

A mesterséges holdak mágneses méréseinek feldolgozása és földtani értelmezése*

KIS K.

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
E-mail: kisk@caesar.elte.hu

A tanulmány a mesterséges holdak által mért, a Földre és belső bolygókra vonatkozó mágneses mérések néhány eredményét foglalja össze. Bemutatja Afrika totális mágneses anomália-térképét, a Föld globális mágneses anomália-térképeit, a kurszki mágneses anomáliát, a Pannon-medence totális mágneses anomáliáját, és a becsapódási szerkezetek által létrehozott mágneses anomáliákat. Összefoglalja a Merkúr, Vénusz, Mars és Hold környezetében, néhány űrszonda által végzett mágneses méréseket.

Kis, K.: Process and interpretation of the magnetic measurements of satellites

The paper discusses the results of the magnetic anomalies of the Earth and inner planets measured by the satellites. It illustrates the magnetic anomalies of the African continent, the global magnetic anomalies of the Earth, the magnetic anomalies of the Kursk and the Pannonian Basin and other magnetic anomalies which are produced by the impact structures. It summarizes the anomalies measured by the spacecrafts around the Mercury, Venus, Mars and the Moon.

* A Magyar Geofizikusok Egyesületében 2017. október 18-án tartott előadás írásbeli változata.

Beérkezett: 2018. február 20.; elfogadva: 2018. március 21.

Bevezetés

A földi mágneses teret mérő mesterséges holdak általában LEO-n (Low Earth Orbit) végzik megfigyeléseiket. A LEO 200–1200 km magasságok közötti pályát jelent. További pályák: MEO Medium Earth Orbit, mely esetben a magasság 1200 és 35 286 km között változik; GEO Geostationary Earth Orbit, azaz a pálya 35 286 km magasságban van; HEO Highly Elliptical Orbit, amikor a mesterséges hold perigeuma 1000 km, apogeuma 35 786 km felett található.

Évente mintegy 1000–1200 mesterséges hold működik Föld körüli pályán, és mintegy 9000 további mesterséges holdat kívánnak pályára állítani a következő tíz év során. Nagyon sok már nem működő mesterséges hold kering különböző magasságú pályákon, valamint szintén Föld körüli pályán vannak a rakéták harmadik fokozatának darabjai, festékdarabok és egyéb törmelékek. Ezeket az objektumokat űrszemétnek lehet tekinteni. Az űrszemét csoportosítása és darabszáma: 1 mm és 1 cm között mintegy 170 000 db,

1 cm és 10 cm között nagyságrendileg 670 000 db és 10 cm-nél nagyobb méretű tárgyakból körülbelül 29 000 db található az űrben. Az űr viszonyai között előbb-utóbb ezek az objektumok a sűrűbb légkörbe kerülnek és ott elégnék. Ennek ellenére több tervet dolgoztak ki az űrszemét eltávolítására. Ezek az objektumok ütközhetnek egymással vagy akár a működő mesterséges holdakkal. Az űrszemét 1 cm és 10 cm közé eső darabjaival történő ütközések jelentik a legnagyobb veszélyt a működő holdakra és a Nemzetközi Űrállomásra. A Nemzetközi Űrállomást több réteges pajzzsal védik az esetleges ütközésektől.

A túl sok űrszemét miatt felmerül az ún. Kessler-szindróma bekövetkezése, amely szerint a nagyszámú ütközéssorozat és az ütközés az újabban felbocsátott holdakkal megakadályozza a további űrtevékenységet.

Az űrszemét eltávolítására vonatkozó ismeretek összefoglalása megtalálható az ESA honlapján, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Clean_Space.

Bár nem képezi a tanulmány részét, de meg kell említeni a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemet,

Villamos és Informatikai Kar két tanszékén, az Elektronikus Eszközök Tanszékén és a Szélessávú Hírközlés és Villamosság-tan Tanszékén kifejlesztett Masat-1 mesterséges holdat. A hold 2012. február 13-án állt Föld körüli pályára. A Masat-1 2015. január 9-én fejezte be küldetését. A magyar fejlesztésű, 10 cm élhosszúságú, kocka alakú (CubeSat) és 1 kg tömegű mesterséges hold közel három évig működött sikeresen. Ugyanitt van tesztelés állapotában a SMOG-1 250 g tömegű miniműhold.

Űrbázissal, azaz űrszonda/űrhajó fellövésére képes technológiával rendelkező országok: Oroszország, Amerikai Egyesült Államok, Franciaország, Anglia, Kína, Japán, India, Izrael. Oroszország új űrbázisa, a Vosztocsnij a Távol-Keleten épül, a kínai határtól 100 km távolságban.

Az 1. táblázat összefoglalóan tartalmazza néhány, magnetométerrel felszerelt mesterséges hold legfontosabb pályáadatait.

A mesterséges holdak mágneses méréseinek a feldolgozása során alkalmazott lépések:

- a mágnesesen nyugodt időszak kiválasztása a Kp és az AE indexek alapján,
- a földmagból származó tér eltávolítása a Gauss-féle sorfejtés alapján,
- az impulzus karakterű hatások eltávolítása,
- empirikus és analitikus modellek alkalmazása az ionoszférikus áramok mágneses terének eltávolítása céljából,

- a gyűrűáram mágneses hatásának eltávolítása iterációs eljárások alapján,
- a keresztező pályák adatainak kiegyenlítése,
- napszinkronpálya esetén a hajnali és alkonyi adatok szétválasztása,
- inverzió.

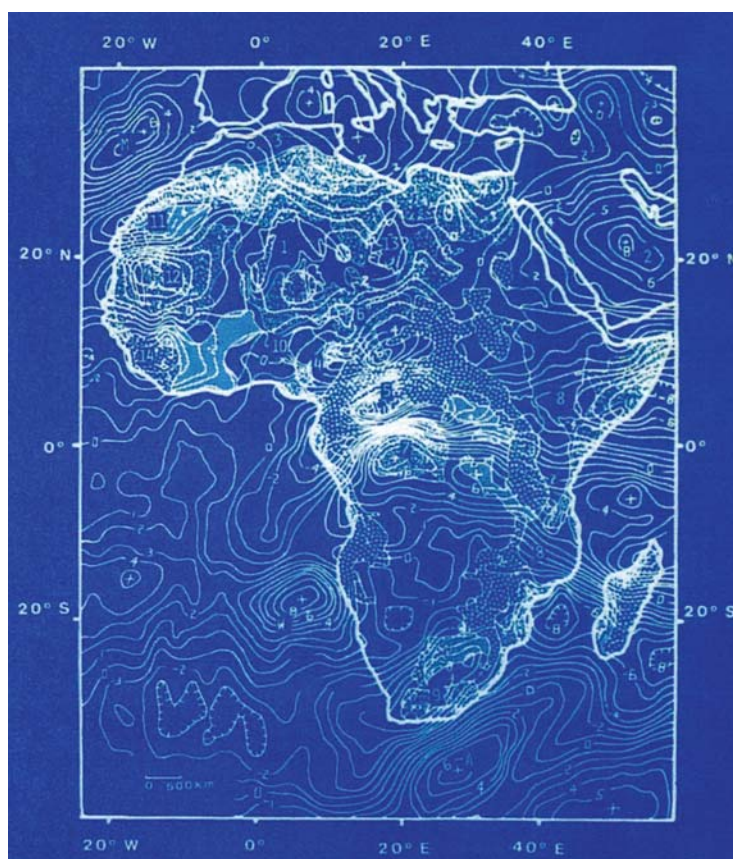
Ezek a műveletek sokszor több száz utasításból álló számítások elvégzését igénylik.

Afrika totális mágneses anomália-térképe

A mesterséges holdak alkalmasak nagy kiterjedésű, esetleg nehezen megközelíthető területek viszonylag gyors felmérésére. A Kozmosz-49, 335 kg tömegű mesterséges holdat a Volgograd közelében lévő Kapusztyn Jar űrbázisról bocsátották Föld körüli pályára. A hold mágneses mérései alapján meghatározták Afrika totális mágneses anomália-térképét (1. ábra). A 2. ábrán az előző térkép 5° átlagolással meghatározott totális anomáliái láthatók. A térkép jellegzetessége, hogy a medencék, a Tinduf-medence, Szenegáli-medence, Szomáliai-medence, Bangui mágneses anomália negatív értékkel rendelkezik, míg az Angolapajzs, Mauritániai-pajzs, Tibeszi-hegység, Etióp-magasföld, Mozambik-pajzs, Fok-fennsík pozitív anomália értéket mutat. Ez a jellegzetesség a később bemutatott anomáliák esetében is felismerhető.

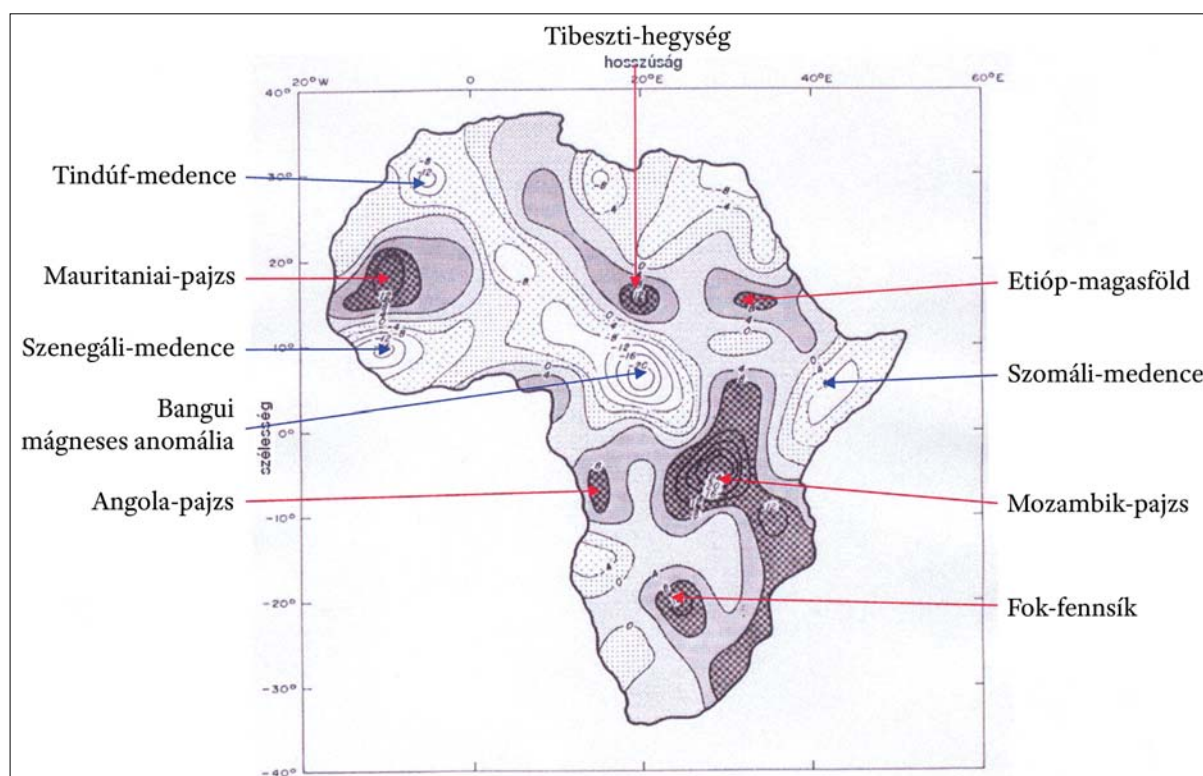
I. táblázat | Néhány magnetométerrel ellátott mesterséges hold pályadata
Table 1 | Orbit data of some satellites supported with magnetometers

Mesterséges hold	Működési időszak	Pálya inklinációja (°)	Működési magasság (km)	Magnetométer	Működési pontosság (nT)
Szputnyik-3	1958. V.–VI.	65	226–1881	Fluxgate	100
Vanguard-3	1959. IX.–XII.	33	510–3750	Proton	10
Kozmosz-26	1964. III.	49	270–403	Proton	–
Kozmosz-49	1964. X.–XI.	48,9	261–488	Proton	22
OGO-2	1965. X.–1967. IX.	87	413–1510	Rubidium	6
OGO-4	1967. X.–1969. I.	86	412–908	Rubidium	6
OGO-6	1969. VI. 1971. VII.	82	397–1098	Rubidium	6
Kozmosz-321	1970. I.–III.	72	270–403	Cézium	–
Magsat	1979. X. 30. 1980. VI. 11.	97,76	325–550	Fluxgate Cézium	5,8 2
Orsted	1999. II. 23.	96,46	649–863	Fluxgate Overhauser	0,5 0,5
CHAMP	2000. VII. 15 2010. IX. 19	87	454	Fluxgate Overhauser	0,5 0,5
SAC-C	2000. XI. 21. 2013. VIII. 15.	98	702	Hélium	0,5
SWARM-A	2013. XI. 22.	87,35	490	Fluxgate	0,5
–B		87,95	530	Overhauser	0,5
–C		87,35	490		



1. ábra | Afrika totális mágneses anomáliái a Kosmosz-49 mérései alapján, izovonalak értékköze 1 nT (Regan et al. 1975)

Figure 1 | Total magnetic anomalies over Africa measured by Cosmos-49, contour interval 1 nT (Regan et al., 1975)



2. ábra | Afrika 5° átlagolással meghatározott totális mágneses anomáliái a Kosmosz-49 mérései alapján, izovonalak értékköze 4 nT (Regan et al. 1975)

Figure 2 | The 5° averaged Cosmos-49 magnetic anomaly map over Africa, contour interval 4 nT (Regan et al. 1975)

Néhány, a Föld mágneses terét vizsgáló mesterséges hold

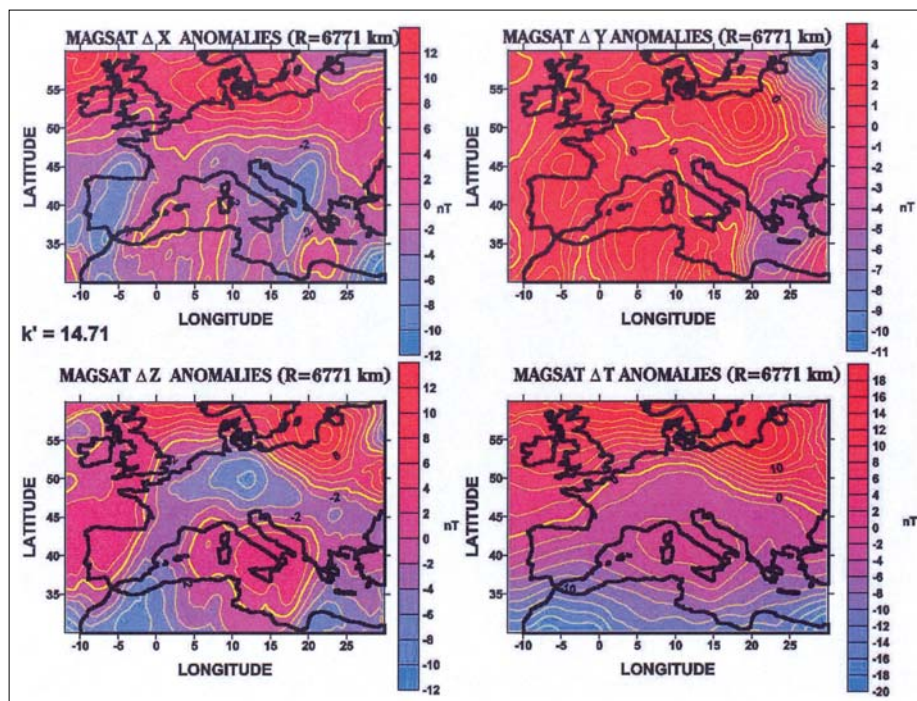
Míg a Föld gravitációs terének vizsgálatára igen sok mesterséges hold alkalmas, addig a Föld mágneses terének leírására alkalmas, magnetométerrel felszerelt műholdból csak kevesebb létezik.

A Magsat mesterséges holdat a Föld mágneses terének vizsgálatára állították pályára. A 182 kg tömegű Magsat holdat a Vandenberg űrbázisról indították 1979. október 30-án. A pálya kezdeti magassága 352–561 km között változott, a pálya inklinációja $97,76^\circ$ értékű volt. A Magsat mesterséges hold mindössze 7 hónapon át, 1980. június 11-ig működött sikeresen. A Magsat műholdat napszinkronpályára állították, ez azt jelenti, hogy a műhold pályasíkjának a Nap irányával bezárt szöge nem változott. A mesterséges hold rendelkezett skalár (cézium) és vektor (fluxgate) magnetométerekkel. A mágneses tér mérésének lényeges eleme, hogy a magnetométerek érzékelőit a zavarok elkerülésének érdekében egy, a holdtól kinyúló karon, 6 m távolságban helyezték el. A Magsat felépítését ismerteti Langel et al. (1982) tanulmánya.

A Német Földtudományi Kutatóközpont (GFZ) irányításával fejlesztették ki a CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) nevű mesterséges holdat, korábbi tapasztalatokat felhasználva. A CHAMP holdat Moszkvától 800 km-re északra, a Plesetsk űrbázisról lőtték fel Kozmosz-3M rakétával. Az 522 kg tömegű CHAMP holdat 2000. július 15-én állították Föld körüli pályára, és küldetését 10 évvel később, 2010. szeptember 19-én fejezte

be. Ez alatt az időszak alatt 58 277 fordulatot tett meg a Föld körül. A CHAMP mesterséges holdat 454 km kezdeti magasságú, közel kör alakú és $87,277^\circ$ inklinációjú pályára állították. Hajtógáz felhasználásával a hold magasságát négyszer módosították, ez tette lehetővé a CHAMP tízéves működését. A működési időt úgy tervezték, hogy a 2001-ben bekövetkező napfoltmaximum idején is végezzen méréseket. A holdon elhelyezett Overhauser skalár magnetométerének teljesítménye 4,5 W, míg fluxgate vektor magnetométerének 2 W teljesítménye volt. A mesterséges hold helyzetét aazon elhelyezett GPS műszerrel határozták meg. A magnetométerek mellett a CHAMP rendelkezett gyorsulásmérőkkel is, így ennek alapján levezették a Föld free-air gravitációs anomáliáit is (Reigber et al. 2005). Közelítőleg azt fogadhatjuk el, hogy a free-air anomáliák tükrözik a topográfia eloszlását. A CHAMP felépítését Reigber et al. (2003) és Kis, Wittmann (2011) tanulmánya ismerteti.

A Swarm küldetést az Európai Űrügynökség irányította a Living Planets Program keretében. A Swarm mesterséges holdakat szintén a Plesetskben található űrbázisról bocsátották Föld körüli pályára, Rokot rakétával, 2013. november 22-én. A Swarm-A és a -C hold kezdeti magassága 460 km, míg a Swarm-B hold kezdeti magassága 530 km. Az A és a C hold inklinációja $87,4^\circ$ a B hold 88° inklinációval rendelkezett. A Swarm holdakat skalár (Overhauser) és vektor (fluxgate) magnetométerekkel látták el. Az A és C hold pályája közel párhuzamosan helyezkedett el, az Egyenlítőtől a két hold távolsága $1,5^\circ$. A 3 Swarm mesterséges hold köszönhetően a



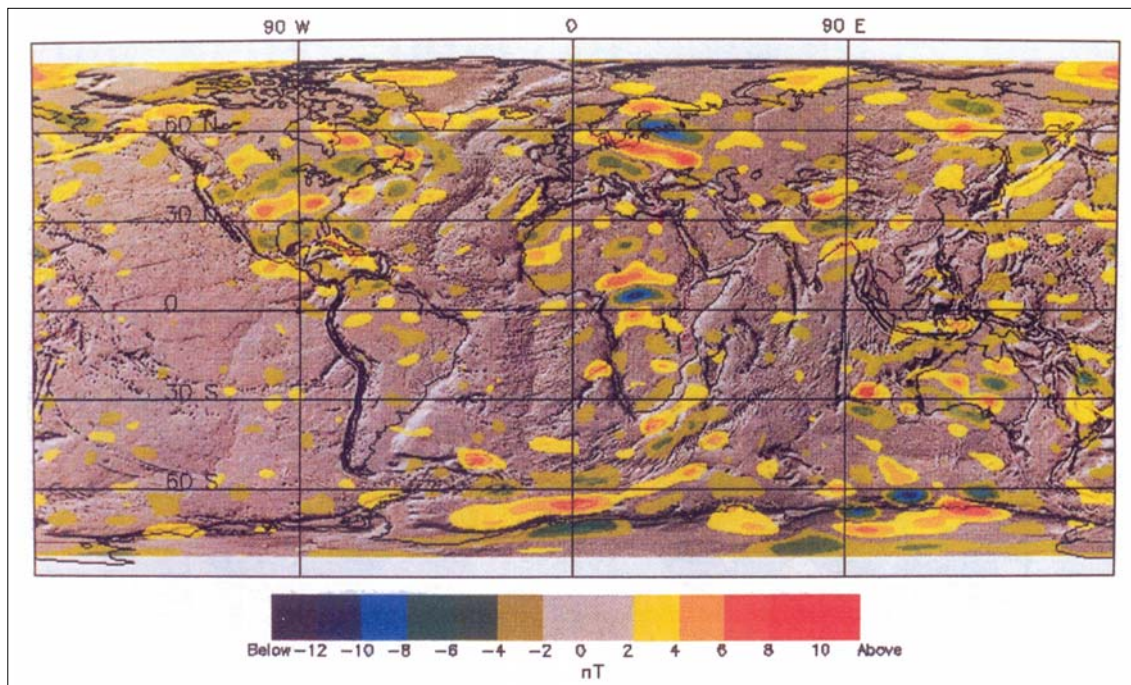
3. ábra A Magsat méréseiből levezetett ΔX , ΔY , ΔZ és ΔT mágneses anomália-térkép 400 km magasságban, izovonalak értéke 2 nT (Kis, Wittmann 2002)

Figure 3 ΔX , ΔY , ΔZ and ΔT Magsat magnetic anomalies at 400 km altitude contour interval is 2 nT (Kis, Wittmann 2002)

speciális elhelyezkedésüknek közvetlenül volt képes a mágneses tér horizontális és vertikális gradienseinek mérésére.

Mivel a mesterséges holdak nagy területek felmérését végzik el rövid idő alatt, felmerült annak az igénye, hogy a mérési adatokból globális térképeket vezessenek le. Ilyen

térkép volt az afrikai kontinensre vonatkozó, korábban bemutatott térkép (1. és 2. ábra). A teljesség igénye nélkül, az európai kontinens globális mágneses anomália-térképét bemutató néhány tanulmány: Nolte és Hahn (1992), Taylor és Ravat (1995), Kis és Wittmann (1998), Kis és Wittmann (2002), Kis et al. (2012).

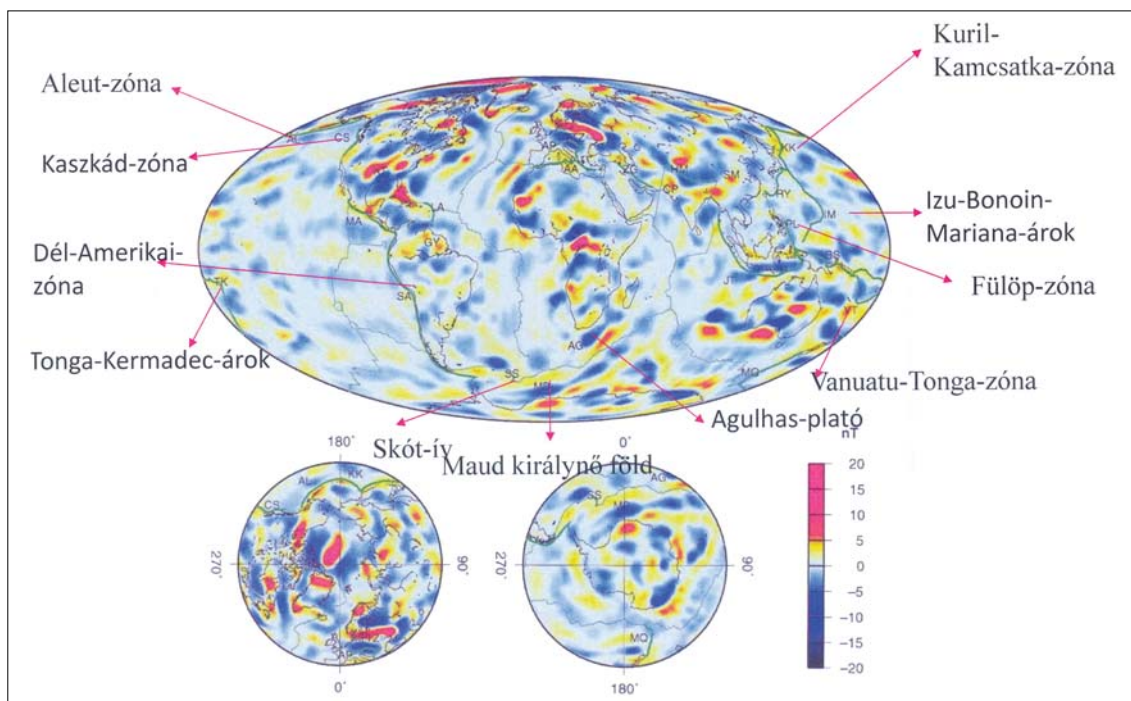


4. ábra

Figure 4

A Magsat méréseiből levezetett globális totális mágneses anomáliák (Ravat et al. 1995)

Magsat global magnetic anomalies (Ravat et al. 1995)

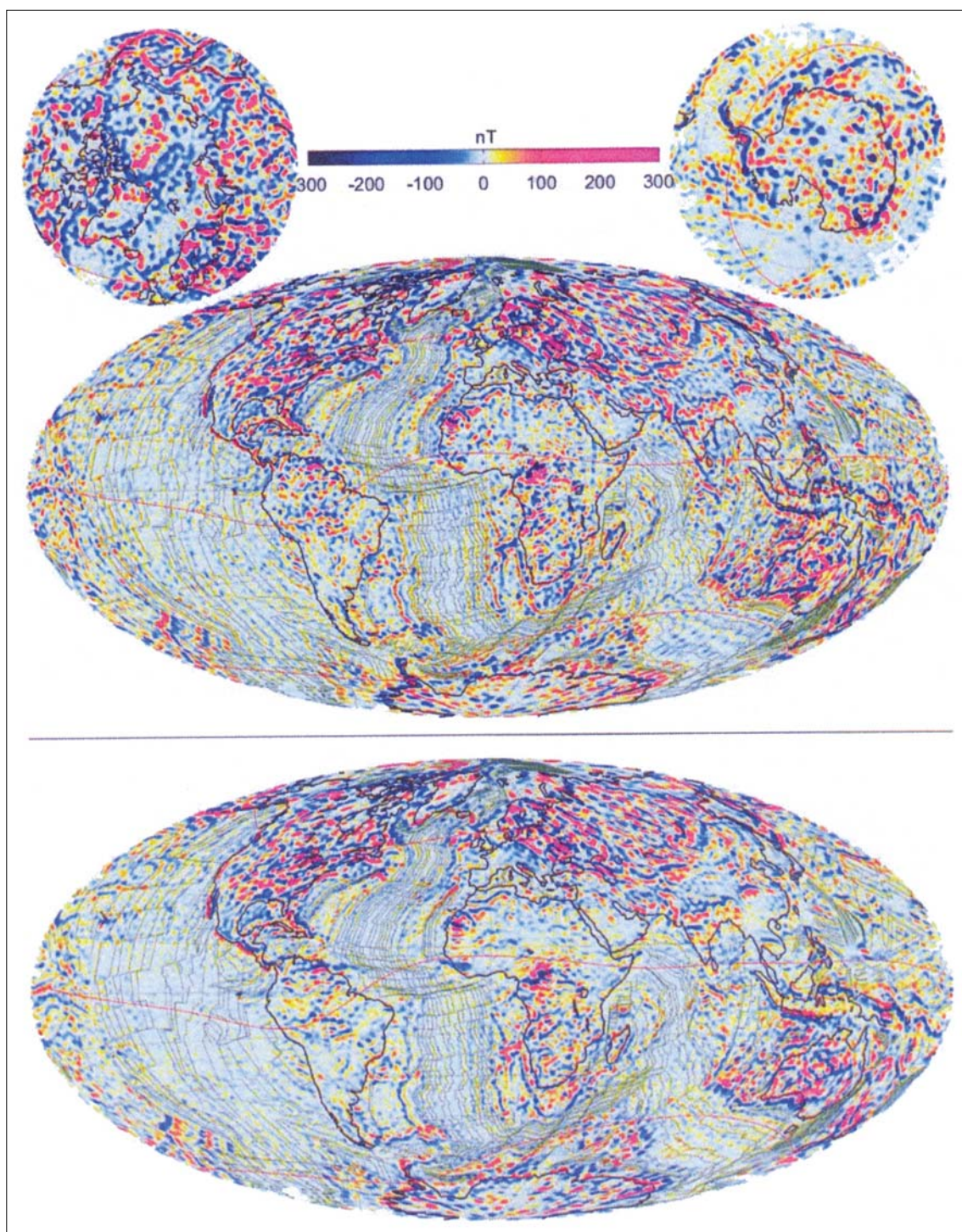


5. ábra

Figure 5

A CHAMP méréseiből meghatározott globális totális mágneses anomáliák, az anomáliák Aitoff-féle vetületben ábrázolva (Maus et al. 2006)

CHAMP global magnetic anomalies, the anomalies are plotted in Aitoff projection (Maus et al. 2006)



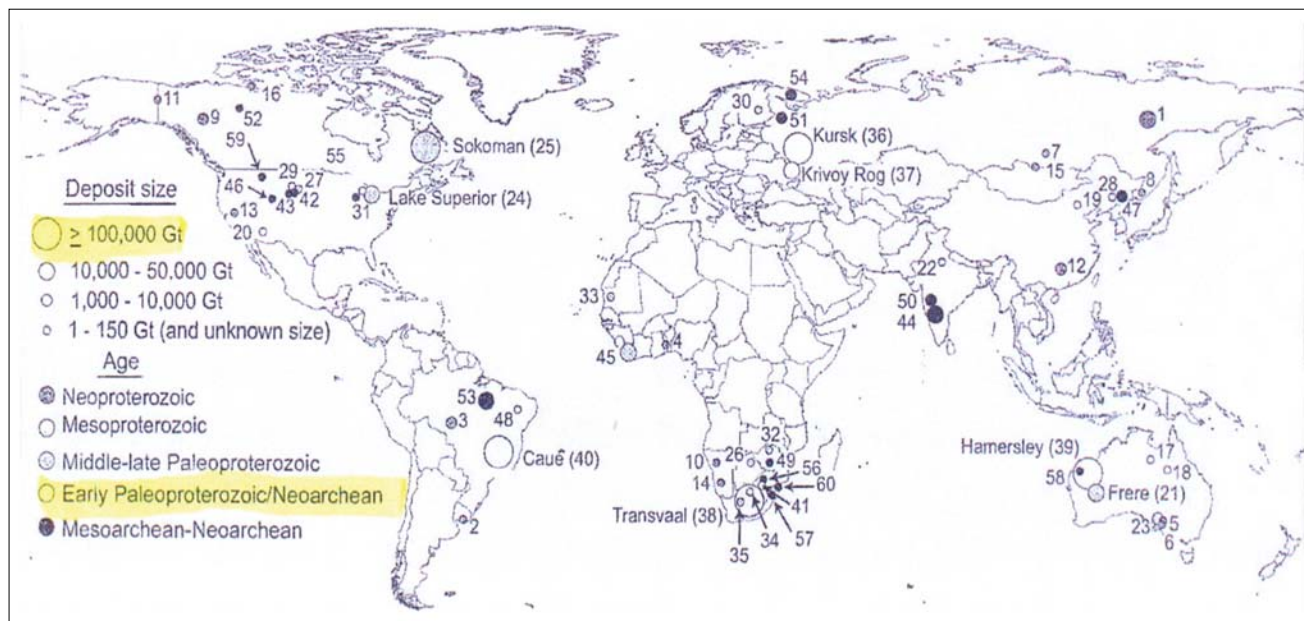
6. ábra A CHAMP és Swarm méréseiből meghatározott vertikális (felső) és totális (alsó) mágneses anomáliák, az anomáliák Aitoff-féle vetületben ábrázolva (Olsen et al. 2017)

Figure 6 CHAMP and Swarm vertical (upper) and total (lower) magnetic anomalies. The anomalies are plotted in Aitoff projection (Olsen et al. 2017)

A 3. ábrán az európai kontinensre vonatkozó ΔX , ΔY , ΔZ és ΔT mágneses anomália-térkép látható 400 km magasságban, a Magsat méréseiből levezetve (Kis, Wittmann 2002). A térkép átlagosan 40 km távolságú pálya menti adatokból készült. Jól tükrözi az európai kontinens nagyszerkezeti földtanát, a Tornquist–Teisseyre tektonikai

vonalat, a Német–Lengyel depressziót (Európai Magsat minimumot), valamint a dél-olaszországi maximumzónát, amelyek egybeesik a kisebb hőáramsűrűséggel és vastagabb litoszférával.

A Magsat méréseiből levezetett, az egész Földre vonatkozó, globális totális mágneses anomália-térkép látható



7. ábra | Vasérctelepekben az érc mennyisége, elhelyezkedés és kora (Bekker et al. 2010)

Figure 7 | The deposit size, position and age of the iron formations (Bekker et al. 2010)

a 4. ábrán (Ravat et al. 1995), míg az 5. ábrán ugyanez a CHAMP méréseiből meghatározva (Maus et al. 2006). Az 5. ábra továbbá feltünteti, néhány jól ismert földmágneses anomália helyzetét is. A CHAMP és Swarm mérései alapján előállított, globális totális mágneses-anomália-térkép látható a 6. ábrán (Olsen et al. 2017). A térképsorozat felbontóképessége kifejezi a mérések pálya menti adatainak számszerinti növekedését (pl. a Swarm holdak másodpercenként végeznek mágneses méréseket, szemben a Magsat 5 másodperces mintavételi idejével).

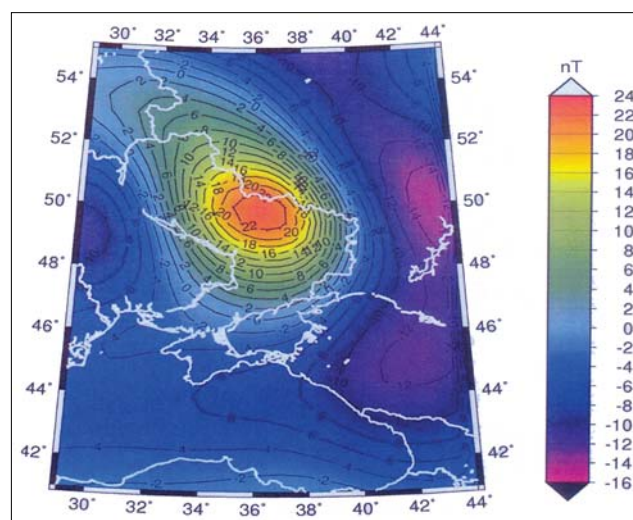
A kurszki mágneses anomália

A Földön található hatalmas kiterjedésű vasérctelepek a neo-archaikumtól a neo-proterozikumig terjedő időszakban alakultak ki (Bekker et al. 2010) (7. ábra). Ezek közé tartozik a kurszki vasérctelep is. A hatalmas kiterjedésű vasérctelepek által létrehozott mágneses anomáliák a mesterséges holdak méréseinek magasságában is regisztrálhatók (Taylor, Frawley 1987).

A kurszki mágneses anomáliát Heiland (1946) szerint Szminow fedezte fel 1874-ben. A kurszki mágneses anomáliát mind a klasszikus (Lasareff 1923), mind a modern szakirodalom (Rotanova 2005) tárgyalja. A kurszki mágneses anomália kiterjedése 190.000 km², az anomália-térképe a 8. ábrán látható. A kurszki terület földtani felépítését több cikk tárgyalja, pl. Voskresenskaya (1965). A kurszki mágneses anomália feldolgozását és értelmezését tárgyaló tanulmány megjelent a *Magyar Geofizika* hasábjain (Kis et al. 2014), ezért a teljes ismertetése nem szükséges.

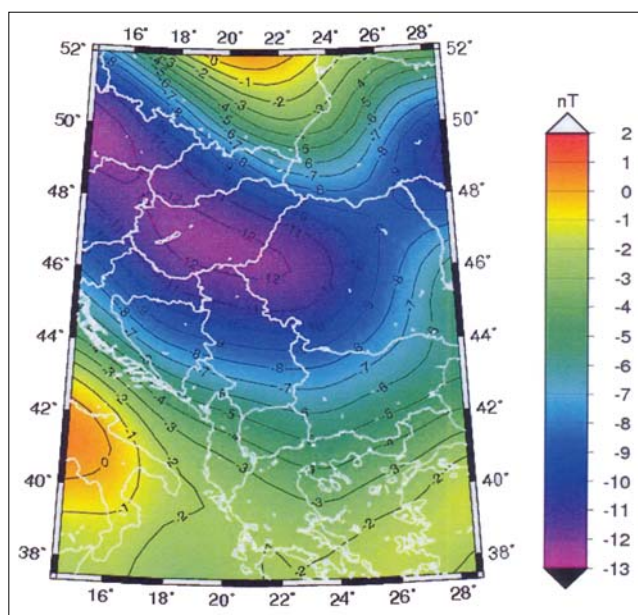
A Pannon-medence totális mágneses anomáliái

A Pannon-medencének a CHAMP mesterséges hold mágneses méréseiből levezetett totális mágneses anomáliái és azoknak értelmezése szintén megjelent a szakirodalomban, ezért csak rövid ismertetésük szükséges (Kis et al. 2011, Taylor et al. 2013). A Pannon-medence geológiai felépítését ismertető újabb tanulmányok: Horváth et al.



8. ábra | A kurszki totális mágneses anomáliák a CHAMP méréseiből levezetve 324 km magasságban az anomáliák ábrázolása Albers-féle vetületben ábrázolva, az izovonalak egysége nT, értékközük 2 nT (Kis et al. 2014)

Figure 8 | Kursk total magnetic anomaly map computed from the CHAMP satellite magnetic data at 324 km altitude and plotted in Albers equal area conic projection. The contour interval is 2 nT (Kis et al. 2014)



9. ábra A Pannon-medence totális mágneses anomáliája a CHAMP méréseiből levezetve 324 km magasságban. Az anomáliák Albers-féle vetületben ábrázolva, izovonalak értékköze 1 nT (Kis et al. 2011)

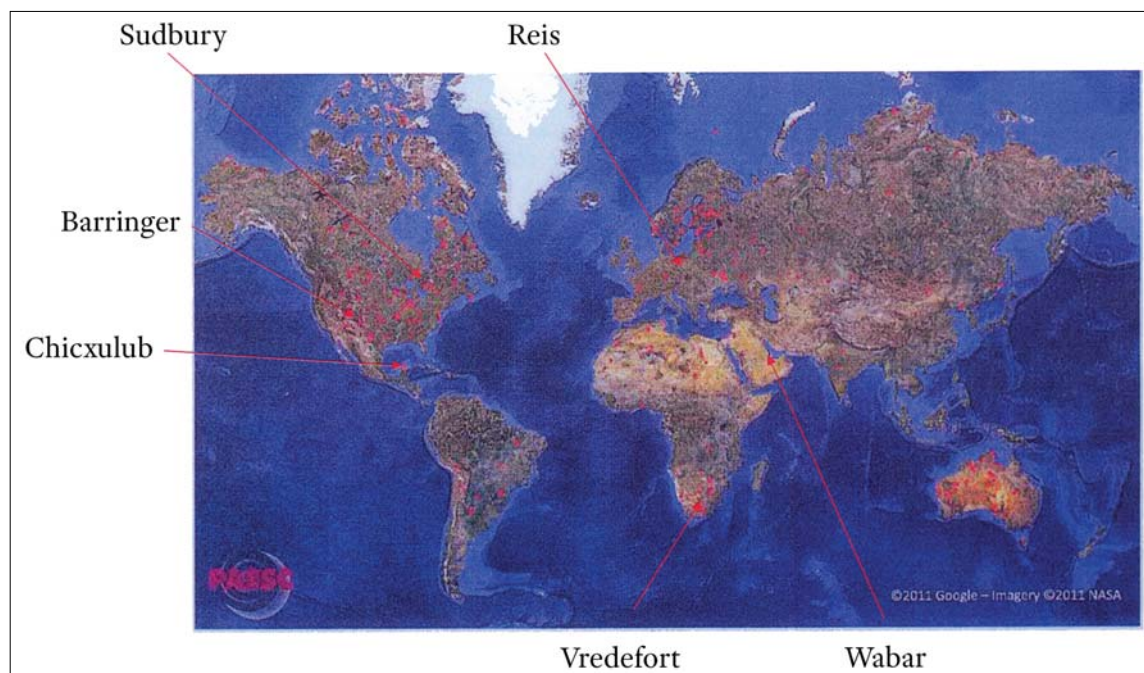
Figure 9 Total magnetic anomalies of the Pannonian Basin computed from the CHAMP satellite magnetic data at 324 km altitude and plotted in Albers equal area conic projection. The contour interval is 1 nT (Kis et al. 2011)

(2015), Balázs et al. (2016), Tašárová et al. (2016). A Pannon-medence totális mágneses anomáliái a 9. ábrán láthatók. A Pannon-medence totális mágneses anomáliája a korábbi megállapításoknak megfelelően negatív anomáliával jelentkezik.

Becsapódási szerkezetek kimutatása

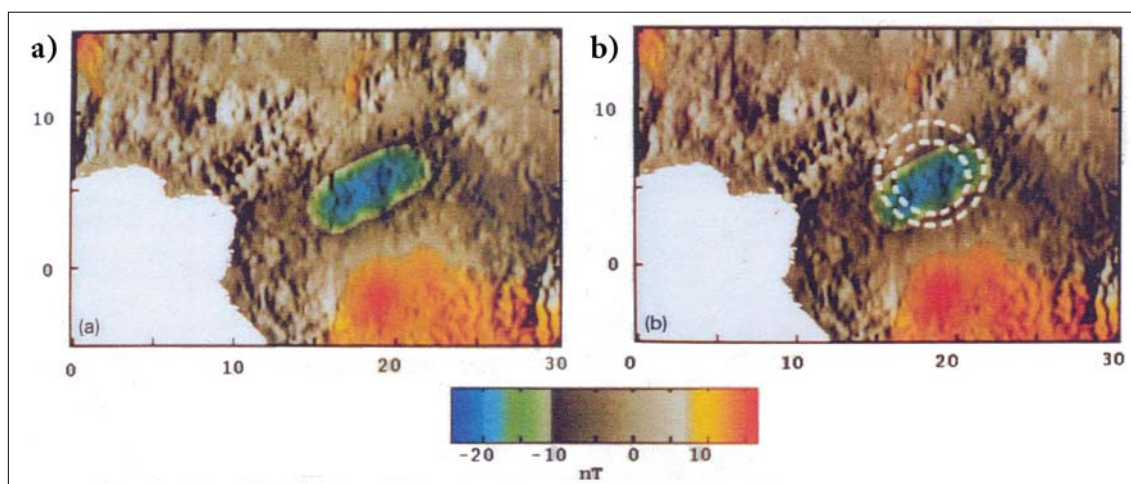
A Földön mintegy 182 becsapódásból származó szerkezetet tartanak nyilván (Lephart 2012). A becsapódási szerkezetek elhelyezkedését a 10. ábra mutatja. A végbemenő eróziós folyamatok megnehezítik ezeknek a szerkezeteknek a felismerését.

A Földön található, valószínűleg a legnagyobb becsapódásból származó szerkezet a Közép-afrikai Köztársaságban található Bangui mágneses anomália, korát proterozoikumnak tekintik. A Bangui mágneses anomália a Kongó- és Csád-medence között helyezkedik el. A perkambriumi medencéket üledékes kőzetek fedik. A becsapódási szerkezethez nagy kiterjedésű negatív totális mágneses anomália tartozik, amely a Magsat mesterséges hold mágneses méréseivel is kimutatható (Girdler et al. 1992). A Bangui-anomáliát először felszíni mérésekkel detektálták. Az egyik ilyen mérés volt a Project Magnet keretében telepített két légi mágneses szelvény, amelyek a Bangui-anomália felett helyezkedtek el (Green 1976). A szelvények jelentős, -1500 nT és -1000 nT anomáliát regisztráltak. Az első értelmezés az anomália forrását maffikus plutonként adta meg. Később felszín közeli, fémesszerkezetű testként értelmezték. Ezt a sekély mélységben elhelyezkedő, vasmeteorit maradványaként fogadták el. Girdler et al. (1992) a Magsat által mért mágneses anomáliát a LANDSAT topográfiai méréseivel vetették egybe. A topográfiai kép feltárta a mágneses anomáliát okozó test kettős gyűrűs szerkezetét (11. ábra). A külső gyűrű átmérője 810 km, míg a belső gyűrű átmérője 491 km. A külső gyűrű átmérője arra utal, hogy a becsapódó meteorit átmérője meglehetősen nagy, 80–200 km lehe-



10. ábra A Földön található becsapódási szerkezetek, piros pontok mutatják az ismert szerkezeteket (Grieve 1987, Pilkington, Grieve 1992)

Figure 10 Impact structures indicated by red dots over the Earth (Grieve 1987, Pilkington, Grieve 1992)



11. ábra A Magsat által mért Bangui totális mágneses anomália (a) és LANDSAT által meghatározott topográfiai kép egybevetése (b), amely mutatja a kettős gyűrű szerkezetet (Girdler et al. 1992)

Figure 11 The Bangui Magsat anomaly (a) superimposed on the LANDSAT topographic image (b) with the highlighted double ring structure (Girdler et al. 1992)

tett. Az értelmezés szerint az anomáliát okozó ható horizontális kiterjedése 800 km, míg a vastagságára 4,5 km adódott. Az anomáliát negatív mágnesezettség okozta.

Bár felszíni mérésekkel mutatták ki, különös érdekes-séggel bír a részben a Yukatán-félszigeten, részben a tenger alatt található Chicxulub meteoritkráter. A becsapódás a kréta és a harmadidőszak határán, 65 millió évvel ezelőtt történt (Pilkington, Hildebrand 2000). Egyes szerzők a dinoszauruszok kihalását ehhez a katasztrofális eseményhez kötik.

Magyarország területén két becsapódási szerkezetet valószínűsítünk: az egyik Pécsről délnyugatra, Magyar-mecskénél (Bodoky et al., 2004), a másik Celldömöktől keletre, Dabronynál (Bodoky et al. 2014). Mindkét szerkezethez negatív Bouguer-anomália tartozik. A területek további jellegzetessége a pozitív vezetőképesség-anomália. Az anomáliák értelmezését Bodoky Tamás és Nemesi László végezte.

A Merkúr, Vénusz, Mars és a Hold mágneses terének űrszondákkal történő vizsgálata

A Naprendszer belső bolygóit igen sok űrszonda vizsgálta. Terjedelemi korlátok miatt csak néhány űrszonda eredményeit ismertetjük.

Általánosságban azt mondhatjuk, hogy jelenleg a Merkúr rendelkezik gyenge, belső eredetű mágneses térrel, a Vénusz esetében a mágneses teret létrehozó dinamó folyamat valószínűleg még nem indult el. A Mars és a Hold vonatkozásában jelenleg azt fogadhatjuk el, hogy a két égitest esetében az aktív, a mágneses teret generáló folyamat pedig már nem működik. A Naprendszer belső bolygói közül csak a Föld rendelkezik jelenleg is működő, aktív dinamóval.

A Merkúr a Naprendszer legbelső bolygója, a Naptól mért átlagos távolsága 0,387099 CSE ($1 \text{ CSE} = 1,495979 \cdot 10^8$

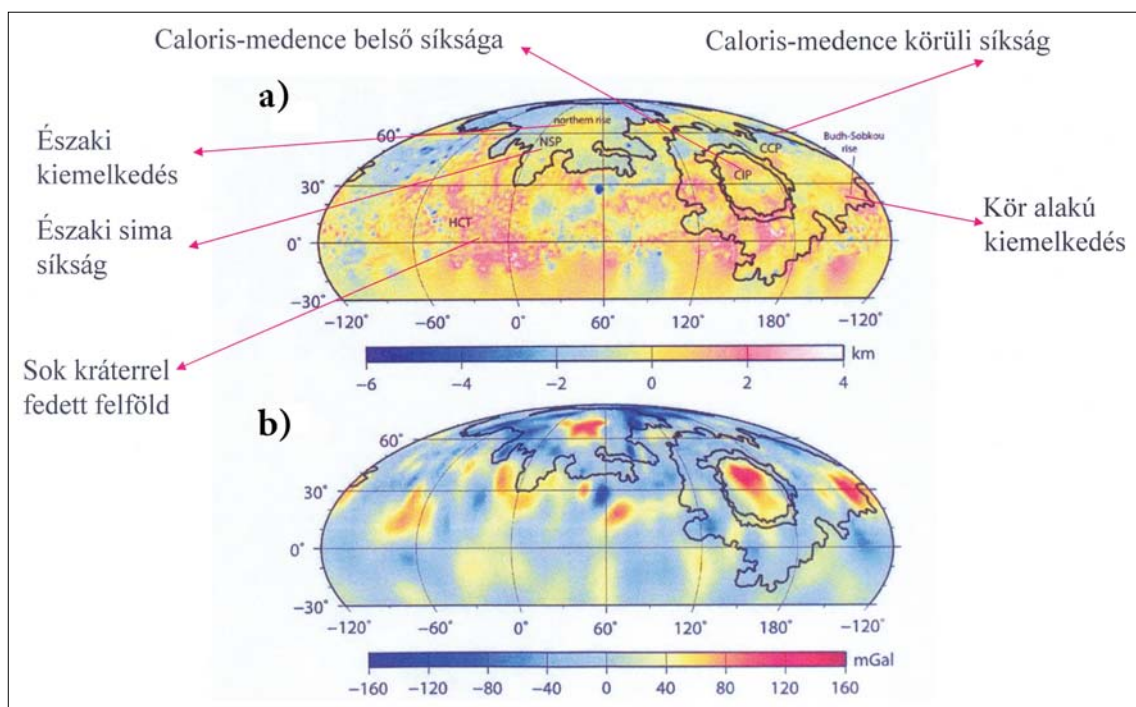
km), egyenlítői sugara 2436 km, átlagsűrűsége 5420 kgm^{-3} , mágneses dipólusmomentuma $2 \cdot 10^{19} - 5 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$. Összehasonlításképpen a Föld adatai: a Naptól mért átlagos távolság 1 CSE, egyenlítői sugara 6378,137 km, átlagsűrűsége 5520 kgm^{-3} , mágneses dipólusmomentuma $7,72 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$.

A Merkúr bolygó topográfiáját, free-air és mágneses anomáliáit a MESSENGER (MERcury Surface Space ENVironment GEochemistry and Ranging) űrszonda mérte meg 2011-ben. Az űrszondát 2004. augusztus 3-án indították, és az 2015. április 30-ig működött. Az űrszonda pályáját úgy módosították, hogy 2006. októberben és 2007. júniusában a Vénusz mellett elrepülve, majd 2008. januárban és októberben, valamint 2009. szeptemberben a Merkúr mellett elhaladva, 2011-ben álljon Merkúr körüli pályára.

Elteltekintve az utazáshoz szükséges vezérlő egységektől, a MESSENGER űrszondán a Merkúr megfigyelésére szolgáló műszereket is elhelyeztek: széles és szűk látószögű, a bolygó topográfiáját megfigyelő kamerákat, gamma- és neutronspektrométereket, amelyek a felszínen előforduló radioaktív elemeket detektálják, a főegységtől 3,6 m távolságban elhelyezett magnetométert, lézeres magasságmérőt, a bolygó atmoszféráját vizsgáló spektrométert, a sebességet mérő, Doppler-elven működő eszközt, a bolygó tömegeloszlásának és kéregvastagságának vizsgálatára. A Merkúr felszíni hőmérséklete eléri a 450°C -t, ezért az űrszondát felszerelték a külső hőmérsékletet árnyékoló pajzzsal, így az űrszonda műszerei szobahőmérsékleten működtek.

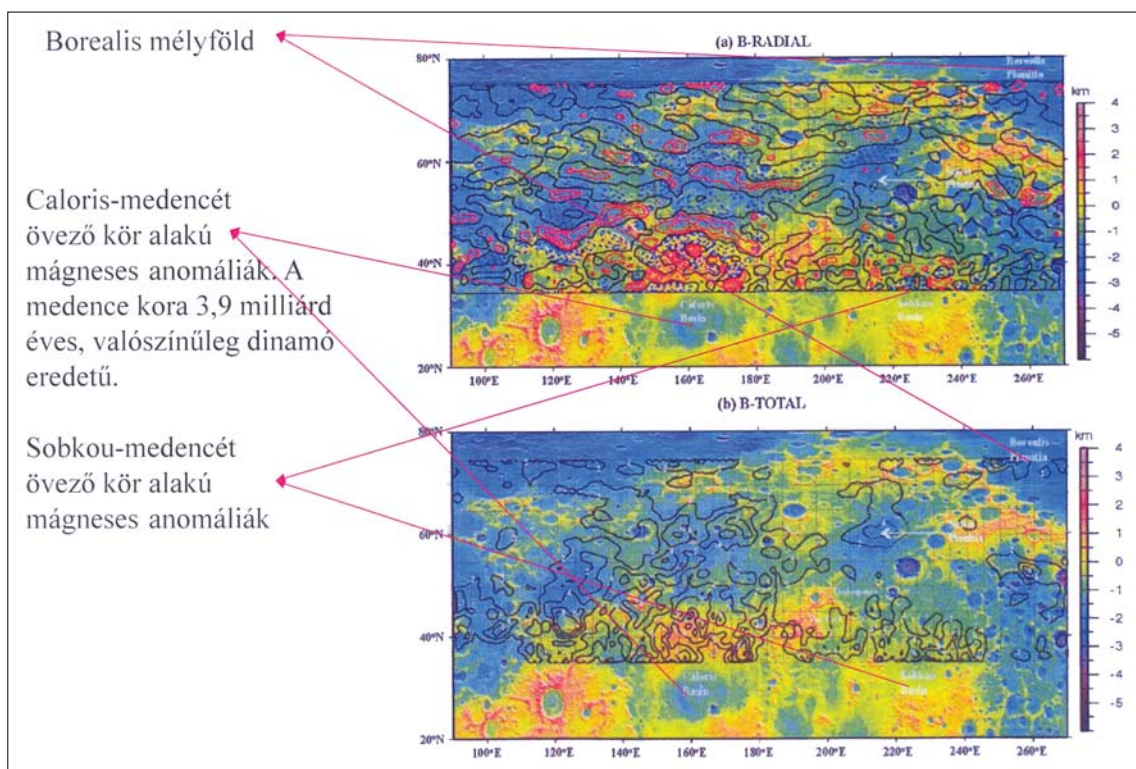
A bolygó tehetetlenségi momentumának meghatározása arra utal, hogy a Merkúr folyékony magjának felső határa 400 km mélységben lehet (James et al. 2015).

A Merkúr topográfiája távcsövekkel a Földről is vizsgálható, bár a körvonalak nem látszanak élesen. A Merkúr topográfiáját és free-air anomáliáit a 12. ábra mutatja (James et al. 2015). A topográfia meghatározása a lézeres magasságmérő műszer mérésein alapult, a mérések pon-



12. ábra A Merkúr topográfiája (a) és free-air anomáliái (b) a MESSENGER mérései alapján. A topográfia és a free-air anomáliák Mollweide-vetületben kerültek ábrázolásra. HCT a sok kráterrel jelentkező területet, NSP az északi sima felföldet, északi Budh-Sobkou-kiemelkedést, CIP a Caloris belső síkságot, CCP a Caloris-medencét körülvevő területet jelöli (James et al. 2015)

Figure 12 (a) Topography and (b) free-air gravity anomaly fields of Mercury determined by MESSENGER in Mollweide projection. Labeled regions heavily cratered terrain (HCT), northern smooth plains (NSP), the northern Budh-Sobkou rise, Caloris interior plains (CIP), Circum-Caloris plains (CCP) (James et al. 2015)



13. ábra A Merkúr vertikális és totális mágneses anomáliái. A mágneses izovonalak értékköze 2 nT. Az ábra feltünteteti a topográfia értékeit is színes ábrázolással (Hood 2016)

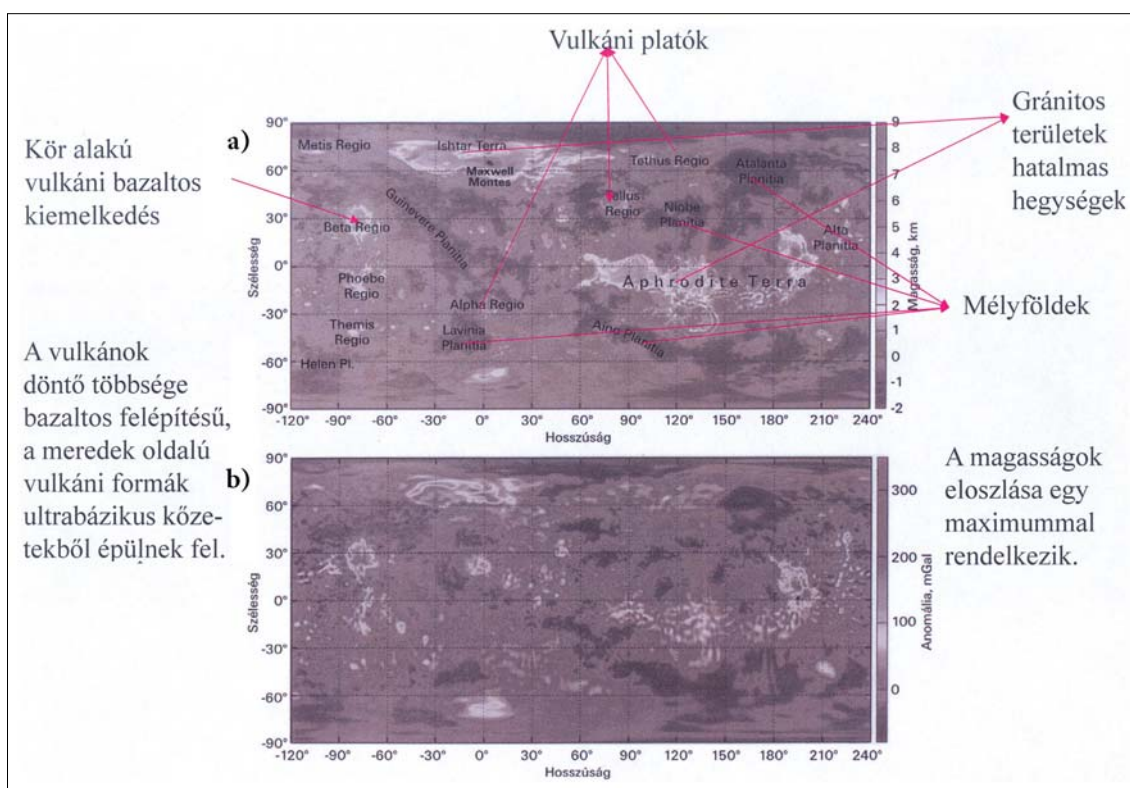
Figure 13 Vertical and total magnetic anomalies of the Mercury, contour interval is 2 nT. The topography is also shown by color scale (Hood 2016)

tossága kisebb volt, mint 1 m. A MESSENGER excentrikus pályája következtében a bolygó délebbre eső féltékén nem történtek magasságmérések. Az ábrán látható Caloris-medencét a legfiatalabb becsapódási területként értelmezték. A medence belsejében sima vulkáni síkság található, ezt nevezik a Caloris-medence belsejében található síkságnak (CIP). A CCP-vel jelölt terület valószínűleg vulkáni eredetű és fiatalabb, mint a Caloris-medence. A bolygó egyenlítői zónájában sok kráterrel fedett felföld található (HCT). A bolygó északi részén kiemelkedés található, amelyet sima síkság vesz körül (NSP). A Budh-Sobkou- kiemelkedés közel kör alakú.

A Merkúr bolygó topográfiájának kompenzációjakor James et al. (2015) négy lehetséges mechanizmus megvizsgálását taglalja. Ezek a kéreg-köpeny határának mélysége, a mélyebb tömeganomáliák hatása, a litoszféra képlékenysége és a kéreg sűrűségének horizontális változása. A Merkúr free-air anomáliái a 12. ábrán láthatók. A kompenzációs mechanizmusok közül a kéreg vastagságának változása és a mélyebb tömeganomáliák kialakulása játszanak szerepet. A Caloris-medence középpontja rendelkezik a legvékonyabb kéreggel, ami nagyobb sűrűségű köpenyanyag megjelenését teszi lehetővé. Ez a hatás okozza a nagy pozitív free-air anomáliát. A topográfia és a free-air anomáliák nagyobb korrelációja jelentkezik az északi kiemelkedés (NSP) és a Budh-Sobkou-kiemelkedés területén. A HCT-vel jelölt területen a köpenyből származó na-

gyobb sűrűségű anyag jelenléte nem jelentkezik nagyobb free-air anomáliával, ez különleges érdekességgel bír.

A 13. ábra együttesen mutatja a meghatározott mágneses tér radiális és totális komponensét, valamint topográfiáját is (Hood 2016). A mágneses anomáliákat a MESSENGER űrszondán elhelyezett magnetométerekkel mérték meg. A mágneses mérések 40 km magasságra vonatkoznak. A Caloris-medence 8 nT anomáliával rendelkezik, míg a medence belsejében pozitív és negatív anomáliák egyaránt előfordulnak, amplitúdójuk 2 nT körül van. A Caloris-medencét övező anomáliák valószínűleg kéreg eredetűek. A Caloris-medence valószínűleg becsapódás következtében alakult ki. Becsapódáskor a hőmérséklet meghaladja a kőzetek Curie-hőmérsékletét, így a kialakult mágnesezettség valószínűleg becsapódási remanens mágnesezettség. A becsapódás után a medencét vulkáni anyag töltötte ki, amely a bolygó mágneses tere következtében mágnesesződött. A mágneses anomáliák második csoportja a Sobkou-síksághoz tartozik. Itt a mágneses anomáliák amplitúdója eléri a 6 nT-t, bár az azt övező anomáliák formája nem annyira kör alakú, mint a Caloris-medence esetében. Amíg a Caloris-medence körül 3,9 milliárd évre teszik, addig a Sobkou-anomáliát 4,0 milliárd évesnek vagy öregebbnek valószínűsítik. Mindkét anomália akkor alakult ki, amikor a Merkúr aktív dinamója még működött. A Borealis-síkság mágneses anomáliája színén a kitöltött vulkáni anyag következtében jött létre.



14. ábra A Vénusz topográfiáját (a) (Rappaport et al. 1999) és free-air anomáliáit (b) (Konopliv et al. 1999) bemutató térkép. Az anomáliák Mercator-vetületben ábrázolva

Figure 14 Topography (a) of the Venus (Rappaport et al. 1999) and free-air anomalies (b) of the Venus (Konopliv et al. 1999). The anomalies are plotted in Mercator projection

A Vénusz a Naprendszer második bolygója, Naptól mért átlagos távolsága 0,723332 CSE, egyenlítői sugara 6053 km, átlagsűrűsége 5250 kg m^{-3} , mágneses dipólusmomentuma $4,29 \cdot 10^{18} \text{ Am}^2$ (vö. a Föld adataival).

A Vénusz Express űrszonda mérte meg a Vénusz mágneses terét és topográfiáját. Az űrszonda 2005. november 9-én indult a Bajkonurban található űrbázisról, és 2014. december 10-én fejezte be méréseit a Vénusz körül.

Az űrszondát ellátták a Vénusz felszínét vizsgáló kamerával: látható és infravörös hőkamerával (a felszín hőmérsékletének vizsgálatára), ultraibolya és infravörös spektrométerrel a bolygó atmoszférájának vizsgálatára, magnetométerrel és az űrplazma energiáját vizsgáló egységgel.

A Vénusz topográfiáját Rappaport et al. (1999) és James et al. (2013) tanulmányai mutatják be (14. ábra). A vénuszi síkságok és mélyföldek a felszínnek mintegy 85%-át, míg a felföldek 15%-át borítják. A Vénusz magasságának gyakorisági eloszlása egy maximumot mutat, szemben a Föld magasságának eloszlásával, amely két gyakorisági maximummal rendelkezik. A magasságok 80%-a 1 km-nél kisebb magasság–mélység intervallumban helyezkedik el. A magasságmérések során 1660 vulkáni formát határoztak meg. A vulkánok döntő többsége bazaltos összetételű, míg a meredek oldalú vulkánok valószínűleg ultrabázisos kőzetekből épülnek fel. A nagy tömegű vulkánok hatalmas kiterjedésű magmakamrákból táplálkozhatnak. A vulkáni aktivitás ugyan csökkent a Vénuszon, de még jelenleg sem szűnt meg.

A vénuszi felföldek két csoportba oszthatók: vulkáni kiemelkedésekre és vulkáni platókra. A vulkáni kiemelkedésekhez nagyobb értékű free-air anomáliák kapcsolódnak. Ennek tipikus példája az 1–3 km kiemelkedésű Beta Regio. A vulkáni platók lehetnek kör alakúak (Alpha Regio) és elnyúlt formájúak (Tellus Regio). A több száz

km kiterjedésű hegyvidékekhez valószínűleg vastagabb kéreg tartozik (James et al. 2013) (15. ábra). Ilyen szerkezetet az Isthara Terra és az Aphrodite Terra. Ezek a hatalmas hegységek valószínűleg gránitos összetételűek. Az Atalanta-síkság és a Lavinia-síkság közel kör alakú bemélyedések.

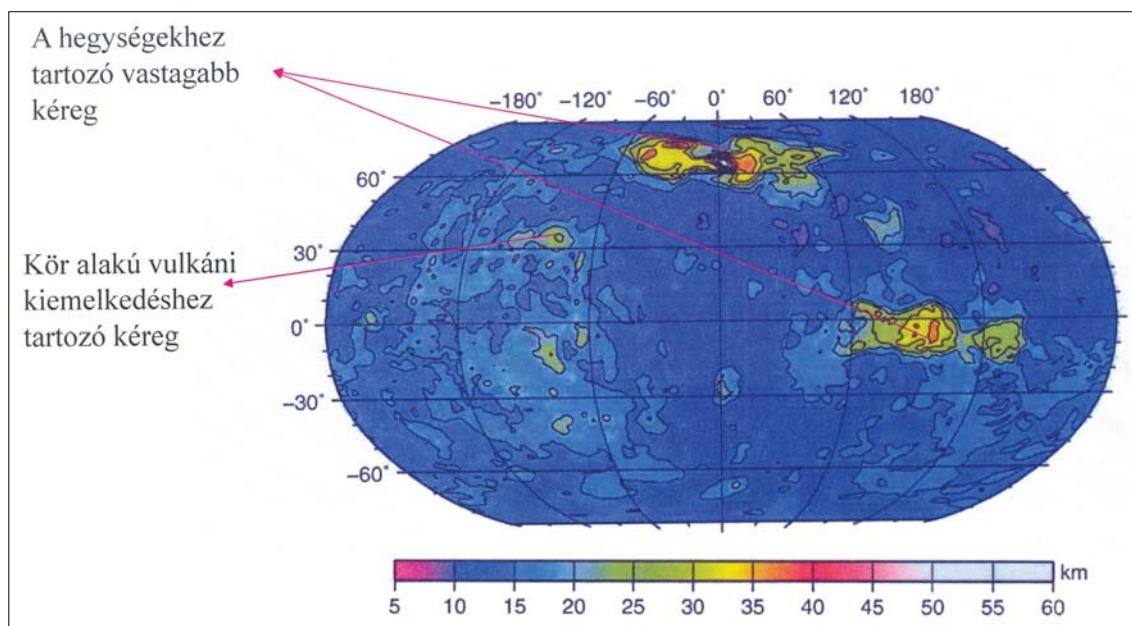
A Beta Regio 150 mGal, az Aphrodite Terra és Alta Regio nagyságrendileg 130 mGal, a Tellus Regio 30 mGal free-air anomáliával jellemezhető. Az Atalanta síkság –35 mGal anomáliával rendelkezik. Ezek a területek izosztatikusan nem vagy kevésbé kompenzáltak. Ahol vastagabb kéreg jelentkezik, ott bekövetkezhet a részleges izosztatikus kompenzáció.

A Vénusz mágnesese terére az indukált mágnesezettség eredetű tér jellemző. A Vénusz esetében is bekövetkezik az interplanetáris mágneses tér és a bolygó indukált mágneses terének átkötődése. Az erővonalak átkötődése a Föld esetében jól ismert folyamat. Ezt a lehetőséget Dugney (1961) tanulmánya ismerteti.

A Mars a Naprendszer negyedik bolygója, a Naptól mért átlagos távolsága 1,523691 CSE, egyenlítői sugara 3396 km, átlagsűrűsége 3940 kg m^{-3} , mágneses dipólusmomentuma $2,5 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$ (vö. a Föld korábban ismert adatával).

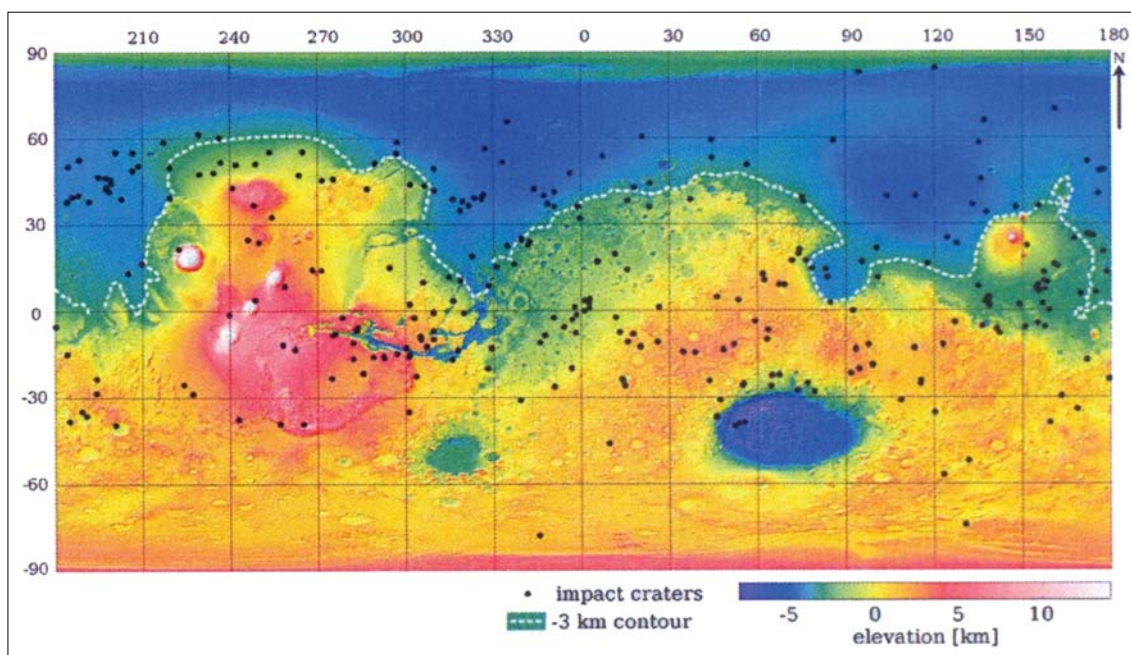
A Mars vizsgálata a Mars Global Surveyor mérésein alapul. Az űrszondát a NASA indította el 1996. november 7-én, az űrszonda 1997. szeptember 11-én állt bolygó körüli pályára. Küldetését közel tíz éves sikeres működés után 2006. november 2-án fejezte be.

A Mars Global Surveyor-t felszerelték a bolygó kutatására szükséges műszerekkel: széles és szűkebb látószögű kamerával (a szűk látószögű kamera felbontóképessége 0,5 m), lézeres magasságmérő műszerrel (pontossága 30 cm), hőemissziót mérő spektrométerrel (az eszköz



15. ábra | A Vénusz bolygó kéregvastagsága km egységben (James et al. 2013)

Figure 15 | Crustal thickness (in km) of the Venus (James et al. 2013)



16. ábra A Mars bolygó topográfiája (Smith et al. 2001), fekete pontok mutatják a kráterek elhelyezkedését, fehér pontsorozat jelöli a –3 km-es mélységet (Watters et al. 2015). Az anomáliák Mercator-vetületben ábrázolva

Figure 16 The topography of the Mars (Smith et al. 2001), black points indicate the position of the craters, white points show the depth of –3 km (Watters et al. 2015). The anomalies are plotted in Mercator projection

meghatározta az infravörös tartományban a bolygó felszínéről érkező hőemissziót), magnetométerrel a bolygó mágneses terének mérésére és a gravitációs tér mérésére alkalmas eszközzel.

A Mars topográfiája érdekes eloszlást mutat (Smith et al. 2001). A Mars Global Surveyor lézeres magasságmérő egysége közel 600 millió mérést végzett. Így a Mars topográfiáját meglehetősen jól ismerjük. A 16. ábrát nézve világosan látható, hogy a bolygónak közelítőleg az északi féltekéjén, a marsi mélyföldön kevés kráter, míg a déli féltekéjén, a marsi felföldön nagyszámú kráter fordul elő (Watters 2015). A marsi mélyföld átlagos magassága mintegy 3 km-rel alacsonyabb, mint a déli féltekén található marsi felföld. A mélyföldet vulkáni eredetű és üledékes anyag tölti ki. A lehetséges magyarázatok közé tartozik, hogy a mélyföld kisebb kéregvastagsággal rendelkezik, mint a felföld. További lehetséges magyarázat, hogy a mélyföld gigantikus becsapódás következtében alakult ki, és a mélyföldet később vulkáni és üledékes anyag töltötte ki. Azt is feltételezik, hogy a mélyföld kialakulását konvekciós cella leszálló ága alakította ki, és ez okozta a kéreg kivékonyulását. A marsi kéreg átlagos vastagsága mintegy 45 km, a felföldön a vastagság eléri a 60 km-t, a mélyföldön 30 km lehet.

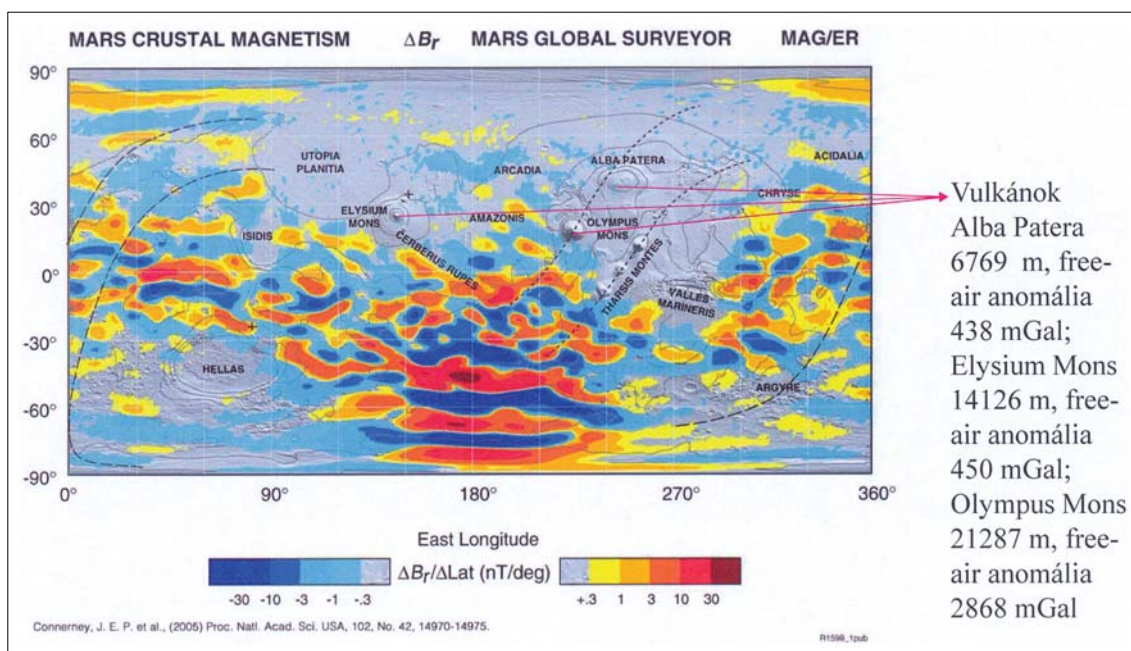
A Mars felszínének további érdekessége a rendkívül nagy magasságú vulkánok előfordulása (17. ábra). Az Alba Patera 6769 m, az Elysium Mons 14126 m, míg az Olympus Mons 21287 m magasságú. Az Olympus Mons a Naprendszerben található legmagasabb vulkán. A vulkánokhoz nagy free-air anomália tartozik, Az Alba Patera 438 mGal, az Elysium Mons 450 mGal, míg az Olympus Mons 2868 mGal free-air anomáliával jellemezhető. A vulkánok gravi-

tációs anomáliái azt fejezi ki, hogy hatalmas tömegük nincs izosztatisztikus egyensúlyban, helyzetüket a mechanikusan szilárd kéreg tartja meg. A Valles Marineris-árok free-air anomáliája –402 mGal nagyságú, az anomália valószínűleg tömeghiány következtében alakult ki.

Lowman (2002) megállapításai szerint a Marson nem találhatók meg a lemeztectonika jellegzetességei, így gyakran nevezik egylemezű bolygónak.

A Naprendszer bolygói közül három esetben rendelkezünk közetmágneses vizsgálatokkal. A Holdról (l. később), a Marsról és természetesen a Földről. A Mars közetmágneses vizsgálatáról az SNC meteoritok (McSween, 1985) szolgáltatnak adatokat. Az SNC rövidítés, a meteoritok elnevezése, a megtalálási helyükre vonatkozik: Shergotty (India), Nakhla (Egyiptom), Chassigny (Franciaország). Ezek a közetminták kristályosodott lávából származnak, feltehetően a Marson bekövetkezett nagyméretű meteoritbecsapódás következtében kerültek a Földre. A megtalált meteoritszemcsék gázzárványainak vizsgálata megegyezett a Marsra leszállt Viking szondák méréseinek eredményével.

A Mars körül keringő Mars Global Surveyor űrszonda részletesen feltárta a bolygó mágneses terének eloszlását (Acuña 2001). A 17. ábrán bemutatott térkép a mágneses tér vertikális összetevőjét mutatja. Az erősebben mágnesezett kéreg közelítőleg a bolygó déli féltekéjén jelentkezik, míg az északi félgömbön, a marsi mélyföldön nem találhatók nagyobb intenzitású anomáliák. A vizsgálatok szerint a Mars mintegy 4,6–3,8 milliárd évvel ezelőtt rendelkezett aktív dinamóval. A déli félgömbön találgató anomáliák valószínűleg ebben az időszakban alakultak ki. A Hellas Planitia-, az Argie Planitia- és az Isidis Planitia-

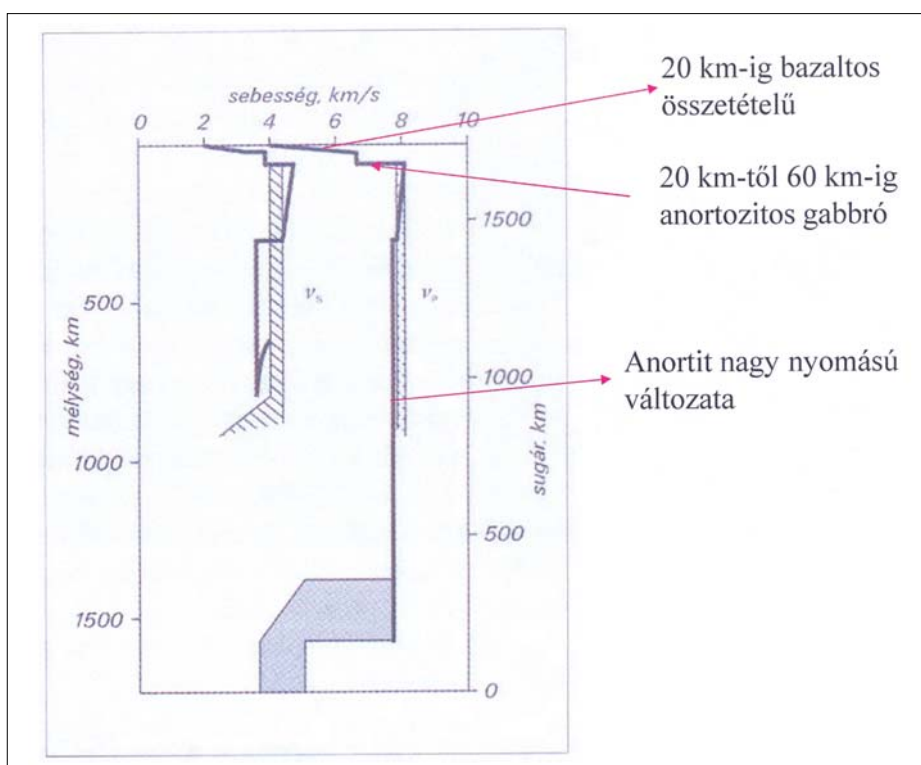


17. ábra Mars vertikális mágneses tere (Acuña et al. 2001). Anomáliák Mercator-vetületben ábrázolva
Figure 17 Vertical magnetic field of the Mars (Acuña et al. 2001). The anomalies are plotted in Mercator projection

síkságok valószínűleg becsapódás következtében alakultak ki.

A Hold a Föld körül keringő égitest. A Földtől mért átlagos távolsága 384 400 km, egyenlítői sugara 1738 km, átlagsűrűsége 3340 kg m^{-3} , mágneses dipólusmomentuma

$1,3 \cdot 10^{19} \text{ Am}^2$. A Hold talán a legjobban vizsgált égitest. Nevezéktana a korai vizsgálatokon alapul, Giovanni Riccoli (1598–1671) olasz csillagász vezette be a vizuálisan sötétebb színben észlehető területeknek, a mare-területnek (mare latinul tenger) történő elnevezését, a világo-



18. ábra A Hold belső szerkezete, a v_s és v_p hullámok sebességének mélységfüggése (Toksöz et al. 1974)
Figure 18 Internal structure of the Moon, velocity of the v_s and v_p waves versus depth (Toksöz et al. 1974)

sabbnak tűnő területeknek, a terra-területnek (terra latinul föld) nevezte el. Ezt az elnevezést mai napig is megtartották.

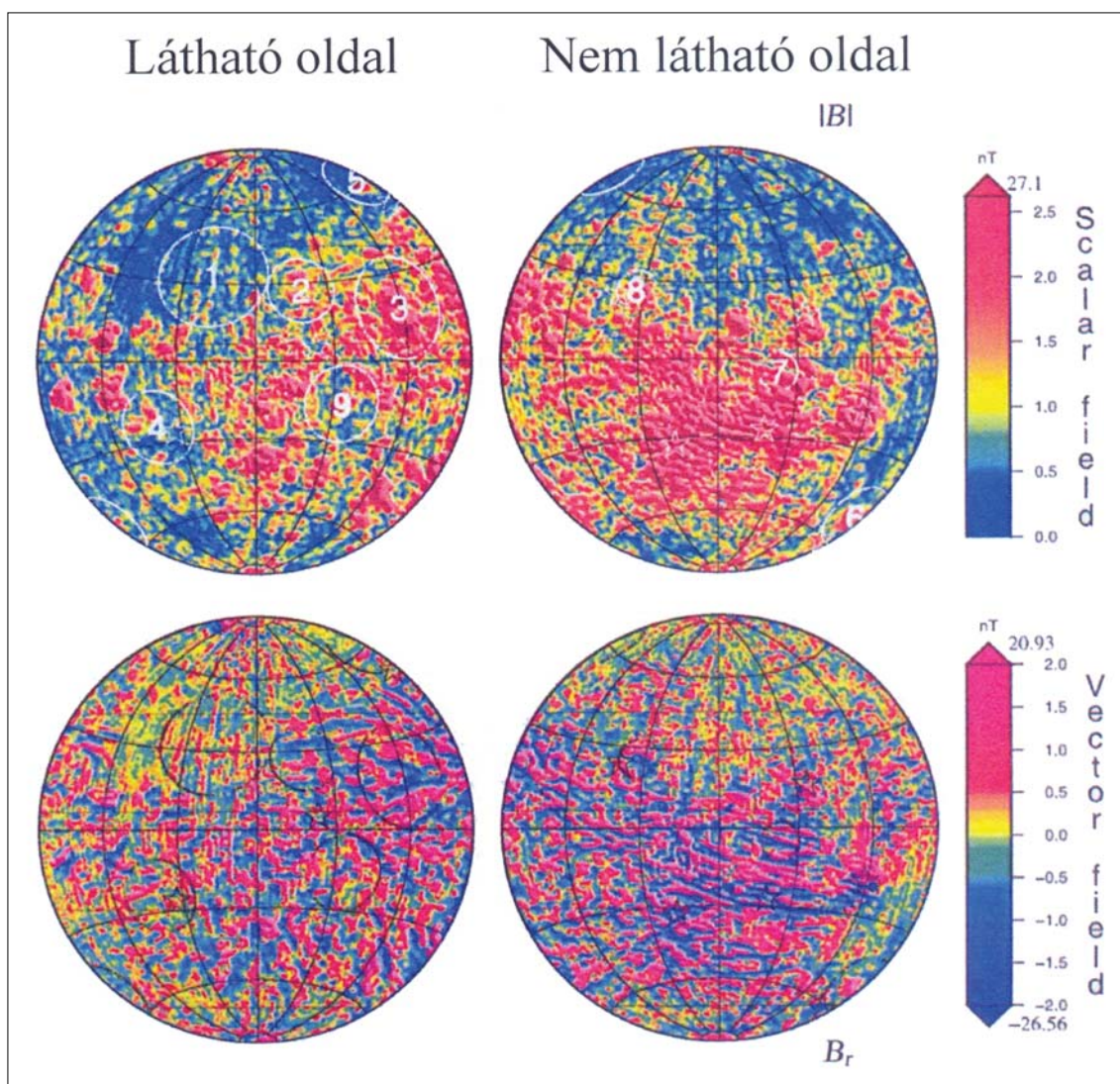
A Hold bemutatott vizsgálata részben a Lunar Prospector, részben a Kaguya űrszondák mérésein alapulnak.

A Lunar Prospector űrszondát a NASA indította 1998. január 7-én. 100 km magasságú pályán keringett 1999. januárig, működésének utolsó 6 hónapja alatt 25 km magasságú kör alakú pályán működött, míg 1999. júliusban becsapódott a Holdba. A Lunar Prospector űrszondát ellátták a Hold vizsgálatára szolgáló műszerekkel: γ -spektrométerrel és neutronspektrométerrel a felszínen található kőzetek vizsgálatára, az α -részecskéket detektáló spektrométerrel, magnetométerrel, elektron reflektométerrel,

amelyet a paleomágneses mérésekhez használtak, Doppler-elven működő műszerrel a gravitációs tér mérésére.

A Kaguya japán szondát a Japán Űrügynökség állította Hold körüli pályára. Az űrszondát 2007. szeptember 14-én indították, és 2009. június 10-én fejezte be küldetését. A Kaguya űrszondát felszerelték röntgen- és γ -spektrométerekkel a felszínen található kőzetek összetételének vizsgálatára, lézeres magasságmérő egységgel, magnetométerrel, töltött részecskék kimutatására szolgáló detektorral, plazma összetételét és energiáját mérő egységgel, televíziós adást biztosító kamerával.

A Hold az egyetlen égitest ahova az Apollo-program keretében embert szállító űrhajók leszálltak. Tudomá-



19. ábra A Hold gömbi sorfejtéssel meghatározott mágneses terének eloszlása a Lunar Prospector mérései alapján 30 km-es magasságban. Az ábra a totális tér abszolút értékét (felső) és radiális komponensét mutatja a Hold látható (bal) és a Földről nem látható oldalára (jobb). Jelmagyarázat: (1) Esők Tengere, (2) Derültség Tengere, (3) Veszélyek Tengere, (5) Humboldt-tenger, (6) Mendel-Ryberg becsapódási zóna, (7) Korolev-tenger, (8) Moszkvai-tenger, (9) Méz Tengere. Az ábra Lambert-féle vetületben készült (Purucker, Nicholas 2010)

Figure 19 Global spherical harmonic model of the lunar magnetic field measured by the Lunar Prospector, at the altitude of 30 km. The total magnetic field (upper) and radial magnetic field (lower), near side map (left) far side map (right) are shown. Legend. (1) Mare Imbrium, (2) Mare Serenitatis, (3) Mare Crisium, (4) Mare Humorum, (5) Mare Humboldtianum, (6) Mendel-Ryberg zone, (7) Mare Korolev, (8) Mare Moscovienne, (9) Mare Nectaris. The figure is plotted in Lambert equal area projection (Purucker, Nicholas 2010)

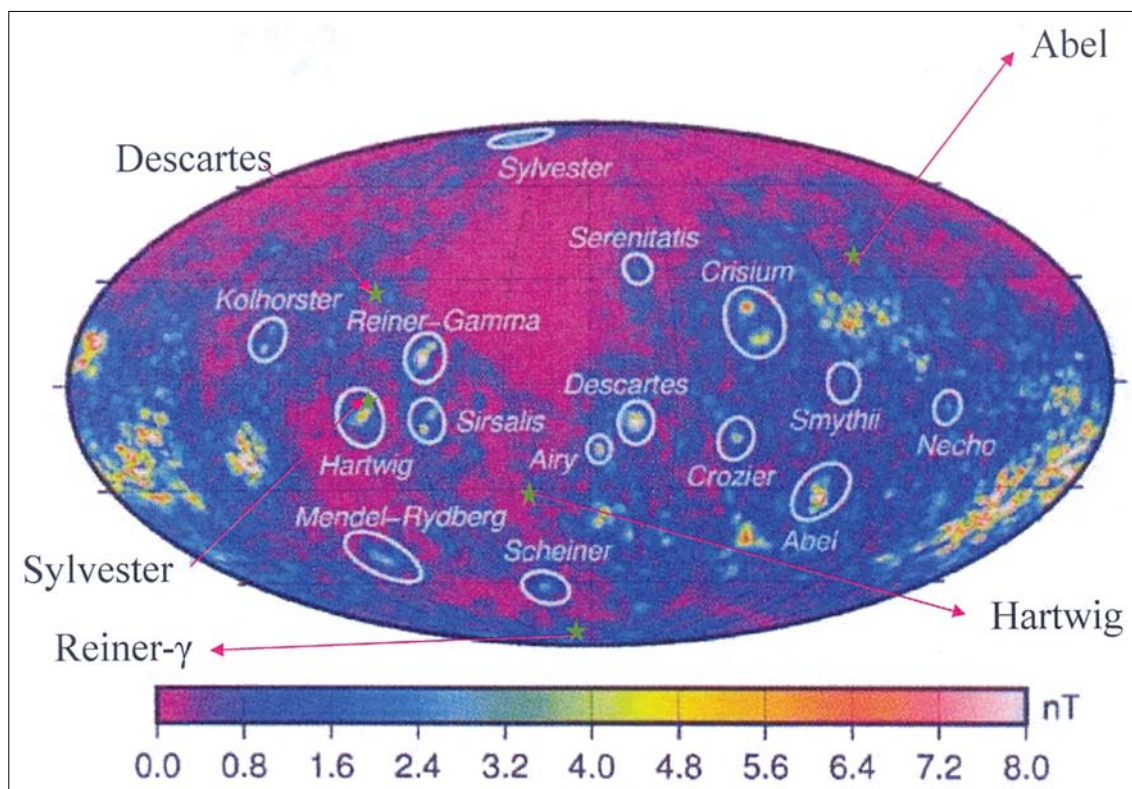
nyos műszereket, az ALSEP-et (Apollo Lunar Scientific Experimental Package), többek között szeizmométereket helyeztek el a Hold felszínén. A szeizmométerek méréseinek értelmezését, a sebességek mélység függését Toksöz et al. (1974) végezte el (18. ábra). A felvételek kiértékeléséből az adódott, hogy a felszíntől 300 m-es mélységig terjedő, töredezett kőzetekből és porból álló összetet nevezik regolitnak. A káliumból, ritka földfémekből és foszforból (Kalium Rare Earth Element Phosphorus) álló kőzeteket nevezik KREEP-nek. A KREEP-ben gazdag kőzetek rendelkeznek nagyobb uránium- és tóriumtartalommal. A kiömlési kőzetek is KREEP-ben gazdagok. A sebességek eloszlása alapján 20 km-es mélységig a kőzetekre bazaltos összetétel a jellemző. 20 km és 60 km mélységig a kőzeteket anortozitos gabbrónak tekintik. 60 km mélységtől az összetételt anortit nagy nyomású változatának fogadják el. A szeizmológiai vizsgálatok nem voltak elegendőek a Hold magjának pontosabb meghatározására. Elfogadható egy 470 km sugarú vasból álló mag vagy egy 720 km sugarú vasszulfidból álló mag létezése.

A Hold vizsgálatának érdekes eredménye a masconok (*mass concentration*), tömegkoncentrációk kimutatása. A masconok becsapódás következtében alakulhattak ki, jellegzetességük a nagy pozitív gravitációs anomália. A masconok a kör alakú mare-medencék területén fordul-

nak elő. Nagy vastartalmú kőzetek hatásának tulajdonították ezeket az anomáliákat. A Lunar Prospector méréseit feldolgozva masconokat mutattak ki a Mare Imbrium (Esők Tengers), a Mare Serenitatis (Derűtség Tengers), a Mare Crisium (Veszélyek Tengers), a Mare Nectaris (Méz Tengers), Mare Humorum (Nedvesség Tengers), Mare Orientale (Keleti Tenger) területén. További masconokat fedeztek fel a Hold Földről nem látható oldalán is, a Mare Moscoviense (Moszkvai-tenger), a Hertzsprung, a Coulomb–Sarton és a Freundlich–Sharonov becsapódási medencékben. A masconok érdekes tulajdonsága, hogy izosztatikusan nem kompenzáltak. A hatalmas tömegüket a szilárd kéreg tartja meg.

A holdi kőzetek paleomágneses vizsgálata azt mutatta, hogy közelítőleg 4-től 3 milliárd évig működött aktív dinamó a magban, miközben a Hold mágnesesdipólusmomentuma $1,3 \cdot 10^{21}$ Am²-ről 10^{19} Am²-re csökkent.

A Hold Lunar Prospector által mért mágneses terét gömbi sorfejtéssel vizsgálta meg Purucker és Nicholas (2010). A számításokhoz a Lunar Prospector 30 km-es magasságban mért adatait használták. A sorfejtést 170 fokig végezték el, ez 64 km-nél hosszabb hullámhosszú felbontást biztosított. A meghatározott térkép (19. ábra) kifejezi, hogy a Hold története során, a becsapódásból származó sok mágneses anomália bizonyos rendezetlenséget jelent azok eloszlásában.



20. ábra A Hold mágneses tere a Lunar Prospector és a Kaguya mérései alapján 30 km-es magasságban. Fehér szín jelöli a vizsgált mágneses anomáliákat, zöld csillag jelöli a meghatározott mágneses pólusok helyét. Az ábra Mollweide-vetületben készült (Oliveira, Wieczorek 2017)

Figure 20 Magnetic field of the Moon based on the measurement of the Lunar Prospector and Kaguya at the altitude of 30 km. White circles indicates the investigated anomalies green asterisks indicate the position of the magnetic pole. The figure is plotted in Mollweide projection (Oliveira, Wieczorek 2017)

Oliveira és Wieczorek (2017) azt vizsgálta, hogy a Holdon tapasztalt mágneses anomáliák mennyire tükrözik a tengelyirányú, dipólusszerkezetű mágneses teret. Feltételezték, hogy a Hold 4,2 és 3,6 milliárd évig tartó időszakában aktív dinamó működött. Számításaikhoz a Lunar Prospector és a Kaguya űrszonda mágneses méréseit használták fel. A 20. ábra illusztrálja a Hold mágneses terét a Lunar Prospector és Kaguya mérései alapján, 30 km magasságban. A 20. ábra fehér szín jelöléssel tünteti fel a vizsgált mágneses hatókat. A hatók közül a Reiner- γ rendelkezett tengelyirányú, dipólus jellegű mágneses tér által létrehozott mágneses pólussal ($\lambda = 348,7^\circ$ hosszúság és $\varphi = -82,0^\circ$ szélesség). A Descartes- és az Abel-anomáliákhoz tartozó pólusok: $\lambda = 278,9^\circ$ és $\varphi = 20,3^\circ$, illetve $\lambda = 107,6^\circ$ és $\varphi = 37,93^\circ$, illetve a Sylvester- és Hartwig-anomáliákhoz tartozó mágneses pólusok: $\lambda = 282,2^\circ$ és $\varphi = -12,0^\circ$, illetve $\lambda = 348,1^\circ$ és $\varphi = -38,0^\circ$. Ezek a hatók valószínűleg becsapódás következtében jöttek létre, és a meghatározott dipólusok iránya nem a forgási tengely irányába mutat. A többi hatóhoz tartozó mágneses pólus szintén nem mutatott tengelyirányú elhelyezkedést.

Konklúziók

A mesterséges holdak mágneses mérései nagy előre lépést jelentenek a Föld mágneses terének és a mágneses anomáliáknak a vizsgálatában. A 6. ábrán az Olsen et al. (2017) által bemutatott anomáliatérképet tekintve világossá válik, hogy a mesterséges holdak által meghatározott anomáliák és azok értelmezése a földtani kutatás alapvető eszközévé válnak. Ezek a mérések a sűrű mintavételi távolság következtében részben helyettesíteni fogják a felszínen végzett nyersanyagkutató mágneses méréseket. Bár a mesterséges holdak pályára állítása költséges, a meghatározott anomáliákhoz azonban viszonylag kis költséggel lehet hozzájutni.

A Naprendszer bolygóit még hosszú ideig csak az űrszondák méréseivel tudjuk vizsgálni. Űrszondák felbocsátására csak az űrkutatásban élenjáró országok képesek, azonban az adatok feldolgozásában – a mért adatok hatalmas mennyisége miatt – az együttműködés a polgári célú kutatásokban lehetséges.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki dr. Patrick T. Taylor geofizikusnak (NASA/GSFC) a több mint húszéves együttműködésért és az érdekes megbeszélésekért. Továbbá dr. Paul D. Lowman geológusnak (NASA/GSFC) az értékes diszkuszióért. Köszönet illeti dr. Wittmann Géza geofizikust (MOL Nyrt.) a közel huszonöt éven át végzett közös munkáért és a közösen végzett számításokért, Pusztai Sándor (Fractal Bt.) és dr. Toronyi Bence (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) geofizikusokat a számítások elvégzésében történt együttműködésükért.

A tanulmány szerzője

Kis Károly

Hivatkozások

- Acuña M. H., Connerney J. E. P., Wasilewski P., Lin R. P., Mitchell D. L., Anderson K. A., Carlson C. W., McFadden J., Rème H., Mazelle C., Vignes D., Bauer S. J., Cloutier P. A., Ness N. F. (2001): Magnetic field of Mars: Summary of results from aerobraking and mapping orbits. *Journal of Geophysical Research* 106, E10, 23403–23417
- Balázs A., Matenco L., Magyar I., Horváth F., Cloetingh S. (2016): The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. *Tectonics* 35, 1526–1559
- Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. (2010): Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology* 105, 467–508
- Bodoky T., Kummer I., Kloska K., Fancsik T., Hegedüs E. (2004): A magyarmecskei tellurikus vezetőképesség-anomália: eltemetett meteoritkráter? *Magyar Geofizika* 45, 96–101
- Bodoky T., Kiss J., (2014): A dabronyi negatív gravitációs anomália vizsgálata: eltemetett meteoritkráter? *Magyar Geofizika* 55, 82–88
- Dungey J. W. (1961): Interplanetary magnetic field and aurora zone. *Physical Review Letters* 6, 47–49
- Girdler R. W., Taylor P. T., Frawley J. J. (1992): A possible impact origin for the Bangui magnetic anomaly (Central Africa). *Tectonophysics* 212, 45–58
- Green A. G. (1976): Interpretation of Project MAGNET aeromagnetic profiles across Africa. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 44, 203–228
- Grieve R. A. F. (1987): Terrestrial impact structures. *Annual Review of Earth and Planet Sciences* 15, 245–270
- Heiland C. A. (1946): *Geophysical Exploration*. Prentice-Hall
- Hood L. L. (2016): Magnetic anomalies concentrated near and within Mercury's impact basins: Early mapping and interpretation. *Journal of Geophysical Research: Planets* 121, 1016–1025
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., Korkonai B., Pap N., Tóth T., Wórum G. (2015): Evolution of the Pannonian Basin and its geothermal resources. *Geothermics* 53, 328–352
- James P. B., Zuber M. T., Phillips R. J. (2013): Crustal thickness and support of topography on Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets* 118, 859–875
- James P. B., Zuber M. T., Phillips R. J., Solomon S. C. (2015): Support of long-wavelength topography on Mercury inferred from MESSENGER measurements of gravity and topography. *Journal of Geophysical Research: Planets* 120, 287–310
- Kis K. I., Wittmann G. (1998): Determination of vertical magnetic anomalies and equivalent layer for the European region from the Magsat measurements. *Journal of Applied Geophysics* 39, 11–24
- Kis K. I., Wittmann G. (2002): 3D reduction of satellite magnetic measurements to obtain magnetic anomaly coverage over Europe. *Journal of Geodynamics* 33, 117–129
- Kis K., Wittmann G. (2011): A CHAMP mesterséges hold tízéves működése. *Magyar Geofizika* 52, 1–4
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztai S. (2011): Inversion of magnetic measurements of the CHAMP satellite

- over the Pannonian Basin. *Journal of Applied Geophysics* 2011, 412–418
- Kis K. I., Taylor P. T., Wittmann G., Toronyi B., Pusztai 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
- Kis K., Taylor P. T., Wittmann G. (2014): A földi mágneses tér gradienseinek meghatározása mesterséges holdak méréseiből és a kurszki mágneses anomália inverziója. *Magyar Geofizika* 55, 150–162
- Konopliv A. S., Banerdt W. B., Sjoren W. L. (1999): Venus gravity 180th degree and order model. *Icarus* 139, 3–18
- Langel R. A., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M. (1982): The Magsat mission. *Geophysical Research Letters* 9, 243–245
- Lasareff P. (1923): The anomalies of terrestrial magnetism and gravity in the Kursk Government Russia. *Terrestrial Magnetism* 123–124
- Lephart D. (2012): Evidence for an impact origin of the Late Ordovician Bear Swamp structure in upstate New York, USA. *The Leading Edge*, August 2012, 892–897
- Lowmann P. D., Jr. (2002): *Exploring Space Exploring Earth*. Cambridge University Press
- Maus S., Rother M., Hemant K., Stolle C., Lühr H., Kuvshinov A., Olsen N. (2006): Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements. *Geophysical Journal International* 164, 319–330
- McSweeney H. Y., Jr. (1985): SNC meteorites: Clues to Martian petrologic evolution. *Reviews of Geophysics* 23, 391–416
- Nolte H. J., Hahn A. (1992): A model of the distribution of crustal magnetization in central Europe compatible with the field of magnetic anomalies deduced from Magsat results. *Geophysical Journal International* 11, 483–496
- Oliveira J. S., Wiczeorek M. A. (2017): Testing the axial dipole hypothesis for the Moon by modeling the direction of crustal magnetization. *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, 383–399
- Olsen N., Ravat D., Finlay Ch. C., Koher L. K. (2017): LCS-1: A high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations. *NASA Goddard Space Flight Center*, pp. 1–19
- Pilkington M., Grieve R. A. F. (1992): The geophysical signature of terrestrial impact craters. *Reviews of Geophysics* 30, 161–181
- Pilkington M., Hildebrand A. R. (2000): Three-dimensional magnetic imaging of the Chicxulub Crater. *Journal of Geophysical Research* 105/B10, 23479–23491
- Purucker M. E., Nicholas J. B. (2010): Global spherical harmonic models of the internal magnetic field of the Moon based on sequential and coestimation approaches. *Journal of Geophysical Research* 115/E12007, 1–14
- Rappaport N., Konopliv A. S., Kucinskis A. B. (1999): An improved 360th and order model of Venus topography. *Icarus* 39, 19–31
- Ravat D., Langel R. A., Purucker M., Arkani-Hamed J., Alsdorf D. E. (1995): Global vector and scalar Magsat magnetic anomaly maps. *Journal of Geophysical Research* 100/B10, 20111–20136
- Regan R. D., Cain J. C., Davis W. M. (1975): A global magnetic anomaly map. *Journal of Geophysical Research* 80, 794–802
- Reiger Ch., Lühr H., Schwintzer P. (szerk.) (2003): *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetism and Atmospheric Studies*. Springer-Verlag, Berlin
- Reigber Ch., Jochmann H., Wünsch J., Petrovic S., Schwintzer P., Barthelmes F., Neumayer K.-H., König R., Förste Ch., Balmino G., Biancale R., Lamonie J.-M., Loyer S., Perosanz F. (2005): Earth gravity field and seasonal variability from CHAMP. In: Reigber Ch., Lühr H., Schwintzer P., Wickert J., (eds.). *Earth Observation with Champ. Results from Three Years in Orbit*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 25–30
- Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Frunze A. Kh., Filipov S. V., Abranova D. (2005): Anomalous magnetic fields measured on the CHAMP satellite for the territory of the Kursk magnetic anomaly. *Geomagnetism and Aeronomy* 45, 671–678
- Smith D. E., Zuber M. T., Frey H. V., Garvin J. B., Head J. W., Muhleman D. O., Pettengill G. H., Phillips R. J., Solomon S. C., Zwally H. J., Banerdt W. B., Duxbury T. C., Golombek M. D., Lemoine F. G., Neumann G. A., Rowlands D. D., Aharonson O., Ford P. G., Ivanov A. B., Johnson C. L., McGovern P. J., Abshire J. B., Afzal R. S., Xiaoli Sun (2001): Mars Orbiter laser Altimeter: experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical Research* 106/E10, 23688–23722
- Tašárová Z. A., Fulla J., Bielik M., Šroda P. (2016): Lithospheric structure of Central Europe: Puzzle pieces from Pannonia Basin to Trans-European Suture Zone resolved by geophysical-petrological modeling. *Tectonics* 35, 722–753
- Taylor P. T., Frawley J. J. (1987): Magsat anomaly data over the Kursk region U.S.S.R. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 45, 255–265
- 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., 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
- Toksöz M. N., Dainty A. M., Solomon S. C., Anderson K. R. (1974): Structure of the Moon. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 12, 539–567
- Voskresenskaya M. N. (1965): Relations between Archean and Proterozoic rocks in Kursk magnetic anomaly. *International Geology Review* 11, 454–460
- Watters W. A., Geiger L. M., Fendrock M., Gibson R. (2015): Morphometry of small recent impact craters on Mars: Size and terrain dependence, short-term modification. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120, 226–254