Az árapály-súrlódás szerepe a Hold termikus történetében

BODRI BERTALAN

Az előadás röviden ismertet a Hold termikus történetének vizsgálatában az új holdfizikai kutatási eredmények interpretálása során előállt néhány problémát. Valószínű, hogy korai magmatikus differenciálódáshoz vezető termikus történeti variáns leginkább a Hold kezdeti közepes hőmérsékletének jelentős megnövelésével alakítható ki. Amint a számítások megmutatták, a Hold történetének korai szakaszában ilyen felmelegedés forrásaként az égitest belsejében dagálysúrlódás miatt hővé átalakuló energiamennyiség szolgálhatott.

В настоящей работе дается краткое описание проблем, связанных с интерпретацией результатов расчетов по термической истории Луны. Делается вывод о том, что одним из наиболее вероятных путей изменения термической истории Луны является значительное повышение ее средней начальной температуры. Как показали расчеты, источником энергии для повышения средней начальной температуры могла послужить приливная диссипация энергии системы Земля – Луна, на ранней стадии эволюции этой системы.

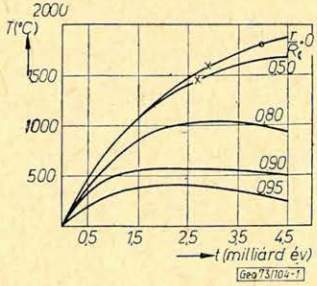
Es werden einige Probleme erörtert, welche sich im Laufe einer Interpretation der neueren Ergebnisse der mondphysikalischen Untersuchungen ergaben. Es ist warscheinlich, dass die geschichtliche Variante, die zu einer frühen magmatischen Differenzialisierung führt, kann durch eine bedeutende Erhöhung der anfänglichen Mitteltemperatur des Mondes herangeführt werden. Wie die Berechnungen zeigen, als Quelle einer solchen Temperaturhöhung in einer so frühen Periode der Entwicklungsgeschichte des Mondes könnte die infolge der im Inneren des Himmelskörpers einsetzenden Flutwellenreibung entstehende Eneriemenge gedient haben.

A holdfizikai kutatásoknak egyik legfontosabb tárgyköre a holdanyag jelenlegi és régebbi időpontokra vonatkozó hőmérsékletének, hőállapotának, vagyis az égitest termikus történetének vizsgálata. A Hold belsejének hőmérséklet-eloszlása valamely időpontban meghatározható a hővezetés differenciálegyenletének megoldásával, az egyenletben szereplő paraméterek meghatározott értékeire, adott kezdeti és határfeltételek esetén. A legutóbbi időkig a Hold hőállapotának vizsgálatában komoly nehézséget jelentett a hővezetési elmélet módszereinek alkalmazhatósága, mivel hiányoztak a Hold felszíni hőáramának megbízható mérési eredményei és hasonlóképpen nem rendelkeztünk a holdkőzetek fizikai tulajdonságait jellemző mérési adatokkal, amelyek ismerete nélkül alig van mód a Hold mélyében végbemenő fázisátmenetekkel és kémiai folyamatokkal együttjáró hőeffektusok becslésére. Jelenleg sincs a Hold kialakulásáról egységesen elfogadott kozmogóniai elmélet, amely egyértelműen meghatározná a hőtörténetben fontos szerepet játszó kezdeti feltételeket.

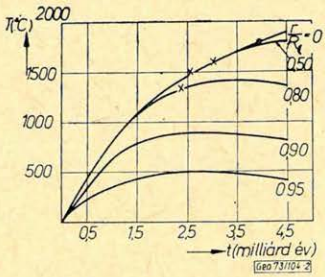
A fenti okok miatt H. C. Urey (1957, 1959, 1960, 1962), G. J. MacDonald (1961, 1962), B. J. Levin (1963), P. E. Fricker (1967), J. Iriyama, Y. Shimazu (1967) és mások hőtörténeti számításaiban a hővezetés differenciálegyenletében szereplő paraméterek értékei, és így természetesen a számítások eredményei is egymástól ismert mértékben eltérnek.

Az *1. és 2. ábrán* a H. C. Urey által (1962) számított hőmérséklet-eloszlás látható kezdetben „*hideg*" Hold esetén. Az első variánsban az χ hődiffuzivitás értéke *0,01*, a második esetén $\chi = 0{,}005$ *CGS*. Az ábrák görbéin a részleges olvadás kezdetét keresztek, a teljes olvadáshoz szükséges hőmérsékletet körök

jelzik, továbbá R_0 – a Hold sugara és r – a Hold adott pontjának a középponttól mért távolsága. Az ábrákról leolvasható, hogy a hődiffuzivitás mindkét értékénél a részleges olvadás különböző mélységben, de körülbelül egyidőben, a Hold kialakulásától eltelt *2,5 milliárd* év múlva kezdődik. Az említett szerzők számos vizsgálatának eredményei az egymás közötti kisebb-nagyobb eltérések ellenére megegyeztek abban, hogy a holdanyag részleges olvadása és ezzel együtt a magmatikus differenciálódás az égitest kialakulása után *2,0–2,5 milliárd* év elteltével kezdődött meg. Mivel a Hold kora *4,5–4,6 milliárd* év és a kőzetek kialakulása a magmatikus differenciálódással kezdődik, általánosan elfogadottá vált az a feltételezés, hogy a holdkőzetek kora legfeljebb *2,5 milliárd* év.



1. ábra – puc. – Abb.



2. ábra – puc. – Abb.

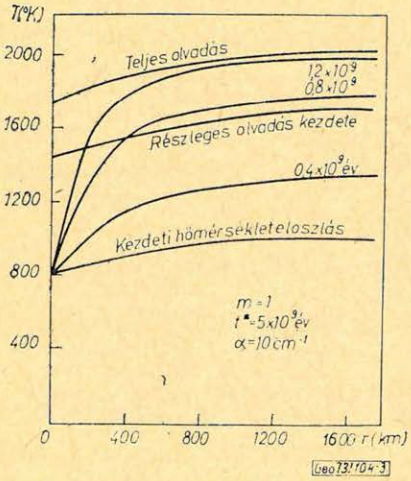
Az utóbbi években lehetőség nyílt a hővezetési egyenletben szereplő paraméterek egy részének közvetlen mérésére, s e mérések olyan meglepő eredményeket adtak, hogy szükségessé vált a régebbi hőtörténeti számítások felülvizsgálása.

Az Apollo–*15* Hold-expedíció mérései tanalizálva M. E. Langseth et al. (1971) a Hold felszíni hőáramára *33 erg/cm²·s* értéket kaptak, ami kb. *25%*-kal több, mint a régebben elfogadott érték. D. A. Papanastassiou, G. I. Wasserburg (1970), és A. L. Albee et al. (1970) az Apollo–*11* és Apollo–*12* bazalt- és talaj-mintáinak kormeghatározása során megállapították, hogy azok kora *1,5–2 milliárd* évvel több, mint az a korábbi hőtörténeti variánsok alapján várható volt.

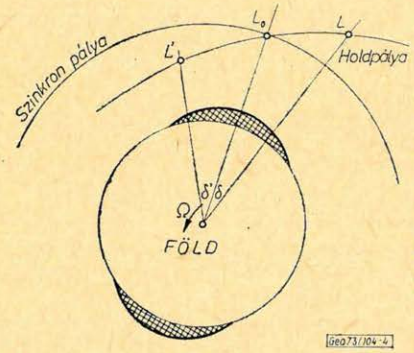
A termikus történet új vizsgálataiban [Sz. V. Majeva (1970), T. C. Hanks, D. L. Anderson (1972), Toksöz et al. (1972)] a szerzők lehetőség szerint maximálisan figyelembe veszik a holdbelsőben végbemenő bonyolult folyamatokat (pl. a molekuláris hővezetés hőmérséklet- és nyomásfüggése, sugárzási hővezetés, konvekciós hővezetés, radioaktív elemeknek a felszín felé történő feláramlása stb.), de az alkalmazott kezdeti és határfeltételek esetén így sem sikerült korai *(4,0–3,7 milliárd* évvel ezelőtt kezdődő) differenciálódáshoz vezető termikus történeti modelt kialakítani.

Kozmogóniai szempontok és különböző holdfizikai vizsgálatok eredményeinek figyelembevétele arra a következtetésre vezet, hogy a Hold termikus történetéről alkotott elképzelésünk alapvető megváltoztatásának legvalószínűbb módja az égitest kezdeti hőmérsékletének jelentős megnövelése. Majeva (1964) szerint a Hold kezdeti közepes hőmérsékletét *500 °K*-kal megemelve a holdbelső részleges olvadása az égitest kialakulása után *0,8–1,2 milliárd* év múlva elkezdődik *(3. ábra)*. Ilyen felmelegedés forrásaként egy eddig még figyelembe nem vett mechanizmus, a dagálysúrlódás következtében hővé át-

alakuló energia szolgálhatott. A Hold pályaelemeinek dagálysúrlódás által okozott evolúciójára és anyagának ezzel együttjáró felmelegedésére végzett számításaink az előbbi feltevést megerősíteni látszanak.



3. ábra – puc. – Abb.



4. ábra – puc. – Abb.

Ismeretes, hogy a Hold vonzásából a dódó árapálykeltő erő a rugalmas Földön alakváltozást, tömegátrendeződést hoz létre, s ha e deformációk súrló-dással járnak, akkor a Föld forgását és a Hold orbitális mozgását jellemzőparaméterek értékeiben évszázados változások lépnek fel. A súrlódás miatt fáziskésésben levő árapályhullám a Föld adott pontjában akkor maximális, amikor a forgó Föld azt már kirántotta a Föld – Hold középpontokat összekötő egyenesből, vagyis a Hold zenittávolsága már nem nulla, hanem valamely δ szögérték *(4. ábra)*. Megmutatható, hogy e jelenség a Föld – Hold rendszerben impulzusmomentum-átrendeződéshez vezet, nevezetesen a Föld rotációs impulzusnyomaték ának egy része átáramlik a Hold orbitális nyomatékába, ami a Föld forgási sebességének évszázados lassulását és a Holdnak a Földtől való lassú eltávolodását okozza. A forgó Földön a súrlódás miatt a holdpálya ellipticitása által okozott hónapos periódusú földdagály is némi fáziskéséssel jelentkezik, s e radiális irányú deformációval együtt járó súrlódás disszipációhoz, a Föld – Hold rendszer mechanikai energiája egy részének elvesztéséhez vezet (G. J. MacDonald, 1964). Mivel a Hold forgási szögsebessége megegyezik a pályamenti keringés szögsebességének középértékével, az excentrikus pályán mozgó Hold a földi árpályakeltő erő hatására tisztán radiális irányú pulzációt végez, a súrlódás okozta energiadisszipáció természetesen itt is jelentkezik.

A Hold mozgását perturbáló erő komponenseit megkaphatjuk a Földön és Holdon az árapálykeltő erők által a súrlódás miatt fáziskéséssel létrehozott deformációk külső potenciáljának megfelelő irányban történő deriválásával. Az egyik erőkomponens, R legyen az egységnyi tömegre a Föld – Hold középpontokat összekötő egyenes mentén ható erő, amelynek pozitív iránya megegyezik a Hold rádiuszvektora növekedésének irányával. A Holdban dagálysúrlódás során hővé átalakuló energiamennyiség számításához az R erőkomponens által dt időintervallum alatt végzett munka ismerete szükséges, amely munka átlagértékének közelítő kifejezése:

$$\left.\frac{\overline{dE}}{dt}\right|_R = -\frac{3e^2 A \mu^{1/2}}{2a^{15/2}} [(3\cos^2\delta - 1) + D] \sin\delta \qquad (1)$$

lesz (G. J. MacDonald), ahol

$$A = \frac{3}{2} Gm R_{\oplus}^5 k_2 ,$$

$$\mu = n^2 a^3 ,$$

$$D = 2 \frac{k_{2)}}{k_2} \left(\frac{M}{m}\right)^2 \left(\frac{R_)}{R_{\oplus}}\right)^5 ,$$

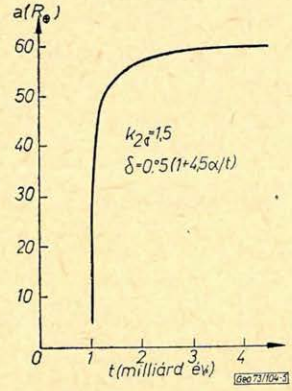
δ — az árapálydeformáció fáziskésési szöge a Holdon, $K_{2)}$ — a Hold rugalmas tulajdonságait jellemző Love-féle szám. A fenti kifejezésekben szereplő többi állandó értelmezése az *1. táblázatban* adott. Az (1) formula alapján látható, hogy valamely t időpillanattól kezdődő dt idő alatt végzett munka kiszámításához szükséges a holdpálya fél nagytengelye és az excentricitás adott időponthoz tartozó értékeinek ismerete. A dagálysúrlódás a Hold pályaelemeit perturbálja, ezért a fejlődéstörténet folyamán szükséges az (1) kifejezésben szereplő két pályaelem időbeli változásának vizsgálata. Ez a vizsgálat elvégezhető a pályaelemek változásait kifejező Gauss-féle differenciálegyenletek Runge—Kutta módszerrel történő numerikus integrálásával.

1. táblázat — таблица — Tabelle

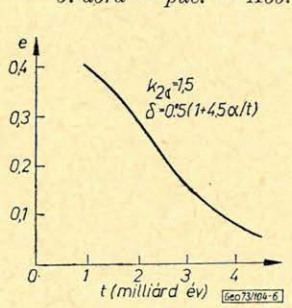
A számításokban előforduló állandók	Jelölések	CGS	Értékek Planetáris egységek
Gravitációs állandó	G	$6{,}67 \cdot 10^{-8}$	1
Hold tömege	m	$7{,}35 \cdot 10^{25}$	0,0123
Föld tömege	M	$5{,}977 \cdot 10^{27}$	1
Hold sugara	$R_)$	$1{,}738 \cdot 10^{8}$	0,2725
Föld sugara	$R_{\oplus}$	$6{,}378 \cdot 10^{8}$	1
Földre vonatkozó Love-féle szám	k_2	0,3	0,3
Földnek a forgástengelyre vonatkozó tehetetlenségi nyomatéka	I	$0{,}487 \cdot 10^{10}$	0,3306
Holdpálya fél nagytengelye	a	$3{,}84 \cdot 10^{10}$	60,23
Holdpálya excentricitás	e	0,0549	0,0549
Hold orbitális szögsebessége	n	$2{,}67 \cdot 10^{-6}$	$4{,}19 \cdot 10^{-4}$
Föld rotációs szögsebessége	Ω	$7{,}292 \cdot 10^{-5}$	$5{,}640 \cdot 10^{-2}$
Holdanyag fajhője	c	10^{7}	$1{,}61 \cdot 10^{-5}$

A Hold említett pályaelemeinek időbeli változását és az energiadisszipáció mértékét különböző fizikai holdmodellek és a holddagály fáziskésési szögének különböző értékei esetén vizsgáltuk. A számításokban előforduló állandók CGS és planetáris egységekben mért értékeit az *1. táblázat* mutatja. A számítás befejezésének időpontját több programutasítással adtuk meg; a számítás leállt, ha a pályaelem-evolúció során a Hold körpályára tért át, mivel körpályán mozgó holdnál nincs energiadisszipáció; ha az excentricitás értéke erősen megnő (1,0 felé közeledik), mivel a vizsgálat módszere csak elliptikus pályatípusra alkalmazható, és ha a számítás során az evolúció a nulla időponthoz elérkezett, mert az általunk elfogadott kozmogóniai hipotézis szerint a Hold kora *4,5 milliárd* év körül lehet. A számításokban a Hold korának megfelelő *4,5 milliárd* évtől, mint jelen időponttól visszafelé kiindulva, negatív időléptéket alkalmaztunk.

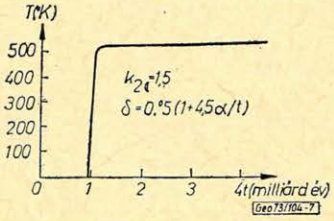
Számításunk eredménye szerint egészében merev Hold esetén (kompreszsziómodulus $K = 7{,}38 \cdot 10^{11}$ dyn/cm^2, $k_{2)} = 0{,}02$) az energiadisszipáció mértéke jelenleg a Holdban 10^{16} erg/s, $3/4$ $R_{)}$-ig kiterjedő folyékony magot és merev kérget feltételezve ($k_{2)} = 0{,}1381$) jelenleg $\overline{\left(\frac{dE}{dt}\right)} \approx 0{,}6 \cdot 10^{17}$ erg/s. A múltban az energiadisszipáció értéke jelentősen nagyobb lehetett, pl. az *5–7. ábrákon* bemutatott variáns esetében a fejlődéstörténet első 10^8 éve alatt $\overline{\left(\frac{dE}{dt}\right)} \approx 10^{20}$ erg/s.



5. ábra – puc. – Abb.



6. ábra – puc. – Abb.



7. ábra – puc. – Abb.

Vizsgálatunkat időben változó fáziskésési szögek esetében is elvégeztük. A holddagály fáziskésési szögének időbeli változása egyelőre ismeretlen, mindenesetre ha a Hold fejlődéstörténetének korai szakaszában legalább részlegesen olvadt állapotban volt (amire a holdbazaltok magas kora utal), akkor valószínű, hogy δ értéke a múltba előrehaladva növekedett. Így a fáziskésési szög időbeli változását formálisan választottuk meg, feltételeztük, hogy δ ajelenlegi $1{,}0°$ értékből kiindulva egyenletesen növekszik $2{,}16°$ végső értékig. A pályaelemek időbeli változását és a Hold közepes felmelegedését az említett variáns esetében az *5–7. ábrák* mutatják. Az *5. ábrán* látható, hogy a fejlődéstörténet kezdetén, kb. 10^8 év alatt a dagálysúrlódás a holdbelső közepes hőmérsékletét kb. 500 °K-kal emeli meg.

Vizsgálatunkból kitűnik, hogy a holddagály fáziskésési szögének viszonylag kis értékei mellett is ($\delta < 2°$) különböző holdmodellek esetén a dagály súrlódás során hővé átalakuló energiamennyiség elegendő ahhoz, hogy jelentősen megváltoztassa a Hold kezdeti hőmérsékletét és ezzel együtt termikus történetét. Kozmogóniai okok miatt némileg negatív eredményünk az, hogy a dagálysúrlódás energiaforrásként csak a múltban nem regulátis pályatípusok esetén jöhet számításba. A fenti ellentmon dás valószínűleg elkerülhető, ha a fizikai valóságot jobban megközelítve, a dagálysúrlódás vizsgálatában időben változó szögeket választunk.

IRODALOM

Albee, A. L. et al.: (1970), Mineralogic and isotopic investigations on lunar rock 12013, Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 9.

Fricker, P. E.: (1967), On the thermal history of the Moon, JGR. Vol. 72. No. 10.

Hanks, T. G., Anderson, D. L.: (1972), Origin, evolution, and present thermal state of the Moon, Phys. Earth Planet. Int. Vol. 5.

Iriyama, J. Shimazu. Y.: (1967), Internal structure of the Moon in the light of her thermal history, Icarus, Vol. 6. No. 3.
Langseth et al.: (1971), The Apollo – 15 lunar heat flow measurement, Paper, presented at the Lunar Sci. Inst. Conf. on Lunar Geophysics, Houston.
Levin, B. J.: (1963), O termicseszkoj isztorii Luni, „Novoe o Lune" izd. AN. SZSZSZR.
MacDonald, G. J.: (1961), The interior of the Moon, Science, Vol. 133.
MacDonald, G. J.: (1962), The Moon and its interior, Astronautics, Vol. 7.
MacDonald, G. J.: (1964), Tidal friction, Revs. Geophys, Vol. 2. No. 3.
Majeva, S. V.: (1964), Nekotorie raszcsoti termicseszkoj isztorii Marsza i Luni, Dokl. AN. SZSZSZR, tom 159, vüp 2.
Majeva, S. V.: (1971), O termicseszkoj isztorii Luni, Izv. AN. SZSZSZR, Fizika Zemli, No. 3.
Papanastassiou, D. A. Wasserburg, G. J.: (1970), Rb – Sr ages from the Ocean of Storms, Earth Planet. Sci. Letters, Vol. 8.
Toksöz, M. N. et al.: (1972), The Moon, 4, 190.
Urey, H. C.: (1957), In „Physics and Chemistry of the Earth" No. 2.
Urey, H. C.: (1960), The origin and the nature of the Moon, Endeavour, Vol. 19. No. 87.
Urey, H. C.: (1962), Origin and history of the Moon, Ed. Z. Kopal, Acad. Press.

MAGYAR GEOFIZIKA XIV. ÉVF. 5 – 6. SZÁM

Lapszemle

Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat, 106. évf. 4. sz. 1973. április

Vitális György: Bányaföldtani szolgálat a cement- és mésziparban, 267 – 272. old.

A tanulmány ismerteti a hazai cement- és mészipar nyersanyagbányászata területén megvalósított bányaföldtani szolgálat feladatát, célkitűzéseit.

A szóban forgó területen a Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet kezdeményezésére már az 1969. évtől megindított szolgálat keretében végzett feladatokat 12 pontban foglalja össze a cikk: ezek közül a 6. pont így szól: (a Bányaföldtani szolgálat) „Javaslatot tesz részletes geofizikai mérésekre".

Példaképpen a tatabányai mészkőbányában létesített bányaföldtani szolgálat kerül bemutatásra.

Hidrológiai Közlöny 53. évf. 4. szám, 1973. április

Urbancsek János: Magyarország rétegvíztározói, 180 – 186. old.

Földtani Közlöny 102 kötet, 3 – 4. szám. 1972.

Stegena Lajos: Lemeztektonika, Tethys és a Magyar-medence, 280 – 300. old.

T. G