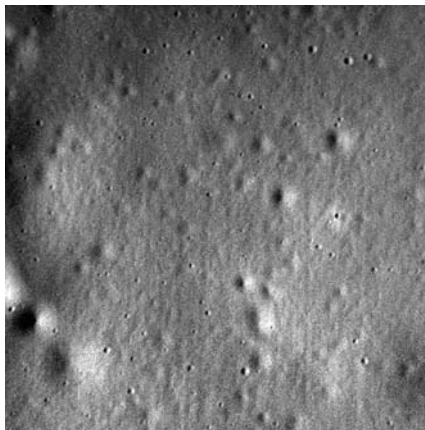


# Négy év a forró bolygó körül

2015. április 30-án, magyar idő szerint 20:26-kor a Merkúr felszínébe csapódott a Messenger-űrszonda, a Merkúr bolygót eddig legrészletebben vizsgáló űreszköz. A program befejezéséig, közel 4 év alatt megtett 4105 bolygókörüli keringés után, a tervezett módon 3,91 km/s sebességgel ütközött a felszínbe, közel 15 m átmérőjű krátert létrehozva a 400 km átmérőjű Shakespeare-medencében. Az esemény egy sikeres program végére tett pontot, amelynek eredményeiről a hírek rovatban rendszeresen beszámoltunk, valamint két nagyobb összefoglaló cikkben tekintettük át korábban. Az alábbiakban az elmúlt két évben született további felfedezésekről számolunk be.

A bolygó belső szerkezetével kapcsolatos modellek fejlesztései alapján a Merkúr vasmagjának egy része olvadt lehet, hűléssel szilárdul és zsugorodik. Az ezzel kapcsolatos áramlások pedig mágneses teret generálnak – a ma megfigyelhető tér tehát nem egy ősi maradványa. A folyékony vasmag sugara közel 1325 km lehet, amelynek belsejében egy kb. 650 km sugarú szilárd mag található. A bolygó kérge pedig vastag, 60–100 km körüli érték jellemezheti. A Merkúr mozgásának részletes vizsgálata alapján sikerült megállapítani, hogy a forgástengely dőlésszöge a pályásik merőlegeséhez  $2,06 \pm 0,016$  ívmásodperc, a tengelyforgási idő 58,646146 nap, a keringési idő pedig 87,9693496 nap.

A fentiek szerint generált mágneses térben a mágneses egyenlítő közel 450 km-re északra van a földrajzi egyenlítőtől, a tér középpontja 0,2 bolygósugárnyival eltolódva mutatkozik a geometriai centrumtól – ezt nehéz a klasszikus dinamó elmélettel magyarázni. A kutatók körében a „vashó” dinamónak is nevezett folyamat a legnépszerűbb, amelynek keretében a Merkúr vasmagja néhány százaléként is tartalmaz, az ebből a vassal alkotott szilárd kristályok kiválása kívül kezdődik meg, a keletkező szemcsék pedig befelé hullnak, és közben felolvadnak. Mindez konvek-

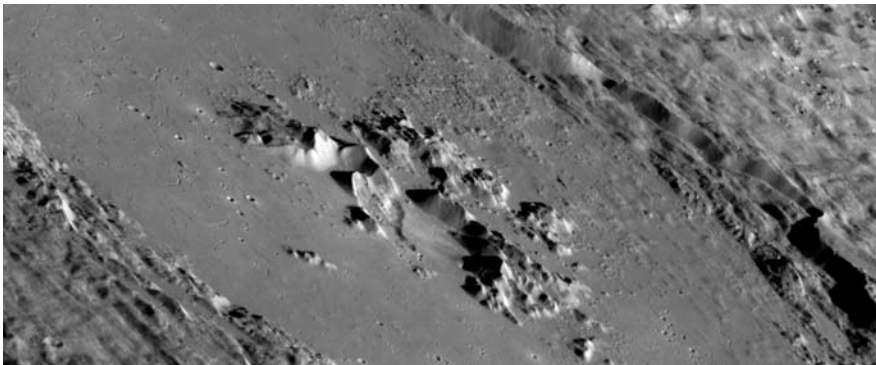


A Messenger-űrszonda becsapódása előtt készült utolsó felvétel, amely kb. 1 km átmérőjű területet mutat

tív áramlatokat generál, ami közreműködhet a dinamóhatás létrehozásában.

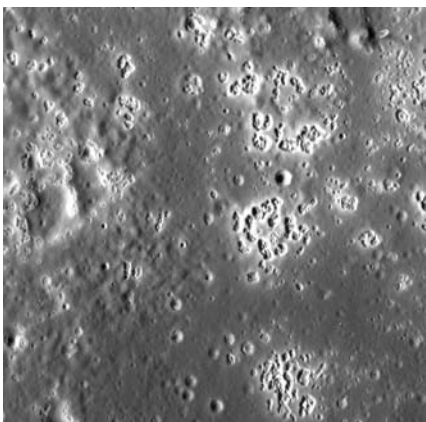
Az így generált mágneses tér szerkezetét tekintve sok szempontból hasonlít a Földéhez, de lényeges eltérések is vannak. Amellett, hogy gyengébb és kisebb a mi bolygónknénál, dinamikusabb, gyorsabban változó. Az erővonalak közötti átszatelődések sokkal gyorsabbak és változatosabb környezetekben történnek itt. A befogott ionok rövidebb időt töltenek a Merkúr magnetoszférájában, továbbá nincsenek a földi van-Allen övekhez hasonló erős sugárzási zónák. A bolygó felszíne pedig fontos szerepet játszik az ionok elnyelésében és kibocsátásban – hiszen a magnetoszféra részecskéi közvetlenül érintkeznek a felszínnel.

A Merkúr ritka légköre exoszféra jellegű, ezért részecskéi nagyon ritkán ütköznek egymásnak és nem klasszikus gázként viselkednek. A megfigyelt Ca forrásai a hajnali egyenlítő környéki vidékek, koncentrációjának változása évszakos jellegű követ – talán a bolygó elnyúlt pályájával és 7 fokos inklinációjával kapcsolatosan változik



Ferde rálátású kép a 116 km átmérőjű Abedin-kráterről. A kráter aljzatát lávák öntötték el, amelyekben repedések keletkeztek a későbbi hűlés hatására. Középen a központi csúcs vonulatai emelkednek ki

a mennyisége, mivel hol sűrűbb, hol ritkább bolygóközi poranyaggal ütközik a Merkúr, ami segíti az anyagot felszínről felszabadulni. A Ca atomokra és ionokra 50 ezer K feletti hőmérséklet jellemző, ami felette van a szökési sebességnek – ez az anyag tehát folyamatosan áramlik ki az úrbe. A Mg-nak hasonló forrása lehet, mint a Ca-nak, részben becsapódásokból származik. A Na általában hűvösebb a fenti két anyagnál, de 1200 K-es átlaghőmérsékletével még így is melegebb a felszínnél – ez az anyag feltehetőleg egyszerűen besugárzás révén szabadul el a felszínről. Az exoszférában ezek mellett H, He, és K volt jellemző.



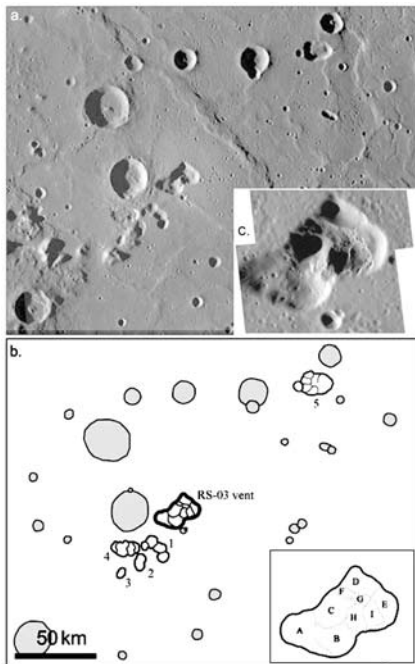
Néhány 100 m átmérőjű, furcsa mélyedések a Zeami-kráter aljzatának nyugati részén

A bolygó felszínének közel harmadát idős kráterközi síkságok alkotják, amelyekről kiderült, hogy a korábban feltételezettnél változatosabb felszínűek, közel egyenesen előfordulnak az égítést egész felszínén. Nem mutatnak egységes szín vagy összetételbeli jellemzőt, és a topográfiával sem korrelálnak: mélyebb és magasabb területeken, lejtők oldalán egyaránt előfordulnak. Becsapódások által erősen átdolgozott vulkáni vidékek lehetnek, főleg az ősi bombázási időszak alatt keletkezettek. Náluk sokkal simábbak a sima síkságok: enyhén hullámzó térszint alkotnak 100–200 km-es távolságon, ezek szintén vulkanikus eredetűek, de főleg mélyedésekben jellemzőek.

A becsapódások hatása nagyszerűen nyomozható a régóta alig aktív égíteten. A nagy medencékhez a Holdon megfigyelthez részben hasonlóan kéregvékonyodás és tömegkoncentrációk (mascon-ok) kapcsolódnak. Az 1550–1640 km átmérőjű Caloris-medence eredeti, tranzienis krátere kb. 730 km átmérőjű és 73 km mély lehetett, akár 220 km mélységig megolvaszthatta részben a kőzetanyagot a területen 3,9 milliárd évvel ezelőtti kialakulásakor. Ez a legfiatalabb nagyméretű medence a bolygón, belsejét néhol 3,5 km vastag vulkáni láva borítja. Területén több vulkáni nyílást és egy lapos pajzsvulkánt azonosítottak. Az egykori lávaelőntés anyaga hűléses zsugorodása során koncentrikus lefutású gyűrődéses redőket hozott létre a terü-

leten. Ugyanakkor tágulásra utaló repedések is vannak, főleg koncentrikusan, a medence középső vidékén. A bolygón jellemző becsapódási sebesség magasabb a gyakran hasonlóknak tekintett Holdhoz viszonyítva, mivel a Merkúr nagyobb tömegű, és közelebb is van a Naphoz. A becsapódásos tördeléstől keletkező regolitréteg ezért vastagabb lehet a holdinál. A kráterek morfológiája alapján Holdunk esetében a terra területeken 5–8 m, a mare vidékeken 2–5 m vastag a regolit felső, képlékenyebb rétege. Ugyanez a Merkúron 20–90 m közötti vastagságú.

A Merkúr felszínének anyaga kémiai szempontból oxigénben szegény (2–4%) és kénben gazdag (6–7%), azaz erősen redukált állapotú. Az északi féltekén két-háromszor nagyobb a Na gyakorisága, mint a déli területeken, a kérdéses anyag feltehetőleg az ott gyakoribb sima síkságok vulkanikus láváiban van jelen ún. alkáli földpát ásványokban, amelyek gyakorisága ott magasabb. A Na emellett mintha a legmelegebb alacsony szélességű vidékeken jellegzetesen alacsonyabb koncentrációt mutatna. A bolygó felszínének Fe tartalma viszonylag kicsi a Merkúr belsejében lévő sok vashoz képest. A napflerek idején felerősödő, felszíni eredetű röntgensugárzás elemzése alapján átlagosan kb. 1,5% a gyakorisága, és ettől leginkább a vulkáni területek térnek el, ahol kénnel alkotott szulfid ásványokban fordulhat elő. A K és Cl területi eloszlása földrajzi szélesség szerint hasonló tendenciát mutat, mindkettő ún. inkompatibilis elem, ezért nehezen épül be a kőzetek kristályrácsába. Magas szélességeken kicsit mintha nagyobb lenne a koncentrációjuk (akárcsak a Na esetében) – talán alacsonyabb szélességeken az erősebben felmelegedő és felszabaduló anyag itt csapódik le. Az elemeloszlás térképezése alapján úgy fest, több nagy, eltérő kemizmusú vidék azonosítható a bolygón, amelyeket terréneknak neveznek (a földi használatban a terrén a geológiai fejlődés során létrejött kiterjedt, közel azonos jellemzőjű kéregrész, egy földi kontinens általában több terrénből áll). A Merkúron legfeltűnőbbek a magas Mg tartalmú terrének, amelyekben alacsony Al, magas S és Ca arány is mutatkozik.



Néhány vulkánikürtő-jelölt környezete az é.sz. 22,3°, k.h. 146,2° térségben (a), szerkezeti rajz (b) és az összetett szerkezeti RS-03 jelű objektum kinagyított képe (c)

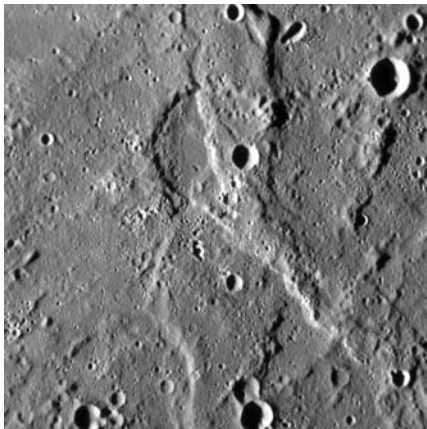
Az azonosított terrének pereme nem követi a sima lávasíkságokét, feltehetőleg azoknál idősebb, korai geokémiai fejlődés eredményeként alakultak ki.

A bolygón sok furcsa mélyedés mutatkozik (angolul hollow). Ezek sekély, szabálytalan alakú, sima fenekű, gyakran világos belsejű és halójú, friss megjelenésű alakzatok. Főként nagyobb becsapódásos kráterek különböző részein (központi csúcs, alját, sáncfal) mutatkoznak. Ott is többnyire sötétebb területekhez kapcsolódnak, ezek talán valamely illóban gazdagabbak. Aprószemcsés anyagból állhatnak, talán valamiféle vulkanikus jellegű kitoréresektől keletkeztek. Egyes színképi megfigyelések alapján kéntartalmú anyag adja a világos színt, de ez egyelőre bizonytalan. Csoportosan fordulnak elő, eddig közel 500 ilyen csoportot azonosítottak. Statisztikai vizsgálatuk még zajlik, de az első eredmények alapján térbeli eloszlásuk a kitettséggel, tehát

a napsugárzás beesésével kapcsolatban mutat összefüggést – talán az erős besugárzástól előálló szublimációtól jöttek létre.

Biztosabb a „hagyományos” kinézetű vulkanikus alakzatok eredete. Ezek lávaömléses és robbanásos alakzatok egyaránt lehetnek. Az utóbbiak a környezetüknél kicsit vörösebb árnyalatú törmelékkel körülvelt vulkáni központok. Közel 200 ilyen robbanásos kitérésnyomot azonosítottak eddig a bolygón, amelyek mérete néhány km-től 100–200 km-ig terjed, alakjuk többnyire szabálytalan, átlagosan 30 km körüli egyszerű mélyedés (eddig egyetlen „klasszikus” kúp alakú vulkáni központot találtak). Többségük kráterekben mutatkozik, de nem kapcsolódik jellegzetesen a lávából álló sima síkságokhoz. Eltérő lepusztultságú és korú kráterekben jellemzőek, ami arra utal, hogy aktivitásuk bolygón tartós volt.

A sima síkságok jellegzetes lávaképződmények, amelyekből az északi féltekén, valamint a Caloris-medencében és környékén mutatkozik a legtöbb. Itt az aktív vulkáni időszak kb. 3,8 milliárd évvel ezelőttig tartott, és átlagosan 0,7–1,8 km vastag lávával boríthatta az északi vidéket,  $10^6$ – $10^7$  km<sup>3</sup> anyagmennyiségben. Az ilyen lávasíkságok a felszín 6–7%-án jellemzőek, a nagy északi lávasíkságok feltehetőleg rövid idő, kb. 100 millió év során keletkeztek. Gyakran nagy becsapódásos kárterek belsejében található-



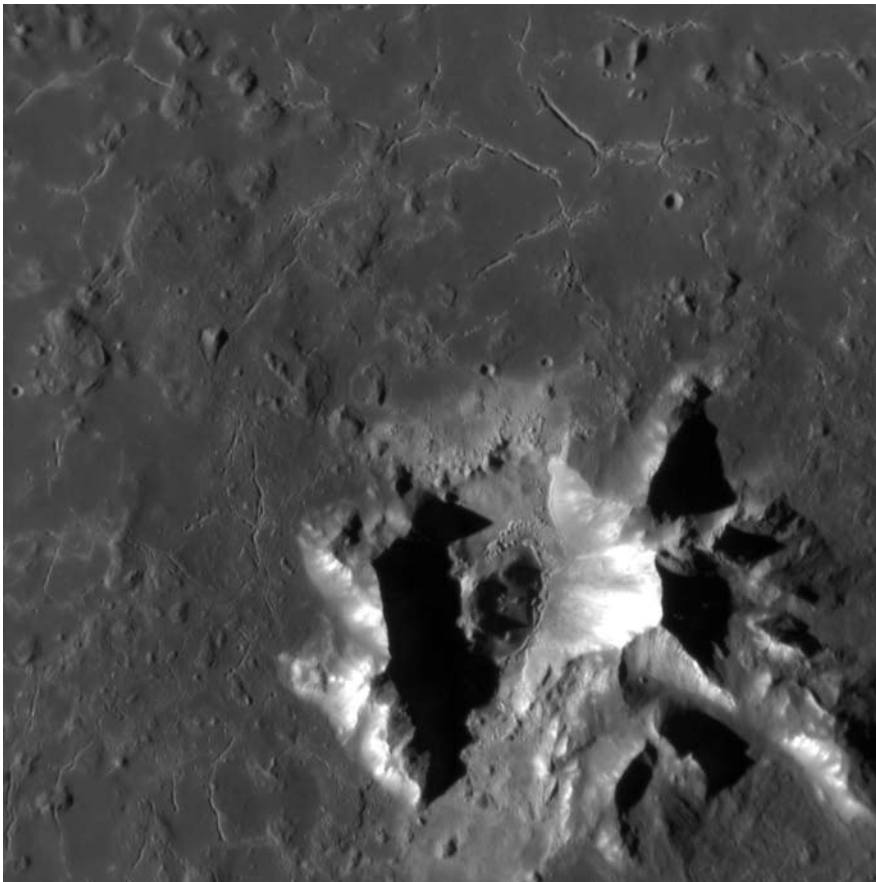
Összenyomódással keletkezett redő a Rembrandt-kráter aljzatán

ak (akárcsak a Holdon), feltehetőleg azért, mert itt tudott a magma legkönnyebben a felszínre emelkedni.

A Merkúr felszíni anyagai bazalthoz és komatiitokhoz (a bazaltnál még primitívebb összetételű vulkáni kőzet) közeli anyagúak, vasban szegények és magnéziumban gazdagok lehetnek. A főleg komatiites és bazaltos vulkáni kőzetek mellett kisebb mennyiségben változatos összetételű anyagok is megjelennek. Ezek között magas SiO<sub>2</sub> tartalmú kőzetek, a földi andezitekhez, sőt dácitokhoz hasonlóak is előfordulhatnak – eszerint geokémiai szempontból a bolygó egyes vidékei a Holdnál és a Marsnál is „fejlettebbnek” mutatkoznak. Mindez azért is érdekes, mert az ilyen vulkáni kőzetek keletkezése a Földön a lemeztektonikához és a víz jelenlétéhez kapcsolódik – előfordulásuk oka a Merkúron egyelőre nem ismert.

A bolygó tektonikus alakzatait főleg két folyamat hozta létre: a globális zsugorodás és a tengelyforgási sebesség változásából eredő lapultság változása. A két folyamat együttesen lehetett jelen, amelyek kölcsönhatása noha a poláris térségben nem hozott létre preferált irányokat a repedéseknél, alacsony szélességen gyakoribbak lettek az észak–déli irányú alakzatok – a tengelyforgás változásából adódó torzulás nyomát a globális zsugorodás elnyomta. A nagy becsapódásos medencék tektonikus mintázata még bonyolultabb, mivel azoknál számít, hogy a belsejüket mikor öntötte el a láva, valamint azt követően milyen deformáció történt a megszilárduló lávában és annak hatására az aljzatban. A nagyfelbontású képeken sok apró, korábban nem ismert és nem is várt feloldódásos redő mutatkozott a felszínen. Ezek eseteként 10 km-nél is rövidebbek voltak, gyakran csoportokban fordulnak elő. Koruk sok esetben akár 50 millió évnél fiatalabb is lehet, ami arra utal, hogy még ma is keletkezhetnek a bolygón.

A földi radaros felfedezés óta sokat vizsgált témakör a poláris kráterekben lévő vízjég. A Messenger a neutron spektrométeres mérései alapján a gyors neutronok arányának csökkenése a sarkvidéki területek felett megerősítette a vízjég jelenlétét. A modellek sze-

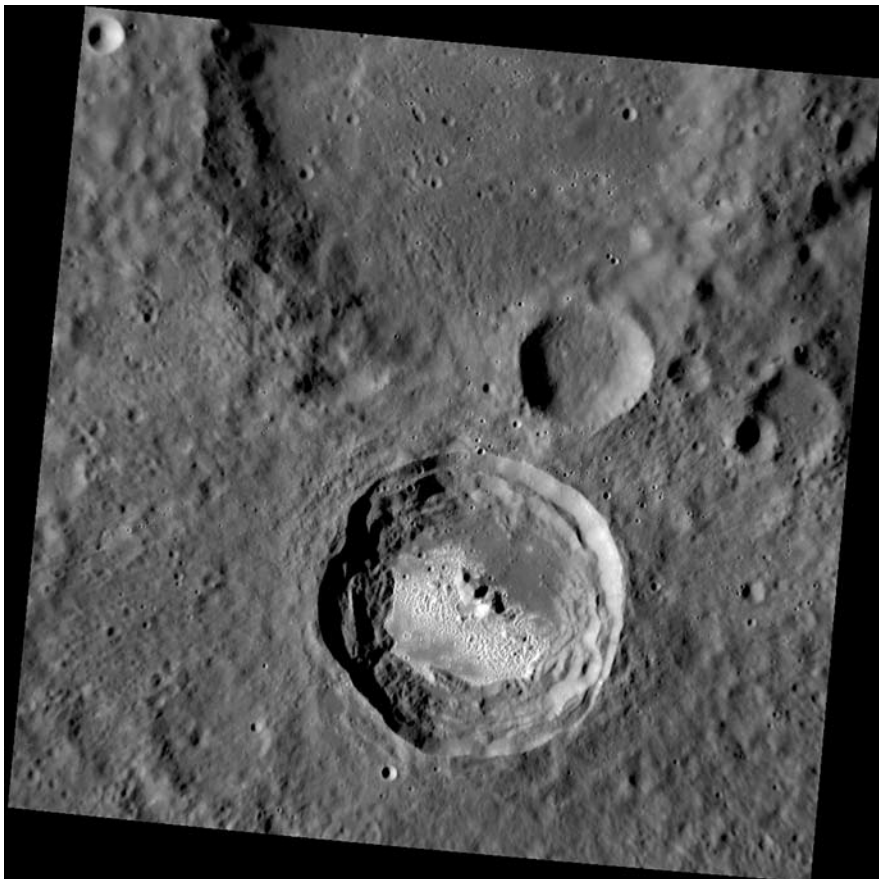


Az 55 km átmérőjű Degas kráter központi csúcsa, amelynek meredek falán omlások nyomai látszanak. A kép többi részén az egykor keletkezett olvadék alkotta síkság hűléses zsugorodásától támadt repedések látszanak

rint legalább 10 cm vastag jégréteg található 10–30 cm vastag felszíni portakaró alatt. Az új eredményeket korábbi földi radaros mérésekkel kombinálva úgy fest, a kérdéses réteg legalább 25%-ban tartalmaz vízjeget. Az egyébként közel állandó sötétségben lévő sarki mély kráterek gyenge sugárzásának mérése (az MLA lézeres magasságmérő 1064 nm hullámhosszú jelei alapján) rámutatott, hogy a pólusok felé néző lejtők erősebb visszaverése egybeesik az erősebb radarjelek helyszínével, amelyek pedig egybeesnek az ideális jég előfordulási területekkel. Miközben ezek az optikailag fényesebb régiók feltehetőleg több

vízjeget tartalmaznak, addig a közelükben mutakozó sötétebb vidékek talán szerves anyagban gazdagok. A sötét réteg talán az elszublimáló jég után visszamaradt szerves anyagot tartalmazhat, és az is elképzelhető, hogy a kozmikus mállasztó hatása sötétítette el ezeket a vidékeket. Sok kifejezetten hideg területen gyakoriak az ilyen nagyon sötét felszínek, amelyeknek viszonylag éles peremük van, és nem tűnnek idős alakzatoknak.

A Merkúr fejlődéstörténetéről sok új ismeret született. A gamma spektrométeres mérésekkel meghatározott Th, K, U gyakoriság alapján a bolygó hőtermelése egykor legalább négy-



A 36 km-es Hopper kráter aljzatán gyakoriak a világos halóval övezett mélyedések

szerese lehetett a jelenleginek, ami közreműködhetett a korai vulkanikus tevékenységben. A Merkúr életének elején jelentős felszín-újra-képződés és átalakulás zajlott, ami a holdi terra vidékekhez képest sok krátert eltörölt a 20–100 km közötti mérettartományban a kráterközi síkságokon. Amikor a Messenger 100 km-nél kisebb magasságban haladt a felszín felett, olyan mágneses anomáliákat észlelt, amelyek a kőzetekbe egykor rögzült ősi térből származtak – a becslések apján kb. 4 milliárd évvel ezelőtt a mainál sokkal intenzívebb mágneses tere volt a bolygónak, ennek maradványait sikerült megfigyelni. Fontos felszíninformáló

tényező volt a globális zsugorodás, amely sokféle alakzatot hozott létre a bolygón, elsősorban a kezdeti időszakban. A korábban becslült 0,8–3 km közöttinél nagyobb, kb. 7 km-nyi volt a zsugorodás mértéke a bolygó sugarát tekintve. A Merkúr még ma is zsugorodik, de a tektonikus szerkezetek többsége korán, kb. 3,5 milliárd évvel ezelőttig létrejött. A legtöbb lávaömléses síkság 3,9–3,7 milliárd évvel ezelőtt keletkezhetett, akárcsak a robbanásos kitörések alakzatainak többsége, de kisebb mértékben még 1 milliárd éve is lehetett vulkáni aktivitás a bolygón.

*Kereszturi Ákos*