



SZÉKFOGLALÓ ELŐADÁSOK A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN

Szarka László Csaba

ELEKTROMÁGNESES GEOFIZIKA,  
FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNY



Telintetes 99972

...matta szabalyainak 32. §-a egy szel.  
...vallasbol tag, a kiret kivetei  
...kalyata katoro dolgorol felalvasasokat  
...melyes megvan jelenhetes eseten kireteli  
...felett egy ev alatt szel foglati; kireteli  
...melyes megvan mivoltan.

...kireteli szel, amelyeket kiret. videlen  
...kireteli a kireteli meglatan de kireteli  
...melyes a kireteli megvan kireteli szel.  
...melyes szel szabalyainak szel kireteli  
...melyes szel szabalyainak szel kireteli  
...melyes szel szabalyainak szel kireteli

...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel  
...szel szabalyainak szel, hogy szel

853

W Komany Lissoly  
Lissoly Lissoly  
Lissoly Lissoly

Jan 20 1864  
K. Komany Lissoly  
Lissoly Lissoly

Szarka László Csaba

ELEKTROMÁGNESES GEOFIZIKA,  
FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNY

**SZÉKFOGLALÓK  
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN**

**A 2013. május 6-án megválasztott  
akadémikusok székfoglalói**

Szarka László Csaba

ELEKTROMÁGNESES GEOFIZIKA,  
FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNY



Magyar Tudományos Akadémia • 2014

Az előadás elhangzott 2013. szeptember 17-én

Sorozatszerkesztő: Bertók Krisztina

Olvasószerkesztő: Laczkó Krisztina

Borító és tipográfia: Auri Grafika

ISSN 1419-8959

ISBN 978-963-508-706-8

© Szarka László Csaba

Kiadja a Magyar Tudományos Akadémia  
Kiadásért felel: Palinkás József, az MTA elnöke  
Felelős szerkesztő: Kündert Judit  
Nyomdai munkálatok: Kódex Könyvnyomató Kft.

## ÖSSZEFOGLALÓ

Az elektromágneses geofizika a földtani megismerés egyik nélkülözhetetlen eszköze, amely a felszín közeli térségtől néhány száz kilométeres mélységtartományig képes egyedi információt adni az elektromágneses közetjellemzők térbeli eloszlásáról. Az előző e tárgyban eddig elért legfontosabb saját eredményeiről a *Magyar Tudomány* 2013. augusztusi számában az új tagokról szóló sorozat keretében készült beszélgetésben a következők olvashatók: „Az elektromágneses geofizikában elért, leginkább hivatkozott eredményeim szinte mind rendszerező jellegűek, és a felismerések is többnyire – matematikai-fizikai indítatású – rendszerezéshől születtek. [...] A hetvenes évek végén és a nyolcvanas évek elején analóg modellkísérletekkel teljes képet igyekeztem adni az elektromágneses geofizikai anomáliákról. [...] A nyolcvanas években úttörő jellegű eredménynek számított a mesterséges eredetű elektromágneses zaj jellegzetességeinek kimutatása és geofizikai felhasználása. [...] A kilencvenes évek végén rendszerbe foglaltam a természetes elektromágneses térváltozásokat hasznosító geofizikai módszer, a magnetotellurika alapvető értelmezési paraméterének (az ún. impedanciatenzornak) invariánsait. Ez az eredmény megnyitotta az utat az információtartalom-vesztés nélküli elektromágneses leképezés felé. Nyilvánvalóan rendszerező jellegű a valaha leírt (egyszáznál több, a világban kifejlesztett) geoelektromos elrendezések – a kémiai elemek Mengyelejev-táblájára emlékeztető – osztályozása is.” Ezeket és a további felfedező jellegű elektromágneses geofizikai eredményeket az előadás a laikus érdeklődők számára is érthetően mutatja be, középpontba állítva a tudományos megismerés korlátait. Emellett, egyetemi

oktatási, valamint tudományos közéleti tapasztalatokra támaszkodva, az előadó vázlatos áttekintést nyújt a globális környezet alapvető kérdéseiről. Amíg az egyes szakterületeken (mint például az elektromágneses geofizikában) alapkövetelmény az ok-okozati összefüggések szigorú keresése, a falszifikálhatóság (cáfolhatóság), valamint a kezdeti és peremfeltételek korrekt számbavétele, addig az emberiség egyik nagy sorskérdését, a „fenntarthatóság” kilátásait megválaszolni igyekvő globális környezettudomány véleményformálói sokkal kevésbé következetesek. Erősebben kellene munkálkodni a konkrét ok-okozati összefüggések feltárásán, jobban figyelembe kellene venni a kezdeti és peremfeltételeket. Világosan kell láttatni például, hogy a globális növekedés számára a Föld véges adottságai áthághatatlan korlátot jelentenek. A legfontosabb környezeti tényezők (az energia és a nyersanyagok, az édesvíz, a talaj, a levegő) nagyrészt földtudományi vonatkozásúak. Ezért elsősorban a földtudománytól várható el, hogy elvégezze – globálisan és hazai szinten is – a természeti kincsek (az erőforrások és a környezet) újraértékelését, reálisan feltárja a lehetőségeket, azaz igyekezzék józanul gondolkodni.

## BEVEZETŐ

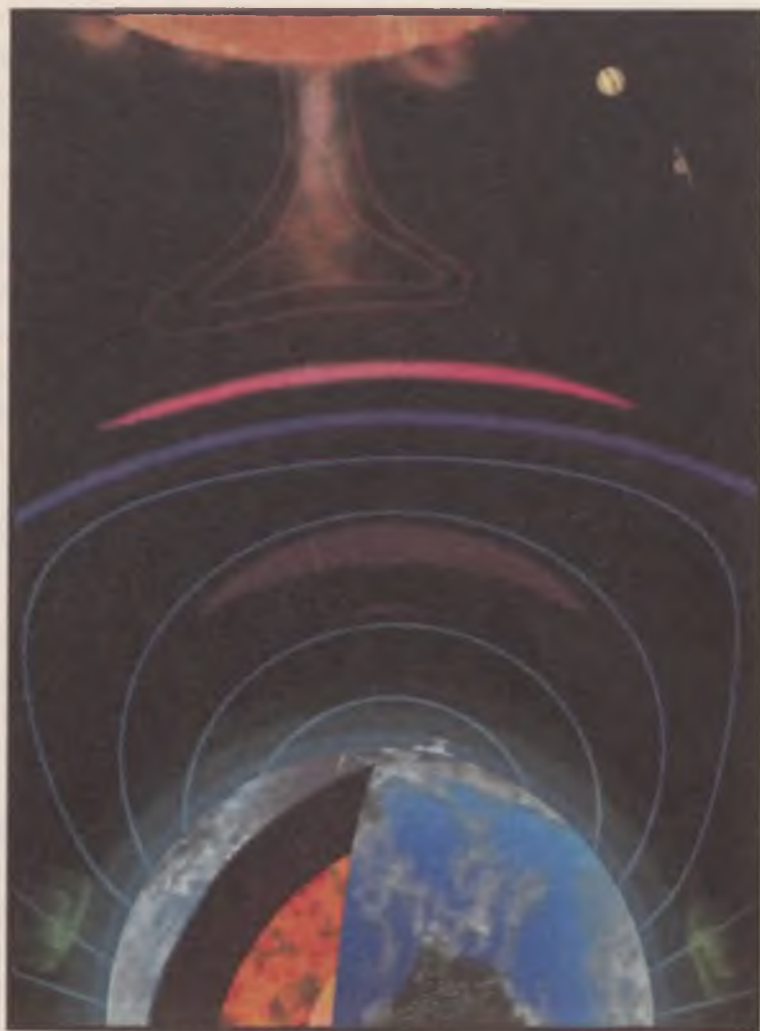
Akadémiai székfoglaló előadást tartani életében egyszer (legfeljebb kétszer) adatik meg az arra érdemesek közül megválasztottak. Az időpont közeledtével – miközben az ember hálát ad mindazért, amit idáig elért – egyre nő a kétsége, hogy a nagyon sokféle érdeklődésű hallgatóságnak sikerül-e megfelelően bemutatnia tudományágának, szakterületének szépségeit és az elért eredményeket. A helyzetet az én esetemben némileg bonyolítja, hogy szeretem magam időnként szűk területen mélyre ásni, ugyanakkor mindig foglalkoztattak a tudományos kutatás alapkérdései is. Ezért a székfoglaló előadás nemcsak az elektromágneses geofizika – sokak számára egzotikusnak tűnő – jelenségeiről szól, hanem olyan föld- és környezettudományi kérdésekről is, amelyek mindenkit testközelből érintenek. Az előadásomban is e kettős érdeklődés és szándék tükröződik.



# I. ELEKTROMÁGNESES GEOFIZIKA

Több mint negyven évvel ezelőtt a Középiskolai Matematikai Lapok fizika rovatában megjelent egy feladatmegoldáson, amelyben egy földmágneses térben forgó fémszerkezetben keletkező elektromágneses indukciót számítottam ki (1973, 46. kötet 1. szám, 42–43; 1063. számú feladat). Sem a beküldéskor (amikor még a nyíregyházi Krúdy Gyula Gimnázium matematika–fizika tagozatos osztályába jártam), sem a megjelenéskor (amikor már miskolci geofizikusmérnök-hallgató voltam) nem sejtettem, hogy ez a feladatmegoldás pályafutásom nyitánya lesz. Négy évtizede azt sem tudtam még, mi az az elektromágneses geofizika. Pályaválasztásom sajátos kortűnet volt, amelyen belül egyetemválasztásomat kökemény gyakorlati szempontok vezérelték.

A hetvenes években a nemzetközi tudományos közösség sem ismerte még fel, hogy a Föld közepétől a Napig terjedő jelenségkörök milyen szorosan kapcsolódnak egymáshoz. Ebből geofizikának az úgynevezett magnetopauzáig (a Naptól származó és földi eredetű plazmák elválasztó határfelületéig) terjedő térség vizsgálatát nevezhetjük, hiszen a – Nap felőli oldalon kb. 10 faldugárnyi magasságban pulzáló – magnetopauza jelenti a Föld (elektro)mágneses határfelületét. Az Akadémia soproni geofizikai kutatólaboratóriuma, majd geodéziai-geofizikai intézete (amely most az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont része) e térséget lényegében a nemzetközi geofizikai évtől (1957–58) kezdődően kutatja (pl. Verő 1996). Az öt napciklusra visszatekintő idősorok egyre értékesebbek. Az én szakterületem kifejezetten a Föld belseje néhány decimétertől néhány száz kilométerig terjedő térrészének elektromágneses kutatása. A bolygónk sugarának egytizedét sem kitevő burkának (a kéregnek és a felsőköpenynek) megismerése érdekében nem csupán erdőn-mezőn végeznek méréseket, hanem minden elérhető helyen: fúrólukban, hajón, tengerfenéken, lánnyáiban, sőt műholdon, repülőgépen, helikopteren és legújabbban drónok bevetésével is.



1. ábra. A Föld (belső mag, külső mag, kőpeny, kéreg, ionoszféra, magszféra), a Föld határát jelölő magnetopauza, a napfény, a Nap, továbbá a Naprendszer egyéb égitestjei a Nemzetközi Geomágneses és Aerionómiai Egyesület (IAGA) ismeretterjesztő anyagán (IAGA 2013)

Be kell vallani: a Föld belsejének vonatkozásában az elektromágneses geofizika elsődleges hajtóereje nem a pusztán kutatói kíváncsiság, hanem az energiahordozó- és ásványianyag-kincs felkutatása volt. (A gravitációs „Eötvös-inga” – valójában Eötvös-mérleg – karrierje kifejezetten a szénhidrogén-kutatáshoz kötődött.) Az elektromágneses geofizika felhasználói körébe tartozik még a környezetkutatás és -ipar, a magas- és mélyépítés, a nagyüzemi mezőgazdaság, továbbá a régészet, sőt még az igazságügy is, hogy a katonai alkalmazásokról (pl. az aknakeresésről) ne is beszéljünk. A geofizika – bármely léptékről legyen is szó – a felszín alatti térség *in situ* és roncsolásmentes megismerését teszi lehetővé. Az úgynevezett „szilárd” földet kutató elektromágneses geofizika a geológia nélkülözhetetlen, „környezetbarát” eszköze.

Az elektromágneses geofizikai tudományos kutatás („research”) egyrészt az ismeretszerzés lehetőségeinek és korlátainak a megismerését (ennek keretében az eszközök tökéletesítését) jelenti a terepi kutatás („exploration”) számára, másrészt a belátható időn belül közvetlenül nem hozzáférhető mélységek megismerése is „research” (azaz tudományos kutatás), hiszen azt valóban a tudományos kíváncsiság mozgatja.

Az elektromágneses geofizikai kutatáshoz (főleg az „exploration”-hoz) többnyire különféle mesterséges térgerjesztő források szükségesek. A nagy (fúrásokkal sem elérhető) mélységek kutatása azonban aránytalanul nagyméretű mesterséges forrásteret igényelne. Hatalmas területen kellene erősáramú kábeleket fektetni és energiát táplálni a földbe. Az elektromágneses mélyszerkezet-kutatás számára szerencsére „rendelkezésre áll” egy óriási kiterjedésű természetes térforrás: annak a jelenségnek a mindennapos megnyilvánulása, amely a Föld felszínén a napszél hatására (lásd *1. ábra*) geomágneses viharokat is képes okozni. Ezt az elektromágneses geofizikai módszert – amelynek kidolgozásában magyar kutatók kezdetől fogva meghatározó szerepet töltek be (Kántás 1956, Takács 1971, Kunetz 1972, Ádám 1992) – magnetotellurikának nevezik.

Az elektromágneses geofizika alapösszefüggéseit az általános elektrodinamika rendkívül egyszerű egyenletei jelentik. (Simonyi Károly tankönyve – Simonyi 1967 – e vonatkozásban még ma is a világ egyik legjobbjának számít.) Ezek a négy úgynevezett Maxwell-egyenlet (amelyből kettő skaláris, kettő vektoriális egyenlet), az elektromos töltés megmaradását kifejező egyenlet, továbbá a három anyagi tulajdonságra: a  $\sigma$  elektromos fajlagos vezetőképességre, a  $\mu$  mágneses permeabilitásra, valamint az  $\epsilon$  dielektrikus permittivitásra vonatkozó anyagi egyenletek. Ezeknek az anyagi tulajdonságoknak a felszín alatti eloszlását szeretnénk meghatározni. Amennyiben az elektromos fajlagos vezetőképesség, a mágneses permeabilitás és a dielektrikus permittivitás izotróp (azaz értékük csak a térkoordinátáktól függ, az iránytól nem), akkor az anyagi összefüggés mindhárom térjellemzőre egy-egy skaláris egyenletet jelent. Amennyiben azonban a térjellemzők anizotrópok, és az anizotrópia iránya helyfüggő is, akkor az összefüggések (és az ismeretlenek) száma szinte kezelhetetlenül nagy. És akkor még a közegjellemzők időbeli változásáról nem is szoltunk. A földtani közeg meglehetősen bonyolult, és ennek a geofizikában döntő jelentősége van. Már a kezdet kezdetén érdemes ésszerű egyszerűsítést tenni a geológiai környezetre vonatkozóan, de ennek az egyszerűsítésnek kockázatai vannak.

$$\begin{array}{lll}
 \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} & \operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \delta}{\partial t} = 0 & \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\
 \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 & & \operatorname{div} \mathbf{D} = \delta \\
 \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} & \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} & \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}
 \end{array}$$

2. ábra Az általános elektrodinamika meghatározó alapegyenletei

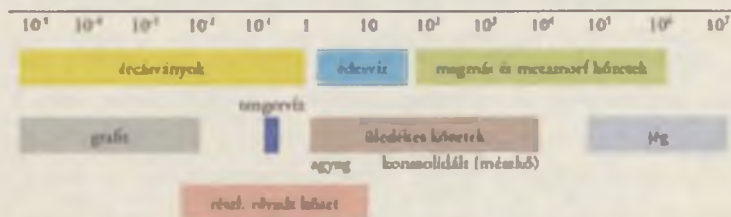
Bal oldalon: Maxwell I. és III. egyenlete, valamint a  $\mu$  mágneses permeabilitásra vonatkozó anyagi egyenlet ( $\mathbf{H}$ : mágneses térerősség,  $\mathbf{B}$ : mágneses indukcióvektor,  $\mathbf{j}$ : térbeli elektromos áramsűrűség,  $\mathbf{D}$ : dielektrikus elmozdításvektor). Középen: az elektromos töltésmegmaradás egyenlete és a  $\sigma$  elektromos fajlagos vezetőképességre vonatkozó anyagi egyenlet, az elektromos töltés sűrűségét a  $\mathbf{B}$  mágneses indukcióvektorral jellemzett térben  $\delta$ -nak feleltetve ( $\delta$ : térbeli elektromos töltéssűrűség,  $\mathbf{E}$ : elektromos térerősség). Jobb oldalon: Maxwell II. és IV. egyenlete, valamint az  $\epsilon$  dielektrikus permittivitásra vonatkozó anyagi egyenlet

Az elektromágneses tér gyors időbeli változása esetén (amennyiben a  $j$  vezetési áram elhanyagolható a  $\partial D/\partial t$  úgynevezett eltolási áram mellett) elektromágneses hullámokról beszélünk. Amennyiben az eltolási áram elhanyagolható a vezetési áram mellett, kvázistacionárius terekkel állunk szemben. Ha maga az időbeli változás ( $\partial/\partial t$ ) is elhanyagolható, a tér stacionárius lesz. Végül, amennyiben áram sem folyik, két egymástól független statikus tér (magnetosztatikus és elektrosztatikus tér) áll elő. A geofizikában az elektromágneses tér nukleáris kölcsönhatásai (pl. mágneses magrezonancia, indukált polarizáció) is hasznosíthatók. E jelenségeket további egyenletek írják le.

A földfelszín fölött elektromágneses hullámként tekinthető térváltozások a geofizikai kutatás mélységtartományában – a közeg miatt, azaz a közetekre jellemző elektromos fajlagos vezetőképesség-értékek következtében – kvázistacionárius jellegű térváltozásként kezelhetők. Ezek az összefüggések diffúziós egyenletté alakíthatók.

Az elektromágneses geofizikai kutatás célja legtöbbször az, hogy az elektromos fajlagos ellenállás lehetséges térbeli eloszlását meghatározva, a Föld belsejéről minél inkább részletekbe menően és minél nagyobb megbízhatósággal adjon információt. Meg kell tudni húzni ugyanakkor az elvi határvonalat: mi az, amit

Földi anyagok  $\rho$  fajlagos elektromos ellenállása ( $\Omega m$ )



$$\rho = 1/\sigma \quad (\sigma: \text{fajlagos elektromos vezetőképesség})$$

3. ábra. Különböző földtani anyagok elektromos fajlagos ellenállás-intervalluma (A  $\rho$  elektromos fajlagos ellenállás a  $\sigma$  elektromos fajlagos vezetőképesség reciproka mennyisége)

geofizikai módszereinkkel a felszínről elvileg ki lehet mutatni, és mi az, amit nem. (És erkölcsi kötelesség megszólalni akkor, ha valaki elvi lehetetlenséget állít: legyen szó akár tudományos nagyotmondásról, akár közönséges üzleti érdekről.)

A földi anyagok elektromos fajlagos ellenállása – az ércektől a jégig – a természetben több mint tíz nagyságrendet fog át (3. ábra). Mintegy egymilliárd-szor többet, mint a jellemző közetsűrűségek intervallumának nagyságrendje. E fizikai tulajdonság rendkívül kedvező, és lényegében ezen alapszik az elektromágneses geofizika hatékonysága. A kőzetek elektromos fajlagos ellenállásának befolyása, hatása azonban gyökeresen más, bonyolultabb mechanizmusokon keresztül nyilvánul meg, mint a sűrűségé.

Amint a 4. ábrán látjuk, a földfelszíni gravitációs térerősséget, a mágnesezett kőzetek mágneses terét, valamint az elektromágneses (mágneses és az elektromos) teret teljesen hasonló térfogati integrálok skalár-vektor vagy vektorvektor függvényei írják le. A nehézségi erőteret a kőzetek sűrűségének térfogati integrálja, a statikus mágneses teret a kőzetek térfogati mágnesezettségének térfogati integrálja (mindkettőjük skalár-vektor függvénye) adja. Az elektromágneses geofizikában (stacionárius és kvázistacionárius terek esetén) a mágneses térerősség ugyanolyan térfogati integrállal (annak vektor-vektor függvényével) kapható meg, mint a nehézségi erőteret vagy a geomágneses tér, az elektromos tér pedig két hasonló integrál skalár-vektor függvényének összegével áll elő.

A hasonlóságok mellett azonban felfedezhetünk egy jelentős különbséget is: a gravitációban és a geomágnességben a kulcsparaméter maga a kőzetjellemző, az elektromágneses geofizikában viszont a kőzetjellemzők helyett elektromos töltések (térbeli és felületi elektromos töltéssűrűség) és áramok (térbeli elektromos áramsűrűség) szerepelnek. Az elektromos áramsűrűséget és az elektromos töltéssűrűséget egyrészt a különféle kőzettestek felszín alatti geometriai viszonyai (azaz az anyagi tulajdonságok térbeli eloszlása), másrészt az elektromágneses térgerjesztés módja együttesen alakítják ki. A térgerjesztés

r: távolság, V: térfogat, A: felület

## Gravitációs és geomágneses anomáliák

Gravitációs tér: 
$$g = -\gamma \text{ grad } \left[ \int_V (d/r) dV \right]$$
$$\gamma: \text{gravitációs állandó, } d: \text{közetsűrűség}$$

Mágn. tér (dipól): 
$$H_m = -(\mu_0/4\pi) \text{ grad } \left[ \int_V M \text{ grad } (1/r) dV \right]$$
$$\mu_0: \text{a vákuum mágneses permeabilitása, } M: \text{közettárgyszélesség}$$

## Elektromágneses anomáliák

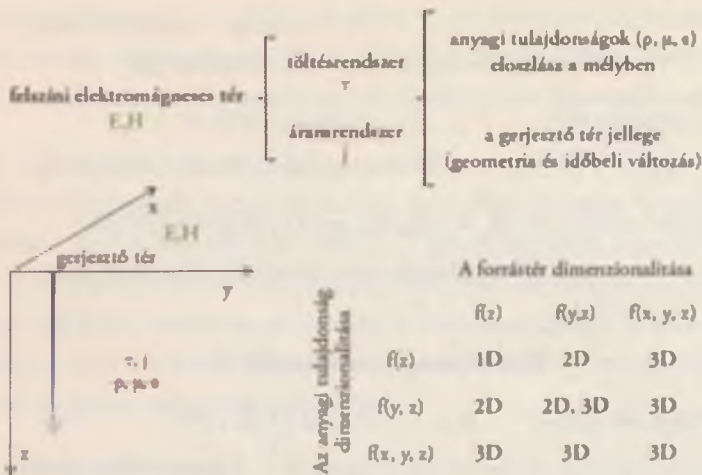
Mágn. tér (áram): 
$$H_e = -(1/4\pi) \text{ rot } \left[ \int_V (j/r) dV \right]$$
$$j: \text{térbeli áramsűrűség}$$

Elektromos tér: 
$$E = -(1/4\pi\epsilon_0) \text{ grad } \left[ \int_V (\delta/r) dV + \int_A (\tau/r) dA \right]$$
$$\epsilon_0: \text{a vákuum dielektromos permittivitása, } \delta: \text{tértöltéssűrűség, } \tau: \text{közethatár-felületi töltéssűrűség}$$

4. ábra. A gravitációs tér, a geomágneses tér és az elektromágneses (elektromos és mágneses) tér hasonló szerkezete. A gravitációs és geomágneses anomáliákat közzetulajdonosságok, az elektromágneses anomáliákat töltések és áramok (azaz a közzetulajdonosságok és a források együttesen) alakítják ki

határozza meg ugyanis, hogy milyen mélyen és a közzettestek mely határfelületein keletkeznek elektromos töltések, és alapvetően a térgerjesztés jelöli ki az áramok irányát is. Az elektromos térerősség esetében hangsúlyozandó, hogy a meghatározó szerepet általában nem a térfogati, hanem a közzetek határoló felületein keletkező úgynevezett határfelületi töltések ( $\tau$ ) játsszák. Szerepük a színházi cselészövökhöz („the villain of the piece”: Price 1973) hasonló: a háttérből – szinte észrevétlenül – eldöntik a „cselekmény” alakulását.

A leegyszerűsítés szükségességéről már volt szó. Az elektromágneses geofizikában egydimenziós (1D), kétdimenziós (2D) és háromdimenziós (3D) modellekről szokás beszélni. 1D esetben a modellfüggvény csak a mélységtől,

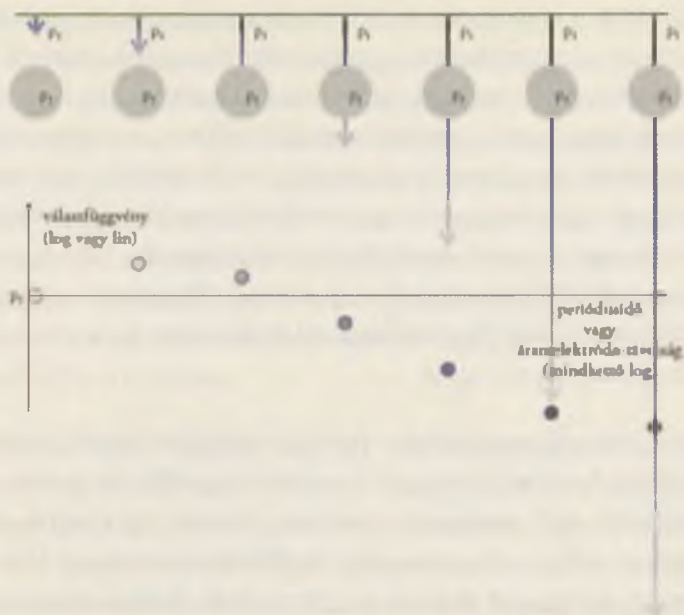


5. ábra. Az anyagi tulajdonságok és a gerjesztő térforrások együttesen határozzák meg a felszín alatti elektromos töltés- és árameloszlást

2D esetben a mélységtől és az egyik vízszintes koordinátától függ, 3D esetben pedig mindhárom ( $x$ ,  $y$  és  $z$ ) koordinátától. A figyelembe veendő modellfüggvény a töltés- és árameloszlás függvénye. Ahhoz, hogy ez 1D jellegű legyen, a fajlagos ellenállásmodell 1D jellege mellett a forrásmodellnek is egydimenziósnak kell lennie. Ennek az egyszerű megfontolásnak az alapján kijelenthető, hogy a legtöbb elektromágneses geofizikai probléma 3D jellegű. Az 1D modell üledékes kőzetek és nagyon speciális források esetén (pl. magnetotellurikában, illetve távoli pontelektródák felezőtávolsága környékén), a 2D – korlátozottan – geológiai vetők környezetében és szintén speciális források esetén alkalmazható.

Az elektromágneses térrel átjárt közeg mélységi kiterjedése a gerjesztő térforrás méretének (pl. a tápelektrodák távolságának) a változtatásával szabályozható. Ezen az egyszerű elven működik az összes egyenáramú szondázás. Időben (általában harmonikusan) változó elektromágneses forrástér esetén a mélységi kiterjedés a frekvencia (a periódusidő reciproka) által befolyásolható úgynevezett skinhatástól függ.





6. ábra. A mélységtengely menti változások kimutatásának célja (a „szuszpenzió”) egy  $\rho_e$  elektronos fajlagos ellenállású közegben lévő  $\rho < \rho_e$  fajlagos ellenállású test fölött. Képzeti (vagy elektromágneses indukció esetén „túlterhelt”) intervallumnak nagyjából a bal oldali (világos) három porz tartományát nevezzük, normál intervallumnak pedig a jobb oldali három sötét porz tartományát

Képzeljünk a felszín alatt egy hatótestet. Ha a forrástér mélységi kiterjedése kicsi (vagy azért, mert például az áramot betápláló elektródák túl közel vannak egymáshoz, vagy azért, mert nagyon rövid a periódusidő, azaz nagyon nagy a tér frekvenciája), akkor az elektromágneses tér – a mélységgel rohamosan csillapodva – már a kutatott szerkezet fölötti térségben lényegében elhal. Hiába fog át tehát az elektromos fajlagos ellenállás 8–10 nagyságrendet a különböző közetekben: ahol nem folyik elektromos áram, illetve az elektromos tér nem kelt határfelületi töltéseket, azok a közettömegek „láthatatlanok” maradnak. Ha pedig a kutatási mélységhez képest nagyon nagy a forrástér mélységi

kiterjedése (azaz a tápelektroda-távolsághoz képest a kutatandó szerkezet kis mélységben van, vagy túl hosszú a periódusidő), akkor a kutatandó test olyan „felszínközeli” torzító hatásként fog jelentkezni, amilyent akár egy rozsdás patkószőg is képes okozni a mérőelektrodák közelében. Az elektromágneses szundázási görbék (látszólagos fajlagos ellenállás- és fázisgörbék) a szerkezet válaszfüggvényét a látszólagos mélység (tápelektroda-távolság vagy periódusidő) kellően széles spektrumában mutatják meg. Megjegyzendő, hogy a gerjesztő tér be- vagy inkább kikapcsolását követő tranziens folyamatok megfigyelésén keresztül is lehet mélységfüggő információhoz jutni; erre Kunetz Géza adott eredeti megoldást (Kunetz 1972).

Az elektromágneses geofizika elméleti háttérének megvilágítását követően néhány konkrét eredményt ismertetek. A publikációs listában minden jelentősebb saját tanulmányt felsorolok, összesen 9 témakör szerint csoportosítva. [AM 1–12] a 12 analóg modellezési tanulmányt, [IM 1–19] a 19 impedanciatenzorral kapcsolatos cikket jelöli. Ezekből mutatok egy-egy példát. Az [EM 1–7] az általános elektromágneses geofizikai cikkeket, [RG 1–2] a régészeti geofizikaiakat, [MK 1–2] a Mars-kutatással foglalkozókat, [TK 1–10] a terepi kutatási jellegűeket jelenti, amelyeket az előadásban nem tárgyalok. Az EZ [1–6] (elektromágneses zajjal kapcsolatos) és az FN [1–4] (a fanedváramlást *in vivo* kimutató) dolgozatok egy-egy itt bemutatott eredménye pedig már átmenetet jelent a környezettudomány felé.

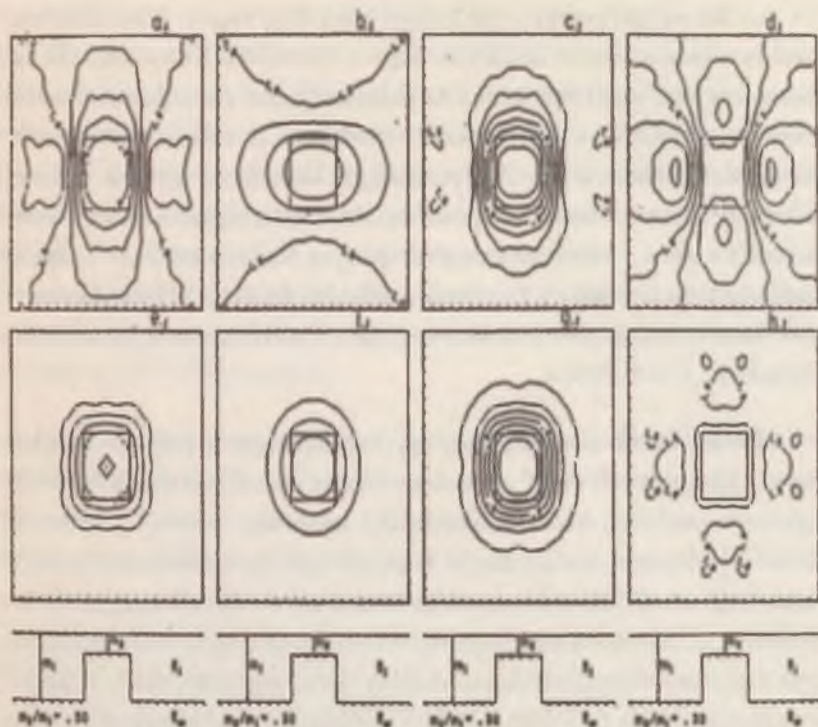
## 1.1. Elektromágneses analóg modellezés [AM 1–12]

A modellezés során a számunkra ismert vagy feltételezett elemeket – hipotézisünknek megfelelően – hozzuk kapcsolatba egymással. Amennyiben a modell viselkedése összhangban van a közvetlen tapasztalatokkal, akkor azt mondhatjuk, hogy a modell használható. Matematikai (numerikus) modellezés során számításokat, fizikai (analóg) modellezés során (modell)kísérleteket végzünk.

A valós (terepi) probléma kicsinyített modelljein végzett fizikai kísérletezéssel 1977-ben, a soproni MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetbe kerülésemtől kezdtem el foglalkozni. Az elektromágneses geofizikában akkortájt kezdődött „nyugaton” a 2D-s numerikus modellezés, de ebbe – eszköz (megfelelő számítógép) hiányában – Magyarországról közvetlenül nem volt érdemes, de érdemben nem is lehetett bekapcsolódni. Az elektromágneses analóg modellezésnek viszont – a bauxit- és a szénhidrogénipar finanszírozásával – a soproni akadémiai kutatóintézetben létrejöttek a műszeres feltételei. Ebbe a laboratóriumba kerülve számos 3D-s kísérletet végeztem. Ezekből mutatok be két példát a következő, 7. és 8. ábrákon.

Hamar sikerült tisztázni, hogy egy háromdimenziós (minden irányban véges, a környezetétől eltérő elektromos fajlagos ellenállású) eltemetett völgy vagy hegy („sashérc”) felszíni geoelektromos anomáliája – távoli tápelektrodák terében – elektromos dipólus jellegű. E képzeletbeli dipól töltéspárját az elektromos áram be- és kilépési határfelületén az áram hatására keletkező felületi töltések (a „cselszövők”) összessége jelenti. Ha a test rosszul vezeti az áramot (azaz elektromos fajlagos ellenállása a környezeténél nagyobb), akkor a belépési és a távozási oldalon úgy alakul a töltések előjele, hogy az áramló elektromos töltések nagy részét (tökéletes szigetelő anyag esetén: egészét) eltaszítják, és a hatótest kikerülésére kényszerítik. Ha a test a környezeténél jobb áramvezető, akkor a határfelületi töltések az áramló töltéseket a hatótest belsejébe vonzzák. (Jóval később mi magunk is meglepődtünk azon, hogy az analóg modellezési tapasztalathól levont, analitikus úton számított, elektromos dipóljelleg mennyire jól leírta egy 3D-s numerikus modellezés eredményét [EG 4].)

A 7. ábra azt is mutatja, mekkora jelentősége van annak, hogy az anomáliakép kizárólag a mélybeli szerkezetet tükrözze, és ne függjön a mérés irányától. Az irányfüggetlen leképezést több, egymástól eltérő árambetáplálási iránnyal lehet megvalósítani. Az egyenáramú elektromos kép – a töltések hatását kife-



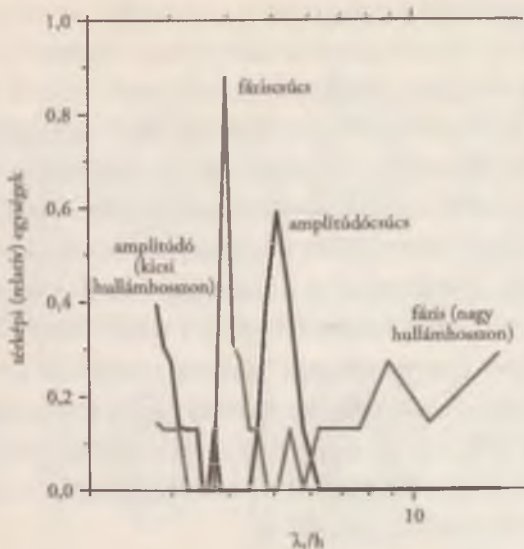
7. ábra. Analóg modellezés: felszíni geoelektromos és mágneses anomáliák egy cheketeti sávból fölött egy a (vízszintes) irányú áramelektroda-pár tereben (felső sor: a, b, c, d); illetve két elektroda-párból számított invariánsok (alsó sor: e, f, g, h):  $E_x/H_x, Z_{xy} = E_y/H_x, P_{xy} = E_x H_y$ . Az ábra a nagy frekvencia ellenálló, téglatest alakú kisméretű felülvezeti és keresztmetszeti képét is mutatja [AM 7]

jezve – szinte tapad a határfelülethez, az egyenáram mágneses téranomáliája pedig – az áram útjának megfelelően – körüljárja azt. Az egyenáram esetében a vízszintes elektromos és a hozzátartozó vízszintes mágneses tér hányadosa (az impedancia) különösen hasznosnak bizonyult, de a modellkísérletek során a Poynting-vektor is beválik (terepi viszonyok között viszont, nagy zajérzékenysége miatt nem használható).

Analog modellezési megfigyeléseket matematikai formába öntve a válszfüggvények (az úgynevezett látszólagos fajlagos ellenállás- és fázisgörbék, az úgynevezett szondázási görbék) számos sajátosságát írtam le [IM 11]. Ami kívülállónak is érdekes lehet, talán az, hogy egy adott mélységben az elektromos fajlagos ellenállás területi változásáról (pl. egy bonyolult geometriájú test alakjáról) nem azokban a periódustartományokban lehet a legrészletesebb képet kapni, ahol maguk az anomáliák a legrobosztusabbak (ezek az úgynevezett „túllövéses” vagy „overshooting” és a normál periódusintervallumok), hanem a kettő között, ott, ahol a felszíntől lefelé és a testről felfelé haladó elektromágneses tér éppen „kiegyensúlyozza” egymást: a szondázási görbe a túllövési (overshooting) periódusintervallumot követően ismét a kiindulási értéket veszi fel: az abszolút érték mérése esetén  $\rho_1$ -et, a fázis mérése esetén a homogén feltérré jellemző 45 fokot [AM 10, IM 17]. Leskelődő jellegére utalva e frekvenciát kulcslyukfrekvenciának neveztük el.

A 8. ábra azt illusztrálja, hogy a nagy, robusztus anomáliák tartományában a területi felbontóképesség túl kicsi, de a kulcslyuktartományban az anomália határozottan alakfüggővé válik. Valós földtani viszonyok között sajnos kétséges a véletlenül felfedezett jelenség gyakorlati alkalmazása, de egyszer talán meg fog valósulni.

Ebből az eredményből az is következik, hogy érdemes mérni a kis abszolút értékű (a gerjesztő térben nem szereplő vagy a gerjesztő teret éppen kiegyenlítő) térkomponenseket, hiszen ezekből jobban kimutathatók a lokális változások. Ezekből a kezdeti felismerésekből nőtt ki Szalai Sándor (első PhD-hallgatóm) munkásságában az úgynevezett egyenáramú nullelrendezések világa: különös, de szabályokba rendezhető leképezési tulajdonságokkal [EG 1–11, Szalai 2002]. Az efféle vizsgálatok nélkül a világban kitalált geoelektromos elrendezések rendszerezése [EG 5] sem készülhetett volna el.



8. ábra. A korrekciók egy felszín alatti modellhez alakja és a mérhető anomália között a  $\lambda_1/h$ -ban kifejezett kolesztyukfrekvencián (ahol  $\lambda_1$  a hullámhossz,  $h$  a test mélysége a felszín alatt) a legmagyabb. A fázisra és az amplitúdóra kifejezett kolesztyukfrekvencia (a korrekciók mutatóira relatív térképi egységeken kifejezett „fáziscsúcs” és „amplitúdócsúcs”) egymástól jól elkülönül. Az adott paraméterre vonatkozóan a frekvenciákon lehet a legalkalmasabb leképezést kapni [LM 17]

Sokszor előfordult, hogy a megrendelő által feltételezett földtani szerkezet-modell előzetesen remélt nagyságú hatásánál (mi úgy mondjuk: anomáliájánál) a laboratóriumi kísérlet eredményeként kisebb hatást tapasztaltunk. Az elektromágneses analóg modellezés elsősorban az ilyen eredményeknek köszönhetően válhatott szemléletformálóvá, hiszen a modellkísérlet mindig jelezte, ha egy terepi kutatómódszer képességéről a valóságnál többet feltételeztünk. Jól mérhető terepi anomáliák kezdetben feltételezett forrásait többször kellett nagyobb méretű és/vagy nagyobb fajlagos ellenálláskontraszttal rendelkezővel kicserélni. Mindez arra bátorít, hogy a Föld belsejében igenis merjünk az elfogadott hipotézisekhez képest sokkal nagyobb változékonyságot feltételezni.

## 1.2. A magnetotellurikus impedanciatenzor [IM 1–19]

Az impedancia (a váltakozó áramú ellenállás) a  $\Delta U$  feszültség és az  $I$  áramerősség komplex hányadosa. A geofizikában az  $E$  [V/m] elektromos és a  $H$  [A/m] mágneses térerősségvektor összetartozó komponenseinek komplex hányadosaként értelmezik, hiszen ennek mértékegysége is ohm. (Érdemes megjegyezni, hogy a  $H$  helyett a  $B = \mu H$  [Vs/m<sup>2</sup>] mágneses indukcióvektorral operálva, már egy m/s dimenziójú mennyiséghez: az elektromágneses diffúzió sebességéhez jutunk.) Az impedancia (vagy a diffúziós sebesség) a váltakozó áram  $T$  periódusidő-hosszától függően átjárt térrész közegjellemzője. Az úgynevezett magnetotellurikában a horizontális elektromos és mágneses térkomponenseket az  $E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y$ ;  $E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y$  összefüggés köti össze, ahol a földtani információ hordozója az úgynevezett magnetotellurikus impedanciatenzor: egy  $2 \times 2$ -es mátrix, amelynek elemei:  $\text{Re}Z_{xx} + i \text{Im}Z_{xx}$ ,  $\text{Re}Z_{xy} + i \text{Im}Z_{xy}$ ,  $\text{Re}Z_{yx} + i \text{Im}Z_{yx}$  és  $\text{Re}Z_{yy} + i \text{Im}Z_{yy}$ .

A 3D-s szemléletmől az elektromágneses geofizikai mérésekben rejlő teljes információtartalom kihasználására, azaz az impedanciatenzor minden elemének megismerésére ösztönzött. A négy komplex elem (nyolc skaláris számérték) egy tetszőlegesen bonyolult földtani szerkezet fölött, a mérés konkrét irányától függően mindig más és más lesz, de a mérési irány megváltoztatásával csak maguk a tenzorelemek változnak, a tenzor úgynevezett invariánsai (mint például a determináns vagy az elemek négyzetösszege) nem. A tenzorinvariánsok kedvező geofizikai tulajdonsága, hogy mérési iránytól független térképi megjelenítést tesznek lehetővé. Végtelen számú invariánsfüggvény konstruálható, de ezek közül 3D esetben csak hét skaláris invariáns lehet egymástól független; 2D esetben három, 1D esetben pedig egy [IM 10]. Egyenáramú esetben (amikor az elektromos és mágneses tér között nincs fázistolás, azaz nincsenek komplex számok) szintén 4 eleme van a mátrixnak, következésképp az egymástól független invariánsok száma ebben az esetben 3. A legismertebb (egymástól is függő) invariánsok: a de-

termináns (det  $Z$ ), az elemek négyzetösszege (ssq  $Z$ ), a főatlóban lévő elemek összege ( $Z$ ); a mellékátlóban szereplő elemek különbsége ( $Z$ ). A manapság leginkább használatos hetes invariánskészletet (az úgynevezett WAL-invariánsokat) a mi munkánk [IM 10] alapján Weaver et al. (2000) publikálta.

A magnetotellurikus impedanciatenzor invariánsainak mindegyike sajátos leképezési tulajdonsággal rendelkezik. Különböző – egymástól független – hetes invariánskészleteket definiáltam, és a mélybeli modellszerkezet alakját legjobban kifejezőket kerestem. Megállapítottam, hogy a komplex impedanciatenzor valós elemeiből származó invariánsok leképezési tulajdonságai szignifikánsan jobbak, mint a képzetes vagy a vegyes elemekből származóké (9. ábra).

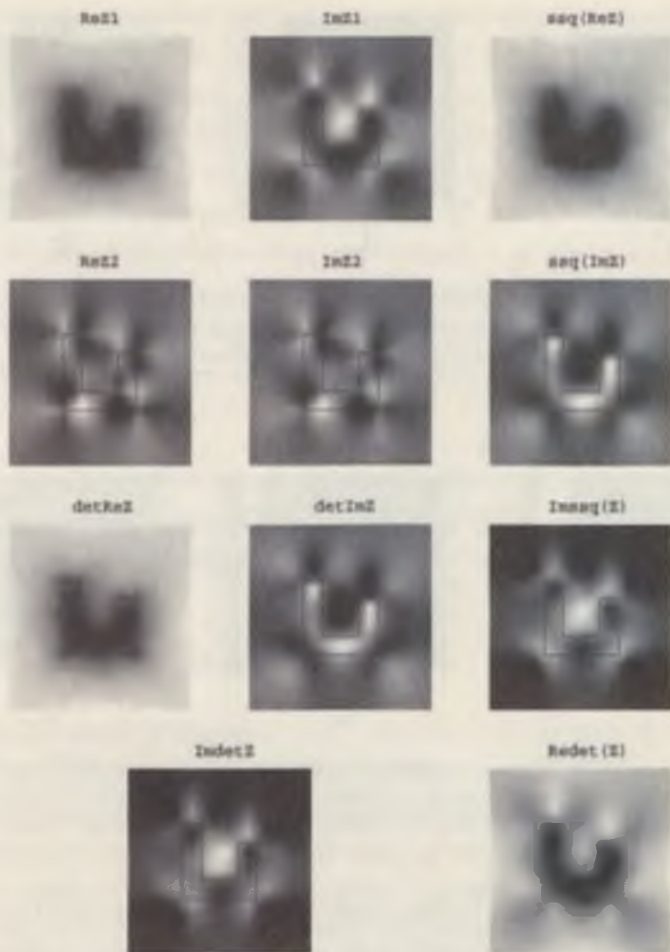
A levezetéshez a kulcsot az a könnyen levezethető összefüggés adta, hogy az impedanciatenzor determinánsa (amely maga is komplex mennyiség) valós része az impedanciatenzor valós elemeiből és képzetes elemeiből álló tenzorok determinánsának a különbsége:

$$\operatorname{Re} \det Z = \det \operatorname{Re} Z - \det \operatorname{Im} Z$$

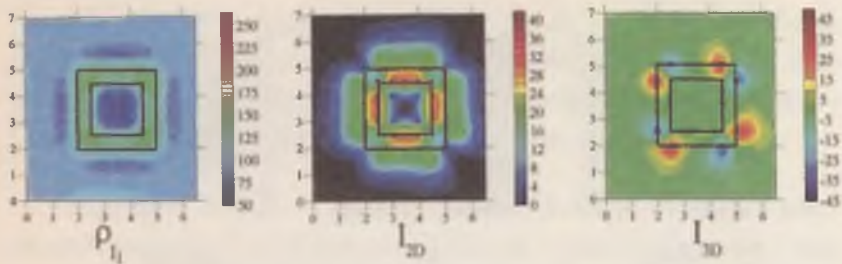
Valóban, amint a 9. ábrán látható, a  $\operatorname{Re} \det Z$  leképezés pontosan azok miatt az oldalhatások miatt gyengébb a  $\det \operatorname{Re} Z$ -nél, amelyek a  $\det \operatorname{Im} Z$ -t jellemzik, és amelyek a különbségképzésben megjelennek.

A tenzorleképezés alapkoncepcióját a közönséges geoelektromos térképezésben a betáplált áram erőssége és a mért felszíni elektromos térerősségvektor kapcsolatára is kiterjesztettük, és különös figyelmet fordítottunk az így nyert tenzorinvariánsok leképezési tulajdonságára. Mindenféle alakjelző (1D) invariáns a gyakorlatban is használhatónak bizonyult, de az éljelző (2D) és a sarokjelző (3D) invariánsok – nagyobb hibaérzékenységük miatt – már nem. A pilisszentkereszti ciszterci apátság romjainak tőszomszédságában a geoelektromos alakjelző invariáns területi eloszlása a felszínről nem látható épületalapot, vízvezető csatornát és egyéb érdekességeket jelzett [RG 2].

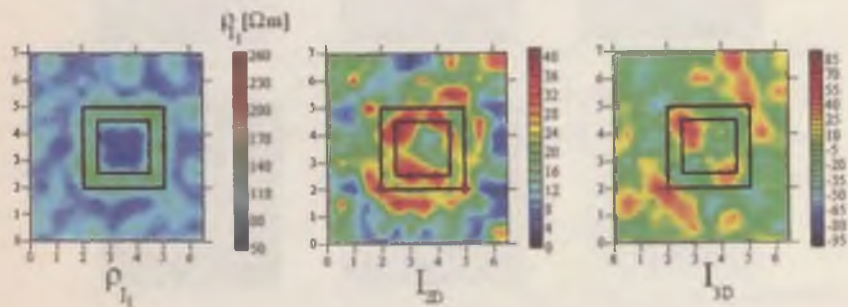




9. ábra. A magnetostellikus impedanciátensor numerikus modellezéssel meghatározott különböző rotációs invariánsainak térképi ábrázolása egy egyenlően szűrű U alakú jól vezető modell fölött. Az impedanciátensornak általában esetben hét egymástól független rotációs invariánsa van, például a fül oldali és középső csatlakozásban szereplő  $ReZ$ ,  $ImZ$ ,  $ReZ$ ,  $ImZ$ ,  $det ReZ$ ,  $det ImZ$  és  $Im det Z$ . Más hetes készletben további komplex függvények (pl.  $sqq ReZ$  és  $sqq ImZ$ ) is szerepelhetnek. A leképezés akkor jó, ha az impedanciátenszor valós elemait vesszük alapul, és lényegében mindegy, hogy ezt melyik invariánsból ( $det$ ,  $sqq$  stb.) számítjuk [IM 10]



10a ábra. Numerikus modellezéssel kapott egyenirányú fajlagos ellenállástenzor invariánsai. Balról jobbra: alakjelző (1D), éljelző (2D) és sarokjelző (3D) invariáns (Novák 2009). A 10a és 10b ábrákon az x-y koordináták dimenziója méter. A skálaértékek dimenziója ohmméter ( $\Omega\text{m}$ )



10b ábra. Terepi adatokból számított egyenirányú fajlagos ellenállástenzor invariánsai. Balról jobbra: alakjelző (1D), éljelző (2D) és sarokjelző (3D) invariáns. Az alakjelző invariáns terepi körülmények között is használható, a nagyobb zajérzékenységu él- és sarokjelző azonban terepi alkalmazásra alkalmatlan (Novák 2009)

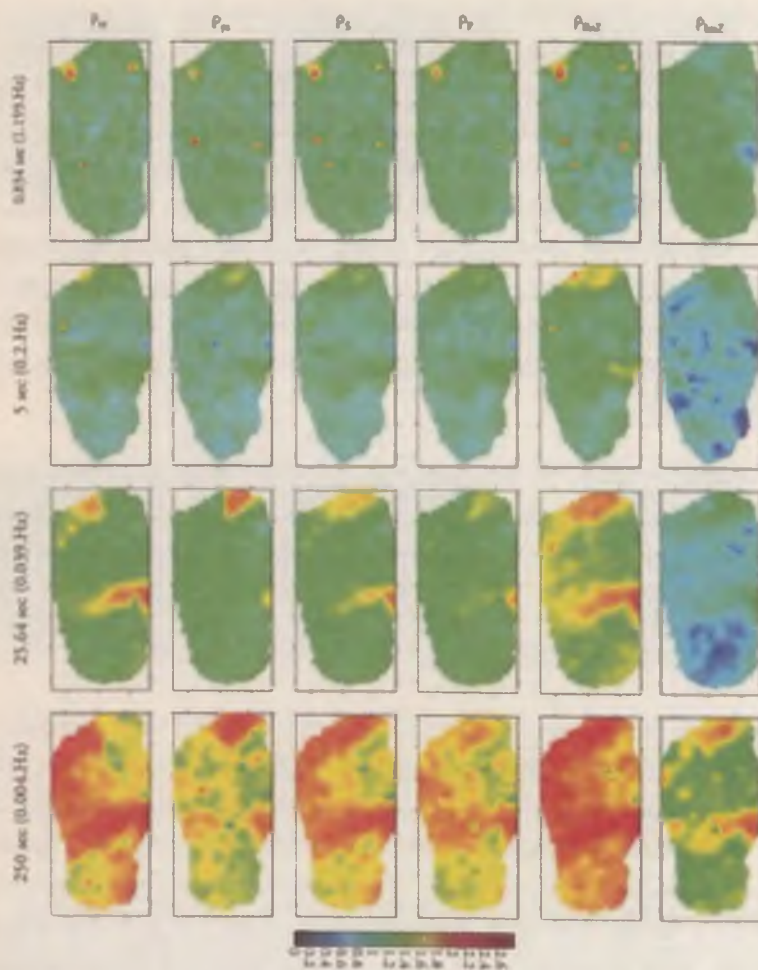
Az elektromágneses modell dimenziószáma a terepi mérések tervezésére is kihat. 1D-s modell feltételezése esetén néhány (akár egyetlen) pontban is elegendő mérni, 2D-kutatáskor vonal („szelvény”) menti mérésekre van szükség. Miután azonban a modelfüggvény a legtöbb esetben 3D-s jellegű, az elektromágneses geofizikában (ezen belül a magnetotellurikában is) érdemes törekedni a rendszeres területi mérésekre. A MOL, illetve elődje geofizikai kutatóvállalatának kőolaj-kutatási célú magnetotellurikus mérési hálózatát újra feldolgozva,

sok érdekes összehasonlítás tehető a valós impedanciaelemek tenzorából és a képzetes impedanciaelemek tenzorából számított látszólagos fajlagosellenállás-térképekről. A valós impedanciatenzor elemeiből sokkal kisebb periódusidő esetén (gyakorlatilag rövidebb regisztrálási idő után) jelenik meg egy adott mélységben lévő földtani szerkezeti elem képe. Ugyanakkor mindkét fajlagos ellenállásképpen megmutatkozik a „patkószög”- („static shift”) effektus. Annak következtében azonban, hogy az elektromos és mágneses térerősségek fáziseltolódásából számított térképen a patkószöghatás eliminálódik, behatárolható a közép-magyarországi tektonikai vonal mélysége: 3 km mélyen még nincs nyoma, 16 km mélyen már nincs; legerősebben kb. 7 km körüli mélységben jelentkezik.

A magnetotellurikus impedanciatenzor mellett a geomágneses mélyszondázás átviteli függvénye is kiváló megismerési eszköz, amelynek kulcsa a függőleges mágneses térkomponens mérése. Takács 1971 munkája több vonatkozásban inspiráló volt.

### I. 3. Ismerjük-e a Föld belsejét?

A geofizikai inverz problémának már a gravitáció esetén sincs egyértelmű megoldása. Önmagában egy-egy felszíni geofizikai anomália alapján (és egyéb kiegészítő adatok híján) nem lehet teljes bizonyossággal megmondani, hogy mi van a felszín alatt. Geofizikai adatokkal valószínűsíteni (esetleg cáfolni) tudunk különféle geológiai feltételezéseket, de egyszer s mindenkorra bizonyítani nem. Ugyanazt a területi anomáliát végtelenül sok áramrendszer és töltésrendszer okozhatja, tehát az inverzióknak (amikor az anomáliaképből következtetünk vissza a mélybeli viszonyokra) végtelenül sok megoldása van. Következésképpen a mért és a számított adat hibahatáron belüli illeszkedése önmagában semmiféle bizonytságot nem jelent arra nézve, hogy a mérésekből meghatározott mélység- és elektromos fajlagos ellenállásadataink helyesek-e.



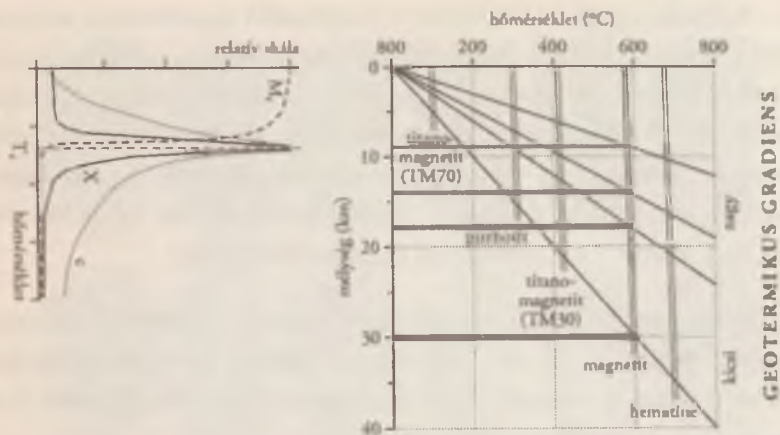
11. ábra. Látszólagos fajlagellenállás-térképek a magnetoelliptikus impedanciásteniszor  $\rho_v$ ,  $\rho_m$  eleméből, illetve különféle irányú ellenállásból ( $\rho_s$  soros ellenállás,  $\rho_p$  párhuzamos ellenállás,  $\rho_{mz}$  az impedanciásteniszor vaki elemének tenzorából számítható tetszőleges invariáns,  $\rho_{mz}$  az impedanciásteniszor képzőes elemének tenzorából számítható tetszőleges invariáns). Nagytudai környéken, egy kb. 30 km x 60 km-es területen a közvetlen körülbetűli jellemző mélységeknél megfelelő periódusoknál: 3 km, 7 km, 16 km, 50 km. A  $\rho_{mz}$  szignifikánsan mélyebb rétegről nyújt információt, mint a  $\rho_{mz}$  (Novák 2009)

Különösen nagyot lehet hibázni a modellesalád megítélésében, amikor a mért adatokhoz leginkább illeszkedő válaszfüggvényt rossz értelmezési tartományban keressük. A valósághoz közel álló, egyértelmű inverziós eredményt csak biztos földtani fogódzók alapján és minél több, különböző fizikai tulajdonságból számított geofizikai anomália ismeretében lehet remélni. A geofizikai inverzióban (amelynek hazai iskolája a Miskolci Egyetemen van, lásd pl. Dobróka et al. 1991, Prácsér 2007) mindezekre figyelemmel kell lenni.

Idővel maga a geoelektromos szerkezet (maga a kőzetjellemző elektromos fajlagos ellenállása) is változhat. (Egy tavaszi vízzel telt karszt például egészen más képet mutat, mint ősszel, a nyári szárazságot követően.) Ez kézenfekvő, de más meglepő jelenségekkel is számolnunk kell.

Közismert, hogy a kőzetek egy bizonyos hőmérsékleten (a Curie-ponton) elveszítik mágnesezettségüket, és az is ismert, hogy a mágnesezettség megszűnése a szuszceptibilitást tekintve nem monoton módon, hanem hatalmas – elméletileg végtelen – csúccsal mehet végbe (l. a 12. ábra bal oldala). A szilárdtestfizikában – nagyon kis méretekben és mesterséges anyagokon – a jelenség két évtizede kísérleti bizonyítást nyert. A 12. ábra jobb oldala a főbb mágneses ásványok Curie-pontját mutatja, a hőmérséklet és a nyomás feltételezett függvényében. Kutatótársaimmal együtt azt állítjuk [MF 1–3, Kiss 2009], hogy amennyiben a Curie-mélységnek megfelelő szűk mélységtartományban kellő homogenitású kőzet található, a jelenség a 12. ábrán jelzett mélységekben, azaz a földkéreg középső részében is kialakulhat. Ha a jelenség általánosan elterjedt lenne (ami pillanatnyi ismereteink szerint nem valószínű), az alapvetően kérdőjelezné meg a középső kéregről és az alatta fekvő térségről elektromágneses úton szerzett ismereteinket.

Egy orosz kutatócsoportnak a Nemzetközi Geomágneses és Aeronomiai Szövetség (IAGA) 12. világkonferenciáján (Mérida, Mexikó, 2013. augusztus 26–31.; az előző világkonferencia helyszíne 2009-ben Sopron volt) tartott



12. ábra. Elvi ábra az  $X$  mágneses súsúsceptibilitás (valamint az  $M_r$  reitans mágneszettség és a  $e$  fajbő) változásánál a  $T_c$  Curie- (Néel) hőmérsékleten végbemenő másodrendű mágneses fázisátalakulás hatására (a bal oldalon). Néhány mágneses ásvány Curie- (Néel) hőmérsékletéhez tartozó, a geotermikus viszonyoktól függő mélységtartomány a földkéregben (a jobb oldalon). A magnetit fázisátalakulási hőmérséklete a Pannon-medencében 8–18 km között változtatható. A bal oldali ábra a 8 km-es fázisátalakulási hőmérséklethez van igazítva. A  $T_c$  körüli mélységintervallum változónak nem több egy-kétszáz méternél [MF 1]

elkádása (Petrisesev–Szemenov 2013) szerint a mélyszerkezetek számított elektromos fajlagos ellenállásának évtizedes változásai vannak. Egy részük megmagyarázható a forrástér napciklusokhoz kötődő változásával, de a tektonikailag aktívabb területen kimutatott nagyobb változások (pl. Európa alatt) feltétlenül mélybeli eredetet tételeznek fel. Az előbb leírt jelenség (másodrendű mágneses fázisátalakulás, azaz a nyomás és a hőmérséklet érzékeny megváltozásának hatására az anyagi tulajdonságokban végbemenő drasztikus változás) minderre kézenfekvő magyarázatot kínál.

## Az elektromágneses geofizika a környezettudományban [EZ 1-6, FN 1-4]

Érdekességképpen pillantsunk bele az elektromágneses geofizika két közvetlen környezettudományi alkalmazásába.

A természetes, kis amplitúdójú (10 mV/km, illetve nanotesla nagyságrendű) elektromágneses térváltozásokat hasznosító tellurikus, magnetotellurikus módszer sajnos rendkívül érzékeny a mesterséges eredetű elektromágneses zajokra. A mesterséges elektromágneses zajimpulzusokat már három évtizede érzékeltük, és egyúttal geofizikai következtetések levonására is felhasználtuk [EZ 1-6]. Ez a fajta „elektromágneses környezetszennyezés” feltartóztatlanul terjed, miközben a természeti jelenségekre (például a geomágneses viharokra) egyre érzékenyebben reagáló („sérülékenyebb”) mesterséges rendszerek létesülnek (Wesztergom 1994). Ezért is van nagy jelentősége annak az elektromágneses indukciós kockázati kutatásnak, amely a soproni intézetben 2009-ben indult, és jelenleg egy 2011-ben kezdődött FP7-projekt ([www.euriscgic.eu](http://www.euriscgic.eu)) keretében folyik.

Francia indítatásra kezdtük alkalmazni a természetes elektromos térváltozásokat az élő természet – faneedváramlás [FN 1-4, Koppán 2004] – vizsgálatára. Az *in vivo* kísérletek eredményeként a kiválasztott bükkfa törzsének két pontja között a faneedváramlás hatására keletkező elektromos potenciálkülönbség napi változásából (amely két éven át – mindaddig, amíg az elektródákat az élő szövet ki nem lökte magából – folyamatosan mérhető volt) megállapítottuk, hogy a faneedváramlás április közepén hirtelen indul be, és addig intenzív, amíg a fa teljesen ki nem lombosodik. Utána június végén – a János-napi hajtásként ismert időszakban – a termés kialakulásakor új lendületet vesz, hogy ősszel fokozatosan megszűnjék.

## II. FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNY

Az elektromágneses geofizika rendkívüli lehetőségeket jelent, ám a legfontosabb „közhasznú” tanulsága feltétlenül az, hogy szigorúan következetes. Elválasztja az áltudományt (pl. a varázsvesszős vízkeresést vagy az úgynevezett mágneses földszugárzás mindenféle vonatkozásait) a tudománytól [TA 1–8]. Miközben a tudományos megismeréshez módszert ad, rámutat arra, hogy a megismerés útja rendkívül rögzös. Szembesít például azzal, hogy az általunk preferált paradigmából származtatott modell következményének egyeznie kell a valósággal, de ha van is egybeesés a tapasztalati adatokkal, még akkor sem biztos, hogy a modell kielégítően írja le a valóságot.

Az elektromágneses geofizika szemléletét képviselve és a globális környezeti problémák iránt érdeklődően lettem a soproni egyetemen 2000-ben a környezettudományi szak vezetője. Az összetett kérdéskörökre igyekeztem kielégítő válaszokat keresni, de a környezettudomány nemzetközi véleményformálóinak munkáiban nem találtam meg a geofizikában megszokott szigorú következetességet. Ehelyett (Gore 2006 nyomán, illetve az éghajlatváltozás vizsgálataért kiosztott Nobel-békedíjakat követően) egyre inkább a „globális felmelegedés” üvegházhatás-alapú megközelítése vált a környezettudomány központi kérdésévé. A túlzó leegyszerűsítések (az úgynevezett klímafanatizmus) ellen elvtelve szólalt meg egy-egy tudományos igényű kritikus hang (pl. Friis-Christensen 2008, Kerr 2009), de a nemzetközi közvélemény előtt legfeljebb Klaus (2008) merev klímaszkeptícizmusa kapott nyilvánosságot.

A Föld bolygó nemzetközi évétől, a Föld-évtől (International Year of Planet Earth, 2008-ban tematikus ENSZ-év) a halmozódó ellentmondások feloldását is vártam. A Föld-év nemzetközi eseményein és projektjeiben tíz, közérdeklődésre számot tartó globális témakörben gyűltek össze megbízható ismeretek. Sajnos a Föld-év hivatalosan nem rakta össze ezeket a mozaikokat egységes egészévé. E kérdéskörrel kapcsolatos publikációimban [GK 1–23] 2008



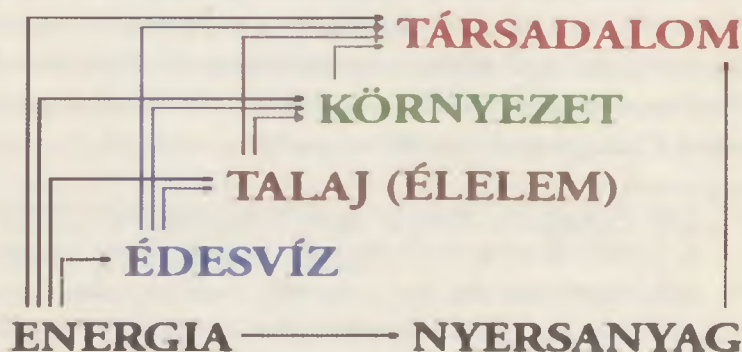
után ugyan a Föld-évré is hivatkoztam, de be kell vallanom, hogy a bemutatott körkép saját (a Föld-év magyar nemzeti bizottságának elnökével részben közös) munkám eredménye. A 2008 óta egyéb forrásokból (néhány tanulmány mellett például a Biodiverzitás nemzetközi éve megállapításából, továbbá az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottság Energetika és Környezet Albizottsága rendezvényeinek tanulságaival) kiegészítet, illetve megerősített geokörnyezeti körkép legfontosabb elemeit az alábbi táblázatban foglalom össze.

1. táblázat. Körkép a Földről, körkép az emberiségről

<p>1. Természeti erőforrások: energia- és ásványi nyersanyag</p>	<p>Az évmilliók alatt elraktározott „napenergia-konzervek” (az úgynevezett „fosszilis” energiabeszételek) könnyebben kitermelhető részét az emberiség lényegében két évszázad alatt felékte. A jövőben az emberiség a természeti folyamatok megcsapolt energiáiból (úgynevezett „megújuló”, avagy „zöld” energiákból) szeretné ellátni magát, de az ismert alternatív energiafajták területi eloszlása olyan kicsi, hogy a maival összemérhető igényeket nem lehet belőlük kielégíteni (MacKay 2009). Ha pedig valamilyen felfedezésnek köszönhetően mégis sikerülne a növekvő energiaigényt kielégíteni (például magfúzió révén), a természetátalakítás (azaz a természetpusztítás) intenzitása még tovább fokozódna, hiszen minden energia végső soron földfelszín-átalakításként is megnyilvánuló munkávé, valamint hővé alakul. Az energiatermelés és -fogyasztás környezeti hatása elsődlegesen az elküldött (az elfogyasztott) energia mennyiségétől és nem annak forrásától függ. Pazarlóan bánunk a földről származó nyersanyagokkal is, de a „közönséges” nyersanyagok még sokáig bányászhatók lesznek. Egyes – leginkább éppen az új technológiák által igényelt – ritkaföldfémekből azonban már néhány éven belül nyomósabb hiány keletkezhet.</p>
<p>2. Felszín alatti vízkészlet</p>	<p>A legjelentősebb ivóvízraktárakokat a még tiszta felszín alatti vizek képezik, és ezt a vízkészletet az emberiség globálisan sokkal nagyobb ütemben fogyasztja, mint ahogyan az természetes úton pótlódik. A felszín alatti édesvízkészletnek több mint a fele már használatban van (Myers 2008).</p>
<p>3. Talaj</p>	<p>Az emberiség egyre inkább szűkülben van a természetterületeknek, ehhez hozzájárul az is, hogy a természeti és emberi hatásra bekövetkező környezeti változások sokszor talajpusztulással járnak. A Föld valószínűleg képes lesz ellátni a 2040-re várható kb. 9 milliárd embert élelemmel, de csak az ökoszisztémák és a biodiverzitás feláldozásával, ráadásul úgy, hogy nem (vagy alig) marad hely biomasza-termelés számára.</p>

4. Föld és élet	Az élet mintegy 2,7 milliárd éve olyan tényezővé vált, amely közvetlenül hat az atmoszférára, az óceánokra és a litoszférára. A Biodiverzitás nemzetközi éve (2010-ben tematikus ENSZ-év) szerint ötven faj pusztul ki naponta, míg egyetlen új faj születése évezredekben mérhető. Rockström et al. (2009) szerint a Föld úgynevezett planetáris határértéke szempontjából a legjelentősebb probléma a biodiverzitás csökkenése.
5. A Föld mélye	A Föld dinamikája (a természeti jelenségek látványosságát, különösen a természeti katasztrófákat leszámítva) nemigen érdekli az embereket. E témához kapcsolódik azonban, hogy az emberiség ma már egy nagyságrenddel több anyagot mozgat meg a Föld felszínén, mint a felszíni természeti folyamatok összessége (Wilkinson 2005, Myers 2008). A kontinensek felszínének a felét átalakította az ember (Steffen et al 2004).
6. Éghajlat- változások	Az éghajlatváltozás a jövőben is befolyásolni fogja az emberiség életkörülményeit, amint az a múltban is történt (hiszen az egész földtörténet többek között éghajlatváltozások története is). A huszadik század eleje óta a szén-dioxid-kibocsátás, illetve a légkör CO <sub>2</sub> -koncentrációja évről évre nő (1955 óta folyamatos mérésekkel ellenőrizhető), a globális hőmérséklet ezalatt összeségében mintegy 0,7 °C-kal nőtt (úgy, hogy 1940 és 1970 között csökkent, és globális hőmérséklet-növekedés a legutóbbi másfél évtizedben sincs). A CO <sub>2</sub> -kibocsátási összességétől üvegházhatás-modell tehát tarthatatlan.
7. Természeti katasztrófák	A természeti katasztrófa az ember és a természet közötti sajátos kölcsönhatás emberközpontú elnevezése. A természeti (biológiai, hidrometeorológiai és geológiai-geofizikai-asztrófikai) katasztrófák számbeli és mérhető növekedésének oka azonban nem a természetben, hanem a terjeszkedő emberiségben keresendő: mindenképp – a népességnövekedésnél sokkal gyorsabb ütemű – fogyasztásnövekedésben, az emberek és az anyagi javak egyre veszélyesebb helyekre koncentrálódásában (Simulka–I Kullnack 2008).
8. Óriásvárosok	Ezeknek az öt milliárdnál nagyobb lélekszámú településeknek a száma és lakosságuk növekedése megállíthatatlannak látszik, ez a jövőben a természeti katasztrófák okozta károkat tovább növekedését, illetve az óriásvárosok fenntarthatatlanságát veti előre.
9. Óceánok	Az óceánok a felfedező kutatás, a környezeti kockázatok, valamint az energia- és nyersanyagkészletek szempontjából számos meglepetést tartogatnak. Új felismerés például, hogy a kontinensek alatti édesvízkészletek kiterjedése egyre növekvő mértékű (néhány tized mm/év értékű) tengervízszint-emelkedést jelent (Wada et al 2010).
10. Föld és egészség	A geokörnyezet (mindenképp közvetlenül az elfogyasztott étel és ital, a belélegzett levegő) jobb figyelembevételével az emberiség felének az egészségén lehetne javítani.

A Föld-év-témakörök osztályozásához segítséget nyújtott a Richard Smalley (Nobel-díjas kutató, a fullerén felfedezője) által ajánlott sorrend. Smalley (2003) a társadalmi kihívásokat aszerint hierarchizálta, hogy milyen előfeltételei vannak valamely probléma érdemi megoldásának. Amint a 13. ábra is mutatja, a legalapvetőbb kérdés a Föld természeti erőforrásaié: az energiáé és a nyersanyagoké. Ha az energia kérdése nincs megoldva, akkor az édesvizellátásé sincs és így tovább. Az összes társadalmi kérdés rendezésének előfeltétele az energia, az édesvíz, a talaj (élelem), a nyersanyagok és a megfelelő környezet rendelkezésre állása. E tényezők azonban egytől egyig korlátosak, és mindegyikükre jellemző, hogy az emberiség túl sokat fogyaszt belőlük.



13. ábra. A legfontosabb globális kérdések hierarchiája a Föld-év és Smalley (2003) alapján  
 (Az eredeti Smalley-sorrend: 1. energia, 2. édesvíz, 3. talaj, 4. környezet, 5. szegénység, 6. terrorizmus, háború, 7. betegségek, 8. oktatás, 9. demokrácia, 10. népesség)

A Smalley-féle rendszerezés hozzásegít annak a felismeréséhez, hogy alapvető ellentmondás van a Föld nevű bolygó véges adottságai és az állandó gazdasági növekedés kényszere között. A globális környezeti problémák mind-mind a földi természeti erőforrásokkal való felelőtlen gazdálkodásra, a túlfogyasztásra vezethetők vissza, amint arra többen figyelmeztettek (Meadows et al. 1972,

Crutzen 2002, Zalasiewicz et al. 2004). A természeti erőforrások (energia, nyersanyag, víz, talaj) mohó fogyasztásához, a környezet (föld, víz, levegő) szennyezéséhez, a biodiverzitás-csökkenéshez képest az éghajlatváltozás olyan megfoghatatlan lepel, amely elfedi a valódi, egyre súlyosbodó – a véges adottságokkal rendelkező Földön az állandó fogyasztásnövekedésből eredő – konkrét környezeti problémákat. Amíg tehát a figyelem egyetlen környezeti indikátorra (az éghajlatváltozásra, nevezetesen az úgynevezett globális felmelegedésre és annak egyetlen feltételezett okára, a szén-dioxid-kibocsátásra) irányítólik, esély sincs a közvetlen ok-okozati összefüggések feltárására [GK 1–23].

Miközben az energia (és nyersanyag), az édesvíz, a talaj korlátossága és a (széles értelemben vett) környezet szennyeződése a közbeszédben és a környezettudományban alul van értékelve, az éghajlatváltozást és a hidrometeorológiai jellegű természeti katasztrófákat (az úgynevezett időjárási szélsőségeket) a „mainstream” környezettudomány túlértékeli. Holott

1. nemcsak hogy nincs bizonyítva az antropogén szén-dioxid-kibocsátás és a globális felmelegedés közötti szoros kapcsolat, hanem egyenesen paradigmaválságot jelez, hogy a legutóbbi másfél évtizedben (1998 és 2013 között) – a légköri CO<sub>2</sub>-tartalom éves átlagának monoton növekedése ellenére – megállt a felmelegedés (Met Office 2013);
2. a katasztrófák számában és méretében tapasztalt növekedés oka elsősorban az emberiség terjeszkedésében (mindenekelőtt a – népességnövekedésnél sokkal gyorsabb ütemű – fogyasztásnövekedésben, az emberek és az anyagi javak egyre veszélyesebb helyekre koncentrációjában és az úgynevezett sérülékenységben, tehát összességében az emberiség terjeszkedésében) keresendő, és nem a természet természetes működésében (Smolka–Höllnack 2008). (Hangsúlyozandó, hogy a természeti katasztrófa az ember és a természet közötti sajátos kölcsönhatás emberközpontú elnevezése.)

Az ember természetátalakító tevékenysége nyílegyenesen és sokrétűen vezet a környezet globális leromlásához, de a természet – amint a földtörténet mutatja – az ember nélkül is képes jelentős változásokra. A környezetváltozásból azonban egyetlenegy dimenziót (nevezetesen az éghajlatváltozást) kiemelni és ezt ráadásul kizárólagosan egyetlen környezeti indikátorral (a CO<sub>2</sub>-kibocsátással) ok-okozati összefüggésbe hozva, középpontba állítani – távol áll a szigorú következetességtől.

A probléma okát: az emberiség konzumerizmusban megnyilvánuló irányvesztését Werner Heisenberg öt és fél évtizede egy nagyon idevágó földmágneses hasonlattal világította meg: „...anyagihatalmának korlátlan növekedésével az emberiség egy olyan hajóskapitány helyzetébe került, akinek hajója szilárdságát már annyi acél és vas biztosítja, hogy a tájoló mágnesűje kizárólag a vasszerkezetekre reagál; az északi irányt végleg elveszítette” (Heisenberg 1958). Mindehhez 2013-ban – a Föld véges adottságai által kijelölt korlátokat öt és fél évtizeddel közelebről látva – legalább annyi hozzáteendő, hogy ez a hajó nem is olyan szilárd... Ennél súlyosabb vélemények is léteznek (pl. Lovelock 2009, Czelnai 2011, Vida 2012).

Úgy tűnik, hogy az UNESCO Future Earth programja („A Föld a jövőben”: 10 éves program a globális környezeti változások következményeinek felmérésére és a tennivalók kidolgozására) a növekedés alapvető problémáit külön széles összefüggésrendszerben igyekszik tárgyalni (Future Earth 2013).

## KÖVETKEZTETÉSEK

Az elektromágneses geofizikát szigorú következetesség és óvatosság jellemzi. Lehetőségeket ad elérhetetlen térségek megismerésére, egyúttal rámutat a megismerés nehézségeire és korlátaira is. Elválasztja az általományt a tudománytól. A tudományos megközelítésektől megköveteli, hogy az általunk preferált paradigmából származtatott modell következménye egyezzen a való-

sággal, sőt arra is felhívja a figyelmet, hogy a modell- és a tapasztalati adatok egyezése sem jelent garanciát arra, hogy a modell a valóságot jól leírja.

A környezettudományban viszont kevés adatból (néha egyetlen korrelációból) túl magabiztos következtetéseket vonnak le, még akkor is, ha a modell- és a mérési adatok jelentősen eltérnek egymástól. Ugyanakkor fontos összefüggések figyelmen kívül maradnak.

A földtudománynak tisztában kell lennie azzal, hogy a legfontosabb környezeti tényezők (az energia és az ásványi nyersanyagok, az édesvíz, a talaj, a környezet) nagyrészt földtudományi vonatkozásúak. Ezért elsősorban a földtudomány felelőssége, hogy elvégezze – globálisan és hazai szinten is – a természeti kincsek (erőforrások és a környezet) újraértékelését, reálisan tárja fel a lehetőségeket.

A tudomány ez idáig mindig nyújtott valamiféle előremenekülési lehetőséget, de a földi korlátok egyre szembetűnőbben kirajolódnak. A Future Earth program e korlátok felismeréséről és a jövőbeni igazságszerű elkerülhetetlenségéről szól.

A program sikerének kulcsa, hogy az egyedi, véges és törekeny Földrendszer (ennek részeként az „antropocentrikusan” torzított *i. ábra* összefüggéseinek) megismeréséhez nagyobb alázattal közelítsünk.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Tanáraim, számos föld- és környezettudományi kutató mellett (akik közül sokuk neve az irodalomjegyzékben szerepel) köszönet illeti soproni kutatóintézeti és egyetemi munkatársaimat, valamint idehaza és a világban mindazokat, akikkel 1977 óta munkakapcsolatban álltam. Köszönet szüleimnek az indítatásért, feleségemnek a türelméért.

# IRODALOM

## Elektromágneses geofizika

- Átlám A.: *A dunántúli elektromos vezetőképesség-anomália földtani és módszertani jelentősége*. Akadémiai székfoglaló, 1990. szeptember 24., Akadémiai Kiadó (1992).
- Dobroka M., Gyulai A., Ormos T., Csókás J., Dresen L.: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an under-ground coal mine. *Geophysical Prospecting* 39, 643–665 (1991).
- IAGA 2013 [http://www.iagg.org/IAGA/iaga\\_pages/pdf/IAGA-Poster-2013-A.pdf](http://www.iagg.org/IAGA/iaga_pages/pdf/IAGA-Poster-2013-A.pdf) (2013. december 21.)
- Kiss J.: *Gravitációs és mágneses feldolgozások és modellezések a geokörnyezet megismerése céljából*. PhD-értekezés, Sopron (2009).
- Koppán A.: *A fatermszám kialakuló természetes elektromos potenciálkülönbség-változások és összefüggésük a xylemnedv-áramlással*. PhD-értekezés, Sopron (2004).
- Kárács K.: *A tellurikus módszer jelentősége a földtani nyersanyagutakutásban*. Akadémiai székfoglaló, 1956. május 31.
- Kunetz G.: Processing and interpretation of magnetotelluric soundings. *Geophysics* 37, 1005–1031 (1972).
- Novák A.: *Elektromágneses geofizikai leképezés tenzor invariánsokból: a felszínközeltől a dunántúli mély-szerkezetiig*. PhD-értekezés, Sopron (2010).
- Petrisev (Petrishev) M. S., Semenov (Semenov) V. Yu.: Features of the long-term variations of the Earth's impedance and its gradients. Paper J5–4. IAGA (2013).
- Price A. T.: The Theory of Geomagnetic Induction, *Phys. Earth Planet. Inter.* 7, 227–233 (1973).
- Prácsér E.: *Modellparaméterek alkalmas megválasztása szelvénymenti geofizikai mérések inverziójához*. PhD-értekezés, Miskolc (2007).
- Simonyi K.: *Elméleti villamosságtan*. Tankönyvkiadó (1967).
- Szalai S.: *Egyenáramú null-elrendezések*. PhD-értekezés, Sopron (2002).
- Takács E.: The role of the vertical pulsations of the magnetic field in magnetotelluric measurements *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Academiae Scientiarum Hungaricae* 6:(1–2), 99–110 (1971).
- Vérő J.: Hullámok a bolygóközi térből vagy csak a magnetoszférából (A geomágneses pulzációk eredete). Akadémiai székfoglaló, 1996. október. In: *Értekezések, emlékezések*. Akadémiai Kiadó (1999).
- Wesztergom V.: *A geomágneses vábrak technogén hatásai*. Kandidátusi értekezés (1994).
- Weaver J. T., Agarwal A. K., Lilley F. E. M.: Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophys J Int* 141, 321–336 (2000).

## Föld- és környezettudomány

- Crutzen P. J.: Geology of mankind. *Nature* 415, 23–23, doi: 10.1038/415023a (2002).
- Czelnai R.: Manha de carnaval. A karnevál reggele – kijáratodás nélkül. In: *Vallás és apokaliptizis* (szerk: Kovács L., P). Éghajlat Könyvtudó, Budapest (2011).
- Fris-Christensen E.: Message from the President: Science and Society. *IAGA News* 45, 2–2 (2008).
- Future Earth 2013 <http://www.icsu.org/future-earth> (2013, december 5.).
- Gore A. A.: *An Inconvenient Truth*. Ennarus, PA: Rodale (2006).
- Heisenberg W.: The Physicist's Conception of Nature. Hutchinson & Co., London, 19–31 (1958); eredeti mű: *Das Naturbild der Heutigen Physik*, Rowohlt, Hamburg (1955).
- Kerr R. A.: What Happened to Global Warming? Scientists Say Just Wait a Bit. *Science* 326 (5949), 28–29, doi: 10.1126/science.326.28a (2009).
- Klaus V.: *Blue Planet in Green Straddles. What is endangered: Climate or Freedom?* Washington DC: Competitive Enterprise Institute (2008).
- Loveck J.: *The Vanishing Face of Gaia. A Final Warning*. Basic Books, 278 (2009).
- MacKay T.: *Sustainable Energy: Without the Hot Air*. UIT Cambridge (2009).
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens III W. W.: *Limits to Growth*. Universe Books (1972).
- Met Office: <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2012/global-temperatures-2012> (2013 december 5.).
- Myers M.: *Science, Society, and the Future of Earth's Resources*, International Year of Planet Earth, UNESCO, Paris, February 12-13, 2008 [http://www.usgs.gov/aboutusgs/docs/speeches/2008/08speeches\\_myers.asp](http://www.usgs.gov/aboutusgs/docs/speeches/2008/08speeches_myers.asp) (2008).
- Rockström J., Will Steffen W., Noone K., Åsa Persson Å., Chapin F. S., Lamlin E. F., Lenton T. M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H. J., Nykvist B., de Wit C. A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sorlin S., Snyder P. K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R. W., Fabry V. J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J. A.: A safe operating space for Humanity. *Nature* 461, 472–475, doi: 10.1038/461472a (2009).
- Smalley R. E.: *Top Ten Problems of Humanity for Next 50 Years*. Energy & NanoTechnology Conference, Rice University, May 3, 2003.
- Smolka A., Hollnack D.: *Geo-risks: Global trends, losses and risk management*. 33UGC, 2008, paper TG415L.
- Steffen W. et al. (eds.): *Global Change and the Earth System*. Heidelberg. Springer (2004).
- Vida G.: Honnan hová homo? Az Antropocén korszak gondoljai. *Szemle* 18, Semmelweis Kiadó <http://www.semmelweisikiado.hu/files/flippingbooks/000/091/liquid-green/index.html> (2012) (2013, december 5.).
- Wala Y., van Beck L. PH., van Kempen C. M., Reckman J. W.T. M., Vasak S., Bierkens MF. P.: Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, L1042, doi:10.1029/2010GL044571 (2010).



Wilkinson B. H.: Humans as geologic agents: A deep-time perspective. *Geology* 33(3), 161–164. doi: 10.1130/G21108.1 (2005).

Zalasiewicz J., Williams M., Smith A.: Are we now living in the Anthropocene? *GSA Today* 18(2), 4–8. doi: 10.1130/GSAT01802A.1 (2008).

## SAJÁT PUBLIKÁCIÓK A SZÉKFOGLALÓ TÉMAKÖRÉBEN

### Analóg modellezés [AM 1–12]

- [AM 1] Ádám A., Pongrácz J., Szarka L., Kardeván P., Szabadváry L., Nagy Z., Zimányi I., Kormos I., Régeni P.: Analogue model for studying geoelectric methods in the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 16, 359–380 (1981).
- [AM 2] Ádám A., Szarka L.: Analogue modelling of the adjustment distance ACTA *Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 21, 177–199 (1986).
- [AM 3] Ádám A., Szarka L., Varga M.: Physical and mathematical modelling of crustal anomalies in the Pannonian Basin. *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 18(4), 467–488 (1983).
- [AM 4] Márcz F., Pongrácz J., Szarka L.: Electromagnetic scale modelling instrument for geophysical prospecting. *Naučnagis Apparatura – Scientific Instrumentation* 1(2), 119–133 (1986).
- [AM 5] Szarka L.: *Egyetemesi geofizikai módszerek analóg modellezése*. Egyetemi doktori értekezés, Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc (1982).
- [AM 6] Szarka L.: Analogue modelling of DC mapping methods. *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 19, 451–465 (1984).
- [AM 7] Szarka L.: Geophysical Mapping by Stationary Electric and Magnetic Field Components: a Combination of Potential Gradient Mapping and Magnetometric Resistivity (MMR) methods. *Geophysical Prospecting* 35(4), 424–444 (1987).
- [AM 8] Szarka L.: Detectability of high-conductivity plates by the CSAMT method on basis of analogue modelling results – An interesting analogue modelling experience. *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 16(1–4), 273–285 (1991).
- [AM 9] Szarka L.: Early analogue modelling experiments and related studies to today's problems of geo-electromagnetic exploration. *Journal of Earth Science* 20(3), 618–625 (2009).
- [AM 10] Szarka L., Nagy Z.: A possibility of an electromagnetic technique to locate oil reservoir boundaries on basis of analogue modelling experiments. *Acta Geodætica Geophysica et Montanistica Hungarica* 27, 131–138 (1992).
- [AM 11] Szigeti G., Szarka L.: Combined Application of Mathematical and Physical Modelling for Potential Mapping. *Geofizikai Közlemények – Geophysical Transactions* 29(2), 33–46 (1982).
- [AM 12] Viljanen A., Szarka L.: Analogue model studies of induction effects at auroral latitudes. *Annales Geophysicae* 13, 1187–1196 (1995).

## Impedancia, impedanciatenzor és származékai [IM 1–19]

- [IM 1] Fischer G., Szarka L., Ádám A., Weaver J.: The magnetotelluric phase over 2-D structures. *Geophysical Journal International* 108(3), 778–786 (1992).
- [IM 2] Prióser E., Szarka L.: A correction to Bahr's „phase deviation” method for tensor decomposition. *Earth Planets and Space* 51, 1019–1022 (1999).
- [IM 3] Szarka L.: A magnetotellurikus térösszefüggések fizikai jelentéséről. *Magyar Geofizika* 29(5–6), 201–224 (1988).
- [IM 4] Szarka L.: Electromagnetic distortions in terms of potential in two-dimensional magnetotellurics. *Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica* 26(1–4), 407–422 (1991).
- [IM 5] Szarka L.: Comment on „Definitions of apparent resistivity for the presentation of magnetotelluric sounding data” by A. T. Basokur. *Geophysical Prospecting* 42(8), 987–988 (1994).
- [IM 6] Szarka L., Menvielle M., Tarits P., Ádám A.: A thin sheet study of the electromagnetic field over geometrically complex high conductivity structures: The field components and their relation with some 3-D interpretation parameters. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 29(1–2), 81–105 (1994).
- [IM 7] Szarka L., Ádám A., Menvielle M., Tarits P.: A thin sheet numerical study of the electromagnetic field over geometrically complex high conductivity structures: Depth and lateral characteristics of different resistivity definitions. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 29(1–2), 107–124 (1994).
- [IM 8] Szarka L., Menvielle M., Tarits P., Ádám A.: A numerical thin sheet study of the electromagnetic field over geometrically complex high conductivity structures: About the current channelling in high-conductivity 3-D models. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 29(1–2), 125–138 (1994).
- [IM 9] Szarka L.: Illustration of some 3-D magnetotelluric parameters on a festive occasion. *Publications of The University of Miskolc Series A, Mining* 52, 149–161 (1997).
- [IM 10] Szarka L., Menvielle M.: Analysis of rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor. *Geophysical Journal International* 129, 133–142 (1997).
- [IM 11] Szarka L.: A compact representation of two-layered magnetotelluric response. *Geophysical Prospecting* 45, 763–774 (1997).
- [IM 12] Szarka L.: A compact derivation of basic relationships to determine subsurface resistivity functions. *Acta Geodaetica Et Geophysica Hungarica* 36, 279–283 (2001).
- [IM 13] Szarka L.: About the so-called “Magnetic Tellurics”: Comment on “Long-period electromagnetic induction vectors in a sedimentary back-arc basin” by Ádám A., Koppán A. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 40, 431–436 (2005).
- [IM 14] Szarka L., Ádám A., Menvielle M.: Field test of a quick-look imaging method based on rotational invariants of the 3-D magnetotelluric tensor. *Geophysical Prospecting* 53, 325–334 (2005).

- [IM 15] Szarka L., Fischer G.: Surface electromagnetic parameters in terms of the distribution of current at depth. *Geo fizikai Közlemények – Geophysical Transactions* 35(3), 157–172 (1989).
- [IM 16] Szarka L., Fischer G.: Subsurface electromagnetic parameters in terms of the distribution of current. *Geo fizikai Közlemények – Geophysical Transactions* 37(1), 25–38 (1992).
- [IM 17] Szarka L., Menvielle M.: A possibility for an enhanced 3D parameter-sensitivity – the keyhole imaging. *Geophysical Prospecting* 47, 59–71 (1999).
- [IM 18] Szarka L., Menvielle M., Spáček V. V.: Imaging properties of apparent resistivities based on rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 35, 149–175 (2000).
- [IM 19] Szarka L., Zhang D., Ádám A.: How magnetotellurics is able to see through 3D near-surface inhomogeneities? *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 39(4) 381–394 (2004).

## Egyenáramú geofizika [EG 1–11]

- [EG 1] Szalai S., Koppán A., Szarka L.: Effect of positional inaccuracies on multielectrode results. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43(1) 33–42 (2008).
- [EG 2] Szalai S., Novák A., Szarka L.: Depth of Investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 14(1), 15–23 (2009).
- [EG 3] Szalai S., Novák A., Szarka L.: Which geoelectric array sees the deepest in a noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems for various two-dimensional models. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1398–1404 (2011).
- [EG 4] Szalai S., Szarka L.: An approximate analytical approach to compute geoelectric dipole-dipole responses due to a small buried cube. *Geophysical Prospecting* 48, 871–885 (2000).
- [EG 5] Szalai S., Szarka L.: On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting* 56(2), 159–175 (2008).
- [EG 6] Szalai S., Szarka L.: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays I. Linear arrays. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43(4), 419–437 (2008).
- [EG 7] Szalai S., Szarka L.: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays II. Nonlinear and focussed arrays. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43(4), 439–447 (2008).
- [EG 8] Szalai S., Szarka L.: Geoelectric arrays (Correspondence). *Current Science* 96(10), 1298 (2009).
- [EG 9] Szalai S., Szarka L.: Expanding the possibilities of two-dimensional multielectrode systems, with consideration to earlier geoelectric arrays. *Journal of Applied Geophysics* 75(1), 1–8 (2011).
- [EG 10] Szalai S., Szarka L., Prácer F., Müller I., Turberg P.: Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null-arrays. *Geophysics* 67, 1769–1778 (2002).
- [EG 11] Szarka L.: *Geo fizikai térképezés stationárius elektromos és mágneses térkomponensekkel. Kandidátusi értekezés* (1986).

## Elektromágneses geofizika általában [EM 1–7]

- [EM 1] Ádám A., Szarka L.: Geoelectromagnetism. In: Harsh K. Gupta (ed.): *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Dordrecht: Springer Tudományos Kiadó, 341–353 (2011).
- [EM 2] Ádám A., Szarka L., Verő J.: Electric field of the Earth. In: Lastovicka J. (ed.): *Encyclopedia of life support systems*. New York: FOLSS Publishers Co. Ltd. (2001) on-line.
- [EM 3] Szarka L.: Discussion on "Results of a controlled-source audiofrequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii". *Geophysics* 53(5), 726–727 (1988).
- [EM 4] Szarka L.: A Coulomb-törvény a geoelektromos anomáliák alapja. *Magyar Geo fizika* 31, 1–10 (1990).
- [EM 5] Szarka L.: Comment on „Aspects of charge-accumulation in DC resistivity experiment” by Y. Li and DW. Oldenburg *Geophysical Prospecting* 40(7), 823–828 (1992).
- [EM 6] Szarka L.: *Háromdimenziós földtani szerkezetek geofizikai leképezésének lehetőségei elektromágneses kutatómódszerekkel* (1994) (MTA doktora).
- [EM 7] Szarka L.: A gravitáció, a mágnesség és az elektromosság közötti kapcsolatokról, a geofizika szemszögéből. *Magyar Geo fizika* 43(2), 74–79 (2002).

## Mágneses fázisátalakulás a földkéregben [MF 1–3]

- [MF 1] Kiss J., Szarka L., Prácsér E.: Second-order magnetic phase transition in the Earth. *Geophysical Research Letters* 32(24), L24310 (2005).
- [MF 2] Kiss J., Zilahi-Sebess L., Szarka L.: A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus (The phenomenon of magnetism and the Hopkinson effect). *Magyar Geo fizika* 52(3), 151–169 (2011).
- [MF 3] Szarka L., Kiss J., Prácsér E., Ádám A.: The magnetic phase transition and geophysical crustal anomalies. *Chinese Journal of Geophysics – Chinese Edition* 53(3), 612–621 (2010).

## Régészeti geofizika ([RG 1–2])

- [RG 1] Szalai S., Lemperger I., Pattantyús-Ábrahám M., Szarka L.: The standardized pricking probe surveying and its use in archaeology. *Journal of Archaeological Science* 38, 175–182 (2011).
- [RG 2] Varga M., Novák A., Szarka L.: Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection. *Near Surface Geophysics* 6(1), 39–47 (2008).

## Mars-kutatás [MK 1–2]

- [MK 1] Menvielle M., Musmann G., Kuhnke F., Alexandrescu M., Berthelier J. J., Glassmeier K. H., Motschmann U., Pajunpää K., Pincon J. L., Prindahl F., Szarka L.: Contribution of magnetic measurements onboard NetLander to Mars exploration. *Planetary and Space Science* 48, 1231–1247 (2000).
- [MK 2] Pincon J. L., Menvielle M., Szarka L.: Geomagnetic induction study using the NetLander Network of magnetometers. *Planetary and Space Science* 48, 1261–1270 (2000).

## Terepi kutatás (magnetotellurika) [TK 1–10]

- [TK 1] Ádám A., Ernst T., Jankowski J., Jozwiak W., Hvozďara M., Szarka L., Westergom V., Logvinov I., Kulik S.: Electromagnetic induction profile (PREPAN95) from the East European Platform (EEP) to the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 32(1–2), 203–223 (1997).
- [TK 2] Ádám A., Kaikkonen P., Hjek S. E., Pajunpää K., Szarka L., Verő J., Wällner Á.: Magnetotelluric and audiomagnetotelluric measurements in Finland. *Tectonophysics* 90, 77–90 (1982).
- [TK 3] Ádám A., Novák A., Szarka L., Westergom V.: The magnetotelluric (MT) investigation of the Dórsjeno dislocation belt, Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 38(3), 305–326 (2003).
- [TK 4] Ádám A., Novák A., Szarka L.: Basement depths of 3D basins, estimated from 1D magnetotelluric inversion. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 42(1), 59–67 (2007).
- [TK 5] Ádám A., Novák A., Szarka L.: Tectonic weak zones determined by magnetotellurics along the CEL-7 deep seismic profile. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 40, 413–430 (2005).
- [TK 6] Ádám A., Novák A., Prácsér E., Szarka L., Westergom V.: Indication of meta-anthracite by magnetotellurics in the Kőszeg-Rechnitz Penninic window: a test area. *Acta Geodaetica et Geophysica* September 2013, 48 (3), 281–292 (2013).
- [TK 7] Ádám A., Kohlbeck F., Novák A., Szarka L.: Interpretation of the deep magnetotelluric soundings along the Austrian part of the CELEBRATION-007 profile. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43, 17–32 (2008).
- [TK 8] Ádám A., Szarka L., Steiner T.: Magnetotelluric Approximations for the Asthenospheric Depth Beneath the Békés Graben, Hungary *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 45, 761–773 (1993).
- [TK 9] Ádám A., Szarka L., Prácsér E., Varga G.: Mantle plumes of E.M distortions in the Pannonian Basin? (Inversion of the deep magnetotelluric (MT) soundings along the Pannonian Geotraverse). *Geofizikai Közlemények – Geophysical Transactions* 40, 45–78 (1996).
- [TK 10] Ernst T., Jankowski J., Semerov V. Y., Ádám A., Hvozďara M., Jozwiak W., Lefeld J., Pawliszyn J., Szarka L., Westergom V.: Electromagnetic soundings across the Tatra Mountains. *Acta Geophysica Polonica* 45, 33–44 (1997).

## Elektromágneses zajok [EZ 1–6]

- [EZ 1] Ádám A., Szarka L., Verő J., Wallner Á., Gutdeutsch R.: Magnetotellurics (MT) in mountains-noise, topographic and crustal inhomogeneity effects. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 42, 165–177 (1986).
- [EZ 2] Ádám A., Szarka L., Verő J.: *Eljárás és kapcsolási elrendezés a talaj szerkezeti és állapotjellemzőinek meghatározására a talajban jelenlévő mesterséges elektromágneses erőter jellemzése alapján.* Lapjainkszám: 186.678 esp@knet link. Benyújtás éve: 1984. Közvetítés éve: 1984. Benyújtás helye: Magyarország.
- [EZ 3] Ádám A., Szarka L., Verő J.: Natural and man-made EM variations in the Komló coalfield. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 53, 207–213 (1989).
- [EZ 4] Ádám A., Szarka L.: Time and space relation of the ELF (AMT) signals and noise. *Acta Geodactica et Geophysica Hungarica* 30, 241–256 (1995).
- [EZ 5] Szarka L.: Exploration of high resistivity basement using electrical and magnetic fields of quasi-static point sources. *Geophysical Prospecting* 31(5), 829–839 (1983).
- [EZ 6] Szarka L.: Geophysical aspects of man-made noise in the Earth. *Surveys in Geophysics* 9, 287–318 (1988).

## Fanedváramlás [FN 1–4]

- [FN 1] Koppán A., Szarka L., Wesztergom V.: Temporal variation of electrical signal recorded in a standing tree. *Acta Geodactica et Geophysica Hungarica* 34(1–2), 169–180 (1999)
- [FN 2] Koppán A., Szarka L., Wesztergom V.: Annual fluctuation in amplitudes belonging to daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series III – Sciences de la Vie* 323, 559–563 (2000).
- [FN 3] Koppán A., Fenyvesi A., Szarka L., Wesztergom V.: Measurement of electric potential difference on trees. *Acta Biologica Szegediensis* 46, 37–38 (2002).
- [FN 4] Koppán A., Szarka L., Wesztergom V.: Local variability of electric potential differences on the trunk of *Quercus cerris* L. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 2005(1), 73–81 (2005).

## Globális kérdések [GK 1–23]

- [GK 1] Brezsnýánszky K., Szarka L.: Földtudományok az emberiség szolgálatában. A Föld Bolygó Nemzetközi Éve. *Magyar Tudomány* 53, 1227–1237 (2008).
- [GK 2] Brezsnýánszky K., Szarka L.: A Föld Bolygó Nemzetközi Éve nézőpontja. *Klimabarát Hírtér* 2010. április 9.

- [GK 3] Szarka L.: *Földi katasztrófák Bill McGuire. A Guide to the End of the World (Oxford University Press, 2002) c. könyvének összefoglalása.* Tansegédlet az NYME Környezetünk: a Föld című tárgyához. (2005).
- [GK 4] Szarka L.: Geofizika a környezetvédelemben és a környezettudományban In: Fenyvesi O (szerk.): *Tudományos előadások 2006.* Veszprém: MTA Veszprémi Területi Bizottság, 2006. 59–78 (2006) (Tudományos előadások).
- [GK 5] Szarka L.: Kellemetlen igazság. *Természet Világa* 138(4), 149 (2007).
- [GK 6] Szarka L.: Globális kihívások „a Föld bolygó nemzetközi éve” tükrében. In: Gömbös E. (szerk.): *Globális kihívások. Milenniumi fejlesztési célok és Magyarország.* Budapest: Magyar ENSZ Társaság, 21–34 (2008).
- [GK 7] Szarka L. (szerk): *Geo-fizika 1-12* (2008).
- [GK 8] Szarka L.: Globális kihívások „A Föld Bolygó Nemzetközi Éve” szemszögéből. In: *MTA VEAB Munkabizottsága tudományos ülésének kiadványa.* Konferencia helye, ideje: Veszprém, Magyarország, 2008. 12. 17. Veszprém: Pannon Egyetem, 31–49 (2008).
- [GK 9] Szarka L.: A Földbolygó Nemzetközi Éve nyitórendezvénye. *Természet Világa* 139(4), 174–176 (2008).
- [GK 10] Szarka L.: „Globális felmelegedés” és kritikai gondolkodás: Gondolatok Václav Klaus Kék bolygó zöld beklyében című könyve kapcsán. *Természet Világa* 140(5), 214–215 (2009).
- [GK 11] Szarka L.: Szempontok az energetika és környezet kapcsolatához. *Magyar Tudomány* 171(8), 979–989 (2010).
- [GK 12] Szarka L.: Mozaikok az éghajlatváltozáshoz. *Magyar Tudomány* 171(5), 609–611 (2010).
- [GK 13] Szarka L.: A fenntarthatóság kulcskérdései. In: Fenyvesi O (szerk.): *MTA Veszprémi Területi Bizottság 38. közgyűlése.* Veszprém, 2010. 12. 04., 7–18 (2010).
- [GK 14] Szarka L.: Amikor a természet győz az emberen: Megszívlelendő tanulság: veszélyes üzemelet nem lenne szabad földrengéses helyekre telepíteni. *Magyar Nemzet* március 17. (2011).
- [GK 15] Szarka L.: Utolsó figyelmeztetés a világ megővésére *Magyar Nemzet*, 2011. június 16. (2011).
- [GK 16] Szarka L.: The main global environmental problems: an earth-science perspective. In: Pakoz-Andresen M., Németh R., Szalay D (eds.): *University of West Hungary* 31–35 (2011).
- [GK 17] Szarka L.: Globális kihívások. In: Kovács-Németh M. (szerk.): *Együtt a környezetért.* Győr: Palatia Nyomda és Kiadó Kft., 21–29 (2011).
- [GK 18] Szarka L.: Critical remarks addressed to climate fanatics and climate sceptics. *Periodica Oeconomica*, 133–143 (2012).
- [GK 19] Szarka L.: Globális kihívások a „Future Earth” (A Föld a jövőben) című ICSU program küszöbén. *Hadtudomány, Különszám*, 2013. május, 425–434 (2013).
- [GK 20] Szarka L., Brezsnjánysky K.: *Körkép a Földről – körkép az emberiségről.* Teremtésvédelem Hete. Segédanyag a Teremtés Hete ünnepkörhöz. Budapest: Luther Kiadó, 6–13 (2010).

- [GK 21] Szarka L., Brezsnýánszky K.: Globális környezeti alapkérdésekről. In: Baranyi B., Fodor I. (szerk.): *Környezetipar, újiparosítás és regionalitás Magyarországon*. Pécs: MTA KRITK Regionális Kutatások Intézete, 355–362 (2012).
- [GK 22] Szarka L., Brezsnýánszky K., Ádám J.: Körkép a Földről: Környezeti kérdések, fokhudo-  
mányi szemmel. *Theológiai Szemle* különszáma, 18–22 (2010).
- [GK 23] Szarka L., Gyulai Á., Verő L.: A magyar környezetgeofizika európai mércével. In: Meskó A., Glatz F., Balogh M. (szerk.): *Európai uniós csatlakozás és földtudomány*. Budapest: MTA Társadalomkutató Központ, 91–102 (2003) (Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián. Műhelytanulmányok).

## Tudomány és áltudomány, tudomány és vallás [TÁ 1–8]

- [TÁ 1] Dudich E., Szarka L.: Earth and Heaven - Geology and Theology. Sopron (Hungary), 16-18 October, 2008. In: *Planet Earth Lisbon 2009*. Lisszabon, Portugália, 2009. 11. 20. –2009. 11. 22., 61 (2009).
- [TÁ 2] Szarka L.: Ráció. *Magyar Geofizika* 33, 108 (1992).
- [TÁ 3] Szarka L.: A természettudományos ismeretterjesztés fontossága: Látványosságok és vesz-  
harang-kongatás a francia tudomány napján. *Magyar Tudomány* 43(6), 732–735 (1998).
- [TÁ 4] Szarka L.: Ami most már a várásvesztést illeti... *Magyar Geofizika* 42(3), 103–105 (2001).
- [TÁ 5] Szarka L.: „Földugárzás”. *Külföldi szepc.* 20., 4 (2001).
- [TÁ 6] Szarka L., Verő J., Westergom V.: Hírek és rémhírek a geomágneses pólusátfordulásról.  
*Ezerévforduló: Stratégiai Kutatások a Magyar Tudományos Akadémián* 7(1), 26–30 (2003).
- [TÁ 7] Szarka L.: Vallás és természettudomány. *Mentor és Tanítvány* 3(1), 120–125 (2006).
- [TÁ 8] Szarka L.: Tudomány és vallás - áltudományok, álvallások összehasonlítása. In: Unger Z.  
(szerk.): *Föld és ég: tudomány és hit: Geológia és Teológia*. Konferencia: Sopron, 2008. október  
16–18. Budapest: Hamken Kiadó, 88–100 (2009).









