

Klímatudomány és földfizika

SZARKA L.

Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet,
9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.
E-mail: szarka.laszlo@epss.hu

A klíma és annak állandó változása rendkívül változatos erők sokrétű kölcsönhatásának kísérőjelensége az atmo-, bio-, geo-, hidroszféra határfelületén. A klímaváltozás visszacsatolásos nemlineáris kaotikus folyamat: egy adott helyen időbeli változásként, globális áttekintésben pedig térbeli átrendeződésekként figyelhető meg. A lehetséges klímaváltozási hipotéziseket földtudományi tények szorítják korlátok közé. Számos lehetséges külső (Nap, Naprendszer, kozmikus térség eredetű) és belső, azaz földi (embertől független természeti és „antropogén”) ok és kölcsönhatás földfizikai áttekintésével rámutatunk a kvantitatív földtudományi szemlélet megerősítésének időszerűségére.

Szarka, L.: Climate science and earth physics

Climate and its eternal change is an accompanying phenomenon of multifaceted interactions of extremely diverse forces at the interface of the atmo-, bio-, geo-, and hydrospheres. Climate change is a coupled nonlinear chaotic process: in a given place it can be observed as a variation over time. In a global overview it is a perpetual spatial rearrangement. Possible climate change hypotheses are constrained by earth science facts. By reviewing a number of possible external (solar, solar system, cosmic) and internal, i.e. terrestrial (human-independent natural and “anthropogenic”) causes and interactions, we point to the timeliness of strengthening the quantitative earth science approach.

Beérkezett: 2021. március 21.; elfogadva: 2021. március 26.

Bevezető

A görög „klíma” szó jelentése: ferdeség, hajlás. Az „éghajlat”: az eredetnél is jobb magyar lelemény, hiszen a klíma csakugyan „az ég hajlatát” jelenti. A Nap megfigyelt járására utal a Föld felszínének különféle helyein (pl. az egyenlítő, a sarkok és a mérsékelt övek mentén), de az éghajlat a vízpartokon, a hegyoldalakon és a völgyekben is jellegzetesen különbözik egymástól. Összefoglalóan azt lehet mondani, hogy az éghajlat: helyjellemző tulajdonság. A klíma és annak állandó változása külső és belső erők kölcsönhatásának kísérőjelensége az atmoszférában, annak bio-, geo- és hidroszférával való határfelületei mentén. A klímaváltozás csatolásos nemlineáris kaotikus folyamat (IPCC 2000). Egy adott helyen időbeli változásként jelentkezik, globális nézőpontból pedig térbeli átrendeződések egymásutánisága.

A klímatudományt sokan a klímamodellezéssel azonosítják, pedig annál sokkal több. Mindenekelőtt fizika (komplex rendszerek fizikája, sugárzástan, asztrofizika,

csillagászat, napfizika), valamint földfizika (geodézia, geofizika, légkörfizika, meteorológia). Továbbá kémia (geokémia, levegőkémia, vízkémia) és biológia (ökológia, paleoökológia, agrártudomány), a földtudományok eddig nem említett, további sokféle ága: természetföldrajz, hidrológia, krioszféra-tudomány, oceanográfia és persze geológia (geokronológia, hidrogeológia, szedimentológia, tektonika, vulkanológia stb.). A történettudományból elsősorban a régészetnek és a természettörténetnek van klímatudományi relevanciája. A bonyolult jelenségek egzakt kifejezéséhez, a következtetések levonásához matematikai szigorúság szükséges. A klímatudományt orvosi, gazdaságtörténeti és egyéb idősorok és térbeli kapcsolatok is szolgálják. Egy-egy ember önmagában csupán töredékes ismeretekkel rendelkezhet. Szerencsére a tudomány empirikus, objektív és racionális. Ezért egy szűk szakterületen szerzett több évtizedes kutatási tapasztalat nagy segítséget jelent az eligazodásban. Amennyiben persze a tudományt klasszikus értelemben definiáljuk (ahol a tények számítanak, nem az elméletek), és nem az ún. posztmodern, netán

az advocacy („pártos”) tudományt részesítjük előnyben. Geofizikus kutatóként környezettudományi-klímakutatási cikkek szerzője is voltam (pl. Szarka 1988, Koppán et al. 2000, Szarka et al. 2021), rálátásom volt soproni kollégáim szerteágazó eredményeire. Aztán öt éven át tartozott feladataim közé egy kutatóhálózat mindenféle kutatási eredményeinek figyelemmel kísérése, a nemzetközi szakirodalmat pedig ma is követem. Mindezen tapasztalatok birtokában igyekszem földfizikai áttekintést adni a klímatudomány helyzetéről.

Tapasztalatiságuk, elfogulatlanságuk és ésszerűségük révén a földtudományi megfigyelések a klímaváltozási hipotéziseket nem engedik a valóságtól elrugaszkodni. A helyi megfigyelésekből időbeli változásokra, a globális áttekintésekből térbeli átrendeződésekre következtethetünk. Az egyidejű kváziglobális klímaváltozási jelenségek a klímarendszeren kívüli (extrateresztrikus vagy földi) magyarázatot igényelnek. A megfigyelt éghajlatváltozást csak akkor nyilváníthatjuk antropogén eredetűnek, ha a földi és extrateresztrikus természet hatását kellően figyelembe vettük. Amint látni fogjuk, a természet sokkal fantáziadúsabb az embernél.

Tapasztalatiság, elfogulatlanság, ésszerűség

Az eszményi tudomány empirikus (tapasztalatokra épül), objektív (elfogulatlan) és racionális (ésszerű). Egyetlen tudományos elmélet nem állíthat olyat, ami nincs összhangban a természetben meg tapasztaltakkal. A mai klímakutatást illetően az egyik legszembetűnőbb tény, hogy a manapság visszahúzódó gleccserek némelyike (nevezetesen a dél-alaszkai Mendenhall-gleccser) alól eredeti (álló)

helyzetben lévő 1000–2000 éves fatöncök kerülnek elő (Daily Mail 2013, Spencer 2017, 1. ábra). Akkoriban tehát azon a helyen melegebb volt, mint ma.

Ennek ellenére elég sokan hívei lettek az ún. klímavész-helyzet gondolatának. A következő kétszáz év folyamán 60 millió éve nem tapasztalt felmelegedést hirdetnek. Ha azonban csak a tényekhez ragaszkodunk, és a 2. ábrán a klímamodellzési jósolatokat 2021-nél letakarjuk, nyilvánvalóvá válik mindenki számára, hogy az ún. „klímavész-helyzetet” kizárólag a klímamodellzéssel lehet alátámasztani. A kérdés aktualitását jelzi, hogy a „klímavész-helyzet”-et az ENSZ Biztonsági Tanácsban 2021-ben napirendre tűzték, de Oroszország vétőjával (és India ellenszavazatával) a kezdeményezést elvetették. Az orosz delegátus meglátása szerint „amennyiben a biztonsági kérdések kiváltó okának az éghajlatváltozást tekintjük, akkor elterelődik a figyelem a valódi kiváltó okokról, ami a megoldást akadályozza” (SC 2021).

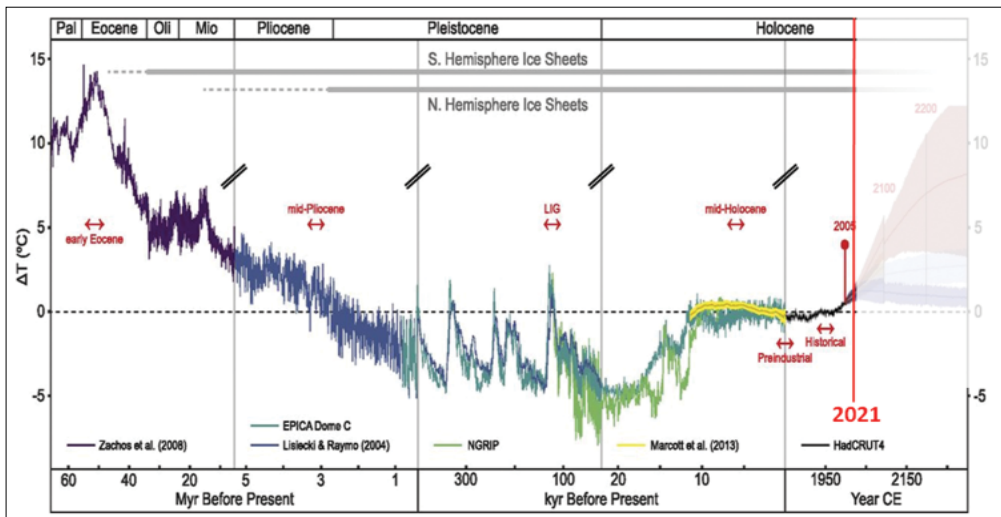
Évtizedek óta azt halljuk, hogy Malé (a Maldív-szigetek fővárosa) szigete a globális felmelegedés miatti tengerszint-emelkedés következtében elsüllyed. Tény, hogy a 20 ezer évvel ezelőtti helyzethez képest a tengerek szintje átlagosan 130 m-rel emelkedett, és ugyan a trend csökkent, de az irány nem változott. A tengerszintváltozás (relatív és eusztrikus vízszint stb.) igen összetett földfizikai problémakör. Az is tény (Mörner 2011), hogy e partok mentén (3. ábra) több mint öt évtizede nem történt relatív tengerszint-emelkedés, pedig a klímaelmélet szerint a vízszintnek folyamatosan emelkednie kellett volna. A háttérben látható mesterséges sziget (Hulhumale) 2 m-re emelkedik ki a tengerből. Építését 1997-ben kezdték, 2019-ben fejezték be. A klímamodellzés szerint 14 év alatt el kellene süllyednie. Az interneten e két sziget



1. ábra | Legalább 1000 éves fatöncök a visszahúzódó dél-alaszkai Mendenhall-gleccser alatt. *Forrás:* Spencer 2017, Daily Mail, 2013

Figure 1 | At least one thousand year old tree stumps under the retreating Mendenhall Glacier in Southern Alaska.

Source: Spencer 2017, Daily Mail 2013



2. ábra Hőmérsékleti trendek és kilátások a legutóbbi 65 millió év egyedi léptékű klímátörténete (proxyrekonstrukciója) alapján, trendváltások (piros nyilak) bejelölésével. *Forrás:* Burke et al. 2018. Burke et al. 1. ábráján a különféle szcenáriók is szerepeltek

Figure 2 Temperature trends and prospects based on the proxy reconstruction of the climate history of the last 65 million years, in a quasi logarithmic time scale. Trend changes are indicated by red arrows. *Source:* Burke et al. 2018. In their original Figure 1, various scenarios were also shown



3. ábra A Maldív-szigetek fővárosának (Malé szigetének) légifényképe, háttérben a csaknem negyedszázadon át (1997–2019 között) készült mesterséges szigettel (Hulhumale), valamint a 2018-ban átadott összekötő hídval (Sinamalé). *Forrás:* Science News 2018

Figure 3 Aerial view of the capital of the Maldives (Malé Island). In the background, the artificial island, Hulhumale (built through a quarter of century, between 1997 and 2019), and the connecting Sinamalé bridge, inaugurated in 2018. *Source:* Science News 2018

együttesselről korábbi légifényképek (pl. Ilyas 2004) is láthatók.

Változások időben

Népi bölcsességek. Nincs olyan szeglete a világnak, ahol ne lenne a helyi bölcsesség része, hogy „nincs semmi új a nap alatt” (Prédikátor 1, 9). A Brihaspati nevű indiai-kínai naptár például 60 év múltán újrakezdődik. (A Brihaspati a Jupiter bolygót jelenti.) Az Ószövetség (Mózes I. 41: 18–20) 7 + 7 = 14 éves ciklust örökít meg. (A fáraó álmában azt látta, hogy „a Nílusból hét kövér és szép tehén jött

ki, és legelt a sás között. De hét másik tehén is kijött utánuk, amelyek nagyon hitványak, rútak és soványak voltak”. József álomfejtése szerint hét bőséges esztendőre hét szűk esztendő fog következni. Úgy is lett.) Egy angol közmondás szerint „There is no debt so surely met as wet to dry and dry to wet”. Magyarul talán így mondhatnánk: „Halálbiztos, hogy száraz időszakra csapadék jön, majd újra száraz idő következik”.

Kutatási eredmények. William Herschel, minden idők egyik legnagyobb megfigyelő csillagásza szoros összefüggést talált az 1700–1800 közötti naptevékenység és a londoni értéktőzsde gabonaárai között (Herschel 1980). Het-

ven éve pedig Berkes Zoltán (Réthly Antal munkatársa) ezt írta: „Éghajlat-ingadozások tehát vannak, sőt néha oly mértékűek és tartalmúak, hogy akinek nincs módjában 50–100 évet áttekinteni, egyen-irányú változásnak gondolhatja azokat...” (Berkes 1940).

A klímatudományi szakirodalomban se szeri, se száma a klimatikus ciklikusságról, periodicitásról szóló publikációknak. A régebbi eredmények közül illusztrációként megemlítenéd, hogy 1939-ben egy *Nature*-cikk 23 éves periodicitást mutatott ki a csapadékban (Abbot 1939). Másutt a pekingi csapadéokra kb. 10 éves periodicitást találtak (Zhang 1981). A légköri nyomás és a naptevékenység alakulása között pedig világos összefüggést fedeztek fel, de a szoros kapcsolat kizárólag nyugati szelek idején figyelhető meg (Burroughs 1992).

Egyedülálló idősor. Az efféle időbeli változások tanulmányozásához egyedülálló jelentősége van a Nílus 847 éven át folyamatosan ismert vízszintváltozási idősorának. Éveken, néha évtizedeken keresztül tartóan alacsony, máskor tartóan magas vízszinteket mértek, és e folyamatokról akár azt is gondolhatták, hogy végzetesen egyirányúak. És egyszer csak megfordult a trend. Nem pontos szabályszerűséggel, hanem mindig egy kicsit másképp. Az egyedülálló természeti idősorból egy gátépítés-tervezéssel megbízott angol hidrológus (Hurst 1951) alapvető elméleti következtetéseket tett. A Hurst-kitevő ma a legkülönbözőbb összetett folyamatok (pl. tőzsdérfolyamok) elemzésében egyenesen nélkülözhetetlen. A Hurst-kitevőt a hidrológiában itt-ott alkalmazzák, de a földtudományokban csak elvétve lehet vele találkozni. A környezet- és klímakutatásból pedig fájdalmasan hiányzik. A Hurst-kitevő a természeti idősorok eredendő tulajdonságára, az

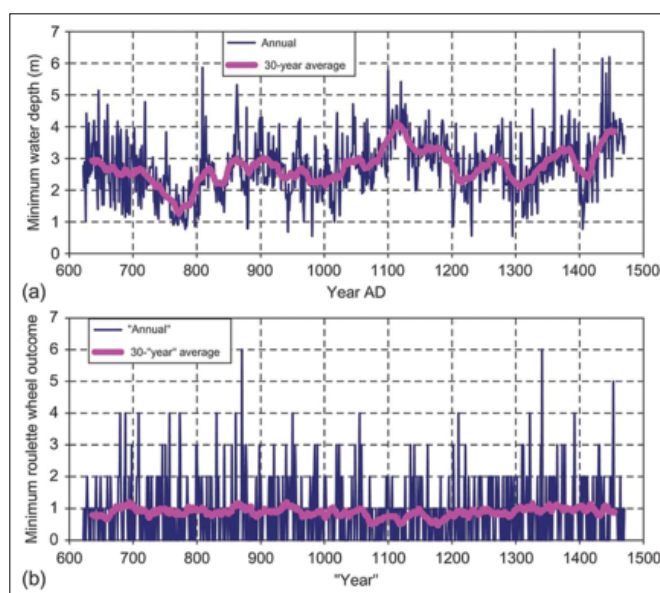
ún. *tartós perzisztenciára* (az átlagértéktől való időnkénti makacs eltérésekre) mutat rá.

A 4. ábra a Nílus 847 éven át éves vízminimum-szintjét hasonlítja össze egy véletlenszám-generátorral szimulált idősorral. A természeti idősorokban vannak, a véletlen idősorokban pedig nincsenek tartós perzisztenciák. Hurst (1951) és Koutsoyiannis (2012) megállapítása tökéletesen összecseng Berkes Zoltánéval.

Változások térben

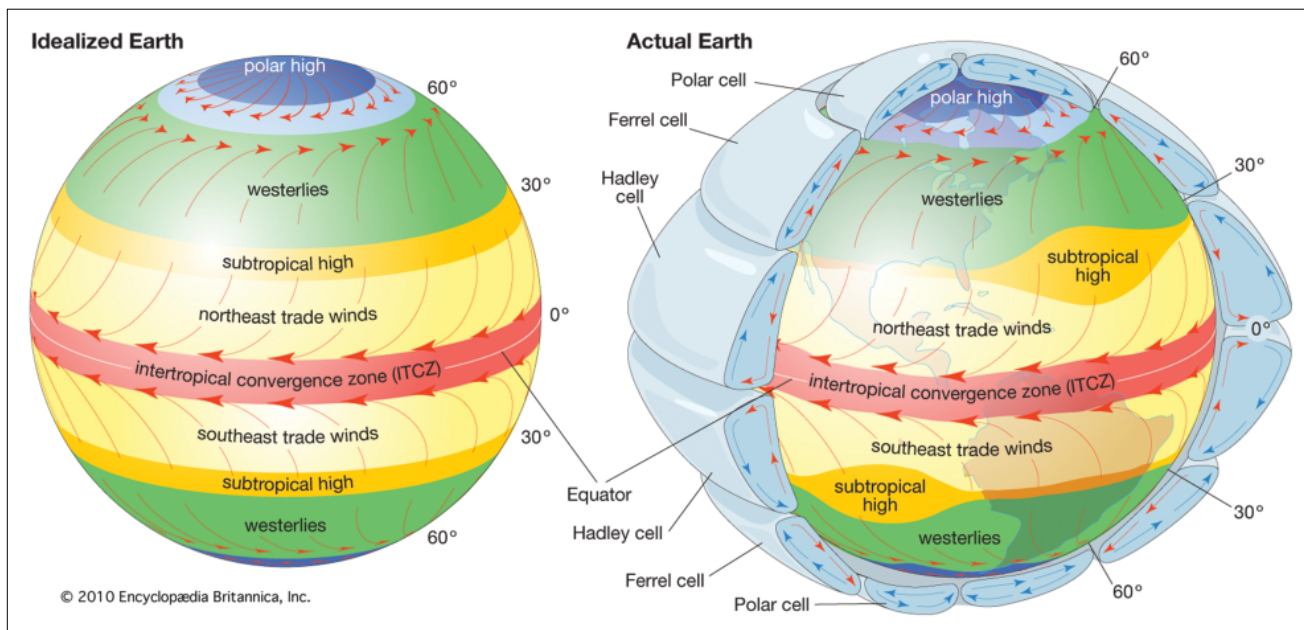
Az éghajlatváltozás térbeni alakulásának megértéséhez érdemes rápillantani a globális légkörzés bonyolult rendszerére (5. ábra), amely összetett hatások (pl. a Föld forgása) örökös egyensúlykereséseként alakul ki. A szelek járása nincsen köbe vésve. A legkisebb hatásra itt-ott megváltozik az egyensúlyi helyzet, ami meg másutt okoz változást. Azt mondhatjuk, hogy e rendszerben, amely örök, az maga a változás. Erre ismerhetünk rá a szélrendszerrel jóval egyszerűbb hármasinga-végpont térbeli-időbeli játékában, ami a nemlineáris kaotikus rendszerek egyik legegyszerűbb esete. Helyi megfigyelésekből mindenütt csak időbeli változásokat lehet látni. Globális megfigyelések révén azonban nagy részletességű térbeli átrendeződések figyelhetők meg. A mintázatalapú (ún. „pattern-based”) klímakutatás viszonylag új („Big Data”) fejlemény. Akkor is van éghajlatváltozás, ha a globális átlaghőmérséklet semmit se változik.

El Niño. A térbeli összefüggésrendszerek egyik legelső példáját az El Niño jelenség (a Csendes óceán felszíni vízének felmelegedése) szolgáltatta (6. ábra, Adler et al.



4. ábra (a) A Nílus éves vízszintminimumjának alakulása 847 éven át a Kairó melletti Roda vízállásjelző állomás adatai alapján, (b) Véletlenszám-generátorral szimulált ruletteredmények sorozata. *Forrás:* Koutsoyiannis 2013

Figure 4 (a) Evolution of the annual minimum levels of the Nile throughout 847 years, based on the data of the Roda water level monitoring station near Cairo, (b) A series of roulette results simulated with a random number generator. *Source:* Koutsoyiannis 2013



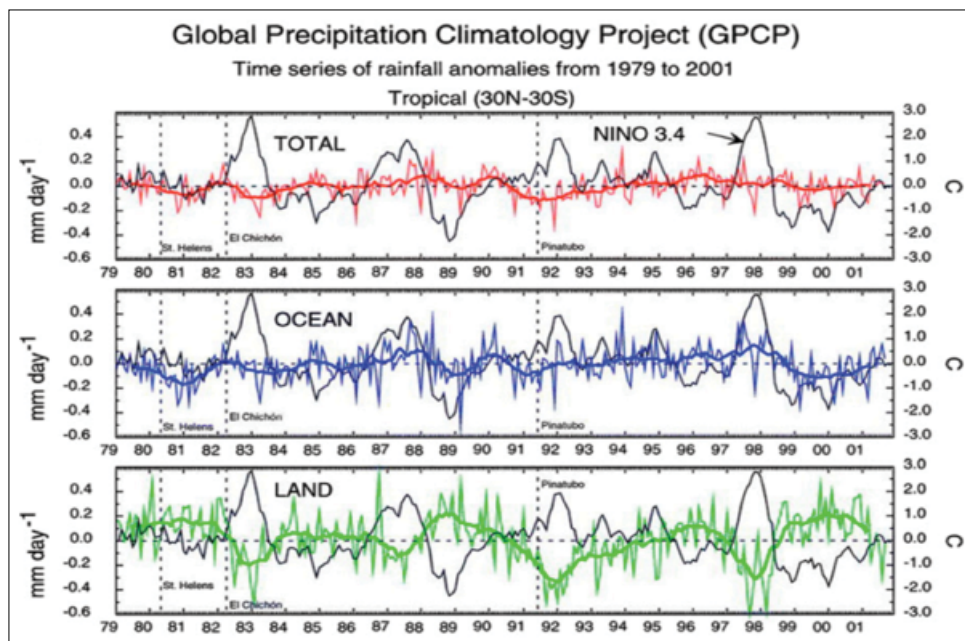
5. ábra A globális légkörzés kétféle (idealizált és valóságközei) rajzolata. *Forrás:* Encyclopaedia Britannica, Lupo 2021. Figyelem: a légkör erősen kivastagított. A valóságban inkább „almahéj”, mint „takaró”

Figure 5 The global circulation model of the atmosphere in two (idealized and quasi real) variants. *Source:* Encyclopaedia Britannica, Lupo 2021. Attention: the atmosphere is strongly thickened. In reality, it is rather “apple peel” than “blanket”

2003). El Niño jelenségek idején (amikor az ún. El Niño-index magas) a szárazföldi csapadék minimumértéket vesz fel. A Föld 2/3-ad részét borító óceánok fölött nincs ilyen összefüggés, és kapcsolat még globálisan (a kontinenseket és az óceánokat együtt véve) sem mutatható ki. Csakis akkor, amikor a Föld felszínét kettébontjuk szárazföldekre

és óceánokra, akkor tűnik elő ez az érdekes és fontos összefüggés.

Távkapcsolatok. A meteorológiai-klimatológiai szakirodalom távkapcsolatok („teleconnection”) és társjelenségek sokaságát tárta fel. Ezek nagy részét az 1. táblázat



6. ábra Az El Niño index (fekete) kapcsolata a globális csapadékkal (piros), az óceáni csapadékkal (kék) és a száraz szárazföldi csapadék alakulásával 1979–2001 között. *Forrás:* GPCP projekt, Adler 2003

Figure 6 Relationship of the El Niño index (black) to global precipitation (red), ocean precipitation (blue), and dry land precipitation between 1979 and 2001. *Source:* GPCP project, Adler 2003

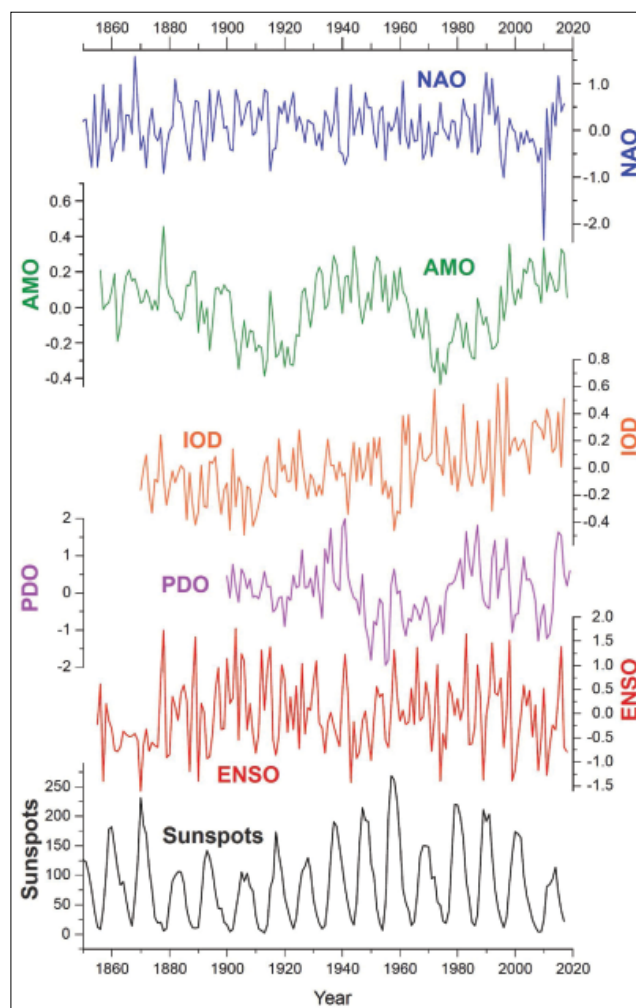
I. táblázat A szakirodalomban talált időjárási távkapcsolat-jellegű jelenségek listája

Távkapcsolatok és társaik	Rövidítés
Antarctic Circumpolar Wave	ACW
Arctic dipole anomaly	ADP
Arctic Oscillation/Northern Annular Mode	AO/NAM
Atlantic Equatorial Mode	AEM
Atlantic Multidecade Oscillation	AMO
Brewer-Dobson Circulation	BDC
El Niño-Southern Oscillation	ENSO
Equat. Indian Ocean Monsoon Oscillation	EQUINCO
European Wind storms	
Gravity waves	
Indian Ocean Dipole	IOD
Jet streams	
Madden-Julian Oscillation	MJO
North Atlantic Oscillation	NAO
North Pacific Gyre	NPG
North Pacific Oscillation	NPO
Pacific/North American telecon. pattern	PNA
Pacific Decadal Oscillation	PDO
Pineapple Express	
Planetary Waves	
Polar Vortex	
Quasi-Biennial Oscillation	QBO
Seasonal lag	
Semiannual Oscillation	SAO
Southern Annular Mode/Antarctic Oscillation	SAM/AAO
Southern Oscillation Index	SOI
Stratospheric Variability	
Sudden Stratospheric Warmings SSW	SSW
Walker circulation	

ABC sorrendben tartalmazza, az igazi távkapcsolatokat rövid nevükön is. A legjelentősebb hatással bíró távkapcsolatok neve vastagítva szerepel.

A 7. ábra a NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO, továbbá a napfoltszám alakulását mutatja a legutóbbi 160 évre (Lüdecke et al. 2021 alapján). Mintázatok lüktetéseit láthatjuk bennük. Felmerül, hogy valamiféle extraterresztrikus vagy belső földi erő hajtja ezeket, de legtöbbször be kell érniük belső ingadozások feltételezésével, azzal, hogy „weather drives weather” („az időjárást az időjárás hajtja”). A globálisan egyirányú események azonban mindenképpen külső (a rendszeren kívüli) okot igényelnek.

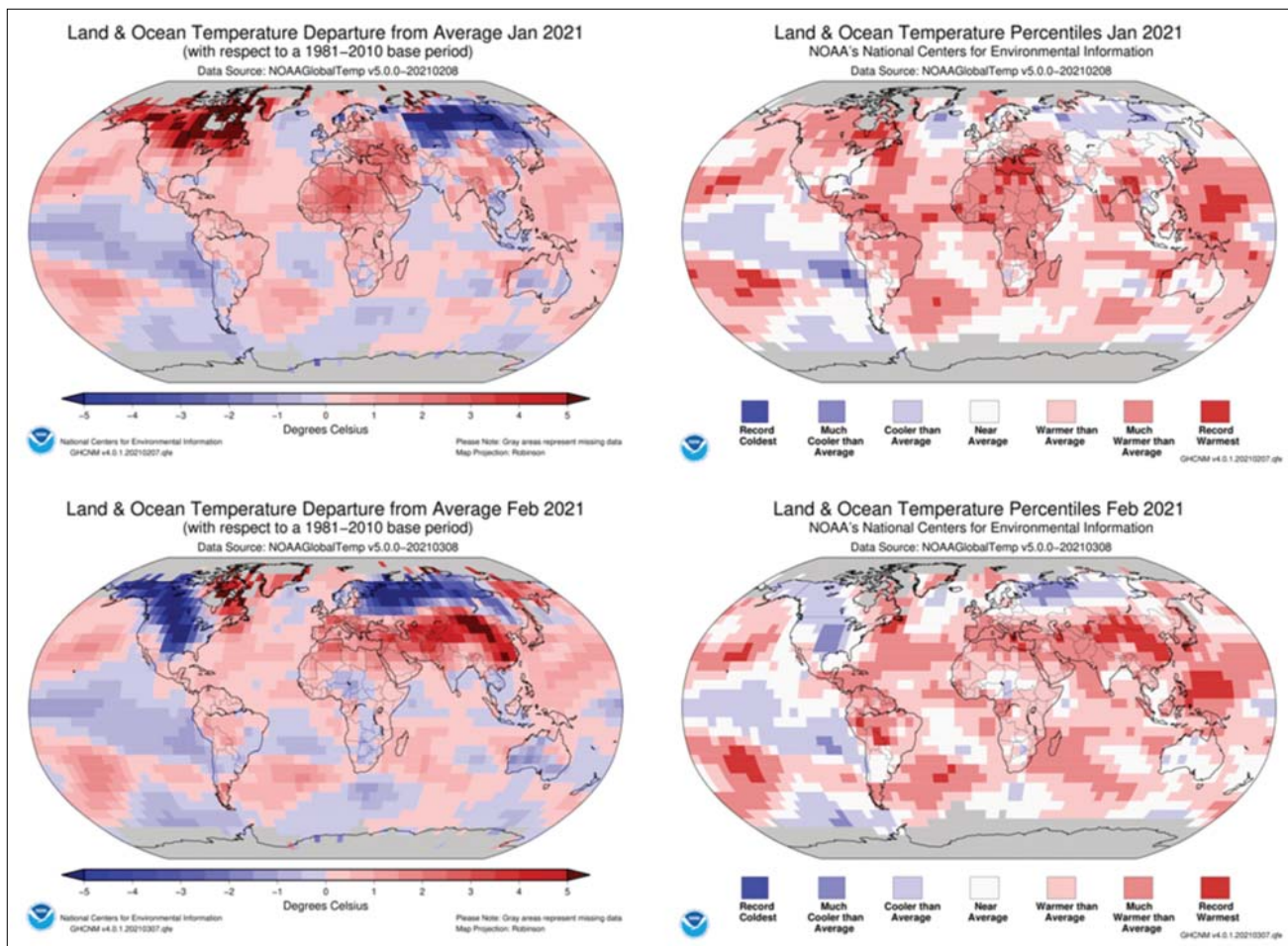
Mintázatok a felhőborítottságban. A mintázatok időbeli változására az egyik közvetlen bizonyítékot román szerzők (Sfică et al. 2021) páratlanul érdekes műholdas felhőborítottság-elemzése szolgáltatja. 27 jellegzetes európai felhőborítottsági mintázat 1981–2014 közötti alakulásában mutattak ki különféle jellegzetes változásokat, amelyeknek az okát a légköri áramlások (az 5. ábrán mutatott *westerlies*en belüli) változására vezetik vissza.



7. ábra Távkapcsolati (NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO) adatsorok éves simítatlan értékei, valamint a napfoltok alakulása 1850–2018 között. Forrás: Lüdecke et al. 2021

Figure 7 Annual unadjusted values of teleconnection data series (NAO, AMO, IOD, PDO, ENSO), and the evolution of sunspots between 1850–2018. Source: Lüdecke et al. 2021

A hidrológiai ciklus. Egy klímamodellzési feltételezés (Del Gieno 1991) alapján a kilencvenes évek végétől a hidrológiai ciklus végzetes felgyorsulásának („intenzifikálódásának”) hipotézise nyert egyre nagyobb hivatalos támogatást (Huntington 2006). Láthatjuk, hogy a hidrológiai ciklus ún. felgyorsulásának gondolata még azokból az időkből ered, amikor egy bizonyos időszakon át mért helyi adatokból állandó egyirányú változásra lehetett következtetni. Tavaly azonban egy mintázatokra alapozó átfogó elemzés (Koutsoyannis 2020) cáfolta a hidrológiai ciklus elemeinek egyirányú változására vonatkozó állításokat. Monoton tendenciák helyett mindenféle ingadozásokat talált (az erősödéstől a gyengülésig és fordítva). Koutsoyannis (2020) szerint a 21. század elejét inkább a gyengülés, mint az erősödés jellemzi. A légköri vízpára-adatokban Miskolczi (2021, szóbeli közlés) belső ellentmondásokra hívta fel a figyelmet.



8. ábra Havi hőmérséklet-eloszlások a Földön 2021 januárjában (fent) és 2021 februárjában (lent). A hőmérsékletértékek a bal oldalon az 1981–2010 közötti átlagértékekhez képest Celsius fokban kvantitatív módon kifejezve szerepelnek, a jobb oldalon pedig környezeti információs szolgáltatásként, kvalitatív osztályokba sorolva. *Forrás:* NCDC NOAA 2021

Figure 8 Temperature distribution on Earth in January 2021 (above) and February 2021 (below). The temperature values on the left are expressed in degrees Celsius relative to the average values from 1981 to 2010, and on the right as environmental information, classified on qualitative basis. *Source:* NCDC NOAA 2021

Havi átlaghőmérsékletek. Térbeli mintázatot mutat a havi átlaghőmérsékleti adatok globális térképe is (8. ábra). A kvantitatív $\Delta^{\circ}\text{C}$ -ábrázolás – amelyen a több évtizedes átlaghőmérséklettől való eltéréseket Celsius fokban láthatjuk – karakterisztikus és objektív információt nyújt. A másik, „környezeti információ”-ra szolgáló kvalitatív ábra ugyanezekről az adatokról elmosódottabb és szubjektív (egyfajta felmelegedés-érzetet sugalló) képet ad.

Globális események

A többé-kevésbé egyidejű globális éghajlatváltozások három – egymással is összefüggő, egymást átfedő – eseménytípusra vezethetők vissza. Az ún. Bond-esemény feltehetően 1000–1500 évenként (az első felfedezés szerint 1470 éves periódussal) jelentkezik, és jellemzően moréna-felhalmozódással kapcsolatos lehűléseket jelent. E rendszer-

2. táblázat Kimutatott Heinrich-, Bond- és Dansgaard–Oeschner-események egyesített listája. *Forrás:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003

Table 2 Frequencies used in two-A united list of detected Heinrich, Bond and Dansgaard–Oeschner events. *Source:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 modelling

Heinrich-események		Bond-események		D–O-események	
Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)
		B0	0,5		
		B1	1,4		
		B2	2,8		

2. táblázat Kimutatott Heinrich-, Bond- és Dansgaard–Oeschner-események egyesített listája. *Forrás:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 (*folyt.*)
Table 2 Frequencies used in two-A united list of detected Heinrich, Bond and Dansgaard–Oeschner events. *Source:* Kordos 2015, Rahmstorf 2003 modelling (*cont'ed*)

Heinrich-események		Bond-események		D–O-események	
Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)	Jelölés	BP (ezer év)
		B3	4,2		
		B4	5,9		
		B5	8,2		
		B6	9,4		
		B7	10,3		
		B8	11,1		
H0	12			DO 0	11,605
				DO A	13,073
				DO 1	14,630
H1	16–15				
H2	24–22				
				DO 2	23,398
				DO 3	27,821
				DO 4	29,021
H3	31–29			DO 5	32,293
				DO 6	33,581
H4	38–35			DO 7	35,270
				DO 8	38,387
				DO 10	41,143
				DO 11	42,537
H5	45			DO 12	45,362
H6	60				

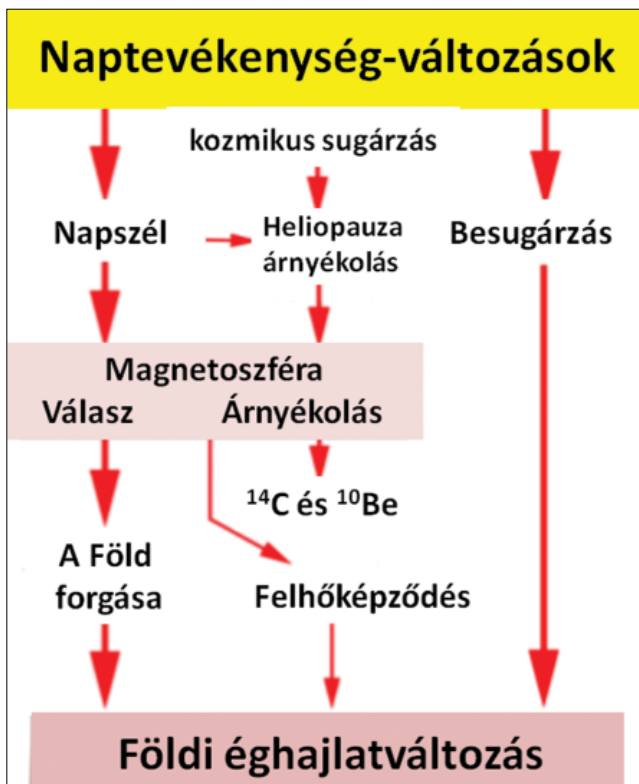
ben az ún. kis jégkorszak a B0 nevet kapta. A Dansgaard–Oeschger- (D–O) eseménynek nevezik a legutóbbi mintegy százezer év (eljegesedés) idején tapasztalt 20–25 hirtelen és nagy (10 °C/évszázad) mértékű felmelegedést. A tengervíz sótartalmának periodikus változásaival kapcsolatos Heinrich-események pedig nagyjából 12 ezer évenként következnek be. A legutóbbi százezer évben hat-nyolc Heinrich-esemény nyomait mutatták ki (jégszállította hordaléklerakódások ismétlődése alapján). A H0 jelölésű Heinrich-esemény a 12 ezer évvel ezelőtti Younger Dryas időszak volt, amikor még a Golf-áramlat is „megfordult”. A Bond-, A D–O- és a Heinrich-események egy része minden bizonnyal szub-Milankovics-esemény, de nem mindegyike az. Az okokat illetően találgatásokra vagyunk utalva (2. táblázat).

Néhány lehetséges extraterresztrikus hatótényező

A lehetséges külső okok számbavételekor lényegében a teljes világegyetemet figyelembe kell vennünk, mindenek-

előtt persze a Nap (és a Naprendszer) folyamatait. A 9. ábrán Mörner (2013) javaslata látható. (Nils-Axel Mörner mutatta ki – a földtörténeti negyedidőszakkal foglalkozó INQUA, azaz az International Union for Quaternary Research tengerszintváltozási bizottságának elnökeként –, hogy a Maldiv-szigeteken nincs tengerszint-emelkedés.)

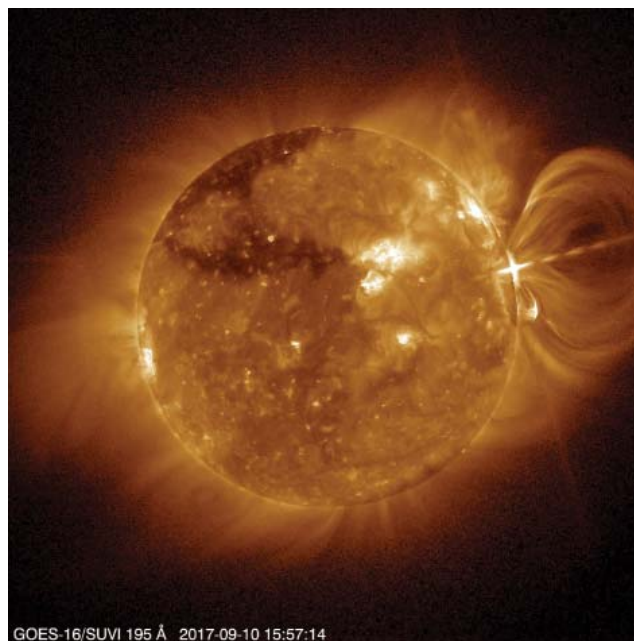
A központi szerepet Mörner (2013) rendszerében is a naptevékenység játssza, meghozza két, egymástól elkülönülő módon. Az egyik a fénysugárzás és annak változása. A földi légkör tetején a fénysugárzás intenzitása ezerháromszáz-hatvan és valamennyi W/m^2 . Ennyi az átlagos teljesítménysűrűség: négyzetméterenként 1,3 kW teljesítményt, azaz négyzetméterenként és másodpercenként 1,3 kilojoule (239 kalória, fél kilogramm víz forráshőjének megfelelő) energiát jelent. A napműködés egy másik megnyilvánulási formája az ún. napszél: pozitív és negatív elektromos töltésű részecskék (zömmel protonok és elektronok) igen változó sűrűségű és sebességű árama. A napszéláramlőketek kölcsönhatásba kerülnek a földi mágnesstérrel. A mágnesztér egyrészt árnyékol, másrészt impulzusnyomatékokat is felvesz, aminek következtében nagyon picit még a Föld forgási sebessége is megváltoz-



9. ábra | Egy lehetséges (és nem teljes) kapcsolatrendszer a naptevékenység és a földi éghajlat változása között. *Forrás:* Mörner 2013

Figure 9 | A possible (and not complete) relationship between solar activity and terrestrial climate change. *Source:* Mörner 2013

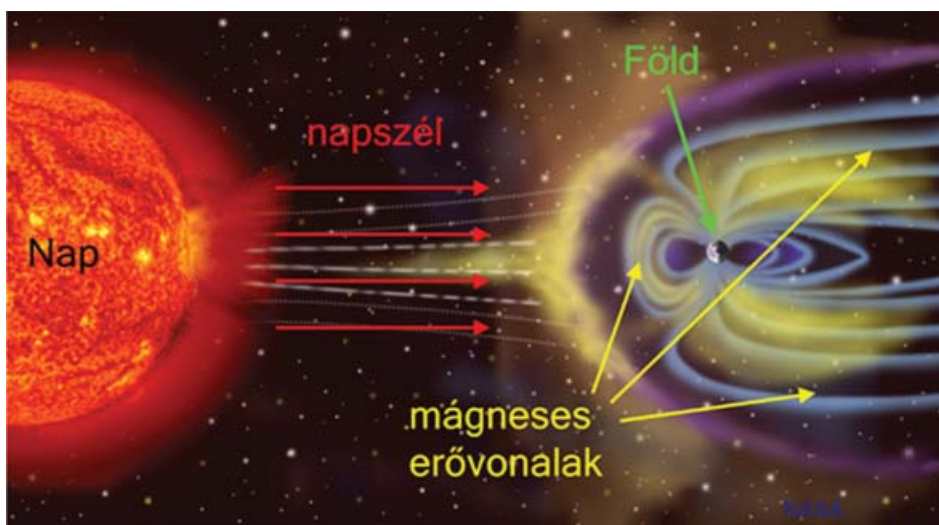
hat. A Föld forgási sebességében tapasztalható apró változások az impulzusnyomaték (angular momentum, „perdület”) törvénye értelmében kihatnak a légköri áramlás rendszerére. Harmadrészt, az ún. heliopauza (a helio-



10. ábra | A GOES-16 műhold által 2017. szeptember 10-én felvett SUI ultraibolya napkép: napkitörés és X8,2-es fler (SUI: „Solar Ultraviolet Imager”). *Forrás:* Seaton and Darnel 2018 (a szerző engedélyével)

Figure 10 | SUI ultraviolet sun image taken by GOES-16 satellite on September 10, 2017: solar flare and X8.2 fler (SUI: “Solar Ultraviolet Imager”). *Source:* Seaton and Darnel 2018 (courtesy of the author)

szféra külső határa, amelyen belül a kozmikus sugárzás szempontjából a Nap az uralkodó) időben változó mértékben árnyékolja a galaktikus kozmikus sugárzást, ami egyrészt jellegzetes radioaktív izotópképződési időszakokban nyilvánul meg (¹⁴C-, valamint a múltbeli naptevékenység nyomait jól megőrző ¹⁰Be-izotópok formájában),



11. ábra | A Nap, a napszél, a Föld és a mágneses erővonalak sematikus rajza. *Forrás:* NASA, www.ggki.hu. A napszél mindig a Nap felől érkezik, a kozmikus sugárzás mindenfelől

Figure 11 | Schematic drawing of the Sun, solar wind, Earth and magnetic field lines. *Source:* NASA, www.ggki.hu. The solar wind always comes from the Sun, the cosmic radiation from all over

másrészt befolyásolja a felhőképződéshez szükséges kondenzációs magképződést. A besugárzás, a földforgás, a felhőképződés változása mind-mind befolyásolják a földi éghajlatot. Mörner (2011) vázlatánál jóval összetettebb sejtések is léteznek. E vázlat csupán egy példa kíván lenni a rendszerben gondolkodásra.

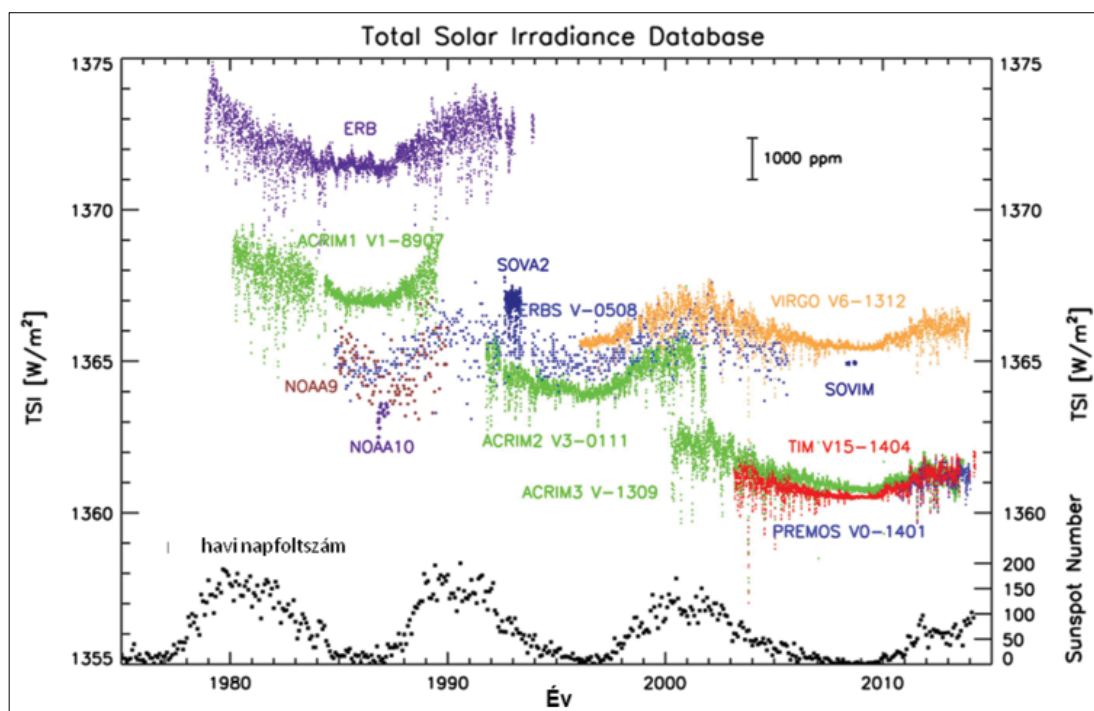
A NASA és az ESA weboldalain napképek tömegét lehet találni. Ilyen például a legutóbbi (2010–2020 közötti) teljes napciklus ultraibolya-képsorozata (NASA 2020), a 2020. november 29-ei koronakitörés (CME) LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) C3 képe (Phillip 2020). A látható fény tartományában teljes napfogyatkozás idején plazmaszerű képződmények tárulnak fel (Druckmüller 2017). A 10. ábra a hurrikánok és földrengések kiváltójaként meggyanúsított 2017. szeptember 10-ei napkitörés UV-képét mutatja.

A napszél és a Föld mágneses terének kölcsönhatását illusztráló 11. ábra közismert. A napszél („szoláris kozmikus sugárzás”) a Nap irányából létezik, a galaktikus kozmikus sugárzás pedig mindenfelől. Amennyiben a 2020. november 29-ei koronakitörés (CME) köpete a Föld felé irányult volna, az emberiséget leginkább foglalkoztató probléma ma nem a COVID lenne...

A Nap fényességváltozása. A Nap fényességváltozását csak a légkör fölött (műholdról) lehet megmérni. Ilyen megfigyelések 1979 óta vannak (12. ábra). A műholdak érzékenysége egy idő után leromlik; időnként új műholdakat lőnek fel, újabb és újabb műszerekkel felszerelve. A különböző műholdak adatai jellegükben hasonló képet mutatnak, értékükben azonban valamivel eltérnek egy-

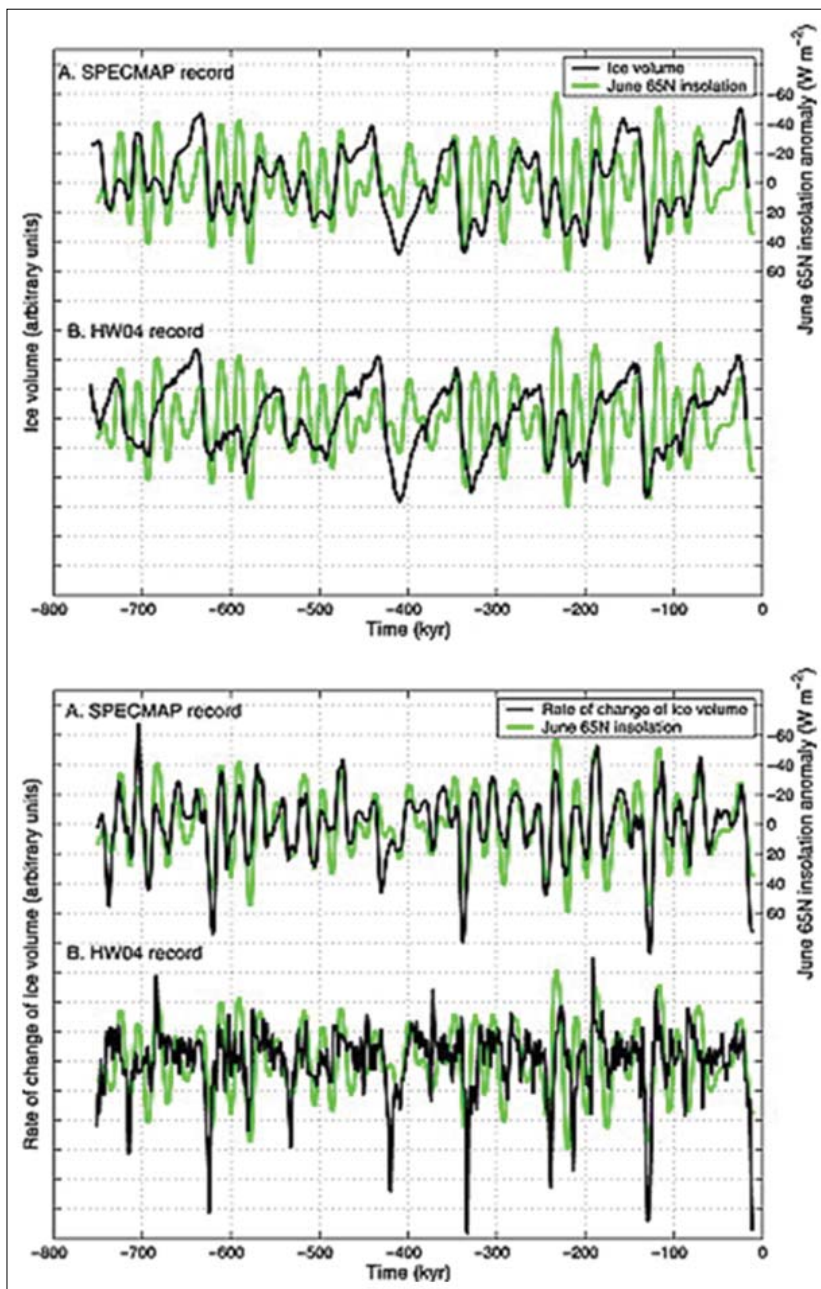
mástól. Egyetlen kompozit idősorra egyesítésük előtt a mért adatokon korrekciók sokaságát kell végrehajtani (többek között a változó Nap–Föld távolság miatt). A bizonytalanságok miatt egymástól igen eltérő évtizedes trendeket lehet felrajzolni. A naptevékenység műholdkorszak előtti alakulását napfoltadatok, faévgyűrű-, ^{10}Be - és stabilizotóp-vizsgálatok (ún. proxy, azaz „helyettesítő” adatok) alapján lehet következtetni. A TSI- és proxy-adatokból napsugárzás-változás 1600–2000 közötti alakulására sokféle, egymástól lényegileg különböző lehetséges idősort lehet felrajzolni, és egyikről sem állítható, hogy alaptalan lenne. Connolly et al. (2021) nyolc változatot különített el. Az ún. mainstream verzió szerint a napsugárzásban az elmúlt évszázadok során csak jelentéktelen (1 W/m^2 -en belüli) ingadozások történtek. Más kompozitadatsor-változatok (a nyolcból négy verzió) szerint a TSI-változás tartománya 10 W/m^2 -hez közelít. Mind a nyolc változat megegyezik abban, hogy a Nap a 20. század utolsó éveiben sötétt a legfényesebben.

A műholdas TSI-adatok szorosan követik a naptevékenységgel többé-kevésbé arányos számban előforduló havi napszámadatokat. Érdekes azt is megjegyezni, hogy amikor több a napfolt (az ábrán nagyjából 1979–1980, 1990–1991, 2001–2002, 2013–2014 táján), akkor nemcsak a TSI-értékek magasabbak, de számos lefelé kiütő TSI-adat is látható. A szélsőségesen kis értékeket kivétel nélkül napkitörések idején mérték. A mainstream irányzatban a látható fény tartományában sajnos a kiütő adatokat is figyelembe vevő, lecsökkent energiaárammal számolnak, a megnövekedett naptevékenységből eredő egyéb erőhatásokat ugyanakkor teljes mértékben elhanyagolják.



12. ábra | TSI műholdadatokat (TSI: Total Solar Irradiance, a Naptól a légkör tetejére érkező fényenergia-áram, W/m^2). Forrás: Kopp 2016

Figure 12 | TSI satellite data (TSI: Total Solar Irradiance, W/m^2 light energy flux from the Sun to the top of the atmosphere). Source: Kopp 2016



13. ábra Fent: A 65. északi szélességre számított júliusi besugárzásanomália időszora (W/m^2), valamint proxy adatokból becült SPECMAP és HW04 jég-tömeg-idősor az elmúlt 750 ezer évben. Lent: A 65. északi szélességre számított júliusi besugárzás- és proxy adatokból becült SPECMAP és HW04 jég-tömeg-változási időszor az elmúlt 750 ezer évben. *Forrás és további részletek:* Roe 2007

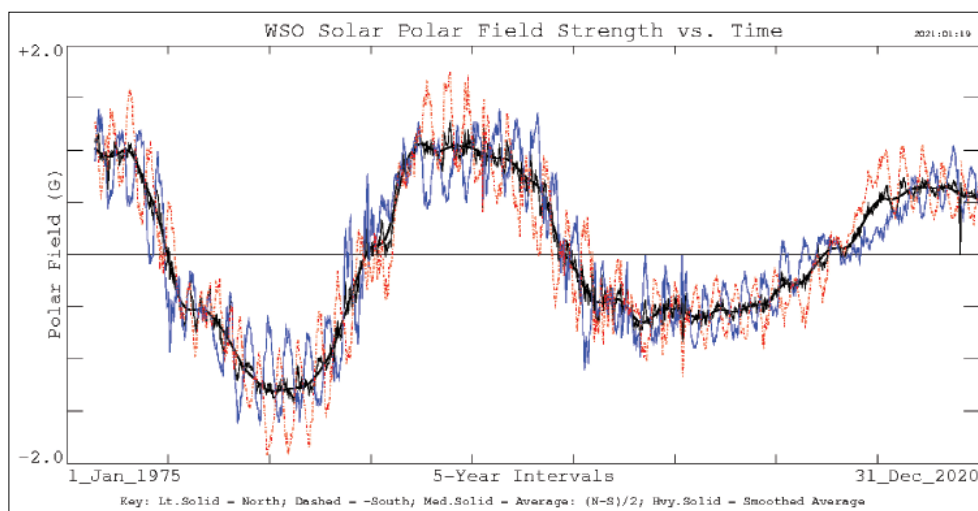
Figure 13 Above: June 65N insolation anomaly (in W/m^2) and two different (SPECMAP and HW04) global ice volume reconstructions, over the last 750 kyr. Below: June 65N insolation anomaly (in W/m^2) and two different (SPECMAP and HW04) global ice volume change reconstructions, over the last 750 kyr. *Source and details:* Roe 2007

Pedig a Naptól kibocsátott teljes energia a napkitörés során minden valószínűség szerint nagyobb annál, mint amennyi a Nap nyugodt állapotában hagyja el a csillagfelszínt.

A besugárzás hosszú távú – a Milankovics–Bacsák-elmélettel leírt – változása a sarki jég-tömegekre is hatással van. A kapcsolat világosan látható, amennyiben a besugárzással nem a jég-tömeget, hanem a jég-tömeg időbeli változását (matematikailag: időbeli deriváltját) ábrázolják együtt. A 13. ábra az északi szélesség 65. fokán a 750 ezer

évre visszamenően mutatja a napsugárzás jég-tömeg-változásra kifejtett hatását. Roe (2007) két egymástól független megközelítés esetében (SPECMAP: Imbrie et al. 1984 és HW04: Huybers és Wunsch 2004) is nagyon hasonló eredményt kapott.

Szoláris mágneses tér. A Nap mágneses tere rendkívül dinamikus, nagyjából 22 éves (kétszeres napfoltciklusnyi) periódusidővel változik. A NASA vizualizációs stúdiója weboldalán jobbnál jobb képekkel és videókkal illusztrál



14. ábra FA Nap sarkvidékeinek mágneses tere 1975. január 1. és 2020. december 31. között gauss (G) egységekben. Kék folyamatos görbe: Észak; piros szaggatott görbe: Dél; fekete görbe: (Észak–Dél)/2; fekete sima görbe: simított átlag. *Forrás:* WSO 2021

Figure 14 The polar magnetic field of the Sun between 1 January 1975 and 31 December 2020 in Gaussian (G) units. Blue continuous line: North; red dashed line: South; black line: (North–South)/2; Black smoothed line: smoothed average. *Source:* WSO 2021

rálják a nyitott pozitív és nyitott negatív, valamint a zárt erővonalak folyamatos hullámzását (NASA SVS 2018). A Nap poláris (sarkokra jellemző) mágneses terének alakulását a 14. ábra mutatja. Két nullátmenet között 11 év, azaz egy teljes naptevékenységi ciklus telik el. Akármelyik mágneses polaritást veszik fel a sarkok, az erős napmágneses tér „elnyomó” hatással van a naptevékenységre. A naptevékenységnek a poláris mágneses tér nullához közeli értékei idején vannak maximumai.

Napszél. A naptevékenység (solar activity) által okozott földi geomágneses vihar közismert jelenség. Kevésbé ismert, hogy – a legelső vizuális műholdmegfigyelések szerint – hatásukra statisztikusan megnő a felhőborítottság (Illés-Almár 2004).

Még kevésbé ismert a sarkvidéki sztratoszféra (a 10–50 km magasságú térrész) hirtelen felmelegedésének jelensége (SSW, Sudden Stratospheric Warming, Butler et al. 2017). A hirtelen felmelegedések nemcsak azért érdekesek, mert a hosszú sarki éj (tél) idején alakulnak ki (amikor a napsugárzás gyakorlatilag nulla W/m^2 intenzitású), hanem elsősorban azért, mert a napciklus végén a leggyakoribbak és a legintenzívebbek. Asikainen et al. (2020) összefüggést talált a téli időjárást meghatározó jelenség, az ún. sarki örvény (Polar Vortex, a sarkvidék fölötti sztratoszférában minden télen kialakuló kialakuló erős nyugati szél) változásai és az úrból érkező nagyenergiájú elektronbecsapódások („precipitáció”, electron precipitation) között. A sarki örvény legdrámaibb változásai közvetlenül a sztratoszféra hirtelen felmelegedéseit megelőző időszakok idejére esnek. A sarki örvény, továbbá a NAO, a NAM és az AO (mindegyikük, sőt a Polar Vortex és az SSW is szerepel a 3. táblázatban) azokon a teleken erősebb, amikor a napszél az átlagosnál gyorsabb. Ez utóbbi a napciklus hanyatló szakaszában tapasztalható. A jelenség összefüggést mutat a szoláris mágneses tér cik-

likus szerkezeti evolúciójával. Akkor a legerősebb, amikor a koronalyukak alacsony napszélességekre – a gyors napszél forrás helyeire – tolódnak. Az elektronprecipitáció által okozott kémiai változások a mezoszférában és a sztratoszférában ózonvesztést is okoznak.

Kozmikus sugárzás. A Napból érkező, általában kisebb energiájú komponensekből álló, ún. szoláris kozmikus sugárzás mellett a csillagközi térből nagyenergiájú töltött részecskékből álló galaktikus kozmikus sugárzás is érkezik a Földre. Látnunk kell, hogy a Nap és az egész helioszféra üstököszerűen, kb. 26 km/s sebességgel száguld a csillagközi térség ionizált gáztömegében. A galaktikus és szoláris kozmikus (ionizáló) sugárzás sokféle kölcsönhatásban állnak egymással; a szoláris kozmikus sugárzás intenzitásának növekedésekor a Naprendszeren (a helioszférán) belül a galaktikus kozmikus sugárzás szintje csökken. A galaktikus kozmikus sugárzással szemben a helioszféra hasonlóképpen viselkedik, mint ahogyan a földi mágneses tér a napszéllel szemben. Következésképpen a kozmikus sugárzás földfelszínen megfigyelt időbeli változásában a helioszféra és a földi mágneses tér változása is tükröződik. Lehet mondani, hogy „kettős pajzs alatt” élünk (AEKI 2011), de talán közelebb áll a valósághoz, ha – japán kutatók (Kitaba et al. 2017) nyomán – mindkét védelmet ernyőnek nevezzük. (A japán napernyő festhető papírból, díszíthető szalvétatechnikával készül. Aprólékos kidolgozású, nyitható és csukható, de sérülékeny.)

A galaktikus kozmikus sugárzás befolyásolhatja a földi éghajlatot. Svensmark és Friis-Christensen (1997) például a felhőborítottságban 11 éves periódusidővel jelentkező, 2%-os ingadozást találtak. Magyarozatuk szerint a helioszféra által változó intenzitással „beengedett” nagyenergiájú kozmikus sugárzás olyan légköri ionokat kelt, amelyek elősegítik a felhőképződéshez szükséges kondenzációs magok kialakulását és növekedését. A felhőborított-

ság 2%-os változásának a klímaváltozási hatása összemérhető a CO₂-klímaérzékenységgel. A hipotézis ellenőrzésére a CERN projektet indított (Cosmics Leaving Outdoor Droplets, CLOUD 2016). Eleinte alátámasztották, később cáfolták a hipotézist. Svensmarkék friss publikációja szerint (Svensmark et al. 2017) az elmélet állja a sarat.

Égi mechanika. A Föld forgástengely-jellemzői (dőlésszög, precesszió és nutáció) égi mechanikai okokból változnak. A földi éghajlatra gyakorolt következményeket a Milankovics–Bacsák-elmélet összegezi (Cionco, Soon 2017). Miután a Naprendszer tömegéhez a bolygók (mindenekelőtt a nagybolygók) is adnak némi hozzájárulást, a Naprendszer tömegközéppontja nem esik egybe a Nap középpontjával. Sőt, nagyon sokszor nem is a Nap belsejében van. A tömegközéppont ma (és az elkövetkezendő 5-6 évben) a Napon kívül (2021-ben a Nap középpontjától kétszeres Nap-sugárnyi távolságban) található. Időnként fellángoló viták tárgya, hogy Nap körül keringő nagybolygók (elsősorban a Jupiter és a Szaturnusz) által keltett égi mechanikai hatások adhatnak-e ritmust a Nap működésének. Efféle kérdésekkel foglalkozott a *Pattern Recognition in Physics* című folyóirat naprendszer-fizikai lapszáma 2013-ban. A megjelenést követően a folyóiratot megszüntették (PRP 2014, <https://www.pattern-recognition-in-physics.net/>)

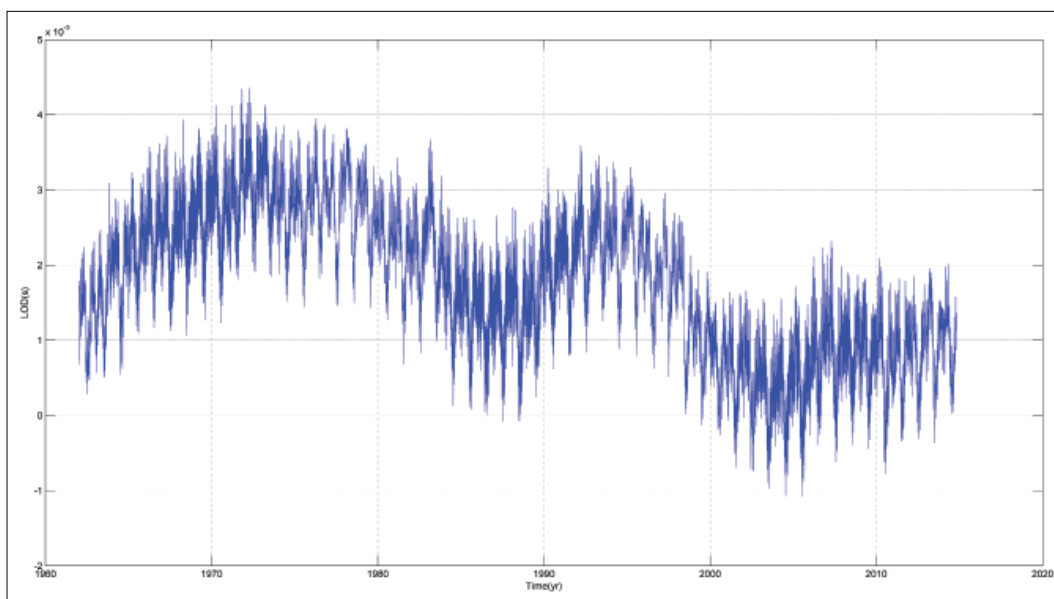
A Föld belsejében zajló folyamatok lehetséges éghajlati hatásai

Azon túlmenően, hogy a Földet érő külső hatásoknak közvetlen éghajlati következményei lehetnek, a Föld bel-

sejének folyamatait is befolyásolhatják. Még a meteor- és aszteroida-becsapódásoknál nagyobb „csudák” is megtörténhetnek, például a Földet állítólag átlugató CUDO-k (Compact Ultra Dense Object, lengyelül „cud”, Rafelski et al. 2013). És ott munkálnak a folyamatosan változó külső erők (pl. gravitációs árapályúrlódás) is.

Forgásidő-változás. A Föld tengely körüli forgásideje a naphossz (angolul Length Of Day, röviden LOD), körülbelül 86400 másodperc. A LOD piciny változásait az IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) nevű szervezet 1962 óta atomóra-pontossággal gyűjti. A 15. ábra az 1962-től 2015-ig mért adatokat mutatja. Az már régóta ismert, hogy a szelek befolyásolják a LOD-ot. Az Andok nyugati oldalának nekifeszülő szelek például gyorsítják, a keleti szelek lassítják a Föld forgását. (A szelek pedig fékeződnek.) A kulcs az impulzusnyomaték-tétel (vagy perdülettétel): a fizika egyik alapvető megmaradási elve. Az impulzusnyomaték-megmaradás népszerű illusztrációja a piruettozó műkorcsolyázó esete, aki saját maga forgását gyorsítani és lassítani is képes.

Francia geofizikusok (Le Mouél et al. 1992, 2010) és sokan mások (pl. Kolaczek 1995, Wilson 2006, Salstein 2019) azt mutatták ki, hogy szoros összefüggés van a naptevékenységi ciklus és a Föld forgásidő-változása között. E tényből nyilvánvaló, hogy a naptevékenység a földi légkörre is fejt ki valamiféle hatást. Logikus, hogy a klíma-rendszer impulzusnyomaték-rendszerébe a légkör és a szilárd Föld impulzusnyomatéka mellé elvileg felveendő a napszél forgatónyomatéka, valamint a Föld folyadék halmazállapotú részeinek (szárazföldi vizek, óceánok, külső földmag) impulzusnyomatéka is. Ha az impulzusnyomatékot *AM*-mel (Angular Momentum) jelöljük, és



15. ábra | LOD 1962 és 2015 között millisekundumban (ms, 10⁻³ s) mért változásában tisztán látható egy kb. 22 éves periódusidő. *Forrás:* Shen, Peng 2016 (a szerző engedélyével)

Figure 15 | LOD changes, measured in milliseconds (ms, 10⁻³ s) between 1962 and 2015 clearly shows an approx. Period of 22 years. *Source:* Shen, Peng 2016 (courtesy of the author)

a szilárd (Solid) Földre *SAM*, a földfolyadékokra (külső magra, óceánokra, szárazföldi vizekre) *LAM* (Liquid), a légkörre (Atmosphere) *AAM*, a külső (External) forgatónyomatéokra *EAM* rövidítést alkalmazunk, az impulzusnyomaték (perdület) megmaradására a következő egyszerű összefüggés adódik:

$$SAM + LAM + AAM = EAM.$$

Amennyiben $EAM = 0$, akkor

$$SAM = - (LAM + AAM).$$

A LOD a szilárd Föld impulzusnyomatékának változásait (*SAM*) méri. A LOD klímatudományi jelentősége felmérhetetlen, hiszen megőrökíti a *LAM* (mindenelőtt a földmag impulzusnyomatéka) és az *AAM* eredőjét. Az impulzusnyomaték szempontjából egy roppant kiszolgáltatott klímarendszer rajzolódik ki, különösen, ha még az *EAM*-mal is számolni kell.

2021 elején sajtóhírekben olvashattuk, hogy a Földnek 2020-ban 28 rekordsebességű napja volt (Yirka 2021). Az IERS előrejelzései szerint 2021-ben a rövidebb idő alatt eltelt napok száma tovább nő. Azt, hogy a földforgás ily különös alakulását külső vagy belső erők okozzák-e, nem tudjuk.

Közismert, hogy a globális légkörzés cellajellegű (Hadley-cella, Ferrel-cella, Poláris cella) alapvetően a Föld forgása alakítja ki. A földforgás piciny megváltozásai nyilvánvalóan befolyásolják a cellák elhelyezkedését és a bolygóléptékű óceáni és légköri Rossby-hullámokat. Az óceáni távkapcsolatok némelyikét bizonyítottan földforgássebességi változások okozzák.

Geodinamika. Evidenciának vesszük, hogy a Föld belsejének – a kisebb-nagyobb szabálytalanságokat leszámítva – gömbhéjas szerkezete van. A 21. század földfizikája az egyre nagyobb belső aszimmetriák megismeréséről szól: újszerű megközelítések jelennek meg a lemeztectonikáról, a litoszféra–asztenoszféra határfelületről (pl. Chen et al. 2021), a földkéregcsíkokról (plume-król), a földmagról, mindenelőtt a külső mag folyadékdinamikájáról (pl. Hide 2000), amely elvileg a Föld forgására és mágneses terére is kihat. Jól tudjuk, hogy a Bibliában számos, az ember által ténylegesen megtapasztalt természeti jelenség leírása is megtalálható. Vajon a „Megállt a nap az ég közepén, nem sietett lenyugodni majdnem egy teljes napig” mondat (Józsúé 10, 13) középük tartozik-e? Mert ha igen, mai tudományos megfogalmazásban ez azt jelentené, hogy a litoszféra megcsúszhat az asztenoszférán. (Sosem gondoltam volna, hogy az asztenoszféra elektromos vezetőképesség-vizsgálatának ekkora jelentősége volna.)

A Föld belsejéből a felszínre jutó hő területi eloszlása egyenetlen. A geotermikus hő ugyan csak tizedes része annak, ami a Napból a légkör tetejére érkezik ($0,1 \text{ W/m}^2$, szemben az 1300 W/m^2 -rel), de ez sem jelentéktelen. Azt a jelenséget például, hogy az Antarktisz jégtömegének kizárólag a nyugati része fogy (a déli sarkvidék egyéb

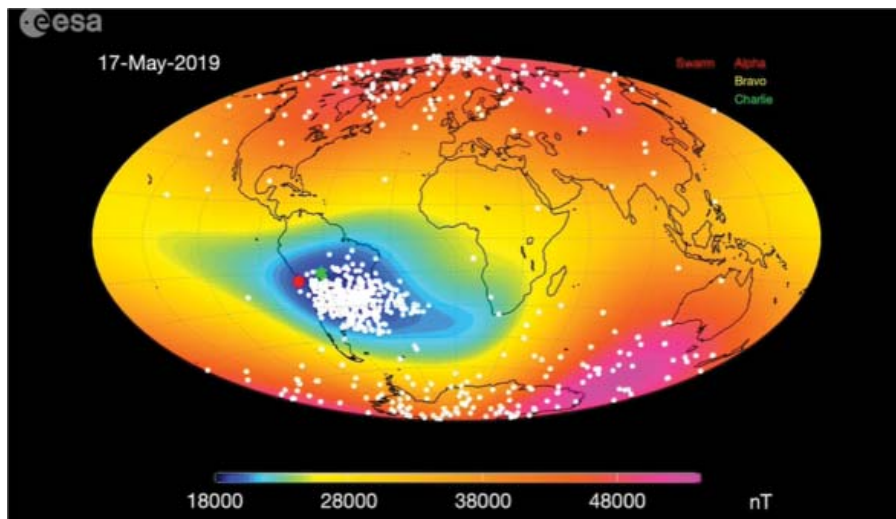
részein inkább hízik a jég), geodinamika (azon belül magmatizmus-vulkanizmus) okozza (Kiss, Földváry 2017, Martos 2017).

A sztratoszférába lövellt kénsav, aeroszol stb. révén a vulkánkitörések lehűlést („vulkanikus telet”) képesek okozni. A különféle VEI-méretű vulkánkitörésekről szóló történelmi dokumentumok alapján a kitörések gyakorisága ciklikus jelleget mutat. (VEI: Volcanic Explosivity Index). Azt, hogy mik lehetnek a ciklicitást kiváltó okai, nem tudjuk. Az utolsó nagyobb kitörés az indonéziai Tambora vulkáné volt (1815), amely Európában, így Erdélyben is éhínséget okozott (Kósa 2008).

Még a nagy földrengésekkel kapcsolatban is komolyan felvetődött, hogy esetleg külső hatások triggerelik a kattanásukat. Erre utal, hogy sok rengés előtt már néhány nappal jelentősen megnő az ionoszféra elektrontartalma (Total Electron Content, TEC). Az egyik lehetséges modell az ún. LAIC, azaz Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (litoszféra–atmoszféra–ionoszféra csatolás, Pulinets, Ouzounov 2010, Oikonomou et al. 2021, Pulinets et al. 2021). Maguknak a földrengéseknek szerencsére nincs közvetlen éghajlatmódosító hatásuk. Kattanásuk azonban azonnal és tényszerűen okoz (lokális, de nagy személyi és gazdasági veszteségekkel járó) katasztrófát, ellentétben a klímamodellkezés által jelzett hipotetikus éghajlatváltozással.

Geomágneses tér. A Föld mágneses terét alapvetően a külső mag folyadékdinamikája alakítja ki és tartja fenn. A kívülről érkező töltött részecskék árama elleni védelem erőssége a geomágneses tér intenzitásával arányos. A földtörténetből (mindenelőtt paleomágneses geofizikai vizsgálatokból) tudjuk, hogy időnként (átlagosan 250 ezer évente) a Föld mágneses polaritása ellenkezőjére fordul. A pólusváltás idején a napszél szinte akadálytalanul jut a Föld felszínére. A friss publikációk egyike a légköri oxigén elfogyásának lehetőségét is felveti. A mai polaritás – noha voltak benne kilengések, sőt egy rövid átfordulás is – már 768 ezer éve áll fenn.

A Föld mágneses terének csökkenésével a kétezres évek elején tapasztalt média-közérdeklődés hatására már korábban foglalkoztunk (Szarka et al. 2003). Azóta (és különösen a legutóbbi években) a geomágneses tér csökkenése és a pólusok vándorlása még jobban felgyorsult. Az abszolút érték csökkenése a Földön meglehetősen egyenlőtlenül oszlik meg. Magyarországon az elmúlt évszázadban lényegében alig változott, de Buenos Airesnél az 100 évvel ezelőtti értéknek mindössze kevesebb mint felére zsugorodott. A dél-amerikai tércsökkenés szembevetően látszik az ESA Swarm műholdprojektje keretében készült globális térképen (16. ábra, ESA Swarm 2020), amely a földi mágneses tér abszolút értékét a műhold magasságában (450 km-en) mutatja. A térképen feltüntetették a kozmikus sugárzásból észlelt beütéseket is. A kozmikus sugárzási beütésszám a Dél-atlanti anomálián való áthaladáskor ugyanannyi (vagy több), mint az északi és a déli sarkvidéken.



16. ábra A földi mágneses tér abszolút értéke nanotesla (nT) mértékegységben (1 tesla = 10^{-4} gauss, $1 \text{ nT} = 10^{-9}$ T, $1 \text{ G} = 10^5$ nT). A pontok 2014 elejétől 2019. május 17-ig észlelt a kozmikus sugárzási beütéseket mutatják. *Forrás:* ESA Swarm 2020

Figure 11 Global distribution of the absolute values of the Earth's magnetic field in nanotesla (nT) units (1 tesla = 10^{-4} gauss, $1 \text{ nT} = 10^{-9}$ T, $1 \text{ G} = 10^5$ nT). The dots show cosmic radiation impacts detected from early 2014 to May 17, 2019. *Source:* ESA Swarm 2020

A mágneses tér csökkenése mellett az is megfigyelhető, hogy az északi földrajzi sark környékén lévő mágneses pólus egyirányú – Kanadából Szibéria felé tartó – vándorlása nemigen akar megállni (WDC 2021). A legutóbbi geomágneses polaritásváltás a pólusok mintegy ötszáz éven tartó, egyre nagyobb mértékű imbolygásával kezdődött, majd a pólusok felcserélődése ezt követően kevesebb mint száz év alatt ment végbe (Sagnotti et al. 2014).

A legutóbbi 70 ezer évből a 3. táblázatban felsorolt geomágneses kilengéseket (geomagnetic excursion: ki-mozdulás, „kirándulás”) ismerjük. A Laschamp-esemény idején néhány száz évig meg is fordult a geomágneses tér polaritása. A Laschamp- és a Mono Lake-eseményt még a Neander-völgyi ősember kihalásával is összefüggésbe hozták (Valet, Valladas 2010).

A geomágneses tér (a szoláris és galaktikus „szél”, „eső”, „sugárzás” ellen úgy-ahogy védő földi „ernyőnk”) az efféle

3. táblázat | Geomágneses rándulások. A Laschamp-eseménykor ideiglenes pólusátfordulás is történt (Korte et al. 2019)
Table 3 | Geomagnetic excursions. During the Laschamp event a temporary pole reversal occurred (Korte et al 2019)

Név	BP ezer év	Forrás
Göthenburg	12,4–12,4	Mörner 1977
Hilina Pali	19,6–17,0	Liu et al. 2020
Lake Mungo	30,8–28,1	Barbetti, McElhinny 1976
Mono Lake	34,5–35,0	Liu et al. 2020
Laschamp	42,0–39,5	Liu et al. 2020
Norwegian-Greenland Sea	68,9–61,0	Liu et al. 2020

nagy eseményektől eltekintve is örökösen változik. A geomágneses tér idő szerinti deriváltjában jelentkező szélsőértékeket a fizikából vett *jerk* (a gyorsulás időbeli változására utaló „rándulás”) fogalom alapján geomágneses jerknek nevezzük. Vannak közöttük globálisan észlelhetők, de olyanok is, amelyek csak regionálisan jelentkeznek. E jelenség is magyarázatra vár (Aubert, Finley 2019).

Az ún. globális elektromos áramrendszer (Global Electric Circuit, GEC) generátorát az egyenlítői viharzóna villámai jelentik, egyéb részeit pedig az atmoszféra, az ionoszféra, az elektrojetek (egyenlítői és sarki áramok, equatorial electrojets, auroral electrojets, Birkeland currents) és a földfelszín alatti térség jelentik (Tinsley 2000, Rycroft et al. 2000). A GEC-en keresztül közvetlen kapcsolat létesül a szoláris plazmaesemények és a földi időjárási események között. A jelenség intenzív kutatások tárgya (Tinsley 2020, NCAR 2021).

A valamikori MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetből (majd CSFK Intézetből) 2021-ben létrejött Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet a geoelektromosság és a geomágnesség terén felhalmozott korábbi tudás alapján (Verő et al. 2009), széles nemzetközi együttműködésben építkezik tovább. Ezt friss GEC-publikációk is mutatják (pl. Williams et al. 2020, Prácser et al. 2020, Arnone et al. 2021). A múltban gyökerező jövő a soproni földfizika (geodézia+geofizika) egészére érvényes. A legfrissebb példa: Szűcs et al. 2021.

Antropogén hatások

Az ember (mint a bioszféra része) kölcsönhatásban él a természettel. Energia-, ásványianyag-, víz- és talaj-

felhasználásával (a földfelszín átalakításával), aeroszol- és üvegházgáz-kibocsátásával (mindenekelőtt CO₂- és H₂O-emisszióval) hozzájárulhat a klímaváltozáshoz is. A legkisebb beavatkozás (pl. egy faültetés) is okoz helyi klímaváltozást. Az ember fizikai teljesítménye 100-szorosának megfelelő teljesítménnyel alakítja a természetet. Természeti beavatkozásának mértéke első közelítésben a primér energiafogyasztás nagyságával jellemezhető. Az antropogén energiafelhasználás azonban még mindig jelentéktelen a természeti energiákhoz képest. Az emberiség ipari forradalom óta integrált teljes primérenergiafogyasztása körülbelül annyi (40 zettajoule), mint amennyi egy nagy földrengés idején összesen felszabadul. (A 2004. december 26-i indiai óceáni nagy földrengés teljes energiája kb. 40 ZJ volt.) Mások az emberiség széndioxid-emisszióját mondják meghatározónak. Erről a tények a következők: 1960 óta az ember 170 ppm-nyi CO₂-t bocsátott ki, a természet pedig 5700 ppm-nyit. Be kell látni, hogy a légköri CO₂-tartalom alakításában az ember alárendelt szerepet játszik (Salby 2011, Harde 2017, Berry 2019). A természet miért ne rendelkezhetne dinamikusan változóképesseggel a széndioxid-kibocsátás és -abszorpció vonatkozásában is?

Az ember a földi természet töredékét jelentő bioszféra egészére meghatározó jelentőségű (Szarka 2019). A földi éghajlatváltozást (sőt, teljes földi létünket) illetően nem mindegy, hogy az ember szerepét miként ítéljük meg. Az antropogén klímatervezők megismerése lehetetlen akkor, ha a természeti hatótényezőket nem ismerjük eléggé. „A mostani klímaváltozásra azt szoktuk mondani, hogy ilyen sebességű klímaváltozás nem nagyon fordult még elő. Ez így valószínűleg nem igaz. Alapjában véve hasonlóan gyors változások voltak a földtörténeti múltban is, csak nem volt hozzá ilyen mértékű kihalási esemény, mint ami most látható az ember tevékenységének köszönhetően.” (Demény 2021). A Demény Attila-nyilatkozat egyrészt elismeri a természet hatalmas éghajlatváltoztató erejét, másrészt egy olyan érvvel hozakodik elő, ami az éghajlatváltozás tényétől és okaitól valójában független. A mai „kihalás”-nak ráadásul nincs egzakt definíciója. Számtalan faj bizonyítottan elpusztult legutolsó példányait senki sem látta. Talán inkább egyedszámcsökkenésről lehet szó.

A lehetséges okok egy teljesebb tárháza

Az eddigiekben az éghajlatot kialakító és annak változását befolyásoló lehetséges okoknak csak egy részét tekintettük át.

- A légkörből érintőlegesen foglalkoztunk a globális légkörzettel, a felhőzettel, a magaslégkörből az ionoszférával, de nem foglalkoztunk az üvegházhatással, az aeroszolokkal és a sugárzási mérleggel.
- Illusztráltam a bioszférával való érvelés ellentmondásosságát. Az olyan modell-előrejelzéseket, miszerint a fajok 1/3-a ki fog halni, célszerű lenne gondosan ellen-

őrizni. Az viszont tény, hogy a korallok és jegesmedvék pusztulására vonatkozó állítások valótlanok. A légköri CO₂-koncentráció-növekedés következményeként pedig globális zöldülés tapasztalható (IPCC 2019), ami klímaváltoztató tényező, feltehetően negatív visszacsatolással. Az ember energia-, ásványianyag-, víz- és talajfelhasználása (a földfelszín átalakítása), mindenféle kibocsátása (a földbe, vízbe, levegőbe, pl. aeroszolok) valamekkora léptékben és mértékben nyilván klímamódosító tényezők. Az invazív fajok terjedését és az ún. biodiverzitás-csökkenését az ember okozza, de mindkét folyamat független a klímaváltozás épp aktuális tendenciájától.

- Az óceáni folyamatok is mélyebb áttekintést igényelnének. Csupán a tengerszintváltozás és a távkapcsolatok sokasága került szóba, a nagy óceáni áramlások, a pH, a Henry-törvény (ami többek között az óceánok hőmérsékletfüggő CO₂-oldóképességét írja le) nem.
- A hó és a jég birodalmából (az ún. krioszférából) csupán a Mendenhall-gleccsert (mint koronatanút), Nyugat-Antarktisz és a jégtömegváltozás napsugárzással való közvetlen földtörténeti összefüggését említettem, minden egyéb kérdés (pl. az albedo) kimaradt.
- A Föld belsejének dinamikus folyamatai között szóba került a belső mágneses tér, bolygónk belső felépítésével kapcsolatos néhány bizonytalanság, a litoszférasztenoszféra határ, a Föld forgása, magmatizmusa és vulkáni tevékenysége, a globális elektromos áramkör, sőt – esetleges következményként – a földrengés is (de például az izosztázia már nem).
- A Nap működésének – fényenergia-áramában, napfoltokban, napfáklyákban, plazmafelhőkben, kifényesedésekben, koronakitörésekben, koronalyukakban, Parker-spirálban, napszélben, napmágneses (helioszférikus) térváltozásokban – és sok más hasonló tüneteiben (esetleg mikronóvának is nevezhető időnkénti szuperkitörésben) megnyilvánuló jelenségei közül csak néhány került szóba. Érdemes lenne boncolgatni a napműködés, a geomágneses tér és a globális földi klímaváltozással járó jelenségek (D–O-esemény, Bond-esemény, Heinrich-esemény) periodicitásának kapcsolatát. A vélt vagy valós 12 ezer éves katasztrófaciklus alapján egyesek néhány éven vagy évtizeden belül apokaliptikus eseményt várnak.
- A bolygó–Nap kapcsolatok közül a Naprendszer tömegközéppontjának vándorlása sokféle égi mechanikai hatás (a nem pejoratív „asztrológia”) egyik megnyilvánulása. Az, hogy van-e az égitestek között a gravitációs kölcsönhatáson túlmenő más (elektromos, elektromágneses) kölcsönhatás, ködbe vész. Tény, hogy a Naprendszer egyéb bolygói is szakadatlanul zajlik klímaváltozás. A Mars és a Hold felszíni kutatása földi klímátörténeti kulcselemekre is magyarázatot adhat.
- A Tejút, az univerzum egyéb részeiből érkező kozmikus sugárzás – e tanulmányban nem részletezett – esetleges változásai szintén befolyással lehetnek földi életünkre, de ezekről még bizonytalanabbak az ismeretek, hiszen

az univerzum jelenségeit – néhány űreszköztől eltekintve – a helioszféra és a földmágneses tér szűrőjén keresztül érzékeljük. A kozmikus sugárzás esetleges felhőképző hatása mellett olyan új fogalmak bukkannak fel, mint „FRB” (Fast Radio Burst, gyors – ms nagyságrendű – radiopulzusok), „kozmosz jet”, „elektromos univerzum”. Ezek szintén az ismeretlenség, esetenként a fantázia világába vezetnek.

A mindezeket tartalmazó komplex fizikai rendszerek leírásához statisztikus fizika is kell. E kérdéskörrel Fan et al. 2021 nyújt friss áttekintést.

Összefoglalás

A természetről, így az éghajlatváltozásról egyre több megfigyelési eredményt ismerünk, és feltérképeztünk egy sor lehetséges hatótényezőt. Ha az antropogén hatótényezőket A -val, a Földön kívüli (extraterresztrikus) hatótényezőket E -vel, a Föld belsejéből származókat I -vel (internal), a közöttük lévő – tetszőlegesen összetett és véletlenekkel terhelt – függvénykapcsolatot (azaz az időben és térben változó megfigyelési adatokat) M -mel jelöljük, a geofizikai inverziós kultúra alapján biztosan tudható, hogy az

$$f(A, E, I) = M$$

összefüggésnek csak akkor lehet a megoldása $A = f^{-1}(M)$, ha E és I nem változik sem időben, sem térben. A tanulmányban ennek az ellenkezőjére mutattunk tényeket.

Panthea rei: minden változik. Térben is és időben is. Néhány – valóban állandónak gondolható – fizikai állandón kívül semmi sincs, ami a természetben ne változna. Valójában fogalmunk sincs, hogy a földi éghajlat a Kárpát-medencében és globálisan hogyan alakul a következő években. Arról, hogy milyen dinamikával jelentkeznek a Föld belsejéből és a Földön kívüli térségből különféle hatótényezők, csak sejtések vannak. Az antropogén eredetű klímaváltozás hatását csak akkor ismerhetjük meg, ha a földi és extraterresztrikus természet földiklíma-változtató tényezőit empirikusan, objektívan és racionálisan vesszük figyelembe. Az emberileg lehetséges korrekt válaszok zömét a földfizikától reméljük.

A tanulmányban nyújtott földfizikai pillanatkép nem lehet teljes, hiszen naponta érkeznek hírek meglepőbbnél meglepőbb új felfedezésekről. Az áttekintés mindazonáltal közelebb viszi az olvasót „korunk legnagyobb kihívásának” megértéséhez és a helyzet reális értékeléséhez (ld. Függelék). Állítsuk a földfizikát – és rajta keresztül az egész földtudományt – mai periférikus helyzetéből a klímatudomány fókuszába!

Töredékes ismereteinkről Eötvös Loránd – Galiani ab-bét idézve – ekként vélekedett: „...a természet [dobó] koczkái ólmozva vannak, s fejünk fölött csak mosolyog rajtunk a bűvészet legnagyobbika”, azaz „...the dices of nature are leaded, and the greatest magician is just smiling at us over our heads.” (Eötvös 1877).

Köszönetnyilvánítás

Az összefoglaló helyzetkép megírását a valamikori MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet (2012–2019 között MTA CSFK GGI, 2019–2021 ELKH CSFK GGI) alapjain, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) keretein belül létrejövő Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) ihlette. Közvetlen motivációt a XXIV. Gyermekegyógyászati Konferencián 2021. március 4-én tartott „Leletek és diagnózis a klímaváltozásról” című és a 206. ENPOL Hétfőn elhangzott „Szemlvények a klímakutatás legújabb eredményeiből” c. előadásra való felkészülés adott. Köszönet a lektorok (Wesztergom Viktor, Zelei Gábor) hasznos észrevételeiért, kiegészítő megjegyzéseikért.

Függelék

A klímaváltozás definíciójának tisztázatlanságáról

Az ENSZ Környezetvédelmi Programja (UNEP, United Nations Environmental Programme) és a Meteorológiai Világszervezet (UN WMO, World Meteorological Organization) „a klímaváltozás tudományának értékelésére” 1988-ban létrehozták az IPCC-t (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Az UNEP 1992-ben – a Riói Egyezmény részeként – megalkotta az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményt (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change), amelyben az éghajlatváltozás („climate change”) fogalmát újradefiniálták: kizárták belőle a természeti eredetű éghajlatváltozásokat. Az UNFCCC definíció szerint „climate change means a change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity”. A teljes mondat magyarul a Keretegyezmény kihirdetéséről szóló 1995. évi LXXXII. törvény 1. cikkelyben, a fogalom meghatározások között található meg, és így hangzik: „Éghajlatváltozás jelenti az éghajlat megváltozását, ami közvetlenül vagy közvetve a globális légkör összetételét módosító emberi tevékenységnek tudható be, és ami az összehasonlítható időtartamokon belül megfigyelt természetes éghajlati változékonyságon túli járulékos változásként jelentkezik.”

Az IPCC hivatalos vezérelve – követve az UNFCCC definíciót – „az ember okozta éghajlatváltozás kockázatai tudományos alapjainak megismerése” („understanding the scientific basis of risk of human-induced climate change”) lett (IPCC 1998).

Saját dokumentumaik alapján levonhatjuk a következtetést, hogy az UNEP és az IPCC által pártolt klímatudomány nem elfogulatlan, hanem inkább pártos („advocacy”) tudomány.

A tanulmány szerzője

Szarka László

Hivatkozások

- Abbot C. G. (1939): Solar variation and the weather. *Nature*, 29, 705.
- Adler R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P-P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin E. (2003): The Version 2 Global Precipitation Climatology Project. *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147–1167.
- AEKI (2011): Úrállomás dozimetria. <http://www.aeki.kfki.hu/?contentid=745&lang=hu>
- Arnone E., Bór J., Chanrion O. et al. (2020): Climatology of transient luminous events and lightning observed above Europe and the Mediterranean Sea. *Surv. Geophys.*, 41, 167–199.
- Asikainen T., Salminen A., Maliniemi V., Mursula K. (2020): Influence of enhanced planetary wave activity on the polar vortex enhancement related to energetic electron precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, 9, e2019JD032137.
- Aubert J., Finlay C. C. (2019): Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface. *Nat. Geosci.*, 12, 393–398. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0355-1>
- Barbetti M. F., McElhinny M. W. (1976): The Lake Mungo geomagnetic excursion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 281, 1305, 515–542.
- Berkes Z. (1940): Éghajlatváltozás vagy éghajlatingadozás? *Az Időjárás*, 44, 7–8, 149–154.
- Berry E. X. (2019): Human CO₂ emissions have little effect on atmospheric CO₂. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, 3, 1, 13–26. Angol-magyar kétnyelvű változatban (a szerző engedélyével) megjelent itt: <https://en-pol2000.hu/dokumentumok/eladas/article/Dokumentumok/C3%A1ci%C3%B3k/Dokumentumok/13-El%C5%91ad%C3%A1s/867-az-emberi-eredetu-co2kibocsatas-csekelyhatast-gyakorol-a-legkori-co2-ra>
- Burke K. D., Williams J. W., Chandler A., Haywood A. M., Lunt D. J., Otto-Bliesner B. L. (2018): Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *PNAS* 115, 52, 13288–13293.
- Burroughs W. J. (1992): *Weather Cycles: Real Or Imaginary?* Cambridge Univ Press.
- Butler A. H., Jeremiah P., Sjöberg J. P., Dian J., Seidel D. J., Rosenlof K. H. (2017): A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 63–76.
- Chen Y. W., Colli L., Bird D. E. et al. (2021): Caribbean plate tilted and actively dragged eastwards by low-viscosity asthenospheric flow. *Nat. Commun.*, 12, 1603, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21723-1>
- Cionco R. G., Soon W. W-H. (2017): Short-term orbital forcing: A quasi-review and a reappraisal of realistic boundary conditions for climate modeling. *Earth-Science Reviews*, 166, 206–222.
- CLOUD (2016): The CLOUD Project. <https://cloud.web.cern.ch/>
- Connolly R. et al. (2021): How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*. Megjelenőben.
- Daily Mail (2013): Ancient forest revealed 1,000 years after being 'entombed' in gravel as Alaskan glacier melts. Mail Online by Nolan S, 10 October 2013, <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2451640/Mendenhall-Glacier-melting-reveals-ancient-forest.html#comments>
- Del Genio A., Laci A., Ruedy R. (1991): Simulations of the effect of a warmer climate on atmospheric humidity. *Nature*, 351, 382–385.
- Demény A. (2021): Stabilizotópokkal a klímaváltozás nyomában. In: Babinszky Edit: Kőbe zárt világok. A Magyarhoni Földtani Társulat kisfilmje. <https://youtu.be/6e6ZyZrCkxI>
- Druckmüller M. (2017): Total Solar Eclipse, 2017, USA http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/eclipse/Ecl2017u/Mi/Mitchell_800mm/0-info.htm
- Encyclopaedia Britannica (2010): <https://www.britannica.com/science/atmospheric-circulation>
- Eötvös L. (1877): A távolba hatás kérdéséről. Magyar Tudományos Akadémia Évkönyvei XVI. (1877–1882), 57–68. In: Eötvös Loránd (ed: Környei Elek), Gondolat Kiadó, Budapest. Rövidítve: Magyar Nemzet 2019. április 7., <https://magyar-nemzet.hu/lugas-rovat/a-tavolba-hatas-kerdeserol-6335396/>
- ESA Swarm (2020): Swarm probes weakening of Earth's magnetic field. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Swarm/Swarm_probes_weakening_of_Earth_s_magnetic_field
- Fan J., Meng J., Ludescher J., Chen X., Ashkenazy Y., Kurths J., Havlin S., Schellnhuber H. J. (2021): Statistical physics approaches to the complex Earth system. *Physics Reports*, 896, 1–84.
- Harde H. (2017): Scrutinizing the carbon cycle and CO₂ residence time in the atmosphere. *Global and Planetary Change*, 152, 19–26.
- Herschel W. (1801): Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of its variable of light and heat; with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 91, 265–318.
- Hide R., Boggs D. H., Dickey J. O. (2000): Angular momentum fluctuations within the Earth's liquid core and torsional oscillations of the core–mantle system. *Geophysical Journal International*, 143, 3, 777–786. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2000.01283.x>
- Huntington T. (2006): Evidence for intensification of of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319, 1–4, 83–95.
- Hurst H. E. (1951): Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 1. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006518>
- Huybers P., Wunsch C. (2004): A depth-derived pleistocene age model: Uncertainty estimates, sedimentation variability, and nonlinear climate change. *Paleoceanography*, 19, PA1028.
- Illés-Almár E. (2004): Weather reacting to geomagnetic storms. *Advances in Space Research*. 34, 376–378.
- Ilyas S. (2004): Aerial view of the whole of Malé proper on the eponymous island, prior to the construction of the Sinamalé Bridge. October 4, 2004. <https://en.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%A9#/media/File:Male-total.jpg>
- Imbrie J., Hays J. D., Martinson D. G., McIntyre A., Mix A. C., Morley J. J., Pisias N. G., Prell W. L., Shackleton N. J. (1984): The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger A. et al. (eds), *Milankovitch and Climate*. Hingham, MA: D. Reidel, 269–305.
- IPCC (1998): Principles governing IPCC work. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/ipcc-principles.pdf>

- IPCC (2000): TAR WG1, The Scientific Basis, Chapter 14, Executive Summary
- IPCC (2018): Advancing Our Understanding. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-14.pdf>
- IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf
- Kiss A., Földváry L. (2017): Uncertainty of GRACE-borne long periodic and secular ice mass variations in Antarctica. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 52, 4, 497–510.
- Kitaba I., Hyodo M., Nakagawa T., Katoh S., Dettman D. L., Sato H. (2017): Geological support for the Umbrella Effect as a link between geomagnetic field and climate. *Sci. Rep.*, 7, 40682.
- Kolaczek B. (1995): Short period variations of Earth rotation. *Nournées 1995, L'observatoire de Paris*
- Kopp G. (2016): Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability. *J. Space Weather Space Clim.*, 6, A30.
- Koppán A., Szarka L., Wesztergom V. (2000): Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree. *C. R. Acad. Sci., III*, 323, 6, 559–563.
- Kordos L. (2015): Gyors klimatikus átmenetek az észak-atlanti területeken. <http://klimaszkeptikusok.hu/wp-content/uploads/2015/10/Kordos-L%C3%A1szl%C3%B3-Gyors-klimatikus-%C3%A1tmenetek-az-%C3%A9szak-atlanti-ter%C3%BCleten.pdf>
- Korte M., Brown M. C., Panovska S., Wardinski I. (2019): Robust characteristics of the Laschamp and Mono Lake Geomagnetic Excursions: Results from global field models *front. Earth Sci.*, 30.
- Kósa L. (2008): Természeti csapások és civilizációs következményeik a 19. században Magyarországon. Székfoglalók a Magyar Tudományos Akadémián, ISSN 1419-8959. MTA, 2014
- Koutsoyiannis D. (2013): Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 6, 1177–1197.
- Koutsoyiannis D. (2020): Revisiting global hydrological cycle: Is it intensifying? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3899–3932.
- Le Mouél J.-L., Cortillot V., Jault D. (1992): Changes in Earth rotation rate. *Nature*, 355, 26–27.
- Le Mouél J.-L., Blanter E., Shnirman M., Courtillot V. (2010): Solar forcing of the semi-annual variation of length-of-day. *Geophysical Research Letters*, 37, L15307, DOI: 10.1029/2010GL043185
- Liu J., Nowaczyk N. R., Panovska S., Korte M., Arz H. W. (2020): The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake excursions recorded in a Black Sea sedimentary sequence spanning from 68.9 to 14.5 ka. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB019225.
- Lupo A. R. (2021): Climate, Climate Change, and the General Circulation. *Climate Information Brief*. Office of Science and Technology Policy, Executive Office of the President of the United States, 8 January, 2021
- Lüdecke H.-J., Müller-Plath G., Wallace M. G., Lüning S. (2021): Decadal and multidecadal natural variability of African rainfall. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 2021, 100795.
- Martos Y. M., Catalán M., Jordan T. A., Golynsky A., Golynsky D., Eagles G., Vaughan D. G. (2017): Heat flux distribution of Antarctica unveiled. *Geophysical Research Letters*, 44, 22. <https://doi.org/10.1002/2017GL075609>
- Mörner N.-A. (1977): The Gothenburg magnetic excursion. *Quaternary Research*, 7, 3, 413–427.
- Mörner N.-A. (2011): The Maldives: A measure of sea level changes and sea level ethics. In: *Evidence-Based Climate Science* (ed.: Don Easterbrook), Elsevier, Chapter 7, 197–209.
- Mörner N.-A. (2013): Planetary beat and solar–terrestrial responses. *Pattern Recognition in Physics*, 1, 107–116. DOI: 10.5194/prp-1-107-2013
- NASA (2020): What Is the Solar Cycle? <https://spaceplace.nasa.gov/solar-cycles/en/>
- NASA SVS (2018): The Dynamic Solar Magnetic Field with Introduction. Bridgman T., NASA Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/4623>
- NCAR (2021): Earth's Global Electric Circuit – Atmospheric Electricity. NCAR & UCAR Science. <https://www.youtube.com/watch?v=X7-0YRiln7E>
- NCDC NOAA (2021): Global Climate Report – January 2021 és February 2021 (www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202101 és 202102)
- Oikonomou C., Haralambous H., Pulinetis S., Khadka A., Paudel S. R., Barta V., Muslim B., Kourtidis K., Karagioras A., Inyurt S. (2021): Investigation of pre-earthquake ionospheric and atmospheric disturbances for three large earthquakes in Mexico. *Geosciences*, 2021, 11, 1, 16.
- Phillip T. (2020): Major solar flare and CME. *Space Weather Archive*, November 29, 2020. <https://spaceweatherarchive.com/2020/11/29/major-solar-flare-and-cme/>
- Prácser E., Bozóki T., Sători G., Williams E., Guha A., Yu H. (2020): Reconstruction of global lightning activity based on Schumann resonance measurements: Model description and synthetic tests. *Radio Science*, 54, 3, 254–267.
- PRP (2014): Termination of the journal *Pattern Recognition in Physics*. <https://www.pattern-recognition-in-physics.net/>
- Pulinetis S. A., Krankowski A., Hernandez-Pajares M., Marra S., Chernik I., Zakharenkova I., Rothkaehl H., Kotulak K., Davidenko D., Blazkiewicz L., Fron A., Flisek P., Rigo A. G. G., Budnikov P. (2021): Ionosphere Sounding for Pre-seismic anomalies identification (INSPIRE): Results of the project and Perspectives for the short-term earthquake forecast. *Frontiers in Earth Science*
- Pulinetis S. A., Ouzounov D. (2010): Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 4, 371–382. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.03.005
- Rahmstorf S. (2003): Timing of abrupt climate change: A precise clock. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 10, 1510. Bibcode: 2003GeoRL...30.1510R.
- Roe G. (2007): In defense of Milankovitch. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24703, DOI: 10.1029/2006GL027817
- Rycroft M. J., Israelsson S., Price C. (2000): The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 17–18.
- Sagnotti L., Scardia G., Giaccio B., Liddicoat J. C., Nomade S., Renne P. R., Sprain C. J. (2014): Extremely rapid directional

- change during Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal, *GJI*, 199, 2, 1, 1110–1124.
- Salby M. (2011) The global emission of CO₂: the contribution from various sources. The Sydney Institute Lectur, 2 August 2011, www.youtube.com/watch?v=YrI03ts-9I
- Salstein D. A. (2019): Atmospheric Angular Momentum related to Earth Rotation studies: History and modern developments. Presentation. Journées 2019, L'observatoire de Paris, October 8
- SC (2021): UN Security Council Press Release, February 23, 2021. <https://www.un.org/press/en/2021/sc14445.doc.htm>
- Science News (2018): Limiting global warming to 1.5 degrees versus 2 has big benefits, the IPCC says. By Gramling C., October 7, 2018, <https://www.sciencenews.org/article/global-warming-limit-degrees-ippc-climate-change>
- Seaton D. B., Darnel J. M. (2018): Observations of an eruptive solar flare in the extended EUV solar corona. *ApJL*, 852, L9. DOI: 10.3847/2041-8213/aaa28e
- Sfîcă L., Beck C., Nita A.-I., Voiculescu M., Birsan M.-V., Philipp A. (2021): Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades. *International Journal of Climatology*, 41, S1, E2211–E2230.
- Shen W., Peng C. (2016): Detection of different-time-scale signals in the length of day variation based on EEMD analysis technique. *Geodesy and Geodynamics*, 7, 3, 180–186.
- Spencer R. W. (2017): An inconvenient deception: How Al Gore distorts climate science and energy policy. <https://www.drroyspencer.com/wp-content/uploads/Mendenhall-Glacier-tree-stumps.jpg>
- Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, 1225–1232.
- Svensmark H., Enghoff M. B., Shaviv N. J. et al. (2017): Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei. *Nat. Commun.*, 8, 2199. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>
- Szarka L. (1988): Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth – A review. *Surv. Geophys.*, 9, 287–318. <https://doi.org/10.1007/BF01901627>
- Szarka L., Wesztergom V., Verő J. (2003): Hírek és rémhírek a geomágneses pólusátfordulásról. *Ezredforduló*, 1, 26–30.
- Szarka L. (2019): Föld és ember. MTA rendes tagsági székfoglaló előadás, 2019. szeptember 17. <https://www.enpol2000.hu/hirek-info/article/Aktu%C3%A1lis/64-Aktu%C3%A1lis%20h%C3%ADrek/762-fold-es-ember-szarka-laszlo-szekfoglalo-eloadasa-a-magyar-tudomanyos-akademian>
- Szarka L., Soon W. W.-H., Cionco G. (2021): How the astronomical aspects of climate science were settled? On the Milankovitch and Bacsák anniversaries, with lessons for today. *Advances in Space Research*, 67, 1, 700–707.
- Szűcs E., Gönczy S., Bozsó I., Bányai L., Szakács A., Szárnya Cs., Wesztergom V. (2021): Evolution of surface deformation related to salt-extraction-caused sinkholes in Solotvyno (Ukraine) revealed by Sentinel-1 radar interferometry. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 977–993.
- Tinsley B. A. (2000): Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev.*, 94, 231–258.
- Tinsley B. A. (2020): Influence of global electric circuit on weather and climate. <https://www.issibern.ch/workshops/svc/Abstracts/tinsley1.pdf>
- Valet J.-P., Valladas H. (2010): The Laschamp-Mono lake geomagnetic events and the extinction of Neanderthal: A causal link or a coincidence? *Quaternary Science Reviews*, 29, 27–28, 3887–3893.
- Verő J., Ádám A., Bencze P., Bór J., Heilig B., Koppán A., Kovács K., Lipovics T., Márcz F., Müller I., Sători G., Szalai S., Szarka L., Wesztergom V., Zieger B. (2009): Geoelektromágnesség és a változó Föld = Geoelectromagnetism and the changing Earth. *Munkabeszámoló. OTKA*. http://real.mtak.hu/2534/1/61013_ZJ1.pdf
- WDC (2021): Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
- Williams E., Bozóki T., Sători G., Price C., Steinbach P., Guha A., Liu Y., Beggan C. D., Neska M., Boldi R., Atkinson M. (2020): Evolution of global lightning in the transition from cold to warm phase preceding two super El Niño events. *JGR Atmospheres*, 126, 3, e2020JD033526.
- Wilson I. R. G. (2006): Are changes in the Earth's rotation rate externally driven and do they affect climate? *The General Science Journal*, <https://www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers-Astrophysics/Download/3811>
- WSO (2021): WSO Solar Polar Field Strength vs. Time. <http://wso.stanford.edu/gifs/Polar.gif>
- Yirka B. (2021): The Earth has been spinning faster lately. <https://phys.org/news/2021-01-earth-faster.html>
- Zhang J.-C. (1981): The periodicity and predictability of climate. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60, 274–228.