

Földi klímaszabályozás – természettudományi perspektívában. Válasz Embey-Isztin Antalnak

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

laszloszarka54@gmail.com

Beérkezés: 2024. június 4., Elfogadás: 2024. június 14.

*„Van valami varázslatos a tudományban.
A tények csekély befektetéséből a
feltevések bőséges profitja
árad vissza az emberhez.”*
(Mark Twain: Utazás a Mississippin.)

Rövid tartalmi kivonat

Embey-Isztin Antal PBK Fórumon megjelent vita cikkének kiinduló állításával – miszerint „a klímaváltozások okainak értelmezésében a geológiának kitüntetett szerepe van” – annyiban egyetérthetünk, hogy a tények zömét a geológia rögzíti. Az okok értelmezésében azonban széles alapú természettudományi megközelítésnek kell érvényesülnie. Ami pedig „az éghajlatváltozás hosszú távú geológiai perspektíváját” illeti, egyáltalán nem látszik, hogy „a Föld légkörének üvegházhatású gáz koncentrációja” lenne „a bolygó legjelentősebb hosszú távú klímaszabályozó rendszere”. Tekintettel arra, hogy a geológiai perspektíva is természeti törvényekből ered, ezért e válasz cikket alapfogalmak (üvegházhatás, földi víz termosztát szerepe. Henry-törvény, modell és valóság) megvilágításával kezdjük, majd ezután térünk át a földtörténeti léptékre, részletesen foglalkozva a Paleocén-Eocén Termális Maximum (PETM) fizikai hátterével. Az Embey-Isztin Antal által hivatkozott publikációból nem derül ki egyértelműen, hogy az esemény bekövetkezésekor a CO₂-koncentráció vagy a tengerfelszín-hőmérséklet változott-e meg először. Javasoljuk továbbá figyelembe venni, hogy az esemény során felszínre kerülő bazaltláva hőtartalma 22 évnyi extra napsugárzás energiájának felel meg, ami önmagában elegendő lehet a levegő- és tengervíz-hőmérséklet megemelkedéséhez. A szén-dioxid-kibocsátás éghajlat-változtató hatása a bazaltláva fagyáshőjéhez képest elenyésző.

Bevezető

Embey-Isztin Antal „A geológia szerepe a klímaváltozás okainak megértésében” című, PBK Fórumon közzétett írásában számos vitatható állítás szerepel:

1. negligálja a vízpára szerepét az üvegházhatás kialakulásában, mondván, hogy a pára lecsapódik, a CO₂ a légkörben marad;
2. nem említi a CO₂ fotoszintézisben játszott szerepének koncentráció-csökkentő hatását;
3. a CO₂ szilikátok mállásában játszott szerepét túlhangsúlyozza, míg a CO₂ valóban jelentős szerepét a mészkőképződésben és -mállásban alulsúlyozza;
4. alulhangsúlyozza a nem antropogén extraterresztriális tényezők (a napsugárzás, a Föld keringési pályájának sajátosságai, a tengelyferdeség változásai, a naptevékenység) szerepét;
5. a vulkanizmus, mint jelenség valóban CO₂-forrás, de az illók mélytörések mentén is földfelszínre kerülnek, amint ezt egymás felett elhelyezkedő, mélytörésekhez támaszkodó szabad földgáztelepek sora bizonyítja. A jelenségkör szoros összefüggésben van a kontinensek/kéreglemezek vándorlásával, az meg a Föld belső szerkezetében (köpeny, mag) lejátszódó folyamatokkal;
6. Az 1. és 3. ábrája közötti szám nélküli (véltetően 2.) ábra nem ad választ arra, hogyan lehet egybevetni a 2021. január-júniusi CO₂-koncentrációt a pontosabban nem definiált, de értelemszerűen nem néhány év(ezred)re? kiterjedő "preindustrial" periódussal. Az ábrán is látható, és szövegesen is említi, hogy a Föld a legutóbbi 66 millió év során a nyilvánvalóan nem antropogén CO₂ légköri koncentrációja a mainál lényegesen magasabb volt. A Paleocén/Eocén határon megjelenő csúcsot nem értelmezi, bár az a Dinoszauruszok kihalását (is) okozó kozmikus katasztrófához kapcsolható (mellék) jelenség. Hasonló, de a cikkben nem részletezett kisebb maximum látható a miocén kor közepén (~20 millió éve), valamint a pliocén pleisztocén határhoz közel (~4-6 millió éve): az előbbi gyanúsán egybeesik a Tethys-óceán bezáródásával, az utóbbi pedig a proto-Földközi-tenger kiszáradásával ("Messinai sókrízis");
7. Az utolsó, szöveges 9. oldalon foglalkozik azzal, hogy a globális átlaghőmérséklet növekedése csak a troposzférára jellemző, amit negatívan minősít. Nem tesz említést arról, hogy ha ez nem így lenne, a Föld is életre alkalmatlan holt bolygó lenne, mint a Mars, illetve minden olyan bolygó az univerzumban, amely nem rendelkezik a Földön lévőhöz hasonló hőháztartással.

Ugyanakkor más mértékadó geológusok sok szempontból másként vélekednek. Császár et al. (2010) például – részben elismerve a CO₂ szerepét – ezt írja: *„a ma leginkább meghatározónak tekintett melegházhatású gázok legjelentősebbjének, vagyis a szén-dioxidnak az eloszlásán, valamint a vulkáni aktivitás mértékén túlmenően, ma még egyértelműen meg nem határozható további okoknak is jelentős szerepük lehetett az éghajlat ... alakulásában”*. A Föld Bolygó Nemzetközi Éve (2007-2009) idején a geológusok jellemzően még csak annyit mondtak, hogy a lehetséges éghajlat alakító tényezők sorában megjelent az ember (Szarka et al. 2009). A földtörténeti éghajlatváltozások okainak változatosságát akkor még csak kevesen kérdőjelezték meg. Ma már viszont egyre elterjedtebb az – az Embey-Isztin Antal által is képviselt – felfogás, miszerint geológiai perspektívában a fő klímaszabályozó tényező a CO₂ lenne, anélkül, hogy az állítás (amint Vincent Courtillot is elmondta az mta.hu-n ma már nem megtalálható előadásában, Courtillot 2014) bizonyítást nyert volna.

A földtörténeti klímaváltozások eddigi legteljesebb fizikusi áttekintését Magyarországon Berényi (2011) adta. Megállapította, *„hogy a Föld klímájának változását nem lehet egyetlen tényezőre visszavezetni. A klíma számos ismert és ismeretlen tényező hatására alakul ki, illetve változik meg.”* Hasonló megállapításra jutott Rácz (2013) is.

A lényegét illetően ennél többet ma sem tudunk mondani. A téma teljesebb megértése és megvilágítása érdekében először igyekszünk összefoglalni a klímaváltozás okainak feltárásához feltétlenül szükséges ismereteket, majd ezt követően térünk rá a geológiai perspektívára.

Üvegházhatás

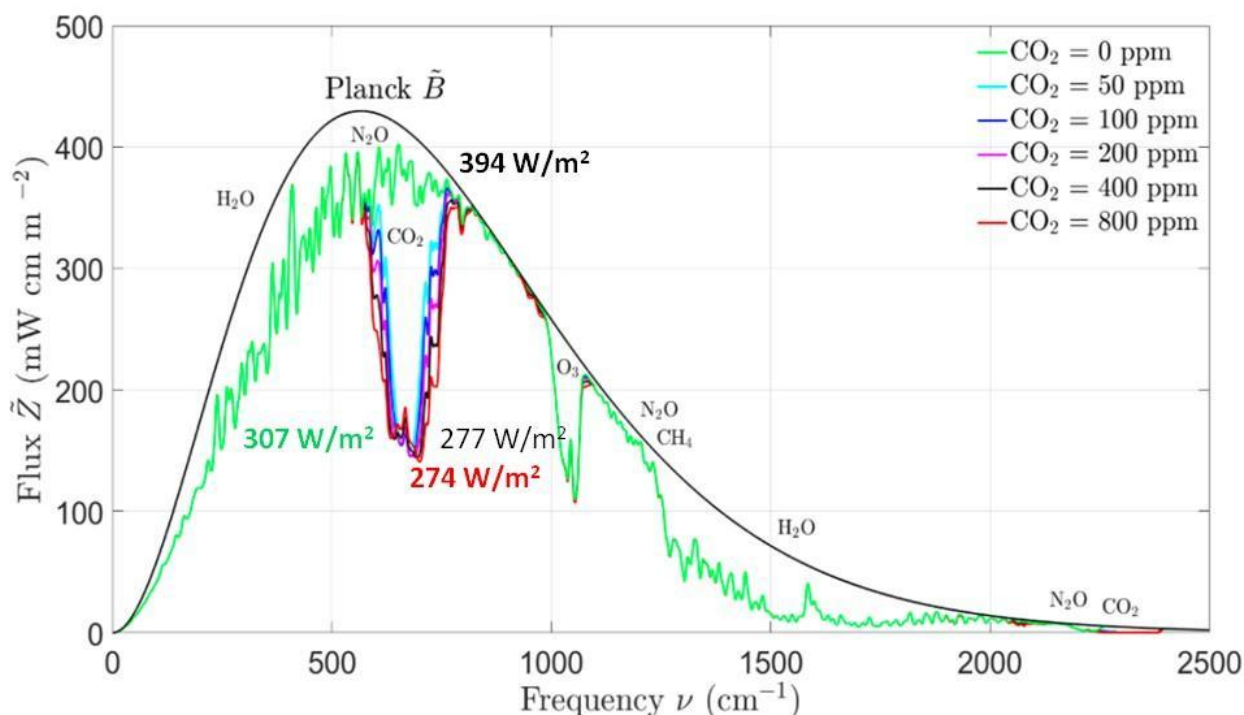
A légköri üvegházhatás – eredetileg kertészeti fogalom – számos félreértésre ad okot. Az eredeti üvegházhatás alapja az, hogy a napfény az üveglapon átjut, de a hő nem, azaz az üveg a fényre átlátszó, a hőre nem. Egy talaj fölé helyezett üveglapon a napfény által felmelegített talaj hősugárzása nem tud visszajutni. Hogy a meleg levegő az üveglap alatt maradjon, oldalfalakkal le kell csökkenteni a légáramlást. Ez az üvegház lényege. A kertészeti üvegházban a benti levegő melegebb a kintinél. Ha nem vigyázunk, könnyen felforrósodhat, gondoljunk csak a nyári napon zárt ablakokkal hagyott autóra. A légköri üvegházhatás definíciója láthatóan sántít, mert a Föld fölött se üveg nincs, se a légköri áramlást nem tudjuk megakadályozni. A légköri üvegházhatás alatt azt értik, hogy egyes gázmolekulák képesek az infravörös fotonok akadályozására olyan módon, hogy a foton-energiát saját mozgási energiájukká alakítják. Az elektromágneses spektrum infravörös tartományában ugyanis a gázmolekulák dipólmomentuma a foton frekvenciáján berezonál. A H₂O-nak eredendő, a CO₂-nek és CH₄-nek például indukált dipólmomentuma van, és éppen ez az üvegházgázok megkülönböztető jegye. Az üvegházgázok a felvett energiát nyomban tovább is adják, egyrészt úgy, hogy dipólmomentum-rezgésük a hő minden irányú sugárzását jelenti, másrészt úgy, hogy mozgási energiájukat ütközéssel átadódik a szomszédos nagyszámú N₂ és O₂ molekulának. A lényeg az, hogy az üvegházhatású gázok az energiát nem befogják és „megtartják vagy tárolják”, hanem átmenetileg feltartóztatják (késleltetve az energiaátadást), de nyomban tovább is adják. Ha például elektromos helyettesítő áramkörrel lenne szó, az ún. „légköri üvegházhatást” talán egy egyszerű áramköri ellenállással lehetne a legjobban szemléltetni. Évtizedek óta halmozódó félreértések következménye, hogy a légköri üvegházhatásban átmeneti feltartóztatás helyett sokan tartós „befogást” és „megtartást”, „tárolást”, mindörökké tartó „csapdázódást” (akkumulálódást) képzelnek el.

Az üvegházgáz-koncentráció hatásának mértékéről némi fogalmat alkothatunk az 1. ábra alapján. A hőkisugárzás elméleti görbáját (a Stefan-Boltzmann törvény szerinti ún. Planck-görbét) mutatja a sima fekete görbe. Egy adott gázösszetételű légkör kisugárzása a benne lévő üvegházgázok összetételétől függően, az ún. Schwarzschild-görbéknek megfelelően változik. A recés görbék kizárólag csak a CO₂-tartalomban különböznek egymástól. A különféle színek különféle légköri CO₂-koncentrációknak felelnek meg (0 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm, 800 ppm). A vastag betűs fekete szám a Planck-görbe szerinti teljes földi hőkisugárzást mutatja; a zöld, a vékony fekete és a piros szám pedig az adott színű Schwarzschild-görbék hőkisugárzását, azaz az adott görbe alatti teljes területet.

A légkörben a CO₂ első megjelenése (azaz koncentrációjának emelkedése 0-ról 100 ppm-re) láthatóan a Schwarzschild-görbe 30 W/m²-nyi területcsökkenését okozta, de a CO₂-koncentráció további 100-100 ppm-mel való növekedésének hatása már egyre csekélyebb. A CO₂-koncentráció 400 ppm-ről 800 ppm-re való növekedése (azaz a jelenlegi szint megduplázódása) a hőkisugárzást elméletileg már csak 3 W/m²-rel csökkenti. További korlátot jelent, hogy a CO₂-üvegházhatása lényegében csak addig képes növekedni, amíg a CO₂ gerjesztésére alkalmas frekvenciatartományban van elegendő foton. A CO₂-koncentráció

emelkedésével tehát az üvegházhatás-telítődést mutat (Reményi, 2010). Olyan ez, mint egy falra festett fekete pötty: hiába festjük át sokadszor, nem lesz feketébb.

A SCHWARZSCHILD-GÖRBE MÓDOSULÁSA



1. ábra: A földi hőkisugárzás elméleti görbéje (a Stefan-Boltzmann törvény szerinti ún. Planck-görbe), valamint az üvegházhatás-hatást számértékkel mutató ún. Schwarzschild-görbék, különféle légköri CO₂-koncentrációkra (0 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm, 800 ppm) meghatározva. A jelenlegi CO₂-koncentráció megkétszereződéséből származó üvegházhatás töredéke annak, mint amennyi a nulla CO₂-tartalom 100 ppm-re növekedésekor tapasztalható. Forrás: de Lange et al, 2022

Összegezve: a CO₂-nek nulláról valamennyire való növekedésekor van érdemi üvegházgáz-szerepe, a mai szint megduplázódása viszont már csekély hatású. Mivel a fizikai törvények a földtörténet során végig ugyanazok voltak, már az eddigiek alapján is megkérdőjelezhető az az állítás, miszerint a széndioxid a mainál nagyobb légköri koncentráció mellett klímaszabályozó szerepet tudott volna betölteni.

A legfőbb klímaszabályozó a földi víz

Embey-Isztin (2024) elismeri ugyan, hogy a vízből „sokkal több van az atmoszférában”, mint az összes többi üvegházhatású gázból, mégis úgy véli, hogy a víz „hatása elhanyagolható a globális éghajlat szabályozásában. A víz ugyanis három fázisban fordul, elő ezért az atmoszférában nem tartózkodik hosszan, mert csapadék formájában távozik onnan.”

Ha a vízgőzből csapadék lesz, majd megfagy, jelentős mennyiségű hó szabadul fel (2256 kJ/kg, illetve 334 kJ/kg), majd ha a jég elolvad, és a víz elpárolog, a környezetből ugyanennyi energia vonódik el. (Szublimációkor pedig az olvadás- és párolgáshő összege.) A vízmolekula

minden egyes megmozdulása – allotróp átalakulása – tehát energiaátadással, azaz időjárás- és klímaszabályozással jár.

A klímaváltozás a Földre érkező és onnan távozó energiákról, valamint a különféle energiák szakadatlan földi átalakulásáról és szállítódásáról szól (Vinós 2023). A fény- és hősugárzás (ami a légkör tetején átlagosan $300\text{-}340\text{ W/m}^2$), valamint hőáramlás, hővezetés és halmazállapot-változások mellett mindenféle oda-vissza energiaátalakulások is zajlanak (helyzeti-mozgási, gravitációs, elektromágneses stb.) Ebben az összetett – térben és időben rendkívül változatos – rendszerben az üvegházhatás az energiaátalakulások sorában mindössze egyetlenegy jelenség. Magában az üvegházhatás nevű légköri jelenségben is a víz játssza a legjelentősebb szerepet. A 1-2% (azaz 10-20 ezer ppm) koncentrációjú vízpára üvegházhatása 25-50-szer nagyobb a ma kb. 0,04 %-nyi (400 ppm-nyi) koncentrációjú széndioxidénak. Bizonyos ráadásul az is, hogy az üvegházhatást az üvegházhatású gázok pillanatnyi légköri koncentrációja, és nem az egyes molekulák légköri tartózkodási ideje határozza meg.

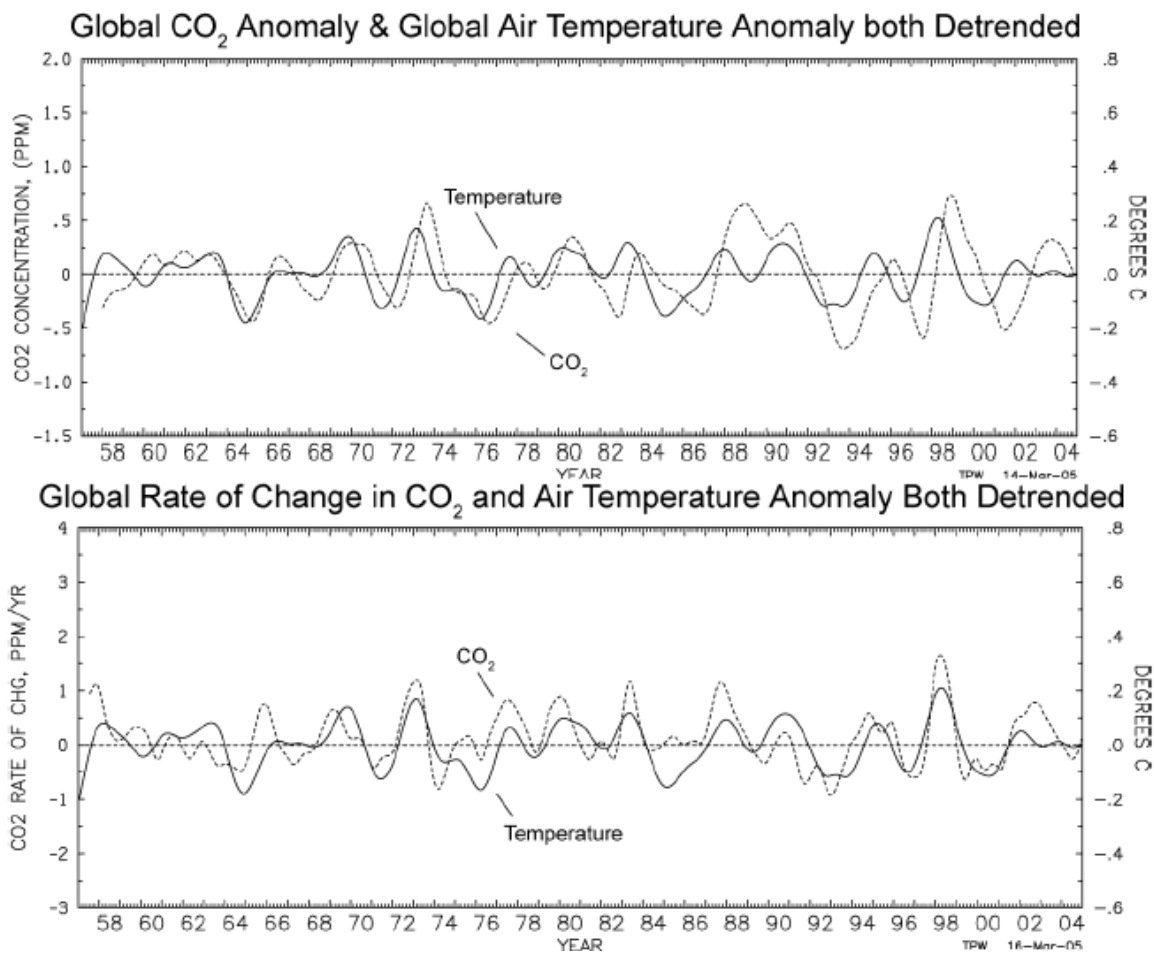
A vízről összességében elmondható tehát, hogy a Föld legjelentősebb hosszú távú klímaszabályozó rendszerét éppen a bőséges földi víz változatos átalakulási képessége (párolgás/lecsapódás, olvadás/fagyás), és mindenekelőtt a fény-árnyék viszonyokat hatékonyan szabályozni képes felhőképződés jelenti. Ha túl meleg van, akkor a trópusi óceán felszínén intenzívebb lesz a párolgás, emiatt több lesz a felhő, és a fehér színű felhőtetőkről a napfény egyre nagyobb része verődik vissza. Ennek következményeként az óceán felszínről az elpárolgás csökken, ami a felhőzet csökkenéséhez, azaz a kevesebb árnyék a földfelszín naposabbá válásához, a földfelszín naposabbá válásához, újbóli felmelegedéshez vezet. John F. Clauser Nobel-díjas fizikus szerint felhők örökös játéka nem más, mint a földi klímaszabályozás alapvető működésének megnyilvánulása (Clauser 2024). Ugyanő mutat rá arra is, hogy a felhőzet albedója (fényvisszaverő-képessége) nem 0,36 (amint az IPCC állítja), hanem a fehér színre jellemző 0,8-0,9. Ebből pedig az következik, hogy a negatív visszacsatoló hatás sokkal nagyobb, mint az IPCC gondolja (eléri a $15\text{ W/m}^2\text{K-t}$), esélyt sem adva a földi hőmérséklet „megfutasának” (Clauser 2024).

A H_2O -termosztát mindemellett a Nap-Föld-világűr rendszerben még a Föld ún. negentrópiájáról (a rendezettség szüntelen növekedéséről) is gondoskodik, ami minden földi evolúció alapja (Csernai et al. 2016, 2017)

Hőmérséklet- és CO_2 -változás

Földünk felszínének több mint kétharmadát óceán borítja. Nem mellékes jelenség tehát, hogy „ha egy folyadék p nyomású gázzal kerül érintkezésbe, a gáz oldódik a folyadékban, majd bizonyos idő múltán az oldat telítetté válik. A tapasztalat szerint *a folyadékban oldott gáz telítési koncentrációja – a gáz oldhatósága – arányos a p nyomással (Henry törvénye, 1803), és a növekvő hőmérséklettel csökken.*” (Az idézet Budó Ágoston: Kísérleti fizika című tankönyvének 467. oldalán megtalálható; Budó 1972). Az ugyanott bemutatott számpélda szerint egy atmoszféra nyomáson a CO_2 -oldhatósága 0 Celsius-fok hőmérsékletű vízben 1713 köbcentiméter literenként, 20 fokosban pedig már csak 878. A nyomás hatása a legjobban talán a pezsgősüveg kinyitásakor feláramló buborékokkal, a hőmérsékleté pedig a pezsgő felhörpintésekor a szájban kialakuló pezsgéssel illusztrálható. A Henry-törvény következménye, hogy az óceán melegedése törvényszerűen a légköri CO_2 -koncentráció emelkedésével (azaz a melegvizű óceánokban a CO_2 távozása miatt karbonátos

üledékképződéssel), lehülése pedig a légköri CO₂-koncentráció csökkenésével (azaz a hideg tengerekben/óceánokban karbonátmentes törmelékes üledékes lerakódásával) jár. Embey-Isztin Antal helyesen, a Henry-törvénynek megfelelően írja le, hogy „a kezdeti melegedés, melyet a Föld keringési pályájának és a tengely ferdeségének változásai váltottak ki, a felmelegedő óceánokból széndioxidot szabadított fel...”. Viszont azzal folytatja: „...és ezek pozitív visszacsatolással újabb lendületet adtak a már folyamatban lévő hőmérséklet emelkedésnek”. Csakhogy tévedés a Henry-törvényt „pozitív visszacsatolás”-ként értelmezni.



2. ábra: Trendtelenített globális átlaghőmérséklet- és CO₂-adatsorok 1958 és 2004 között. Felső ábra: ΔT és ΔCO_2 -adatok, alsó ábra: ΔT és $\Delta \text{CO}_2/\Delta T$ adatok. Forrás: Charles David Keeling 2005-ös Tyler Pize előadása: Keeling 2005.

Az antarktisi jégfúrások fúrómagjainak gázösszetétel- (CO₂ és oxigén izotóp) vizsgálatáról Embey-Isztin Antal szó szerint elismeri, hogy „a buborékban a CO₂ és egyéb gázok koncentrációja szorosan követi az interglaciális és glaciális periódusok közötti emelkedő és csökkenő hőmérsékleteket.” A követés néhány száz éves időbeli késleltetést jelent. Tehát – amint a Henry-törvény írja – az óceán hőmérséklet-változása az ok, az okozat pedig a légköri CO₂-szintváltozás. A Mauna Loán a légköri CO₂-szint közvetlen megfigyelését 1958-BAN Charles David Keeling kezdte el. (Az évek múlásával folyamatos emelkedést és éves lüktetéseket mutató CO₂-görbét óróra neveztek el Keeling-görbének.) Az 1958 és 2003 közötti időszakra összevetette a trendektől megtisztított globális léghőmérséklet- és CO₂-adatsort (Keeling 2005), és úgy találta, hogy a légköri CO₂-növekedés (a $\Delta \text{CO}_2/\Delta t$ idő szerinti deriváltja) akkor veszi fel a legnagyobb pozitív értéket, ha a hőmérséklet a legmelegebb, és

akkor a legkisebb (negatív) értékű, amikor a globális átlaghőmérsékletnek minimumai vannak (2. ábra).

Mindehhez hozzá kell vennünk, hogy „a szerves anyagok bomlásának üteme hőmérsékletfüggő, tehát a hőmérséklet változása is lehet oka a metán és szén-dioxid légköri koncentrációja változásának” (Major 2010).

Klímodellezés

Embey-Isztin (2024) szerint a földi éghajlatváltozásokat alapvetően a légköri CO₂-koncentráció szabályozta. Ha így lenne, a klímamodelleket geológiai léptékben is lehetne alkalmazni. Ezzel szemben a klímamodellezés terén a helyzet az, hogy a modell-előrejelzéseknek a fele sem igazolható (bizonyos scenáriók a valóságos hőmérséklet-emelkedésnél több mint kétszer nagyobbat jeleznek, különösen 2000 óta). A modellek hátrajelzései pedig az 1975 előtti lehűléses időszak leírására bizonyosan teljességgel alkalmazhatatlanok. (Eközben a kőolaj-geológiában a kőolaj- és földgáztelepek jövőbeli kitermelése ütemezésére kidolgozott előremodellek használhatóságát azzal kell bizonyítani, hogy lehet-e segítségükkel a múltbéli termelési tényadatokat visszafelé rekonstruálni.)

A klímamodellek nem vesznek tudomást a Nap, a Naprendszer, a kozmikus tér (pl. a Tejútrendszer spiráljainak 135 millió évente megtörténő keresztezése), az idegentest-bechapódások, a lemeztektonika geológiai léptékű hatásáról, noha pl. a lemeztektonika alapvetően változtatja meg a szárazföldek és az óceánok elhelyezkedését is. Mindezeket más magyar geológusok elismerik (Császár et al. 2010). Számos új eredmény is napvilágot lát, például hogy a Naprendszer bolygóinak mozgása állandóan billegtetti a földtengelyt (pl. Courtillot et al. 2023), sőt magát a Nap tevékenységet is befolyásolja (pl. Stefani et al. 2024).

Geológiai lépték

Minden földtudományi kutató egyetért abban, hogy a Föld 4,5 milliárd éves története felfogható klímaváltozások történetének. Az éghajlati rendszerben történt ősi változásokat a geológia „véste kőbe”: többek között por- és jég felhalmozódások, tavi és tengeri üledékek, dűnemezők és folyóteraszok, növényi fossziliák és faunaegyüttesek, ősi partvonalak, korallok, faéngyűrűk, mészkőbarlangok növekedési vonalai formájában. Folyton változó földi éghajlatról tanúskodik számos régészeti adat és írásos emlék is.

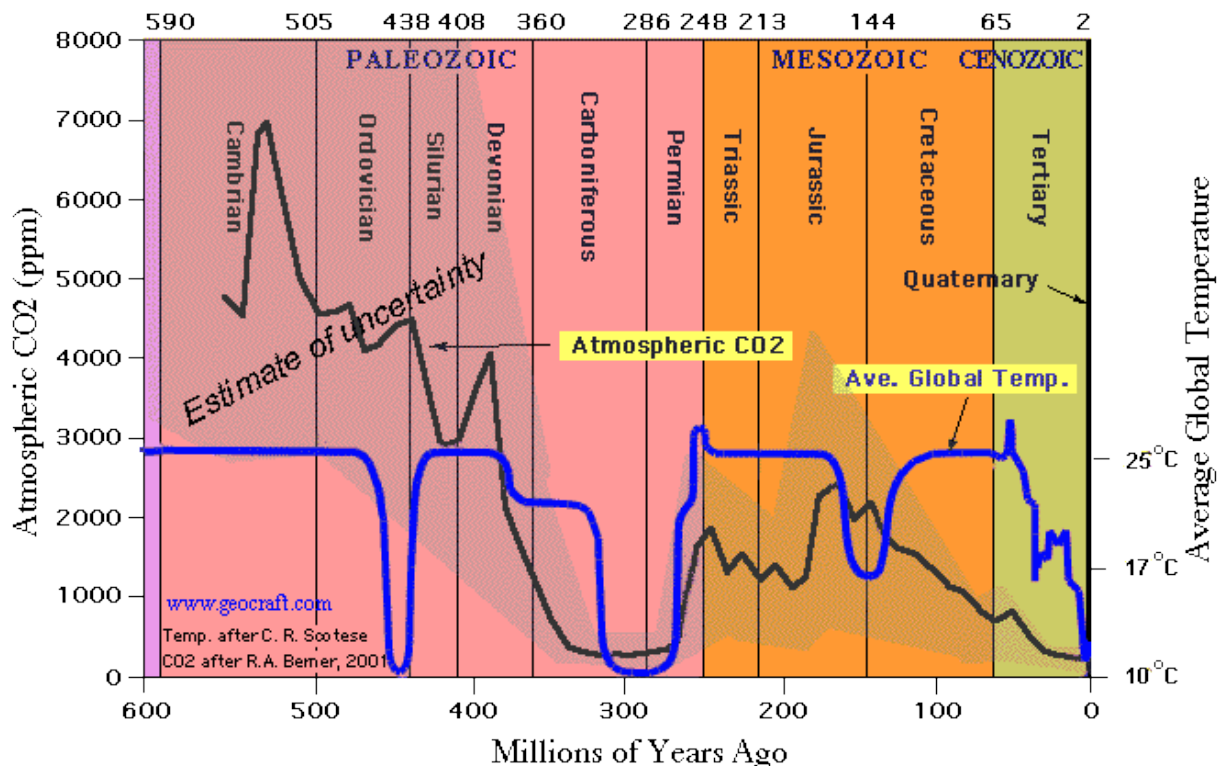
Olyan események zajlottak le a földtörténet során, amelyeknek változatossága bizony a kutatói képzeletet is meghaladja. Igyekezhetünk hipotéziseket felállítani (például, hogy a folyékony vizet a gyenge Nap ellenére a CO₂ üvegházhatása tette lehetővé), de az ilyen feltételezéseknek nincs bizonyító ereje.

A mintegy 4,5 milliárd éves eddigi földtörténet a látható élet előtti mintegy 4 milliárd évre, azaz az archeozoikum vagy prekambrium néven ismert időre és a legutóbbi 550 millió évet átfogó „látható élet” („phanerosz zóé”) alapján elnevezett fanerozoikumra (a tovább részletezett paleozoikum, mezozoikum és kainozoikum együttesére) osztható. A mai ember is a 66 millió éve kezdődött kainozoikum földtörténeti időben él. (A kainozoikum neogén korszakán belül az ún. negyedidőszak 11 700 éve kezdődött holocén földtörténeti korában, azon belül is a 4200 éve kezdődött meghálajai korszakban). A geológiai jellegben egymástól eltérő szakaszok egymástól eltérő éghajlati rezsimeket is jelentettek egyben.

A prekambriumban (a földtörténet első 4 milliárd évében) több, geológiailag is bizonyított jégkorszak volt. Az első hógolyó-föld-állapot (az ún. huron eljegesedés) ismereteink szerint a földtörténet felénél, 2,4 milliárd évvel ezelőtt következett be, és mintegy 300 millió éven át tartott. A második és harmadik hógolyó-föld-állapot az ún. kriogén eljegesedés (más néven a sturti és a marinoi eljegesedés) volt, 720-630 millió évvel ezelőtt, tehát ~90 millió éven át zajlott. A hógolyó Föld alacsony hőmérsékleteihez magas CO₂-koncentráció járult, ami közvetlen cáfolata Embey-Isztin Antal állításának.

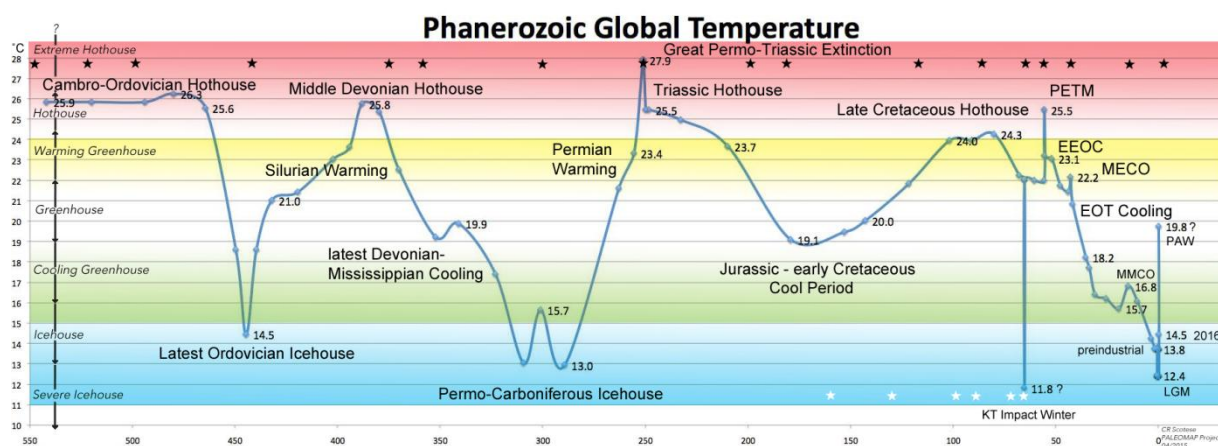
A fanerozoikum eon kezdete óta, azaz mintegy 545 millió éve az éghajlat alakító kölcsönhatások sorában immár a bioszféra is részt vesz. A fanerozoikum legmarkánsabb változásait a jégkorszakok jelentették. Geológiai bizonyítékok a fanerozoikumból a következő eljegesedésekről állnak rendelkezésre: a 460-420 millió évvel ezelőtti, kb. 40 millió év hosszúságú késő-ordoviciumi (más néven: Andok-Szahara) eljegesedés, a 360-260 millió évvel ezelőtti, kb. ~100 millió éven át tartó permo-karbon („Karoo”) jégkorszak, valamint a kainozoikumi eljegesedés (a jelenkori jégkorszak), ami tágan véve 34, szűken véve 2,5 millió évvel ezelőtt kezdődött (Vinós 2023).

A hőmérséklet és a CO₂-koncentráció alakulásáról a 3. ábrán bemutatott kép vázolható fel. Kétállapotú („hűtőházi” és „melegházi”) hőmérsékleteket, és a karbonig folyamatosan csökkenő CO₂-koncentráció trendet mutat. A karbon-kori CO₂-minimum (egyben O₂-maximum!) után újabb CO₂-emelkedés, majd egészen a közelmúltig tartó csökkenés mutatkozik.



3. ábra: Az átlaghőmérséklet és a légköri CO₂-tartalom hozzávetőleges alakulása a földtörténet legutóbbi fél milliárd évében. A hőmérséklet első közelítésben egy kétállapotú jelleget mutat, a CO₂-koncentráció 300 millió évvel ezelőtlig, majd mintegy csökkenő tendenciát mutat (széles hibahatárral). A CO₂ és a hőmérséklet a maihoz hasonló alacsony értéket a földtörténet során egyedül kb. 300 millió éve mutatott. Forrás: Geopcraft (2024), Berner és Kothavala (2001), Scotese (2024)

Ismereteink szerint az egyik legutóbbi, igen alapos hőmérsékleti rekonstrukciót Scotese tette közzé, a PALEOMAP projekt keretében (Scotese 2016, Scotese et al. 2018, Scotese 2024). Amint a 4. ábra mutatja, számos hirtelen felmelegedési és lehülési időszakot azonosított. A legmelegebb a perm és a triász határán volt, a második legmelegebb periódus pedig az Embey-Isztin Antal által említett PETM (Paleocén-Eocén melegedés) időszaka. Scotese (2016) hőmérsékleti idősorának legvégéről (a 2016. évi átlaghőmérséklethez képesti 5,3 °C emelkedésről) feltétlenül megjegyzendő, hogy az – ellentétben az összes 2016 előtti adattal – nem tényalapú. Legfeljebb modell-alapúnak mondható, ami már nem tartozik bele a geológiai hőmérséklet-rekonstrukcióba.



4. ábra: A legutóbbi 540 millió évre vonatkozó új, továbbfejlesztett Globális Hőmérsékleti Görbe PETM= Paleocén-Eocén Termális Maximum (55.8 Ma), EEOC=Korai Eocén Klímaoptimum (54 Ma – 46 Ma), MECO = Közép-Eocén Klímaoptimum (42 Ma), EOT = Eocén-Oligocén Átmenet (40 Ma – 33 Ma), MMCO=Középső – Miocén Klímaoptimum (15Ma – 13Ma), LGM= Legutóbbi Glaciális Maximum (21 ezer éve), 2016 = Mai Éves Középhőmérséklet, MAT, PAW = Poszt-Antropogén Felmelegedés. Fehér csillagok jelölik a gyors lehülési időszakokat (Stoll-Schrag események) 160, 127, 97, 91, 71 és 65 millió évvel ezelőtt). Fekete csillagok jelölik a gyors felmelegedési időszakokat (Kidder-Worsley események): a jelenlegit, valamint a 15, 43, 56, 65, 93, 120, 183, 200, 251, 300, 359, 374, 444, 499, 520 és 542 millió évvel ezelőttil.

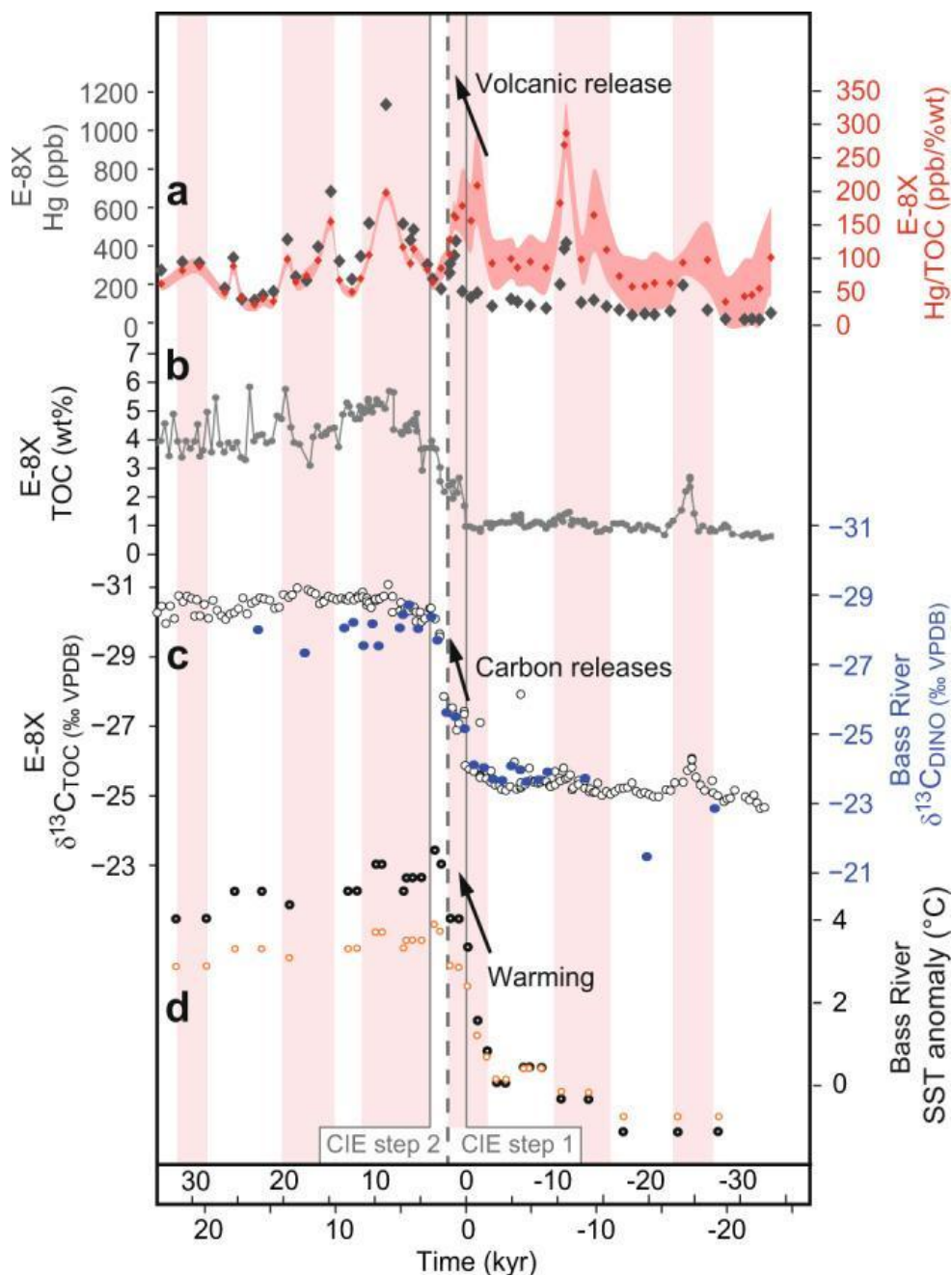
Forrás: Scotese 2016, Scotese et al. 2018

A Paleocén-Eocén Termális Maximum (PETM)

A harmadik, a kainozoiukumi jégkorszak előtti különös felmelegedés az 56 millió évvel ezelőtti korai eocén felmelegedés (vagy más néven Paleocene-Eocén Termális Maximum, PETM) volt. Embey-Isztin Antal – Kender et al (2021) cikkét perdöntő tanulmányként elfogadva – ezt a különleges felmelegedést az ún. Észak-atlanti Magma Provincia bazalttömegéből feláramló széndioxidnak tulajdonítja. A cikk és egyéb kapcsolódó tanulmányok adatai szerint a bazalt területe 1,3 millió km², térfogata 6,6 millió km³. Figyelembe véve a bazalt kb. 2900 kg/m³ sűrűségét, fagyáshőjét (500 kJ/kg), fajhőjét (0,6 kJ/kg°C), változó (2%-nak becsült) H₂O és (104 ppm-től to 1.9 wt% között változó, 1%-nak vett) CO₂-tartalmát (Le Voyer et al. 2019, Kovács et al. 2020), a következő adatok adódnak: a bazalttest tömege 2x10¹⁹ kg, benne 4x10¹⁷ kg vízgőz és 2x10¹⁷ kg, azaz 200 ezer Gt CO₂. Ez nagyságrendekkel kisebb, mint közszájon forgó szám: Scotese (2016) például 4,5x10¹⁸ tonna légkörbe bocsátott C-t említ. Véleményünk szerint akármennyi is lehetett, ugyanis nagy CO₂-koncentrációk esetében a CO₂-üvegházhatás telítődik, teljesen mindegy, hogy egy bizonyos mennyiségen túl még mennyi van a levegőben.

Ugyanakkor a folyékony bazalt megszilárdulásakor felszabaduló és a bazalt lehülésekor keletkező hő mennyisége rendre 10^{25} J és $1,2 \times 10^{25}$ J, azaz yottajoule-ban (1 YJ= 10^{24} J) kifejezve összesen 22 YJ. Összehasonlításképpen: a Földet 1 év alatt 1 yottajoule fényenergia éri. Tehát a földfelszínre 22 évnyi fényenergiának megfelelő hő került. Ez az Északi-atlanti hőimpulzus bőven elegendő lehetett az azt megelőző éghajlati viszonyok felforgatásához. (Mint ahogyan manapság is a kiömlő láva, és nem az abból kikerülő üvegházhatású gázoknak van forraló hatása.)

Az 56 és 47,8 millió évvel ezelőtt a korai eoécén teljesen kiegyenlített (pálmafás-krokodilos pólusokkal jellemzett) éghajlatát azért sem okozhatta a CO_2 , mert ilyen szerkezetű (túlnyomórészt a sarkokra irányuló) melegedést a légkörben egyenletesen elkeveredő CO_2 eleve nem okozhatott. Az okokat teljesen máshol kell keresni.



5. ábra: Vulkanizmus-, szén-dioxid-kibocsátási és hőmérsékleti proxy-k időbeni változásának alakulása a PETM idején. Forrás és további információ: Kender et al. (2021)

A korai eocén kiegyenlített éghajlatáról a kainozoikumi, majd a pleisztocén-eljegesedésre ugyanis a geodinamika önmagában is elegendő magyarázatot nyújt: kezdett megnyílni az Északi-sarkvidék, a Tasmánia-átjáró, a Drake-átjáró, felemelkedett a Himalája, a Föld légköri cirkulációja zonális (kelet-nyugati) jellegűtől egyre inkább meridionálisra (Észak-Dél-irányúvá) változott. Az elmúlt 540 millió évből származó hőmérséklet- és CO₂-változási adatok szerint (amint Embey-Isztin Antal 2. ábrája is ezt mutatja) ezen időszak alatt vagy a hőmérséklet változott, vagy a CO₂-szint. Összességében a hőmérséklet csökkent, és a CO₂ is csökkent, úgy, ahogyan a Henry-törvényből következnie kell.

A vulkanizmus-, a szén-dioxid-kibocsátási és a tengerfelszín-hőmérsékleti proxy-k időbeni változásának alakulását a PETM idején mutató 5. ábrából (az Embey-Isztin Antal által hivatkozott Kender et al. (2021) tanulmány 6. ábrájából) nem vehető ki, hogy a CO₂-szintemelkedés megelőzte volna a hőmérséklet (tengerfelszín-hőmérséklet) emelkedését. Az okot és az okozatot illetően igencsak elgondolkodtató, hogy (1) az ábra szerkesztője a változást mutató nyilakat a vulkanizmus. és a hőmérsékleti idősoron időben korábbra rajzolta, mint a CO₂-idősoron, és (2) a CO₂ idősor simább lefutású, mint tengerfelszín-hőmérsékletet mutató idősor. Ki mit gondol: a tengervíz a bazaltláva, vagy az abból a légkörbe kerülő CO₂ melegítette-e fel?

Záró gondolatok

A Nemzetközi Geológiai Szövetségen (IUGS) belüli vita az „antropocén” geológiai bevezetéséről, majd a 2024. márciusi végleges elutasító döntés (IUGS 2024) mutatja, hogy a geológusok legnagyobb szervezete nem állt oda a trendeket diktálni kívánók mellé. Az IUGS jelenkori éghajlatváltozás antropogén eredetének kérdésében megengedő, a múltra vonatkozóan sincs egységes álláspont. A CO₂-nek földtörténeti éghajlat-változtató tényezőként való hangoztatása divatossá vált, de – amint az Embey-Isztin (2024) által hivatkozott Kender et al. (2022) tanulmánya megmutatta - az efféle állításoknak nincsenek valóságos és kézzelfogható bizonyítékai. Sokkal több munkát kellene befektetni a földtörténeti éghajlatváltozások tényleges okainak felderítésére. A mai helyzetet talán Mark Twain ábrázolta a legpontosabban: *„Van valami varázslatos a tudományban. A tények csekély befektetéséből a feltevések bőséges profitja árad vissza az emberhez.”* (Utazás a Mississippin, Vinós 2023).

Míg évtizedekkel ezelőtt nem volt világos, hogy miért központi kérdés a CO₂ szerepének (sőt az antropogén CO₂ „történelmi szerepének”) minden áron való középpontba állítása, a globális energia- és iparpolitika ideológia-vezérelt megváltoztatásának során ma ez már napi tapasztalat. A geopolitikai szempontok a nemzetközi kapcsolatok elmérgesedéséhez vezettek a világgazdaságban, aminek során döntő érvként hivatkoznak a klímaváltozásra, és abban a tudományosan nem igazolt antropogén üvegházhatásra (karbon-lábnyom, karbonmentesítés, zöldátállás stb.).

Látván a bizonyítékok hiányát, egyre valószínűbb, hogy a klímaváltozás ok-okozati folyamatában a CO₂ lényegében nem más, mint egy fölösleges, ezért kihagyható láncszem.

Hivatkozások

- Berényi D (2011): Klímaváltozás, globális felmelegedés, CO₂-hatás. Magyar Tudomány, 172, 1, 18-31.
- Berner R, Kothavala Z (2001): GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over phanerozoic time, American Journal of Science, Vol. 301, February, 2001, 182-204
- Budó Á (1972): Kísérleti Fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest
- Courtillot V, Lopes F, Kossobokov V, Zuddas P, Gibert D, Boule J-B, Le Mouel J-L (2023): On the tilt of the Earth's polar axis (κλιμα): Some 'impressionist' remarks, <https://arxiv.org/pdf/2310.02768>
- Courtillot V (2014): Dangerous global warming: myth or reality? On scientific discovery, consensus and debate: a personal experience. Előadás az MTA-n, 2014. október 29.
- Császár G, Haas J, Nádor A (2010): A földtörténet klímaváltozásai és azok tanulságai. Magyar Tudomány 2008, 6 663-687.
- de Lange, C.A., et al., (2022). Nitrous oxide and climate. <https://arxiv.org/abs/2211.15780>
- Clauser J. F. (2024): A Cloud Thermostat Controls the Earth's Climate, Not Greenhouse gasses! May 8, 2024, Irish Climate Science Forum & CLINTEL
- Csernai L P et al. (2016): Physical Basis of Sustainable Development. Int. J. of Central European Green Innovation 42, 39-50. arXiv:1612.06439v1 [physics.soc-ph]. [https://acadeurobergen.no/publications/\[e2\]-Physical-basis_Csernai_ea_JCEGI-42\(2016\)39.pdf](https://acadeurobergen.no/publications/[e2]-Physical-basis_Csernai_ea_JCEGI-42(2016)39.pdf)
- Csernai L P et al. (2017): Quantitative assessment of increasing complexity. Physica A 473, 363, arXiv:1609.04637 [q-bio.OT].
- Embey-Isztin Antal (2024): A geológia szerepe a klímaváltozás okainak megértésében. PBK Fórum
- Geocraft (2024): Comparing Carbon Dioxide (CO₂), Temperature, and Oxygen (O₂) over Geologic Time, https://geocraft.com/WVFossils/CO2_Temp_O2.html
- IUGS (2024): Anthropocene. https://www.iugs.org/files/ugd/f1fc07_40d1a7ed58de458c9f8f24de5e739663.pdf?index=true
- Keeling D (2005): 2005 Tyler Prize Laureate Lecture, <https://www.youtube.com/watch?v=aH1837EUvTI>
- Kender, S., Bogus, K., Pedersen, G. K., et al. (2021): Paleocene/Eocene carbon feedbacks triggered by volcanic activity. Nature communications, 12(1), 5186.
- Kovács I, Patkó L, Liptai N et al. (2020): The role of water and compression in the genesis of alkaline basalts: Inferences from the Carpathian-Pannonian region, Lithos, Volumes 354–355, 105323,
- Le Voyer M, Hauri E H, Cottrell E et al. (2019): Carbon Fluxes and Primary Magma CO₂ Contents Along the Global Mid-Ocean Ridge System, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Volume20, Issue3 Pages 1387-1424
- Major György (2010): A Föld éghajlatának vázlatos története. Debreceni Szemle. 18, 221–231, https://real-j.mtak.hu/24639/4/Debreceni_Szemle_2010_18_4_.pdf
- Rácz Z (2013): Klímaváltozások és az aktivista ész kritikája, <http://cgl.elte.hu/~racz/Climate-2013-apr.pdf>
- Reményi K (2010): A konszenzus és evidencia nem tudományos érv. Magyar Tudomány. 171, 44–8.
- 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

- Scotese, C R , Song H, Benjamin J W, Mills J W, Douwe G, van der Meer D G (2021): Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years, Earth-Science Reviews, Volume 215, 103503, ISSN 0012-8252
- Scotese C R (2024): <http://www.scotese.com/climate.htm>
- Stefani F, Horstmann G M, Klevs M, Mamatsashvili G, Weier T (2024): Rieger, Schwabe, Suess-de Vries: The Sunny Beats of Resonance, Solar Physics (DOI: 10.1007/s11207-024-02295-x)
- Szarka L et al (2009): Éghajlat. „Kőbe vésett magnószalag”. Geo-fifika (földtudományi ismeretterjesztő füzet 5) http://www.foldev.ggki.hu/geofifika_fuzet_5.pdf
- Szarka L (2010): Szarka László (2010): Mozaikok az éghajlatkutatáshoz. Magyar Tudomány. 171, 609–611
- Veizer, J., et al., (2000): Nature, 408 (6813), pp.698-701. doi.org/10.1038/35047044
- Vinós J (2023): Solving the Climate Puzzle. The Sun's Surprising Role. Critical Science Press, Madrid