

# Éghajlatváltozás

Szarka L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

*Különbféle földi idősorok elemzése (már a Föld ún. egyensúlyi hőmérsékletét kialakító alapvető tényezők: TSI-é, albedóé is), továbbá a legkülönbélebb földfizikai jelenségekben lényegében egyidejűleg tapasztalt trendváltozások sora arra enged a következtetni, hogy a földi éghajlatváltozás a természet játéka. Napjainkban különösen izgalmas tudományos fejlemények zajlanak a lehetséges belső (geodinamikai, pl. tengerfenéki vulkanizmus) és külső (a Napból, a Naprendszerből, a kozmoszból eredő) hatóerők feltárásában. Nincs kellőképpen előtérben a három halmazállapotú földi víz éghajlati jelentősége sem, ami pedig a Nap-Föld-világűr rendszer földi tartományában szakadatlanul biztosítja a negentrópiát. Amennyiben a természeti folyamatokat nem értjük kellőképpen, addig az antropogén éghajlati hatásokat még megbecsülni sem vagyunk képesek. Be kell látnunk, hogy a természetet csupán töredékesen ismerjük; csak annyit tudhatunk, hogy a természeti törvények terén rend van. A megismerés útja a megfigyelés, többek között földi obszervatóriumi és űreszközökkel.*

## Motiváció

A Nap-Föld-világűr összes ismert elemét magában foglaló ún. „földrendszerben” mindenütt igen széles spektrumú tér- és időtartománybeli változások, szinte kibogozhatatlan kölcsönhatások, kényes egyensúlyok és azok körüli billegések figyelhetők meg. Bármit és bárhol mérve, minden örökösen változik, matematikailag leginkább turbulens módon. Az éghajlat – a földfelszín körüli almahéjszerű vékonyságú légkör jellemzője – esetében is ugyanez az alaphelyzet.

A tudományos megismeréshez elengedhetetlen, hogy az alapdefiníciók precízek legyenek. E követelmény már olyan fogalmak esetén sem teljesül, mint az éghajlattudomány és a klímarendszer. Az ENSZ 1992-es Éghajlatváltozási Keretegyezményében [1] ugyanis az éghajlatváltozás definíciójából kivették a természeti tényezőket. Sőt, a klímarendszer fogalmából hiányoznak a külső erők, például a Nap. (A Keretegyezmény 1. cikkelyének 2. és 3. pontja szerint „2. *“Climate change” means a change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity that alters the composition of the global atmosphere and which is in addition to natural climate variability observed over comparable time periods.* 3. *“Climate system” means the totality of the atmosphere, hydrosphere, biosphere and geosphere and their interactions.*”) A döntéshozók hajlamosak mindenféle megfigyelt változást az általuk elfogadott definícióban szereplő tényezőknek tulajdonítani.

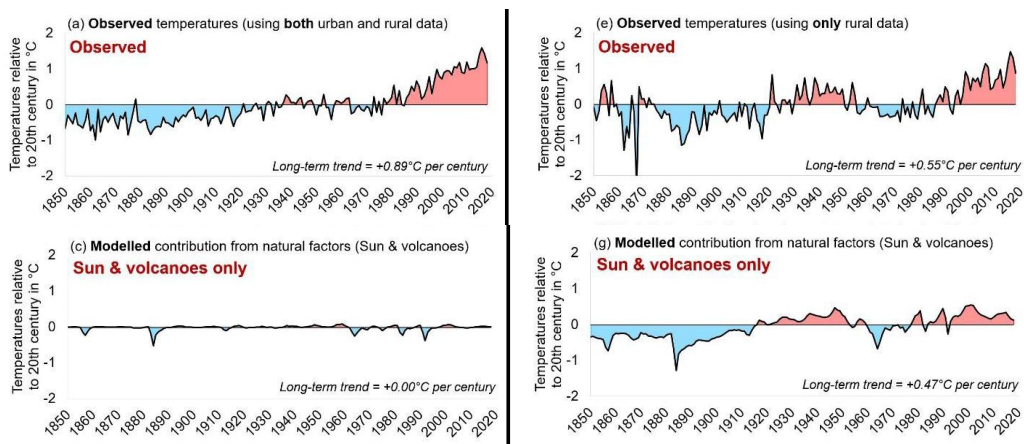
Az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet elektromágneses tudományos iskolájának kutatójaként, egyetemi oktatóként, majd tudományszervezőként mindig érdekelték a tágabb összefüggések. Nyugdíjba menetelem óta igyekszem intenzíven és szisztematikusan utána járni a jelenkori éghajlatváltozás kérdéseinek [2], [3], és tisztázni alapvető félreértéseket. Az áttekintés mellett friss eredményekbe is bepillantunk.

## TSI, albedó

A Stefan-Boltzmann törvény szerint a Föld ún. egyensúlyi (légkör nélküli) hőmérsékletét a TSI (Total Solar Irradiance, teljes napbesugárzás) és az albedó egymással egyenrangúan befolyásolja.

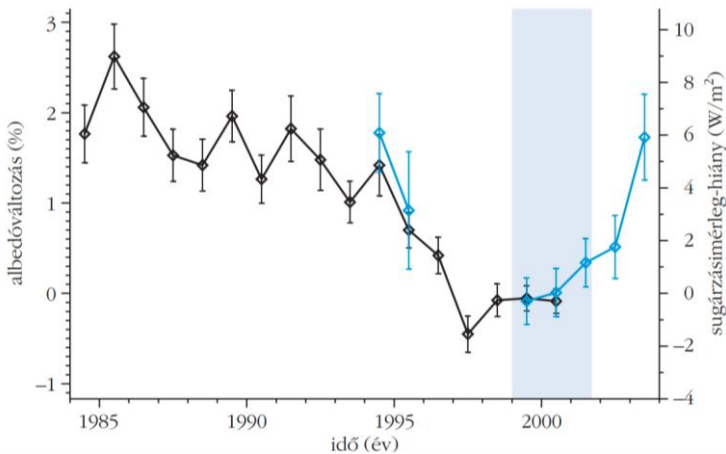
Egy 2021-es tanulmányban [4] kimutattuk, hogy a műholdas TSI mérésekből nagyon

sokféle idősor-kompozit állítható össze. Ha egy nagy változékonyságú TSI-idősört fogadnánk el (szemben az IPCC által egyedül lehetségesnek tartott kis változékonyságú TSI-idősorral), valamint, ha az északi félteke hőmérsékleti adataiból kivennénk az elvárosiasodott meteorológiai állomások adatait, akkor a jelenkori globális felmelegedés nagyobbik része megmagyarázható lenne TSI-változások által (1. ábra). A Nap jelenkori éghajlatot változtató hatására levonható következtetés tehát attól függ, hogy az egyformán lehetséges (ACRIM és PMOD) adatsorokból ki melyiket fogadjuk el [5]. Egy közelmúltbeli előadás [6] rejtélyes ellentmondásokra hívja fel a figyelmet. Kalevi Mursula 2023. május 3-án megjelent tanulmánya pedig – úgy tűnik – konkrét magyarázatot ad a hosszú távú naptevékenység, a napmágnesség, a dinamó, a napszél és a Nap-Föld térség nagy időléptékű változásaira [7].



1. ábra: Mért hőmérsékleti (fent), és modellezett hőmérsékletre átszámított TSI-adatok az 1850-2020 évekre. Balra az IPCC, jobbra a Connolly et al.-féle feltételezésekkel. Forrás: [4]

Bolygónk albedója műholdak segítségével és a Holdról visszaverődő ún. földfény földi obszervatóriumi méréseivel is meghatározható. A két módszer között az első meggyőző egyezést egy 1997 folyamán tapasztalt albedó-trendváltásnak köszönhetően lehetett kimutatni. A néhány tizedszázalékos albedóváltozás a sugárzásmérleg-egyensúlyban  $1 \text{ W/m}^2$ -nyi eltolódást jelent [8, 9].

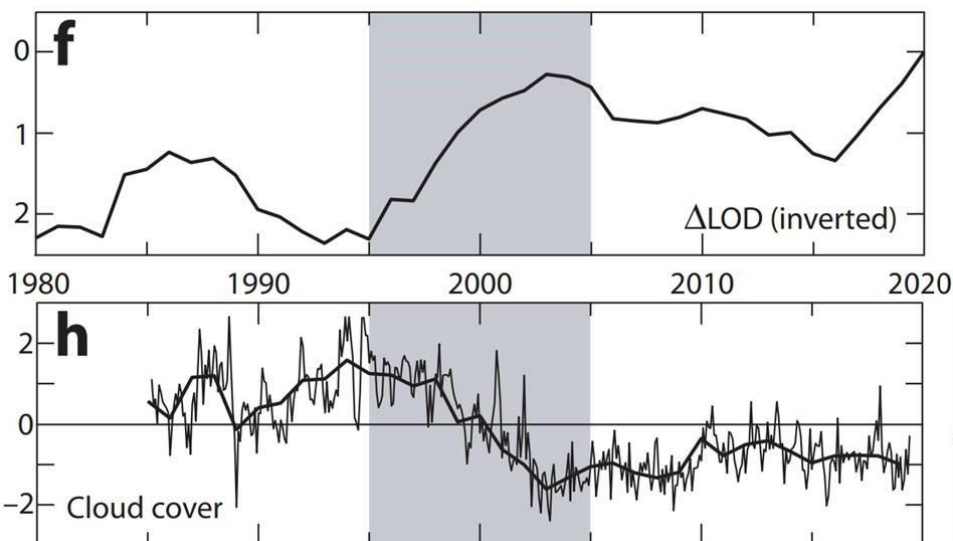


2. ábra: Rekonstruált (fekete) és földfényméréssel meghatározott (kék) éves albedóváltozások (1994–1995 és 1999–2003). Forrás: [8]

## Egyidejű változások sokasága

Észak-Amerika kontinentális talapzatán három évtizede mérik a tengerfenéki hőhullámok idő- és térbeli eloszlását [10]. Amint az eredeti cikk 5. ábráján látható, az egyik csomósodás 1997-1998-ban volt megfigyelhető (Kalifornia, Alaszka partjainál, majd a Bering-tengerben, gyorsan egymás után), egy második csomósodás pedig 2015-2016-ra tehető. Egy friss tanulmányban a világ óceánjai fenékdomborzatában radarműholdakkal mintegy 19 ezer tengeri vulkánt mutattak ki [11]. Amennyiben nem csak a selfeken, hanem a Csendes-óceán kiterjedt medencéjében mindenütt ismernénk a hasonló vulkánkitörési csomósodásokat, feltehetően közelebb jutnánk az El Niño-jelenség megértéséhez [12].

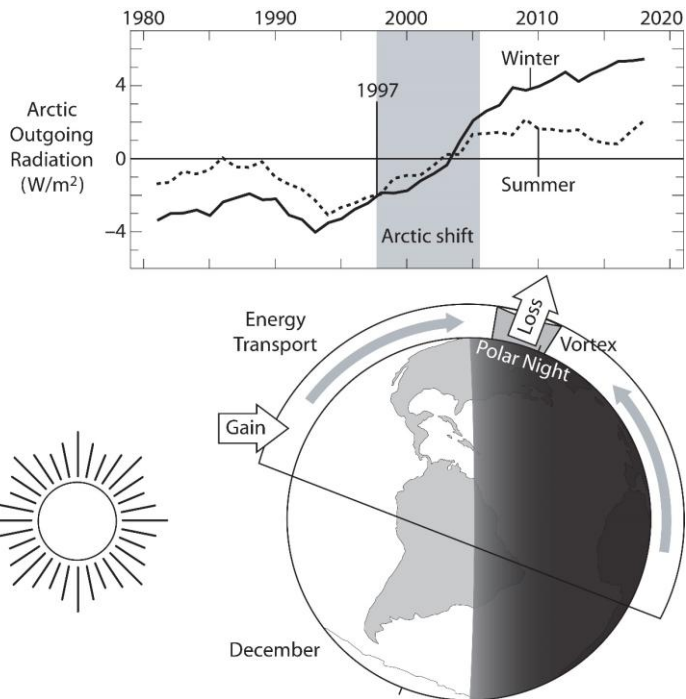
Összesen 14 földfizikai indikátor 1980-2020 közötti menetét megfigyelve [13] azt vette észre, hogy a négy évtized alatti legnagyobb változások 1995-2005 között játszódtak le. [13] 11.6. ábráján például a sztratoszférikus vízgőztartalom hirtelen, 2001-ben csökkent le. A felhőborítottság már korábban elkezdett csökkenni, miközben a Föld forgási sebessége pedig nőni kezdett (azaz a naphossz csökkent: a 86400 másodperchez képest néhány milliszekundummal). Az utóbbi két idősor látható a 3. ábrán.



3. ábra: LOD (Length of Day, naphossz, ms) és a felhőborítottság (%) változások 1980-2020 között. Forrás: [13]. Az eredeti ábra 14 különféle indikátort mutat.

A kiváltó okot (hogy például külső-e vagy belső) nem ismerjük, de az egyik következmény biztosan az [13, 14], hogy a téli (az északi sarkvidéki téli) és a nyári (a déli sarkvidéki téli) infravörös hőkisugárzás egymáshoz való viszonyában ugyanebben az időszakban (1997-től kezdődően) jelentős átrendeződés ment végbe (4. ábra). Az ábra alsó része a forgó és napsütött Föld éghajlatának valós fizikai alapmodelljét mutatja, benne az egyenlítői energiaelnyelést és a sarkvidéki energiaveszteséget, valamint az egyenlítő és a sarkvidékek közötti kiegyenlítő energiaszállítást. Látható, hogy több  $\text{W}/\text{m}^2$ -nyi teljesítménysűrűség-változásokról van szó.

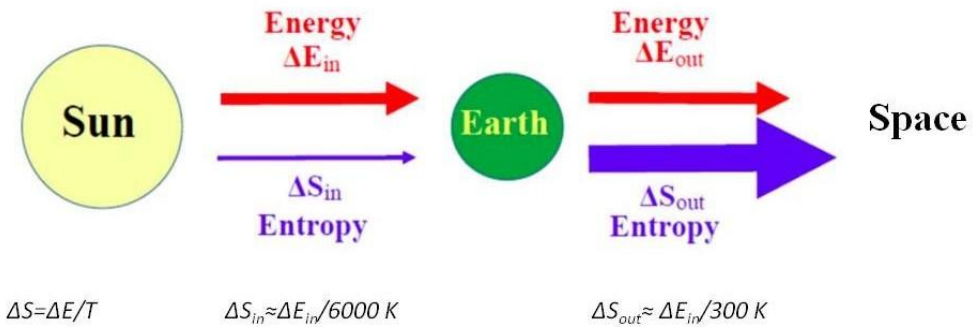
Izgalmas fejlemény az is, hogy befolyásolja-e a 11 éves naptevékenységi ciklust a bolygóegyüttállások arapályhatása. Egyes friss tanulmányok [15] szerint úgy tűnik, hogy igen, de egy másik [16] szerint ez a mintegy egy évtizede itt-ott felbukkanó feltételezés kizárható. E kérdés Barcza Szabolcsot is foglalkoztatta [17].



4. ábra: Fent: 1997-es klímaváltozás során a sarkvidéki téli kimenő sugárzás (az Északi-sark vidékén) sokkal nagyobb mértékben nőtt, mint a nyári kimenő sugárzás (a déli sarkvidéken).  
Lent: a földi éghajlat alapmodellje: a Nap süt, a Föld forog. Forrás: [14]

### Energia- és entrópia

A földrendszer (a Nap-Föld-világűr rendszer) magától értetődő természetességgel gondoskodik a Föld entrópiájának csökkenésétől, azaz a „rendezettség” növekedéséről a Földön. Amint a 2. ábra mutatja, a Föld egy melegebb testtől (a Naptól) magasabb hőmérsékleten vesz fel energiát és egy jóval hidegebb közegnek (a világűrnek) adja le, alacsonyabb hőmérsékleten.



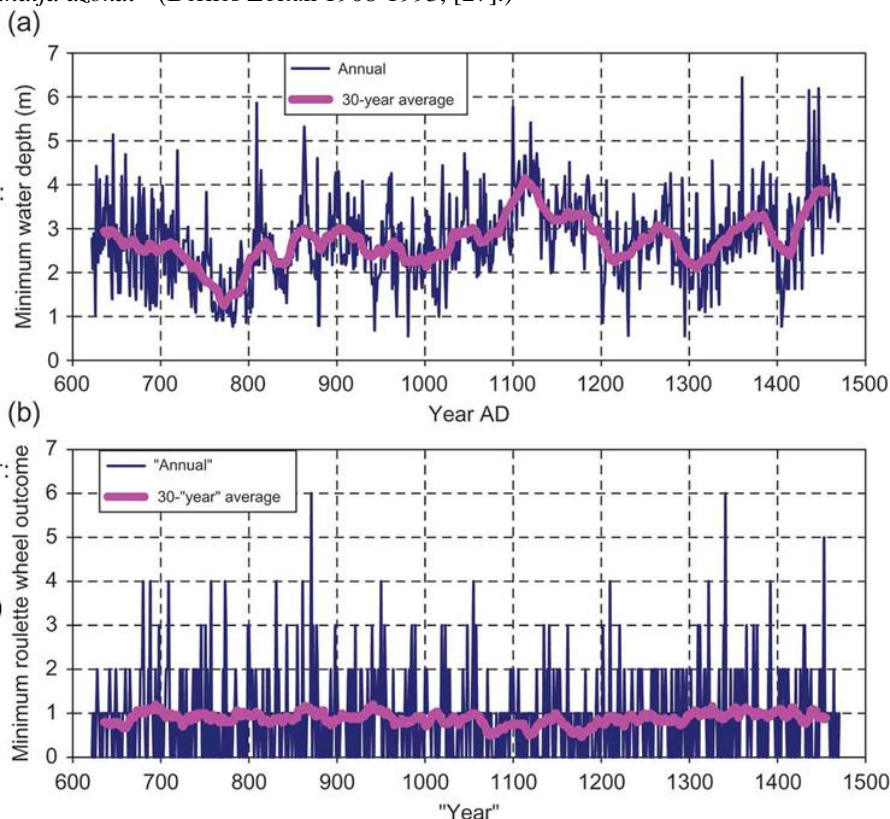
5. ábra: A Nap-Föld rendszerben a sugárzási energia-egyensúlyának a Föld entrópia-mérlege minden időpillanatban negatív. Forrás: [20]

A rendszer kritikus eleme a három halmazállapotú földi víz megléte, ami ahhoz kell, a földi hőmérséklet ne szaladhasson el. (Lényegében egy „termosztát”-ról van szó.) Röviden úgy is mondható, hogy a Földet a Nap élteti. E megközelítésben – Csernai László [18, 19] szerint – még olyan puha fogalmaknak is lehetséges egzakt fizikai jelentést adni, mint a „fenntartható fejlődés” [20], aminek forrása a természeti eredetű entrópiacsökkenés („negentrópia”).

### Hadd meséljenek az adatok!

A földrendszer bonyolult, de – mivel a természeti törvények terén rend van – a mai szintnél jóval közelebb lehet jutni a megértéséhez. „A természet megértésének kulcsa a harmónia s a harmónia a számszerűség. A természet számokkal megérthető, és minden harmónia: A dolgok lényege a szám!” Ezt adta Püthagórasz szájába – A szférák harmóniája című, színpadra szánt tanulmányában – Kövesligethy Radó (1862-1934) [21, 22, 23]. A mai tennivaló (kvantitatív megfigyelés földi obszervatóriumi- és űreszközökkel és a mért adatok leképezése) is ebből következik. „Let the data speak!” – mondta Guus Berjhout 2021-ben [24].

E szemlélet legkorábbi és máig legszebb példája a Nílus középkori vízszintváltozásának egzakt, kvantitatív megfigyelése [25, 26]. A Kairó mellett 622 és 1458 között mért éves minimumszintek és azok 30 éves átlaga (3. ábra) teli van évtizedeken át tartó perzisztens változásokkal. „Éghajlatingadozások tehát vannak, sőt néha oly mértékűek és tartalmiak, hogy akinek nincs módjában 50-100 évet áttekinteni, egyenirányú változásnak gondolhatja azokat” (Berkes Zoltán 1908-1993, [27].)



3.ábra: A Nílus éves vízszintminimumának alakulása 847 éven át a Kairó melletti Roda vízállásjelző állomás adatai alapján, (b) Véletlenszám-generátorral szimulált ruletteredmények sorozata. Forrás: [26].

## Irodalom

- [1] UN FCCC (1992), <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- [2] Szarka L. (2021), Magyar Geofizika, 62, 1, 7-26
- [3] Szarka L. (2022), Fizikai Szemle 72, 8, 244-247
- [4] Connolly R. et al. (2021), Astron&Astroph, 21, 6, 131; magyarul: Geomat Közl 24, 45-127
- [5] Robson J. (2022), Looking at the Sun, [climatediscussionnexus.com](https://climatediscussionnexus.com)
- [6] Seppälä A. (2022), <https://www.issibern.ch/game-changers-space-environment/>
- [7] Mursula K. (2023), Astronomy and Astrophysics (in print)
- [8] Pallé E. et al. (2016), Geoph. Res. Letters 43, 4531–4538
- [9] Szarka L. (2021), Fizikai Szemle, 71, 11, 375-379
- [10] Amaya, D.J. et al. (2023), Nat Commun 14, 1038
- [11] Gevorgian J. et al. (2023), Earth and Space Science, 10, 4, e2022EA002331
- [12] Yim W. (2017), Imperial ENGINEER Spring 2017, 14-15
- [13] Vinós J., (2022), Climate of the Past, Present and Future. A Scientific Debate, 2nd ed., Critical Science Press, Madrid
- [14] Vinós J., May A. (2023), Magyar Demokrata, 14, 44-45
- [15] Bianchini A., Scafetta N. (2023), EGU23-4472
- [16] Cionco R. G., Kudryavtsev S. M., Soon W. (2023), Solar Physics (in print)
- [17] Szarka L. (2021), Magyar Geofizika 62, 4, 239-247
- [18] Csernai L. P. et al. (2017): Physica A 473, 363
- [19] Csernai L. P. et al. (2016), Int. J. of Central European Green Innovation 42, 39-50.
- [20] Szarka L. et al. (2023), [pbk.info.hu/archiv/pbkforum/PBK\\_ENERGIA\\_2023\\_02\\_21.pdf](https://pbk.info.hu/archiv/pbkforum/PBK_ENERGIA_2023_02_21.pdf)
- [21] Kövesligethy R. (1908): A szférák harmóniája. In: Ponticulus Hungaricus 2005, 9, 1
- [22] Vargha D. (2011), In: Szabados.L. (szerk.): Kövesligethy Radó és az asztrofizika kezdetei Magyarországon. Konkoly Observatory, Monographs, 8, 6–50
- [23] Szarka L. (2023), Magyar Geofizika, 64, 1 (in print)
- [24] Berkhout G. (2021), <https://www.youtube.com/watch?v=Msy3sFneOda>
- [25] Hurst H. E. (1951), Transactions of the American Society of Civil Engineers 116, 1
- [26] Koutsoyiannis D. (2012), Hydrological Sciences Journal 58, 6, 1177-1197
- [27] Berkes Z. (1940), Az Időjárás 44, 7–8, 149–154