltozásokat síkhullámnak tekintjük, és a regisztrátumok feldolgozását, illetve a közegmodell számítását ennek megfelelően végezzük (Tikhonov 1950, Cagniard 1953). Köztudott azonban, hogy az említett egyszerűsítő feltevés nem tekinthető általános érvényűnek, hiszen az egyenlítő környékén és a sarkifény-régiókban az egyenlítői és a sarki elektrojetek felszíni mágneses terei közelítőleg sem írhatóak le síkhullámként.

Az ULF tartományban, a felszíni mágneses térváltozások elsődleges forrásai az ionoszférában kialakuló áramrendszerek. Általános ionoszférikus forrás áramterekre meghatároztuk a felszíni indukáló és indukált tér, valamint az indukáló és a tellurikus tér viszonyát a forrás geometriai sajátosságait leíró paraméterek függvényében. A legfontosabb geometriai jellegű forrás paraméterek a következők: a kiterjedés (azimutális és meridionális), valamint az áram iránya és az áramtér horizontális változását meghatározó ún. forráshullámhossz. Fizikailag realiztikus forrásparaméter-tartományokban numerikus számításokkal meghatá-



3. ábra A felszíni totális mágneses térváltozás és tellurikus variáció viszonyát reprezentáló impedancia függvény modulusának és fázisának függvénye a forrás jellemző hullámhosszának reciproka (Λ a forrás hullámszámát jelöli) és a forrás kiterjedésének (G) függvényében, 1 mHz-es frekvencián

Figure 3 The function of the modulus and phase of the impedance tensor function represents the relation of the subsurface total magnetic field and the telluric variation in function of the characteristic wavelength (Λ is the source wavenumber) and the extension (G) of the source at 1 mHz frequency

roztuk, hogy a felszíni mágneses és tellurikus változások viszonya hogyan változik rögzített felszín alatti fajlagos elektromos ellenállás-eloszlás mellett. A vizsgálat során a nagycentri obszervatórium környezetében érvényes, korábbi publikációkból ismert (Ádám 1970) közegmodellt használtuk fel. Legfontosabb eredményeinket a 3. ábrán foglaljuk össze. A bemeneti EM impedanciát mint a felszíni mágneses és tellurikus variációk viszonyát a forrásparaméterek függvényében megjelenítve a következő megállapításokat tehetjük:

- Nagy forráshullámhossz esetén – ez a kvázisíkhullám feltevésnek felel meg – a felszíni mágneses és tellurikus változások amplitúdójának viszonya a forrás kiterjedésétől gyakorlatilag független, míg fáziskülönbségük szempontjából a forrás mérete meghatározó.
- A forrás hullámhosszának csökkenésével (Λ növekedésével) mind az amplitúdók viszonya, mind a felszíni mágneses és elektromos terek változásának fáziskülönbsége monoton csökken.
- Megállapítható továbbá, hogy kis forráshullámhosszak (nagy Λ) esetén a forrás kiterjedése a térváltozások amplitúdójának arányát erősen befolyásolja.

A felszíni kváziszinuszos EM variációk ULF tartománybeli összetevőit eredményező ionoszférikus áramrendszerek, magnetoszférikus folyamatok révén alakulnak ki. E magnetohidrodinamikai jelenségek a magnetosféra és a napszél sokrétű energiacsatolásának eredményeként írhatók le, melyek a geomágneses erővonalak révén az ionoszférára vetülnek.

A Pc1–2 típusú pulzációk (periódus 1–15 s) mágneses erővonalak mentén terjedő – nem álló – MHD hullámok, ebben alapvetően különböznek hosszabb periódusú tár-

saiktól. A Pc3 típusú pulzációkon belül megkülönböztünk kompressziós és transzverzális eredetűeket. A kompressziós Pc3 hullám (15–45 s) az ún. upstream térségben lejátszódó hullám–részecske kölcsönhatás eredménye. A transzverzálisak keletkezésére kézenfekvő magyarázat az erővonal-rezonancia, ám gyakran mutatnak upstream sajátosságokat. Emiatt valószínűsíthető, hogy a két pulzációs módus esetenként ugyanannak az energiának két különböző úton való becsatolódása (Verő, Zieger 1994, Anderson 1994).

A tipikus Pc4 pulzáció (45–150 s) radiális irányban polarizált (poloidális) ULF hullám az egyenlítő szűk környezetében. Eredetüket tekintve valószínűleg 150 keV körüli protonok ún. ide-oda pattogó (bouncing) rezonanciája révén keletkeznek. Pc5-ös pulzációk (150–600 s) több különböző mechanizmus révén alakulhatnak ki: a magnetopauzán kialakuló ún. Kelvin–Helmholtz-instabilitás erővonalmenti becsatolódásaként, a magnetosféra mint üregrezonátor sajátrezgéseiként (Kivelson, Southwood 1986), vagy akár annak hullámvezető tulajdonságai révén (Walker 1998).

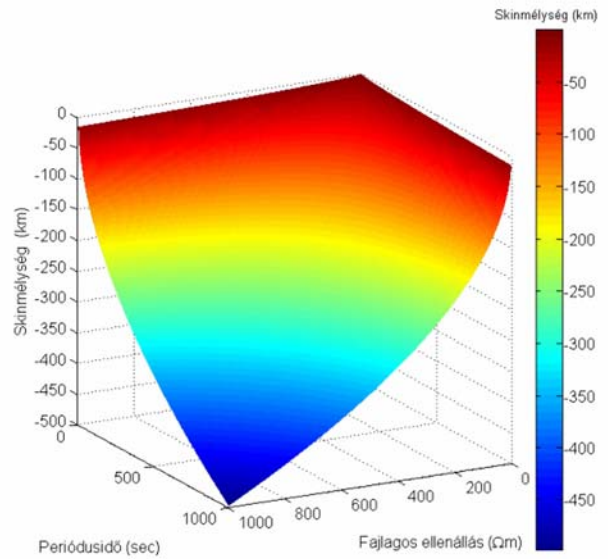
A pulzációk keletkezési mechanizmusairól, illetve azok napszélparaméterekkel és mágneses háborgatottsággal kimutatható kapcsolatáról McPherron (2005) adott részletes áttekintést.

Az említett MHD hullámforrások eredményeként terjedő perturbációk hatásai az erővonalak sajátos geometriája révén az ionoszférában áramokat keltenek, és kiterjedt – akár globális – áramrendszereket okoznak. Az indukciós vizsgálatok során az említett MHD folyamatok eredményeként kialakult ionoszférikus áramrendszerek mágneses térváltozásainak, illetve az általuk indukált tellurikus áramok tereinek eredőjét regisztráljuk.

Az európai litoszféralemez geoelektromos modellje – EURHOM (European RHO Model)

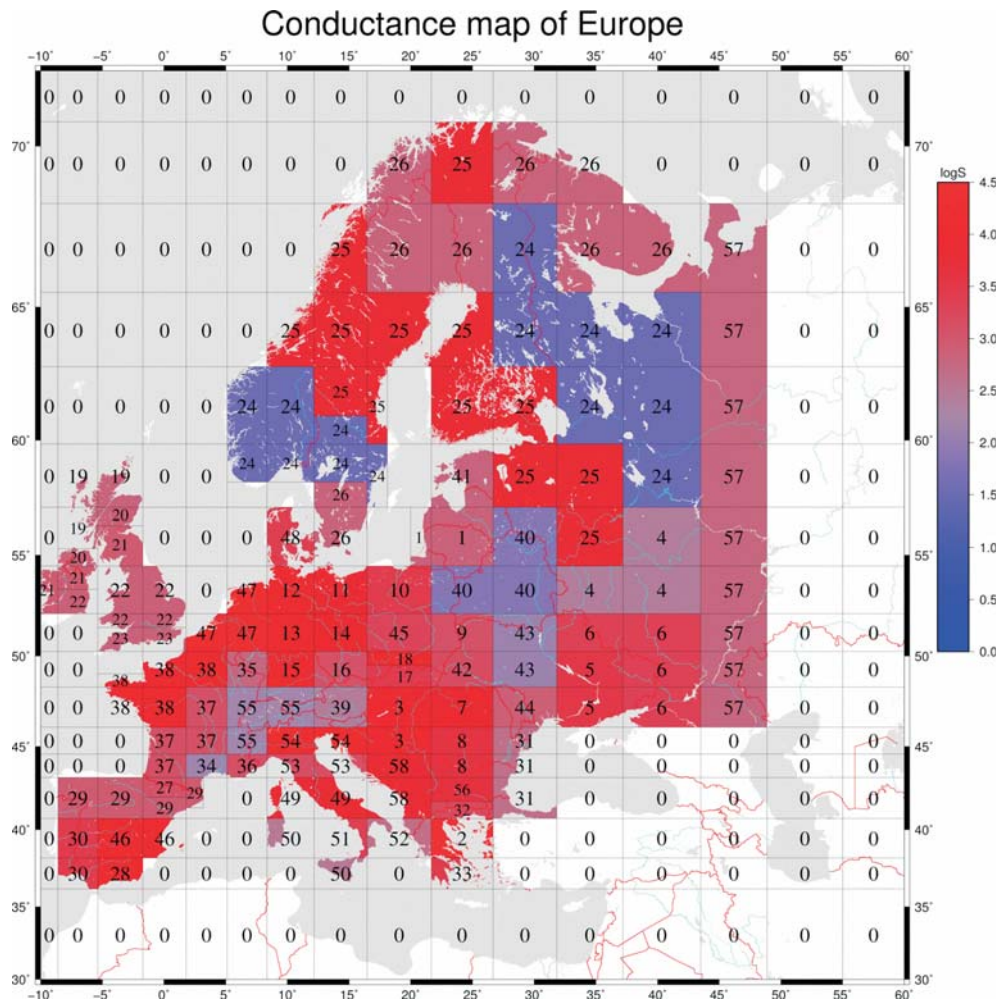
Az EURHOM lényegében egy olyan kvázi-háromdimenziós modell, amely különféle méretű cellákból épül fel, a cellákon belül pedig 1D struktúrát feltételez (Ádám et al. 2012).

A magnetotellurika alapösszefüggése szerint a helyi felszíni E -t a fajlagos elektromos ellenállás mélybeli eloszlása határozza meg. A kőzetek fajlagos elektromos ellenállása igen változó, azt leginkább a pórustérfogatot kitöltő elektrolit és a kőzet hőmérséklete határozza meg. A fajlagos elektromos ellenállás helyi változásai a potenciálkülönbség számításakor kiátlagolódnak, jelentős áramcsatornázást okoznak viszont a kétdimenziós (2D) felszín alatti elektromos vezetőképesség-inhomogenitások. A legjelentősebb jól vezető 2D vezetőképesség-anomáliák tektonikai zónákhoz kötődnek, de a modell horizontális felbontásának (grid) figyelemmel kell lennie a nagyobb hegyvonulatokra, kiterjedt üledékes medencékre, a domborzatra és természetesen a



4. ábra | Skinmélység (behatolási mélység) a periódusidő és a fajlagos elektromos ellenállás függvényében

Figure 4 | Skin-depth in function of the period and the apparent electrical resistivity



5. ábra | EURHOM – az európai litoszféralemez összegzett elektromos vezetőképessége (S-térképe) a felszíntől 160 km mélységig

Figure 5 | EURHOM – electric conductance [S] map of the European lithospheric plate for the upper 160 km

távvezeték-hálózat topológiájára is. A mélybeli vezetőképesség-anomáliák magnetotellurikus és geomágneses szondázásokból csak részben ismertek, ami további korlátot jelent a modell horizontális felbontására. A modell eltérő méretű celláit hosszúsági és szélességi körök választják el.

Arra vonatkozóan, hogy az egyes cellákon belül milyen mélységtartományt kell alkalmazni, támpontot ad az elektromágneses tér abszorpciójával (behatolási mélységgel) kapcsolatban álló skinmélység, amely annak a mélységnek felel meg, ahol az amplitúdó a felszíni érték e-ad részére csökken (4. ábra):

$$\delta = \sqrt{\rho T / \mu_0 \pi}, \quad (11)$$

ahol μ_0 a mágneses permeabilitás (közelítőleg $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am).

Az 50–200 km mélységtartományban változó litoszférasztenoszféra határfelületen a fajlagos ellenállás 1 Ω m-re vagy az alá csökken (Ádám, Wesztergom 2001). Az ULF tartományban ez olyan jelentős abszorpciót jelent, amely a nagyobb mélységben feltételezett elektromos ellenállás-változásokat a modellben érdektelenné teszi. A litoszférán belül legalább az üledéket és a kristályos aljzatot el kell választani, így az egyes cellákat minimum háromréteges, 1D-s szerkezet tölti ki.

Az EURHOM cellái is láthatók a modell alapján számított összegzett elektromos vezetőképesség-térképen (5. ábra). A modell digitális formában az alábbi helyről letölthető: <http://real.mtak.hu/2957>.

Köszönetnyilvánítás

A kutatások az Európai Közösség FP7-es keretprogram (FP7/2007-2013) 260330 számú projektje (EURISGIC) támogatásával valósultak meg.



A tanulmány szerzői

Ádám Antal, Kis Árpád, Lemperger István, Novák Attila, Prácsér Ernő, Szarka László, Wesztergom Viktor

Hivatkozások

- Ádám A., 1970: A földi elektromágneses tér szerepe a Föld belső szerkezetének kutatásában. MTA X. Osztályának Közleményei 4, 385–416
- Ádám A., Wesztergom V., 2001: An attempt to map the depth of the electrical asthenosphere by deep magnetotelluric measurements in the Pannonian Basin (Hungary). Acta Geol. Hung. 44, 167–192
- Ádám A., Prácsér E., Wesztergom V., 2012: Estimation of the electric resistivity distribution (EURHOM) in the European lithosphere in the frame of the EURISGIC WP2 project. Acta Geod., Geoph. Hung. 47/4, 377–387
- Anderson B. J., 1994: An overview of spacecraft observations of 10 s to 600 s period magnetic pulsations in the Earth's magnetosphere. AGU Monograph 81, 25–43
- Bartels J., Heck N. H., Johnston H. F., 1939: The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. Terrestrial magnetism and atmospheric electricity 44, 411–454
- Cagniard L., 1953: Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. Geophysics 18, 605–635
- Kivelson M. G., Southwood D. J., 1986: Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. JGR 91, 4345–4351
- McPherron R. L., 2005: Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity. Survey in Geophys. 26, 545–592
- Tikhonov A. N., 1950: Determination of electrical characteristics of the deep strata of the Earth's crust. Dokl. Akad. Nauk. USSR 73, 293–297
- Verő J., Zieger B., 1994: Upstream waves and field line resonances – pulsation research at the Nagycenk Observatory during three solar cycles. AGU Monograph 81, 55–66
- Walker A. D. M., 1998: Excitation of magnetohydrodynamic cavities in the magnetosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 60, 1279–1293