

AMIRŐL A HOLD MESÉL

A holdrengések természete

2018. május 5-én indult útjára a NASA InSight Mars felfedezőútja és tervek szerint 2 szeizmométert raknak le a Mars felszínére. A szonda majd félmillió kilométer megtétele után sikeresen célba is ért tavaly november 26-án. Annak idején az Apollo programok során 1969 és 1972 között 6 szeizmométert telepítettek a Holdra, és eredetileg a fő cél a meteor becsapódások észlelése lett volna. A műszerek 1977-ig folyamatosan küldték a jeleket a Földre, és meglepetésre közel 12 500 holdrengést észleltek! A természetes eredetű holdrengések sok tekintetben lényegesen eltérnek a földrengésektől.

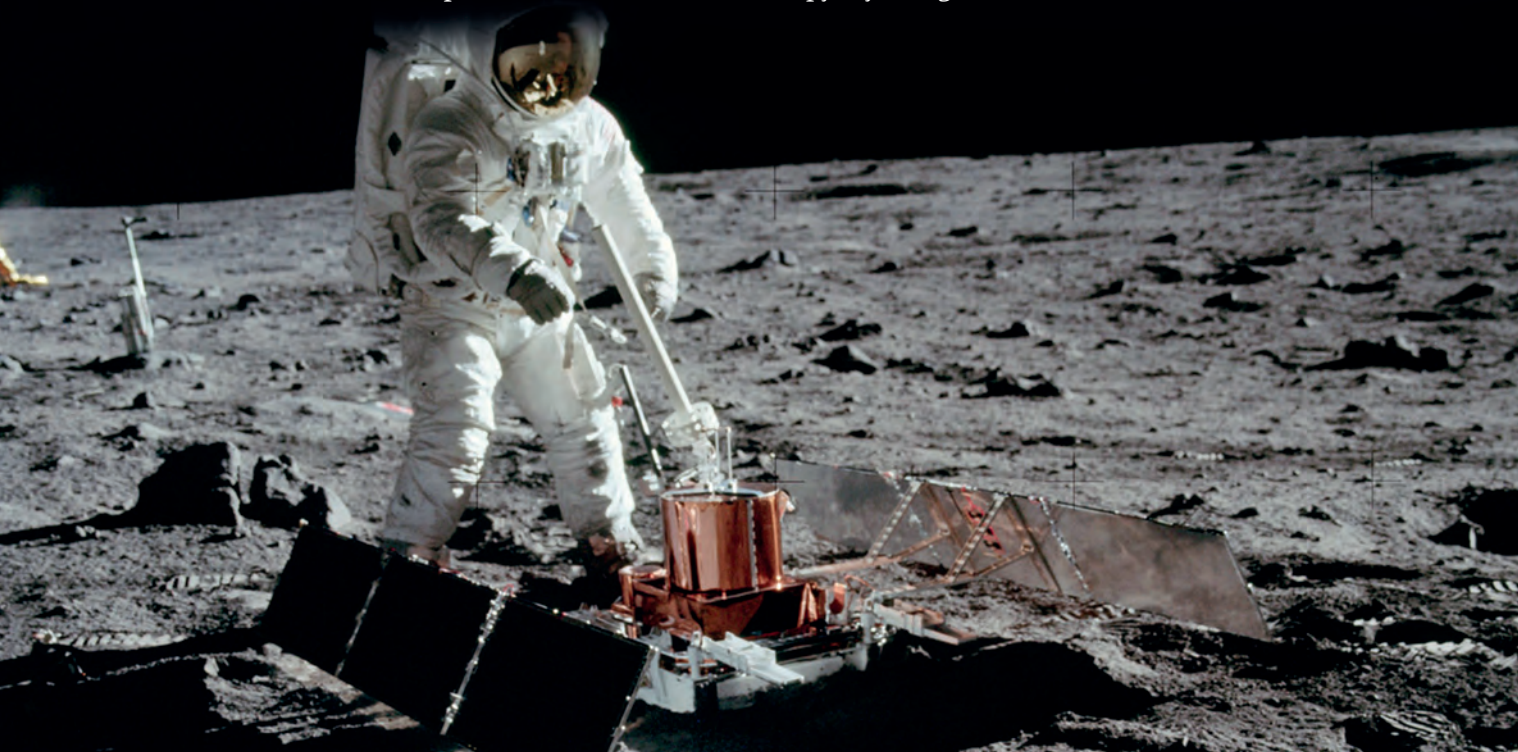
Az Apolló programok során folyamatosan bővítették a Hold felszínére elhelyezett műszereket és 1969-től egészen 1977-ig összesen nyolc éven keresztül folyamatosan működtek (egyesek csak rövidebb ideig). A legtöbb adatot az Apolló-12, -14, -15 és -16 szeizmométereinek adták. Három mérőállomást (ALSEP - Apollo Lunar Surface Experimental Package, Apollo Holdfelszíni Műszer-csomag) egy egyenlő oldalú háromszög csúcsaiban raktak le a Holdon, aminek középpontja szinte pont a Földdel szemben helyezkedett el, és egy negyediket az egyik csúcsához közel (1-2. ábra).

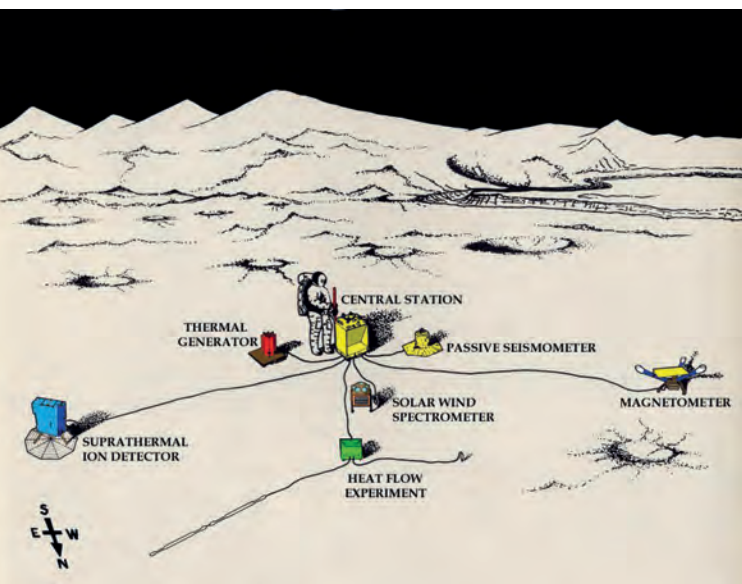
A szeizmológiai állomások 2 fő részből álltak: szenzorból és egy elkülönített elektronikus részből, ami a központi kommunikációs állomáshoz kapcsolódott. A szenzor 3 hosszú periódusú (LP - long period) szeizmométerből állt (15 másodperces rezonancia periódussal), függőleges Z és két horizontális X és Y komponensekkel. Az LPX a Kelet-Nyugat irányú, az LPY az Észak-Dél irányú és LPZ a függőleges komponens jelöli. E három egymásra merőleges érzékelő segítségével lehet a beérkező rengéshullám irányát meghatározni. Egy rövid periódusú (SP - short period) egység is volt a műszerek között (1 másodperces rezonancia periódussal) ami a vertikális mozgást érzékelte. A szeizmométereket 15 különböző paranccsal működtették.

Ezek a szintező motorok irányát és sebességét, az erősítést és a kalibrálást irányították. A Hold rendkívül nyugodt hely, maximális érzékenységgel tudtak az állomások működni. Minden szeizmométer a 0,3 nm-nél kisebb holdmozgást már észlelhette [1].

A Hold, akár egy hangvilla!

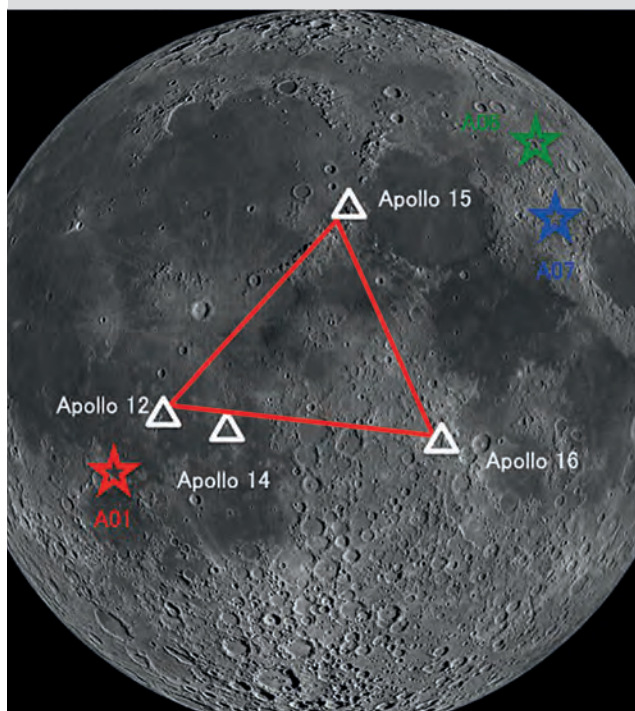
A Hold úgy viselkedik, mint egy hangvilla vagy harang. Ha „megkonganak” egy meteor becsapódás vagy egy nagy jel, akkor a keletkezett rengéshullámok nagyon lassan, több óra alatt csillapodnak csak le. Egy hasonló esemény a földön csak néhány percig tartó földrengést okozna (3. ábra). A szeizmikus hullámok ilyen rendkívül kis csillapodását az erősen töredezett legfelső réteg alatt található nagy keménységű holdkőzet okozhatja, mivel azokból hiányoznak a folyadékok, gázok, ráadásul nagyon merev és hideg is egyúttal (akár egy vasdarab). A másik időnként felröppenő magyarázatot, miszerint üreges a Hold, nem igazolják a holdrengések. Ahogy a Föld esetében is, úgy a Hold belső felépítését is nagyrészt a holdrengések segítették felderíteni. Ha egy rengés legalább három állomáson megfigyelhető, akkor a helyét és kipattanási idejét a beérkező hullámok alapján jól meg lehet határozni. Minél messzebb van a



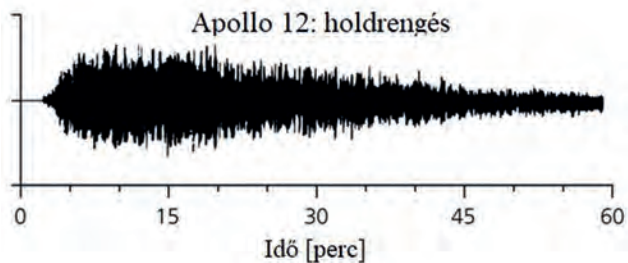
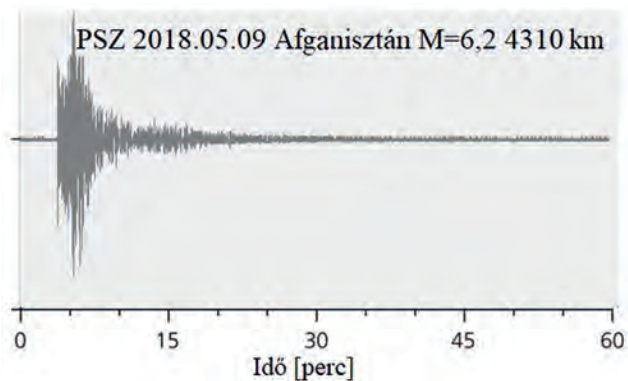


1. ábra. A különböző Apollo küldetések során változtak az ALSEP egységei. Az Apollo-15 műszerei a következők voltak: központi egység, termoelektromos generátor, hőáram mérő, magnetométer, graviméter, passzív rengésmérő, szupratermális iondetektor és napszél spektrométer.
(Forrás: Hamish Lindsay)

2. ábra. A Holdra kihelyezett legtöbb mérési eredményt adó szeizmométerek elhelyezkedése. A piros vonallal összekötött állomások kb. 1100 km-re, míg az Apollo-12 és az Apollo-14 egységei 181 km-re voltak egymástól. A csillaggal jelzett helyek az A1, A7 és A8 jelű holdrengések fészkei. Összesen kb. 300 fészket azonosítottak, az A1 a legaktívabb.
(Forrás: NASA, Kawamura)



fészek az állomástól, annál mélyebben található kőzeteken áthatolva jut el a rengéshullám a szeizmométerig, azaz annál mélyebb és távolabbi rétegekről kapunk ismereteket. A holdrengéseknél is a szeizmogramból számolt epicentrum függ a feltételezett holdi kőzetek anyagától, hőmérsékletétől, a nyomásviszonyaitól, valamint az eltérő tulajdonságú kőzetek határfelületeinek elhelyezkedésétől. A Holdon kilenc robbantást is végeztek, ami az égitest sekélyszerkezetét segítette megismerni általa, hogy ekkor pontosan ismert volt a robbantás helye, ereje és időpontja.

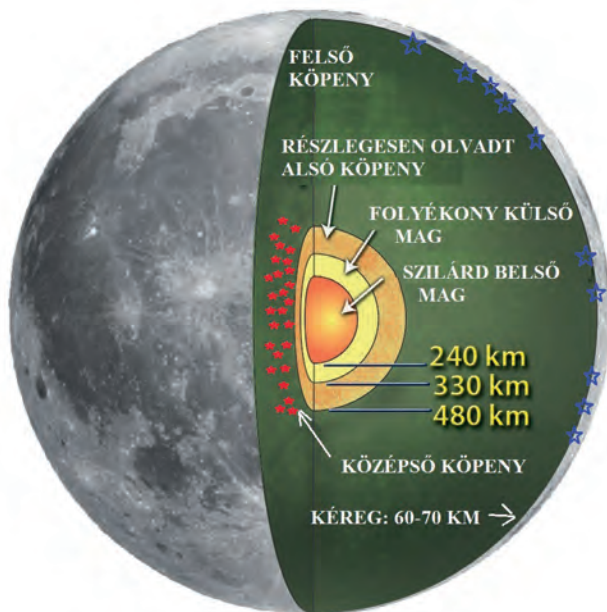


3. ábra. A Mátra második legmagasabb csúcsán levő piszkés-tetői (PSZ) szeizmológiai állomáson rögzített afganisztáni, a Richter skálán 6,2 magnitúdós földrengés, és egy, az Apollo-12 állomáson rögzített holdrengés szeizmogramja.

A természetes holdrengések négy csoportja

A szeizmométerek adatait a NASA mágnesszalagokra rögzítette, a digitalizálásuk és feldolgozásuk Yoshio Nakamura „Moonquake man” professzor vezetésével 1980-ig tartott. Az eredeti szeizmogramok mikrofilm másolatai, illetve a feldolgozott katalógus kikérhető az amerikai Nemzeti Űrtudományi Adatközponttól [2]. Az Apollo program során megfigyelt szeizmikus események alapján a természetes holdrengések négy fő csoportja különböztethető meg a mesterségesen előidézett becsapódások és robbantások mellett.

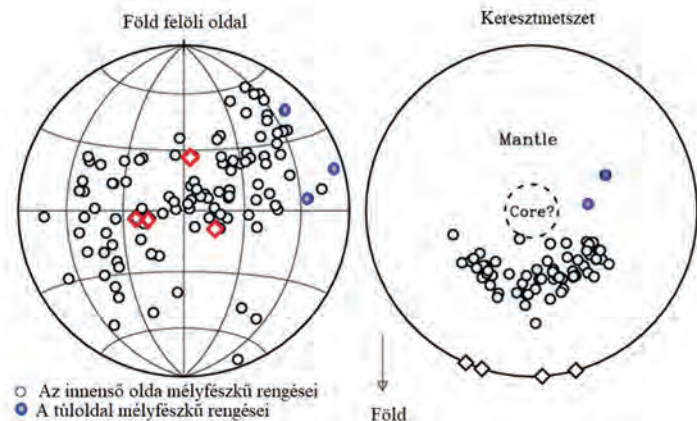
A mélyfészktű holdrendegések képviselik a leggyakoribb holdrendegés típusát, amelyek a földi 2-3 magnitúdós erősségű földrendegésnek felelnek meg. Kipattanási mélységük körülbelül 600-1000 kilométer, ami a Hold középső köpenyére esik. Ezek a mélyfészktű rendegések erősen korrelálnak az árapályerőkkel, és nagyjából 300 jól elkülöníthető fészektől származnak, jelölésük A1, A2,... Az A1 ezek közül a legaktívabb. A fészkek csak néhány kilométer kiterjedésűek, és főleg a Hold Föld felőli oldalára esnek rendszer nélkül szétszóródva. Összesen 7245 mélyfészktű holdrendegést azonosítottak. Havi és félhavi periodicitásuk arra utal, hogy az árapályerőkkel kapcsolatos a kipattanási mechanizmusuk. Abban a mélységben pattannak ki, ahol maximálisak az árapály feszültségek (4. ábra).



4. ábra. A sekély- és mélyfészktű holdrendegések elhelyezkedése (kék és piros csillagok). A holdköpeny több mint 1200 km vastag, arányaiban majdnem kétszer olyan vastag, mint a Földé. A Holdnak kb. 480 km átmérőjű kis magja van. Olvadt állapot csak a holdköpeny alsó részében és a mag külső részében áll fenn. A köpeny felső részének szilárdsága miatt a holdkéreg nem mutat tektonikus tulajdonságokat, lényegében egy tömbben áll az egész. A Hold kérgé kb. 60-70 km, ami a földi kéreg átlagvastagságának háromszorosa (arányaiban pedig tizenháromszorosa).

Az ugyanabból a fészektől származó holdrendegések szinte teljesen azonos hullámformát mutatnak. Ez arra utal, hogy a rengéshullámok egy kis kiterjedésű fészektől erednek, hiszen az adott állomásig ugyanazt a sugárutat teszik meg a rengéshullámok. A mélyfészktű holdrendegéseket ezért vizuálisan a hullámformák

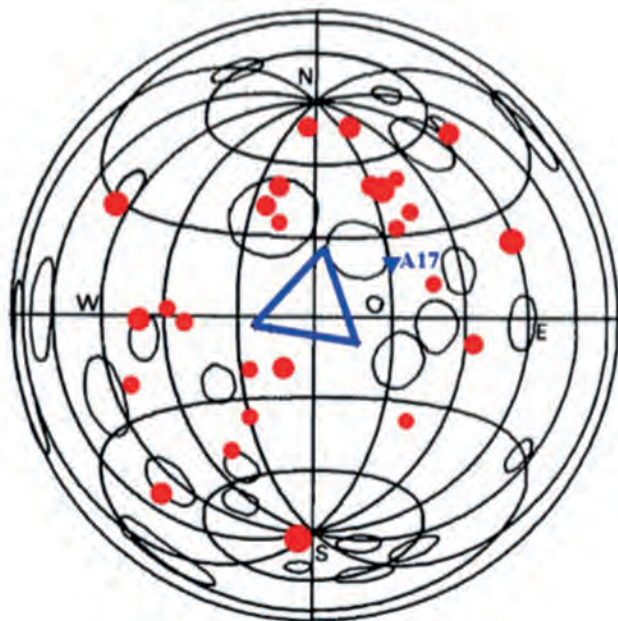
illesztése segítségével azonosították. E korrelációs módszer általában addig működik, amíg egyértelműen elkülöníthető a nyírási S-hullám beérkezése a korábban beérkező P-hullámtól (primer hullám). Azonban e módszer nem működik a legtöbb túloldali mélyfészktű holdrendegés esetében, mert a nyíró hullám nem látszik, ezért szinte lehetetlen vizuálisan azonosítani őket. A hullámformák korrelációját persze minden rendegésre el lehet végezni, de ez túl sok volt az 1970-es években rendelkezésre álló számítógépek képességeinek. Az Apollo programok során született szeizmikus események katalógusában felsorolt események között több mint 9000 epicentrum nélküli esemény volt [3]. Ezek helyének a meghatározása céljából az elmúlt években nagyteljesítményű számítógépekkel keresztkorrelációt végeztek minden lehetséges eseménypáron, ami rendkívül sikeres volt, és az epicentrummal bíró mély holdrendegések számát 1360-ról 7245-re, több mint az ötszörösre növelték, és mintegy 250 új fészket fedeztek fel [4]. A következő lépés az újonnan azonosított fészkek



5. ábra. A mélyfészktű holdrendegések eloszlása a Holdon (Forrás: Nakamura)

helyének a megtalálása, és annak eldöntése volt, hogy van-e köztük a Hold túloldalán levő. A mélyfészktű holdrendegések elenyésző száma a Hold túlsó oldalán több okkal magyarázható. A megfigyelések szerint a Hold belseje áthatolhatatlan a szeizmikus nyíróhullámok számára, ami arra utal, hogy részben olvadt lehet, vagy nem sikerült kellő mértékben feldolgozni a jeleket. A hold túloldaláról sajnos nincsenek szeizmométeres adatok. Az olvadt kőzetekből álló külső mag a Föld esetében a földrendegések észlelhetőségében árnyékoló hatást okoz. A Holdon is hasonló lehet a helyzet (5. ábra).

Nagyon ritka, ám annál erősebbek események a sekélyfészktű rendegések. Nincsenek összefüggésben az árapálllyal, ezért sejtethető, hogy okai esetleg tektonikai



6. ábra. A sekélyfészklű holdrengések epicentrum térképe a nagyobb holdkráterekkel. A nagy kék háromszög az ALSEP szondák elhelyezkedését mutatja.

mozgásokra vezethetőek vissza. Összesen 28-at regisztráltak, és nagyban hasonlítanak a földrengésekre. Méretük akár az 5,5 magnitúdót is elérheti. Szokatlanul erős a nagyfrekvenciás tartalmuk, és nagy távolságról is jól érzékelhetők. A Földön már egy 4,5 magnitúdós rengés is épületkárokat okoz! Kipattanási mélységük nem több 60 kilométernél.

A Földön a rengések 90 százaléka a keskeny övekbe – a szubdukciós zónák íveibe – rendeződnek, jó példa rá Japán. A Hold esetében ilyen nem tapasztalunk, az epicentrumok elszórtan helyezkednek el (6. ábra). Yosio Nakamura feltételezése szerint a sekély holdrengések a Hold becsapódási kráterei (tengerei) körül csoportosulnak. Lehet, hogy a fiatalabb kráterek körül még tektonikai mozgások történnek, esetleg az akkor megolvadt láva hőmérsékleti feszültségével kapcsolatos mechanizmusok okozhatják a sekélyfészklű holdrengéseket [5].

A meteorbecsapódások alkalmával keletkező rengések igazából nem tekinthetőek holdrengéseknek, mert külső forrásból származnak. Segítségükkel mégis jobban megismerhetjük a bolygóközi környezetet. A Holdat ért meteoritok súlya igen széles skálán mozog: 0,5 - 5000 kilogramm súlyúak lehetnek. A feltételezések szerint a Hold felszínének felső 20 kilométerét a meteorok alaposan összetörték, feldarabolták, ami a rengéshullámok

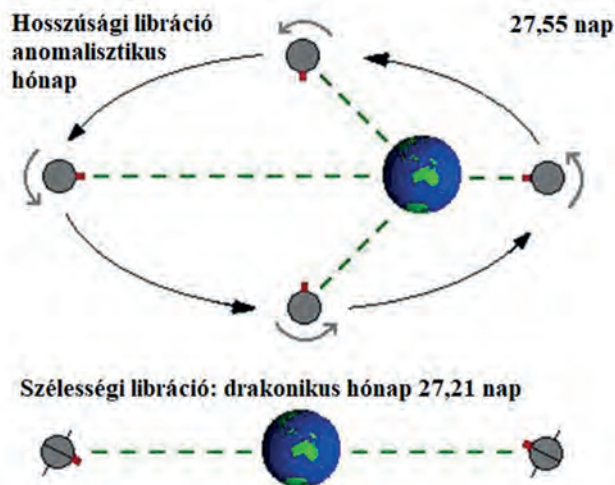
gyors elnyelődését okozza ebben a rétegben. A Földön meteor becsapódást szerencsére csak ritkán regisztrálunk. A 2013-as oroszországi cseljabinszki meteor a Richter-skála szerinti 2,7-es földrengést okozott.

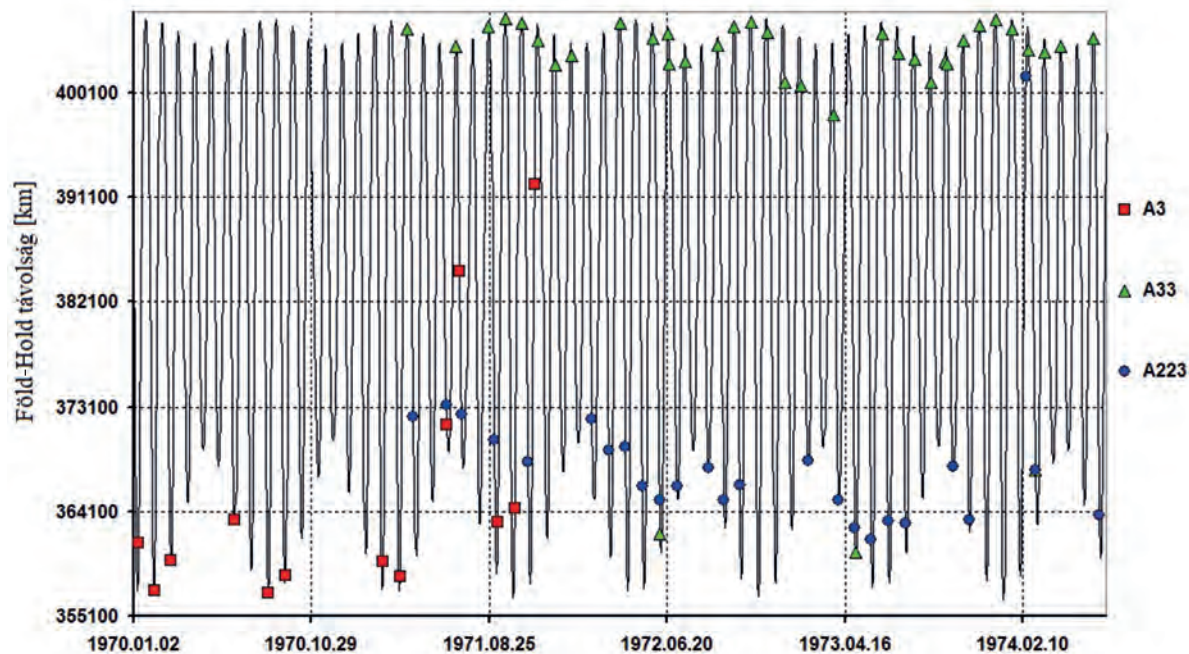
A negyedik csoportot a termikus holdrengések alkotják. Ezek nagyon kis erősségű szeizmikus események, csak a szeizmométerek közvetlen közelében voltak észlelhetőek. A hőmérsékletváltozással kapcsolatos szeizmikus mozgások száma több mint 300 000. Oka valószínűleg a hőtágulás lehet, mivel számuk hirtelen megemelkedett két nappal a holdi napfelkelte után, a naplementét követően pedig megszűntek. A hőmérsékletváltozás miatt fokozódik a kőzetek töredezettsége, vagy kisebb elmozdulások történnek a gyengébb övezetekben, esetleg a talaj megcsúszik a hőmérsékleti feszültségek miatt. Az Apollo-17 állomás szeizmikus adatainak újrafeldolgozása 3 alapvető típusát tárta fel a termikus rengéseknek, ezek a gyors, közepes és lassú lecsengésű események. Apollo-14-en 48, az Apollo-15-ön 245 típusát figyelték meg a termikus holdrengéseknek [6].

Égi keringő többféle dallamra

A Föld–Hold távolság nagyjából 28 és 32 földszugár között változik, emiatt hol nagyobbak, hol kisebbnek látjuk a Holdat. Égi kísérőnknek csak a forgása egyenletes, a Föld körül ellipszis alakú pályán kering, emiatt haladási sebessége a Kepler-féle törvényeknek megfelelően ingadozik. Földtávolban a Hold lelassul és kissé „túlforog”, amikor pedig Földközeli

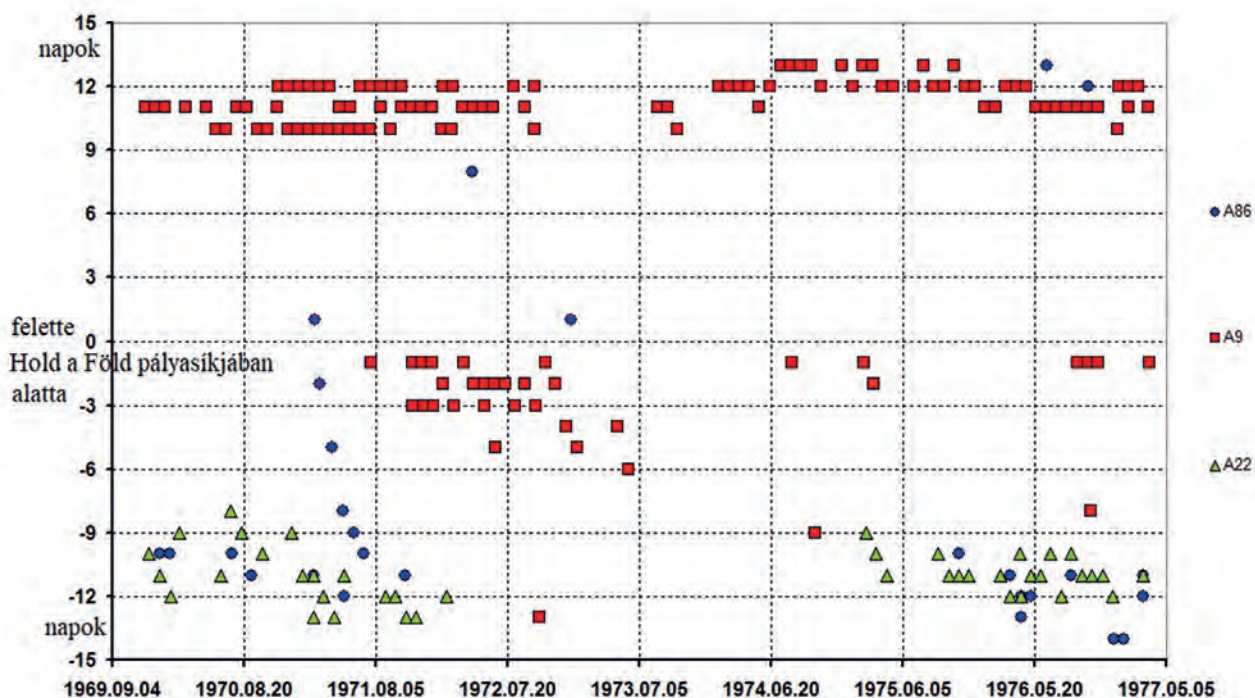
7. ábra. A hosszúsági és szélességi libráció







8. ábra. A Föld-Hold távolság változása a Hold keringése során, és a pillanat, amikor az A3, A33 és A223-as fészkek egy-egy rengései kipattantak. Az A33 a Hold túlsó oldalán helyezkedik el, és e fészkek akkor aktív leginkább (ellentétben a másik kettővel) amikor a Hold pályája során legtávolabbra kerül a Földtől.

9. ábra. A Hold Föld körüli keringése során fél hónapig a Föld pályasíkja alatt, fél hónapig felette halad. A pillanat, amikor az A9, A22 és A89-as fészkek rengései kipattantak a drakonikus hónap más-más időszakára jellemzőek.



 Földrengések	 Holdrengések
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Érvényes a GR törvény ▶ Van árnyéköna – folyékony külső mag ▶ Az árapály hatása nem jellemző ▶ Max. magnitúdó: 9,5 ▶ Max mélység: 700 km ▶ Elő-, fő- és utórengések, néha rajokban ▶ Lemezhatárok találkozásánál övekben ▶ A meteor becsapódások nem jellemzők ▶ Erőteljes csillapodás jellemzi a rengéshullámokat ▶ A lemeztectonika a legtöbb földrengés oka 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Érvényes a GR törvény ▶ Van árnyéköna – folyékony külső mag ▶ Az árapály hatása jellemző ▶ Max. magnitúdó: 5,5 ▶ A fészkek mélysége 600-1000 km közötti ▶ Rajokban ▶ 300 fészkekben (néhány km-es kiterjedésű) ▶ Sok meteor becsapódás ▶ Termikus rengések ▶ A Hold akár egy hangvilla ▶ A sekély és mélyfészkes holdrengések okai nem tisztázottak

10. ábra. A föld- és holdrengések természetének összevetése

felgyorsít, a forgása lemarad, így hol a nyugati, hol a keleti oldalán látunk többet a túloldalából, mintegy $7,9^\circ$ -kot. Ez a jelenség a hosszúsági libráció. Két egymás követő földközelpontbeli áthaladás időtartama az anomalisztikus hónap, hossza körülbelül 27,55 nap (7. ábra). A Hold keringési pályája valójában nem esik egybe az ekliptika síkjával (a földpálya síkjával), hanem azzal körülbelül 5° -os szöget zár be. Ezért a Hold hol az ekliptika síkja fölött, hol pedig az alatt mozog. Emiatt egyszer kissé felülről, másszor pedig kicsit alulról látunk rá, 7° -kal bepillantva a szélességi körök mentén. Ennek a szélességi librációnak a periódusa a drakonikus hónap, hossza mintegy 27,21 nap. (A drakonikus név egy mesés sárkányra utal, aki a holdcsomópontban él és a Napot vagy a Holdat a fogyatkozás során felfalja. Napfogyatkozás vagy holdfogyatkozás ugyanis csak akkor lehetséges, ha a Hold a két pont bármelyikében vagy annak közelében van).

A bonyolult Föld körüli tánc során változnak a Holdra ható árapályerők, és azok szélsőséges értékeinél 600–1200 kilométer mélyen holdrengések pattannak ki. Ezek a drakonikus és az anomalisztikus hónappal

mutatnak kapcsolatot, egyes fészkek rengései mindkettővel (8-9. ábra) [7]. A holdrengések főként e kétféle „billegés” speciális pontjaiban pattannak ki, sőt annál nagyobb rengés keletkezett, minél inkább földközelpontban tartózkodott akkor éppen a Hold. Egy éles maximum van még 13,6 naponként, ami a drakonikus hónap fele. A rengések kipattanási idejében felfedeztek még két hosszabb periódust is, egy 206 naposat és egy féléveset, amelyeknek tulajdonképpen a Hold pályájának zavarai a Nap perturbáló hatása miatt. A holdrengéseket okozó fizikai hatások elemzésével nagyon sokan foglalkoznak [8] [9] és a Természet Világa korábbi számában Varga Péter indukált földrengésekről írt cikkében példaként említi az árapályerők által gerjesztett holdrengéseket [10].

A holdrengések és földrengések összehasonlítása

A földrengésekre jellemző, hogy sokszor előrengések előznek meg egy nagy főrengést, amit aztán utórengések sorozata követ. Az elő- és utórengések

térbeli és időbeli eloszlását az Omori-törvény írja le. Az utóregések jellemző, hogy annál nagyobb területet érintenek, minél nagyobb volt a főregés mérete. A holdregésekre ez nem jellemző, időszakonként rajokban pattannak ki, illetve periódikusan az árapályerők hatására. A mélyfészű holdregések természete még sok kérdőjelet tartogat.

A Holdon ott keletkeznek mélyfészű holdregések ahol a hőmérséklet és nyomás állapotok hasonlítanak a közepes mélységű földregések környezetére. Olyan hőmérséklet és nyomás értékek mellett fordulnak elő, ahol azt hittük, hogy nem lehetséges ridegtörés, és olyan égitestben, amiről azt hittük, hogy tektonikailag „halott” [11]. A Föld esetében 670 kilométer mélységtől kezdődő alsó köpeny anyagának magas hőmérséklete már nem teszi lehetővé a földregéseket kiváltó rugalmas feszültség felhalmozódását, ennél mélyebben nem fordulnak elő földregések.

A Gutenberg-Richter-féle összefüggés (GR törvény) a földregések méret-gyakoriág eloszlását írja le. E szerint bármely területen előforduló regések mérete (M magnitúdója) és a legalább akkora méretű regések előfordulási száma (N) között logaritmikus kapcsolat áll fenn: $\log N = a - bM$. A b konstans értéke a Földön a szeizmikusan aktív területeken 1 körül van. A mélyfészű holdregésekre ez a konstans 1,7-3,7 közötti, a sekélyfészűkére 0,55, a meteor becsapódásokra pedig 1,3 értéket kaptak [12] [13].

A Holdregések Geoinformatikai Rendszere

A cél egy olyan térinformatikai rendszer létrehozása volt, ami mindenki számára elérhetően, kézzelfoghatóan és könnyen értelmezhetően mutatja be a holdregések világát. A holdregések száma ahhoz már sok, hogy kényelmes kezelésük, értelmezésük megfelelő megjelenítési, adatbázis-kezelési keret nélkül megoldható legyen. A HGR.01 holdregés térkép az Esri cég által kiadott ArcGIS Online alkalmazással készült. Az ArcGIS Online egy teljes, az összes eddigi ArcGIS funkciót ellátó felhőalapú, teljesen webes megoldás, melynek nincs szüksége helyi számítógépre történő kliens telepítésére. A webes térkép létrehozásánál a holdregéseket kutató szakemberek munkájának segítségét és annak megkönnyítését tartották a szerzők szem előtt [14] [15]. A nem közvetlenül a holdregésekhez kapcsolódó kiegészítő adatokat rendszerezve, tematikusan ábrázolva egy közös információs térképen tették elérhetővé. A térképre felkerült a teljes Nakamura-féle holdregés-katalógus is,

táblázatos formában. A kutatásokat nagyban segítheti, hogy azonos helyen lekérdezhetőek és kereshetőek a holdregések eseményei [16].

KISZELY MÁRTA

IRODALOM

- [1] NASA Headquarters, Apollo Lunar Surface Journal - ALSEP Apollo Lunar Surface Experiments Package. [Online] <http://www.hq.nasa.gov/alsj/HamishALSEP.html>.
- [2] Az adatok egy része digitálisan is elérhető, azaz letölthető a <http://darts.jaxa.jp/planet/seismology/apollo/PSE.html> címről
- [3] Nakamura Y., Latham G. V., Dorman H. J., Harris J. E.: (1981) Passive seismic experiment long-period event catalog, Final version, 1969 day 202 - 1977 day 273, 314 pp., Galveston Geophysics Laboratory, Galveston, 19 June, 1981.
- [4] Nakamura, Y.: (2003), New identification of deep moonquakes in the Apollo lunar seismic data, Phys. Earth Planet. Inter., 139, 197–205.
- [5] Nakamura Y.: (1980) Shallow moonquakes - How they compare with earthquakes. 11 th, Lunar and Planetary Science Conference. USA, Huston TX, March 17-21, 1980, Proceedings. Volume 3. (A82-22351 09-91) New York, Pergamon Press, 1980, p. 1847-1853.
- [6] Dimech J.L., Knapmeyer-Endrun B., Phillips D., Weber R.C.: (2017) Preliminary analysis of newly recovered Apollo 17 seismic data, Results in Physics, 7, 4457-4458.
- [7] Bulow R. C., Johnson C. L., Bills B. G., Shearer P. M.: (2007) Temporal and spatial properties of some deep moonquake clusters, Journal of Geophysical Research, VOL. 112.
- [8] Weber R. C., Bills B. G., Johnson C. L.: (2009) Constraints on deep moonquake focal mechanisms through analyses of tidal stress, Journal of Geophysical Research, 114.
- [9] Weber R. C., Bills B. G., Johnson C. L.: (2010) A simple physical model for deep moonquake occurrence times, Physics of the Earth and Planetary Interiors 182, pp. 152–160.
- [10] Varga P.: (2017) Indukált földregések, Természet Világa 148, 3
- [11] Frochlin C., Nakamura Y.: (2009) Physics of the Earth and Planetary Interiors (2009) The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: How similar and how different? Volume 173, 365-374
- [12] Nakamura Y.: (1980) Shallow moonquakes: How they compare with earthquakes, Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th, 1847-1853
- [13] Lamlein D.: (1977) Lunar seismicity and tectonics, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 14 224–27
- [14] Lázár L.: (2016) A Hold szeizmikus aktivitásának bemutatása és elemzése térinformatikai módszerekkel, szakdolgozat, Óbudai Egyetem, Alba Régia Műszaki Kar, Geoinformatikai Intézet
- [15] Lázár L., Kiszely M., Földváry L., Gribovszki K. (2018) HGR.01: Geographic Information System of the Moonquakes, EGU2018-17555, poszter
- [16] A Holdregések Geoinformatikai Rendszere: <http://arcg.is/2hnp5F5>