

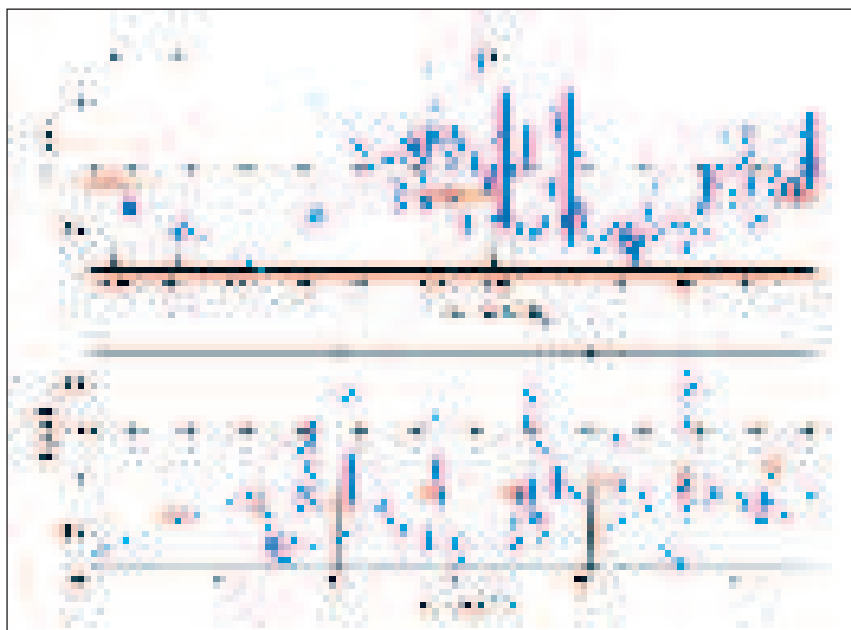
VARGA PÉTER

A naphosszúság változása

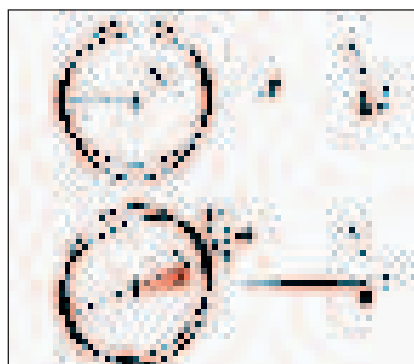
Hatásai a Föld és az élet fejlődésére

Hosszú ideje feltételezik, és a legutóbbi idők exobolygó-kutatásai ezt egyértelműen meg is erősítették, hogy a világmindenség sok milliárd csillaga körül bolygók sokasága kering. Ez utóbbiak jelentős része található a központi égitestet körülvevő, az élet kialakulásához és fennmaradásához szükséges lakhatósági zónában, azaz ott, ahol cseppfolyós víz van jelen a felszínen (vagy annak közelében). Ennek határait elsősorban a központi égitest által kisugárzott energia határozza meg, de bonyolultabb modellek figyelembe vesznek más, a vizsgált égitest felszínén és belsejében feltételezett, paramétereit is. Az Astrophysical Journal Letters-ben 2013-ban megjelent cikk szerint (Kopparapu és szerzőtársai) a Naprendszer esetében ennek a sávnak határai (0,95-1,67) CsE az egyszerűbb modell és (0,99-1,70) CsE az összetett, több tényezőt figyelembe vevő modell esetében (CsE - csillagászati egység, számértéke kerekítve 150 millió km).

Ezek szerint Naprendszerünkben csak a Föld található a lakható zónában, bár annak belső széléhez meglehetősen közeli



2. ábra. A földmágneses dipólusok tér relatív egységben (egység a jelenkori érték: $6,77 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$), a fanerozoikumban (felül), valamint az archaikumban és a proterozoikumban (alul). A korok a vízszintes tengelyeken millió években szerepelnek



1. ábra. Az árapálysúrlódás elve (magyarázat a szövegben)

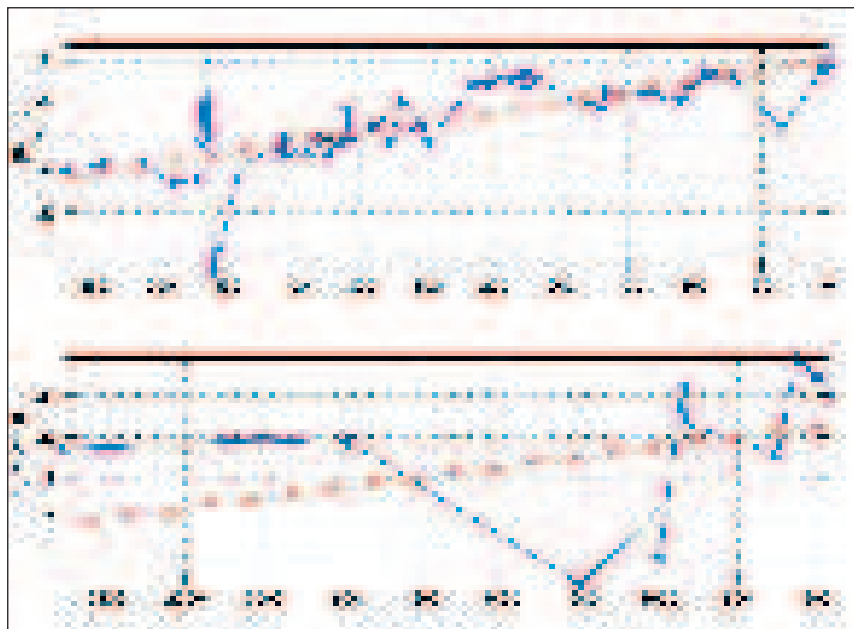
helyzetben. Megjegyzendő, hogy a lakhatósági zóna időben nem állandó. Határait elsősorban a központi égitest fényerősége jelöli ki. Ennek értéke a Nap esetében a Föld kialakulásához közeli, mintegy négy milliárd évvel ezelőtti időszakban a mainak csak 70%-a lehetett. Ahhoz, hogy

egy bolygón az élet kialakuljon, távolról sem elegendő a cseppfolyós víz jelenléte. Meglehetősen sajátos feltételeknek kell még ehhez teljesülniük. A bolygó megfelelő erősségű mágneses tere gátolja az azt körülvevő légkör pusztulását, erózióját és védi a kialakuló, vagy már kialakult életet a kozmikus térségből érkező káros sugárzástól. A mágneses tér generálásában a Föld-típusú égitestek középső része, magja játssza a legfontosabb szerepet. Tehát az élet kialakulásának egyik fontos tényezője a bolygó belső felépítése és annak időbeli alakulása.

Az élet létrejöttének további lényeges komponense a lemeztectonika jelenléte. A lemeztectonika, azon túl, hogy fontos szerepet játszik a bolygó felszín kémiai összetételének kialakításában, hűti a bolygó belsejét is. Ez által hozzájárul a dipólusos mágneses tér kialakulásához, erősödéséhez. A lemeztectonikát generáló köpenybeli anyagáramlások következtében keletkező felszíni hőmérsékleti anomáli-

áknak köszönhetőek azok a hőforrások, melegvizű vízfelületek, melyek a jelenlegi elképzelések szerint az élet keletkezésében fontos szerepet játszottak. A lemezek mozgásán keresztül megvalósuló tektonikai tevékenység fontos következménye a kontinensek területi növekedése és tengerszint fölé emelkedése, ami szintén meghatározó összetevője az élet kialakulásának és fejlődésének. A legutóbbi évek földtudományi kutatásai megmutatták, hogy a lemezek mozgásában a Föld felszínén meghatározó szerepe van az elsősorban a Hold által keltett és a világóceánok által felerősített árapálysúrlódásnak. Azaz az élet kialakulásához, legalább is ezt mutatja a mi bolygónk esete, szükség van még egy viszonylag nagy holdra is (a Hold tömege – a Föld tömegéhez viszonyítva – ötvönszer nagyobb, mint bármelyik holdé Naprendszerünkben, saját bolygójához képest).

Az elsősorban a Hold jelenlétének köszönhető árapálysúrlódás két jelenség, az árapály és a tengely körüli forgás jelensé-



3. ábra. A nap hossza órákban a fanerozoikumban (felül), valamint az archaikumban és proterozoikumban (alul). A korok a vízszintes tengelyeken millió években szerepelnek

geinek eredője. Az 1. ábra felső rajza azt az idealizált esetet mutatja, mikor a Föld tökéletesen rugalmas testként – azaz kérés nélkül – reagál a Hold (v. a Nap) gravitációs hatására. Ebben az esetben az árapály keltette „púpok” a keltő és a hatásnak kitett égitest tömegközéppontját összekötő egyenesre esnek, azaz a Föld tengely körüli forgássebessége állandó. Egészen más az eset a valóságos Föld esetében (alsó ábra). Itt a Föld árapály okozta kiemelkedése egy β szöggel elmozdul a két égitest tömegközéppontját összekötő egyeneshez képest. Az elmozdulás oka, hogy a Föld a luniszoláris hatásra viszkózus testként reagál, és így a púp „késik” a tengely körüli forgáshoz viszonyítva. Ez a rugalmatlan reakció nem a szilárd Föld deformációjának következménye, hanem a tengeri árapályé, melynek eloszlása bolygónk felszínén nagyon bonyolult és ennek eredőjeként jön létre az a látszólagos, „effektív” viszkozitás, mely az árapály púpok kését eredményezi. Ekkor az árapály keltette kiemelkedésekre ható erőt, F -t, két összetevőre bonthatjuk fel. E_1 -re, mely bolygónk felületére merőleges és számunkra adott esetben nincs jelentősége és E_H -ra, mely a Föld felszínével párhuzamos, a tengely körüli forgással ellentétes irányú és létrehozza a Föld forgásának lassulását eredményező árapálysúrlódást. A kését (vagyis az effektív viszkozitást) jellemző β szög meghatározásához a világóceánok árapálytérképét vizsgáltuk és számításaink szerint ez $\sim 5.2^\circ$ -t tesz ki. Egészében véve hasonló érték kellett, hogy érvényes legyen a Föld

történetének utolsó 500–600 millió évében is. Természetesen az árapálysúrlódás következtében a Hold és kisebb mértékben a Nap gravitációs hatása miatt számottevően csökken bolygónk forgási energiája és ezzel együtt nő a földi nap hossza. Az árapálysúrlódás következtében keletkező és a szilárd Földnek átadott energia szerepét, súlyát bolygónk energia háztartásában a táblázat szemlélteti.

Korábbi kutatásaink eredményeire építve (I. Varga P.: A Föld fejlődésének dinamikája, Természet Világa 2009. október) az akkor használt adatbázisainkat kibővítettük és statisztikai vizsgálatukat a korábbiaktól eltérően végeztük. A mágneses térerősség vizsgálatának célja a Föld belsejében (cseppfolyós magjában) végbemenő folyamatok kutatása volt. Ennek érdekében a földmágneses dipólikus tér erősségét (amit a földmágneses tér dipólikus momentumának Am^2 egységben kifejezett értékével jellemezhetünk) két külön lépésben vizsgáltuk. Először az archaikumból és a proterozoikumból, azaz a 3,5 milliárd évtől fél milliárd évvel ezelőttig terjedő időszakból származó adatokat dolgoztuk fel. Majd ezt követően került sor a fanerozoikumra, azaz a földtörténet utolsó ~ 500 millió évére. Mindkét esetben a dipólikus tér változásainak lineáris trendjének meghatározása volt a cél. A változás mértékét megadó időtől függő változó a 3,5–0,5 milliárd évvel ezelőtti időszakban statisztikai értelemben egyértelműen szignifikáns volt: $(0,000197 \pm 0,000079)$ /millió év. Ezzel szemben a fanerozoikumban

az egész időszakra kiterjedő változást nem lehetett kimutatni, a tér erősségének növekedési tendenciája tehát megszűnt: $(-0,00019 \pm 0,00028)$ /millió év (2. ábra). Megjegyzendő: munkánk során a mágneses térerő értékeit relatív egységben fejeztük ki, azaz a katalógusunkban szereplő értékeket elosztottuk a jelenlegi értékkel $(6,77 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2\text{-tel})$.

Mindezekből következik, hogy a földmágneses tér erőssége egyértelműen növekedett a 3,5 és 0,5 milliárd évvel ezelőtti időszakban, de ez a növekedés a fanerozoikum elején leállt. A földmágneses teret generáló cseppfolyós magbéli folyamatok összesített energiája természetesen nem növekedhetett az idő folyamán. A térerősség növekedését valószínűleg az okozta, hogy valamilyen magbéli folyamat hatására az áramlások olyan módon rendeződtek, hogy ennek következtében a földmágneses tér dipólikus jellege megerősödött. Az ezt a rendeződést kiváltó folyamat hozzávetőleg 0,5 milliárd évvel ezelőtt leállt. A növekedés okozója lehetett esetleg, hogy a Föld belsejében uralkodó hőmérséklet csökkenése következtében megindult, és mintegy hárommilliárd évig tartott a Föld belső magjának megszilárdulása és ez a növekedés a fanerozoikum elején valamilyen oknál fogva leállt. Ugyanakkor nagyon valószínű, hogy az a tény, hogy ezalatt a hosszú idő alatt a mágneses térerősség több mint duplájára növekedett, fontos szerepet játszott a földi élet körülményeinek javulásában.

A földi nap hosszának változása az archaikum és proterozoikum során, szemben a földmágneses térével, sokkal kisebb volt mint a fanerozoikumban. A nap

A Naptól kapott energia	$\sim 2 \times 10^{24}$
Légköri cirkuláció	$\sim 6 \times 10^{22}$
Geotermikus energia	$\sim 1 \times 10^{21}$
Óceáni áramlások	$\sim 3 \times 10^{19}$
A tengely körüli forgás energiája	$\sim 2 \times 10^{19}$
Vulkáni tevékenység	$\sim 2 \times 10^{18}$
Földrengések	$\sim 1 \times 10^{18}$
Földmágneses viharok	$\sim 3 \times 10^{13}$

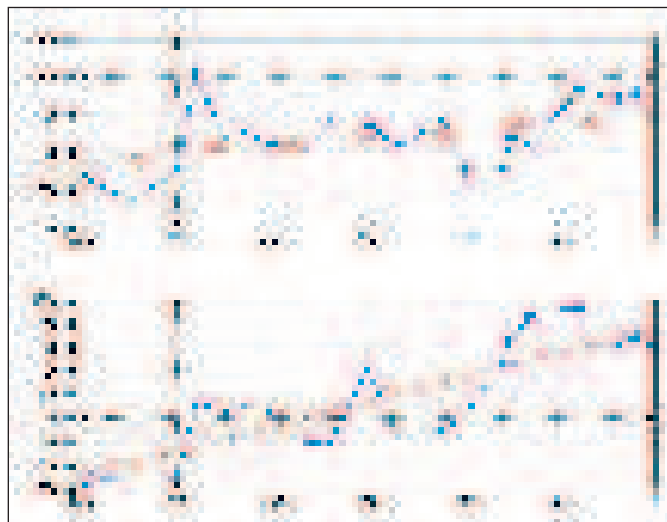
Táblázat. A Föld éves energiaháztartás legfontosabb összetevőinek éves változásai (J/év)

hossza 1,24 órával nőtt egymilliárd év alatt a 2,5 milliárd évvel ezelőtti időtől a fanerozoikum elejéig és ennek a növekedésnek az eltérése a zero növekedéstől statisztikai értelemben nem tekinthető bizonyítottnak. Ezzel szemben a fanerozoikum során a nap hosszúságának növekedése gyorsult és értéke 5,4 óra lett milliárd évenként (3. ábra). Vizsgálataink eredmé-

nyeként elmondható, hogy 3 milliárd évvel ezelőtt a nap hossza ~18,0 óra volt. Az 1. ábrán szereplő, az árapálypúp késését megadó és az árapálysúrlódás hatékonyságát jellemző β szög értéke is fanerozoikum előtt lényegesen kisebb volt a jelenleginél, és értéke ~1,5°-t tett ki. Tekintettel a rendkívül hosszú vizsgált időszakra, azt lehet megállapítani, hogy bár a nap hossza 25%-kal csökkent 3 milliárd év alatt, a nap hossza nem szenvedett el döntő mértékű vál-

kialakulásában, azaz a köpenyáramlások folyamatában. Közel harminc, a fanerozoikum és a késő-proterozoikum idejét bemutató ösföldrajzi térkép feldolgozásával vizsgáltuk, hogy az utolsó félmilliárd év során e vonalas tektonikai szerkezetek hossza hogyan változott. Az óceánközépi hátságok hossza, tehát azon helyek hossza ahol a köpenyáramlások elérik a felszínt, az utolsó félmilliárd év során $2,5 \cdot 10^4$ km-ről $8 \cdot 10^4$ km-re, azaz 3,2-szeresével növekedett (4. ábra). A lineáris trend időtől füg-

ves élet fejlődésében a fanerozoikum elején bekövetkezett robbanásszerű változáshoz közeli időpontban szintén fontos változás következett be: megnövekedett az árapálysúrlódás következtében a szilárd Földnek átadott energia és jelentős mértékben ehhez kapcsolódóan felgyorsultak a lemeztektonikai folyamatok is.



4. ábra. Az óceánközépi hátságok (felül) és a szubdukciós zónák (alul) hossza (km) a fanerozoikumban. A korok vízszintes tengelyeken millió években szerepelnek

Ebben az írásban még egy kérdésre szükséges kitérni. A rendelkezésre álló adatok alapján megkíséreljük megbecsülni a földi nap hosszát egy a Föld keletkezéséhez és egy a jövőbeli a Föld létezésének feltételezhető végéhez közeli időpontban. Ha a proterozoikum és archaikum idejére kapott értékből indulunk ki (18 óra 3 milliárd évvel ezelőtt) és figyelembe vesszük, hogy erre a hosszú, 2,5 milliárd éves hosszú időszakra nem sikerült a nullától szignifikánsan eltérő időfüggő regressziós együtthatót meghatározni, valószínűnek látszik, hogy egy a Föld keletkezéséhez közelebbi időpontban is (mondjuk, 4 milliárd évvel ezelőtt) is hasonló, talán egy-másfél órával rövidebb naphosszal számolhatunk. Egészen más a helyzet, ha a nap hosszúság becslését a távoli jövőre vonatkoztatva végezzük el. Mint már említettük, a Föld jelenleg a Naprendszer lakhatósági zónájában van ugyan, de meglehetősen közel annak belső széléhez. Ez a határ évente egy méterrel távolodik a Naptól és mintegy egymilliárd év múlva bolygónk kikerül ebből a sávból. Ekkor a nap hossza 25–25,5 óra lesz. A Nap várhatóan ~7 milliárd év múlva éri el a vörös óriás állapotot. Ennek következtében térfogata rendkívül nagy növekedésen megy keresztül és elnyeli a Merkúrt, a magas

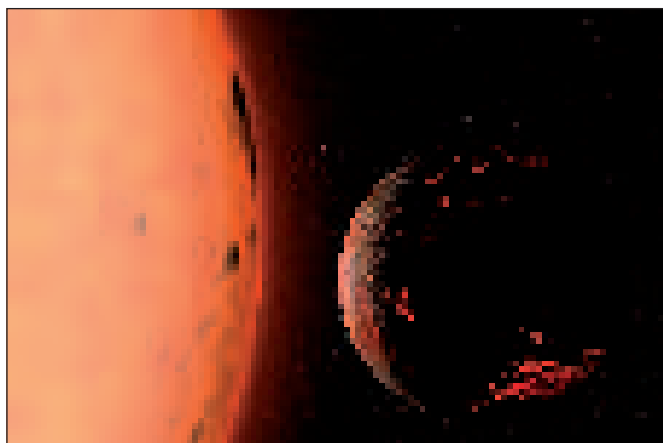
tozást. A forgási energia a naphosszúság reciprok értékével arányos. Kutatásaink alapján az mondható, hogy hárommilliárd év alatt a Föld forgási energiája harmadával csökkent, de ennek a csökkenésnek 80%-a a földtörténet utolsó félmilliárd évére, azaz a Föld életének 1/9-ére esik.

Természetesen ez a nagy, az árapálysúrlódás segítségével a szilárd Földnek átadott, energiamennyiség hatással kellett, hogy legyen a Föld tektonikai folyamataira. Korábbi kutatásaink során megállapítottuk (l. Riguzzi et al., 2010, Tectonophysics; Varga et al., Tectonophysics, 2012), hogy a tektonikai lemezek mozgása közel nyugati irányba polarizált és mozgásukhoz jelentős mértékben hozzáadódik az árapálysúrlódásból származó energia. Példaként említtem, hogy az az energia, mely ahhoz szükséges, hogy a Föld felszíne mentén egy 10^4 km átmérőjű és 10^2 km vastagságú kör alakú lemezt $\omega=1,7^\circ/\text{év} \cdot 10^{-6}$ szögsebességgel ($v=2$ cm/év) mozgassunk egy $\chi=10^{22}$ poise ($1\text{P}=0,1\text{Pa}\cdot\text{s}$) viszkozitású köpeny mentén $\dot{E}=1,27 \cdot 10^{19}$ J/év, míg az árapálysúrlódásból rendelkezésre álló érték ennél valamivel nagyobb ($4 \cdot 10^{19}$ J/év).

Ez a mozgás fontos szerepet játszik az óceánközépi hátságok és a szubdukciós zónák

egészét tekintve a feláramlások mértéke egyértelműen meghaladta a szubdukciót. Ha a két lineáris trendet az időben visszafelé meghosszabbítjuk, az az eredmény adódik, hogy az óceánközépi hátságok hossza 1,5 milliárd évvel ezelőtt nulla km lesz, míg ez a helyzet a szubdukciós zónák esetében egymilliárd évvel később áll be. Tekintettel arra, hogy a lemeztektonikai aktivitás 3,5–4,0 milliárd éve már jelen volt, azt kell feltételeznünk, hogy az archaikumban a lemeztektonikai működés – az árapálysúrlódáshoz hasonlóan – lényegesen lassúbb volt, mint a fanerozoikum alatt.

Az elmondottakat összefoglalva megállapítható, hogy bolygónk dinamikájában és tektonikai folyamataiban, a szer-



5. ábra. A vörös óriássá lett Nap és a felhevített Föld 7 milliárd év múlva

hőmérsékletben elpárolog a Vénusz és megsemmisülhet a Föld is, melyen a Nap hosszúsága akkor hozzávetőleg 38–40 óra lesz (5. ábra).