Földtörténeti kihalások és a CO_2 – természettudományi perspektívában. Válasz Embey-Isztin Antalnak II.

Szarka László, Bérczi István, Csernai László, Bársony István, Kiss Ádám

laszloszarka54@gmail.com

Beérkezés: 2024. szeptember 6.

„a Föld klímájának változását nem lehet egyetlen tényezőre visszavezetni. A klíma számos ismert és ismeretlen tényező hatására alakul ki, illetve változik meg.” (Berényi Dénes, 2011)

Összefoglaló. A szerzők Embey Isztin egy korábbi PBK Fórum-írására (Embey-Isztin, 2024a) adott részletes, fizikai alapokig visszamenő válaszukban tucatnyi érvvel indokolták, miért helytelen geológiai léptékben a CO_2-t a klímaváltozás fő hajtóerejének tekinteni. Ez az írásunk Embey-Isztin Antalnak arra a viszontválaszára (Embey-Isztin, 2024b) született, amelyben azt állítja, hogy a nagy geológiai kihalások fő oka is a CO_2 volt, és aki ezzel nem ért egyet, az „klímaszkeptikus”. Úgy gondoljuk, hogy egy tudományos vitában kizárólag érveknek van helyük, minősítgetésnek nincs. Bemutatjuk a nemzetközi szakirodalom fő megállapításait, miszerint a tömeges kihalások alapvető és közvetlen okára nézve találgatásokra vagyunk utalva. Mi azokkal értünk egyet, akik a tömeges kihalásokat „káros anyagok” okozták, és nem a CO_2. Friss tanulmányok sora szerint a CO_2-t inkább lehet klímaindikátornak, mint klímaváltoztató tényezőnek tekinteni.

Bevezető. Embey Isztin Antal a PBK Fórumon 2024. május 2-án közzétett, „A geológia szerepe a klímaváltozás okainak megértésében” című írásában lényegében azt állítja, hogy geológiai léptékben a legjelentősebb klímaszabályozó a CO_2. Kifejtésként, íme két Embey Isztin-idézet: 1. *„Az éghajlatváltozás hosszú távú geológiai perspektívája egyértelműen azt mutatja, hogy a kőzetmállás és a vulkanizmus változásain keresztül, a Föld légkörének üvegházhatású gázkoncentrációja a bolygó legjelentősebb hosszú távú klímaszabályozó rendszere.”* 2. *„Mindjárt itt az elején tisztázni érdemes, hogy üvegházhatású anyagok közül miért éppen a széndioxidnak (CO_2) tulajdonítunk döntő szerepet. Vízből pl. sokkal több van az atmoszférában mégis hatása elhanyagolható a globális éghajlat szabályozásában. A víz ugyanis három fázisban fordul, elő ezért az atmoszférában nem tartózkodik hosszan, mert csapadék formájában távozik onnan. Ezzel szemben a CO_2 csak gáz állapotban van és nagyon hosszú ideig megmarad a légkörben.”*

2024. június 16-án ugyanitt közölt válaszunk (Szarka et al. 2024 első, bevezető részében szakmabeliekhez (földtudósokhoz és fizikusokhoz) szólva tucatnyi érvet soroltunk fel, hogy

miért képtelenség Embey Isztin Antal alapállítása. Válaszunk (Szarka et al. 2024) második, terjedelmesebb részében magyarázó jellegű érvelést adtunk, aminek a lényege a következő:

- A légköri üvegházhatás munkájának túlnyomó részét a vízpára végzi el, mellette a CO_2 csupán mellékszereplő.
- A CO_2-nek kizárólag a nagyon kicsiny (0-tól alig különböző) légköri CO_2-koncentrációk tartományában van érdemi üvegházhatás-módosító szerepe. A mainál nagyobb CO_2-koncentrációk esetén a CO_2-üvegházhatás növekedése már csekély. A telítődésnél nagyobb CO_2-koncentrációk esetében teljesen mindegy, hogy egy bizonyos mennyiségen túl még mennyi CO_2 van még a levegőben. Vitatható tehát a földtörténet mainál sokkal nagyobb széndioxid-koncentrációval jellemezhető időszakaiban (tehát a földtörténet túlnyomó részében) a klímát üvegházgázként szabályozó szerepe.
- Számos elvi (pl. fizikai-kémiai törvény, a Henry-törvény, 1803) és gyakorlati (pl. mérési adatokon alapuló) bizonyíték szerint a légköri CO_2-koncentráció emelkedése csupán következménye a tengervíz felmelegedésének, és nem annak az oka.
- A klímamodellek csak a modellezők által elképzelt valóságot írják le, de a természet – bármennyire állítják az ellenkezőjét – nem a modellek szerint, hanem a hatalmas és az igen bonyolult természet erői által változik.
- A földtörténetből több olyan eseményt mutattunk be példaként, amelyek határozottan ellentmondanak Embey Isztin Antal állításának.
- Az Embey Isztin által idézett Kender et al. (2021) cikkben a vulkanizmust, a melegedést és a CO_2-koncentrációemelkedést mutató eredeti ábra szerint a vulkanizmus és a melegedés előbb kezdődött, mint a CO_2-kibocsátás.
- Felvetettük, hogy a vulkanizmus hője forgatta fel a klímarendszert.

Ebben az írásban Embey-Isztin Antal második levelére reagálunk.

A második levél. Embey-Isztin Antal 2024. augusztus végén megkapott új írásának címe: „Megjegyzés Szarka László Csaba, Bérczi István, Csernai László, Bársony István, Kiss Ádám (2024): Földi klímaszabályozás – természettudományi perspektívában Válasz Embey-Isztin Antalnak PBK Fórum cikkéhez”. Ebben ugyan elismeri kritikánk többségét, de érveinkre – arra hivatkozva, hogy azok túl részletesek és bonyolultak – nem reagál. Pedig elvártuk volna, hogy mindegyikről érdemben nyilatkozzon, hiszen azok külön-külön elegendők az ő eredeti állításának megdöntésére. Ehelyett a következőkben (Szarka et al. 2024)-ből idézett két mondatunkat szemeli ki, és kritizálja azokat: *1. „Látván a bizonyítékok hiányát, egyre valószínűbb, hogy a klímaváltozás ok-okozati folyamatában a CO_2 lényegében nem más, mint egy fölösleges, ezért kihagyható láncszem”, 2. Az Északi-atlanti vulkanizmus révén a földfelszínre 22 évnyi fényenergiának megfelelő hő került, ami önmagában elegendő lehetett az azt megelőző éghajlati viszonyok felforgatásához.*

Embey-Isztin az első írásában még nem szereplő, merőben új tétellel áll elő, miszerint a legutóbbi 300 millió év mintegy tíz tömeges kihalási eseményét a CO_2 okozta. Míg első írásában (Embey-Isztin 2024a) a geológiai léptékű klímaváltozás hatásmechanizmusaira, a másodikban (Embey-Isztin 2024b) a geológiai kihalási eseményekre fókuszál. A két kérdéskör egymással csak részlegesen átfedő, tehát témát váltott. Újonnan bevetett érvei a szövegéből vett idézetekkel a következőképpen illusztrálhatók: 1. *„…a PBK Energia Munkacsoportja Szarka László Csaba professzor vezetésével klíma szkeptikus álláspontón van és ezzel hangadóvá vált, PBK-án belül, szükségesnek éreztem, hogy a professzor társaknak az érem másik oldalát is bemutassa valaki”, 2. „Petrovay professor kategorikusan kizárta, hogy a jelenlegi globális hőmérsékletemelkedést a Nap számlájára írhassuk*”; 3. *„a CO_2 és hőmérséklet közötti kapcsolat nem egy mai ’divat’, hanem az 1930-as évek óta elfogadott összefüggés”; 4. a katasztrófákat okozó magmás eseményekben „közös … hogy a klímarendszer szétrombolásban, a globális hőmérséklet emelkedésében fő eszközük a széndioxid volt”*.

Embey-Isztin (2024b) legfrissebb hivatkozása – a mi válaszunkat nem számítva – 2009-es. Indoklás nélkül „klímaszkeptikusnak” nevez bennünket, holott mindannyian messzemenően elismerjük, hogy a földi klíma változik (mindenféle térbeli és időbeli léptékben), és azt is, hogy az embernek van némi szerepe. (Például már egyetlen ház építése, egyetlen fa ültetése is megváltoztatja az adott hely klímáját.) Mindkét írásunk annak a tisztázását szolgálja, hogy globálisan miféle és mekkora hatótényezők működnek. A vitában csak érveknek van helye, tekintélyelvre történő hivatkozásnak nincs. Embey-Isztin egy csillagász tekintélyére hivatkozik, miközben vannak olyan tekintélyes csillagászok (köztük például Barcza Szabolcs csillagász-geofizikus), aki egészen mást gondolt az extraterresztrikus tényezőkről, mint amit Embey-Isztin Antal Petrovay Kristófnak tulajdonít (Szarka 2021). A válaszszöveg megfogalmazása sem elég precíz. 1930-as évekből Embey-Isztin Antal bizonyára Callendar (1938) tanulmányára gondol. G. S. Callendar, ha élne, személyesen cáfolná a rá vonatkozó állítását: 1938-as tanulmánya csak évtizedekkel később került a figyelem homlokterébe!
A következőkben áttekintjük, mi minden található a legújabb tanulmányokban az Embey-Isztin által felvetett két kérdésről, arról, hogy: (1) a CO_2 okozta-e a tömeges kihalásokat, (2) a CO_2 geológiai léptékben klímaalakító hatótényező-e. Újabb – remélhetőleg nem bonyolult – magyarázatunkat több részre osztjuk: először igyekszünk betekinteni a tömeges kihalások hatásmechanizmusaiba, különösen a vulkáni tevékenység által okozott geológiai léptékű kihalásokba. Ezután ismertetjük Shaviv et al. (2023) friss éghajlati áttekintését a fanerozoikumról. Majd egy friss tanulmány segítségével bemutatjuk, hogy a CO_2 azért nem lehet klímaalakító tényező, mert a légköri CO_2-koncentráció változása semmilyen időléptékben sem előzi meg a hőmérsékletváltozását. Legvégül rámutatunk arra az elfogadhatatlan gyakorlatra, hogy a hőmérsékleti rekonstrukciók eredményadatait bizony számos tanulmányban a jövőre vonatkozó modellezési számokkal toldják meg, így igazodva bizonyos tudományon kívüli elvárásokhoz.

A tömeges kihalás definíciója és okai. A tömeges kihalás definíciója: *„a kihalás mértékének (a leszármazási vonal megszűnésének) bármely jelentős növekedése, amelyet egynél több, földrajzilag elterjedt ún. magasabb taxon szenved el viszonylag rövid geológiai időintervallumon belül, ami legalább átmenetileg csökkenti a diverzitást”* (Sepkoski, 1986, 278. o.) A tömeges kihalás kifejtését szó szerint idézzük a Geológiai Enciklopédiából (Racki, 2021) és a Biodiverzitás Enciklopédiából is (Levinton 2024).
A Geológiai Enciklopédiában a következő szómagyarázat található: *„A tömeges kihalási események a következők:*
(1) a biológiai sokféleség válsága, amit elsősorban a jelentősen megnövekedett kihalási arányok mutatnak, és
(2) az ökológiai (vagy biotikus) válságok, amikor a bioszféra perturbációjának ökoszisztéma-következményei aránytalanul nagyok voltak, összehasonlítva a biológiai sokféleség elhúzódó/lépcsős csökkenésével.
A szó szoros értelmében vehető, egyértelmű tömeges kihalásnak csupán a perm és a kréta végi tömeges kihalás volt. Az ordovícium végén bekövetkezett globális esemény csak egy jelentős biodiverzitási válság volt, míg a késő devon és a triász végén bekövetkezett kihalás jelentős ökológiai (vagy biotikus) válságot jelentett. Az oksági kapcsolatot illetően a kréta végi katasztrófát egy óriási meteorit becsapódása okozhatta, de valószínűleg ez csak egy utolsó volt a bioszféra összeomlásához vezető lépések sorában, amelyek között ott van a Dekkán plató trappbazalt-vulkanizmusa is. Földi pusztító tényezőkkel függ össze négy másik tömeges kihalás: a mezozoikumi nagyobb, a paleozoikumi kisebb mértékben, és kiváltó okként elsősorban a nagy magmás tartományokat nevezik meg. Frissítették a vulkáni eredetű melegház/hűtőház forgatókönyveket, amiket a közelmúltban felfedezett higany-anomáliák is alátámasztanak. A vulkanikus természeti csapásokhoz kapcsolódó, nem vulkanikus jellegű tényezőkkel kiegészített

ölőfaktorok széles spektruma teljesen más időléptékben működött. A konkrét kölcsönhatások és visszacsatolások minden bizonnyal mindegyik tömeges kihalásra nézve egyediek voltak, ami nagy változatosságot eredményezett." (Racki 2021).

A Biodiverzitás Enciklopédia 3. kiadásában (Levinton 2024) pedig ez szerepel: „*A tömeges kihalás jelentős időbeli környezeti változásokkal jár együtt. A probléma természetesen az, hogy amikor nincs tömeges kihalás, akkor is vannak környezeti változások, és joggal mondhatjuk, hogy nem sikerült az összes tömeges kihalást megjósolni a közvetlen fosszília-adatok nélkül. Amennyiben olyan környezeti kényszer a tömeges kihalás egyik fő oka, amely meghaladja a fajok túlélési vagy alkalmazkodási képességét, akkor vajon mik lehettek a hatótényezők? Összeállíthatunk egy listát (de a füstölgő fegyvert valóban megtalálni gyakran egészen más ügy):*

- *Földönkívüli eredetű objektumok becsapódása vagy becsapódásainak sorozata;*
- *Hatalmas léptékű vulkanizmus, amely globális éghajlatváltozással, többek között felmelegedéssel jár;*
- *Az éghajlatváltozás számos tényezőből ered, beleértve a Napból jövő energiát, a kontinensek, valamint az óceáni áramlatok átrendeződéséből adódó felmelegedést, a felszíni magmás tevékenységből eredő felmelegedést;*
- *A tengerszint-süllyedés csökkenti a tengeri fajok élőhely-nagyságát;*
- *Oxigénhiány (anoxia), különösen az oxigén nélküli mély vizek kiterjedése a kontinentális talapzatokra.*

Mindezek az okok inkább a kikövetkeztetett geológiai események és a kihalás közötti időbeli összefüggésekből fakadnak, nem pedig a környezeti változást a kihalással összekötő biztos modellekből. Mit mondanak az adatok? Megvan az öt legnagyobb ok (fentebb felsorolt „Big Five"), de a fent tárgyalt kritériumok alapján […] Bond és Grasby (2017) szerint legalább 17 eseményt érdemes tömeges kihalásként számon tartani. Ezek közül legalább 7 kihalási esemény, közöttük a kréta végi, ún. Nagy Magmás Tartományhoz (Large Igneous Province, LIP) kapcsolódik, ami szintén szorosan összefügg egy jelentős hatással, amint azt alább tárgyaljuk. Fontos azonban felismerni, hogy a krétához hasonlóan, voltak olyan vulkanikus megnyilvánulások is, amelyek során nem volt kihalás. Mégis úgy tűnik, hogy a perm folyamán és a triász végén földrajzilag óriási mennyiségben lezajlott bazaltkiömlés kihalásokkal járt (Clapham és Renne, 2019).

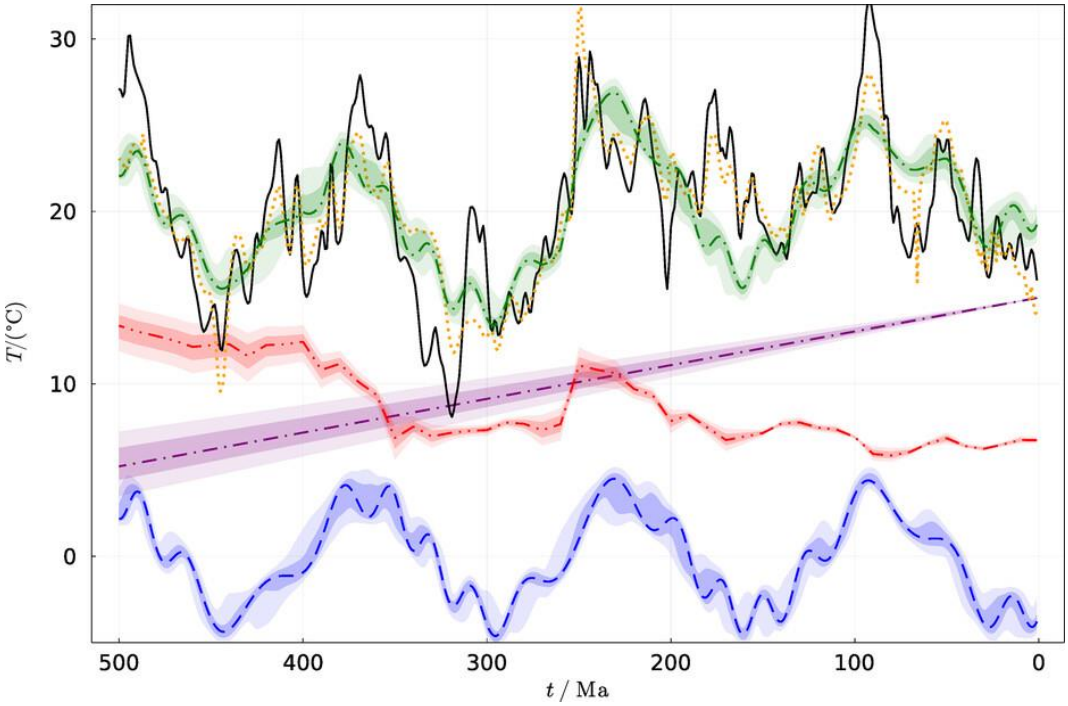
A mezozoikum során a Nagy Magmás Tartományok és a kihalások kapcsolata különösen feltűnő. A nagy magmás elhelyezkedések felveti a kihalás alapvető és közvetlen okainak kérdését, amelyeket nem határoztak meg konkrétan, kivéve talán a permi kihalás esetében. A vulkáni eredetű környezet (LIP) mechanizmusok közé tartozik az óceánok elsavasodása, a mérgező fémmérgezés, a savas eső, az ózonkárosodás és a bőrégető UVB (ahol a B „burn"-t jelent) ultraibolya sugárzás, a vulkáni sötétség által okozott lehűlés és a fotoszintézis leállása. A légkör felmelegedése a tengeri és szárazföldi fajok toleranciaszintje fölé emelhette a hőmérsékletet, amint az valószínűleg a nagy devon végi frasni-fammeni esemény soron történt (amikor lehűlés is volt), a perm végi kihalás, a karni (a felső triász legkorábbi szakasz) és a triász végi kihalási esemény. Az óceán felmelegedése csökkentheti az oldott oxigén koncentrációját, ami az áramlási rendszerek változásaival együttesen nagy léptékben hozhatott létre oxigénhiányos eseményeket. Ilyeneket számos tömeges kihalás során is megfigyeltek, beleértve a perm végi kihalást, a szilur-beli Mulde-eseményt, a devoni Kačák-eseményt és a korai jura toarci kihalást […]. A hatalmas méretben felszínre jutó magmákból származó szulfidok közvetlen kibocsátása közvetlen szulfidmérgezést is okozhatott, különösen az óceánban. Az oxigénhiány serkenthette a rendkívül mérgező szulfidok tömeges előfordulását, például a késő devonban, a perm végén és az alsó krétában (Kump et al., 2005). Sajnos az oxigénhiány, a szulfid és az áramlási rendszerek összefüggenek, így nehéz meghatározni a halál alapvető és közvetlen okát, mivel ezek mindegyike nagymértékű elhalálozási arányhoz vezetne.

A stabilszénizotóp-eloszlás drámai ugrásokat mutathat a geológiai történelem során, és felmerült, hogy az ilyen elugrásokat tömeges kihalásokhoz kössék. A 12C és 13C stabil szénizotópok aránya a vulkanizmusban bekövetkezett nagy léptékű változást, vagy az óceáni üledékekben lévő gázhidrát-lerakódásokból történő metán-felszabadulást tükrözheti (Schobben et al., 2019). Az izotóparányok nagy léptékű változásai azonban számos mechanizmushoz kapcsolódnak, például a perm végi kihalás során, de nincsenek összhangban geológiai vagy modellezési bizonyítékokkal. Schobben és munkatársai arra a következtetésre jutottak, hogy az izotóparányok változásának sebességére vonatkozó jelenlegi ismereteink sok érdekes összefüggést mutatnak, de az izotóp-elugrások egyedileg nem kapcsolhatók össze a tömeges kihalás konkrét okaival."
Sem a geológiai, sem a biodiverzitási enciklopédiából nem vonható le az Embey-Isztin-féle következtetés.

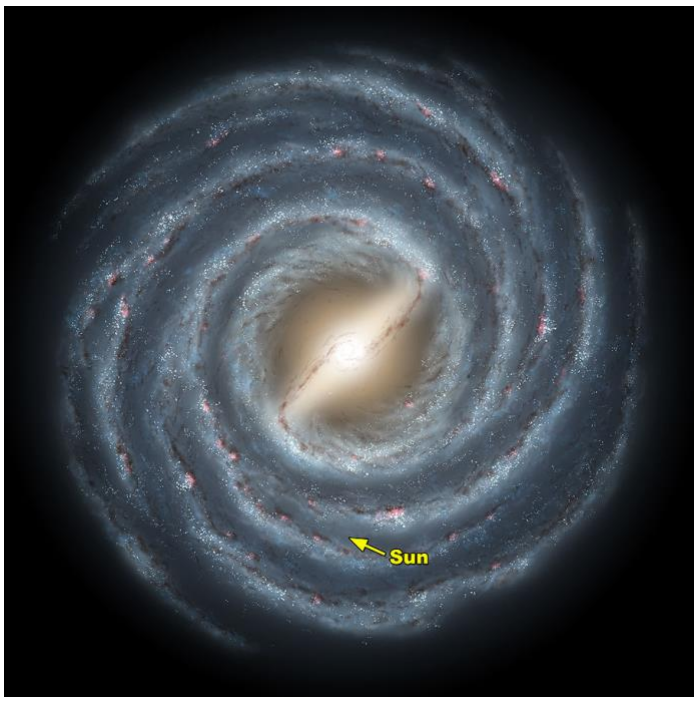
Tömeges kihalás és vulkanizmus. Azt, hogy az egyik legnagyobb tömeges kihalást inkább okozhatta a felszínre áradó bazalt, mint aszteroida-becsapódás, Vincent Courtillot francia geofizikus az elsők között vetette fel (Courtillot 1990, 1999). Erről szólt 2014. október 29-én az MTA Székházban megtartott „Flood basalt volcanism as the main cause of mass extinctions: evidence for huge magmatic pulses and mega-flows" (Kiömlőbazalt-vulkanizmus, mint a tömeges kihalások fő oka: hatalmas magmalöketek és megaáramlások bizonyítékai) című előadása is (Courtillot, 2014). Arról, hogy valójában mi okozza a kihalást, a szakterületi kutatók azt mondják, hogy *„a földtörténet során időszakonként viszonylag rövid idő alatt hatalmas mennyiségben tódult a felszínre bazaltos magma, amely események oly mértékben bolygatták meg az éghajlati rendszert, hogy ahhoz az élővilág nehezen tudott alkalmazkodni, és tömeges kihalások történtek"* (Harangi et al., 2015). A fajok kihalása (a szárazföldeken, a sekélytengerekben és a mélyvízi óceánokban) nyilván összefügg a specifikus életterük eltűnésével. Különféle tananyagokban az olvasható, hogy a magmatömeg sokkal kisebb, mint a kitörés által érintett kőzeteké, következésképpen ugyanez érvényes a gáztartalmukra is. A kihalást a legtöbben a kitöréssel érintkező kőzettömeg kigázosodásának tulajdonítják. Amennyiben a kitörés szerves (azaz széntartalmú) vegyületeket tartalmazó kőzetekkel érintkezik, a hatalmas mennyiségű SO_2 mellett természetesen metán és széndioxid is felszabadul.
Igen ám, de egy 2021-es publikáció szerint a perm-triász határon a trappbazalt kiáradását intenzív robbanásos vulkáni tevékenység előzte meg (Zhang et al. 2021). Robbanásos vulkánkitörés során a kénben gazdag vulkáni anyagból és kénsav-aeroszol (savas eső) jön létre, és a felszabaduló mindenféle gázok közvetlenül mérgezik az állat- és a növényvilágot. Zhang et al. (2021) szerint a tömeges kihalást ún. vulkanikus tél okozta, azaz a közvetlenül vagy közvetve légkörbe kerülő vízgőz, vulkáni hamu, kénsavpermet és egyéb gázok keveréke sűrű felhőként éveken át eltakarta a Napot, négy Celsius foknál nagyobb globális lehűlést okozva. Annak ellenére tehát, hogy a bazaltmagma által közvetlenül és közvetve kibocsátott CO_2-üvegházhatást McLean már 1978-ban felvetette a tömeges kihalás okaként (McLean, 1978), a kiváltó okokra vonatkozó feltételezések igencsak vitatottak, és egymásnak is ellentmondók (Vinós, 2023). Az a tény, hogy nem minden nagy vulkáni tevékenységnek lett kihalási következménye, az okok összetettségét valószínűsíti, úgy amint az a geológiai és biodiverzitási enciklopédiákban is szerepel. A vulkánkitörés, a hamufelhő, a légkörben okozott kémiai változások dominóhatása tehát a CO_2-től függetlenül is okozhatott kihalásokat. Legalábbis ez Vincent Courtillot (1999) véleménye. A hosszú távon üvegházhatást és a fotoszintézist egyaránt növelő CO_2-vel szemben mi egy „valódi károsanyag", többek között az azonnal gyilkolni képes SO_2 mellett tesszük le a voksunkat.
Az efféle összetett és szemtanú nélküli folyamatban sok részelemet meg lehet nevezni a tömeges kihalás közvetlen kiváltójaként. Ami vitathatatlanul közös, az a felszínközeli

kőzettömegeket érő iszonyatos hőhatás. A felszínre kerülő kőzetolvadékok hőhatását a Biodiverzitás Enciklopédia is említi.
Mellékesen megjegyezzük, hogy Embey Isztin Antal állítása – miszerint a klímarendszer szétrombolásában a leghatékonyabb eszköz a CO_2 volt – nehezen egyeztethető össze azzal a – a természet klímaváltoztató erejét tudatosan alábecsülő, szintén hatékonyan terjesztett – másik nézettel (Gerlach, 2011), hogy a vulkánok CO_2-kibocsátása nagyon csekély. (A cikk szerint mindössze 0,23-0,44 Gt/év.) A PBK energia-munkacsoport 2024. évi tusványosi rendezvényén (Szarka 2024) Kovács István János szavai (*„…a Föld mélyéből a CO_2 (továbbá sok egyéb gáz, illetve „fluidum”) nem csak az ismert szárazföldi vulkánok révén jut a felszínre, hanem vulkánmentes területekről is. A CO_2-forrás – nemesgáz-elemzések szerint – beazonosíthatóan a litoszféra alóli térségben, az ún. asztenoszférában van. Kijelenthető, hogy ma a természetes földtani CO_2-kibocsátás és az antropogén kibocsátás arányát sem ismerjük pontosan”*) a szénciklus újragondolását vetik fel.

A fanerozoikum nagyléptékű éghajlatváltozásai. Shaviv et al (2023) a legutóbbi 540 millió évre (az ún. fanerozoikumra, ahol a „phanerosz zóé” a látható élet időszakát jelenti) kombinálta az éghajlat kőzettani mutatóira (pl. szén, evaporit, bauxit és tillit) épülő ún. litológiai rekonstrukciót és az oxigénizotópos paleohőmérséklet-alapú (geokémiai) rekonstrukciót, majd az így kapott idősorokra az egyes lehetséges hatótényezők hatásait feltételezve modellgörbét illesztettek. A modellezéshez a lehetséges éghajlati tényezőket belső (geológiai) és külső (a Földön kívüli) csoportokra osztották. A belső hatótényezők közül a legjelentősebbek a légkör összetétele, a Föld fényvisszaverő-képessége, valamint az óceánok és kontinensek megoszlása, ezek változásai ugyanis különféle geológiai folyamatok miatt következnek be. A külső tényezők a Föld és az égi környezet kölcsönhatásától függenek: a Milankovics-ciklusoktól (amelyek a több millió éves léptékben nem láthatók), a galaktikus kozmikus sugárzástól, amelynek legnagyobb változásait a Naprendszernek a Tejútrendszer karjain való periodikus (145 millió évenként ismétlődő) áthaladásai jelentik. Eredményeiket (a hosszú távú, azaz a több millió év léptékében is megmutatkozó éghajlatváltozások legfontosabb hatótényezőit) az 1. ábra foglalja össze. Jelentősnek találták a légköri CO_2 – geológiai folyamatok miatti – hosszú távú trendjét, a változó galaktikus környezet miatti légköri ionizációt, valamint a napsugárzás változását. Érdekes, hogy e léptékben olyan tényezők, mint az albedó és a földrajzi hatások, a Milankovics-ciklusokhoz hasonlóan, ugyancsak másodlagos jelentőségűek. A CO_2-ről szólva fontos megjegyezni, hogy ez az egyetlen geológiai hajtóerő, amit egyáltalán meg lehetett becsülni. A többi geológiai hatóerő némelyike szintén jelentős lehet, de ezeket egyrészt nehéz rekonstruálni, másrészt globális éghajlati hatásukat (pl. a kontinensek és az óceánok földrajzi változását) mennyiségileg lehetetlen értékelni.
A fanerozoikum domináns hőmérséklet-változásai a Naprendszernek a Tejútrendszer spirálkarjain való periodikus áthaladásaihoz köthetők. Ez tehát geológiai (540 millió éves, fanerozoikumi) léptékben a legjelentősebb klímaalakító tényező (2. ábra). Emellett a Nap fényesedése hőmérséklet-emelő hatást jelent, a CO_2 (illetve az CO_2-ben elfedett egyéb geológiai tényezők) alakulása pedig hőmérséklet-csökkentőt.
A geológia által feltárt mindenféle léptékű éghajlatváltozásokról Gregory Wrightstone (2017) könyve, valamint Tom Gallagher előadása (Gallagher és Palmer 2022) ad kiváló áttekintést.

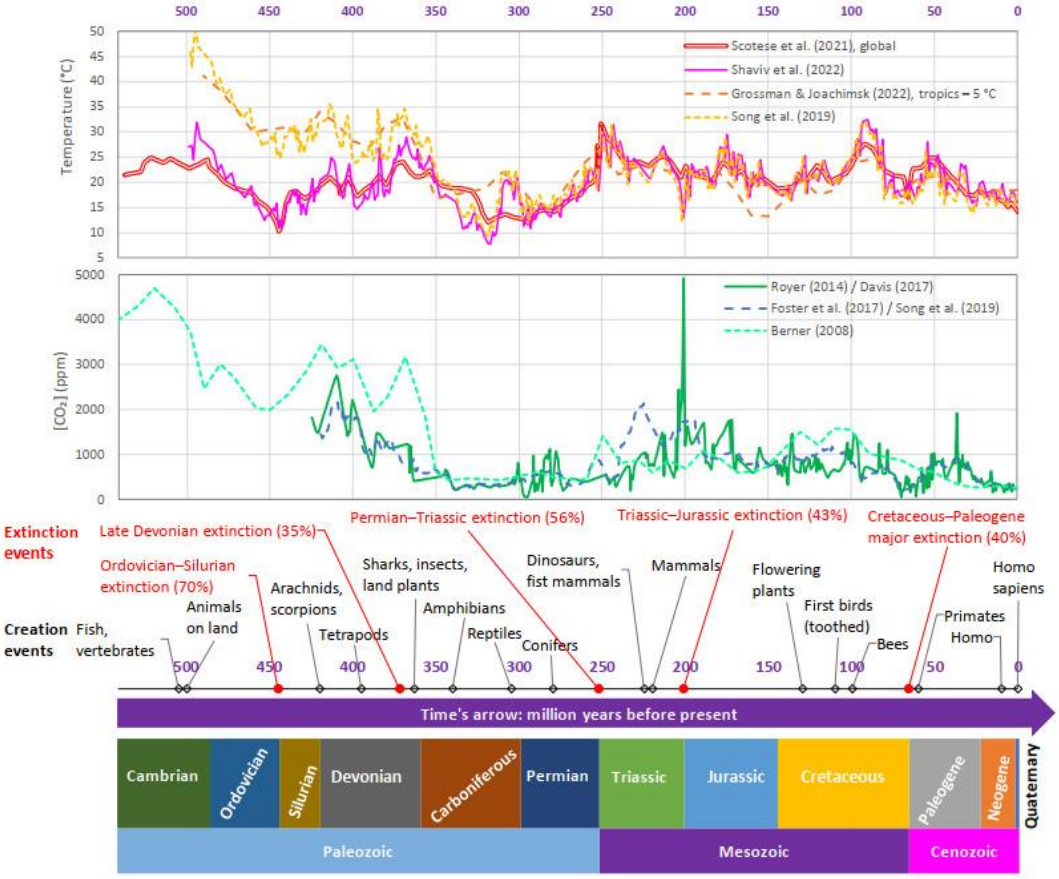


1. ábra: A fanerozoikum globális átlaghőmérséklete, a legalább több millió éves léptékű változások tükrében. A pontozott görbe Scotese et al. geokémiai/litológiai rekonstrukciója, a folytonos vonal Shaviv et al. (2023) kombinált geokémiai/litológiai rekonstrukciója, a zöld szaggatott vonal a modellezett hőmérsékletet. A többi görbe a modell különböző összetevőit mutatják: légköri ionizáció (alul, szaggatott), CO_2 (dupla-pontozott szaggatott vonal) és növekvő napfény (szaggatott, lila). A vonal körüli sávok régiók hibatartományokat mutatnak. Forrás: Shaviv et al. (2023)



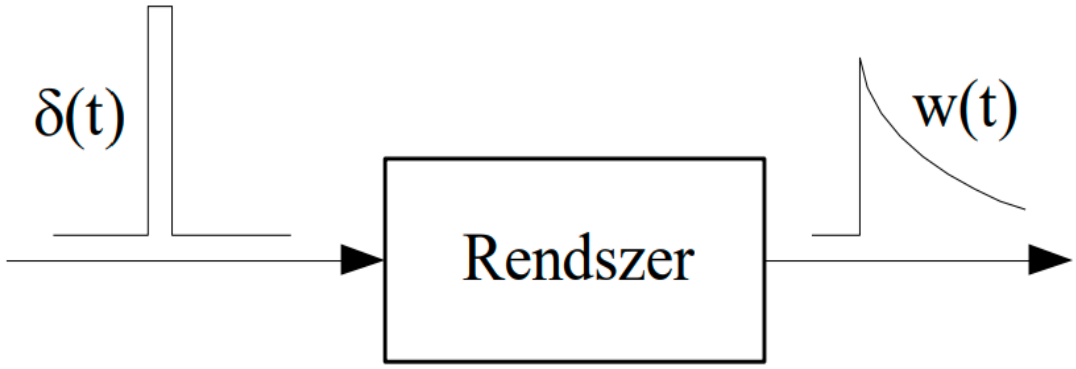
2. ábra: A Tejútrendszer ábrázolása felülnézetben (NASA) a Nap (Sun) helyzetével. A kép forrása: Wikipedia. Geológiai (fanerozoikumi) léptékben a legjelentősebb klímaalakító tényező az, hogy a Naprendszer 145 millió évente keresztezi a Tejútrenszer valamelyik spirálkarját, periodikus változásokat okozva a légköri ionizációban (Shaviv et al., 2023). Kép forrása: Wikipedia

Ok és okozat. Kikerülhetetlen kérdés, hogy a CO_2-koncentráció változása és a kapcsolódó hőmérsékletváltozás közül melyik az ok, és melyik az okozat. 2024-ben született meg az a publikáció (Koutsoyiannis 2024), miszerint e kérdésre határozott válasz adható.
Az olyasféle – bonyolult módon és egyedülállóan alakuló – földfizikai rendszerekben, ahol a jelenségek megismételhetetlenek, nem lehet a következtetést egyszerűen levonni. Megfigyelésekre kell alapozni, valószínűségi logikát kell használni, és a rendszert sztochasztikusan kell modellezni. Demetris Kutsoyiannis és szerzőtársai az ok-okozati összefüggés értékelésére már évekkel ezelőtt új sztochasztikus módszertant dolgoztak ki (Koutsoyiannis et al. 2021, 2022a, 2022b). Módszerüket először a hőmérséklet (*T*) és a légköri szén-dioxid-koncentráció ([CO_2]) hét évtizede műszeresen mért idősoraira alkalmazták (Koutsoyiannis et al. 2023), ahol egyértelmű bizonyítást nyert, hogy az ok a hőmérséklet, és a [CO_2] a hőmérséklet következménye. A módszert ezt követően kiterjesztették paleoklíma-proxy adatokra is. Számos proxy sorozatot állítottak össze, állítottak párba, és elemeztek ki. Legnagyobb léptéktartományuk átfogja a teljes fanerozoikumot. A közbülső léptéktartományok a fanerozoikum egyre kisebb részeit fedik le. A legkisebb lépték pedig a pontosnak tekinthető megfigyelések jelenlegi korszakáit jelenti. A 3. ábra a teljes fanerozoikumra vonatkozó kiindulási adatokat mutatja.



3. ábra. A légköri hőmérséklet és a szén-dioxid-koncentráció néhány rekonstrukciója a fanerozoikum 541 millió évére. A fanerozoikum három geológiai korszakra és 12 geológiai periódusra oszlik, mialatt keletkezési események (a jelzett taxonok első megjelenései), valamint kihalási események is történtek. A kihalási események melletti szám a veszteség százalékos arányát jelenti. Forrás és további részletek: Koutsoyiannis (2024)

Az egyszerű időbeli késleltetés helyett (ami téves következtetésre vezethet) az oksági kapcsolatot kell megvizsgálni, annak mintájára, ahogyan a 4. ábrán a *δ(t)* impulzusfüggvény az ok, és a *w(t)* impulzus-súlyfüggvény az okozat.



4. ábra: A rendszer bemeneti oldalán a *δ (t)* jel impulzusfüggvény-közeli, a *w(t)* kimenő jel az impulzusfüggvény válaszfüggvényét közelíti.

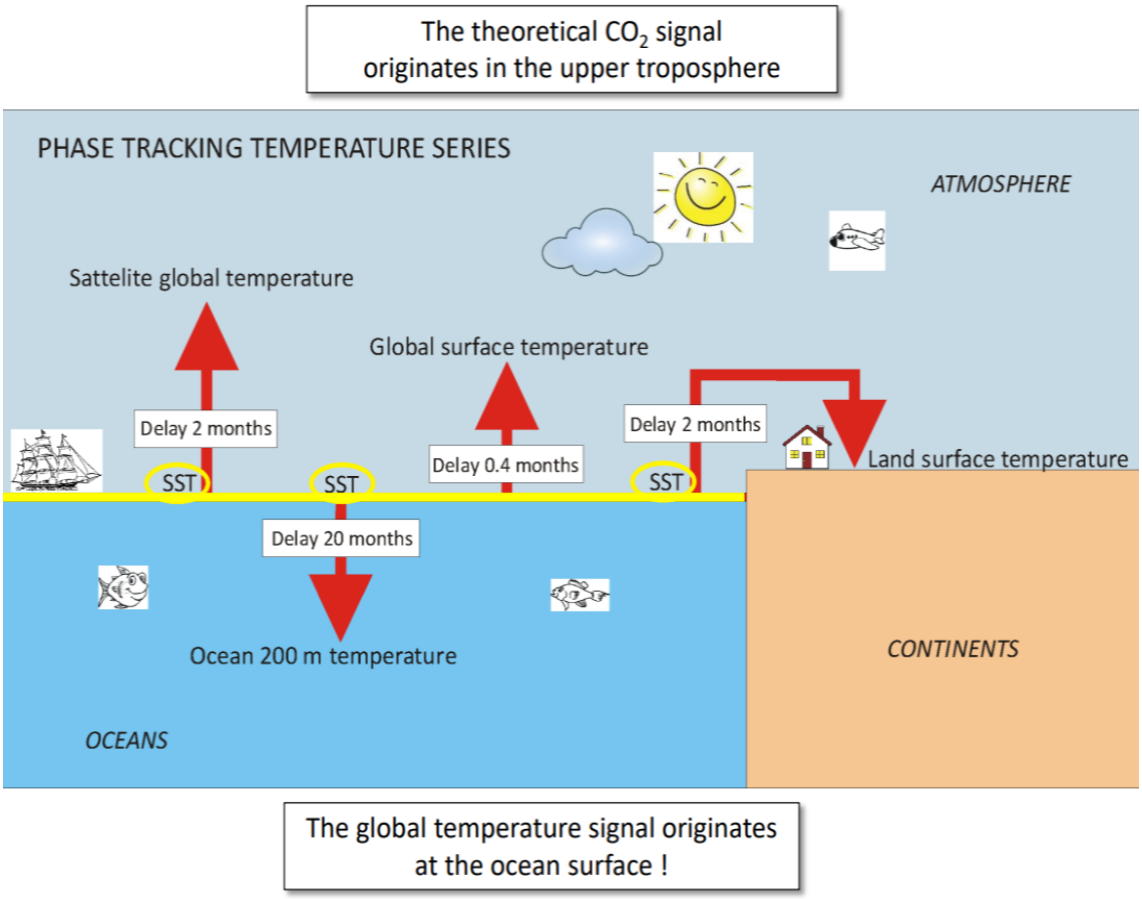
Miután az összes időpár esetében az adódott, hogy a *T* az ok, és a [CO_2] az okozat, és egyik idősorra sem adódott ennek az ellenkezője, a kiterjesztett elemzés következtetése az, hogy a szén-dioxid-koncentráció változása mindig csak követi a hőmérséklet-változást. E következtetés mind a proxy, mind a műszeres adatokra érvényes, az összes megvizsgált időléptékben. A *T* és a [CO_2] idősorok időbeli eltolódásai a mintavételi köztől és az időtartomány léptékétől is függenek, és minden esetben azzal megegyező nagyságrendűek. Az oksági összefüggések alapján megállapított időeltolódásokat az 1. táblázat mutatja:

1. táblázat: Időléptékek (időtartam és lépésköz feltüntetésével), valamint *T*→[CO_2] oksági kapcsolatot bizonyító idősorok elemzési eredményei. Minden esetben a *T* az ok, a [CO_2] a megadott időtartam múlva követi a *T*-t.

Farenozoikum (540 millió év, lépésköz: 1 millió év): 2,3-6,4 millió év
Kainozokium: (66 millió év, lépésköz: 100 ezer év): 760-910 ezer év
Negyedidőszak-végi (440 ezer év, lépésköz: 500 év): 1200-3300 év
Negyedidőszak-végi (440 ezer év, lépésköz: 1000 év): 1200-4500 év
A legutóbbi kétezer év (2000 év, lépésköz: 1 év): 25-33 év
A legutóbbi kétezer év (2000 év, lépésköz: 10 év): 26-33 év
Modern műszeres (70 év, lépésköz: 1 év): 0,6-0,7 év
Modern műszeres (70 év, lépésköz: 10 év): 3,2-3,3 év

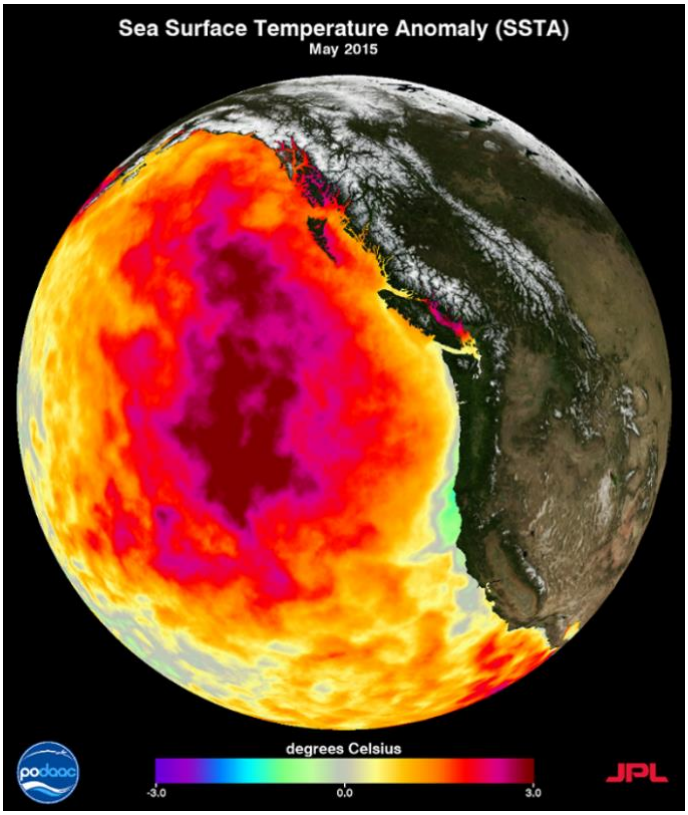
Az, hogy a hőmérséklet az ok, és a CO_2-koncentráció az okozat, a Henry-törvény egy bizonyos léptéktartományban kielégítően magyarázza. A mindenféle léptékű időeltolódásokra Koutsoyiannis a Henry-törvény mellett a bioszféra figyelembe vételét is ajánlja. Általánosan igaz ugyanis, hogy hűvös időszakokban a lebomlás nagyobb mértékben lassul, mint a fotoszintézis. Ennek következtében a CO_2 a talajban csapdázódik. Meleg időszakokban viszont a CO_2 gyorsabban szabadul fel a talajból, mint ahogy a fotoszintézis képes elnyelni, tehát a légköri CO_2-szint ilyenkor emelkedni fog. Miután az összes aerob (szabad oxigént tartalmazó légkörben életképes) élőlény légzése CO_2-t bocsát ki, a hőmérséklet és a CO_2 között széles intervallumban keletkezhet időbeli eltolódás. Ezek sorában figyelembe veendők a fajok keletkezésekor és kihalási események során bekövetkező nagyobb időléptékű változások is. Összességében tehát az időlépték függvényében a *T* és a CO_2-koncentráció közötti kapcsolatnak többféle mechanizmusa jelenik meg az adatokban.

Koutsoyiannis és munkatársai eredményeinek ismeretében az 5. ábrán Humlum (2022) alapján bemutatjuk azt a kapcsolatot, amit a ma műszeresen megfigyelhető különféle hőmérsékletek időbeni egymásutánisága mutat*: mindig a tengerfelszín-hőmérséklet változik először*! A globális felszínhőmérséklet ezt kb. 2 héttel, a műholdas globális hőmérséklet és a szárazföldi felszínhőmérséklet pedig mintegy 2 hónappal követi; a tengerfelszín alá 200 m-re pedig a hőmérsékleti változás – csillapítva – mintegy 20 hónappal később ér le. Ha igaz lenne a CO_2-alapú üvegházhatás növekedése miatti melegedés, nem a tengerfelszín-hőmérséklet változna mindig legelőször. *Az éghajlatváltozás alapvető oka az, ami a tengerfelszín-hőmérsékletet megváltoztatja.*



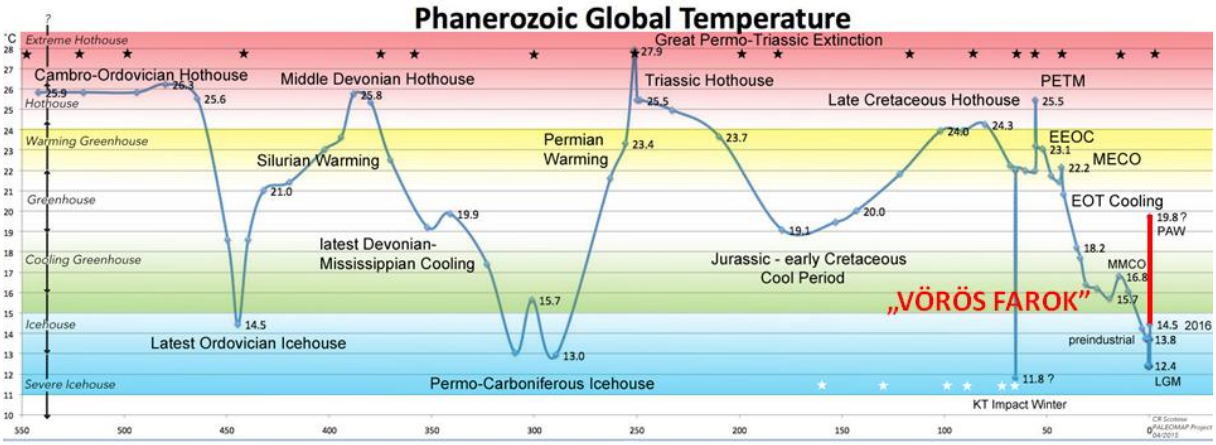
5. ábra: A tengerfelszín-hőmérséklet (SST, Sea Surface Temperature), a globális felszínhőmérséklet, a műholdas globális hőmérséklet, a szárazföldi felszínhőmérséklet és a 200 m mélységű tengervíz-hőmérséklet időbeli egymásutánisága. Forrás: Humlum (2022).

Ha ezek után egy, az ok-okozati kapcsolat iránt fogékony olvasó rápillant az 2015 májusára vonatkozó tengerfelszín-hőmérsékleti anomáliatérképre (PO.DAAC JPL 2024, 5. ábra), nyomban megérti, hogy a tengerfelszín-hőmérséklet a térbeli hullámhossz alapján sem lehet a légkörben jól elkeveredő CO_2 következménye.



5. ábra: A Csendes-óceánon 2015 májusában rekord meleget mutató havi átlagos tengerfelszín-hőmérsékleti anomália. Forrás és részletek: PO.DAAC JPL (2024).

Vörös farok. A 3. ábrán már előfordult a Scotese fanerozoikumra vonatkozó egyik hőmérsékleti rekonstrukciója. Vegyük észre, hogy a paleoéghajlati 6. ábra (Scotese „The Phanerozoc Global Temperature" címen közzétett paleohőmérsékleti rekonstukciója) klímamodellezésen alapuló jövőbeli előrejelzést is tartalmaz! Az idősor záró, emelkedő szakasza lényegében teljes egészében klímamodellezésből származik. Szerepeltetése egy paleoéghajlati ábrán inkorrekt, de nyilván célzatos. Ez egy klasszikus „vörös farok" (Balázs 2015).



6. ábra: Scotese (2016) paleohőmérsékleti rekonstrukciója, amelyen a 2016-os 14,5 Celsius fok érték utáni emelkedő szakaszt lezáró „19,8? PAW" érték az emberi eredetűnek feltételezett melegedés végére vonatkozik. PAW: Post-Anthropogenic Warming, azaz az emberi melegedés utánra vonatkozó). E szakasz a paleohőmérsékleti rekonstrukcióban testidegen „vörös farok".

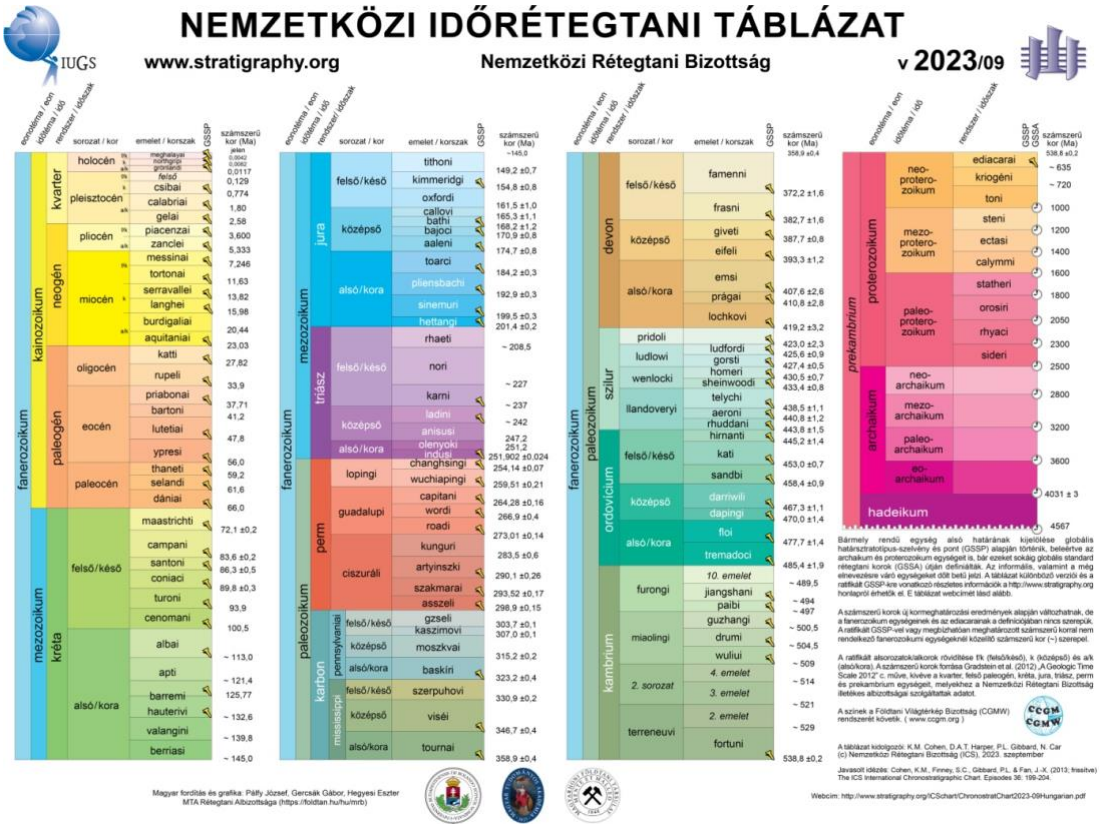
Összefoglalás. Embey-Isztin Antalnak immár második írására adtunk terjedelmesebb választ, mint amekkora terjedelmű az ő megjegyzése volt. Ennek az az oka, hogy minden megszólalás nagy odafigyelést igényel. És mivel a természet nem egyszerűsíthető le „egybitesre”, igyekeztünk megvilágítani – mindannyiunk okulására – számos olyan földi jelenséget, amelyekről nem ugyanazt gondoljuk.

Nézeteltérésünk valójában ott kezdődik, hogy a jelenkori globális felmelegedés visszavezetése a CO_2-alapú üvegház-erősödésre, mint elsődleges okra, csupán gyarló klímamodelleken és igazolatlan visszacsatolásokon alapul, amint azt az előző levelünkben (Szarka et al. 2024) indokoltuk. Úgyhogy az a vita, ami arról folyik, hogy a földtörténet során bekövetkezett tömeges kihalásokat a CO_2 és a felmelegedés, vagy az SO_2 és a lehűlés, vagy esetleg valami más okozta-e, nem tekinthető függetlennek a földtörténeti és a jelenkori klímaváltozás okairól folyó vitától.

Egyetértünk, hogy a geológiának kitüntetett szerepe van a földtörténet – benne a földi éghajlatváltozások története – megismerésében. Záró illusztrációképpen az Olvasó szíves figyelmébe ajánljuk a Nemzetközi Geológiai Unió részeként működő Nemzetközi Rétegtani Bizottság 2023-ban frissített időrétegtani táblázatát (IUGS ISC 2023, 7. ábra), amelyben minden egyes tétel egyúttal jelentős földi klímaváltozási következménnyel is járt, és néhány közülük kihalási eseményekkel is.

Messzemenően elismerve, hogy a CO_2, illetve a szénciklus szerepe geológiai léptékben is óriási jelentőségű, a szakirodalom áttekintése és a fizikai törvényszerűségek alapján összességében az a véleményünk, hogy az éghajlatváltozást és a tömeges kihalásokat illetően *a CO_2 geológiai léptékben is klímaindikátor, és nem hatótényező*.

Berényi Dénes 2011-es megállapításához (*„…a Föld klímájának változását nem lehet egyetlen tényezőre visszavezetni. A klíma számos ismert és ismeretlen tényező hatására alakul ki, illetve változik meg”)* annyi kívánkozik még, hogy aki egyetlen tényezőt emel ki és csak arra fókuszál, az biztosan téved. Lezárt ügyek a tudományban nincsenek.



7. ábra: Az IUGS Nemzetközi Rétegtani Bizottság friss (2023/09-es) időrétegtani táblázata magyar nyelven is elérhető (IUGA ISC 2023)

Záró kérdésünk:
Ha négy és félmilliárd éven keresztül kozmikus léptékű folyamatok eredményeképpen ismételten a kialakuló CO_2-koncentráció okozta az élővilág egyes elemeinek (szelektív) kihalását (nyilvánvalóan emberi hozzájárulás nélkül), akkor mi a realitása és az értelme annak, hogy most egyedül az emberi eredetű CO_2-kibocsátást visszafogva próbáljuk negyedszázad alatt úgymond megállítani a klímaváltozást a NetZero kampánnyal, a társadalom életkörülményeinek drasztikus lerombolása árán? Eközben a kozmikus léptékű folyamatokra, mint például a földköpeny felső részéig lehatoló mélytörésekhez kapcsolódó szabad földgáz- és CO_2-telepekre a kontinentális kéreg többmilliárd éves, stabil töredékein semmiféle befolyásunk sincs…

Hivatkozások

Balázs G. (2016): Új szavak, kifejezések. IKU-Inter Nonprofit Kft.

Bond D. P., Grasby S. E. (2017): On the causes of mass extinctions, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 478, 3-29, ISSN 0031-0182, https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.11.005.

Callendar G. S. (1938): The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 64, 275, 223-240, https://doi.org/10.1002/qj.49706427503

Clapham M. E., Renne P. (2019): Flood Basalts and Mass Extinctions. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 47, 1, DOI:10.1146/annurev-earth-053018-060136

Courtillot V. (1990): A Volcanic Eruption. Scientific American, 263, 4, 85-93.

Courtillot V. (1999): Evolutionary Catastrophes: The Science of Mass Extinction. Cambridge University Press, https://archive.org/details/evolutionarycata0000cour

Courtillot (2014): Flood basalt volcanism as the main cause of mass extinctions: evidence for huge magmatic pulses and mega-flows. MTA KÖTEB előadás, MTA Székház, 2014. október 29.

Embey-Isztin A. (2024a): A geológia szerepe a klímaváltozás okainak megértésében. PBK Fórum

Embey-Isztin A. (2024b): Megjegyzés Szarka László Csaba, Bérczi István, Csernai László, Bársony István, Kiss Ádám (2024): Földi klímaszabályozás – természettudományi perspektívában Válasz Embey-Isztin Antalnak PBK Fórum cikkéhez. PBK Fórum

Gallagher T., Palmer R. (2022): Lessons from Paleoclimate – Conveniently Ignored bythe IPCC, https://youtu.be/pj-Iu1i317E

Gerlach T. (2011): Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide, EOS, 92, 24, 201-202.

Harangi Sz., Jankovics M. É., Taracsák Z., Németh K., Sági T., Kiss B., Soós I., Lukács R., Zemeny A., Pál-Molnár E., Ntaflos T. (2015): Bazaltok: a magmaképződéstől a vulkánkitörésig – új eredmények és perspektívák 6. Kőzettani és Geokémiai Vándorgyűlés (Szeged) konferenciakötete, 9-21.

Humlum O. (2022). The State of the Climate Based on Real Observations. ICSF-Climtel előadás, 2022. december 7., https://www.icsf.ie/lecture-series-2022

IUGS ISC (2023): Nemzetközi Időrétegtani Táblázat. Az International Chronostratigraphic Chart (https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09.jpg) magyar fordítása. Fordította: Pálfy J. Gercsák G. , Hegyesi E., MTA Rétegtani Albizottsága). https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09Hungarian.jpg

Kender, S., Bogus, K., Pedersen, G. K., et al. (2021): Paleocene/Eocene carbon feedbacks triggered by volcanic activity. Nature communications, 12, 1, 5186.

Koutsoyiannis D., Kundzewicz Z. W. (2020): Atmospheric temperature and CO_2: Hen-or-egg causality?. Sci, 2 (4), 83, doi: 10.3390/sci2040083.

Koutsoyiannis D., Onof C., Christofides A., Kundzewicz Z. W. (2022a): Revisiting causality using stochastics: 1.Theory. Proceedings of The Royal Society A, 478, 2261, 20210835, doi: 10.1098/rspa.2021.0835.

Koutsoyiannis D., Onof C., Christofides A., Kundzewicz Z. W. (2022b): Revisiting causality using stochastics: 2. Applications. Proceedings of The Royal Society A, 478, 2261, 20210836, doi: 10.1098/rspa.2021.0836.

Koutsoyiannis D., Onof C., Kundzewicz Z. W., Christofides A. (2023): On hens, eggs, temperatures and CO_2: Causal links in Earth's atmosphere. Sci, 5, 3, 35, doi: 10.3390/sci5030035.

Koutsoyiannis D. (2024): Stochastic assessment of temperature – CO_2 causal relationship in climate from the Phanerozoic through modern times. Mathematical Biosciences and Engineering, 21, 7, 6560–6602, doi:10.3934/mbe.2024287, 2024.

Kovács I. J. (2024): Az MTA FI Lendület Pannon LitH_2Oscope Kutatócsoport 2024. augusztus 18-ai FaceBook bejegyzése, https://www.facebook.com/LitH2Oscope/

Kump, L.R., Pavlov, A., Arthur, M.A. (2005): Massive release of hydrogen sulfide to the surface ocean and atmosphere during intervals of oceanic anoxia. Geology 33, 397–400

Levinton J. S. (2024): Causes and definition of mass extinctions. In: Encyclopedia of Biodiversity (Third Edition, Ed: Levin S. A.), Elsevier, https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/mass-extinction

McLean D. M. (1978): A Terminal Mesozoic "Greenhouse": Lessons from the Past. Science, 201, 4354, 401-6, doi: 10.1126/science.201.4354.401

PO.DAAC JPL (2024): https://podaac.jpl.nasa.gov/node/889

Racki G. (2021): The Big 5 Mass Extinctions. Encyclopedia of Geology (Second Edition, Eds: Alderton D, Elias S.), Chapter 44, 603-616, Elsevier

Scotese C. R. (2016): Some Thoughts on Global Climate Change: The Transition for Icehouse to Hothouse Conditions In book: Earth History: The Evolution of the Earth System. PALEOMAP Project. May 25, 2015 v19a

Schobben M., van de Schootbrugge B., Paul B. Wignall P. B. (2019): Interpreting the Carbon Isotope Record of Mass Extinctions. Elements 15, 5, 331–337. DOI: https://doi.org/10.2138/gselements.15.5.331

Sepkoski, J.J. (1986): Phanerozoic Overview of Mass Extinction. In: Raup, D.M., Jablonski, D. (eds) Patterns and Processes in the History of Life. Dahlem Workshop Reports, vol 36. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70831-2_15

Shaviv N. J., Svensmark H., Veizervensmark J. (2023): The Phanerozoic climate. Annalks of the New York Academy of Science, 1519, 1, 7-19.

Szarka L. (2021): Az Ég hajlatán. Barcza Szabolcs (1944–2021) munkásságának éghajlatkutató fejezete. Magyar Geofizika 62, 4, 239–247.

Szarka L. (2024): Beszámoló. „Klíma és energia – mellébeszélés nélkül", https://pbk.info.hu/wp-content/uploads/2024/08/Tusvanyos_Beszamolo_05082024_BI.pdf

Szarka L., Bérczi I., Csernai L., Bársony I., Kiss Á. (2024): Földi klímaszabályozás – természettudományi perspektívában Válasz Embey-Isztin Antalnak. PBK Fórum

Vinós J (2023): Solving the Climate Puzzle. The Sun's Surprising Role. Critical Science Press, Madrid

Wrightstone G. (2017): Inconvenient Facts: The science that Al Gore doesn't want you to know, Silver Crown Productions, LLC.

Zhang H., Zhang F., Chen J-b., Erwin D. H., Syverson D. D., Ni P., Rampino M. et al. (2021): Science Advances, 7, 47, DOI: 10.1126/sciadv.abh1390