

# A Swarm–A mesterséges hold mágneses méréseiből meghatározott totális mágneses anomáliák és azok vertikális gradiensének meghatározása Közép-Európára és a Pannon-medencére

KIS K.<sup>1,®</sup>, P. T. TAYLOR<sup>2</sup>, TORONYI B.<sup>3</sup>, PUSZTA S.<sup>4</sup>, WITTMANN G.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék,  
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

<sup>2</sup>Geodesy and Geophysics Laboratory, NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA

<sup>3</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék,  
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>4</sup>Fractal Bt., 1155 Budapest, Óda u. 37.

<sup>5</sup>MOL Group, 1117 Budapest, Október huszonharmadika u. 18.

<sup>®</sup>E-mail: kisk@caesar.elte.hu

A Swarm–A mesterséges hold totális mágneses méréseiből levezetett anomáliák meghatározásának lépéseit ismertetjük. A meghatározás több konverziós és szelekciós eljárás alkalmazását követeli meg. A korrekciók első lépése a CDF formátumú adatok konverziója ASCII formátumú adatokká. Azok az adatok kerültek további feldolgozásra, amelynek a  $K_p$  indexe  $\leq 1_+$ . A mérési adatok és az IGRF tér különbsége szolgáltatta az anomáliákat. Két fajta Swarm–A anomália állt rendelkezésre: 6000 leszálló és 5688 felszálló pálya. A további számításokra a leszálló pályákat használtuk. A számítások következő lépése az anomáliák (2. ábra) és az ezekhez illesztett kétdimenziós lineáris tér (3. ábra) különbségének meghatározása. Az így meghatározott anomáliák kétdimenziós Gauss-féle aluláteresztő szűrővel lettek transzformálva. A feldolgozás utolsó lépése az anomáliákban előforduló direkt komponens eltávolítása. A továbbiakban meghatároztuk az anomáliák és azok vertikális gradiensének kvalitatív értelmezését Közép-Európára és a Pannon-medencére.

## Kis, K. I., Taylor, P. T., Toronyi, B., Puszt, S., Wittmann, G.: Determination of total magnetic anomalies and their vertical gradients of Swarm–A satellite over Central Europe and Pannonian Basin

Our paper discusses the determination of total magnetic field anomalies derived from the Swarm–A satellite data; one of two low orbiting satellites of the three Swarm formations. This procedure requires several modifications. The first step is the conversion of the measured CDF data to the ASCII format. This step is followed by the selection of the data with  $K_p$  index  $\leq 1_+$ . The anomalies are determined by the removal of the IGRF from the resulting satellite data. There are two Swarm–A data sets: descending (6000) orbits and ascending (5688) orbits. For our study the descending orbits were used. The next step of calculations is to determine the difference of the two-dimensional linear field (Fig. 3) fitted to the Swarm–A anomalies and the anomalies given in Fig. 2. These anomalies are filtered by Gaussian low-pass filter. The last step of the corrections is the removal of the direct component, zero spatial frequency, from the descending anomalies. The anomalies and their vertical gradients are qualitatively interpreted over Central Europe and the Pannonian Basin.

Beérkezett: 2018. december 21.; elfogadva: 2018. december 29.

## Bevezetés

A Swarm–A mesterséges hold méréseiből levezetett totális mágneses anomáliák és azok vertikális gradienseinek meghatározása, valamint ezeknek az anomáliáknak a kvalitatív értelmezése képezi a jelen tanulmány tárgyát.

A Swarm–A, –B és –C mesterséges holdakat Rokit rakétával bocsátották Föld körüli pályára a Plesetskben található űrbázisról, 2013-ban. A Swarm küldetést az ESA (Európai Űrügynökség) koordinálja a Living Planets Program keretében.

A Swarm mesterséges holdakat közel kör alakú pályára állították 2013. november 22-én. Az A és C holdakat közel párhuzamos pályára állították, amelyeknek kezdeti magassága 460 km volt, míg a B hold 530 km-es kezdeti magasságú pályán keringett. Az A és C mesterséges holdak inklinációja  $87,4^\circ$ , míg a B holdé  $88^\circ$  volt. Az A és C holdak egyenlítői távolsága  $1,5^\circ$  volt.

A mesterséges holdak által mért mágneses tér feldolgozásának és értelmezésének több mint 50 éves története van. Az eljárások a Kozmosz, POGO, Magsat, Oersted, CHAMP és a SAC–C mesterséges holdak mérésein alapultak. Taylor et al. (1989), valamint Taylor és Schnetzler (1990) már korai tanulmányukban megfogalmazták a mesterséges holdak alkalmazhatóságát a nyersanyagkutatásban, rámutattak az alkalmazás célszerű mérési magasságára és mérések pontossági követelményeire. Ravat et al. (1993), valamint Taylor és Ravat (1995) a Magsat mérései alapján az európai tektonikai szerkezeteket azonosították. Kimutatták a Tornquist–Teisseyre tektonikai vonalat, a kurszki vasércformációt, a Közép-Svecofennian zónát, a kirunai vasércformációt, a Ladogai-öböl zónáját és a Balti-pajzsot.

Jelen dolgozat szerzői több módszert ismertettek a CHAMP mesterséges hold Pannon-medence területén mért mágneses anomáliák értelmezéséről. Az analitikusan meghatározott gradienseket és az analitikai lefelé folytatást ismerteti Kis et al. (2011) tanulmánya. A CHAMP mesterséges hold által mért mágneses anomáliáknak a Pannon-medence felett történő inverziós eljárásait tárgyalják Kis et al. (2011) és Kis et al. (2012) közleményei. A ható paramétereinek Laplace- és Gauss-féle eloszlását és az inverzió regularizációs eljárásait foglalja össze Kis et al. (2011 és 2012) cikke. A globális mágneses anomáliák litoszférából való származását tárgyalja Abramova et al. (2016) tanulmánya. Megállapításuk a CHAMP mérésein alapultak. Eredményük részben megegyezik a jelen szerzők korábbi következtetésével, amelyek szerint az anomáliák az alsó kéregből származnak. Taylor et al. (2013) tanulmánya foglalja össze a horizontális gradiensek alkalmazását és azok értelmezését. A földmágneses vektor és gradienstenzor alkalmazását tárgyalja Du et al. (2015) tanulmánya.

## Adatfeldolgozás

A Swarm mesterséges holdak mágneses mérései az ESA Level 1B adatkönyvtárban érhetők el. A Swarm holdak

mérései az ESA CDF (Constant Definition File) formátumban adóttak.

Az adatkezelés első lépése a CDF formátumú adatok – amelyek a mesterséges hold saját hardverére, valamint a sokirányú méréseire vonatkozó információk nagy mennyiségét tárolják – leválogatása és konverziója ASCII (American Standard Code for Information Interchange) formátummá, mivel a további számítások ezt kívánják meg. A letöltött és konvertált, egy napnyi időtartamú fájlok tartalmazzák a mérési adatok keletkezését és időpontját, a mérési adatok gömbi polárkoordináta-rendszerbeli (hosszúság-, szélesség-, gömbi sugár-) adatait, a mágneses tér adott helyen mért  $X$ ,  $Y$  és  $Z$  összetevőit, a totális mágneses tér értékeit és a mérési adatok hibáját. A figyelembe vett adatok 2015. február 28. és július 20. közötti időintervallumba esnek. A későbbiek során az adatok 450 km magasságban kerültek meghatározásra. Mindegyik mesterséges hold rendelkezett a mágneses tér három komponensének mérésére szolgáló flux-gate vektor-magnetométerrel és a totális tér meghatározására alkalmas Overhauser-féle skalár-magnetométerrel. A magnetométerek másodpercenként végeztek méréseket, így az egy nap időtartamú adatsor  $4 \times 86.400$  mérési adatot tartalmazott. Ha az átlagos 90 perces keringési időt tekintjük, akkor az egy nap időtartamú adatsorok mintegy 16 Föld körüli forgásnak felelnek meg.

Azok az adatok kerültek további feldolgozásra, amelyek a  $K_p$  (planetáris indexe)  $\leq 1_+$ . A  $K_p$  indexeket az IAGA International Service of Geomagnetic Indices táblázata tartalmazza.

Az adatkezelés következő lépése az anomáliák meghatározása volt. Az anomáliák viszonyítási szintje az IGRF 12. generációja (Thébaud et al. 2015) volt. A földi mágneses tér  $W$  potenciálját a

$$W(r, \theta, \lambda, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \times \left[ g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda) \right] P_n^m(\cos\theta)$$

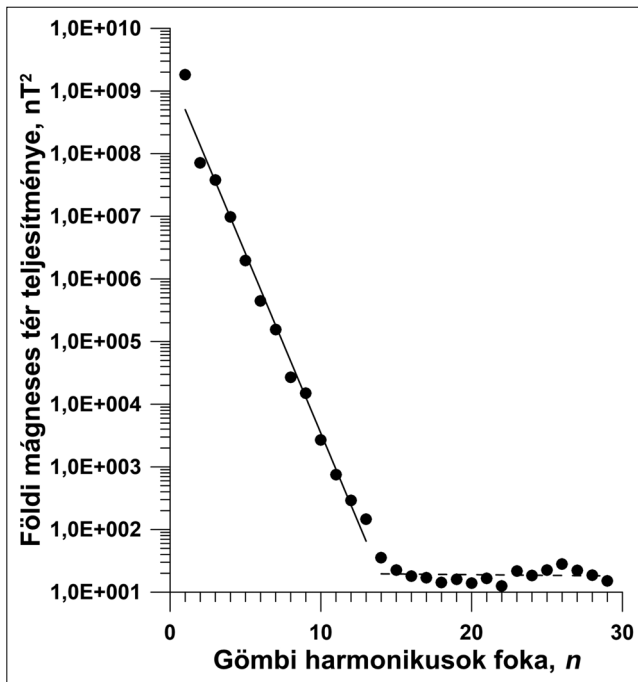
egyenlet adja meg, ahol  $r$  a gömbi távolság,  $\theta$  a pólustávolság,  $\lambda$  a gömbi szélesség,  $t$  az idő,  $a$  a gömb sugara (6371,2 km),  $g_n^m$  és  $h_n^m$  a Gauss-féle sorfejtés időtől függő együtthatói,  $P_n^m(\cos\theta)$  az  $n$ -ed fokú,  $m$ -ed rendű gömbfüggvény. A  $W$  potenciálból negatív gradien képzéssel kapjuk meg a földi mágneses tér  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  összetevőit, azaz

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta}, \quad Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial W}{\partial \lambda} \quad \text{és} \quad Z = \frac{\partial W}{\partial r}.$$

A  $T$  totális teret a következő összefüggés szolgáltatja:

$$T = [X^2 + Y^2 + Z^2]^{1/2}.$$

Macmillan publikált egy FORTRAN programot az IGRF meghatározására, amely az IAGA honlapján található meg. Ez a program jelen számítások céljaira közvetlenül nem használható, ennek továbbfejlesztett változatára van szükség. A továbbfejlesztett program  $n = 16$  fokig



1. ábra A földi mágneses tér logaritmus teljesítményspektruma az együtthatók  $n$  fokának függvényében. Az illesztett egyenesek illusztrálják a földmagból és a földkéregből származó összetevőket

Figure 1 Logarithmic power spectrum of the geomagnetic field plotted the spherical harmonics degree  $n$ . The fitted solid line indicates the contributions from the core and the dashed line the crust

számítja ki az IGRF-t a mesterséges hold pontos pozíciójának és idejének megfelelő helyre. Az 1. ábra illusztrálja

a sorfejtés együtthatóiból meghatározott a Mauersberger (1956)–Lowes (1972)-féle  $R_n$  spektrumot:

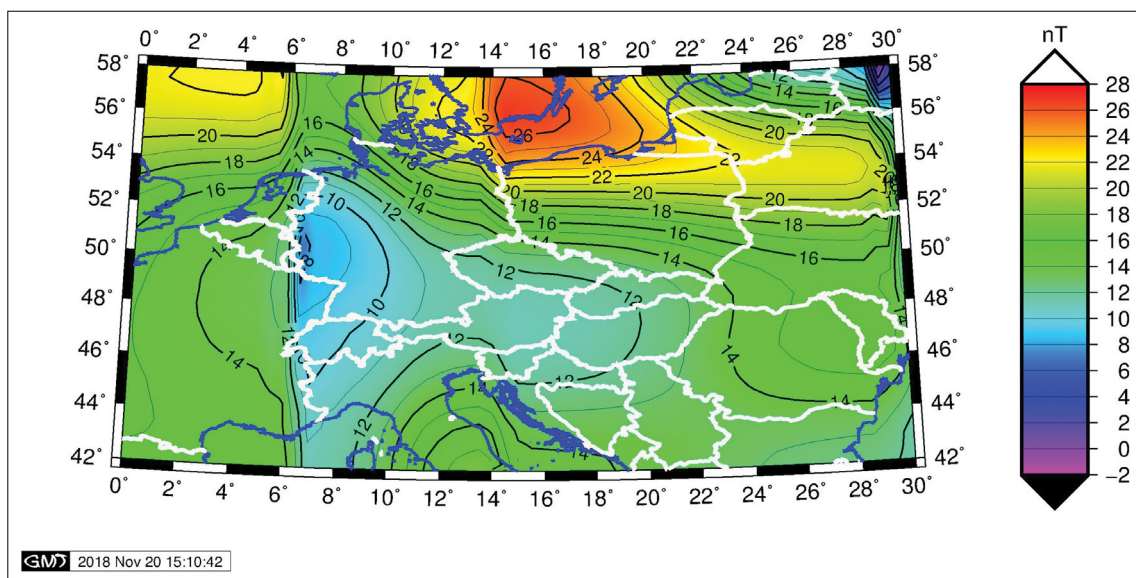
$$R_n = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]$$

A logaritmus spektrumhoz illesztett egyenesek világosan mutatják a földmagból és a földkéregből származó járulékokat. A nagyobb meredekséggel jellemzett egyenes tartalmazza a földmagból származó hatást, míg a kisebb meredekséggel adott egyenes szolgáltatja a földkéregből eredő járulékokat. Amennyiben  $n = 16$ -ig vesszük figyelembe az együtthatókat, akkor a földmagból származó hatások jelentkeznek a sorfejtéssel meghatározott tér értékeiben. A mérés és az IGRF érték különbsége adja a  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  és a  $\Delta Z$ , valamint a  $\Delta T$  nyers anomáliákat, amelyek a földkéregből származnak.

Az eddig említett korrekciók után a meghatározott adatsorok nem mutatnak használható anomáliatérképet (2. ábra). Az adatkezelés során további eljárások voltak szükségesek. A lokális adatsort úgy lehetett tovább javítani, hogy a szélességtől és hosszúságtól függő kétdimenziós lineáris trendet illesztettük a meghatározott anomáliaképhez (3. ábra), amely a következő alakú:

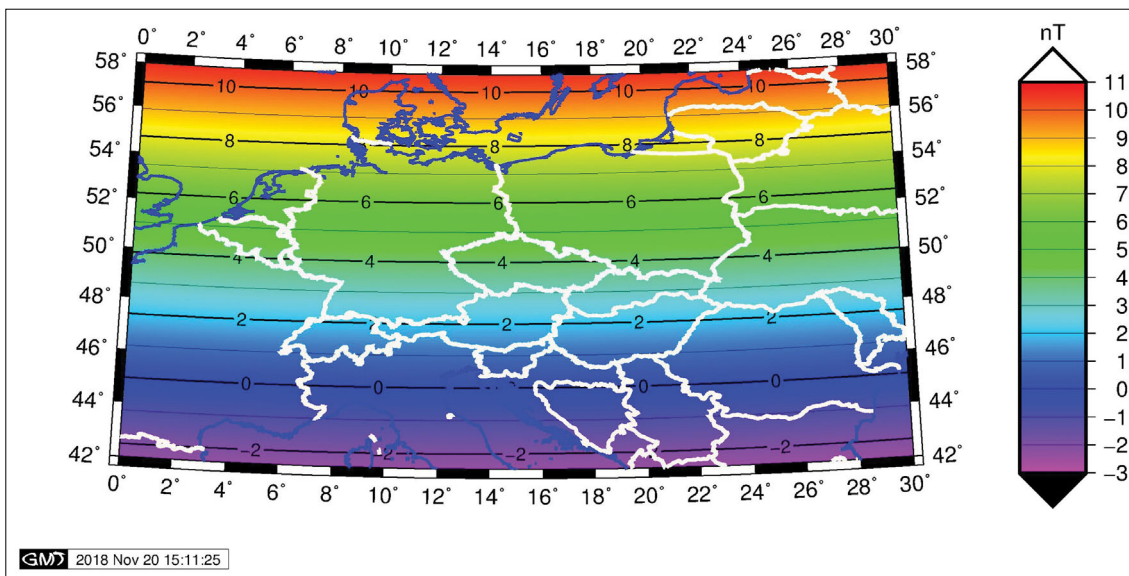
$$T(\Delta\varphi, \Delta\lambda) = s_1 + s_2\Delta\varphi + s_3\Delta\lambda.$$

Közép-Európára meghatározott lineáris trend együtthatói  $s_1 = -36,8449$ ,  $s_2 = 0,8203$  és  $s_3 = -0.00472$ . Így belátható, hogy a lineáris trend elsősorban a  $\Delta\varphi$  változótól függ. A meghatározott lineáris trend kifejezi az anomáliákban jelentkező észak–dél irányú tendenciát. Amennyiben ezt a hatást csökkenteni akarjuk, akkor lineáris trend meghatározott értékeit levonjuk az anomáliákból.



2. ábra A Swarm–A mesterséges hold méréseiből 450 km magasságban meghatározott nyers totális mágnesestér-anomáliák a járulékos korrekciók elvégzése előtt Közép-Európa egy részén. Az anomáliák Albers-féle területtartó vetületben, az anomáliák nT egységekben ábrázolva

Figure 2 Swarm–A total magnetic anomaly field at 450 km altitude over a part of Central Europe before long-wavelength fields are removed. The anomalies are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT



**3. ábra** A totális mágneses anomáliákhoz (2. ábra) illesztett kétdimenziós lineáris tér Közép-Európa egy részén Albers-féle területtartó vetületben, az anomáliák nT egységben ábrázolva

**Figure 3** A two-dimensional linear magnetic field is fitted to the magnetic anomalies (of Fig. 2) over a part of Central Europe. Isolines are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT

A további átalakítás Gauss-féle aluláteresztő szűrő (Meskó 1984) alkalmazását jelenti. Az aluláteresztő szűrő egyenlete:

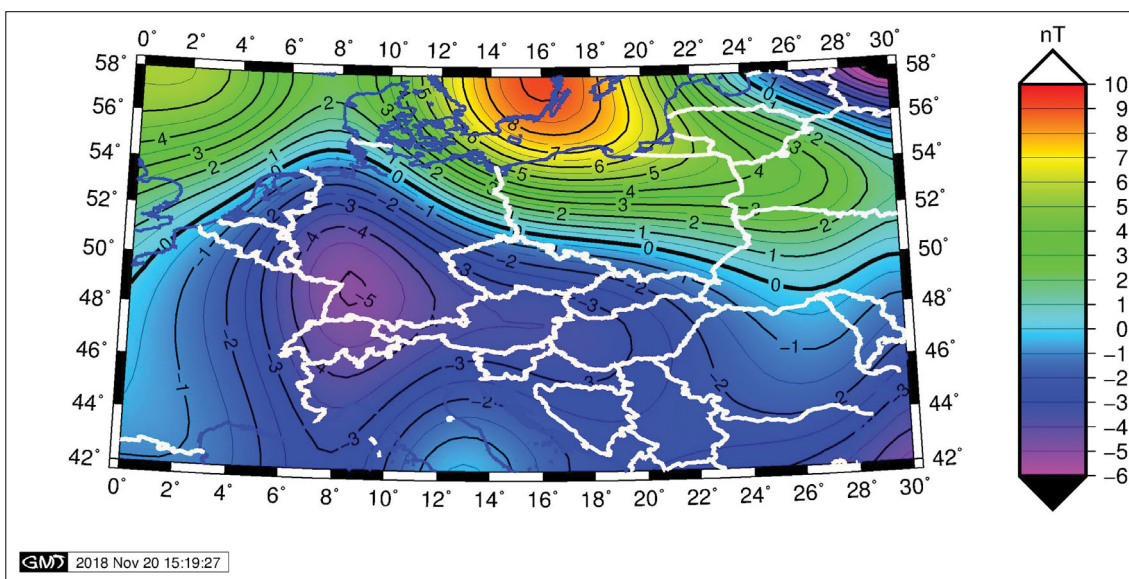
$$s(r') = \pi d^2 \left(\frac{m}{36}\right)^2 \exp\left\{-\left(\frac{\pi m r'}{36}\right)^2\right\},$$

ahol  $m$  a szűrő paramétere,  $d$  a mintavételi távolság,  $r'$  a dimenzió nélküli változó (mintavételi távolság egységeiben mérve) a szűrő középponti elemétől mérve.

Az optimális  $m$  paraméter megválasztása több numerikus kísérlet után történt meg. Definiáljuk az  $f_c$  vágási

frekvenciát a  $-3$  dB erősítéssel (Meskó 1984). A mintavételi távolság fokban  $0,25^\circ$ , így az ennek megfelelő mintavételi távolság  $29,76$  km a mesterséges hold magasságában. Így a szűrő az  $1820$  km-nél hosszabb hullámhosszokat engedi át.

Az adatkezelés utolsó előtti lépése a pályák felszálló és leszálló ágra történő szeparálása volt. A feldolgozás során kiderült, hogy a leszálló pályák adnak alkalmazható eredményt, mert a felszálló ág adatai sokkal zajosabbak. A kiválasztott területre  $11\,688$  mérési adat tartozott, amelyből  $6\,000$  leszálló pálya adata került kiválasztásra.



**4. ábra** Közép-Európára meghatározott totális mágneses anomáliák az összes korrekció elvégzése után,  $450$  km magasságban. Az anomáliák Albers-féle területtartó vetületben, az anomáliák nT egységekben ábrázolva

**Figure 4** Total magnetic anomalies at  $450$  km altitude over Central Europe longer wavelength (IGRF) have been removed. Isolines are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT

A meghatározott leszálló pályák rendszerint tartalmaznak egyenkomponenst, ezért az anomáliák átlagértékének levonása célszerű. A felsorolt eljárások alkalmazása után jutottunk a 4. ábrán bemutatott, leszálló pályákból meghatározott anomáliatérképig. Ezek az anomáliák már értelmezhető eredményt adtak.

Az anomáliák csak Közép-Európára vonatkoznak. A vizsgált terület olyan gömbi négyszögre esett, amely szélességben a  $42^\circ \leq \varphi \leq 58^\circ$  és hosszúságban  $0^\circ \leq \lambda \leq 30^\circ$  közötti intervallumban található. A leszálló adatokat használtuk a 4. ábrán bemutatott anomáliák levezetéséhez. A számítások eredményei 450 km magasságra vonatkoznak.

A későbbiek során a totális anomáliák vertikális gradiensét is kiszámítottuk (5. és 7. ábra). Az értelmezést a későbbi fejezetben tárgyaljuk). A gradiensek numerikus meghatározására szolgáló eljárást Kis és Pusztai (2006) tanulmánya ismerteti. Az ismertett eljárást korábban sikerrel alkalmaztuk Kis et al. (2011) és Kis et al. (2014) tanulmányaiban. Az anomáliatérképekből meghatározott vertikális gradiensek segítségével kimutatható a földtani szerkezet mélységének változása, a földtani ható mágneszettségében bekövetkezett változás vagy mindkét hatás együttesen. (Ábrázolási okból a bemutatott vertikális gradiensek nT/10 km egységben lettek ábrázolva, így az egységek nagyságrendje áttekinthetővé válik.)

### Az anomáliák kvalitatív értelmezése

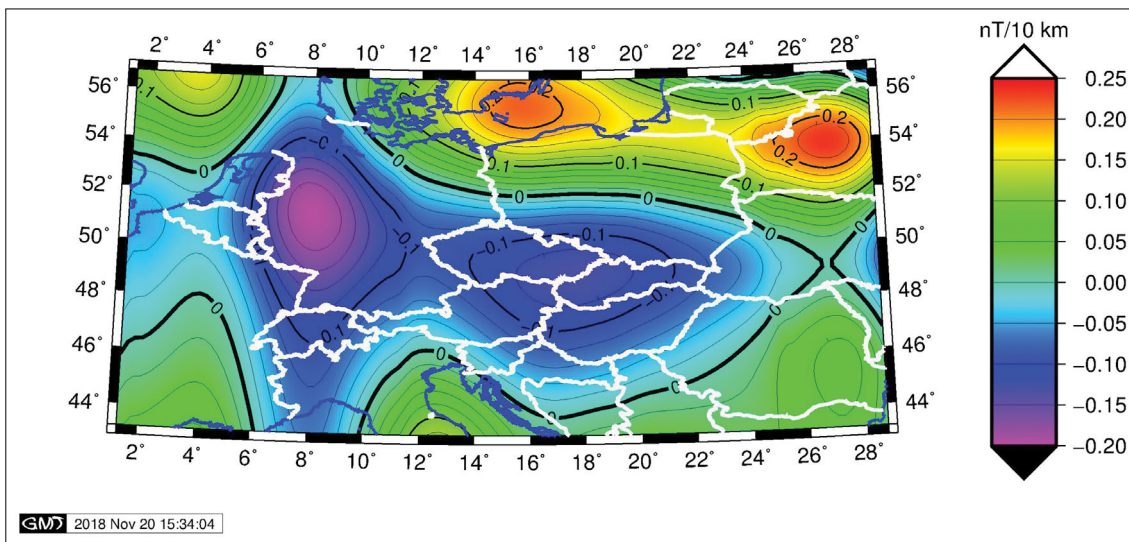
A 4. ábrán bemutatott totális mágneses anomáliák felismerhetően mutatják Közép-Európa földtani viszonyait, amelyek a mesterséges holdak magasságában is jelentkeznek. Az anomáliák elhelyezkedése mutatja a közép-európai Magsat-minimumot (Ravat et al. 1993) Németország területén. Ez minimum a vékony mágneses kéregnek fe-

lertethető meg. A kéregvastagság ezen a területen 8–10 km. A térkép szintén mutat egy minimumzónát a Pannon-medence területén. Ezek a totális mágneses anomáliákban jelentkező minimumzónák egybeesnek a nagyobb hőáramsűrűséggel rendelkező területekkel, ugyanis a mágneses kéreg ezeken a területeken vékonyabb. Amennyiben elfogadjuk Wasilewski et al. (1979) és Wasilewski et al. (1992) megállapításait, akkor a vékony kéreg és a mágneses minimum összefüggése nyilvánvalóvá válik. A 4. ábrán a zero izovonal megfelel a Tornquist–Teisseyre tektonikai vonalnak. Az ábra illusztrálja az paleozoikumi Európai-tábla és a prekambriumi Orosz-tábla érintkezési zónáját. A paleozoikumi Európai-tábla területén a kéreg vastagsága 30–35 km, míg a prekambriumi Orosz-tábla 42–47 km-keg vastagsággal rendelkezik. A térkép északi részén a Kiruna mágneses anomália egy része látható. Az 5. ábrán látható vertikális gradiensanomália markánsabban illusztrálja Közép-Európa tektonikai viszonyait, az Európai-tábla és az Orosz-tábla elkülönülését, a Magsat minimumzónát Németország területén, és a Tornquist–Teisseyre-vonalat.

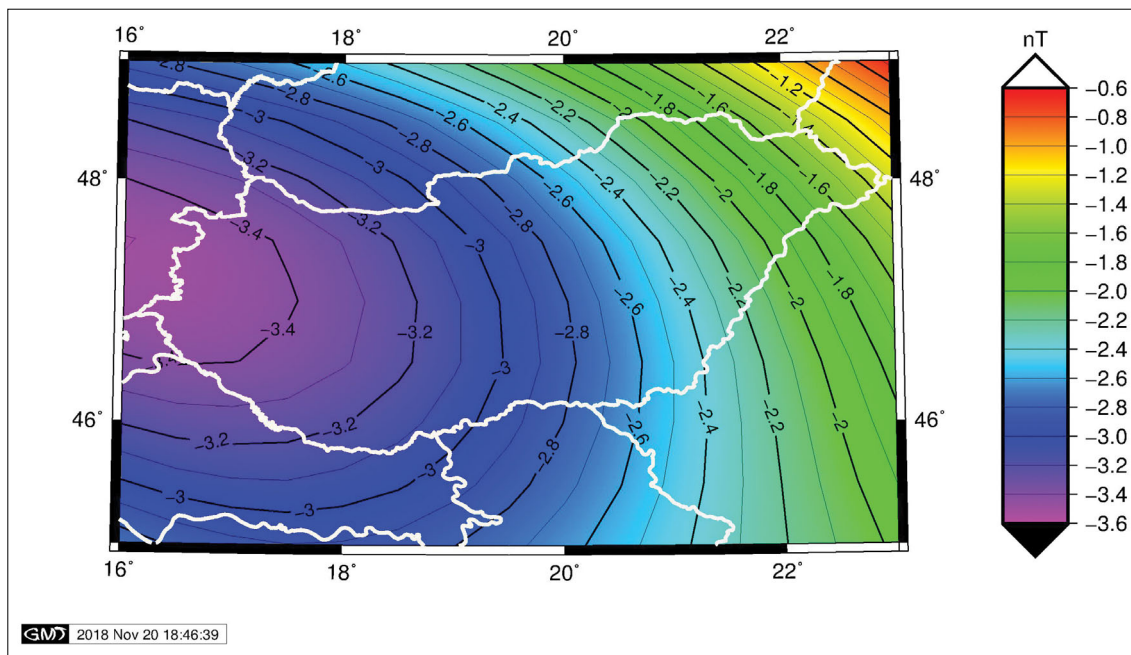
A Pannon-medence földtani kialakulását több tanulmány (Horváth 1993, Chang et al. 2010, Tašárova et al. 2016) is ismerteti. A Pannon-medence ív mögötti medence, amelyet az Alpok, Kárpátok és a Dinaridák hegységei fognak közre. A Pannon-medence kialakulásában az Eurázsiai-lemez és az Adriai-mikrolemez ütközése játszik szerepet.

A Pannon-medence kialakulása három – ún. pre-rift, syn-rift és post-rift – fázisra osztható (Horváth, 1993):

- A pre-rift fázisban az alpi orogenezis során kialakult medencealjzat deformálódott és gyűrődött paleozoikumi és mezozoikumi szerkezetekből áll, amelyeket kevés deformált üledékes rétegek fednek le. A Pannon-medence kialakulásában döntő szerepet játszott a triász-



5. ábra A totális mágneses anomáliák vertikális gradiense Közép-Európára 450 km magasságban, a vertikális gradiensek Albers-féle területtartó vetületben, az anomáliák nT/10 km egységekben ábrázolva  
 Figure 5 Vertical gradients of the total magnetic anomalies in Fig. 4 over Central Europe. Isolines are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT/10 km



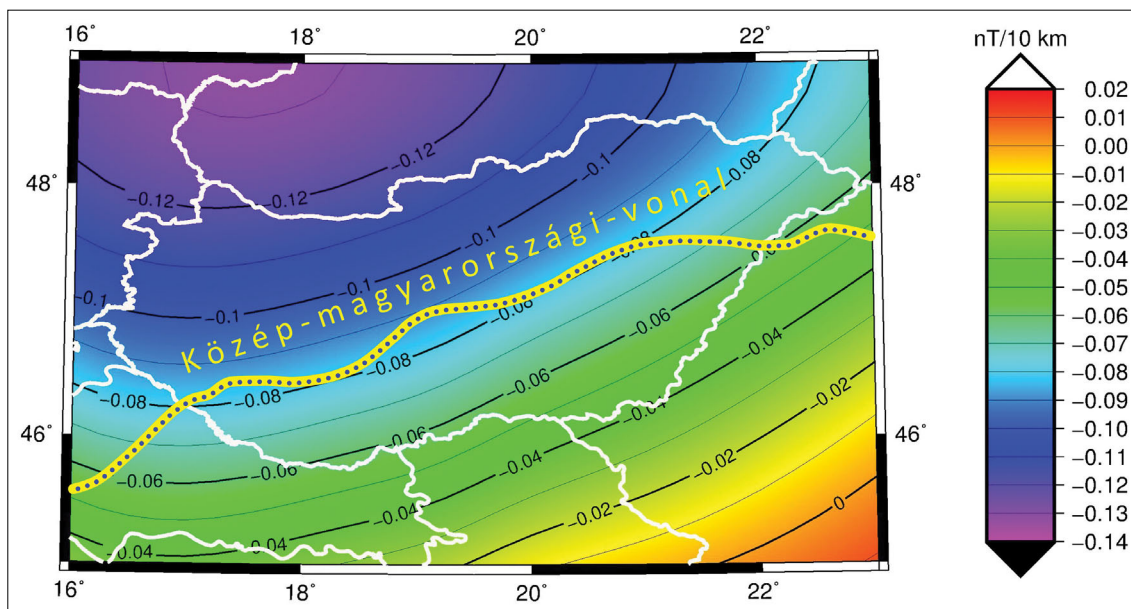
**6. ábra** Totális mágneses anomáliák 450 km magasságban a Pannon-medence területén. Az anomáliák Albers-féle területtartó vetületben adóttak, az anomáliák nT egységekben ábrázolva

**Figure 6** Total magnetic anomalies at 450 km altitude over the Pannonian Basin. Isolines are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT

kréta Neothetys és a középső jura Alpi-thetys kinyílása és bezáródása. Ezeknek a tektonikai folyamatoknak következménye, hogy az ALCAPA- (Alpok–Kárpátok–Pannon-) egység és a Tisza–Dácia-egység elkülönültek az Európai-lemeztől a késői jura korban. A Tisza-egység eltávolodott az Európai-lemeztől a középső jurában és

érintkezett a Dácia-egységgel a késői jurában – korai krétában. Ez a két tektonikai egység az ALCAPA és Tisza–Dácia a Közép-magyarországi-vonal mentén találkozik (Csontos, Nagymarosy 1998).

– A syn-rift fázisban az Adriai-mikrolemez délnyugat irányú nyomást fejtett ki, és ez a hatás oldaleltolódásos



**7. ábra** A totális mágneses anomáliák vertikális gradiense 450 km magasságban a Pannon-medence területén, a Közép-magyarországi-vonal kiemelten látható. Az anomáliák Albers-féle területtartó vetületben, anomáliák nT/10 km egységekben ábrázolva

**Figure 7** Vertical magnetic field gradients of the total magnetic anomalies (Fig. 4) at 450 km altitude. The Mid-Hungarian line is highlighted. Isolines are plotted in an Albers equal area projection. Color bar gives field in nT/10 km

vetőket okozott a korai miocénben. A medence intenzív extenziója, a kéreg süllyedése és a litoszféra töredezése a korai miocén karakterisztikus eseményei. A litoszféra vékonyodása és a köpeny diapír jellege nagy termális anomáliát eredményezett a korai miocénben. Az ALCAPA-egység az óramutató járásával ellentétes forgást eredményezett, míg a Tisza–Dácia-egység az óramutató járásával azonos irányú forgást mutatott. A kéregnek ez a két egysége a Közép-magyarországi-vonal mentén érintkezett (Márton, Fodor 2003).

- A post-rift fázisban a termális anomália csökkent, a késői miocéntól a pliocénig. Az extenzió lassan kompresszióvá alakult. A medence süllyedése lassan befejeződött, és lassú emelkedés kezdődött. Az emelkedés mértéke nagyobb volt a medence nyugati részén. További üledékes kőzetek keletkezése folytatódott ebben a fázisban. A 6. ábrán a Pannon-medence területére eső totális mágneses anomáliák láthatók. Ez az anomália-térkép a 4. ábra kinagyított része.

A meghatározott vertikális gradiensek izovonalai tendenciájukban kifejezik az ALPACA- és a Tisza–Dácia-egységek kontaktzónáját, a Közép-magyarországi-vonalat (7. ábra) (Csontos, Nagymarosy 1998, Márton, Fodor 2003).

A Pannon-medence termikus viszonyait Horváth et al. (2015) foglalja össze. Az átlagos geotermikus gradiens a felső 5000 m-ben 40–50 °C/km, a hőáramsűrűség értéke 50–130 mW/m<sup>2</sup>, átlagosan 100 mW/m<sup>2</sup> értékűnek tekinthető. A Pannon-medencére vonatkozó, mintegy 1900–5000 m mélységben mért hőmérsékletmérések alapján extrapoláltjuk a geotermikus gradiens értékét, akkor a következő következtetésre jutunk. Legyen a magnetit Curie-hőmérséklete (Blakely 1988) 580 °C a permanens mágneszettség határhőmérséklete, akkor a permanens mágneszettség jelenléte 11,6–14,6 km mélységig következik be. A Pannon-medencében található nagy mélységű és kiterjedésű mágneses hatók maximális mélysége valószínűleg az alsó kéregben található.

Az üledékes rétegek átlagosan 3 km vastagok a Pannon-medencében, az alsó kéreg vastagsága vékonyabb. A Moho átlagos mélysége a Pannon-medencében 25 km (Chang et al. 2010). Ezzel azonos eredményt kapott Grácer és Wéber (2012) a longitudinális hullámok sebességének vizsgálata alapján. A kéreg szerkezetét a Rayleigh-hullámok tomográfiai vizsgálata alapján Szanyi et al. (2013) határozta meg.

## Hibaszámítás

Az elvégzett számítások Gauss-féle hibaterjedési törvény alapján készültek (Clifford 1973), csak az eredmények szóráit ismertetjük.

A Swarm–A mesterséges hold pozícióját megadó GPS-mérések nagy pontosságúak voltak, így ezeknek a méréseknek hibáit elhanyagoltuk. A Swarm–A mesterséges

hold Overhauser-magnetométere szintén nagy pontossággal mérte meg a totális mágneses teret. Ezeknek a méréseknek a szórása 0,4 nT (kicsit túlbecsülve). Az anomáliák meghatározása különbségképzéssel történt, a mért mennyiségekből levontuk a Gauss-féle sorfejtéssel meghatározott IGRF globális mágneses teret. Az IGRF elméleti szórása 1 nT. Így a meghatározott anomália szórása 1,4 nT. (Az anomáliák számítással meghatározott szórása 1,2 nT). A két szórás nagyjából hasonló eredményt adott. A lineáris trend szórása 1,19 nT, így az eredményezett szórás 2,59 nT. A felülvágó szűrés együtthatói egységnyire voltak normálva, az eredményezett szórás 2,59 nT. A gradiensképzés együtthatói szintén egységnyi normával rendelkeztek, így szórásuk 0,087 nT/km.

## Következtetések

A Swarm–A mesterséges hold méréseiből levezetett anomáliatérképek jól illusztrálják a vizsgált területek regionális földtani viszonyait. Ez a tény mutatja a mesterséges holdak méréseinek alkalmazhatóságát a földtani kutatásban. Az anomália-adatsorokból meghatározott vertikális gradiensek kiemelik a tektonikai változásokat. Sűrűbb mintavételezés következtében sikerült kimutatni a vertikális gradiensekben a Közép-magyarországi-vonal által okozott tendenciát 450 km magasságban.

## A tanulmány szerzői

Kis Károly, Patrick T. Taylor, Toronyi Bence, Pusztai Sándor, Wittmann Géza

## Hivatkozások

- Abranova D. Yu., Filipov S. V., Abranova L. M., Varentsov I. M., Lazovskii I. N. (2016): Changes of lithospheric magnetic anomalies with altitude (According to the CHAMP satellite). *Geomagnetism and Aeronomy*, 56(2), 239–248.
- Chang S.-J., van der Lee S., Flanagan M. P., Bedle H., Marone F., Matzel E. M., Pasyanos M. E., Rodgers A. J., Romanowicz B., Schmid C. (2010): Joint inversion for three-dimensional S velocity mantle structure along the Tethyan margin. *Journal of Geophysical Research*, 115, B08309, DOI: 10.1029/2009JB007204.
- Clifford A. A. (1973): *Multivariate Error Analysis*. Applied Science Publishers, Ltd., London.
- Csontos I., Nagymarosy A. (1998): The Mid-Hungarian line: a zone of repeated tectonic inversion. *Tectonophysics*, 257, 51–71.
- Blakely R. J. (1988): Curie-temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 93(B10), 11817–11832.
- Du J., Chen C., Lesur V., Wang L. (2015): Non-singular spherical harmonic expressions of geomagnetic vector and gradient tensor fields in the local north-oriented reference frame. *Geoscientific Model Development*, 8, 1979–1990.
- Grácer Z., Wéber Z. (2012): One-dimensional P-wave velocity model for the territory of Hungary from local earthquake data. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 47(3), 344–357, DOI: 10.1556/AGeod.47.2012.3.5.

- Horváth F. (1993): Toward a mechanical model for the formation of the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 226, 333–357.
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., Koroknai B., Pap N., Tóth T., Wórum G. (2015): Evolution of the Pannonian Basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53, 328–352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009>.
- Kis K. I., Pusztas S. (2006): Application of the magnetic field derivatives for locating Sarmatian graves. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 13–26. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.12.002.
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztas S. (2011): Inversion of magnetic measurements of the CHAMP satellite over the Pannonian Basin. *Journal of Applied Geophysics*, 75, 412–418. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.07.018.
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztas S. (2012): Interpretation of the total magnetic field anomalies measured by the CHAMP satellite over a part of Europe and the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 47, 130–140, DOI: 10.1556/AGeod.47.2012.2.2.
- Kis K., Taylor P. T., Wittmann G. (2014): A földi mágneses tér gradienseinek meghatározása mesterséges holdak méréséből és a kurszki mágneses anomália inverziója. *Magyar Geofizika*, 55, 150–162.
- Lowes F. J. (1974): Spatial power spectrum of the main geomagnetic field and exploration to the core. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 36, 717–730.
- Márton E., Fodor L. (2003): Tertiary paleomagnetic results and structural analysis from the Transdanubian Range (Hungary): Rotational disintegration of the AlCaPa unit. *Tectonophysics*, 363(3–4), 201–224. DOI: 10.1016/S0040-195(02)006-72-8.
- Mauersberger P. (1956): Das mittel der Energiedichte des geomagnetischen Hauptfeldes an der Erdoberfläche und seine säkulare Änderung. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 65, 207–215.
- Meskó A. (1984): Digital Filtering: Applications in Geophysical Exploration for Oil. *Akadémiai Kiadó, Budapest*, p. 635.
- Ravat D., Hinze W. J., Taylor P. T. (1993): European tectonic features observed by Magsat. *Tectonophysics*, 220, 157–173.
- Szanyi Gy., Grácz Z., Győri E. (2013): Ambient seismic noise Rayleigh wave tomography for the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 48, 209–220. DOI: 10.1007/s40328-013-0019-3.
- Taşárova Z. A., Fullea J., Bielik M., Šroda P. (2016): Lithospheric structure of Central Europe: Puzzle pieces from Pannonian Basin to Trans-European Suture Zone resolved by geophysical-petrological modeling. *Tectonics*, 35, 722–753. DOI: 10.1002/2015TC003935.
- Taylor P. T., Kis K. I., Wittmann G. (2013): Interpretation of CHAMP magnetic anomaly data over the Pannonian Basin region using lower altitude horizontal gradient data. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 48, 275–280. DOI: 10.1007/s40328-013-0026-4.
- Taylor P. T., Ravat D. (1995): An interpretation of the Magsat anomalies of central Europe. *Journal of Applied Geophysics*, 34, 83–91.
- Taylor P. T., Schnetzler C. C., Regan R. D. (1989): Satellite magnetic data: How useful in exploration? *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, Nov. 1989, 26–28.
- Taylor P. T., Schnetzler C. C. (1990): Satellite magnetic data: The exploration industry rates their usefulness. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, Oct. 1990, 42–43.
- Thébault E., Finlay Ch. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., L  ger J-M., Lesur V., Lowes F. J., Macmillan S., Manda M., Manoj Ch., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T. J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. (2015): International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth Planets and Space*, 67, 79. DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.
- Wasilewski P. J., Thomas H. H., Mayhew M. A. (1979): Moho as a magnetic boundary. *Geophysical Research Letters*, 6(7), 541–544.
- Wasilewski P. J., Mayhew M. A. (1992): The Moho as a magnetic boundary revised. *Geophysical Research Letters*, 19(22), 2259–2262.