

A CHAMP mesterséges hold mágneses méréseinek értelmezése a Pannon-medence tartományában¹

KIS KÁROLY², PATRICK T. TAYLOR³, PUSZTA SÁNDOR⁴, WITTMANN GÉZA⁵,
HYUNG RAE KIM⁶, TORONYI BENCE⁷, TORSTEN MAYER-GÜRR⁸

A CHAMP méréseiből meghatározott mágneses anomáliák rendszerint gömbi polárkoordináta-rendszerben hozzáférhetők, addig az inverzióhoz szükséges direkt feladat egyenletei általában helyi derékszögű koordináta-rendszerben állnak rendelkezésre. A gömbi polárkoordináták egy translációval (eltolással) és egy rotációval (forgatással) transzformálhatók helyi derékszögű koordináta-rendszerbe. A Pannon-medence közepén elhelyezkedő mágneses anomália inverziós modellje háromszög keresztmetszetű, függőleges oldallapokkal határolt, vízszintes fedő- és alaplapokkal rendelkező prizma. A inverzió célja a modell geometriai paramétereinek meghatározása rögzített remanens mágnesezettség mellett. A inverzióban szereplő minimum feladat numerikus megoldása simulated annealing eljárással került megoldásra. Az anomália központi része keresztezi a Tiszai egységet. A mágneses anomália forrásai különböző eredetű fragmentumokból: ofiolitokból és metamorf kristályos kőzetekből állhatnak.

KIS, K.²; TAYLOR, P. T.³; PUSZTA, S.⁴; WITTMANN, G.⁵; HYUNG RAE KIM⁶; TORONYI, B.⁷; MAYER-GÜRR, T.⁸:
Interpretation of the CHAMP magnetic measurements over the Pannonian Basin

Magnetic anomaly data recorded by the low-Earth orbiting geophysical satellite CHAMP are interpreted using both a forward and inverse method. These data are given in spherical polar coordinates. In the forward modeling interpretation the equations are given in Cartesian coordinates. For the inverse method we make a transformation between spherical and Cartesian coordinates by a single translation and rotation. Using the forward magnetic modeling program we modeled the CHAMP data from the central part Pannonian basin by a triangular body. The same model was also applied to our inversion method. The aim of inversion is the determination of the dimensions of the triangular prism model when the direction of remanent magnetization known. The minimum problem of the inversion is solved by the simulated annealing method. Our results show that the source of the central anomaly, covering the Tisia Composite Terrane, is fragments of ophiolites and the crystalline metamorphic complex.

Bevezetés

A CHAMP (Challenging Mini Satellite Payload) német fejlesztésű mesterséges holdat Kozmosz-3M rakétával az oroszországi Pleszeck bázisról állították közel poláris, 87° inklinációjú Föld körüli pályára 2000. július 15-én. A hold pályája közel kör alakú, felszíntől mért kezdeti magassága 454 km. A Moszkvától északkeletre található Pleszeck bázis földrajzi helyzete (62° 50' É; 40° 30' K) tette lehetővé a közel poláris pálya biztosítását. A mesterséges hold keringési ideje 93,55 perc. A hold működését úgy tervezték, hogy a 2001-es napaktivitás maximum idején is végezzen mágneses méréseket. A CHAMP a Lyngbyben lévő Technica University of Denmark által kifejlesztett vektor (fluxgate), és a Grenobleban található Laboratoire d'Electronique de Technologie et d'Instrumentation által

készített skalár (overhauser) magnetométerekkel rendelkezik. A magnetométerek érzékelőit 4 m távolságban helyezték el a mesterséges hold elektronikus egységeitől. A magnetométerek mérési pontossága $\pm 0,5$ nT.

A tanulmányba foglalt számítások célkitűzése a CHAMP mágneses méréseiből meghatározott, a Pannon-medence tartományában található anomália kvantitatív értelmezése, azaz az anomáliát okozó ható paramétereinek inverzióval történő becslése.

Adatok transzformációja

A mesterséges holdak méréseiből meghatározott anomália-térképek rendszerint gömbi polárkoordináta-rendszerben állnak rendelkezésre, amelynek elemei: az r a koordináta-rendszer kezdőpontjától (a Föld középpontjától) mért távolság, θ a gömbi pólustávolság, és λ a gömbi hosszúság. Az anomáliákat létrehozó hatók terét leíró egyenletek általában helyi derékszögű xyz koordináta-rendszerben adottak. Mivel az egyenletekben szereplő hatóparaméterek értékét kívánjuk inverziós eljárással meghatározni, ezért a két koordináta-rendszer közötti átszámítást el kell végezni, amely egy translációval és egy rotációval adható meg.

Legyen az XYZ koordináta-rendszer origója a gömbi polárkoordináta-rendszer kezdőpontjához rögzítve! Az X tengely az Egyenlítő síkjában mutasson a greenwichi meridián irányába, az Y tengely az Egyenlítő síkjában keleti irányban található, míg a Z tengely essen egybe a Föld forgástengelyével. Ekkor az

1 Beérkezett: 2006. január 24-én

2 MTA-ELTE Geofizikai és Környezetfizikai Kutatócsoport,
H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

3 Planetary Geodynamics Laboratory NASA/GSFC, Greenbelt,
MD 20771 USA

4 Fractal Bt., H-1155 Budapest, Óda u. 37.

5 MOL Magyar Olaj- és Gázipari Rt. Geofizikai Felügyelet,
H-1117 Budapest, Budafoki út 79.

6 UMBC/GEST and Planetary Geodynamics Laboratory
NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771 USA

7 Geodéziai és Térképészeti Rt., H-1149 Budapest, Bosnyák tér 5.

8 Institute of Theoretical Geodesy, University of Bonn,
Nussalle 17, D-52115 Bonn, Germany

$$X = r \sin \theta \cos \lambda, \quad Y = r \sin \theta \sin \lambda \quad \text{és} \quad Z = r \cos \theta \quad (1)$$

összefüggések érvényesek a kétféle koordináták között. Toljuk el az $x'y'z'$ koordináta-rendszer origóját az X, Y és Z tengelyekkel párhuzamosan az r_0, θ_0, λ_0 koordinátájú pontba. Ez a pont lesz a későbbi xyz koordináta-rendszer origója. Az eltolás t_x, t_y és t_z koordinátái:

$$\begin{aligned} t_x &= r_0 \sin \theta_0 \cos \lambda_0, \\ t_y &= r_0 \sin \theta_0 \sin \lambda_0, \quad \text{és} \\ t_z &= r_0 \cos \theta_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Így, a transláció az

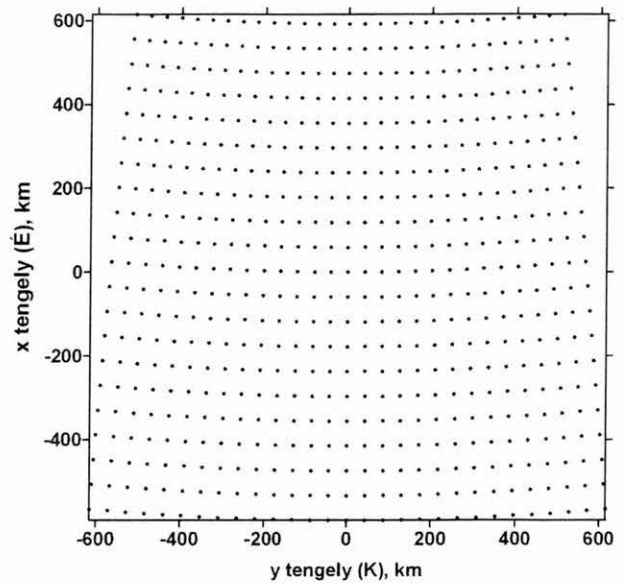
$$x' = X - t_x, \quad y' = Y - t_y \quad \text{és} \quad z' = Z - t_z \quad (3)$$

egyenletekkel írható le. Forgassuk el az $x'y'z'$ koordináta-rendszert olyan xyz (helyi) koordináta-rendszerbe, amelynek x tengelye északi, y tengelye keleti, míg z tengelye a helyi függőleges irányába lefelé mutat. A rotációt leíró egyenletek:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos(x'x) + y' \cos(y'x) + z' \cos(z'x), \\ y &= x' \cos(x'y) + y' \cos(y'y) + z' \cos(z'y), \\ z &= x' \cos(x'z) + y' \cos(y'z) + z' \cos(z'z), \end{aligned} \quad (4)$$

ahol a koszinuszfüggvény argumentumában szereplő mennyiségek a megfelelő tengelyek által bezárt szögeket jelentik.

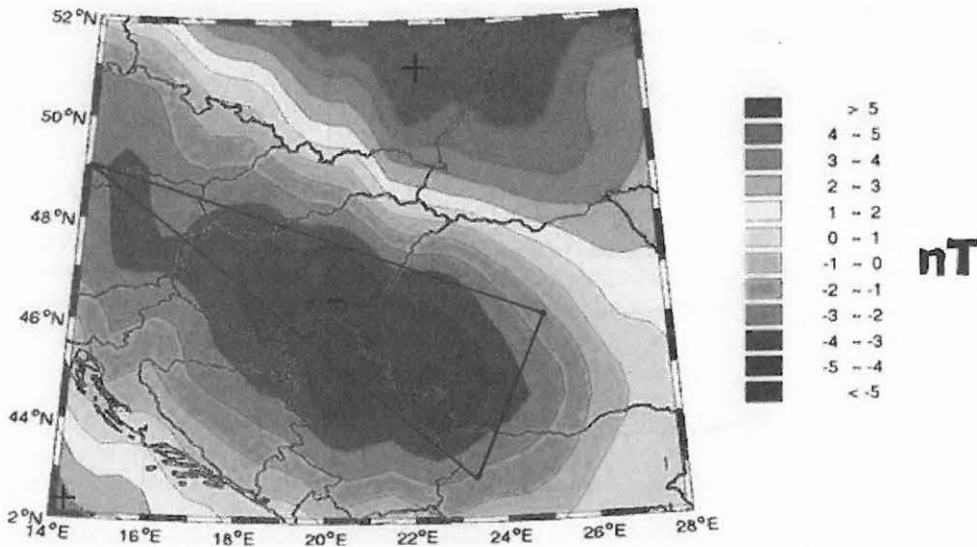
A CHAMP adataiból meghatározott totális mágneses anomáliák egy 425 km magasságú gömb felszínén adottak gömbi polárkoordináta-rendszerben. Az anomália-térkép 0,5 fokos hálózatban állt rendelkezésre a 42°–52° szélességi és a 14°–28° hosszúsági körök által határolt területen. Az xyz helyi koordináta-rendszer kezdőpontjául a 425 km magasságú, $\theta=43^\circ$ pólustávolságú és $\lambda=21^\circ$ hosszúságú pontot választottuk. A 609 mérési pont eloszlása a helyi xyz koordináta-rendszerben az 1. ábrán látható.



1. ábra. A mérési pontok eloszlása xyz koordináta-rendszerben
Fig. 1. CHAMP magnetic data points in Cartesian coordinates

Az inverzió modellje

A CHAMP által mért totális mágneses adatokból meghatározott, a Pannon-medencére vonatkozó anomália-térkép a 2. ábrán látható. Az anomália minimális amplitúdója a 425 km-es magasságban eléri a -8 nT-t, kiterjedése nagy. Az anomália jellegzetessége a térkép közepén található minimum zóna. Jelen szerzők korábbi publikációikban ennek az anomáliának kvalitatív értelmezését adták meg [TAYLOR et al. 2005a; 2005b]. A kvalitatív értelmezés modellszámításokon alapuló döntés volt. Az értelmezés azon a felismerésen alapult, hogy az anomália reverz mágne-



2. ábra. A CHAMP méréseiből meghatározott totális mágneses anomáliák a Pannon-medence régiójában, 425 km magasságban Albers-féle vetületben ábrázolva. Az izovonalak egysége nT. Az ábra feltünteteti a meghatározott ható keresztmetszetét is

Fig. 2. Map of the total magnetic anomalies from CHAMP data over the Pannonian basin at 425 km altitude. Anomalies are plotted on an Albers projection, isolines are given in nT. The outline of the top of the model from the forward calculation is shown

szettségű ható következtében alakult ki. A kvantitatív értelmezés — a ható paramétereinek becslésének — modellje a kvalitatív értelmezés eredményei alapján itt is háromszög kiterjedésű ható volt. Az értelmezés modellje a 3. ábrán látható. Az inverzióhoz kiválasztott modell egyenletei PLOUFF [1976] tanulmányában találhatóak meg. A ható $T(x,y,z)$ totális mágneses terét a

$$T(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} [J_x (lV_1 + mV_2 + nV_3) + J_y (lV_2 + mV_4 + nV_5) + J_z (lV_3 + mV_5 + nV_6)] \quad (5)$$

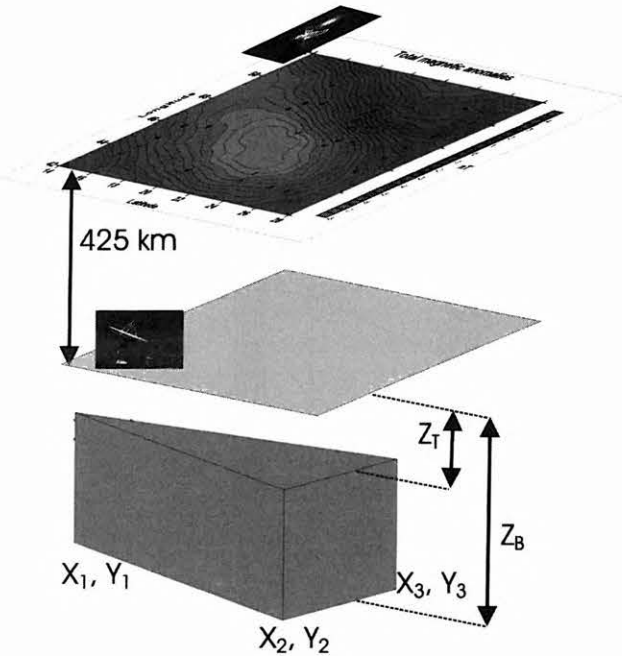
egyenlet írja le, ahol μ_0 a vákuum permeabilitását, J_x, J_y, J_z a mágnesezettség három összetevőjét, l, m, n a földi mágneses tér iránykoszinuszait, V_1, \dots, V_6 a ható koordinátáit tartalmazó mennyiségeket jelölnek. A ható mágnesezettségének három összetevőjét a

$$J_x = J_r L, \quad J_y = J_r M, \quad J_z = J_r N \quad (6)$$

egyenletek írják le, amennyiben eltekintünk a demagnetizációtól. L, M, N a ható remanens mágnesezettségének iránykoszinuszait jelentik. Az iránykoszinuszokat az

$$\begin{aligned} l &= \cos I \cos D & L &= \cos \alpha \cos \beta \\ m &= \cos I \sin D \text{ és } & M &= \cos \alpha \sin \beta \\ n &= \sin I & N &= \sin \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

egyenletek szolgáltatják, ahol I és D a földi mágneses tér inklinációját és deklinációját, míg α és β a ható remanens mágnesezettségének inklinációját és deklinációját fejezi ki.



3. ábra. A totális mágneses anomáliák és az inverzió perspektivikus modellje, annak paraméterei

Fig. 3. Perspective views of the anomaly field, surface and the model derived from the inversion method and its parameters

A mágneses anomália inverziója

Jelen szerzők korábbi tanulmányukban ismertették gravitációs ható paramétereinek meghatározását [KIS et al. 2005]. Az ismertetésre kerülő eljárások több részletükben

azonosak a korábbi módszerrel, néhány vonatkozásban eltérések. Az azonos részletek a következők: az eljárás alapelve a Bayes-féle inverziós eljárás [BOX, TIAO 1973; DUIJNDAM 1988a, 1988b; MENKE 1989; SEN, STOFFA 1995, 1996], az alkalmazott valószínűségi eloszlások azonosak, a minimum feladat is hasonló elven alakult:

$$\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} (T_i^{\text{mért}} - T_i^{\text{számított}})^2 = \min \quad (8)$$

ahol σ_i^2 a mérési adat szórásnéyszete. A korábbi és jelen eljárás között két lényeges különbség volt: egyrészt a feladat most a mágneses ható kiválasztott paramétereinek becslése volt, szemben az előző tanulmányba foglalt gravitációs esettel, másrészt a minimum feladat numerikus megoldása most a simulated annealing módszerrel [KIRKPATRICK et al. 1983; SEN, STOFFA 1995] történt, míg korábban a szimplex módszert alkalmaztuk.

A most használt eljárás során a vízszintes fedő- és alaplappal rendelkező, háromszög keresztmetszetű ható képezi az inverziós eljárás modelljét. Ezt a hatót a korábbi tanulmányokban [TAYLOR et al. 2005a, 2005b] használt kvalitatív becslés alapján választottuk ki. A mágneses ható paraméterei: a fedőlap z_T és az alaplappal z_B mélysége; az $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$ koordináta-párok; és a ható remanens mágnesezettségének irányait megadó α és β szögek. A számítások során a ható remanens mágnesezettségének amplitúdója rögzített volt, értéke $-1,5$ A/m. A ható remanens mágnesezettségének irányát szintén rögzítettnek tekintettük. Ezt az irányt az anomália szerkezete alapján jól meg lehet becsülni. A rögzített irányt megadó szögek: $\alpha = -60^\circ$ és $\beta = 60^\circ$, illetve a földi mágneses tér irányát leíró szögek: $I = 60^\circ$ és $D = 0^\circ$. A remanens mágnesezettség mellett az indukált mágnesezettséget elhanyagoltuk.

A minimum feladat numerikus megoldása a simulated annealing módszerrel történt. A numerikus eljárás során az iteráció állapotát a

$$T = T_0 \left(1 - \frac{k}{K}\right)^\kappa \quad (9)$$

függvény jellemzi, ahol a κ konstans értéke szabja meg az állapot jellegét a minimum közelében, a T_0 konstans értékét a minimum feladathoz illeszkedő nagy értéknek célszerű választani, K az iteráció maximális, k az iteráció közbenső értéke. A simulated annealing előnyös tulajdonsága a korábban alkalmazott szimplex módszerrel szemben, hogy stabilabban működik még a több — jelen esetben 8 — paraméteres becslés esetében is. Szakirodalmi adatok a szimplex módszer alkalmazását maximálisan 5 esetleg 6 paraméter becslésére tartják alkalmasnak [WALSH 1975].

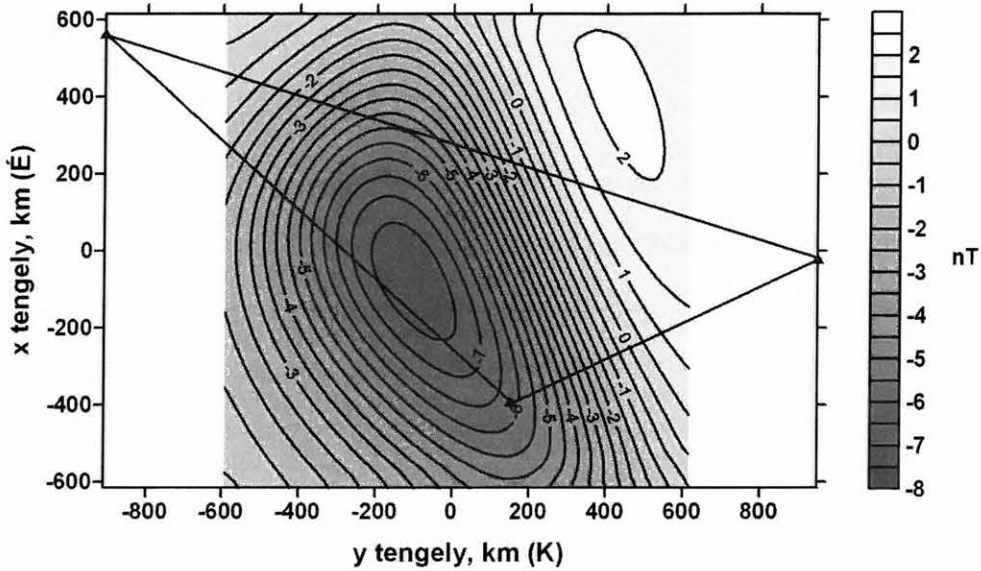
Az inverzióval meghatározott paraméterek értékei:

$$\begin{aligned} z_T &= 0 \pm 3 \text{ km}, & z_B &= 14 \pm 5 \text{ km}, \\ x_1 &= 564 \pm 93 \text{ km}, & y_1 &= -910 \pm 93 \text{ km}, \\ x_2 &= -391 \pm 93 \text{ km}, & y_2 &= 151 \pm 93 \text{ km}, \\ x_3 &= 20 \pm 93 \text{ km}, & y_3 &= 949 \pm 93 \text{ km}. \end{aligned}$$

A ható paraméterei közül a felső lap mélysége becsülhető viszonylag pontosabban. A becsült paraméterek hibái numerikus deriválással kerültek meghatározásra. A meghatározott és a rögzített paraméterek alapján kiszámított totális mágneses tér a 4. ábrán látható. A mágneses teret csak ott számítottuk ki, ahol mérési adatok is rendelkezésre álltak. A számított és a mérésekből meghatározott mágne-

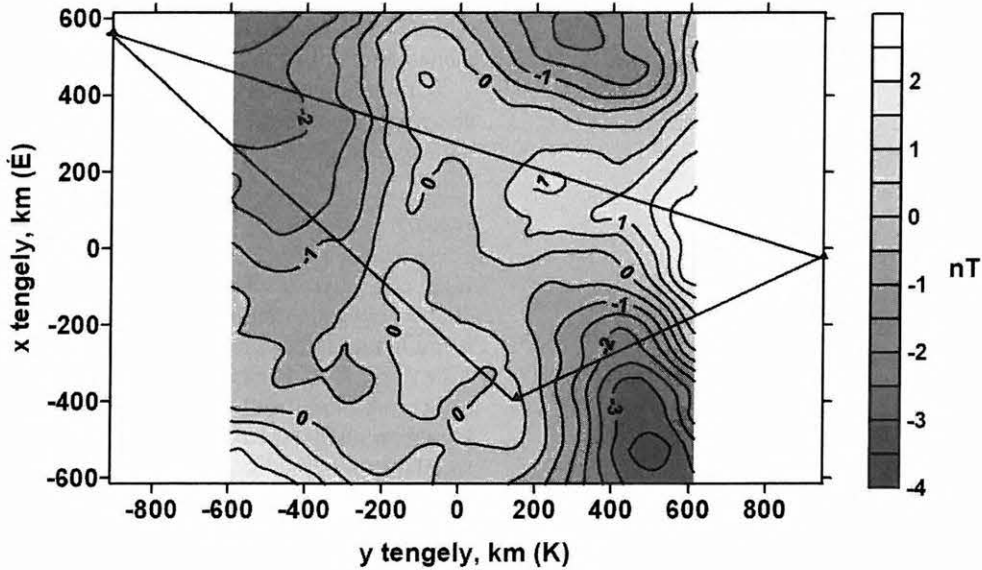
ses tér különbsége — azaz a reziduál tér — 0 nT körül ingadozik, az izovonalak eloszlása rendezetlen (5. ábra). Ez arra utal, hogy a ható számított mágneses tere jól illeszkedik a mérésekből meghatározott mágneses térhez. Megjegyezzük, hogy inverzióval négyszög és ötszög keresztmetszetű ható geometriai paramétereit is meghatároztuk, de

a kiszámított reziduál anomáliák kicsit nagyobbak mutatkoztak, mint a háromszög keresztmetszetű ható esetében. Így a legegyszerűbb esetet, a háromszög keresztmetszetű hatót fogadtuk el az összetett anomália forrásának közelítéseként.



4. ábra. A meghatározott paraméterek alapján számított totális mágneses tér, az izovonalak egysége nT. Az anomáliák xyz koordináta-rendszerben kerültek ábrázolásra. Az ábra feltünteti a meghatározott ható keresztmetszetét is

Fig. 4. Total magnetic anomaly field calculated by the determined parameters, isolines are given in nT unit. Anomalies are plotted in Cartesian coordinates. The figure shows the outline of the top of the derived source



5. ábra. A mért és számított anomáliák különbségéből meghatározott reziduális mágneses anomáliák xyz koordináta-rendszerben ábrázolva, az izovonalak egysége nT. Az ábra feltünteti a meghatározott ható keresztmetszetét is

Fig. 5. Residual magnetic anomaly determined from the difference between the measured and calculated magnetic anomalies, respectively. Residual anomalies are given in Cartesian coordinate system. Isolines are given in nT unit. The figure shows the outline of the top of the computed source body

A CHAMP méréseiből meghatározott, a Pannon-medencére vonatkozó nagy kiterjedésű mágneses anomália tengelye közel párhuzamos a Dinaridák tengelyének csapásirányával. A Dinaridák takarós-gyúrt felépítésű délnyugati vergenciájú hegységrendszert alkotnak, amelyeknek kialakulása az alpi orogén fázis során történt.

Az anomália izovonalainak kissé hullámzó eloszlása arra utal, hogy a mágneses ható több fragmentumból épülhet fel.

Az inverzióval meghatározott ható horizontális kiterjedése ÉNy-i irányból kinyíló háromszög. A ható vastagsága eléri a 9–10 km-t, így az anomália forrása a felső kéregben

található. A feladat a mágneses anomáliák forrásának, azaz az anomáliák létrejöttéért felelős kőzetek megtalálása volt. A nagy kiterjedésű mágneses anomália részben a Tiszai nagyszerkezeti egység területére esik, amelynek jelenlegi fragmentumai a Variszkuszi–Európa peremén összetett elmozdulások során kerültek jelenlegi helyzetükbe [SZEDERKÉNYI 1996]. Ennek az egységnek nagy mélységű összetelei valószínűleg prevariszkuszi, variszkuszi eredetű kristályos metamorf kőzetek [SZEDERKÉNYI 1996; TARI, PAMIĆ 1998], amelyek közé granitoid jellegű kőzetek ékelődnek.

A Tiszai egység leválása a variszkuszi Európáról a középső jurában kezdődött, míg a Pannon-medence kifejlődése csak jóval később, a neogén során ment végbe. A Kárpátok és a Dinaridák között létrejött ív mögötti medence legnagyobb ÉNy–DK irányú extenziója késő bádeni korú [KONEČNÝ et al. 2002]. Ezen extenziós folyamat okozta vulkáni aktivitás nagy mennyiségű andezittel növelte az anomáliát okozó összetetet. A Tiszai mikrolemezek mintegy 60 fokos, az óramutató járásával egyező elfordulása következett be a miocén során [KONEČNÝ et al. 2002]. A ható kialakításában szerepet játszott még az anomália középső–déli része alatt elhelyezkedő Vardar–Marosi zóna ofiolit övezete, valamint a Déli-Kárpátok takarórendszerének prevariszkuszi kristályos kőzetei, amelyek a ható déli pereme közelében találhatók.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben megjelent kutatási eredmények a T 038008 számú OTKA pályázat keretében készültek. A számítások a Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Iroda szuperszámítógépén történtek.

HIVATKOZÁSOK

- BOX G. E. P., TIAO G. C. 1973: Bayesian Inference in Statistical Analysis. Addison–Wesley Publishing Company, London, Don Mills, Reading, Menlo Park
- DUIJNDAM A. J. W. 1988a: Bayesian estimation in seismic inversion. Part I: Principles. *Geophysical Prospecting* **36**, 878–898

- DUIJNDAM A. J. W. 1988b: Bayesian estimation in seismic inversion. Part II: Uncertainty analysis. *Geophysical Prospecting* **36**, 899–918
- KIRKPATRICK S., GELATT Jr. C. D., VECCHI M. P. 1983: Optimization by simulated annealing. *Science* **220**, 671–680
- KIS K. I., TAYLOR P. T., WITTMANN G., KIM H. R., TORONYI B., MAYER–GÜRR T. 2005: Bayesian inference in satellite gravity inversion. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **40**, 161–170
- KONEČNÝ V., KOVAČ M., LEXA J., ŠEFARA J. 2002: Neogene evolution of the Carpatho–Pannonian region: an interplay of subduction and back–arc diapiric uprising in the mantle. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* **1**, 105–123
- MENKE W. 1989: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, Inc. San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto
- PLOUFF D. 1976: Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. *Geophysics* **41**, 727–741
- SEN M. K., STOFFA P. L. 1995: *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier, Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, Shannon, Tokyo
- SEN M. K., STOFFA P. L. 1996: Bayesian inference, Gibbs sampler and uncertainty estimation in geophysical inversion. *Geophysical Prospecting* **44**, 313–350
- SZEDERKÉNYI T. 1996: Metamorphic formations and their correlation in the Hungarian part of Tisia Megaunit (Tisia Composite Terrane). *Acta Mineralogica–Petrographica, Szeged*, **37**, 143–160
- TARI V., PAMIĆ J. 1998: Geodynamic evolution of the northern Dinarides and southern part of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* **297**, 269–281
- TAYLOR P. T., KIS K., VON FRESE R. R. B., KORHONEN J. V., WITTMANN G., KIM H. R., POTTS L. V. 2005a: A különböző kéregvastagság indikálása a CHAMP gravitációs és mágneses mérései alapján. *Magyar Geofizika* **46**, 19–24
- TAYLOR P. T., KIS K., VON FRESE R. R. B., KORHONEN J. V., WITTMANN G., KIM H. R., POTTS L. V. 2005b: Effect of varying crustal thickness on CHAMP geopotential data. *In: REIGBER CH., LÜHR H., SCHWINTZER WICKERT J. (Eds) Earth Observation with CHAMP*. Springer 279–286
- WALSH G. R. 1975: *Methods of Optimization*. John Wiley & Sons, London, New York, Sydney, Toronto