

Szemelvények a Földön kívüli tektonikai jelenségekről

KERESZTURI Ákos

Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet. Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
kereszturi@konkoly.hu

Selected issues on the tectonic structures beyond the Earth

Abstract

Apart from the Earth, tectonic structures are present on several planetary bodies in the Solar System. Parallel magnetized basaltic stripes with an alternating polarized direction on Mars could be the result of ancient spreading of the lithosphere; this could also be the case with the parallel stripes having different colour and albedo along extensional faults on Europa and Ganymedes. Rift-like ridges with cross-sections that resemble mid-oceanic ridges are present on Venus, and they also indicate signs of possible subduction. Furthermore, there are examples of real 'polar wandering', e.g. the rotation of the whole lithosphere on Earth, Mars, Europa and Titan. Compressional features are also visible on several planets, including tesserae on Venus; these tesserae — beyond their fractures and elevated topography — show signs of geochemical fractionation, partly resembling the blocks of continental crust on Earth. In addition to the above-mentioned examples, tectonic features are also present on asteroids. These examples from other features of the Solar System help to make Earth science formation models more accurate, and they could also be used to make enrich the contents of university courses.

Keywords: Europa, Ganymedes, Mars, Moon, spreading, 'polar wandering', strike-slip fault, subduction, tectonism, Titan, Venus

Összefoglalás

Tektonikus alakzatok bolygónkon kívül a Naprendszer számos égitestén azonosíthatók. A földi szétterüléshez (spreadinghez) hasonló egykori folyamatra utalnak a Mars váltakozó irányban mágnesezett párhuzamos kőzetsávjai, valamint az Europa és Ganymedes tágulások zónáiban lévő, eltérő színű és albedójú párhuzamos sávok is. A Vénuszon a földi óceánközépi hátságokhoz hasonló domborzatprofilú, rift jellegű vonulatokon tágulás nyomai láthatók, másfelől szubdukcióra utaló jelenségek is azonosíthatók. Az égitestek egész külső burkának egyben történő elfordulására, valódi pólusvándorlásra a Föld mellett a Marson, az Európán és a Titanon utalnak nyomok. Kompressziós alakzatok szintén számos égitesten azonosíthatók, a Vénusz kiemelkedő és gyűrt ún. tesszerái esetében a töredezett és kiemelt szerkezet mellett geokémiai differenciáció is elképzelhető, így ezek az alakzatok a földi kontinentális kéreghez hasonló blokkok is lehetnek. Mindezek felett tektonikus alakzatok kisbolygókon is mutatkoznak. A Földön kívüli példák segítségével a földtudományi modellek pontosíthatók, és azok az oktatást is érdekesebbé teszik.

Tárgyszavak: eltolódás, Europa, Ganymedes, Hold, óceánfenék-szétterülés, tektonika, szubdukció, Mars, Titan, Vénusz

Bevezetés

Az alábbi cikk célja, hogy áttekintést adjon a Földön kívüli tektonikus alakzatok és folyamatok néhány érdekes példájáról. A témakör széles palettája miatt teljes körű áttekintés nem lehetséges, azonban néhány jellegzetes példán keresztül vázlatos képet kaphatunk a más égitesteken jellemző tektonikáról, annak általános vonatkozásairól.

A Földön kívüli tektonikus alakzatok és folyamatok azonosítása, valamint értelmezése nehéz feladat. Általában

az eltérő égitesteken megjelenő, a hagyományos földi értelemben szilárdnak tekintett anyagban fellépő töréseket, deformációkat, elmozdulásokat — és az így kialakuló képződményeket — értik ez alatt. A besorolás és kategorizálás természetesen a földi tapasztalatok és gondolkodásmód (BÁLDI 1991, CSONTOS 1998, FOSSEN 2010, POLLARD, FLETCHER 2005, MOORES & TWISS 1986) szerint alakul, azonban olyan egzotikus tényezőket, formákat is érintenie kell, amelyeknek ma nincs földi megfelelője, de a földtudományban a tektonika témaköréhez állnak közel. Az

alábbiakban a nemzetközi szakirodalomban általánosan elfogadott nézet szerinti modelleket vázoljuk, csak a fontos hivatkozásokat említve. Ezeknél a feltételezett folyamat létét még nem mindig sikerült bizonyítani, de az a megfigyelt alakzatok legvalószínűbb magyarázata.

Több olyan eltérés van a Földön és más égitesteken uralkodó viszonyok között, amelyek szokatlan tektonikus folyamatokat és alakzatokat eredményeznek. Ezek között említhető a földtől eltérő nehézségi erőtér, amelytől adott kőzettestekben eltérő mélységben lép fel meghatározott nyomás, illetve feszültség, befolyásolva a rideg–képlékeny átmenetet, a kőzetanyag sűrűsége, amely befolyásolja az általa létrehozott nyomást és ezzel a törés keletkezését egy mélyebben fekvő kőzettestben, amelyre a terhelés nehezedik. Sajátos eset, amikor az égitest nehézségi erőtere a tengelyforgási sebesség jelentős változása miatt annyira módosul, hogy az a tektonikus folyamatokat észrevehetően befolyásolja. Egyes égitesteken az árapály eredetű erők nagysága és következménye is lényegesen meghaladhatja a földi viszonyokat. A becsapódások hatása szintén jobban

érezhető, mint amilyen példákat erre a Földön ma láthatunk, főleg ha a deformált objektum mérete és tömege bolygónkénál kisebb. A belső szerkezetben mutatkozó eltérések révén is kialakulhatnak „egzotikus” alakzatok és folyamatok, például a nem összefüggő darabokból álló vagy a külső szilárd burok alatt folyékony vízburokkal bíró égitestek esetében. Szintén fontos az anyagi, összetételbeli eltérés a földfelszíni viszonyoktól — van ahol a vízjég, esetleg egyéb jég a domináns kőzetalkotó.

A planetológiában sok esetben nem egyértelmű a nomenklatura használata, és kérdéses, hogy van-e alapja egyes földi fogalmakat más égitestekre is alkalmazni. Az alábbiakban a földi terminusokat úgy használjuk más égitestekre, mint a jelenlegi ismereteink alapján elérhető legjobb közelítést. Például hegyvonulatoknak nevezzük a feltehetőleg tektonikus kivastagodással keletkezett hosszanti kiemelkedéseket — akár a Vénuszon, a Holdon vagy a Földön is vannak — noha közöttük sok eltérés lehet. Az egyik kritikus eset a kéreg, illetve a kőzetburok pontos definiálása az eltérő égitesteken. Az Europa esetében

I. táblázat. Áttekintés a cikkben szereplő égitestekről

Table I. Overview of the planetary bodies discussed in this paper

Égitest neve	Naptávolság (csillagászati egység = 150 millió km)	Átmérő (km)	Tömeg (föld-tömeg)	Átlag-sűrűség (g/cm ³)	Közelítő felépítés
Föld	1	12756	1	5,5	vasmag, szilikátos köpeny és kéreg, vízburok, N ₂ O, légkör
Vénusz	0,72	12102	0,82	5,2	vasmag, szilikátos köpeny és kéreg, sűrű CO ₂ légkör
Mars	1,5	6792	0,1	3,9	vasmag, szilikátos köpeny és kéreg, ritka CO ₂ légkör
Hold	1	3474	0,0123	3,34	vasmag, szilikátos köpeny és kéreg
Titan	9,60	5152	0,022	1,88	kőzet-jég mag, folyékony víz (víz-ammónia) réteg, jégkéreg, sűrű nitrogénlégkör
Ganymedes	5,2	5268	0,025	1,93	kőzet-jég mag, különböző sűrűségű és szerkezetű jégkéreg, bennük néhány km vékony folyékony vízréteg lehet kb. 170-200 km mélyen (BARR et al. 2001)
Callisto	5,2	4820	0,018	1,83	a hold tömegének legnagyobb részét kőzet-jég keverék teszi ki, a külső 300 km vastag réteget jég alkothatja, illetve ebben egy vékonyabb folyékony réteg is elképzelhető
Io	5,2	3660	0,015	3,53	vas- vagy vas-szulfid mag, szilikátos és részlegesen olvadt köpeny, szilárd kéreg, a felszínen sok kén-tartalmú anyaggal
Europa	5,2	3138	0,008	3,01	kőzetbelső, folyékony vízréteg, külső jégburok
Miranda	19,2	470	0,00001	1,2	jégbelső, kevés kőzetanyaggal
Enceladus	9,6	504	0,00002	1,6	jégbelső, kőzetanyaggal, a felszín alatt kevés víz is lehet
Ariel	19,2	1158	0,002	1,7	főleg jégbelső, kőzetanyaggal
Ida	2,9	56×24×15	0,000000002	1,1	szilikátos kőzetek, 25-35%-os porozitással
Eros	1,4	34×11×11	0,000000006	2,7	szilikátos kőzetek, 27%-os porozitással

Megjegyzés a táblázathoz: A mag lehatárolása a Földhöz hasonló anyagú és felépítésű égitesteknél elméleti szempontból egyértelmű, azonban az eltérő égitesteknél, mint pl. a jégholdak, egyelőre nincs erről egységes álláspont. Ennek megfelelően, ahol a „belső” kifejezés szerepel, ott az alatt a földi viszonylatban a mag és a köpeny együtteséhez hasonló szerkezeti egységet kell elképzelni. Pl. az Europa esetében főleg szilikátos kőzetanyagból áll a belső, amelyben a mag elkülönült. Sok esetben „jégbelső kőzetanyaggal” olvasható, ez főleg jég, kisebb mértékben szilikátos kőzetanyagot tartalmazó belső egységet jelöl. Ezekben az esetekben nem tudni, hogy kialakult-e a földihez hasonló vasmag, illetve a szilikátok és a jég elkülönültek-e egymástól. A modellek alapján gyakran nem differenciált a kőzet-jég keverék akár az ezer kilométer átmérőjű égitesteknél sem.

Additional remarks: The definition of the cores in planetary bodies with composition resemble to that of the Earth is evident, while bodies (like icy satellites) with different composition or internal structure is problematic. The phrase “belső” means an Earth-like core plus mantle together. For example in the case of Europa the interior is composed of silicate dominant material with a separated metal core inside it. The phrases “jég belső kőzetanyaggal” means mixed ice and silicate unit. In these cases it is unknown has a metal core former or has the ice and silicate separated from each other or not. Based on some models the ice-rock mixture may be undifferentiated even in the case of 1000km sized bodies.

például a 10–30 km vastag külső jégburok alatt 100 km-nyí folyékony vízréteg következik, majd ezt követően a szilikátos belső, amelyen belül egy külső, merev réteg következik — az ilyen esetekben az égitest szerkezete külön be is van mutatva. Emellett a külső szilárd burok alatti térségre a „belső” kifejezés olvasható (az utóbbi ez esetben az esetleges elkülönített köpenyt és magot egyaránt tartalmazza). A félreérthető helyzetek elkerülése végett egyszerűen csak szilárd külső burokról beszélünk, amely a földi értelemben vett kőzetburok (litoszféra) megfelelője. Emellett az egyes alakzatok neveinél az első említéskor a magyar név (HARGITAI et al. 2008) után zárójelben megadjuk a külföldi szakirodalomban használt változatot is. A cikkben szereplő égitestek fő jellemzői az I. táblázatban olvashatók a NASA Goddard Spaceflight Center, Planetary Data System adatai alapján.

A Földön kívüli tektonikus alakzatok és folyamatok vizsgálata — elsősorban távérzékeléses adatokból — következtetni lehet az alakzatok morfológiai, topográfiai jellemzőire, a színeképekből pedig az összetételre. Az égitestek gravitációs tere, gravitációs anomáliái és az elméleti modellek a belső szerkezetről, valamint a forgási paramétereikről nyújtanak információt.

Összetétel alapján durva közelítésben elkülöníthetünk (1) a földi szilikátos kőzetekhez hasonló anyagot, (2) különféle jegeket (főleg vízjeget), (3) szilikátos kőzet és jég keverékét (a Mars esetében jéggel kitöltött pórusterű kőzettörleméket), valamint (4) több darabból álló és fizikailag érintkező, de nem összefüggő szilárd égitesteket (ún. kozmikus kőrákosokat). A felszíni tektonikus alakzatok vizsgálatánál fontos a külső szilárd burok és az alatta lévő, általában képlékeny, esetenként folyékony réteg viszonya. Ilyen szempontból a kőzetbolygók mai ismereteink alapján sorba rendezhetők a rideg külső burok becsült vastagsága szerint: Vénusz, Föld, Mars, Merkúr és Hold, amelyekben egyre mélyebben húzódik a részlegesen vagy teljesen olvadt zóna, igaz, a Vénuszon kevésbé ismert a helyzet. Hasonló sorrend a jégholdaknál is felállítható: Europa, Enceladus, Titan, Ganymedes és Callisto. Ezekben a folyékony vízréteg feletti szilárd jégburok vastagsága 20-ról több 100 km-re nő a fenti sorrendben, a Miranda és Ariel esetében jelenleg nem is várható folyékony víz. A jégholdakon a külső szilárd burkolat alatt a földi asztenoszféra „helyén” víz (illetve víz-ammonia keveréke) található. Az utóbbi kis viszkozitása miatt sokkal gyengébb a mechanikai kapcsolódás a képlékeny/folyékony réteg felett és alatt lévő rész között — így pl. az Europa felszíni szilárd jégburkolata könnyen elfordul az óceán alatti belső részek felett.

Az alábbiakban a tektonikus alakzatokat és folyamatokat a következő beosztás szerint tárgyaljuk. Először a szilárd külső burok keletkezését és eltűnését, majd egyéb mozgását tekintjük át a Földön kívül. Külön vizsgáljuk a hegységképződés lehetőségét, a becsapódások hatását, illetve a kisbolygókon látható furcsa, tektonikus eredetűnek tűnő szerkezeteket. Mindezek szemelvényeszerűen betekintést nyújtanak a Földön kívüli tektonikus folyamatokba, bár nem fedik le azok teljes körét.

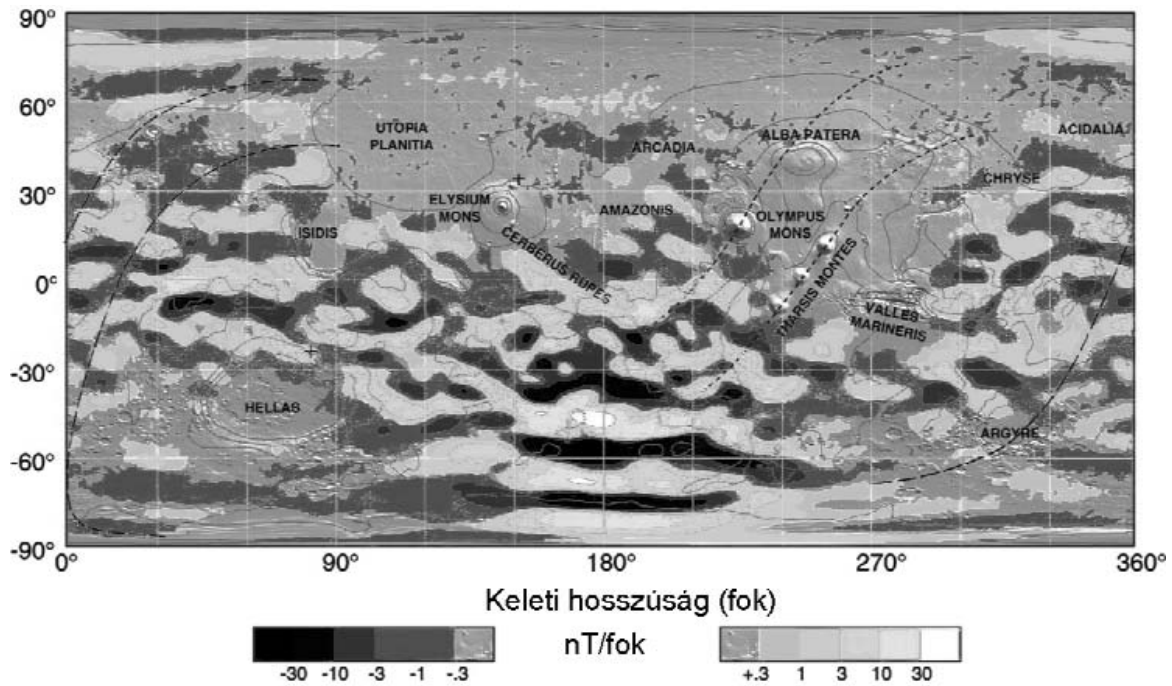
Kőzetburok keletkezése

A kőzetburok keletkezése — a Földön ismert, csekély tektonikus folyamattal járó magmás folyamatok kivételével (amikor kőzetolvadék nyomul a kőzetburokba és megszilárdulásával növeli azt jelentős tektonikus behatás segítségével) — tektonikus szempontból alapvetően a riftekben, illetve az óceánfenék szétterülésével történik — bár ott is magmás folyamat keretében szilárdul meg a kőzetalkotó anyag. Emellett léteznek olyan területek is (pl. ívmögötti medencék), amelyek tágulási környezetben jellemzőek, mégsem található rajtuk jól lehatárolható hasadékvölgy, mint a fenti esetekben.

A földi értelemben vett kőzetburok szétterülésének (spreading) folyamatára a Mars, a Vénusz, az Europa, és talán a Ganymedes felszínén sikerült példát találni. A Mars-on a földi spreadinghez hasonló ősi folyamatra utalnak a felszínének jelentős részén megfigyelhető, egymással párhuzamos, váltakozóan normál/reverz polaritású mágneses sávok (1. ábra). Ezek a földi óceánközépi hátságok két oldalán található, a földi mágneses tér pólusváltásainak nyomát őrző mágnesezett kőzetsávokra emlékeztetnek (FAIRÉN et al. 2002). Ennek megfelelően elképzelhető, hogy a kőzetanyag a Mars-on is a köpenyből származó és egy ősi hátság mentén a felszínhez közel jutó és ott megszilárduló anyag nyomát és kőzetburok-képződést képvisel. A mágneses nyomokkal együtt semmilyen más jellemzőben vagy domborzatban nem mutatkozik hasonló mintázat.

A marsi mágneses sávozottság főleg az idősebb déli felföldek területén jellemző, 140–170 km széles, közel kelet–nyugati irányú sávok formájában. Az északi féltekén, valamint délen a Hellas és Argyre nagy becsapódásos medencék területén nincsenek sávok, feltehetőleg itt vastag lávák takarták el őket, illetve a becsapódás hatása törlötte el nyomukat. Míg a földi óceánfenéki mágneses anomáliák a 400 km-es magasságban keringő műholdaknál nagyságrendileg ± 10 nT mértékű eltéréseket okoznak, addig a Marsnál ugyanez ± 1500 nT, és 600 km magasan még mindig ± 200 nT (CONNERNEY et al. 1999). Ennek az oka feltehetőleg az, hogy a bolygó kérgének nagyobb a vastartalma, mint a földi kéregnek, ezért intenzívebb mágneses nyomok maradtak benne az ősi tér után. Néhány helyen transzform vetők is azonosíthatók, amelyek mentén a mágnesezett sávok egymáshoz képest eltolódnak. Elképzelhető, hogy 4,0–3,8 milliárd évvel ezelőtt a Mars-on is lehetett globális mágneses tér, amely alkalmanként pólusváltásokat mutatott, és ennek nyoma a bazaltos kéreg szétterülésében is megmaradt. Ugyanakkor a fenti érvek ellenére ma még nem biztos, hogy a földi spreading és mágneses pólusváltás nyomát őrzik a fenti képződmények.

A Vénusz esetében (HEAD & CRUMPLER 1987) az Aphrodite-föld (Aphrodite Terra) területén megfigyelt alakzatok alapján jelenleg is elképzelhető, hogy kb. 1 cm/év sebességű tágulás zajlik (SOTIN et al. 1989), és hasonló a helyzetet a Beta-régió (Beta Regio) esetében. Mindkét esetben a hosszanti kiemelkedés közepén egy 100–200 km széles árok van, amelyre merőleges keresztiszelvények a



1. ábra. Változó irányú mágnesezettséget mutató sávok a Földhöz képest fele méretű Marson, egy Mercator-vetületű térképen
A megfigyelések közel kelet-nyugati irányú sávozottság létre utalnak (CONNERNEY et al. 1995 nyomán). A szürkeárnyalatok a mágnese fluxussűrűség nagyságát jelzik
Figure 1. Parallel magnetized stripes with opposite polarization directions on Mars (half as large as the Earth) on a Mercator map
The Martian observation suggests the presence of an east-west oriented magnetic pattern. The greyscale shading marks the magnetic flux density

földi óceánközépi hátságokra emlékeztető domborzatprofil mutatnak (STODDARD & JURDY 2009). A földi riftekhez hasonló morfológiájú alakzatoknál a topografikus, és a geoidon mérhető kiemelkedés, valamint a vulkáni aktivitás együttes nyoma jellemző a Vénuszon (2. ábra). Ennek megfelelően logikus feltételezés, hogy a Vénuszon ezeken a területeken kőzetburok-képződés és -széttérülés zajlott avagy zajlik ma is. A Vénuszon nem találtak eddig mágnese nyomokat, amit okozhat a Marshoz viszonyított gyengébb megfigyelési anyag, de még inkább az, hogy a bolygónak jelenleg nincs globális mágnese tere, és talán korábban sem volt.

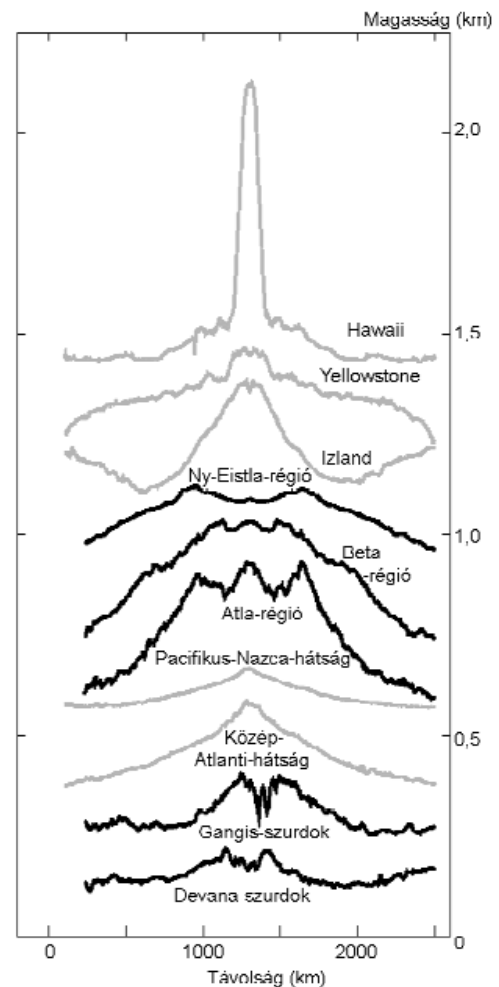
Az *Europa* jéghold felszíne tektonikus alakzatokban gazdag, sok hosszanti töréses forma figyelhető meg rajta, közöttük több tágulós folyamatra utal. Ez nem a klasszikus értelemben vett kőzetburok-képződés folyamata, azonban ekkor is növekedhet a belsőből származó friss anyag révén a kőzetburok tömege. Itt a szemközti oldalak

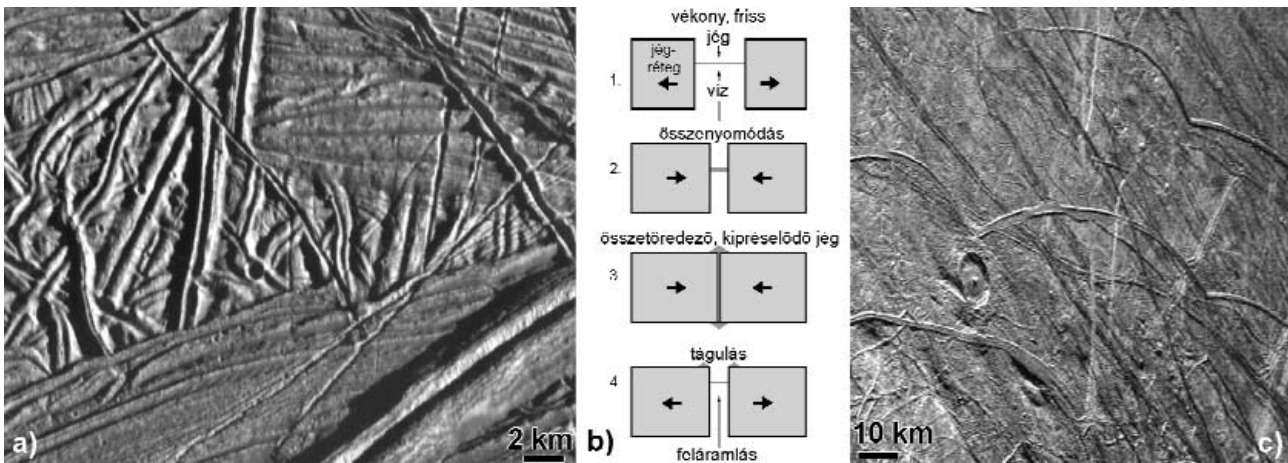
2. ábra. Tágulós alakzatok keresztmetszvényei 2500-szoros függőleges torzítással a Földön (szürke) és a Vénuszon (fekete)

Legvalószínűbb magyarázatuk szerint az alakzatok részben riftek: Pacifikus-Nazca-hátság, Közép-Atlanti-hátság, Gangis- és Devana-szurdok (Gangis és Devana Chasma), részben köpeny-felboltozódások forró foltoknál: Hawaii, Yellowstone, Izland, Ny-Eistla-régió, Beta-régió, Atla-régió (STODDARD & JURDY 2009 nyomán). Utóbbi kettőnél a kiemelkedés és a tágulós tektonika együttese felboltozódásra, részben kéreg képződésére és felfelé mutató köpenyáramlásra utal (STOFAN et al. 1989). A Vénuszon a kőzetburok-széttérülés és a forró foltok nyomán keletkező kiemelkedés feltehetőleg együtt fordul elő ezeken a területeken

Figure 2. Cross sections of extensional features on Earth (grey) and on Venus (black) with 2500 times vertical exaggeration

According to the most probable theories these are rifts: Pacific-Nazca Ridge, Mid-Atlantic Ridge, Gangis and Devana Chasma, and mantle plume-related hot spots: Hawaii, Yellowstone, Iceland, Western Eistla Regio, Beta Regio, Atla Regio (after STODDARD & JURDY 2009). In the case of the last two features the tectonic pattern suggests mantle upwelling and lithosphere formation (STOFAN et al. 1989). At these regions spreading and mantle upwelling coincides on Venus





3. ábra. Páros gerincek képe és keletkezési modellje az Európán

A gerincek részletei: a) lent a két kiemelkedő sáv egymástól 1,5 km-re található, és maximálisan 300 m magas (PIA01664 kép, d.sz.16, ny.h. 195); b) keletkezésük tektonikus modellje (PROCKTER et al. 2002); c) mindez alkalmanként a dagálypúp ciklikus vándorlásának megfelelően íves alakzatokat mutat

Figure 3. Twin or double ridges and their formation on Europa

Details of the images: a) the large ridge pair at the bottom of the image is 1.5 km wide and 300 m high; b) tectonic model for the origin of these ridges (PROCKTER et al. 2002) after the faulting deep water or plastic ice rises upward (1), and forms a rigid ice layer at the surface. Finally it breaks up by compression (2) and its fragments are pushed to the surface, forming a ridge (3). Later a new cycle starts splitting the earlier formed ridges into two parts (4); c) the process may happen along the migrating tidal bulge forming arc-shaped ridges (right)

eredeti helyzetükbe visszaforgatva egymással összeilleszthetők, és közöttük a mélyebbről kipréselődött és a felszín közelében megszilárdult anyag található. Itt a tágulás a külső jégburok árapály eredetű felrepedése mentén következett be, és a felszínre nyomult anyag megszilárdulásával gyarapodott a külső burok. Mindez olyan szempontból a földi spreading folyamatára hasonlít, hogy a külső jégburok egy repedés mentén tágul, és a mélyből felnyomuló anyag megszilárdulásával gyarapszik (SQUIRES et al. 1983).

A fentieket az Európán azok a páros gerincek bizonyítják, amelyekben két keskeny kiemelkedés fut egymás mellett (3. ábra, a). Itt talán a tágulás helyén vékony jégkéreg jött létre, majd kompresszió lépett fel, összetöredezett és feltorlódott az anyag, kiemelkedést alkotva (3. ábra, b). Később újabb tágulás mélyített központi árkot az alakzatba. További érdekesség, hogy sok helyen ívelt lefutásúak ezek a gerincek, és görbült szakaszok ismétlődnek bennük (3. ábra, c). Ezek feltehetőleg a holdon az árapályciklus nyomán keletkeztek, amikor a dagálypúp helyzete íves mozgást végez, és útja mentén a legnagyobb feszültség fellépésének időszakában repeszi meg a kéreg. A „dagály” maximumakor a kéreg a legerősebben emelkedik felfelé, ekkor törés keletkezhet benne, és a törés mentén a mélyből anyag nyomulhat felfelé. Később „apály” idején a terület visszahúzódik, és a rés bezárul. Ekkor korábban a résben felemelkedett víz, esetleg annak jéggé fagyott felső rétege összetörik és részben a felszínre préselődik. A „dagály” után a kritikus érték alá csökkenhet a feszültség, ezért ekkor nem folytatódik az ív keletkezése.

A szilárd burok egyéb változásai

A Földön ismert makrotektonikus alakzatok közül sokat sikerült más égitesteken megfigyelni, ezekből válogatunk az

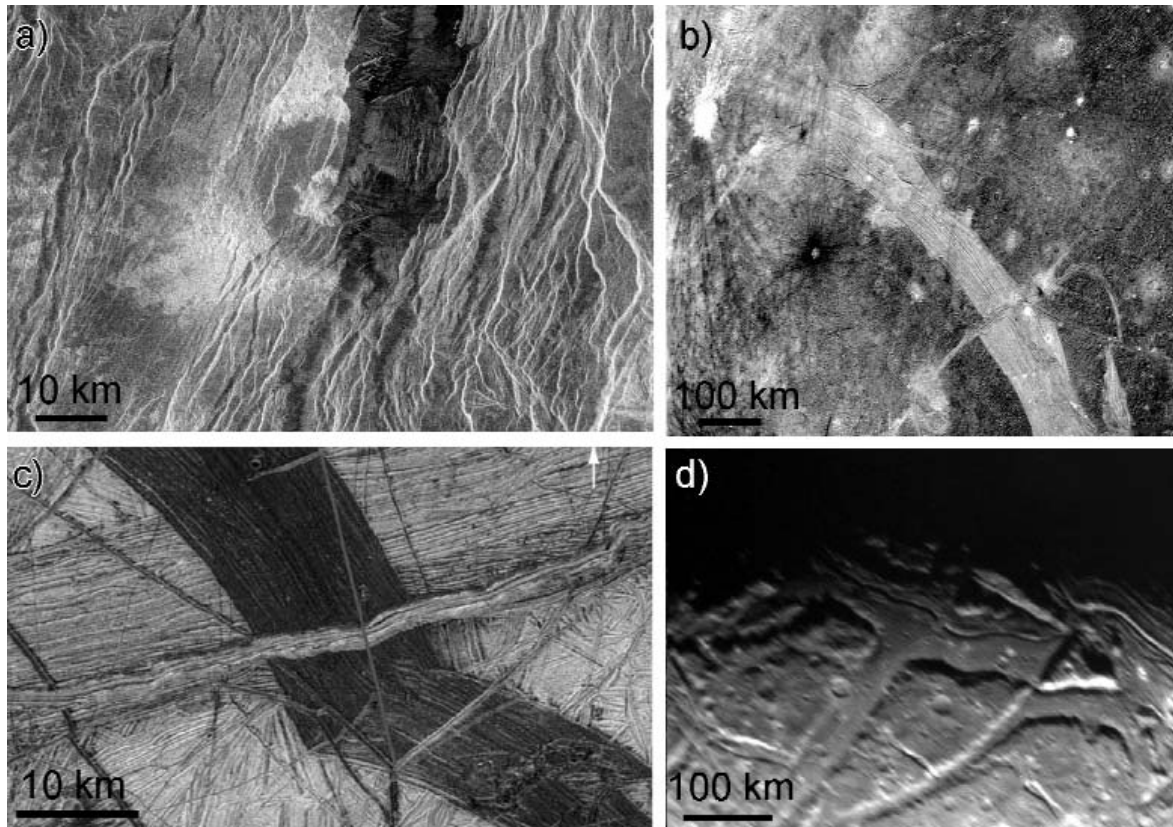
alábbiakban (4., 5., 6. ábra), először a tágulások repedések és a normál vetők, másodsor az oldaleltolódások, harmadsor pedig az összenyomódások formáira mutatva példákat.

Egyes égitesteken a felszín jelentős részén mutatkoznak tágulásra utaló alakzatok, amelyek együttesen az egész égitest *globális tágulására* is utalhatnak (4. ábra, b, c, d). Ez szintén azzal jár, hogy a belsőből anyag áramlik a felszín felé, ahol megszilárdulva a kőzetburkot gyarapítja, mivel ezen égitestek H₂O-tartalmának jelentős része olvadt lehetett keletkezésük után az összeálláskor felszabadult hőtől. Később a fokozatos hűlés révén víztartalmuknak egyre nagyobb része szilárdult meg, ami térfogat-növekedéssel járt (CZECHOWSKI & LELIWA-KOPYSTYŃSKI 2002). Talán ettől repedtek szét és távolodtak el egymástól a Ganymedes idős, sötét poligonális alakzatai (SQUIRES 1980), amelyek között a mélyebbről a felszínre nyomult jég világosabb felszínt alkotott. Hasonlóra utalnak az Uránusz Ariel holdján megfigyelt szögletes, szomszédjaikkal durván összeilleszthető kiemelkedések is (NYFFENEGGER et al. 1997).

Eltolódás nyomai sok égitesten figyelhetők meg, legtöbb példa az Európán található (SCHENK & MCKINNON 1989), ahol az elmozdulás mértékét és irányát a korábban egybefüggő lineamentek mutatják (5. ábra, b).

Normálvetők, lezökkenések szintén nagy számban figyelhetők meg (6. ábra). Ezek kinézetüket tekintve hasonlóak a szilikátos és jeges objektumokon észlelhetőkhöz, eltekintve attól, hogy a jeges (főleg vízjég) anyagú égitesteknél néhány km-nél magasabb meredek falak nem figyelhetők meg — feltehetőleg az ilyen alakzatok idővel ellapulhatnak saját súlyuk alatt, illetve a szintkülönbségeket az erózió is csökkenti.

A legtöbb modell alapján *kompressziós*, összenyomódások eredetűnek tartott alakzatokra a Hold, a Merkúr, a Mars, a Vénusz és az Europa esetében láthatunk példákat. A kiterjedt lávatakaróval borított égitesteken gyakoriak az ún.

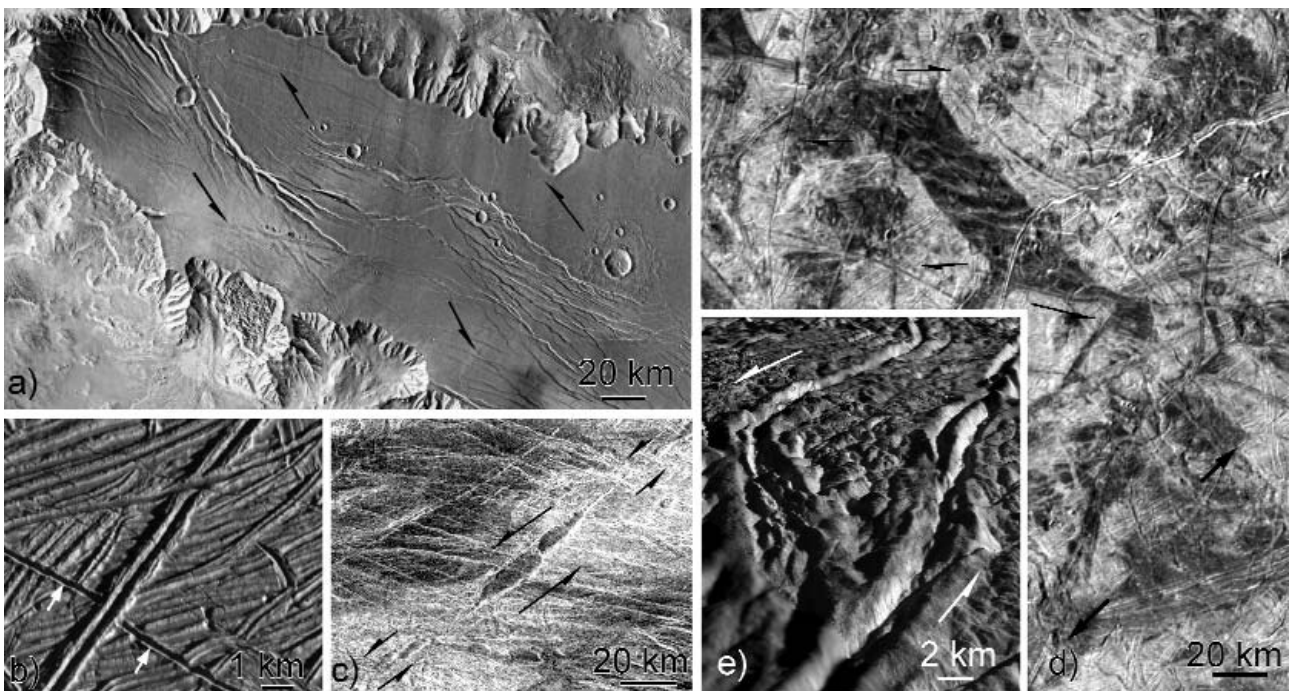


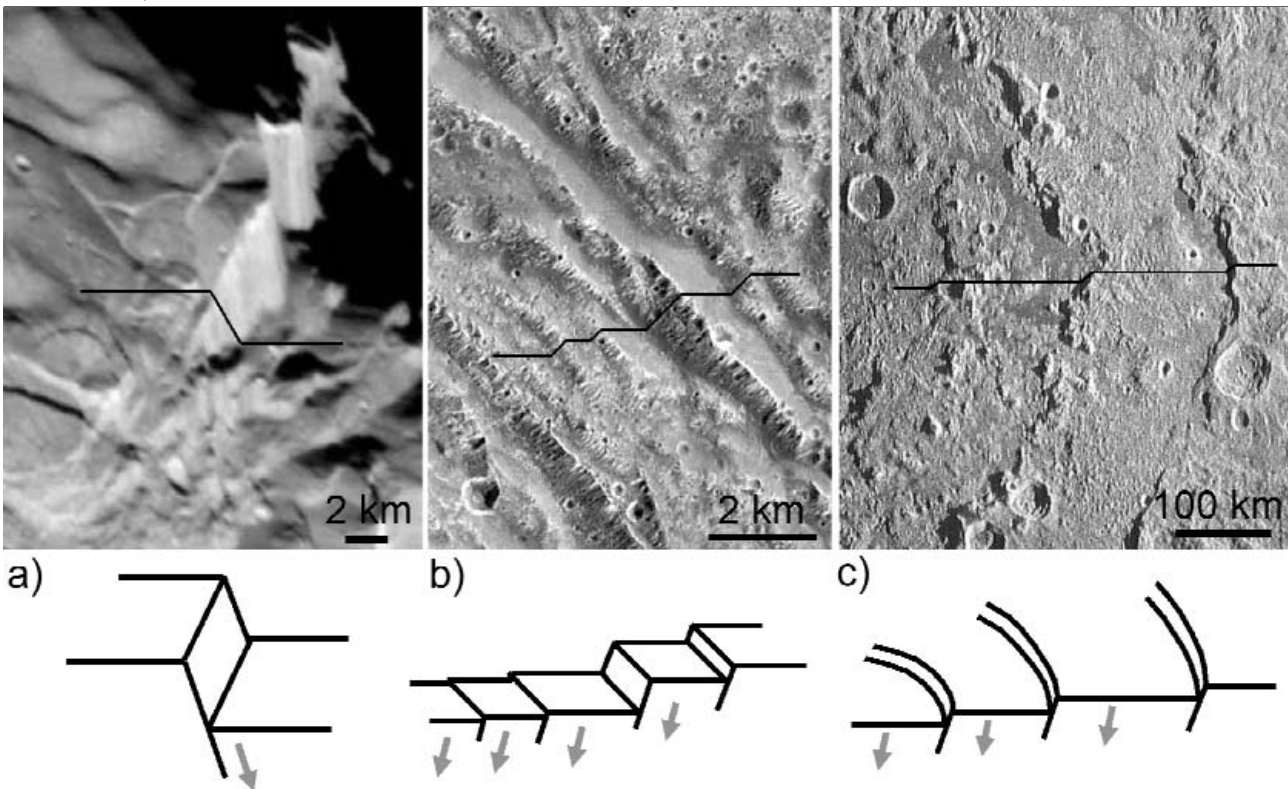
4. ábra. Tágulásra utaló tektonikus alakzatok a Földön kívül

Négy égitest felszínének részletei: a) Vénusz: a 37 km-es, kettévágott Sommerville-kráter a Beta-régióban, amely a Rhea- és Theia-hegység (Rhea, Theia Mons) magaslata 20 km-nyi tágulása nyomán szakadt szét (29.9N 282.9E, PIA00100 kép); b) Ganymedes: a sokszögletű sötét alakzatok tágulásával felszakadt kb. 150 km széles árok, amelyet a mélyből felnyomult világosabb anyag tölt ki (PIA02281 kép); c) Europa: egymást felülíró tágulós alakzatok, amelyek között mélyből kinyomult jég tölti ki a felszínt (60 km széles terület, PIA01664); d) Ariel: egymástól talán tágulás nyomán szétvált szögletes blokkok, amelyek között a mélyedéseket később jég töltötte fel (500 km széles terület, PIA01356 kép)

Figure 4. Extensional tectonic features beyond the Earth

Extensional features of four planetary bodies: a) Venus: the 37 km-diameter Sommerville Crater was split into two parts in Beta Regio due to the extension between the Rhea and Theia mons by 20km (29.9N 282.9E, PIA00100 image); b) Ganymedes: extension produced a 150 km wide trench between dark polygonal blocks where bright fresh ice filled the trench; c) Europa: several extensional ridges overprint each other at a 60km wide terrain where fresh ice pushed from below filled gaps (60km wide area, PIA01664 image); d) Ariel: possible extension process split the rectangular blocks where the trench between them was filled by ice from the interior (500km wide terrain, PIA01356 image)





6. ábra. Normálvetőkkel keletkezett lezökkenések, amelyek tágulási zónákban keletkeztek

Fényképek (fent) és tömbszelvények lent a normálvetőkről: a) lezökkenés az Uránusz Miranda nevű holdján (PAPPALARDO 2006), ahol a falak magassága 5 km körüli; b) lépcsőzetes lezökkenések a Jupiter Ganymedes nevű holdján (LUCCHITTA 1980) vízjég felszínének 6 kilométer széles területén, a kép enyhén ferde rálátással készült, a közel vízszintes felszíneket a finomszemcsés, sima kinézetű felületek jelzik (kép: PIA02582, d.sz.14 ny.h. 320); és c) normálvetők a Holdon a Mare Orientale becsapódásos medence peremén

Figure 6. Subsided blocks formed by normal faulting in extensional zones

Images (top) and cross-sections (below): a) 5km high steep walls on Miranda, satellite of Uranus (PAPPALARDO 2006), b) step-like series of faults on a 6km wide terrain of Ganymedes, satellite of Jupiter (LUCCHITTA 1980) the image was acquired from tilted direction respect to the surface, the smooth area are the nearly horizontal surfaces (image PIA02582, 14 south 320 west), c) arc-shaped normal faults on the Moon in Mare Orientale impact basin

lávagerincek (SOLOMON & HEAD 1980), amelyek helyenként 100 km-nél is hosszabb, néhány km széles, és maximum néhány száz méter magas, szinuszosan kanyargó kiemelkedéseket alkotnak (7. ábra). Egymással párhuzamos vonulataik hasonló térközrel sorakoznak, és a térköz egy-egy nagyobb lávasíkságra jellemző, de egymástól alkalmanként eltér, egyes modellek alapján a lávaborítás rétegvastagságára is utal (MONTÉSI & ZUBER 2002). Ahol ezek hatalmas, kerek becsapódásos medencéket utólag felöltő bazaltláva-síkságokon vannak (pl. a Holdon), ott a medence peremével párhuzamosak, így koncentrikus haladási irány jellemző rájuk.

A Vénuszon a kiemelkedő ún. tesszerák (SOLOMON et al. 1992, IVANOV & HEAD 1996) felszínét sűrűn borítják redőkre

emlékeztető alakzatok. Az ilyen területek éjszakai infravörös sugárzása alapján a becsült köztetani összetételük granitoid lehet (HASHIMOTO et al. 2008). Ez arra mutat, hogy a kiemelkedő és erősen összegyűrt területek köztetaniilag is differenciáltabbak a környező vidéknél — ilyen szempontból a földi kontinensekre emlékeztetnek —, azonban ennek pontos megértéséhez további vizsgálat szükséges.

A globális deformációra utaló nyomok a feltételezések alapján gyakran a tengelyforgási sebesség árapály eredetű lassulásával kapcsolatban keletkeztek. A lassuló forgás során változott az égitest globális egyensúlyi alakja: a poláris átmérő növekedett, az egyenlítői pedig csökkent,

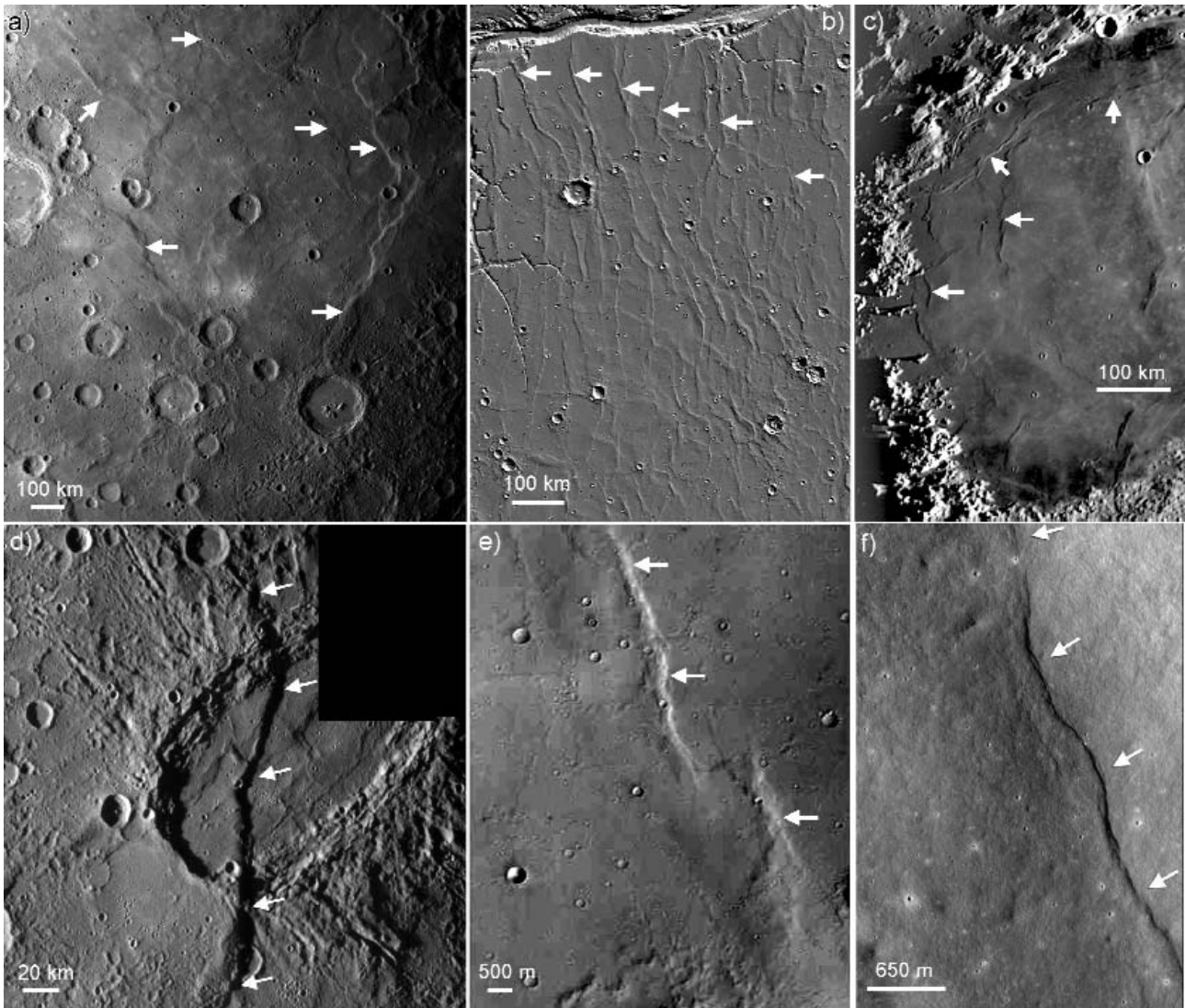
←

5. ábra. Példák eltolódásokra

Szilárd köztettekben lezajlott eltolódások nyomai különböző égitesteken: a) Mars: eltolódási zóna a Chandor és a Melas Chasma közötti fennsíkon (BISTACCHIA et al. 2004 nyomán); b) Europa: eltérő korú, egymást felülbélyegző eltolódások (12 km széles terület, PIA00850 kép, é. sz. 15 ny. h. 273, két fehér nyíl jelzi egy marker lineamentnek az elmozdulását); c) Vénusz: az Ovda-régióban pull-apart jellegű oldalelmozdulást mutató 100 km széles terület, ahol a sötét alakzatok mélyedések a radarfelvételekből összeállított képen (ROMEO et al. 2005 nyomán); d) Europa: sötétebb anyaggal kitöltött pull-apart medence (PIA01401, 250 km széles; PAPPALARDO & SULLIVAN 1996); e) Enceladus: oldalelmozdulás és tágulás együttes nyoma egy 20 km széles területen a 100 m magas Baghdad-barázdánál, amely pull-apart jellegű medencét formáz (10-szeres függőleges torzítás és perspektivikus rálátás; PIA12208 kép)

Figure 5. Examples for strike-slip movement

Surface manifestation of strike-slip movement on different planetary bodies: a) Mars: lateral shear zone on the plateau between Chandor and Melas Chasma (BISTACCHIA et al. 2004), b) Europa: differently aged lateral movements superposing each other (12km wide terrain, image no. PIA00850, 15N 273W, two short arrows indicate the lateral movement at a marker lineament), c) pull-apart style lateral movement on Venus at a 100km wide terrain (ROMEO et al. 2005), d) Pull-apart basin on Europa, filled by dark material (image no. PIA01401, 250km wide area; PAPPALARDO & SULLIVAN 1996), e) perspective view of lateral movement and transtension on Enceladus at the Baghdad Sulcus on a 20km wide terrain where the ridges in the foreground are 100m high (10 times vertical exaggeration; image no. PIA 12208)



7. ábra. Lávagerincek sora lávasíkságokon

Kompresszióra utaló alakzatok három eltérő égitesten: a) több lávagerinc a Merkúron (PIA10185 kép); b) egymással párhuzamos gerincek a Mars Lunae Planum térségében (MOLA domborzatmodell); c) a medence peremével közel párhuzamosan futó lávagerincek a Holdon a Mare Serenitatis területén (IV-151-M Lunar Orbiter kép); d) a Beagle Rupes a Merkúron (USGS képmozaik a Messenger-űrszondától); e) egy lávagerinc közelképe a Marson (P21_009354_1936 CTX kép); f) a Lee Lincoln-gerinc közelképe a Holdon (Mars Reconnaissance Orbiter mozaikfelvétel)

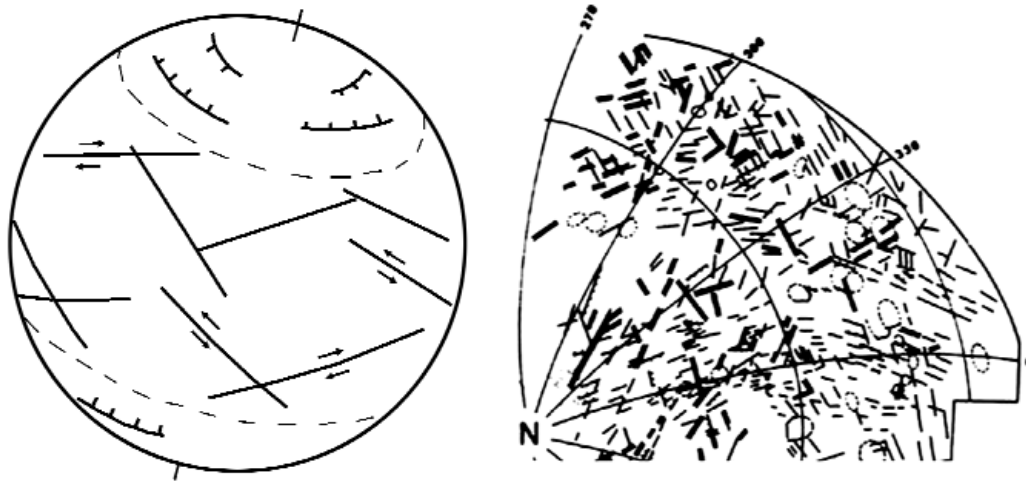
Figure 7. Wrinkle ridges on lava plains

Ridges suggesting compression on various planetary bodies: a) several ridges on Mercury (image no. PIA10185); b) many parallel ridges on the Lunae Planum region of Mars (MOLA topographic map); c) ridges on the Moon in Mare Serenitatis basin, running roughly parallel to the basin's perimeter (Lunar Orbiter image no. IV-151-M); d) the Beagle Rupes on Mercury (USGS mosaic from Messenger probe); e) ridge on a lava plain on Mars (CTX image no. P21_009354_1936), and the Lee Lincoln Ridge on the Moon (mosaic image from Mars Reconnaissance Orbiter)

jellegetes globális törérendszer hozva létre (8. ábra). Mindezek nyomára a Merkúr, a Hold és a Szaturnusz Rhea nevű holdja esetében bukkanhatunk, azonban nem mindig követik pontosan az elméletileg várható mintázatot (MELOSH 1977).

Egyes tektonikus jelenségek globálisak, de különböznek a földi értelemben vett, szintén globálisnak nevezett lemeztectonikától. Előfordul, hogy a külső szilárd burkolat egyben fordul el a mélyebben lévő részek felett, ami globális tektonikus jelenségekkel jár, de az mégsem azonos a globális lemeztectonikával. Ez az eset például a Földnél akkor lépne fel, ha az egész kőzetburkolat, benne az összes kőzetlemezzel egyben fordulna el az asztenoszféra felett. A

tengelyforgásuk miatt mind a külső, mind a belső egység enyhén lapult alakú. Ha mindkét egység poláris (azaz legkisebb) tengelye elmozdul egymáshoz képest, akkor deformáció is fellép. A két egység között alakeltérés keletkezik, ami töréseket okoz. A nagyobb térfogatú belsőt elmozduló külső egység eltorzul, mivel a két forgási ellipszoid kistengelye elmozdul egymáshoz képest. A fenti folyamatra az Europa esetében sokszor kerül sor (KATTENHORN 2002): jelentős árapályerők deformálják a jégpáncélt, változtatva annak tömegeloszlását. A jég alatt vastag vízréteg húzódik, amelynek kis viszkozitása révén könnyen elmozdul a belső és a külső szilárd egység egymáshoz képest. A repedések egy része olyan globális



8. ábra. Egy bolygó tengelyforgásának lassulásakor fellépő alaktorzulástól kialakuló törérendszer

Balra az elméleti szerkezet látható, ahol az egyenlítői átmérő csökkenésével alacsony szélességen oldalelmozdulások történnek (a nyílak az elmozduló kőzettestek mozgási irányát mutatják), a poláris átmérő növekedésével pedig magas szélességen tágulás lép fel (MELOSH 1977). Jobbra egy példa (MOORE et al. 1984): a Szaturnusz Rhea nevű holdjának északi féltekéjén mutató törések, amelyek csak részben követik a bal oldali globális trendet, mivel egyéb, főleg árapály eredetű, továbbá a belső, esetleg egykor olvadt víz megfagyásakor fellépő tágulásból eredő feszültségek is hatnak a kőzetburokban

Figure 8. Framework of tectonic features on a despinning planetary body

On the left theoretical structure of a fault system is visible where the decreasing equatorial radius produces compression and lateral movements at low latitude, and the increase of polar radius produces extensional faulting at high latitude (MELOSH 1977). On the right side an example is shown (MOORE et al. 1984) for the real situation on Rhea, satellite of Saturn, to represent the observed pattern, which differs from the theoretical one, as tidal and internal forces produce more complicated stress field and fracture pattern

rendszerbe illeszthető, amely a teljes burok egyben történő elfordulásakor keletkezett.

Bizonytalanabb a helyzet a Mars esetében (SPRENKE et al. 2005), ahol szintén feltételeznek hasonló elfordulást. Itt a nagy tömegkoncentrációt és pozitív gravitációs anomáliát kiváltó Tharsis-hátság egyenlítői helyzete, az égitest egészén azonosítható egyes tektonikus nyomok eloszlása (OKUBO & SCHULTZ 2003), valamint az égitest alakja képezi a feltételezés alapját. A megfigyelésekkel összeegyeztethető az elgondolás, amely szerint a Tharsis-hátság anyagtömege a mainál magasabb szélességen keletkezett, majd a bolygó forgása során alacsonyabb szélességre vándorolt, és ott ért el stabilabb helyzetet. A vándorlás során a kőzetburok és a mélyebben fekvő egységek kistengelye elmozdult egymáshoz képest, és ez torzulásokat okozott a kőzetburkon, amely összeegyeztethető néhány tektonikus mintázattal. Hasonló jelenség a Földön is elképzelhető, valódi pólusvándorlás keretében, amikor a kőzetburok egyben fordul el a maghoz, a köpenyhez, és a korábbi forgástengelyhez képest (MALOOF et al. 2006).

A Titan esetében a külső, felszíni jégburoknak az óceán alatti részhez viszonyított elmozdulását közvetlen mérések igazolják. 2005 és 2009 között a Cassini-űrszonda a holdhoz közeli elhaladásai alkalmával 51 felszínforma helyzetét határozta meg nagy pontossággal, amiből a tengelyforgás egyenetlenségének mértékét határozták meg. Az egyes közelítések során némely alakzat maximálisan 30 kilométerrel eltérő pozícióban mutatkozott, mint ami egyenletes tengelyforgás esetén várható (LORENZ et al. 2008). A jelenséget a külső jégburok és a szilárd kőzet-jég keverékből álló mélyebb egység közötti gyenge kapcsolat teszi

lehetővé: közöttük kb. 100 kilométer mélyen egy 100 km-nél is vastagabb folyékony víz-ammónia keverék réteg van, amely egy csapágy olajozásához hasonlóan engedi elmozdulni a mélyebben fekvő rétegek felett a külső jégburkot. Még érdekesebb, hogy a mélységi vízrétegen fekvő szilárd külső burok elmozdulását feltehetőleg nem csak árapályhatások, hanem az évszakos változások során a téli féltekén fújó erős szelek is befolyásolják, de ennek bizonyításához további megfigyelések szükségesek.

Becsapódások hatása

A becsapódások tektonikus hatása látványosabban vizsgálható más égitesteknél, mivel azok a mi bolygónknál kevésbé aktívak, ezért sokáig őrzik az egykori folyamatok nyomát a felszínükön. Emellett kisebbek a Földnél, így ott adott becsapódás erősebb következménnyel járhat, mint bolygónkon. A becsapódások tektonikus hatásai a nagy impaktmedencék peremvidékén látványosak. Ilyen például a Holdon a Mare Orientale, a Merkúron a Caloris-, a Marson a Hellas- és Argyre-medence. Ezeknél a kráterek külső részén lezökkenéses alakzatok figyelhetők meg, amelyeket részben a hatalmas robbanástól fellépett belső anyagihiány irányába elmozduló kőzettestek okozták. Hasonló alakzatok a jégfelszínű holdakon is megfigyelhetők, a Callisto, a Ganymedes és az Europa esetében még több ilyen gyűrű övezi a medencéket, aminek az oka feltehetőleg a szilárd kéreg kis vastagságában keresendő.

Speciális jelenség a nagy becsapódások által kiváltott rengéshullámok fókuszálódása, ami a robbanással átellen-

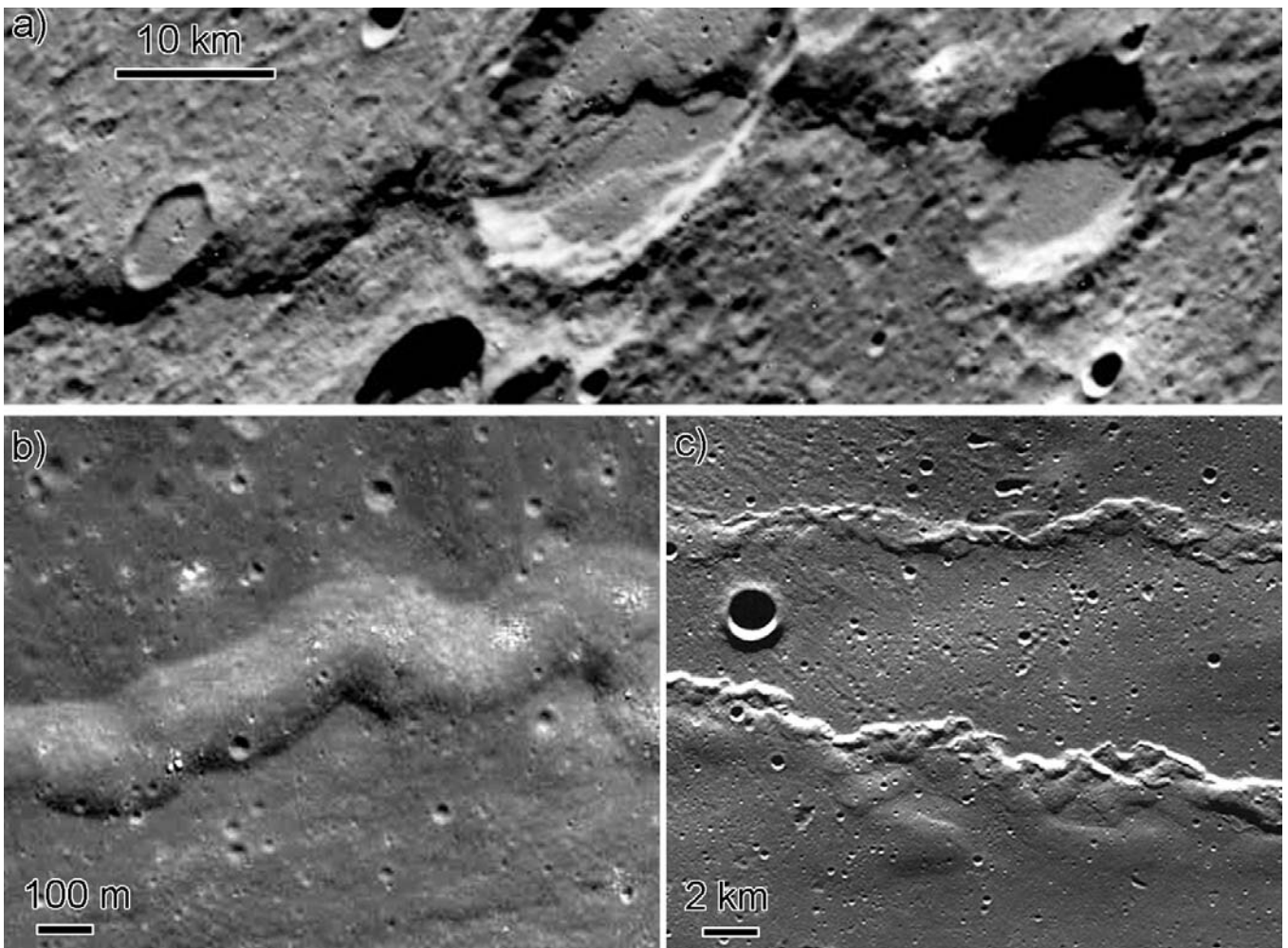
ben lévő (antipodális) helyen hozhat létre töredezett zónát. Ilyet feltételeznek a Merkúr esetében a Caloris-medencével átellenben lévő területen. Talán hasonló szeizmikus fókuszállódás hozta létre az Ida kisbolygón a becsapódásos eredetűnek feltételezett Vienna-régióval átellenben a mutatózó Pola-régió töréseit.

Hegységek keletkezése

A kőzetburok kivastagodásával kapcsolatos izosztatikai kiemelkedés más égitesteknél is fontos a hegységek keletkezésében. A planetológiában a hegység fogalma nincs pontosan definiálva, és mivel a földi globális lemeztectonikához hasonlóra legfeljebb csak néhány bizonytalan nyom utal bolygónkon kívül, ezért más kontextusban közelítjük meg a kérdést. A kiemelkedések jelentős része becsapódásos eredetű, így azokat főleg a kráterképződés keretében tárgyalják, azonban a bolygótudományban ezt nem különítik el hegységképződésként. A vulkánok is nagy hegyeket alkothatnak sok

égitesten, azonban számunkra itt csak a dominánsan tektonikus eredetű kiemelkedések fontosak (9. ábra).

Dominánsan tektonikus eredetű magaslatokat létrehozó folyamatok a Vénuszon, a Marson, az Ión és Titanon azonosíthatók. A *Vénusz* esetében sok olyan, néhány száz km hosszú kiemelkedés figyelhető meg, amelyek kompressziós erőkkel kapcsolatban jöttek létre (HEAD 1990). Közülük leglátványosabbak az Ishtar-föld (Isthar Terra) térségében vannak, amelynek fennsíkját (Lakshmi Planum) egyesek (CATTERMOLE 1994, MARINANGELI 1992) a Tibeti-platóhoz hasonlítják, az utóbbi kivastagodott, kemény egységét a környező területről rátolódott hegyvonulatok határolják (10a és 11. ábra). Ezek a Maxwell-, Danu-, Akna- és Freya-hegységek (Maxwell, Danu, Akna, Freya Mons), és az őket felépítő, 10–20 km távolságban, egymással közel párhuzamosan futó vonulataik, kőzetegységek egymásra tolódása és a kivastagodott kéreg valószínűvé teszik, hogy kompressziós erők hozták létre őket (BURKE et al. 1984, HEAD 1992). Itt található a bolygó legmagasabb pontja, a 11 km magas Maxwell-hegység is.

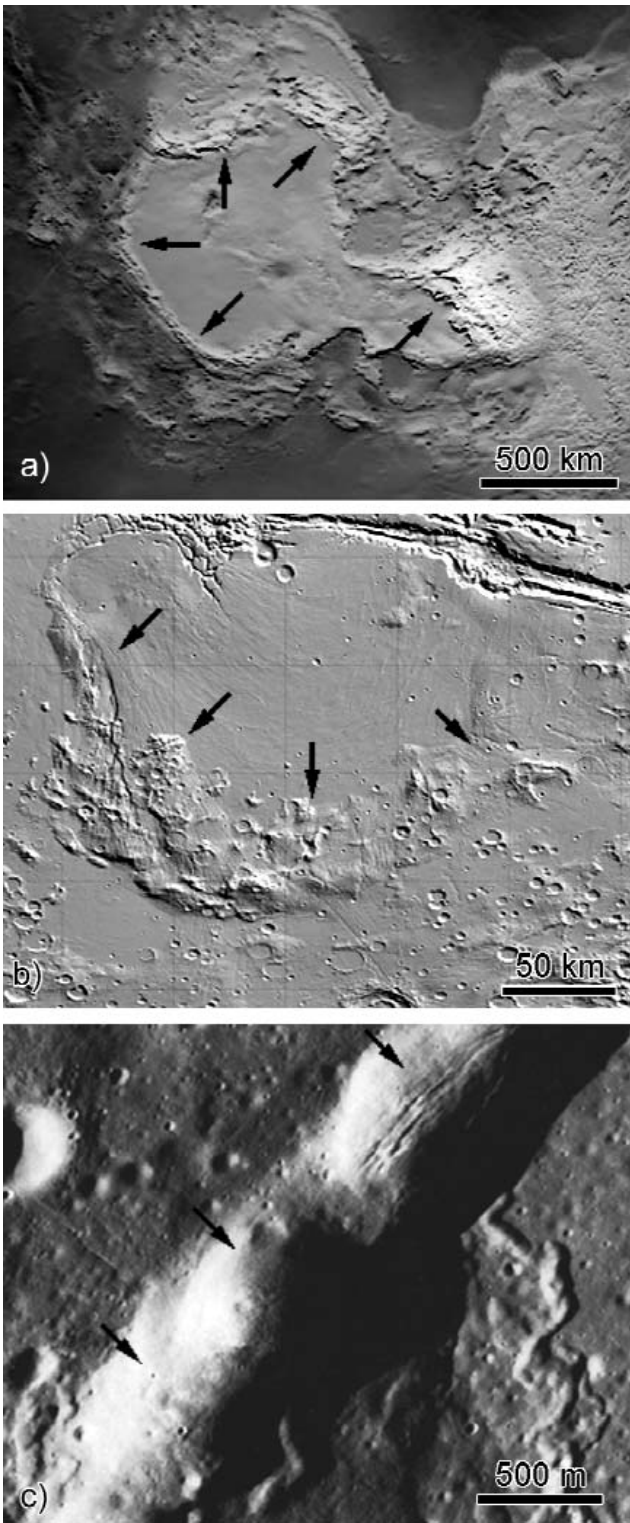


9. ábra. Példa a feltehetőleg kompresszió által létrehozott alakzatokra

Lávagerincek különböző égitesteken: a) a Merkúron a Discovery Rupes nevű, 650 km hosszú, 2 km magas gerinc; b) a Holdon az Aitken-kráterben (M105730242 jelű LROC felvétel); c) a Holdon egy bazaltsíkságon (az ábrázolt formák nem lávafolyások frontvonalai) (Lunar Orbiter mozaik)

Figure 9. Example for compression produced surface structures

Lava ridges on various planetary bodies: a) the 650km long 2km high Discovery Rupes on Mercury; b) a wrinkle ridge on the Moon in Aitken Crater (M105730242 LRO image); c) two wrinkle ridges on the Moon on a basaltic lavaplain that are not fronts of lava flows (Lunar Orbiter mosaic)

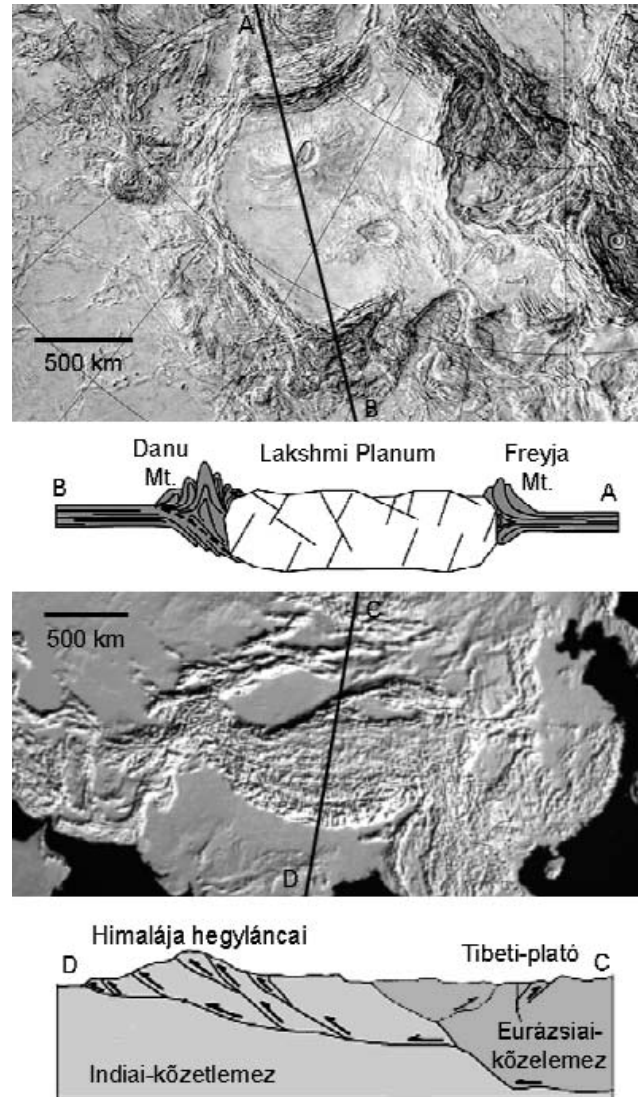


10. ábra. Hegyvonulatként is értelmezhető kiemelkedések, amelyek elnyúlt alakját rájuk közel merőleges nyilak mutatják
 a) Vénusz: az Isthara-föld (Isthara Terra) területén a Lakshmi-fennsík (Lakshmi Planum) övező hegyláncok (a nyilak a vonulatra, annak hossz tengelyére merőleges irányban mutatnak rá; Magellan radaros domborzatmodell, USGS); b) Mars: a Thaumasia-plató és a környező kiemelkedések (MOLA domborzatmodell, NASA); c) Hold: a feltételezések alapján összenyomódással keletkezett lávagerincek

Figure 10. Longitudinal compression produced features

a) Venus: tectonic ridge belts, which surround Lakshmi Planum at Isthara Terra (marked with arrows along their longitudinal axis; Magellan radar measurements based topographic map); b) Mars: Thaumasia Plateau region (MOLA data based topographic map); c) Moon: compressional wrinkle ridges on a lava plain

Hasonló a Marson a Thaumasia-plató esetében figyelhető meg (10. ábra, b). Itt nincsenek magas hegyvonulatok, de a tektonikus szerkezetek feltérképezése révén sikerült kimutatni, hogy a térségben kompresszió lépett fel (DOHM & TANAKA 1999), és valószínűleg ezzel kapcsolatos kivastagodás történt a kőzetburokban (OKUBO & SCHULTZ 2003); ez a terület alkotja a hegyvonulatot. A jelenség talán a közeli Tharsis-hátsággal kapcsolatos, és a kompresszió nyomán ívelt alakban történt a kivastagodás (DOHM & TANAKA 1999). A jelenség terület kráttersűrűsége alapján idős, és a bolygó fejlődésének korai periódusában keletkezhetett.



11. ábra. A Lakshmi Planum (fent) és a Tibeti-plató (lent) térségének domborzatmodellje, valamint egyszerűsített elméleti keresztmetszete (IVANOV & HEAD 2008, SCHIEBER 2008)

A két fekete vonal a szelvények helyét jelöli. A Vénuszon a Lakshmi Planum, valamint a Földön a Tibeti-plató tömbjének pereménél a kompresszió hozott létre párhuzamos hegyláncokat, bár a kialakulás mikéntje eltérő lehet a két égitesten

Figure 11. Shaded topographic relief map and theoretical cross section of Lakshmi Planum (top, IVANOV & HEAD 2008) and the simplified cross section of the Tibetan plateau (bottom, SCHIEBER 2008)

The two dark line mark the location of the profiles. Around the Lakshmi Planum on Venus and the Tibetan Plateau on Earth compression produced parallel mountain chains, although there could be differences in the exact formation method

Az *Io* esetében a vulkánokra nem emlékeztető hegységek keletkezésénél szintén tektonikus hatást feltételeznek. Ezek többnyire szögletes, hatalmas kibillent blokkok benyomását keltik. Eloszlásuk nem véletlenszerű, a Jupiter felé néző, valamint az azzal átellenben lévő felszíni ponttól kb. 90°-ra, alacsony szélességen legnagyobb a gyakoriságuk (SCHENK et al. 2001). A jelenség oka az árapály eredetű feszültségekkel és hőtermeléssel kapcsolatos, de pontosan még nem ismert. Közrejátszhat benne közvetlenül az árapály eredetű feszültség, emellett az árapályhő miatt főleg a Jupiter felé és azzal ellentétes irányban fellépő vulkáni aktivitással kapcsolatos anyagprodukciónak is. Az utóbbi miatt a felszínre jutott láva idővel hűl és süllyed (SCHENK & BULMER 1998), ami részben kompresszióhoz vezet (KIRCHOFF & MCKINNON 2005). Ugyanakkor az árapály eredetű hő aszimmetrikus eloszlása a köpenyáramlásokat is befolyásolja (TACKLEY et al. 2001), amelyek a vulkáni központok térségében intenzívebbek. Az utóbbinak a hegységekre kifejtett hatása egyelőre pontosan nem ismert.

Kőzetburok eltűnése

A kőzetburok eltűnésénél a földi szubdukcióra, és az azt kísérő szubkrusztális beolvadásra, tehát a kőzetburok alsó részének az asztenoszféra-ba történő asszimilációjára hasonlító nyomok figyelhetők meg más égitesteken. Itt említhető a *Vénusz*on néhány ún. koronaalakzat peremvidéke (SANDWELL & SCHUBERT 1992), illetve pl. az Aphrodite-föld térségében lévő Diana- és Dali-völgy, amelyek keresztmetszete a földi szubdukciós zónákra emlékeztet. Az enyhén íves alakzathoz közeledve a felszín fokozatosan süllyed, majd meredeken emelkedni kezd, és a környező terület fölé tornyosuló hegyvonulatot alkot (12. ábra).

A kéreg alsó részének az olvadása nehezen nyomozható, de a Jupiter *Europa* holdja esetében valószínűnek tekinthető. A különböző mérések alapján a jégkéreg vastagsága itt 10–30 km. A felszínen néhány száz méternél magasabb kiemelkedések nincsenek, feltehetőleg azért, mert a „túl”

vastag kéregdarabok izosztatikusan lesüllyednek, és ahol az olvadási izoterma alá jutnak, ott jéganyaguk idővel az óceán vizébe olvad, így a kiemelkedés egyre alacsonyabb lesz.

Kisbolygók tektonikája

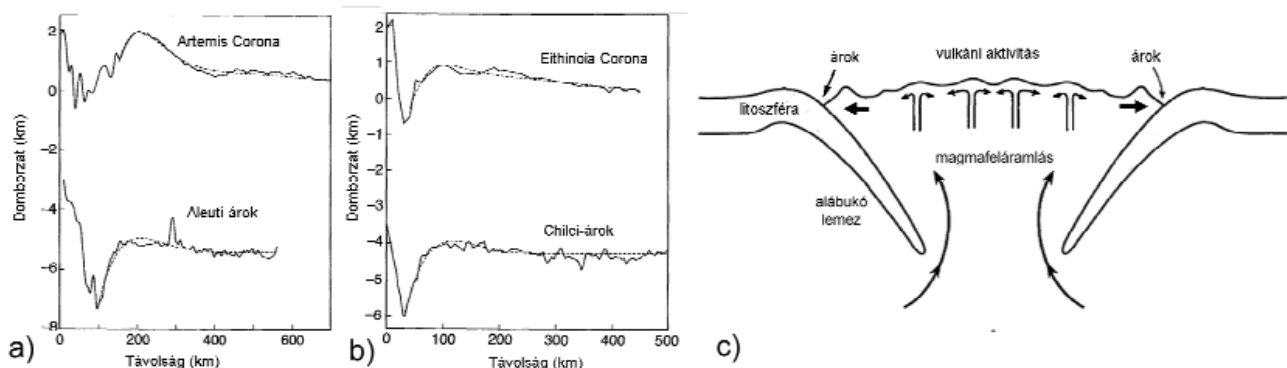
A kisbolygók részletes űrszondás vizsgálata révén sok lineáris alakzatot azonosítottak rajtuk, de ezek értelmezése nehéz, részben mert sok kisbolygó úgynevezett kozmikus kórákás szerkezetű: egymástól közel független, különálló darabok laza halmazának tekinthető. Mindezek ellenére a becsapódásoktól nehezen törnek szét, mivel anyaguk az ütközések nyomán tömörödik, és nehezen robban szét. Az egyes szemcséket a felületi tapadás és az objektum gravitációs tere tartja egyben, de az ilyen környezetben keletkező törésekről, deformációról kevés ismeretünk van.

A részletesen tanulmányozott kisbolygókon mutatkozó lineáris szerkezetek nehezen illeszthetők globális rendszerbe (13. ábra). Egyes törések meglepően nagyok is lehetnek, és az adott kisbolygó kerületének harmadán-felén követhető; ekkor talán két nagyobb tömb mozdult el bennük egymáshoz képest. Emellett néhány kráter esetében sikerült a tömbhatárookra radiális helyzetű töréseket azonosítani, amelyek feltehetőleg a robbanás lökéshullámától keletkeztek (BUCZKOWSKI et al. 2007).

A kisbolygóknál fellépő tektonikus hatások esetében olyan szokatlan tényezőkkel is érdemes számolni a modellek alapján, mint például a tengelyforgás jelentős változása. Az utóbbi nemcsak becsapódás, árapályhatás, hanem akár besugárzás hatására is előállhat (PARRY 2000) a kisebb méretű égitesteknél.

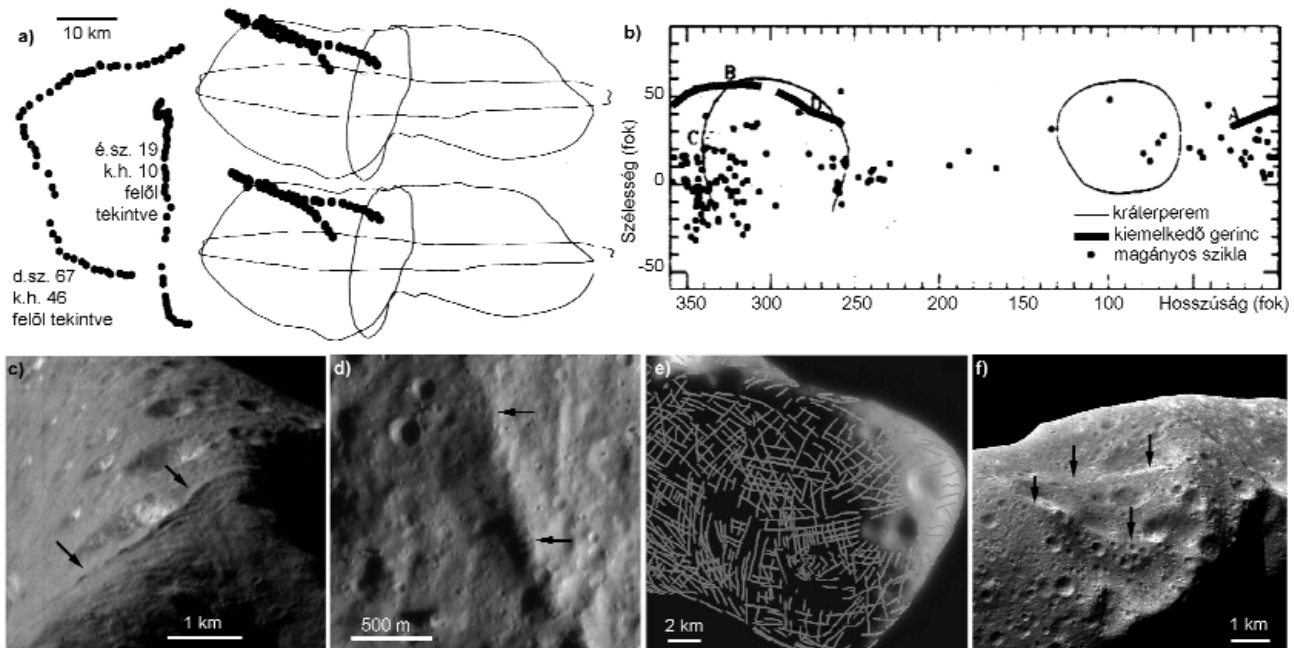
Következtetések

A cikkben vázoltak alapján megállapítható, hogy a Naprendszerben a Földön kívüli felszíneken sok olyan tektonikus alakzat azonosítható, amelyek a bolygónkon megfigyel-



12. ábra. Domborzatprofilok a feltételezett szubdukciós zónákra merőlegesen (a, b) két korona esetében a Vénuszon (fent) és a Földön (lent, SCHUBERT & SANDWELL 1995 nyomán), valamint egy korona feltételezett metszete (c) a tektonikus modell alapján (jobbba)

Figure 12. Topographic profiles perpendicular to the probable subduction zones (left) on Venus (top) and Earth (bottom) (SCHUBERT & SANDWELL 1995) and the proposed tectonic cross section of a corona feature (right)



13. ábra. Tektonikus eredetűnek feltételezett alakzatok kisbolygókon

a) a Townsend Dorsum-gerinc az Idán (az égitest két eltérő irányú metszete és a törésvonal helyzete a kisbolygó sziluettjén); b) a Rahe Dorsum nevű hosszanti kiemelkedés szakaszainak elhelyezkedése az Eros kisbolygón (a pontokkal jelölt blokkok feltehetőleg becsapódás eredetű magányos szikladarabok a felszínen); c) és d) kiemelkedő gerincek a 33×13×13 km-es Eros kisbolygón (8 km széles terület PIA02498 kép amelyen a nap balról süt, 1,4 km széles terület PIA02913 kép, amelyen a Nap jobbról süt); e) az Eros kisbolygón látható lineamentek rendszere; f) hosszanti gerinc az Ida kisbolygón

Figure 13. Features with probable tectonic origin on asteroids

a) Townsend Dorsum on Ida (with two cross sections viewed from two different directions, and also location of the fault on two outlines of the asteroid; b) Rahe Dorsum on the map of Eros (dots mark the location of rock blocks which were ejected by impacts but later fell back onto the surface; c) and d) ridges on the 33×13×13 km Eros asteroid (on subset c the Sun illuminates from the left, while on subset d the Sun illuminates from the right); e) section of asteroid Eros with lineaments; e) linear ridges on Eros.

tekkel rokoníthatók. Ilyen alakzatok és folyamatok a Földnél sokkal kisebb égitesteken is megjelenhetnek, részben a mérettől és belső hőforrásoktól függetlenül jelentkező árapályfűtés eredményeként. A kőzetburok szétterülésére utaló nyomok a Vénuszon, az Európán, a Ganymedesen és talán a Mars ősi területein is mutatkoznak. Ezzel ellentétben a kőzetburok eltűnésére szubdukció révén csak a Vénuszon utal néhány megfigyelés.

A teljes kőzetburok egyben történő elfordulására utaló nyomok is azonosíthatók a Marson, az Európán, de a földihez hasonló globális lemeztectonika egyértelműen nem mutatkozik sehol, noha a kőzetburok kisebb, különálló részekre törése a Vénuszon, az Európán és a Ganymedesen feltételezhető. Ezek közül talán a Vénuszon ma is aktív folyamatok zajlanak. A földihez hasonló, tektonikus eredetű kőzetburok-kivastagodással és izosztikus kiemelkedéssel keletkezett hosszanti hegyvonulatok a Vénuszon figyelhetők meg. A Marson is található ehhez hasonló forma, de az feltehetőleg nem kőzetlemezek mozgása, hanem az egész bolygó méretskáláján fellépett feszültségtől keletkezett. Kisebbségi erő hatására keletkezett szerkezetek a Merkúron, a Holdon, a Marson és a Vénuszon egyaránt megfigyelhetők. Tektonikus átalakulások feltehe-

tően az égitesteknek korai időszakában történtek, és napjainkban jelentős belső eredetű aktivitás csak kevés esetben zajlik.

Más égitestek tektonikus alakzatai révén olyan speciális esetek és képződmények vizsgálhatók, amelyeknél az átalakulás a földitől eltérő anyagok, illetve erők hatására történt; elemzésükkel így a folyamatokat leíró fizikai modellek pontosíthatók. A témakör az egyetemi és főiskolai földtudományi oktatásban is használható: a Földön kívüli esetek, mint érdekes példák, nemcsak szélesítik a hallgatók látókörét, és motiválják őket, de egyes folyamatok jobb megértésében is segítenek.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben vázolt anyag az ELTE TTK-n, részben a Planetológiai Műhely tevékenysége keretében tartott kurzusok során állt össze, így köszönet illeti érte a műhelyben dolgozó kollégákat, BÉRCZI Szaniszlót, HARGITAI Henriket, HORVÁTH Andrást, ILLÉS Erzsébetet és SIK Andrást. Külön köszönet illeti a lektorokat: BALLA Zoltánt és PALOTAI Mártont, hasznos tanácsaikért.

Irodalom — References

- BÁLDI T. 1991: *Általános (elemző) földtan I–II. Jegyzet*. — Nemzeti Tankönyvkiadó – ELTE TTK, 113–307.
- BARR, A. C., PAPPALARDO, R. T. & STEVENSON, D. J. 2001: Rise of deep melt into Ganymede's ocean and implications for astrobiology. — 32nd *Lunar and Planetary Science Conference* abstract 1781.
- BISTACCHIA, N., MASSIRONIA, M. & BAGGIO, P. 2004: Large-scale fault kinematic analysis in Noctis Labyrinthus (Mars). — *Planetary and Space Science* **52**, 215–222.
- BRUEGGE, R. W. V. & HEAD, J. W. 1991: Processes of formation and evolution of mountain belts on Venus. — *Geology* **19**, 885–888
- BUCZKOWSKI, D. L., BARNOUN-JHA, O. S. & PROCKTER, L. M. 2007: 433 Eros interior structure and formation history: an analysis of global lineament mapping. — 38th *Lunar and Planetary Science Conference* abstract 1112.
- BURKE, K., SEGNOR, C. & FRANCIS, P. 1984: Maxwell Montes in Ishtar – A collisional plateau on Venus? — 35th *Lunar and Planetary Science Conference* 104–105.
- CATTERMOLE, P. 1994: *Venus, the geological history*. — Johns Hopkins University Press. Balimore, Maryland, p. 24., 51.
- CONNERNEY, J. E., ACUNA, M. H., WASILEWSKI, P. J., NESS, N. F., RÉME, H., MAZELLE, C., VIGNES, D., LIN, R. P., MITCHELL, D. L. & CLOUTIER, P. A. 1999: Magnetic lineations in the ancient crust of Mars. — *Science* **284**, 794–798.
- CSONTOS L. 1998: *Szerkezeti földtan. Jegyzet*. — Eötvös Kiadó, Budapest, 71–104.
- CZECHOWSKI, L. & LELIWA-KOPYSTYŃSKI, J. 2002: Solid state convection in the icy satellites: discussion of its possibility. — *Advances in Space Research*, **29**, p. 751–756.
- DOHM, J. M. & TANAKA, K. L. 1999: Geology of the Thaumasia region, Mars: plateau development valley origins and magmatic evolution. — *Planetary and Space Science* **47**, 411–431.
- FAIRÉN, A. G., RUIZ, J. & FRANCISCO, A. 2002: An origin for the linear magnetic anomalies on Mars through accretion of terranes: implications for dynamo timing. — *Icarus* **160**, 220–223.
- FOSSEN, H. 2010: *Structural geology*. — Cambridge University Press, 119–185.
- HARGITAI H., CSÁSZÁR G., BÉRCZI SZ. & KERESZTURI Á. 2008: Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana. — *Földtani Közlöny* **138**, 323–338.
- HASHIMOTO, G. L., ROOS-SEROTE, M., SUGITA, S., GILMORE, M. S., KAMP, L. W., CARLSON, R. W. & BAINES, K. H. 2008: Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data. — *Journal of Geophysical Research*. **113** (E9), CiteID E00B24.
- HEAD, J. W. 1990: Formation of mountain belts on Venus: Evidence for large-scale convergence, underthrusting, and crustal imbrication in Freyja Montes, Ishtar Terra. — *Geology* **18**, 99–102.
- HEAD, J. W. & CRUMPLER, L. S. 1987: Evidence for divergent plate-boundary characteristics and crustal spreading on Venus. — *Science* **238**, 1380–1385.
- IVANOV, M. A. & HEAD, J. W. 1996: Tessera terrain on Venus: A survey of the global distribution, characteristics, and relation to surrounding units from Magellan data. — *Journal of Geophysical Research* **101**(E6), 14861–14908.
- IVANOV, M. A. & HEAD, J. W. 2008: Formation and evolution of Lakshmi Planum, Venus: Assessment of models using observations from geological mapping. — *Planetary and Space Science* **56**, 1949–1966.
- KATTENHORN, S. A. 2002: Nonsynchronous rotation evidence and fracture history in the bright plains region, Europa. — *Icarus* **157**, 490–506.
- KIRCHOFF, M. R. & MCKINNON, W. B. 2005: Mountain building on Io: an unsteady relationship between volcanism and tectonism. — 36th *Lunar and Planetary Science Conference*, abstract 2245.
- LORENZ, R. D., STILES, B. W., RANDOLPH, K., ALLISON, L., MICHAEL, D., PERSI DEL MARMO, P., IESS, L., LUNINE, J. I., OSTRO, S. J. & SCOTT, H. 2008: Titan's rotation reveals an internal ocean and changing zonal winds. — *Science* **319**, 1649–1651.
- LUCCHITTA, B. K. 1980: Grooved terrain on Ganymede. — *Icarus* **44**, 481–501.
- MALOOFF, A. C., HALVERSON, G. P., KIRSCHVINK, J. L., SCHRAG, D. P., WEISS, B. P. & HOFFMAN, P. F. 2006: Combined paleomagnetic, isotopic, and stratigraphic evidence for true polar wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard. — *Geological Society of America Bulletin*, **118**, 1099–1124.
- MARINANGELI, L. 1992: Tectonic evolution of Western Ishtar Terra, Venus. — 28th *Lunar and Planetary Science* abstract 1472.
- MELOSH, H. J. 1977: Global tectonics of a despun planet. — *Icarus* **31**, p. 221–243.
- MONTÉSI, L. G. J. & ZUBER, M. T. 2002: A unified description of localization for application to large-scale tectonics. — *Journal of Geophysical Research* **107**, 2045.
- MOORES, E. M. & TWISS, R. J. 1996: *Tectonics*. — New York, Freeman Publisher, 127–252.
- MOORE, J. M., HORNER, V. M. & GREELEY, R. 1984: The geomorphology of RHEA — Implications for geologic history and surface processes. — *Journal of Geophysical Research Supplement* **90**, C785–C795.
- NYFFENEGGER, P., DAVIS, D. M. & CONSOLMAGNO, G. J. 1997: Tectonic lineations and frictional faulting on a relatively simple body (Ariel). — *Planetary and Space Science* **45**, 1069–1080.
- OKUBO, C. H. & SCHULTZ, R. A. 2003: Thrust fault vergence directions on Mars: A foundation for investigating global-scale Tharsis-driven tectonics. — *Geophysical Research Letter* **30**, 22, doi:10.1029/2003GL018664. PLA 2–1.
- PAPPALARDO, R. T. 2006: Ridge and Trough terrains on outer planet satellites. — *American Geophysical Union, Fall Meeting*, abstract #P32A–02.
- PAPPALARDO, R. T. & SULLIVAN, R. J. 1996: Evidence for separation across a gray band on Europa. — *Icarus* **123**, 557–567.
- PARRY, D. 2000: Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. — *Icarus* **148**, 2–11.
- POLLARD, D. D. & FLETCHER, R. C. 2005: *Fundamentals of Structural Geology*. — Cambridge University Press, 333–455.
- PROCKTER, L. M., HEAD, J. W., PAPPALARDO, R. T., SULLIVAN, R. J., CLIFTON, A. E., GIESE, B., WAGNER, R. & NEUKUM, G. 2002:

- Morphology of European bands at high resolution: A mid-ocean ridge-type rift mechanism. — *Journal of Geophysical Research (Planets)* **107**(E5), CiteID 5028.
- ROMEO, I., CAPOTE, R. & ANGUITA, F. 2005: Tectonic and kinematic study of a strike-slip zone along the southern margin of Central Ovda Regio, Venus: Geodynamical implications for crustal plateaux formation and evolution. — *Icarus* **175**, 320–334.
- SANDWELL, D. T. & SCHUBERT, G. 1992: Evidence for retrograde lithospheric subduction on Venus. — *Science* **257**, 766–770.
- SCHENK, P. M. & BULMER, M. H. 1998: Origin of mountains on Io by thrust faulting and large-scale mass movements. — *Science* **279**, 1514–1517.
- SCHENK, P. M. & MCKINNON, W. B. 1989: Fault offsets and lateral crustal movement on Europa — Evidence for a mobile ice shell. — *Icarus* **79**, 75–100.
- SCHENK, P., HARGITAI, H., WILSON, R., MCEWEN, A. & THOMAS, P. 2001: The mountains of Io: Global and geological perspectives from Voyager and Galileo. — *Journal of Geophysical Research* **106**, 33201–33222.
- SCHIEBER, J. 2008: *Basics of structural geology*. — Indiana University (elektronikus egyetemi oktatási segédanyag).
- SCHUBERT, G. & SANDWELL, D. T. 1995: A global survey of possible subduction sites on Venus. — *Icarus* **117**, 173–196.
- SQUYRES, S. W. 1980: Volume changes in Ganymede and Callisto and the origin of grooved terrain. — *Geophysical Research Letters* **7**, 593–596.
- SQUYRES, S. W., REYNOLDS, R. T. & CASSEN P. M. 1983: Liquid water and active resurfacing on Europa. — *Nature* **301**, 225–226.
- SOLOMON, S. C. & HEAD, J. W. 1980: Lunar mascon basins – Lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere. — *Reviews of Geophysics and Space Physics* **18**, 107–141.
- 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. 1992: Venus tectonics – an overview of Magellan observations. — *Journal of Geophysical Research* **97**(E8) 13199–13255.
- SOTIN, C., SENSKE, D. A., HEAD, J. W. & PARMENTIER, E. M. 1989: Terrestrial spreading centers under Venus conditions — Evaluation of a crustal spreading model for Western Aphrodite Terra. — *Earth and Planetary Science Letters* **95**, 321–333.
- SPRENKE, K. F., BAKER, L. L. & WILLIAMS, A. 2005: Polar wander on Mars: Evidence in the geoid. — *Icarus* **174**, 486–489.
- STODDARD, P. R. & JURDY, D. M. 2009: Topographic comparisons of uplift features on Venus and Earth: implications for Venus tectonics. — 40th *Lunar and Planetary Science Conference* abstract 2236.
- STOFAN, E. R., HEAD, J. W., CAMPBELL, D. B., ZISK, S. H., BOGOMOLOV, A. F., RZHIGA, O. N., BASILEVSKY, A. T. & ARMAND, N. 1989: Geology of a rift zone on Venus: Beta Regio and Devana Chasma. — *Geological Society of America Bulletin* **101/1**, 143–156.
- TACKLEY, P. J., SCHUBERT, G., GLATZMAIER, G. A., SCHENK, P., TODD, J. & MATAS, J-P. 2001: Three-dimensional simulations of mantle convection in Io. — *Icarus* **149**, 79–93.

Kézirat beérkezett: 2010. 08. 05.