

A Hold, a Vénusz és a Mars globális gravitációs anomáliái. A Mars négy lokális gravitációs anomáliájának kvantitatív értelmezése¹

KIS KÁROLY², PATRICK T. TAYLOR³, PUSZTA SÁNDOR⁴, TORONYI BENCE⁵,
WITTMANN GÉZA⁶

A Lunar Prospector, a Magellan és a Mars Global Surveyor űrszondák mérései részletesen feltárták a Hold, a Vénusz és a Mars topográfiáját és gravitációs anomáliáit. A morfológiai analízisből és a gravitációs anomáliák értelmezéséből megbízható következtetések vonhatók le a Hold és a két bolygó tektonikai folyamataira. A Marson található Alba Patera és az Arsia Mons vulkánok, továbbá az Argyre és Isidis becsapódási kráterek által okozott gravitációs anomáliák értelmezése a Bayes-féle inverzióval történt. Az inverziós számításokban a Laplace-féle valószínűségi sűrűségfüggvényt használtuk. Az inverzió modellje véges kiterjedésű vertikális henger, amelynek sugarát, valamint felső és alsó lapjának mélységét határoztuk meg. A Bayes-féle következtetésben szereplő optimum feladat numerikus megoldása a simulated annealing módszerrel történt. Az Alba Patera gravitációs anomáliáját modellező henger becsült paraméterei: sugár = $320 \text{ km} \pm 49 \text{ km}$, felső lapjának mélysége = $6 \text{ km} \pm 4,8 \text{ km}$, alsó lapjának mélysége = $38 \text{ km} \pm 10 \text{ km}$. Ezeknek a paramétereknek értékei az Arsia Mons esetében: $182 \text{ km} \pm 42 \text{ km}$, $4 \text{ km} \pm 4,7 \text{ km}$ és $57 \text{ km} \pm 15 \text{ km}$; az Argyre vonatkozásában: $355 \text{ km} \pm 59 \text{ km}$, $25 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$, $31 \text{ km} \pm 8,3 \text{ km}$; míg az Isidis esetében $336 \text{ km} \pm 57 \text{ km}$, $21 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$ és $38 \text{ km} \pm 9 \text{ km}$. A vulkanikus eredetű gravitációs anomáliák inverziójából meghatározott ható alja a marsi kéreg nagyobb mélységeiben található. Ezek a nagyobb mélységek a vulkánt létrehozó hőoszlop indikációi lehetnek.

K. KIS, P. T. TAYLOR, S. PUSZTA, B. TORONYI, G. WITTMANN: Global gravity anomalies of Moon, Venus, and Mars, quantitative interpretation of four Martian gravity anomalies

The missions Lunar Prospector, Magellan and Mars Global Surveyor recorded the topography and gravity field of the Moon, Venus and Mars, respectively. The tectonics of the Moon and the other two planets can be derived from these measurements on a global scale. The gravity data from the Mars Global Surveyor mission will be interpreted. The Martian gravity anomalies over the Alba Patera and Arsia Mons volcanoes, and the gravity anomalies over the Argyre and Isidis impact craters are interpreted by the Bayesian inference method. A finite vertical cylindrical model is used for this inversion method its radius, depths to the top and bottom of the cylinder are estimated by the Bayesian inference. The Laplacian probability density function is applied in the Bayesian inference. The optimum problem of the Bayesian inference is solved by the simulated annealing method. The estimated model parameter values for the Alba Patera volcano are: radius = $320 \text{ km} \pm 49 \text{ km}$, depth to the top = $6 \text{ km} \pm 4.8 \text{ km}$ and depth to the bottom = $38 \text{ km} \pm 10 \text{ km}$; for the volcano Arsia Mons these values are: $182 \text{ km} \pm 42 \text{ km}$, $4 \text{ km} \pm 4.7 \text{ km}$, $57 \text{ km} \pm 15 \text{ km}$; and for the impact craters Argyre: $355 \text{ km} \pm 59 \text{ km}$, $25 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$, $31 \text{ km} \pm 8.3 \text{ km}$; and Isidis: $336 \text{ km} \pm 57 \text{ km}$, $21 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$ and $38 \text{ km} \pm 9 \text{ km}$, respectively. Inversions of the gravity anomaly data, however, shows a greater lower depth over these volcanoes. These greater depths are probably an indication of the mantle plumes that produced the volcanoes.

Bevezetés

A Naprendszer bolygói közül azoknak tudjuk a részleteiből a gravitációs anomáliáit meghatározni, amelyek körül űrszonda — mesterséges hold — keringett. Az űrszondák pályája a bolygó körüli több hónapos keringésük során perturbálódik, amelynek oka a megfigyelt égitest tömegeloszlása. E mérhető perturbációból a bolygó gravitációs terének eloszlása meghatározható. Meg kell azt is jegyezni, hogy az orbitális egységeken rendszerint többféle műszert helyeznek el, így azok többek közt felméri a bolygó to-

pográfiáját, vizsgálhatják légkörének összetételét, mérhetik mágneses terének eloszlását, a spektrométerek adatsorából a felszíni kőzetek összetételére is lehet következtetni. Az alábbiakban a bolygók globális gravitációs terének ismertetése mellett összefoglaljuk azok topografikus jellegzetességeit is. A három égitest topográfiáját, gravitációs anomáliáit, tektonikáját, belső folyamatait a szakirodalom részletesen tárgyalja pl. SCHUBERT, TURCOTTE, OLSON [2001] és LOWMAN [2002].

A Hold globális gravitációs anomáliái

A Hold Földről látható oldalának topográfiája jól ismert. Az ókor gondolkodói is megfigyelték a Holdat és a holdfázisokat. PTOLEMAIOSZ (Kr. u. 75–160), az ókori csillagászat kiemelkedő egyénisége a Hold átmérőjét 0,29 földátmérőben adta meg, amely kevéssé tér el a 0,272 helyes értéktől.

Az első távcsöves megfigyelésen alapuló Hold-térképet Galileo GALILEI (1564–1642) készítette, míg a ma is hasz-

¹ Beérkezett: 2007. augusztus 15-én

² Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c.

³ Planetary Geodynamics Laboratory, Code 698 NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA

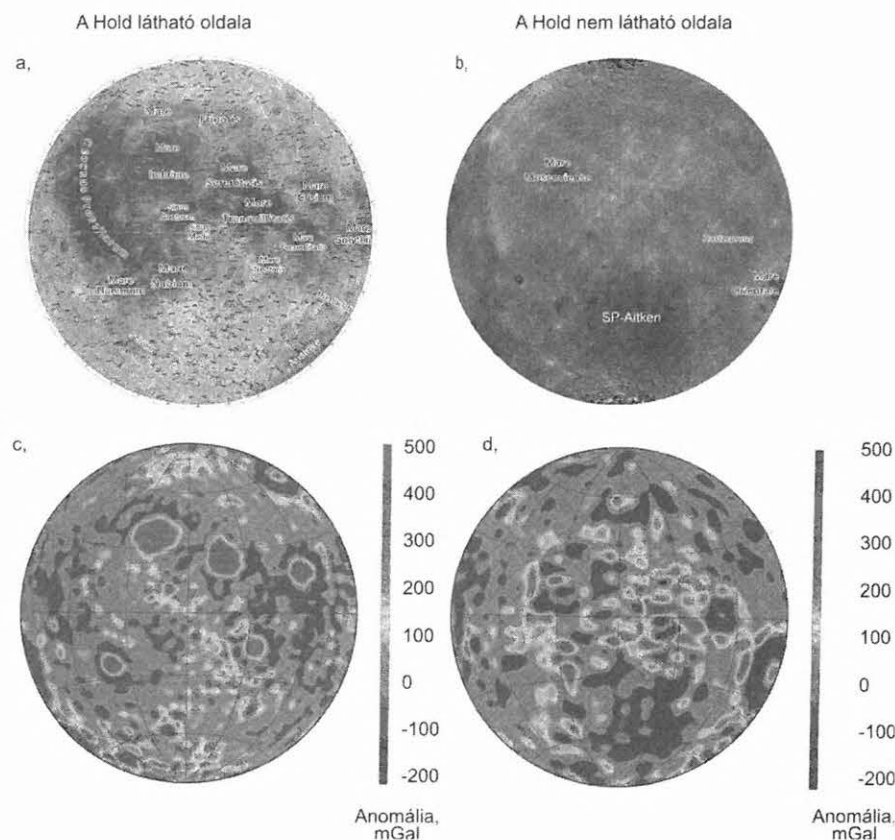
⁴ Fractal Bt., H-1155 Budapest, Óda u. 37.

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

⁶ MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt., H-1117 Budapest, Budafoki út 79.

nálatos holdi névjaj alapjait kortárs, Giovanni RICCOLI (1598–1671) olasz csillagász rakta le. Ő vezette be a vizuálisan sötétebb színben észlelhető tartományok *mare területek*, míg a világosabb színben látható vidékek *terra területek* elnevezését. (A „mare”, illetve „terra” latin szavak

jelentése tenger és föld.) A mare területek a medencéknek, míg a terra területek a hegyi és a krátervidékeknek felelnek meg. A Hold topográfiai térképe az 1.a és 1.b ábrákon látható.



1. ábra. (a) A Hold Földről látható oldalának topográfiai térképe; (b) a Hold túlsó felének topográfiai térképe; (c) a Hold Földről látható oldalának free-air-anomália-térképe a Lunar Prospector mérései alapján, az anomáliák egysége: mGal [KONOPLIV et al. 1998]; (d) a Hold túlsó oldalának free-air-anomália-térképe a Lunar Prospector mérései alapján, az anomáliák egysége: mGal [KONOPLIV et al. 1998]. Az ábrák Lambert-féle területtartó vetületben lettek ábrázolva

Fig. 1. (a) The near side Lunar topographic map; (b) The far side Lunar topographic map; (c) The near side Lunar Prospector free-air gravity anomalies are in mGals [KONOPLIV et al. 1998]; (d) The far side Lunar Prospector free-air gravity anomalies are in mGals [KONOPLIV et al. 1998]. All maps are shown in a Lambert equal area projection

A Hold vizsgálatára sok amerikai, orosz, japán és európai űrszondát bocsátottak fel, közülük az első felvételt a Hold túlsó oldaláról a szovjet *Luna-3* űrszonda (indítási ideje: 1959. október 4.) készítette. (Jól kiértékelhető kép a szovjet *Zond-3* felvételéből ismert, amelynek az indítási ideje: 1965. július 18.) Az amerikai *Apollo-program* (1968–1972) keretében 12 űrhajós lépett a Hold felszínére.

Az ESA (Európai Űrügynökség) által 2003. szeptember 27-én indított *SMART-1* Hold-szonda mérései alapján várhatóan az eddigi legrészletesebb Hold-térkép készíthető el. A szonda 2006. szeptember 3-i, Hold felszínébe csapódásakor felszálló por spektrális analíziséből holdi kőzetek összetételére is lehetett következtetni.

A NASA által indított *Lunar Prospector* 1998. január 16-tól egy éven át 100 km magasságú, kör alakú pályán keringett, működésének utolsó 6 hónapja alatt 25 km magasságú pályán végezte méréseit, míg végül 1999 júliusában becsapódott a Holdba. Komplex vizsgálatra tervezték, hiszen a Hold felszíni kőzeteinek vizsgálatához felszerelték gamma-, neutron- és alfa-spektrométerekkel is [BINDER 1998]. A mérések alapján három közetregió különíthető el: vasban és titánban gazdag mare-bazaltok; közepes vas- és titántartalmú kőzetek, amelyek a kör alakú mare-területeket határoló hegyvidékek peremén fordulnak elő; valamint a felföldek vasban és titánban szegény anortozitos kőzetei. A spektrométerek adataiból határozták meg azt is, hogy az uránium és a tórium a *KREEP* — káliumot (K), ritka föld-

fémeket (Rare Earth Element) és foszfort (P) nagyobb mennyiségben tartalmazó — kőzetekben koncentrálnak. A mare-bazaltok előfordulása is ezeknek a *KREEP*-ben gazdag kőzetek kiömlésének köszönhető, valószínűleg meteoritok becsapódásának következményeként. A Naprendszer egyik legnagyobb becsapódási medencéje is a Hold déli pólusa közelében található, a mintegy 2500 km átmérőjű Aitken-medence.

A Hold belső szerkezetének pontosabb meghatározása KHAN, MOSEGAARD [2002] és KHAN et al. [2006] tanulmányaiból ismert. A holdi kéreg, köpeny és mag mélységének meghatározását az *Apollo-program* keretében a Holdra telepített szeizmográfok méréseinek ismételt feldolgozásából határozták meg. A Hold belső felépítésében előforduló kőzeteket a fizikai körülményeknek (hőmérséklet, nyomás) megfelelő, stabil ásványokból állóknak tekintették. A holdi kéreg átlagos vastagsága a feldolgozás alapján 40–45 kilométernek adódott. A kisebb sűrűségű felső kéreg mintegy 20 km vastagságú, amely valószínűleg anortozitos gabbroból épül fel. Az alsó kéreg feltehetően bazaltos összetételű. A Hold felső köpenye olivint és kis kalciumtartalmú piroxént tartalmaz, míg az 500 km-nél nagyobb mélységű alsó köpenyben valószínűleg nagyobb FeO- és kisebb MgO-tartalmú gránátok fordulnak elő. A mintegy 340 km sugarú mag fémes vagy szilikátos összetételű, amelynek sűrűsége 5600 kg/m³. Vastartalma valószínűsíthetően 1–3%, amely kisebb sűrűségű elemekkel, főleg kénnel keveredik.

A *Lunar Prospector* méréseiből készített, a Hold globális gravitációs terére vonatkozó eredmények [KONOPLIV et al. 1998; LOWMAN 2002] az 1.c és 1.d ábrákon láthatók. A gravitációs térkép jellegzetessége a nagy pozitív amplitúdójú anomáliák megjelenése, amelyek általában a kör alakú mare-medencék területén fordulnak elő. Ezeket az anomáliákat masconok (angol eredetű mass concentration — tömegkoncentráció — elnevezésből származik) hozzák létre. A masconok okozta nagy pozitív gravitációs anomáliákat MULLER, SJOGREN [1968] fedezte fel, azokat nagy vastartalmú kőzetek hatásának tulajdonították. A *Lunar Prospector* méréseit feldolgozva masconokat a Mare Imbrium (Esők Tengere), a Mare Serenitatis (Derűtség Tengere), a Mare Crisium (Veszélyek Tengere), a Mare Nectaris (Méz Tengere) a Mare Humorum (Nedvesség Tengere) a Mare Orientale (Keleti Tenger) mare-medencék területén, és a Sinus Aestum (Dagályok Öble) és a Sinus Medii (Közép Öble) között mutattak ki. Az eredményeket tovább elemezve újabb masconokat találtak a Mare Humboldtianum (Humboldt-tenger), a Mendel–Rydberg és a Schiller–Zucchinus becsapódási medencékben is, valamint a Hold Földről nem látható oldalán a Mare Moscoviense, a Hertzsprung, a Coulomb–Sarton és a Freundlich–Sharonov becsapódási medencékben [ARKANI-HAMED 1998; LOWMAN 2002].

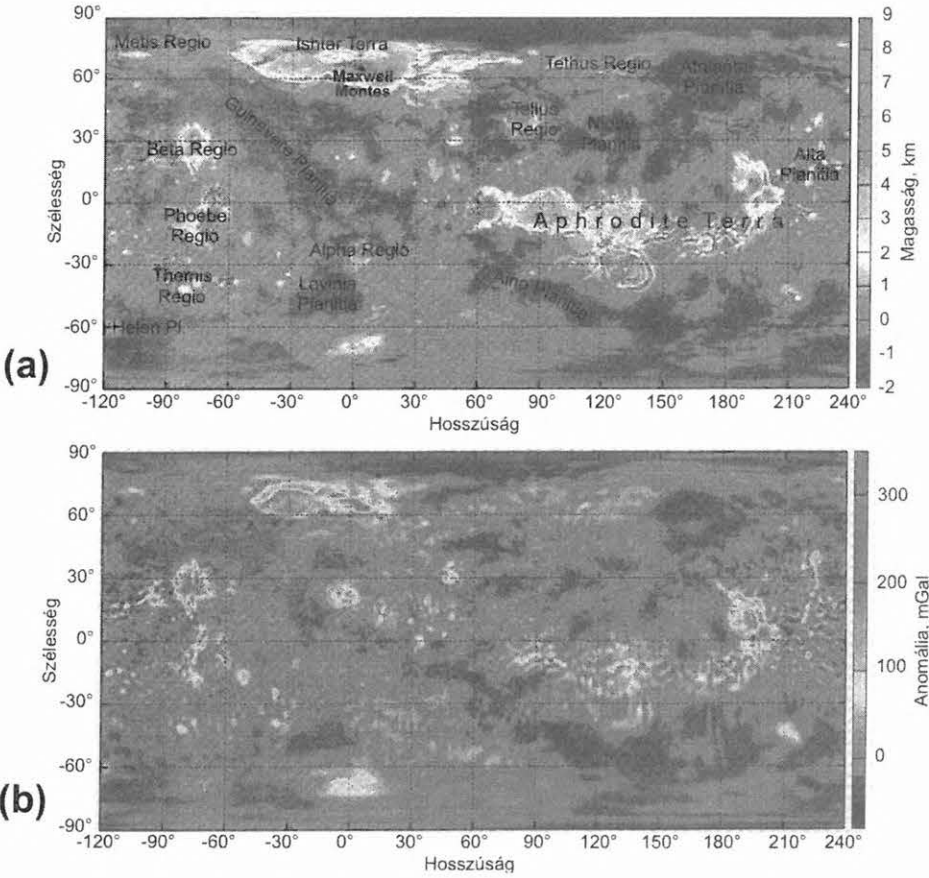
A *Lunar Prospector* gravitációs mérési adataiból meghatározott free-air-anomáliák 250 mGal és 450 mGal között változnak. A Mare Orientale területén meghatározott free-air-anomália maximuma eléri a 400 mGal-t, amelyet gyűrű alakú minimumzóna (250 mGal) vesz körül. Ezek az anomáliák további kutatás tárgyát képezték. Az értelmezés szerint a masconok a holdi kráterekeket is létrehozó meteoritbecsapódások következtében alakultak ki, azaz a becsapódás követ-

kezében nagyobb sűrűségű köpenyanyag emelkedett fel, amely kitöltötte a kráter medencéjét, majd később a medence izosztikus egyensúlyba került. ARKANI-HAMED [1998] azzal egészítette ki a masconok értelmezését, hogy a becsapódás következtében a környező felföldön parciális olvadás következett be, és az így megolvadt bazalt is bekerült a becsapódási medencébe. Megállapítása szerint a Mare Serenitatis és a Mare Nectaris területén 50 km-es, a Mare Crisium területén 35 km-es, a Mare Smythii (Smith-tenger) és a Mare Humorum területén 30 km-es, a Mare Orientale területén, pedig 20 km-es rugalmas kéregvastagság szükséges a mascon tömegének kompenzálására. Szerinte a masconok kialakulása 3,6 milliárd évvel ezelőtt történt, az izosztikus egyensúly, pedig mintegy 3 milliárd évvel ezelőtt állt be.

A *Lunar Prospector* méréseit értelmezve hét további, mascon által létrehozott anomáliát határoztak meg [LOWMAN 2002], amelyek kisebbek a korábban felfedezetteknél és nincsenek kitöltve mare-bazaltokkal.

A Vénusz globális gravitációs anomáliái

A Vénusz topográfiáját a vastag, optikai módszerrel áthatolhatatlan felhőtakarója miatt nem lehet földi távcsövekkel megfigyelni, így azt először a Puerto Ricó-i 300 m-es rádiótávcsövel végzett földi mérések alapján, majd később a NASA által felbocsátott *Magellan* űrszonda (indítási ideje: 1989. május 4.) radaros magasságméréseiből határozták meg (2.a ábra). További új eredmények várhatók az *Európai Űrügynökség* által 2005. október 26-án indított, és 2006 áprilisában bolygó körüli pályára állt *Venus Express* űrszonda méréseiből.



2. ábra. (a) A Vénusz topográfiai térképe a Magellan mérései alapján, a topográfiai szintek egysége: km [RAPPAPORT, KONOPLIV, KUCINSKAS 1999]; (b) a Vénusz free-air-anomália-térképe a Magellan mérései alapján, az anomáliák egysége: mGal [KONOPLIV et al. 1999]. Az ábrák Mercator-vetületben lettek ábrázolva

Fig. 2. (a) Magellan Venus topographic map, distances are in kms [RAPPAPORT, KONOPLIV, KUCINSKAS 1999]; (b) Magellan Venus free-air gravity are in mGals [KONOPLIV et al. 1999]. All maps are shown in a Mercator projection

A *Magellan* orbitális egységének radaros magasságmérései a bolygó felszínének 97%-át térképezték fel. E mérések felbontóképessége egy nagyságrenddel pontosabbnak bizonyult a korábbi méréseknél. A vénuszi vulkáni síkságok, a mélyföldek a bolygó felszínének 85%-át teszik ki, míg a maradék 15% a felföldeké [SAUNDERS et al. 1992].

A *Magellan* mérései alapján 1660 vulkáni formát határoztak meg [HEAD et al. 1992]— így 556 pajzs vulkánt (méretük kisebb, mint 20 km), 274 közepes méretűt (20–100 km átmérővel), 156 nagy vulkánt (átmérőjük meghaladja a 100 km-t), 86 kaldera formájú vulkánt (60–80 km-es átmérővel), 176 kupola alakú vulkánt (a vulkáni test koncentrikus felépítésű, valószínűleg nagy viszkozitású láva kiömlése során alakult ki), 259 pókháló formájú vulkáni formát (belső része koncentrikus felépítésű, míg külső része sugár irányú hálót mutat), 50 csillag alakú vulkánt, 53 lávafolyást, és 50 öböl alakú lávacsatornát, amelyeknek a hossza eléri a 100–1000 km-t. A vulkánok döntő többsége bazaltos összetételű, míg a meredek oldalú vulkáni formák valószínűleg ultrabázisos kőzetekből épülnek fel. A nagyobb kiterjedésű, kör alakú vulkánok a köpenyből származó hőoszlopok, illetve forró pontok jelenlétére utalhatnak. A vulkáni aktivitás napjainkra már csökken a Vénuszon, de nem szűnt meg teljesen.

A vulkánok helyzetének eloszlása nem rendezetlen. Az ilyen jellegű eloszlás arra utal, hogy a becslések szerint 500 millió évvel ezelőtt a Vénusz mélyföldjeit vulkáni anyag öntötte el, így az egyfajta újjáalakuláson ment keresztül.

A *Magellan* mérései alapján a becsapódásból származó kráterek átmérője 1,5 és 280 km közé esik és eloszlásuk közel egyenletes [SCHABER et al. 1992]. A 35 km-nél nagyobb átmérőjű kráterek eloszlása hasonlóságot mutat a Föld-típusú bolygókéval, de az 500 millió évnél fiatalabb kráterek száma lényegesen kevesebb. Ez szintén arra utal, hogy a bolygó felszíne mintegy 500 millió évvel ezelőtt globálisan újjáalakult.

A *Magellan* űrszonda orbitális egységének radaros magasságmérései feltárták a bolygó morfológiáját. E felvételek alapján határozták meg a bolygó tektonikáját, amelyet BINDSCHADLER, SCHUBERT, KAULA [1992] és SOLOMON et al. [1992] tanulmányai ismertettek. A vénuszi tektonika jellegzetes megnyilvánulásai nem emlékeztetnek a földi lemeztektonikára, ahol a horizontálisan nagy kiterjedésű merev lemezeket keskeny, deformációt szenvedett zónák határolják. A vénuszi tektonikára jellemző, hogy a deformált zónák nagy kiterjedésűek, szélességük eléri a néhány száz kilométert. Ezek a zónák mind formájukban, mind méretükben különböznek a Földön előfordultaktól.

A Vénuszon található felszíni formák vulkanizmus és deformációk nyomát mutatják. A vénuszi felföldek két csoportba oszthatók: vulkáni kiemelkedésekre és vulkáni platókra. A vulkáni kiemelkedéseket kör (Alpha Regio) és elnyúlt (Tellus Regio) alakú szerkezetek jellemzik, és ezekhez nagyobb pozitív értékű gravitációs anomáliák tartoznak. Ezeknek a tipikus példája az 1–3 km magasságú Beta Regio. Feltételezések szerint a vulkáni kiemelkedésekhez hőoszlopok kapcsolhatók. A platókat kis amplitúdójú gravitációs anomáliák jellemzik. Az idősebb területek gránitos jellegű kőzetekből épülnek fel, ezeket az Ishtar Terra és az Aphrodite Terra képviseli. Az Ishtar hatalmas kiterjedésű vulkáni hegység, míg az Aphrodite tektonikai-

lag töredezett vulkáni anyagból álló hegység a bolygó egyenlítői tartományában.

ANDERSON, SMREKAR [2006] a *Magellan* űrszonda méréseiből meghatározott topográfia egyensúlyát határozták meg. A Vénusz felszínét síkságokra, vulkánokra és vulkáni kiemelkedésekre, kristályos platókra, és kupola és hasadék alakú vulkánokra osztották fel.

A síkságokon, amelyek a Vénusz felszínének mintegy 85%-át teszik ki, a litoszférát 50–100 km vastagságúnak határozták meg.

A vulkáni kiemelkedések 1000–2500 km átmérőjűek. Ezeket a felszíni formákat a földi forró pontok szerkezetéhez hasonlónak fogadják el. Ezeken a területeken a kompenzáció mélysége 60–260 km között lehet. Jellegzetes területei az Alta és Beta Regióban találhatók.

A kristályos platók 1–3 km-rel magasabbak a bolygó átlagos sugarához viszonyítva, ezeknek az izosztatikus kompenzációja 20–90 km mélységű. Ezeket a szerkezeteket nagyobb kiterjedésű feláramlások hozhatják létre. Amint a feláramló hőoszlop szétáramlik, a litoszféra alján parciális olvadás következik be és a kéreg kivékonyodik. A kristályos platók az Alpha, Ovda, Thetis és a Tellus Regióban fordulnak elő.

A kupolák közel kör alakú vulkáni formákat jelentenek, amelyeket a köpenyben végbemenő feláramlások hoztak létre, ezek jellegzetes típusa az Artemis. A hasadékvulkánokat valószínűleg lokális szubdukció hozta létre. A másik lehetséges magyarázat a kéregben bekövetkező extenzió. A hasadékvulkánok a Dali, Diana és Parga Regióban találhatók.

A Vénusz néhány területének free-air-anomáliáit BINDSCHADLER, SCHUBERT, KAULA [1992] tanulmánya foglalja össze (2.b ábra). A felföldi területekhez tartozó Beta Regio átlagos magassága 1–3 km, 150 mGal nagyságú gravitációs anomália jellemzi. Az Alta Regio az Aphrodite Terra keleti részén található, amelynek átlagos magassága 3–4 km, a gravitációs anomáliák nagyságrendje 130 mGal. A Thetis Regio a plató alakú felföldek közé tartozik, kiterjedése mintegy 1500 km × 1500 km, magassága 1–2 km, a gravitációs anomáliák 40 mGal körül ingadoznak. A Tellus Regio szintén a plató jellegű felföldek közé tartozik, horizontális kiterjedése eléri a 2000 km × 1600 km-t. A terület átlagos magassága 2 km, gravitációs anomáliái 30 mGal nagyságrendűek. Az Ishtar Terra nyugati részén a gravitációs anomáliák átlagos értéke 55 mGal. Az Alpha Regio átlagos magassága 2 km, kis értékű gravitációs anomáliák jellemzik. A vénuszi mélyföldek közé tartozik még az Atalanta Planitia is, amelynek átmérője 1500 km. A terület átlagos mélysége 2 km, gravitációs anomáliái –35 mGal körül ingadoznak.

A Mars globális gravitációs anomáliái

A Mars topográfiája földi távcsöves megfigyelésekből is felmérhető, így a Mars felszínéről már a XIX. század folyamán készítettek térképeket. Az első jobb felbontóképességű távcsövet felhasználva két német csillagász, Wilhelm BEER (1797–1850) és Johann von MÄDLER (1794–1874) adott ki térképet a Marsról. Giovanni Virginio SCHIAPARELLI (1835–1910) olasz csillagász távcsöves megfigyelésen alapuló topográfiai térképe már igen sok

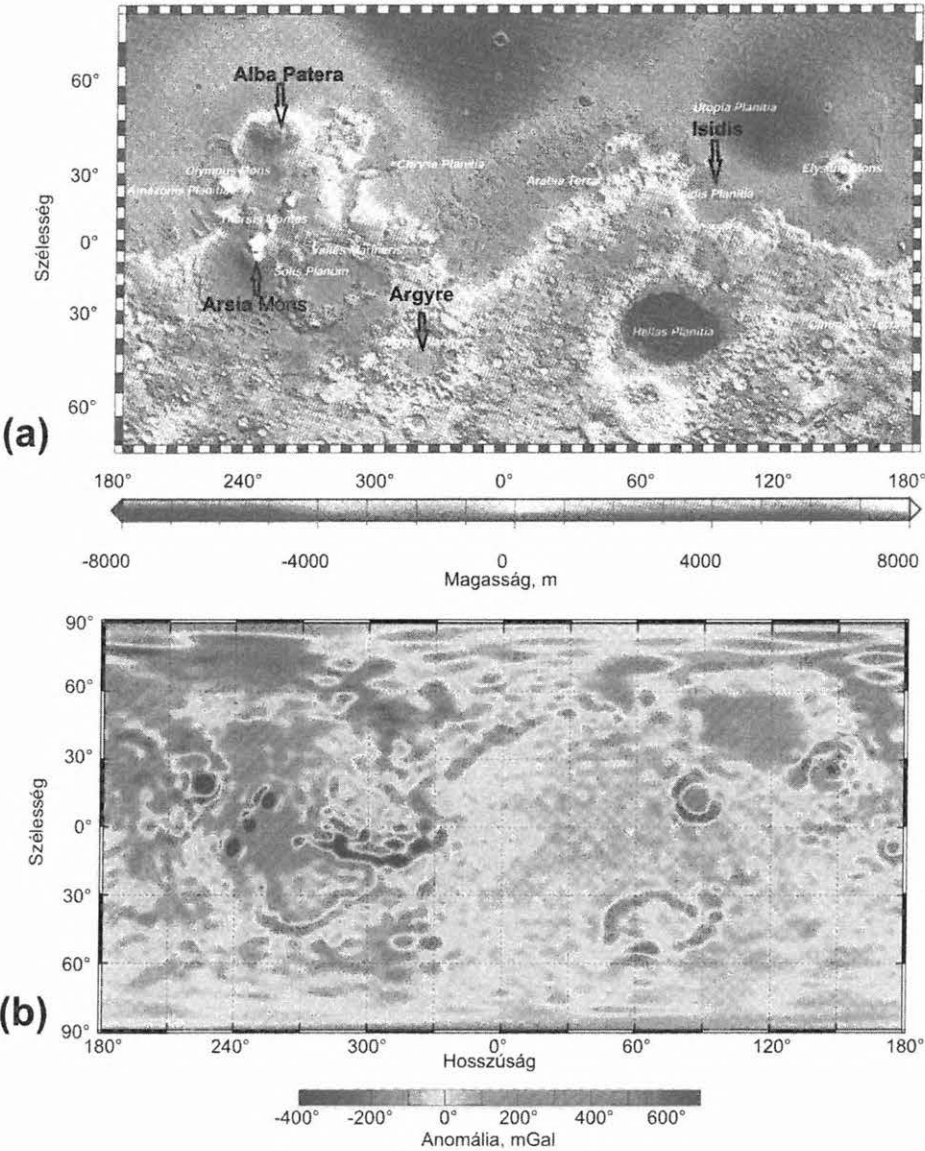
részletet tartalmazott a bolygóról. Schiaparelli nyomán — aki a Mars-csatornák leírójaként is ismert — nevezik a bolygón sötétebb színű részeket mare-területeknek. A Mars-csatornák első említése Angelo Secchi (1818–1878) olasz csillagásztól származik.

A Mars felszínéről több űrszonda készített megbízható térképeket. A Mars kutatásának lényeges eredményei a Mars Global Surveyor (MGS) (indítási ideje: 1996. november 7.) méréseiből származnak [ALBEE et al. 2001]. Az űrszonda 1997 novemberében állt bolygó körüli pályára, és különböző pályamódosítások után 1999 márciusában érte el a közel kör alakú pályát. A Mars-kutatás újabb eredményei az ESA Mars Express (indítási ideje: 2003. június 2.) és a NASA Mars Reconnaissance Orbiter (indítási ideje: 2005. augusztus 12.) űrszondák mérési eredményeinek feldolgo-

zásából várhatók.

A MGS orbitális egységen elhelyezett lézeres magasságmérő közel 600 millió mérést végzett. A mérések alapján többek közt meghatározták a Mars egyenlítői (3396,19 km) és poláris (3376,2 km) sugarát. A bolygó átlagos sugara: 3389,5 km [NEUMANN et al. 2004].

A Mars topográfiai térképeit SMITH et al. [1999a], ZUBER et al. [2000], NEUMANN et al. [2004] tanulmányai ismertetik, a 3.a ábra a SMITH et al. [2001] térképét mutatja be. A bolygó felszíne két, globálisan eltérő jellegzetességet mutató régióra osztható fel. Sok kráter található a közelítőleg a déli féltekén elhelyezkedő marsi felföldön, míg nagyjából az északi féltekén elhelyezkedő marsi mélyföldön csak alig fordulnak elő.



3. ábra. (a) A Mars topográfiai térképe a MOLA mérései alapján, a topográfiai szintek egysége: km [SMITH et al. 2001], fekete nyíl mutatja az értelmezett gravitációs anomáliák helyzetét; (b) a Mars free-air-anomália-térképe a Mars Global Surveyor mérései alapján, az anomáliák egysége: mGal [YUAN et al. 2001]. Az ábrák Mercator-vetületben lettek ábrázolva

Fig. 3. (a) Mars Orbiter Laser Altimetry topographic map, distances are in kms [SMITH et al. 2001], the position of the inverted anomalies is indicated by black arrows; (b) Mars Global Surveyor free-air gravity, anomalies are in mGals [YUAN et al. 2001]. All maps are shown in a Mercator projection

A Mars felszínének harmadát kitevő mélyföldet — melynek átlagos magassága közel 3 km-rel alacsonyabb, mint a marsi felföldé — vulkáni eredetű és üledékes anyag tölti ki. A felszín két különböző jellegzetes topográfiáját mind endogén (belső eredetű), mind exogén (külső eredetű) folyamattal próbálják megmagyarázni [MCGILL, DIMITRIOU 1990]. KE, SOLOMATOV [2006] a Mars felszí-

nének két különböző magasságú tartományának lehetséges kialakulását vizsgálta. Az elvégzett áramlástani számítások szerint a marsi köpeny–mag határon a bolygó kialakulásának korai időszakában hatalmas méretű hőoszlop (superplume) alakult ki, amelynek oka köpeny–mag közötti 500–1500 K tartományba eső hőmérséklet-különbség. A hatalmas méretű hőoszlop által szállított és a felszínre

kiömlő kőzetanyag szétterülése okozhatja a Mars felszínének kettős jellegét.

A marsi kéreg átlagos vastagságára 45 km-es értéket állapítottak meg [ZUBER et al. 2000; NEUMANN et al. 2004], de a sok kráterrel rendelkező déli féltekén található marsi felföldön a kéreg mintegy 60 km vastag, míg az északi félteke mélyföldjén a kéreg átlagos vastagsága csak 30 km.

Eddigi megfigyelések szerint a Naprendszerben található legnagyobb vulkánok a Marson találhatók [SMITH et al. 2001], közülük a legnagyobb az Olympus Mons, melynek térfogata 2,7 millió km³, magassága 21 287 m.

A Mars kérgét alkotó kőzetek összetételére az SNC meteoritok vizsgálatából is lehet következtetni (MCSWEEN Jr. 1985). Ezekről a Földön talált meteoritokról megalapozottan tételezik fel, hogy a Marsot ért nagyobb méretű becsapódás következtében, annak tömegvonzását legyőzve kerültek bolygónkra. Elnevezésük a meteoritok megtalálási helyére utal. Shergottit meteoritokat az indiai Shergotty közelében találtak meg 1865-ben, ezek jellegzetes ásványai a piroxén és az augit. Nakhiliteket Egyiptomban El Nakhla el Baharia környékén gyűjtöttek össze 1911-ben, míg a chassigniteket Franciaországban találták meg Chassigny környékén 1815-ben. A nakhilitek és a chassignitek jellegzetes ásványai többek között az augit és az olivin. A Marsra leszállt *Viking szondák* által meghatározott, a marsi felszín kőzeteinek összetételére vonatkozó analízisek megerősítették az SNC meteoritok Marsról való származhatóságát.

A marsi kéreg sűrűsége 2700 kg/m³ és 3100 kg/m³ között változik, a Bouguer-anomáliák meghatározásakor 2900 kg/m³ sűrűségértéket használtak [NEUMANN et al. 2004]. A sűrűség meghatározásakor az SNC meteoritok, a *Viking szondák* (*Viking-1*, indítási ideje: 1975. augusztus 20.; *Viking-2*, indítási ideje: 1975. szeptember 9) és a *Pathfinder* (indítási ideje: 1996. december 4.) spektrométereinek méréseit vették figyelembe.

A Mars gravitációs anomáliáit tárgyalja SMITH et al. [1999b], ZUBER et al. [2000] és LEMOINE et al. [2001] tanulmánya, a 3.b ábrán látható free-air-térképet pedig YUAN et al. [2001] közölte. A Marson található vulkánok nagy amplitúdójú free-air-anomáliával rendelkeznek, így az Alba Patera 438 mGal, az Arsia Mons 1684 mGal, az Ascraeus Mons 1390 mGal, az Elysium Mons 450 mGal, az Olympus Mons 2868 mGal, a Pavonis Mons 1094 mGal anomáliával jellemezhető [SMITH et al. 1999a]. Az Isidis Platinia 1500 km átmérőjű becsapódási medence 417 mGal, az Utopia Platinia becsapódási medence 268 mGal anomáliával jelentkezik [YUAN et al. 2001]. Ezeket a közel kör alakú pozitív free-air-anomáliákat negatív anomáliák veszik körül. A vulkánok gravitációs anomáliái azt fejezik ki, hogy hatalmas tömegük nincs izosztatikus egyensúlyban, helyzetüket a mechanikusan szilárd kéreg tartja meg.

A Valles Marineris nagy kiterjedésű árok zóna negatív free-air-anomáliái (-402 mGal nagyságúak) az árokkal összefüggő tömeghiány következtében alakultak ki. Az anomáliásávnak az árok méreténél szélesebb volta az izosztatikus egyensúlytól való eltérésre utal.

LOWMAN [2002] megállapításai szerint a Marson nem találhatók meg a lemeztectonika jellegzetességei, így gyakran nevezik egylemezű bolygónak. Meg kell jegyezni, hogy a Mars kisebb kiterjedésű egyenlítői mágneses anomáliái

hasonlóságot mutatnak a földi óceáni hátságok területén mért anomáliákkal, de ezek inkább lokális jellegzetességek tekinthetők.

A Mars gravitációs anomáliáinak kvantitatív értelmezése Bayes-féle következtetéssel

A Mars gravitációs anomáliáinak jelenlegi feltártsága lehetővé teszi azok kvantitatív értelmezését. A gravitációs anomáliák a *Mars Global Surveyor* [ALBEE et al. 2001] méréseiből származnak. A számítások célja a meteoritbecsapódásból és a vulkánok által létrehozott gravitációs anomáliák eltérő szerkezetének vizsgálata. A vulkáni szerkezeteket valószínűleg kisebb méretű hőoszlopok alakították ki, amelyek a marsi kéreg (esetleg köpeny) nagyobb mélységű tartományig nyúlnak le.

A kvantitatív értelmezés a Bayes-féle következtetésen [BAYES 1763] alapul, amelyeknek matematikai részleteit számos munka [BOX, TIAO 1973; TARANTOLA 1987; SEN, STOFFA 1995; ULRICH, SACCHI, WOODBURY 2001; SCALES, TENORIO 2001; GREGORY 2005] ismerteti. A Bayes-féle következtetés geofizikai alkalmazását tárgyalja MENKE [1984], DUJNDAM [1988a, 1988b], SCALES, SNEIDER [1997] és KHAN, MOSEGAARD [2002] tanulmánya.

A kiválasztott gravitációs anomáliák közel kör alakú formát mutatnak. Ez indokolja, hogy az interpretációhoz tartozó direkt feladat (a modell) véges kiterjedésű függőleges tengelyű henger legyen. A modell Δg gravitációs terét két lefelé végtelen kiterjedésű henger tere adja meg:

$$\Delta g(\mathbf{m}) = \Delta g^{felső} - \Delta g^{alsó}, \quad (1)$$

ahol az $\mathbf{m}$ vektor jelenti a modell paramétereit. Az $\mathbf{m}$ vektor elemei az R sugár és a henger felső ($a^{felső}$), illetve alsó ($a^{alsó}$) lapjának a mélysége. A henger gravitációs terét NABIGHIAN [1962] és NAGY [1965] által közölt egyenletek adják meg:

$$\Delta g^{felső} = 2G\rho R \left[\frac{1-x^2}{\sqrt{(1+x)^2 + a_1^2}} K + \sqrt{(1+x)^2 + a_1^2} E + \frac{\pi}{2} a_1 [\Lambda_0(\varphi_1, k_1) - 2] \right] \quad (2)$$

és

$$\Delta g^{alsó} = 2G\rho R \left[\frac{1-x^2}{\sqrt{(1+x)^2 + a_2^2}} K + \sqrt{(1+x)^2 + a_2^2} E + \frac{\pi}{2} a_2 [\Lambda_0(\varphi_2, k_2) - 2] \right], \quad (3)$$

ahol G a gravitációs állandó, ρ a henger sűrűsége, E és K az elsőfajú és másodfajú teljes elliptikus integrálokat, Λ_0 a Heuman-féle lambda függvényt jelenti. A (2) és (3) egyenletekben szereplő x , a_1 és a_2 változók jelentése $x = x_0/R$, $a_1 = a^{felső}/R$, $a_2 = a^{alsó}/R$, ahol x_0 a hengerek közös tengelyétől mért távolság, $a^{felső}$ és $a^{alsó}$ a henger alsó és felső lapjának a mélysége. A Heuman-féle függvény φ_1 , k_1, φ_2 , k_2 paraméterei a

$$k_1^2 = \frac{4x}{(1+x)^2 + a_1^2}, \quad \varphi_1 = \arcsin \frac{a_1}{\sqrt{(1-x)^2 + a_1^2}}, \quad (4)$$

$$k_2^2 = \frac{4x}{(1+x)^2 + a_2^2}, \quad \varphi_2 = \arcsin \frac{a_2}{\sqrt{(1-x)^2 + a_2^2}}$$

egyenletekkel határozhatók meg.

A Bayes-féle következtetés alapegyenlete [BOX, TIAO 1973; DUIJNDAM 1988a; SEN, STOFFA 1995]:

$$p(\mathbf{m} | \mathbf{d}) = p(\mathbf{d} | \mathbf{m}) p(\mathbf{m}), \quad (5)$$

ahol $\mathbf{d}$ a mérési adatok vektorát:

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \quad (6)$$

N a mérési adatok számát, T a transzponált vektort jelenti. Az $\mathbf{m}$ jelenti a modell paramétereinek vektorát:

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_M]^T, \quad (7)$$

M a paraméterek számát jelenti. Az (5) egyenletben $p(\mathbf{m} | \mathbf{d})$ a modell paramétereinek a mérési adatokra vonatkoztatott feltételes valószínűségi sűrűségfüggvényét, $p(\mathbf{d} | \mathbf{m})$ a mérési adatoknak a modell paramétereinek feltételes valószínűségi sűrűségfüggvényét, $p(\mathbf{m})$ a modell paramétereinek valószínűségi sűrűségfüggvényét jelenti. Mind a mérési adatokat, mind a paramétereket a $\mathbf{C}_d$, illetve $\mathbf{C}_M$ kovarianciamátrixuk jellemzi:

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_1 \sigma_N \rho_{1N} \\ \vdots & & \\ \sigma_N \sigma_1 \rho_{N1} & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_1 \sigma_M \rho_{1M} \\ \vdots & & \\ \sigma_M \sigma_1 \rho_{M1} & \dots & \sigma_M^2 \end{bmatrix}.$$

A (8) kovarianciamátrixokban $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ az adatok, illetve a modell paraméterek szórását, ρ_{ij} a megfelelő korrelációs együtthatót jelenti.

A Bayes-féle következtetés (5) alapegyenletében szereplő $p(\mathbf{m})$ a priori valószínűségi sűrűségfüggvény legyen többdimenziós exponenciális eloszlású [FERRARI, SOLARO 2003]:

$$p(\mathbf{m}) = \frac{M \Gamma\left(\frac{M}{2}\right)}{\pi^{M/2} 2^{1+\frac{M}{\kappa}} \Gamma\left(1+\frac{M}{\kappa}\right) |\mathbf{C}_M|^{1/2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{m}-\mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m}-\mathbf{m}')] \frac{\kappa}{2}\right\}, \quad (9)$$

esetünkben $\kappa=1$, és Γ a gamma-függvényt, míg $\mathbf{C}_M$ az *a priori* kovarianciamátrixot jelenti. Az ilyen hosszabb szárnyú sűrűségfüggvény alkalmazására STEINER [1990] hívta fel a szerzők figyelmét, annak előnyös robusztus volta miatt. A megfelelő a priori sűrűségfüggvény kiválasztásának fontosságát hangsúlyozza ULRICH, SACCHI, WOODBURY [2001] és SCALES, TENORIO [2001].

Az (5) alapegyenletben szereplő *likelihood* valószínűségi sűrűségfüggvény legyen szintén exponenciális eloszlású:

$$p(\mathbf{d}^{\text{mért}} | \mathbf{m}) = \frac{N \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)}{\pi^{\frac{N}{2}} 2^{1+\frac{N}{\kappa}} \Gamma\left(1+\frac{N}{\kappa}\right) |\mathbf{C}_D|^{1/2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))] \frac{\kappa}{2}\right\}, \quad (10)$$

ahol az előző egyenletben szereplő $\mathbf{C}_D$ kovarianciamátrixot a $\mathbf{C}_D = \mathbf{C}_d + \mathbf{C}_T$ összefüggés adja meg [TARANTOLA 1987], ahol $\mathbf{C}_T$ az elméleti modell kovarianciamátrixát jelenti. Az a posteriori valószínűségi sűrűségfüggvény a

$$p^{\text{a posteriori}} \propto \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{m}-\mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m}-\mathbf{m}')] \frac{\kappa}{2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))] \frac{\kappa}{2}\right\} \quad (11)$$

formában írható fel.

A számítások célja az $\mathbf{m}$ paramétervektor értékeinek becslése. Ezt a becslést a (11) a posteriori valószínűségi sűrűségfüggvény maximális értéke határozza meg. Ezzel ekvivalens megfogalmazás a (11) egyenletben lévő exponenciális kifejezésekből álló szorzat pozitív előjellel vett kitevői összegének minimalizálása, így tehát a kitevőkből álló

$$F(\mathbf{m}) = \frac{1}{2}[(\mathbf{m}-\mathbf{m}')^T \mathbf{C}_M^{-1} (\mathbf{m}-\mathbf{m}')] \frac{\kappa}{2} + \frac{1}{2}[(\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_D^{-1} (\mathbf{d}^{\text{mért}} - \Delta g(\mathbf{m}))] \frac{\kappa}{2}, \quad (12)$$

egyenlet minimumának meghatározását kívánjuk meghatározni az $\mathbf{m}$ vektor függvényében. Az ilyen típusú többváltozós nem lineáris minimumfeladat numerikus megoldását a szakirodalom [BOX, TIAO 1973; SEN, STOFFA 1995] részletesen tárgyalja. Számításaink során három paraméterértéket: a hengermódel sugarát, tető- és talpmélységét kívánjuk meghatározni, rögzített 2900 kg/m³ sűrűség mellett.

A háromdimenziós minimumfeladat meghatározására a KIRKPATRICK, GELATT, VECCHI [1983] által tárgyalt és SEN, STOFFA [1995] által összefoglalt simulated annealing eljárást használtuk. A simulated annealing Metropolis-féle eljárását a statisztikus fizikából ismert hűlési folyamat analógiájára vezették be. Az eljárás alkalmazása során ki kell választani egy az állapot (hőmérséklet) csökkenését leíró függvényt, jelen esetben szakirodalmi javaslat alapján az alábbi egyenletet választottuk:

$$T_k = T_0 \left(1 - \frac{k}{c}\right)^2. \quad (13)$$

A (13) egyenletben T_k a k -edik lépésben az állapotot jellemző értéket, T_0 a kezdeti állapot értéket, míg c az iterációs lépések számát jelenti.

A C_{ap} a posteriori kovarianciamátrix nem lineáris esetben a

$$C_{ap} \approx [G_n^T C_D^{-1} G_n + C_n^{-1}]^{-1}, \quad (14)$$

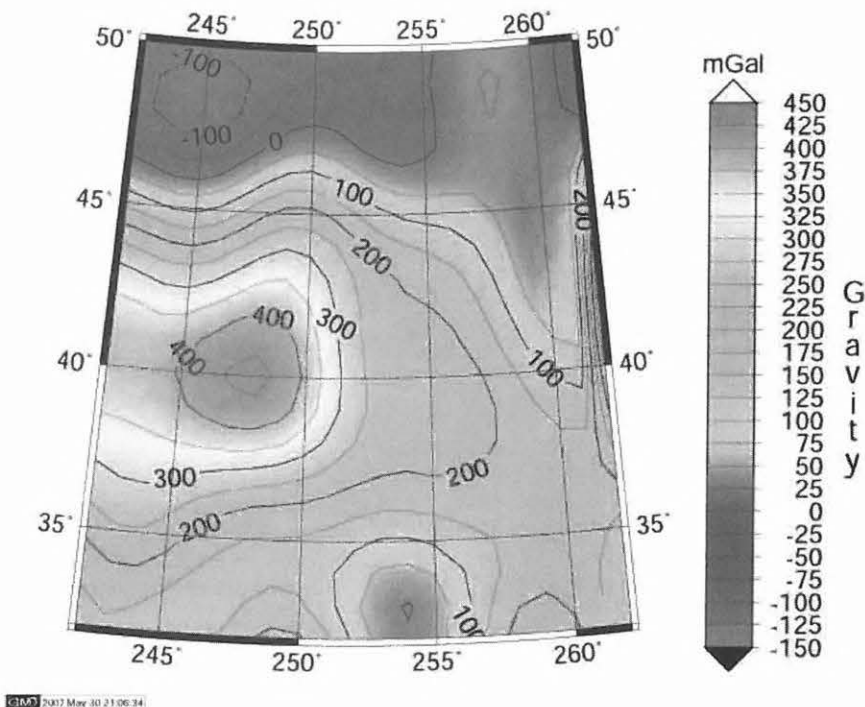
összefüggés alapján határozható meg [TARANTOLA 1987], ahol a G_n mátrixot a

$$G_n = \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial m} \right)_{m=m_{\text{meghatározott}}} \quad (15)$$

deriválttal definiáljuk. Jelen esetben a modell összetett volta miatt a (15) deriváltat numerikusan, differenciáhányaddal közelítettük.

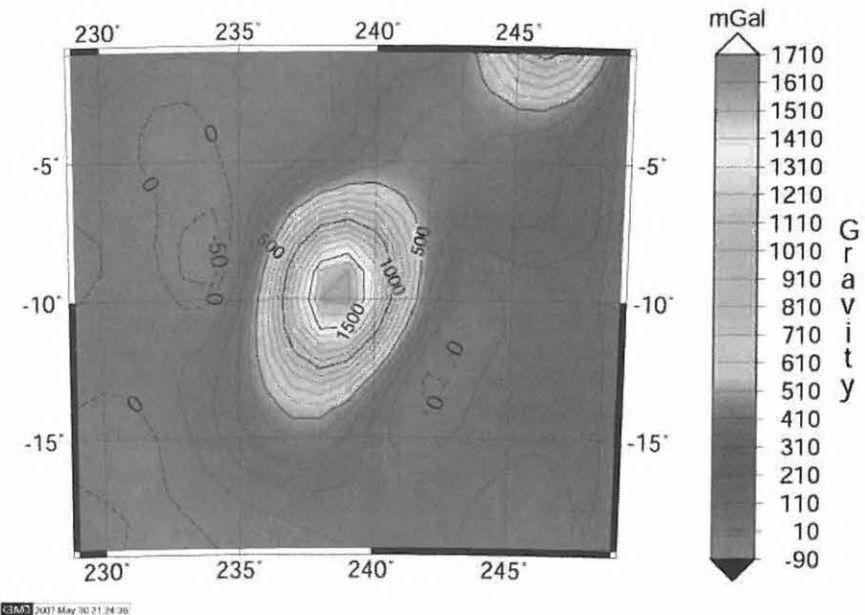
A Mars Global Surveyor méréseiből a gravitációs ada-

tokat a R. A. SIMPSON vezette kutatócsoport (Mars Global Surveyor Radio Science Team) vezette le. A gravitációs adatok a bolygó feletti 400 km-es magasságban, $1^\circ \times 1^\circ$ beosztású hálózatban álltak rendelkezésre. A Mars Global Surveyor méréseiből meghatározott, négy lokális gravitációs anomáliát választottunk ki az előbbieken vázolt, Bayes-féle értelmezés tárgyául. Az anomáliák közül kettőt: Alba Patera (40° É, 245° K) (4. ábra), Arsia Mons (9° D, 240° K) (5. ábra) vulkáni tevékenység hozott létre, míg kettőt: Argyre (50° D, 315° K) (6. ábra), Isidis (12° É, 85° K) (7. ábra) meteoritbeesés alakított ki. Ezeknek a gravitációs anomáliáknak központi pozícióját ZUBER et al. [2000] és LEMOINE et al. [2001] adta meg.



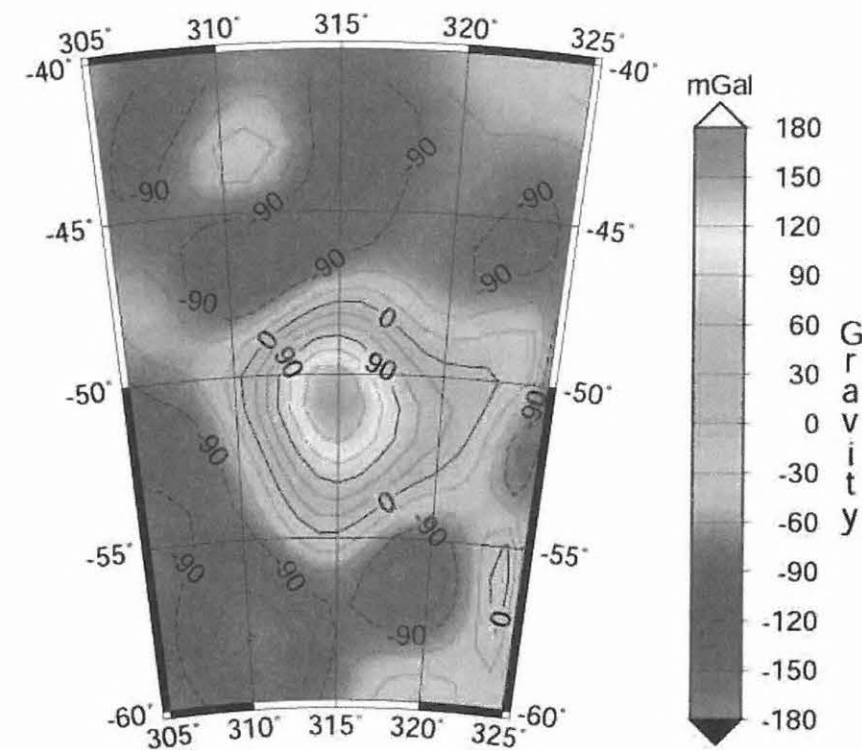
4. ábra. Az Alba Patera vulkán által okozott gravitációs anomália Albers-féle területtartó kúpvetületben ábrázolva, az izovonalak egysége mGal

Fig. 4. Mars Global Surveyor gravity anomaly over the Alba Patera volcano, the anomaly is plotted in an Albers conic equal-area projection, contours are given in mGals



5. ábra. Az Arsia Mons vulkán által okozott gravitációs anomália Albers-féle területtartó kúpvetületben ábrázolva, az izovonalak egysége mGal

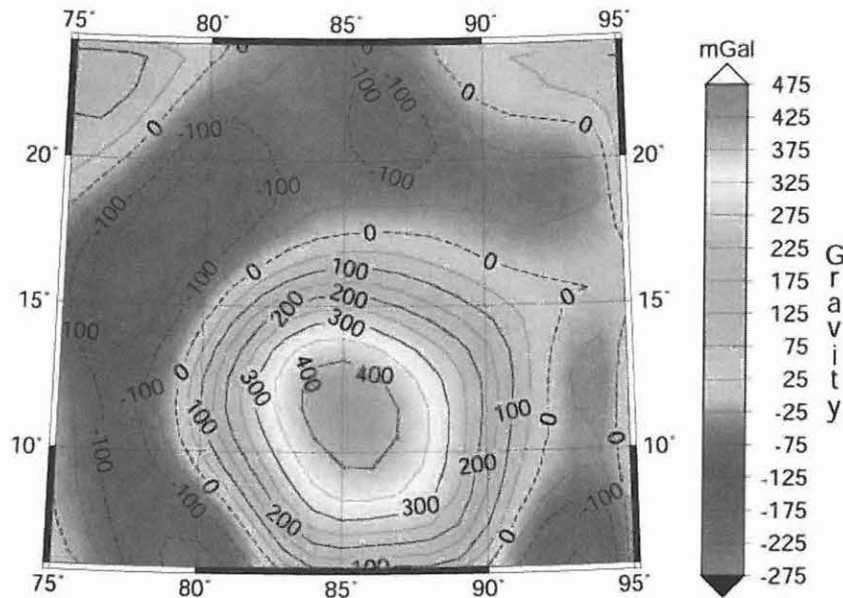
Fig. 5. Mars Global Surveyor gravity anomaly over the Arsia Mons volcano, the anomaly is plotted in an Albers conic equal-area projection, contours are given in mGals



6. ábra. Az Argyre becsapódási kráter által okozott gravitációs anomália Albers-féle területtartó kúpvetületben ábrázolva, az izovonalak egysége mGal

Fig. 6. Mars Global Surveyor gravity anomaly over the Argyre impact crater, the anomaly is plotted in an Albers conic equal-area projection, contours are given in mGals

©1642 2007 May 30 21:21:42



7. ábra. Az Isidis becsapódási kráter által okozott gravitációs anomália Albers-féle területtartó kúpvetületben ábrázolva, az izovonalak egysége mGal

Fig. 7. Mars Global Surveyor gravity anomaly over the Isidis impact crater, the anomaly is plotted in an Albers conic equal-area projection, contours are given in mGals

©1642 2007 May 30 21:14:58

A számítások során a mérési adatokat jellemző C_d kovarianciamátrix diagonális volt, a szórásnégyzetek azonos 100 mGal^2 értékkel rendelkeztek. Az a priori kovarianciamátrixot szintén diagonálisnak tekintettük. A mátrixban szereplő szórásnégyzet a henger sugara esetében 50 km^2 , míg a henger alsó és felső lapjára vonatkozóan 10 km^2 volt. A becsült paraméterek hibáját a háromszoros szórással definiáltuk.

Az Alba Patera egyike a legnagyobb marsi vulkánoknak, amely beágyazódik az északi mélyföldbe. Valószínűleg genetikusan kapcsolatban van a Tharsis vulkáni régióval. A vulkán felépítését több tanulmány ismerteti:

McGOVERN et al. [2001], LEMOINE et al. [2001], NEUMANN et al. [2004], IVANOV, HEAD [2006]. Az Alba Patera magassága eléri a 6769 métert, vulkáni összetételének kiterjedése mintegy $5,7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ [McGOVERN et al. 2001], a vulkán térfogata $2,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ [SMITH et al. 2001]. A morfológiai felvételek alapján a vulkánt extenziós vetőrendszer vágja ketté, továbbá kisebb koncentrikusan elhelyezkedő vetők szabdalják a vulkáni kúpot. Ezt a vetőrendszert a feszültség megjelenésének tekintik, amelyet a vulkán hatalmas tömegének terhelése alakít ki. Az inverziós eljárással meghatározott modellparaméterek értékei: a hatót modellező

henger sugara $320 \text{ km} \pm 49 \text{ km}$, felső lapjának mélysége $6 \text{ km} \pm 4,8 \text{ km}$, alsó lapjának mélysége $38 \text{ km} \pm 10 \text{ km}$.

Az Arsia Mons vulkán $17\,780 \text{ m}$ magasságú, a vulkán térfogata $1,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Az inverziós eljárással meghatározott modellparaméterek értékei: a hatót modellező henger sugara $182 \text{ km} \pm 42 \text{ km}$, felső lapjának mélysége $4 \text{ km} \pm 4,7 \text{ km}$, alsó lapjának mélysége $57 \text{ km} \pm 15 \text{ km}$.

Az Argyre és az Isidis becsapódási medencék megjelenési formájukra jellemző a közel kör alakú negatív gravitációs anomália közepén jelentkező nagy amplitúdójú pozitív csúcs. A középponti pozitív anomália valószínűleg a meteoritbecsapódást követő köpenyanyag felemelkedésének következménye. A gyűrű alakú negatív anomália sáv az izosztatikusan kompenzálatlan, megvastagodott kéreganyag következtében alakult ki.

Az Argyre becsapódási medence mélysége -5240 m , átmérője 600 km . Az inverziós eljárással meghatározott modellparaméterek értékei: a hatót modellező henger sugara $355 \text{ km} \pm 59 \text{ km}$, felső lapjának mélysége $25 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$, alsó lapjának mélysége $31 \text{ km} \pm 8,3 \text{ km}$.

Az Isidis becsapódási medence átmérője 550 km . Az inverziós eljárással meghatározott modellparaméterek értékei: a hatót modellező henger sugara $336 \text{ km} \pm 57 \text{ km}$, felső lapjának mélysége $21 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$, alsó lapjának mélysége $38 \text{ km} \pm 9 \text{ km}$.

Az Alba Patera és az Arsia Mons vulkánok esetében a meghatározott alsó modellmélység nagyobb, mint a becsapódási kráterek alatt. Ez a nagyobb mélység lehet a vulkánokat létrehozó hőoszlop mélyebb kiterjedésének az indikációja. A becsapódási kráterek vonatkozásában az inverzió más jellegű mélységbeli kiterjedésre utal.

HIVATKOZÁSOK

- ALBEE A. L., ARVIDSON R. E., PALLUCONI F., THORPE T. 2001: Overview of the Mars Global Surveyor. *Journal of Geophysical Research* **106**, E10, 23291–23316
- ANDERSON F. S., SMREKAR S. E. 2006: Global mapping of crustal and lithospheric thickness on Venus. *Journal of Geophysical Research* **111**, E08006, doi:10.1029/2004JE002395
- ARKANI-HAMED J. 1998: The lunar mascons revisited. *Journal of Geophysical Research* **103**, E2, 3709–3739
- BAYES T. 1763: An essay toward solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society* **53**, 370–418. (Reprinted in *Biometrika* 1958, **45**, 293–315)
- BINDER A. B. 1998: Lunar Prospector: Overview. *Science* **281**, 1475–1476
- BINDSCHADLER D. L., SCHUBERT G., KAULA W. M. 1992: Cold-spots and hotspots: Global tectonics and mantle dynamics of Venus. *Journal of Geophysical Research* **97**, E8, 13495–13532
- BOX G. E. P., TIAO G. C. 1973: *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. Addison–Wesley Publishing Company
- 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
- FERRARI P. A., SOLARO N. 2003: On parameter estimation procedures in multilevel models. Working Paper, n. 20.2004–MAGGIO
- GREGORY P. C. 2005: *Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences*. Cambridge University Press
- HEAD J. W., CRUMPLER L. S., AUBELE J. C., GUEST J. E., SAUNDERS R. S. 1992: Venus volcanism: classification of volcanic features and structures, associations, and global distribution from Magellan data. *Journal of Geophysical Research* **97**, E8, 13153–13197
- IVANOV M. A., HEAD J. W. 2006: Alba Patera, Mars: Topography, structure, and evolution of a unique late Hesperian–early Amazonian shield volcano. *Journal of Geophysical Research* **111**, E09003, doi:10.1029/2005JE002469, 2006
- KE Y., SOLOMATOV V. S. 2006: Early transient superplumes and the origin of the Martian crustal dichotomy. *Journal of Geophysical Research* **111**, E10001, doi:10.1029/2005JE002631
- KHAN A., MOSEGAARD K. 2002: An inquiry into lunar interior: A nonlinear inversion of the Apollo lunar seismic data. *Journal of Geophysical Research* **107**, E6, 10.1029/2001JE001658
- KHAN A., MACLENNAN J., TAYLOR S. R., CONNOLLY J. A. D. 2006: Are the Earth and the Moon compositionally alike? Inferences on Lunar composition and implications for Lunar origin and evolution from geophysical modeling. *Journal of Geophysical Research* **111**, E05005, doi:10.1029/2005JE002608
- KIRKPATRICK S., GELATT Jr. C. D., VECCHI M. P. 1983: Optimization by simulated annealing. *Science* **220**, 671–680
- KONOPLIV A. S., BINDER A. B., HOOD L. L., KUCINSKAS A. B., SJOGREN W. L., WILLIAMS J. G. 1998: Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector. *Science* **281**, 1476–1479
- KONOPLIV A. S., BANERDT W. B., SJOGREN W. L. 1999: Venus gravity: 180th degree and order model. *Icarus* **139**, 3–18
- LEMOINE F. G., SMITH D. E., ROWLANDS D. D., ZUBER M. T., NEUMANN G. A., CHINN D. S., PAVLIS D. E. 2001: An improved solution of gravity field of Mars (GMM–2B) from Mars Global Surveyor. *Journal of Geophysical Research* **106**, E10, 23359–23376
- LOWMAN P. D., Jr. 2002: *Exploring Space Exploring Earth*. Cambridge University Press
- MCGILL G. E., DIMITRIOU A. M. 1990: Origin of the Martian global dichotomy by crustal thinning in the late Noachian or early Hesperian. *Journal of Geophysical Research* **95**, B8, 12595–12605
- MCGOVERN P. J., SOLOMON S. C., HEAD III, J. W., SMITH D. E., ZUBER M. T., NEUMANN G. A. 2001: Extension and uplift at Alba Patera, Mars: Insight from Mola observations and loading models. *Journal of Geophysical Research* **106**, 23796–23809
- MCSWEEEN H., Y. Jr. 1985: SNC meteorites: Clues to Martian petrologic evolution. *Reviews of Geophysics* **23**, 391–416
- MENKE W. 1984: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press Inc. International Geophysical Series **45**
- MULLER S., SJOGREN W. L. 1968: Mascons: Lunar mass concentrations. *Science* **161**, 680–684
- NABIGHIAN M. N. 1962: The gravitational attraction of a right vertical circular cylinder at points external to it. *Pure and Applied Geophysics* **53**, 45–51

- NAGY D. 1965: The evaluation of Heuman's Lambda function and its application to calculate the gravitational effect of a right circular cylinder. *Pure and Applied Geophysics* **62**, 5–12
- NEUMANN G. A., ZUBER M. T., WIECZOREK M. A., MCGOVERN P. J., LEMOINE F. G., SMITH D. E. 2004: Crustal structure of Mars from gravity and topography. *Journal of Geophysical Research* **109**, E08002, doi:10.1029/2004JE002262
- RAPPAPORT N., KONOPLIV A. S., KUCINSKAS A. B. 1999: An improved 360 degree and order model of Venus topography. *Icarus* **139**, 19–31
- SAUNDERS R. S., SPEAR A. J., ALLIN P. C., AUSTIN R. S., BERMAN A. L., CHANDLER R. C., CLARK J., DECHARON A. V., DE JONG E. M., GRIFFITH D. G., GUNN J. M., HENSLEY S., JOHNSON W. T. K., KIRBY C. E., LEUNG K. S., LYONS D. T., MICHAELS G. A., MILLER J., MORRIS R. B., MORRISON A. D., PIERESON R. G., SCOTT J. F., SHAFFER S. J., SLONSKI J. P., STOFAN E. R., THOMPSON T. W., WALL S. D. 1992: Magellan mission summary. *Journal of Geophysical Research* **97**, E8, 13067–13090
- SCALES J. A., SNEIDER R. 1997: To Bayes or not to Bayes? *Geophysics* **62**, 1045–1046
- SCALES J. A., TENORIO L. 2001: Prior information and uncertainty in inverse problems. *Geophysics* **66**, 389–397
- SCHABER G. G., STORM R. G., MOORE H. J., SODERBLOM L. A., KIRK R. L., CHADWICK D. J., DAWSON D. D., GADDI L. R., BOYCE J. M., RUSSELL J. 1992: Geology and distribution of impact craters on Venus: What are they telling us? *Journal of Geophysical Research* **97**, E8, 13257–13301
- SCHUBERT G., TURCOTTE D. L., OLSON P. 2001: *Mantle Convection in Earth and Planets*. Cambridge University Press
- SEN M., STOFFA P. L. 1995: *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier Science Publishers
- SMITH D. E., SJOGREN W. L., TYLER G. L., BALMINO G., LEMOINE F. G., KONOPLIV A. S. 1999a: The gravity field of Mars: results from Mars Global Surveyor. *Science* **286**, 94–97
- SMITH D. E., ZUBER M. T., SOLOMON S. C., PHILLIPS R. J., HEAD J. W., GARVIN J. B., BANERDT W. B., MUHLEMAN D. O., PETTENGILL G. H., NEUMANN G. A., LEMOINE F. G., ABSHIRE J. B., AHARONSON O., BROWN C. D., HAUCK S. A., IVANOV A. B., MCGOVERN P. J., ZWALLY H. J., DUXBURY T. C. 1999b: The global topography of Mars and implication for surface evolution. *Science* **284**, 1495–1503
- 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., GOLOMBECK M. P., 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, 23689–23722
- SOLOMON S. C., SMREKAR S. E., BINDSCHADLER D. L., GRIMM R. E., KAULA W. M., MCGILL G. E., PHILLIPS R. J., SAUNDERS R. S., SCHUBERT G., SQUYRES S. W., STOFAN E. R. 1992: Venus tectonics: An overview of Magellan observations. *Journal of Geophysical Research* **97**, E8, 13199–13255
- STEINER F. 1990: *A geostatiztika alapjai*. Tankönyvkiadó, Budapest
- TARANTOLA A. 1987: *Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo
- ULRYCH T. J., SACCHI M. D., WOODBURY A. 2001: A Bayes tour of inversion: A tutorial. *Geophysics* **66**, 55–69
- YUAN D.-N., SJOGREN W. L., KONOPLIV A. S., KUCINSKAS A. B. 2001: Gravity field of Mars: A 75th degree and order model. *Journal of Geophysical Research* **106**, E10, 23377–23401
- ZUBER M. T., SOLOMON S. C., PHILLIPS R. J., SMITH D. E., TYLER G. L., AHARONSON O., BALMINO G., BANERDT W. B., HEAD J. W., JOHNSON C. L., LEMOINE F. G., MCGOVERN P. J., NEUMANN G. A., ROWLANDS D. D., ZHONG S. 2000: Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topology and gravity. *Science* **287**, 1788–1793