

KERESZTURI ÁKOS
BOLYGÓTUDOMÁNY

ÚJ TUDOMÁNYOS ZSEBKÖNYVTÁR

MATEMATIKAI ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYOK

KERESZTURI ÁKOS

BOLYGÓTUDOMÁNY

VULKÁNOK, GLECCSEREK, FOLYÓK
ÉS TAVAK A FÖLDÖN KÍVÜL



A könyv megjelenését
az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Titkarsága támogatta.

ELKH | Eötvös Loránd
Kutatási Hálózat

© Kereszturi Ákos, Typotex, Budapest, 2023
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Szakmailag lektorálta: Hargitai Henrik és Szabados László
Szakirodalmi források összeállítása: Kurfis-Pál Bernadett

ISBN 978 963 493 196 6
ISSN 2939-8797

Kedves Olvasó!
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!
Újabb kiadványainkról, akcióinkról a www.typotex.hu
és a facebook.com/typotexkiado oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.
Felelős kiadó: Németh Kinga
Felelős szerkesztő: Kovács Zoltán
Tördelés: Jankovics Milán
Borítóterv és tipográfia: Somogyi Péter
Nyomta és kötötte: OOK-PRESS Nyomda, Veszprém
Felelős vezető: Szathmáry Attila

TARTALOM

BEVEZETÉS	7
1. TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK	11
1.1. Eredetük és csoportosításuk	11
1.2. A tektonikus felszínformák típusai	13
1.3. Egész kőzetburok elfordulása	18
1.4. A kőzetburok képződése	21
1.5. Hegységképződés jellegű folyamatok	29
1.6. Tesszerák	32
1.7. A kőzetburok felemésztődése	32
1.8. Szubdukció	33
1.9. További tektonikus eredetű felszínformák	38
1.10. A tektonikus felszínformák területi eloszlása	45
2. VULKANIZMUS	49
2.1. A vulkáni működés jellege	54
2.2. Robbanásos kitörések	55
2.3. Lávaömléses kitörések	58
2.4. További vulkáni képződmények	62
2.5. Meredek vulkánok	66
2.6. Kalderák, lávafolyások és lávatavak	68
2.7. Koronák a Vénuszon	74
2.8. Kriovulkanizmus	80
2.9. Kriomagmás tevékenység	84
2.10. A vulkanizmus területi eloszlása	85

3. BECSAPÓDÁSOS KRÁTEREK	89
4. A GÁZÁRAMLÁS HATÁSA A FELSZÍNRE	93
5. FOLYADÉKOK A FELSZÍNEKEN	101
5.1. Áramló folyadékok felszínformái	107
5.2. Álló folyadékok nyomai	115
6. JEGES FELSZÍNFORMÁK	123
6.1. Sarki jégsapkák	124
6.2. Gleccserek és társaik a Marson	137
6.3. További jeges felszínformák	145
6.4. Jég-vulkán kölcsönhatások	152
7. LEJTŐS TÖMEGMOZGÁSOK NYOMAI	155
7.1. Lejtős tömegmozgások kisbolygókon	165
8. A REGOLIT	173
8.1. A regolit jellemzői	182
9. NEHEZEN BESOROLHATÓ FELSZÍNFORMÁK	189
UTÓSZÓ	195
Köszönetnyilvánítás	197
Irodalomjegyzék	199
Tárgymutató	237

BEVEZETÉS

Évszázadokon keresztül a folyóvölgyek, szigetek, vulkánok vagy jégsapkák a tudományos leírásokban csak földi helyszíneken jelentek meg, csak ilyeneket lehetett bemutatni – tekintve persze a képzelet szülte tájaktól. Az ürtevékenység megindulásával azonban gyorsuló ütemben bővültek ezek a helyszínek (Illés, 2009). A bolygókutató szondáknak köszönhetően hamar kiderült, hogy nemcsak a Földön hullik csapadék, omlanak a meredek lejtők, vagy folytak folyók, hanem más égitesteken is, és azok jellemzői, területi eloszlása sok információval szolgál (Hargitai, 2006; Hargitai és tsai., 2019). Egyértelmű lett, hogy a saját bolygónkon kialakult képződmények és az itt zajló földtudományi folyamatok ezek széles skálájának csak egy kis részét képviselik. A földtudomány a csillagászat, fizikával és néhány további tudományterülettel karöltve értelmezi a korábbinál szélesebb skálán megjelenő, a Földről már ismert folyamatokat és felszínformákat ezekben a nekünk extrémnek számító környezetekben.

A bolygótudomány vagy planetológia (Bérczi, 1978, 1985), noha furán hangzik, a földtudomány Földön kívüli változa-

tának vagy kiterjesztésének is tekinthető. Egy olyan témakör, amely egységes rendszerben értelmezi azt, amit a különböző égitesteken látunk: a planetológiában egy kavics lehet akár nitrogénjégből, a folyóban áramló folyadék lehet metánból, a tűzhányó pedig mínusz száz fokon is működhet. Mindezek segítenek az égitestek felszínén zajló és azokat alakító folyamatokat a Földön tapasztalhatónál szélesebb körben megismerni és fejlődésüket megérteni (Bérczi, 1989, 1991). Bolygónk egy olyan laboratóriumnak tekinthető, ahol csak szűk viszonyok között, korlátozottan zajlanak a felszínt és a belsőt alakító folyamatok – ismerjük meg tehát ezen folyamatok és az általuk létrehozott képződmények szélesebb skáláját, amiben más égitestek mint más paramétereket mutató „laborok” segítenek.

Ennek a kiadványnak a célja az elmúlt közel húsz évben született azon bolygótudományi ismeretek bemutatása magyar nyelven, amelyek a Naprendszer szilárd felszínű égitesteinek felszíni jellemzőivel kapcsolatosak, különös tekintettel a rendszerszintű összefüggésekre. Ennek megfelelően az egyes égitesteket és felszínformákat az azokat létrehozó folyamatok szerint csoportosítottam, nem pedig objektumként tárgyalom. A Naprendszer szilárd felszínű tagjainak külön-külön történő áttekintése a hamarosan megjelenő *Csil-lagászat* (Szabados László főszerk., előkészületben) könyvben olvasható majd. Olyan témaköröket sem érintek, amelyek a magyar szakirodalom nemrég megjelent művei segítségével részletesen megismerhetők. Ezért nem tárgyalom behatóan a becsapódásokat és következményeiket, amelyekről Hargitai és tsai. (2005) könyvében olvashatunk, valamint a Mars jellemzőit sem, amelyeket Kereszturi (2012) tekinti át. Emellett

részben terjedelmi okokból nem ismertetem az égitestek belső szerkezetét, a légköröket és sok fontos fejlődéstörténeti összefüggést sem (Bérczi, 2007; Illés, 2012).

A könyv jelenlegi tudásunkat tükrözi, természetesen a témakör gyors fejlődése miatt idővel több tétele is túlhaladottá válhat. Számos olyan kifejezéssel illetett képződményről olvashatunk a könyvben, amelyek értelmezése nem evidens minden esetben. A Földön kívüli alakzatokat és folyamatokat a már ismert földi jelenségekhez szükséges hasonlítaniunk, ennek megfelelően a már ismert fogalmakat és definíciókat ki kell terjesztenünk más égitestekre. Ilyenkor persze nem mindig felel meg a távoli objektum képződménye a földi nomenklatúrával jelzett képződmény típusának – mégis egyszerűbb az ilyen szóhasználat, mint a fogalmak bonyolult körülírása. Például vulkánnak, dűnének vagy folyó völgynek olyan felszínformákat nevezünk, amelyek a földi értelmezéshez hasonlóak, noha azzal nem egyeznek meg teljesen. Ennek megfelelően ezek leírását legjobb a ma elérhető legmegfelelőbb közelítésnek tekintenünk, az eltéréseket az adott helyeken majd próbálom jelezni.

A fogalomhasználat terén is akadnak „szokatlan” helyzetek. A Földön például nem szokás a jeget kőzetnek tekinteni, viszont a külső Naprendszerben ez a domináns kőzetalkotó anyag. A csapadék, a lejtős tömegmozgások vagy az álló folyadékok stb. eseteiben is a Földön kívüli jelenségeket az itthon megszokott fogalmakkal tárgyaljuk. Ugyanakkor sok felszínforma besorolása a feltételezett keletkezési mód alapján történik, és utóbbiról nincs minden esetben biztos tudásunk.

Fontos az égitestek szilárd külső burkának jellemzése és besorolása az ismert kategóriákba. Itt az okozhat gondot,

hogy egyes égitesteknek több szilárd külső burka is van: az óriásbolygók jégholdjain például a kívülről látható jégpáncél számtalan becsapódásos krátert, tektonikus és egyéb formát mutat – ugyanakkor a jégréteg alatti vízréteg alján egy újabb nagy nyomású szilárd jég vagy szilikátos felszínű kőzetburok következik.

Mindezek értelmezése várhatóan sokat fog módosulni és fejlődni a következő években. A szakkifejezések nagyobb része zárójelben angolul, dőlt betűvel is olvasható, megkönnyítve az interneten ma már elérhető hatalmas mennyiségű szakirodalom értelmezését. Előfordul, hogy sok felszínformának vagy terület nevének nem egyértelmű a magyar fordítása, néhány alkalommal a szakirodalomban használt latin vagy angol változatot is jelzem dőlt betűvel. A könyv fontos eleme a tárgymutató, amivel egy-egy érdekes felszínforma megtalálható akkor is, ha nem tudjuk, mely égitesten vagy felszínformatípusban van jelen.

1. TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK

1.1. EREDETÜK ÉS CSOPORTOSÍTÁSUK

A szilárd külső burok tektonikus és vulkanikus jellegű átalakulásához belső és külső eredetű energiaforrások egyaránt hozzájárulhatnak. Itt szó lehet *hőenergiaként* felszabaduló különböző belső hatásokról (például radioaktív fűtés, akkréció eredetű maradványhő, hőfelszabadulással járó geokémiai és fázisátalakulások), de ide tartoznak olyan *mechanikai* átalakulások is, amelyek nem vagy csak alig járnak fűtőhatással (például fázisváltozáshoz köthető térfogatváltozás vagy főleg a keletkezés utáni korai időszakban jellemző melegedés kiváltotta tágulás). Mindezek mellett a *becsapódások* is jelentős energiaforrást képeznek (amelyek gyakorisága és mértéke a korai időszakot követően gyorsan csökkent a Naprendszer fejlődése során), ezek részben hőhatással, részben mechanikai deformációval járhatnak. Rendkívül nagy becsapódások esetében akár az égitest külső rétegeit is leszakíthatják (például a Merkúr anomálishan nagy vastartalmának kialakulását a szilikátos külső rétegek leszakadása segítette, illetve ilyen esemény robbantotta ki a Hold anyagát a Földből, akár csak a Plútó holdjainak anyagát a Plútóból), vagy azt szét is

darabolhatják – mindezek a későbbi tektonikus és vulkanikus folyamatok jellegét is befolyásolhatják.

Külső eredetű hatás a napsugárzás (amely a központi csillaghoz kötött tengelyforgás esetén tartósan magasabb hőmérsékletet eredményezhet a felszín adott részén és idővel a kőzetburok mélyebb tartományaiban is – ilyen a Naprendszerben feltehetőleg nincsen, de a Merkúr alacsonyabb szélességű területein a kéreg magasabb hőmérsékletű lehet a polárisnál), ide sorolandó az *árapályhatás* is (ez mechanikai deformációt és hófelszabadulást okoz). Fontosak továbbá az árapályval kapcsolatos nemszinkron tengelyforgás és ezzel összefüggésben a valódi pólusvándorlás (az ilyen elfordulásnak kedvez a sok jeges hold esetében előforduló mélységi vízréteg – Collins és tsai., 2009). Itt említendő a tengelyforgási sebesség változása és ezzel összefüggésben a stabil forgási ellipszoid alak módosulása, valamint egyéb pályaelem-változások hatása is. Szintén jelentős a fentiekkel összefüggésben fellépő *térfo gatváltozás* hatása, amely tágulást a belső víz megfagyása okozza. Ez az óriásbolygók jég holdjain fordulhat elő, továbbá a Plútón és annak Charon holdján is ehhez kapcsolódhat a jellegzetes tágulós tektonika (Hammond és tsai., 2016).

Különleges példák a legkisebb égitestek. A kisbolygók esetében például a napfény elnyelésének és visszasugárzásának különbsége nyomán, az ún. YORP-effektus révén változhat a tengelyforgási sebesség. A YORP-effektus (a név a hatást elsőként kidolgozó, illetve pontosító kutatók nevének – Yarkovsky, O'Keefe, Radzievskii, Paddack – kezdőbetűiből összeállított betűszó) keretében az égitestet érő és róla szóródó napsugárzás, valamint az elnyelődő és visszasugárzott komponensek irányeloszlásának különbségétől keletkező nyoma-

ték változtatja az égitest forgási sebességét és forgástengelyének irányát – ezzel pedig a nehézségi erőterét és alakját. Ha módosul az egyensúlyi alak, az égitest poláris átmérője nőhet vagy csökkenhet, ezzel összefüggésben pedig tektonikus jelenségek léphetnek fel rajta, szélsőséges esetben szét is szakadhat az égitest.

1.2. A TEKTONIKUS FELSZÍNFORMÁK TÍPUSAI

Definíció szerint tektonikus eredetű felszínformáknak azokat tekintjük, amelyek egy égitest szilárd vagy részben szilárd halmazállapotú külső rétegének (amit többnyire kőzetburoknak avagy litoszférának neveznek) töréses vagy képlékeny deformációs változása révén jönnek létre. Akadnak olyan égitestek is, amelyeken „több kőzetburok” is előfordul, például az Europa jupiterhold jeges anyagú külső kőzetburkán sok tektonikus és néhány vulkanikus felszínforma van, miközben mélyebben, a vízréteg alján is van egy kőzetburok (ami szilikátos), várhatóan szintén hasonló eredetű felszínformákkal. A tektonikus folyamatokhoz sorolhatók a kisbolygók hasonló jelenségei is, noha ott az érintett kőzetréteg az egész kisbolygót jelentheti. A tektonikus mozgásokat sokszor szerkezeti mozgásoknak is nevezik. A tektonikus eredetű felszínformák azonosítása, pontosabban ebbe a kategóriába sorolása az adott képződmények kinézete és a feltételezett keletkezési mód alapján történik – noha az utóbbi esetben a jelenlegi ismereteink (részben a felszínekről nyert adatok sokféle értelmezhetősége miatt) nem biztos, hogy megfelelnek a valóságnak, és idővel módosításra szorulhatnak.

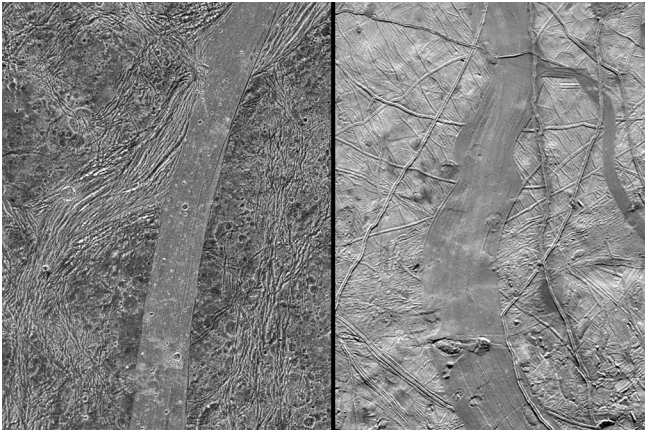
Általánosan érvényes megállapítás, hogy az *óriásbolygók jeges holdjainak* felszínén (a szilikátos kőzetekhez hasonlóan) rideg töréses folyamatok jellemzőek, míg a felszíntől lefelé növekszik a képlékeny deformációk lehetősége és aránya. Speciális csoportot képez az ún. viszkózus relaxáció (viszkózus kúszás, *viscous creep*), avagy képlékeny elernyedés, ami a jég holdak felszínformáinál lehet jellemző (Bland és McKinnon, 2018). Ennek hatására a Ganymedesnél esetenként egy eredetileg besüllyedő domborzati elem aljzata akár domború is lehet idővel (Parmentier és Head, 1981), ilyen például a jeges Ceresnél is azonosítható az idősebb kráterek alakjában (Schenk, 2015). A Ganymedes 2 km-nél nagyobb kráterei jellegzetesen sekélyebbek, mint a Hold hasonló kráterei (Schenk, 1991), ami a jégnek a szilikátos kőzethez viszonyított nagyobb képlékenységének tulajdonítható. Ilyen elernyedett kráterek főleg a Ganymedes idős, sötétebb poligonális területein lehetnek (Bland és tsai., 2017), talán mert a keletkezésük utáni korai időszakban nagyobb lehetett a belső eredetű hőáram. A teljes ellapuláskor a kráterek után csak egy albedófelt marad vissza, ezek neve *palimpszeszt*.

Ezen jeges holdaknál néha jelentős tektonikus aktivitás is előfordulhat például az árapály-eredetű kéregmozgások hőhatása miatt. Emellett sokszor várható főleg korai erősebb aktivitás az elmúlt 1-2 milliárd évhez képest, az anyaguk egy része ugyanis kezdetekben cseppfolyós halmazállapotúvá alakulhatott, majd még korán megfagyott, és az ezzel egyidejűleg fellépő térfogat-növekedés járhatott tektonikus folyamatokkal (1.1. ábra). A legtöbb jég hold esetében inkább tágulós, semmint összenyomódós tektonikus alakzatok mutatkoznak.

A kőzetburok tektonikai viselkedése szempontjából kritikusak annak mechanikai jellemzői, ezeket részben a *reológia* témakörében tárgyalják. Ilyen szempontból a Földhöz viszonyítva egzotikus eseteket képeznek a fent említett jégholdak. Ugyanis fontos eltérés, hogy a szilárd jég sűrűsége kisebb a folyékony víznél, ennek megfelelően a jég „felúszik” a víz tetejére (ellentétben néhány szilikátolvadékkal), míg az emelkedő kriomagmás (vizes) olvadékok önmagukban csak sűrűségkülönbség alapján nem törnek ki a jeges felszínre. Mégis van, ahol fellépett kriovulkanizmus például belső nyomás következtében. Ugyanakkor a jég sokkal képlékenyebb az olvadásponthoz közeledve, mint a szilikátos kőzetek – ennek megfelelően könnyebben és gyorsabban deformálódik, noha itt is millió éves időskálákról van szó. Továbbá a mélység növekedésével gyorsabban vált képlékeny deformációra a jég, és így a felszín alatti áramlásai könnyebben befolyásolják a felszíni, ridegebb réteg mozgását.

A tektonikus folyamatok értelmezését ugyancsak elősegíti az adott égitest domborzatának magasságeloszlása. Az 1.4. ábra alapján a Föld esetében a világosszürke a világtenger által borított területeket, míg a Marson a többféle árnyalat a feltételezhetően egykor vízzel borított területeket jelzi. Jól látszik a Földön a kétféle kéregtípust jellemző eltérő vastagság, kémiai összetétel és sűrűség, valamint az emiatt fellépő domináns magasságkülönbség (óceáni és kontinentális lemezek), hasonló a domborzatot tekintve csupán sejtethető a Mars esetében (északi mélyföldek – déli felföldek, ezek kettőssége angolul *Hemispheric Dichotomy*), de ott nem mutatkozik geo-kémiai eltérés. A Vénuszon és a Holdon pedig még a domborzat alapján sincs ilyen megoszlás, noha a holdi kéreg

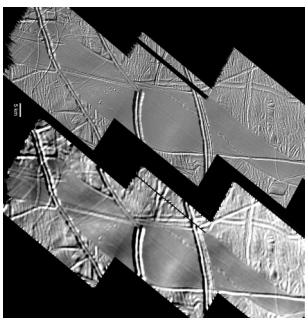
- I.1.** Az Arbela Sulcus tágulós felszínforma a Ganymedesen (balra) és egy névtelen tágulós felszínforma az Europa jégpáncélján (jobbra) (NASA, JPL, Brown University).
- I.2.** Összenyomódással keletkezett, 10-15 km széles gerincek alkotta hegyvonulatok az Ovda Regio északi peremének 200 km széles részén, a Vénuszon. A mélyebb és sötétebb területek lávaömléseket jeleznek a Magellan űrszonda radarfelvételén (NASA, JPL).
- I.3.** Kompressziótól keletkezett, lapos, gyűrődéses alakzatok az Astypalaea Linea szürkés sávja térségében (felfelé, kissé jobbra futó sáv). Utóbbi tágulással és oldaleltolódással, valamint anyagfeláramlással együtt keletkezett (NASA, JPL, JHUAPL, Brown University).
- I.4.** Hipszografikus görbék a Föld, a Vénusz, a Hold és a Mars esetében (balról jobbra).



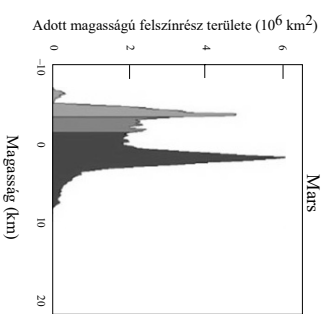
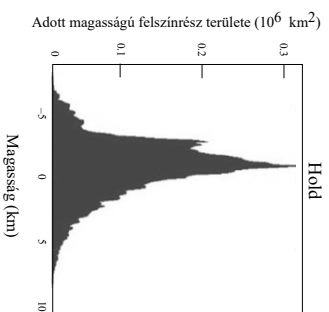
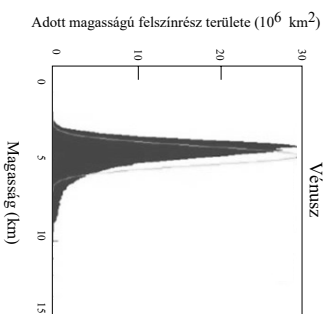
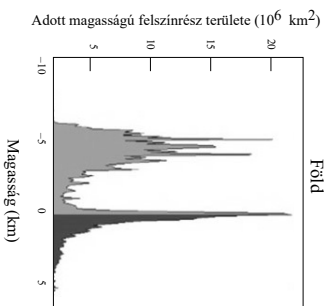
I.1.



I.2.



I.3.



I.4.

vastagsága jelentős intervallumot fed le (Stoddard és Jurdy, 2012).

A tektonikus felszínformák tárgyalása során először a kőzetburok egészére jellemző mozgásformák és az ezekkel kapcsolatos felszínformák kerülnek sorra. Ezt követi a kőzetburok keletkezésének, mozgásának és felemésztődésének ismertetése, majd pedig az eddig nem vagy csak korlátozottan említett tektonikus eredetű felszínformák bemutatása. A tektonikus felszínformák értelmezésében sokat segít a felszíni domborzat, a formakincs és a gravitációs anomáliák vizsgálata – és természetesen az egyéb felszínformák, főleg vulkanikus képződmények jellegéből és a korbecslésből származó *kontextus*.

1.3. EGÉSZ KŐZETBUROK ELFORDULÁSA

Ezen jelenség keretében az egész külső kőzetburok egyben fordul el a belső részek felett, ezt a Föld esetében valódi pólusvándorlásnak is nevezik. A jelenség oka a kőzetburok megváltozott tömegeloszlása, amely a tengelyforgáshoz viszonyított további elfordulást okozó erőket ébreszt, és ezek a belső rétegekhez képest elfordítják a külső szilárd burkot. Ehhez persze az szükséges, hogy a külső és a belső rétegek között valamilyen képlékeny anyag legyen, ami a Földnél az asztenoszféra, jégholdaknál pedig a belső vízréteg.

A *Mars* pólusai „eredetileg” mintegy 20-25°-ra lehettek a mai pozíciótól, amit geodinamikai szempontból, tehát a kőzetburok tömegeloszlását tekintve az észak–dél ellentét befolyásolhatott és határozhatott meg korábban. A vulkani-

kus eredetű Tharsis-hátság hatalmas tömegének kialakulása ezt követően (de még a bolygó fejlődéstörténetének korai szakaszában) viszont úgy változtatta meg a kőzetburok tömegeloszlását, hogy a nagy hátság a kőzetburokkal együtt az egyenlítőre fordult, valószínűleg a köpeny felső részével együtt mozogva a belső felett. Léteznek olyan jellegű sarkvidéki üledékek, amelyek ma már nem a pólusnál vannak, és a korábbi pólus helyét jelzik. Ezek az akkoriban (kb. 3,4 milliárd évvel ezelőtnél korábban) elhelyezkedő pólussapka maradványának tekinthetők az északi (Murray és Malin, 1973; Fishbaugh és Head, 2001) és a déli féltekén (Tanaka, 2000). Emellett az idős folyóvölgyeknek feltehetőleg az egyenlítői vidéken előfordult egykori koncentrációja is kissé megváltozott, ezek sávja enyhén elmozdult az eredeti egyenlítőt követő helyzettől. Továbbá mivel egy forgási ellipszoid tengelyei nem egyforma méretűek (a bolygók a forgás miatt lapultak, így a poláris átmérő kisebb az egyenlítői átmérőnél), ezért a kőzetburokban repedésrendszer keletkezhetett az elfordulásakor – azonban ennek azonosítása nem egyértelmű a Marson.

A *Hold* esetében a sarkvidéki kráterek örökké sötét belsejében lévő jég eloszlása utal valódi pólusvándorlásra. Hárommilliárd évvel ezelőtt mintegy 5° -ot mozdulhatott el a pólus helyzete, amelynek nyoma a jég eloszlásában mutatkozik: a két pólustól egymáshoz képest ellentétes irányban mintegy 5° hosszan jellemző egy-egy „jegesebb” sáv, ami a mai és a korábbi pólusok helyzete közötti „útvonalat” mutatja (Siegler és tsai., 2016). Az elmozdulást az Oceanus Procellarum területén fellépett vulkanikus tevékenység során megváltozott globális tömegeloszlás okozta, és ennek keretében a déli pólus kissé a Föld felé, az északi pedig ezzel ellentétes irányban mozgott

(miközben a kötött tengelyforgás szerinti látható és túloldal helyzete nem változott jelentősen) – úgy is fogalmazhatunk, hogy a holdfelszíni képzeletbeli arc kicsit „felhúzta az orrát”.

A fentiek mellett az *Europa* jupiterhold és a *Titan* szaturnuszhold esetében is felléphetett valódi pólusvándorlás, amit segíthetett, hogy a külső jégpáncél és a mélyebben lévő szilárd részek között folyékony vízréteg van (Jara Orue és Vermeersen, 2011). Az egész külső ilyen elfordulása nem feltétlenül jár deformációval, elképzelhető olyan elfordulás is, amikor a forgási ellipszoid alakú burok és a belső bolygótest forgástengelye nem mozdul el egymáshoz képest, tehát nem lép fel valódi pólusvándorlás. Ekkor például a burok és a belső rész forgási sebessége módosul egymáshoz képest. Ilyen ún. nem szinkron tengelyforgást az *Europa* jupiterholdnál feltételeznek, ahol a jégpáncél tektonikai és kriovulkáni jellegű módosulása hatására megváltozott tömegeloszlás okozhatta azt (Schenk és tsai., 2020).

Hasonló tengelyforgási jellemzőt figyeltek meg a *Titan* szaturnuszhold esetében is, ahol az évszakosan váltakozó irányú szelek is befolyásolják a külső jégpáncél forgását némi évszakban, a változó kelet–nyugat irányú komponensek aránya hol sietteti, hol meg lassítja a belsőhöz és az elméleti egyenletes tengelyforgáshoz képest. Az eltérés évente néhány tizedfok nagyságrendű (Lorenz és tsai., 2008b), ami sokkal hosszabb időskálán (a Szaturnusz keringési idejének 29 éves skáláján) lép fel, mint az árapály-eredetű forgási módosulás, utóbbi a Titannak a Szaturnusz körüli keringése időskáláján (16 nap) jelenhet meg. Mindezt részben az teszi lehetővé, hogy a külső és belső szilárd egység között egy kb. 200 km vastagságú, kis viszkozitású vizes oldat helyezkedik el, továb-

bá a légkör viszonylag nagy tömegű, ezért jelentős az impulzusmomentum (perdület) légkör és a felszín közötti átadása.

Az 525 km-es *Vesta* kisbolygó poláris átmérője közel 60 km-rel kisebb az egyenlítőinél, amit egy óriáskráter okoz. Ez a Rheasilvia kráter, amely ma a déli pólussal a középpontjában helyezkedik el kisbolygón. Keletkezésekor feltehetőleg nem itt volt, de a hatalmas kráter képződése nyomán létrejött anyaghiánytól újabb, geodinamikailag stabil forgási helyzetbe „dőlt” a *Vesta*. A globális átfordulással az anyaghiányt el nem szenvedő többi terület jelentős része pedig az égitest forgása által kijelölt egyenlítő közelébe jutott (Karimi és Dombard, 2014). Felszín alatti anyag benyomulásával kapcsolatos tágu-lásos repedések is mutatkoznak a *Vesta* felszínén (2.1. ábra).

A forgástengely térbeli irányának változása igen gyakori lehet sok, főleg kisebb kisbolygó esetében, ahol a becsapódások vagy a beeső napfény és a test által kibocsátott sugárzás iránya közötti eltérés hosszú idő alatt jelentős impulzusnyomatékokat képviselnek az objektum tömegéhez képest. Ugyanakkor ez más jelenség, mint a külső réteg korábban említett elfordulása a belső felett, mivel itt „egyben mozog” az egész égitest.

1.4. A KŐZETBUROK KÉPZŐDÉSE

A tektonikus témakörben említjük, de szorosan kapcsolódik a vulkanikus (pontosabban magmás) folyamatokhoz a *kőzetburok-szétterülés* (kőzetlemezek szétsodródása, *spreading*) jelensége, amely ismert a Földön, és több jel utal rá, hogy részben a Vénuszon (sajátos, „lágú” lemeztektonika formájában).

Talán egykor a Marson is előfordulhatott. Hasadékvölgy-magmatizmusnak is nevezik ezt a jelenséget. Ugyanakkor megoszlanak arról a vélemények, hogy a jéghegyszélek felszínén is felléphet-e ilyen jelenség, erre utaló jelek leginkább az Europa és Ganymedes jupiterholdaknál azonosíthatók. Fontos megjegyezni, hogy itt sokféle, változatos eredetű repedés mutatkozik a jégen és a jégréteg alatt, ettől függetlenül a szilikátos felszínen is elvben felléphet részben hasonló jelenség, de erről még nincsenek ismereteink.

A *földi globális lemeztektonika* a legrészletesebb modell, amely a legjobban ismert bolygó, a Föld vonatkozó tektonikus folyamatait foglalja össze egységes, kölcsönható rendszer formájában. Ez utóbbit és annak irodalmát itt nem részletezzük, de tanulmányozása melegen ajánlott az olvasóknak. Hasonló kölcsönható rendszerek más égitesteken (főleg a Vénuszon; Illés, 2011) is előfordulhatnak, de megismerésük még korai fázisban tart. Az alábbiakban ezen folyamatok egy-egy ismert vagy indokoltan feltételezhető elemét mutatom be (a kőzetburok gyarapodását a magmás-vulkanikus folyamatok és ősi magmaóceán alapján később tárgyalom).

Kőzetburok-szétterülés nyomai a *Vénuszon* is mutatkoznak. Az Artemis Regio területén húzódó, kiemelkedő gerincek a földire hasonlító, gyors kőzetburok-szétterülésre utaló morfológiát, főleg domborzati mintázatot képviselnek (McKenzie és tsai., 1992). Az Aphrodite Terra nyugati részén feltételezett *spreading* szimmetrikus topográfiai profilt hoz létre a központi kiemelkedő gerinc két oldalán, amelynek centrumában egy keskeny árok húzódik végig. A Parga Casma-árokknál ún. hármass csomópontot feltételeznek a kutatók (Graff és tsai., 2017), ahol több, egymással összekap-

csolódó, riftesedő hasadékvölgy vagy árok is előfordulhat. Az Ovda Regio esetében pedig a központi árkot keresztvező transzform vetők jellege, helyzete hasonlít a földi kéregképződési zónákban megfigyeltekre.

A vénuszbeli *chasmata*-zónái több szempontból a földi riftekkel és óceánközépi hátságokkal rokoníthatók, amit a megfigyelhető domborzatprofil és tágulások jelei is alátámasztanak (2.3. ábra). A Vénuszon a földinél lassabb kőzetburok-szétterülést feltételeznek ezekben a térségekben (Stoddard és Jurdy, 2009). Érdekes egybeesés, hogy a Földhöz hasonló méretű Vénusz árokrendszereinek teljes hossza 54 ezer km, míg a Földön a hasonló tágulások teljes hossza kb. 59 ezer km. Érdemes megemlíteni, hogy egyes hegyvidékeknél, például az Ishtar Terra környékén olyan töréses mintázat mutatkozik (Smrekar és Solomon, 1992), amely a nagyobb kiemelkedések plasztikus szétterülésére utal; ez egy egyszerű mechanikai folyamat, és nem kapcsolódik a fent említett kéregkeletkezéshez.

A Vénuszon várható magasabb köpenyhőmérséklet befolyásolhatja a tektonikus folyamatokat, de egyelőre nem tisztázott, hogy pontosan miként. Fontos továbbá, hogy a Vénusz száraz bolygó, víztartalma az erős üvegházhatás miatt feltételezőleg már régen elszökött; és ennek megfelelően a feltételezett szubdukció során nem sok H_2O jut a mélybe, ami ott csökkenthetné volna az anyagok szilárdságát és olvadáspontját. A Földön a litoszféra és asztenoszféra viselkedését befolyásolva a víztartalom elősegíti a globális lemeztectonika működését.

A kőzetburok-szétterülés potenciális nyomai a *Marson* azok az idős, mágneses mintázatok, amelyek a bolygó fel-

színének közel harmadán, idős területeken azonosíthatóak. Főként a déli felföldek vidékén mutatkozó mágneses anomáliák nemcsak az egykori globális mágneses tér létrejöttére és annak periodikus mágneses pólusváltásaira utalnak, de transzformvetők is szabdalják a mintázatot.

Sajátos alakzatok és folyamatok az *Europa* jupiterhold jégfelszínén a néhány 100 m széles, akár több száz km hosszú, V keresztmetszetű kiemelkedések, avagy *gerincpárok* (*double ridges*), amelyek közepén mélyedés mutatkozik. Kérdés, hogy ezek a földi óceánközépi hátságok tágulós zónáira hasonlítanak-e, vagy inkább időszakos árapály-eredetű enyhe tágulást, majd utána összezáródást képviselnek-e. Néhol akár 10 km széles komplex gerincek is mutatkoznak, amelyek talán többszöri kinyílás, majd összezáródás következtében és a közepén keletkezett friss anyag összetörése és kipréselődése nyomán keletkeztek. Ugyanakkor sokszor a kettős gerincek a központi repedéssel közel párhuzamos oldalelmozdulásra utaló jeleket is mutatnak. A megfelelő megvilágítási viszonyok alatt, nagy felbontással rögzített képeken némelyik kettős gerinc mellett sötét, finomszemcsés anyag mutatkozik talán a gerincekről lepusztult és felhalmozódott törmelékből, de az sem kizárt, hogy a két gerinc közül kilövellt, majd visszahullott anyagból származik.

Keletkezésüket illetően egy korábbi elmélet úgy vélte (Greenberg és tsai., 1998), hogy az árapályhatás keltette tágulós feszültség repesztheti fel ezeket az alakzatokat, majd a 3,5 napos árapályciklusnak megfelelően később záródik a repedés, és közben a területén felhalmozódott anyag össze-, illetve felpréselődik (Sullivan és tsai., 1998), kialakítva a hosszanti gerinc jellegű felszínformát. Ezen alakzatok egy része