

## A GEOLÓGIA SZEREPE A KLIMAVÁLTOZÁSOK OKAINAK MEGÉRTÉSÉBEN

**Embey-Isztin Antal**

**antoba@t-online.hu**

A klímaváltozások okainak értelmezésében a geológiának kitüntetett szerepe van. A geológia ugyanis az egyetlen tudományág, mely többek között, évmilliárdos történelmi távlatban vizsgálja a Föld éghajlatának változásait. Azt kutatja, hogy mi történt a múltban és azt is, hogy ami megtörtént, az miért történhetett meg. Az így megszerzett tudás és tapasztalat, jelenkori problémáink megértésében is hasznos lehet, elvégre a közmondás (a történelem az élet tanító mestere) a Föld 4 milliárd éves történetére is igaz. Ugyanakkor a geológiai folyamatok maguk is aktívan befolyásolják a klímarendszert évektől egészen milliárd évekig bezárólag. Például, hosszabb távon a lemeztektonikai folyamatok szabályozzák a kontinensek elhelyezkedését, a hegységek képződését és az óceáni átjárók méreteit és elhelyezkedését, amelyek az óceáni és légköri keringési rendszert befolyásolják. A lemeztektonika szabályozza a vulkanizmus mértékét, amely kulcsfontosságú tényező, mert az atmoszférába jutó üvegházhatású gázok bevitelének mennyiségét érinti. Mindjárt itt az elején tisztázni érdemes, hogy üvegházhatású anyagok közül miért éppen a széndioxidnak ( $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$  csak gáz állapotban van és nagyon hosszú ideig megmarad a légkörben. A metán ( $\text{CH}_4$ ) viszont könnyen oxidálódik és ebből is széndioxid keletkezik. Kulcsfontosságú tényező, hogy a  $\text{CO}_2$  nem csak a legfontosabb üvegházhatású gáz, hanem egy természetes termosztát is. A  $\text{CO}_2$  ugyanis reagál a vízzel és szénsavat hoz létre, amely a szilikátos kőzetek mállását segíti elő. Ha pl. a  $\text{CO}_2$  koncentráció nő az atmoszférában, pl. nagyobb méretű vulkanizmus miatt, a globális hőmérséklet emelkedni fog. Magasabb hőmérséklet a kéreg kőzeteinek növekvő mállásához fog vezetni, mert magasabb hőmérsékleten nő a reakció sebessége. Az intenzívebb mállás a fölösleges  $\text{CO}_2$ -öt elfogyasztja, és ezzel csökkenti a hőmérsékletet. Ezzel szemben, ha a globális hőmérséklet csökken, a kisebb hőmérséklet a kémiai mállás sebességét lelassítja. Kevesebb mállás kevesebb  $\text{CO}_2$ -öt von ki az atmoszférából és ezzel a további hűlést meggátolja. A széndioxidnak köszönhetjük, hogy nincs sem túl hideg, sem túl meleg, a földi élet néhány kritikus helyzet és több tömeges kipusztulás ellenére is, folyamatosan fennmaradt. (Kasting 2019). A vulkanizmuson kívül, kőzetek mélységi metamorfózisából származó  $\text{CO}_2$  is áramlik a felszínre, viszont rengeteg  $\text{CO}_2$  tűnik el az óceánokban, ahol karbonátos kőzetek képződnek belőle. Ahhoz, hogy ennek mennyiségi jelentőségét értékelni tudjuk, gondoljunk hazánk mészkőhegységeire, vagy pl. az Alpok dolomitjaira. Az ezekben lekötött hatalmas szén tömeg sok millió évvel ezelőtt az atmoszférában tartózkodott.

A klímát hosszabb rövidebb távon más, tényezők is befolyásolják. A leghosszabb távon a Nap életciklusa játszott fontos szerepet, mert kezdetben a jelenleginél mintegy 30 százalékkal kevesebb energiát sugárzott ki, és ez az év milliárdok során csak lassan növekedett meg a mai értékére. Ezért sokáig azt gondolhattuk, hogy kezdetben a víz nem lehetett folyadék

állapotban. Bizonyítékunk nem volt, mert az első, mintegy 500 millió évből (Archaikum) semmilyen kőzet sem maradt fenn. Később azonban valamivel fiatalabb áthalmozott kőzetekben, mállásnak rendkívül ellenálló cirkon ( $ZrSiO_4$ ) kristályokat találtak, melyek kora archaikumi. Ezekben a kristályokban a legnagyobb meglepetésre bizonyítékot találtak arra, hogy 4 milliárd éve bolygónkon folyékony és nem pedig fagyott állapotú víz volt. Erre utal továbbá az is, hogy az élet primitív formái is megjelentek mintegy 3,8 milliárd éve. Mindez a jelenlegi légkörünk összetételével elképzelhetetlen lenne ('sápadt Nap paradoxon'). A sápadt Nap paradoxon megoldására többféle ötlettel álltak elő, de a legelfogadhatóbb az, hogy a korai Földön a kisebb napenergiát a fokozott üvegházhatás, főleg magasabb széndioxid és metán koncentráció, kompenzálhatta (pl. Ramstein 2011). A Föld klímája történetének messze túlnyomó részében melegebb volt, mint jelenleg. Az idők során a megnövekedett besugárzást, rövidebb időszakos ingadozásokkal, széndioxid és metán csökkenés kísérte. Közepes időtávon a Föld keringési pályája (excentricitás) és a tengelyferdeség változásait említhetjük. Ezek több ciklusban működnek, többek között 100 000, 40 000 és 20 000 éves ciklusokban és a hosszú távú szenciklussal, valamint a szárazföldi tömegek északi és déli félteke közötti egyenlőtlen eloszlásával együtt hozzájárulnak a nagyléptékű éghajlati ciklusok alakulásához, mint például az eljegesedések. Rövidebb időskálán a Nap sugárzása függ a 11 éves napfolt ciklustól és ezek 88, 208 és 2300 éves variánsaitól. A nap mágneses mezeje is hatással van az időjárásra és a klímára, pl. a mágneses mező fluktuálása Ausztráliában és más országokban extrém szárazságok kialakulását okozhatja (Baker et al. 2008). Fontos azonban megjegyezni, hogy a Föld történelmének egészében a természetes geológiai folyamatok közvetlenül és uralkodó mértékben befolyásolták az éghajlatot, nem utolsósorban azáltal, hogy jelentős változásokat okoztak a légköri üvegházhatású gázok koncentrációjában. 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.



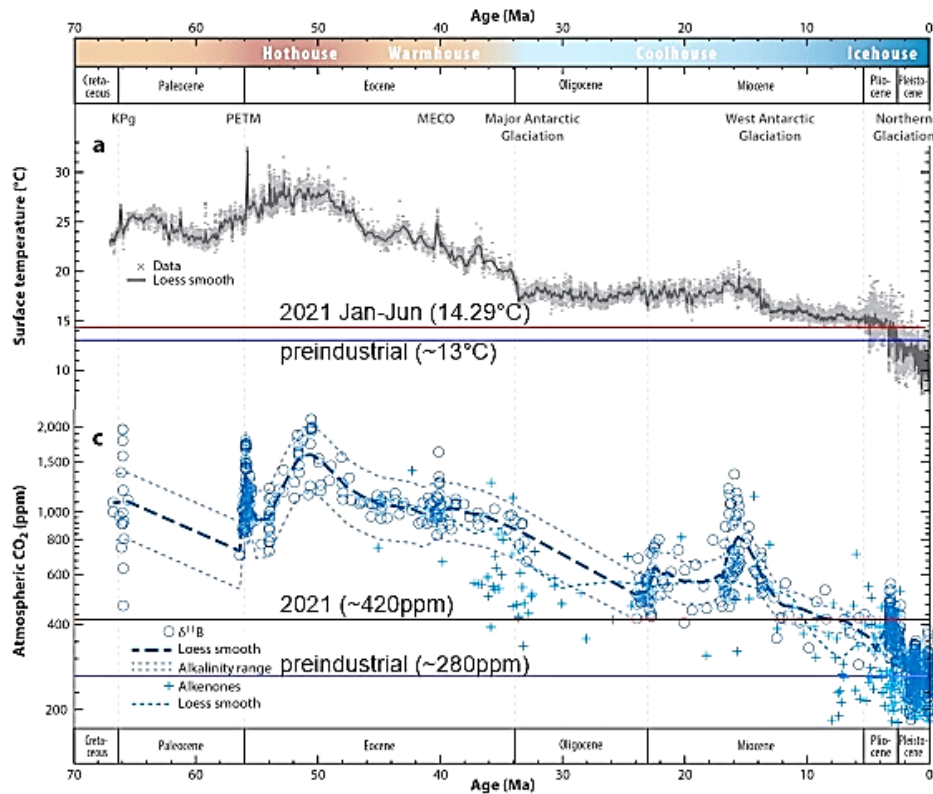
1. Ábra ~ 640 millió éves jégkorszaki glaciális hordalék, egyenlítői Afrika, Gabon. Ebben a korban az egész bolygó jégburokban volt (Hógyolyó Föld) Foto: J.-P. Prian

A múlt klímaváltozásai számos geológiai képződményébe íródtak bele, így tengeri és tavi üledékekbe, jégtakarókba, ősmaradványok vázába (pl. korallak, foraminiferák, diatomák), azután cseppkövekbe és fosszilis fák gyűrűibe. A geológus feladata ezeknek az 'iratoknak' a megfejtése. Az éghajlat változások bizonyítékainak egy része közvetlen bizonyíték, pl. glaciális kőzetformációk, melyek a jég egykori jelenlétére utalnak (1. Ábra), vagy a közismert 260-270 millió éves Balaton-felvidéki vörös homokkő, mely száraz, forró sivatagi környezetben képződött. Másrészt viszont közvetett bizonyíték, pl. geokémiai proxy adatok múltbeli hőmérséklet, pH, sótartalom vagy óceáni áramlások változásához. A tengeri mikro ősmaradványok oxigén izotóp összetétele például értékes információt nyújt a múltbeli óceánok hőmérsékletéről és a sótartalomról. Az újabb és újabb terepi munkák, tengeri mélyfúrások, az egyre fejlődő laboratóriumi technikák, adat asszimilációs statisztikai numerikus modellezés lehetővé teszik a kutatók számára, hogy egyre nagyobb biztonsággal mutassák meg, hogyan és miért változott az éghajlat a múltban. A jégtakarókon telepített fúrásokból nyert jég fúrómagok például Grönlandon 120 000 évre, az Antarktiszon 800 000 évre visszamenőleg rögzítik, méghozzá közvetlen bizonyítékként, a sarki hőmérsékletet és a légkör összetételét. Az óceáni üledékek több tízmillió évre visszanyúló adatokat őriznek, az idősebb üledékes kőzetek pedig több százmillió évre is kiterjednek. Az üledékes kőzeteknél geokémiai proxy adatokra van szükség, ezért a geológusok általában több független proxy anyagot használnak, hogy növeljék a múltbeli éghajlat rekonstrukcióinak megbízhatóságát. A légkör CO<sub>2</sub> koncentrációjának múltbeli rekonstruálására is számos közvetett módszer létezik, például a foraminiferák bórízotóp-arányai és az alkenon szénízotóp-arányai. A közelmúltban igen jelentős előrehaladás történt az időbeli felbontóképesség terén is (Sosdian et al. 2018; Tierney et al. 2022 ; Rae et al. 2021 és idézetek benne).

Az alábbiakban kicsit részletesebben is foglalkozunk bolygónk éghajlatának legutóbbi 66 millió éves történelmével, mivel ez különösen fontos ismereteket és tanulságokat nyújt számunkra. Ez az idő a Kainozóikum, vagy más néven földtörténeti újkor, ami alatt a kontinensek elhelyezkedése és eloszlása fokozatosan közeledett a jelenlegi állapothoz. Ezt megelőzően a mezozóikum zömében és paleozóikumban nagyon más volt a Föld, amikor mind az öt kontinens egyetlen szuper kontinensként (Pangea) létezett, amelyet főleg száraz és forró kontinentális éghajlat jellemezett. A mezozóikum végén, a kréta-paleocén határán történt aszteroida becsapódás az élővilág gyökeres megváltoztatásával is járt, a legismertebb esemény a dinoszauruszok kihalása és az emlősök gyors térhódítása volt, ami végül is az ember megjelenéséhez vezetett. Ebből a szempontból is ez az idő fontos számunkra, mert adatokat szolgáltat arról, hogy fajunk és ősei milyen éghajlati körülmények között „akklimatizálódtak”.

A Kainozóikum időtartamára az első mélytengeri foraminifera stabil izotópos adatsorokat Shackleton és Kennett (1975) publikálták. Alacsony időbeli felbontásuk ellenére már akkor is sikerült kimutatni, hogy a Föld éghajlata a 60-40 millió évvel ezelőtti meleg állapotából hideg állapotba került 10 és 5 millió év között. Hasonlóképpen Pearson & Palmer (1999) úttörő CO<sub>2</sub> rekonstrukciós kísérlete is bizonyította már, hogy az utolsó 50 millió évben a klíma lehülésével párhuzamosan csökkent a széndioxid szint az atmoszférában. 1975 óta eltelt majdnem fél évszázad alatt egyre modernebb technikákkal és komplexebb módszerekkel

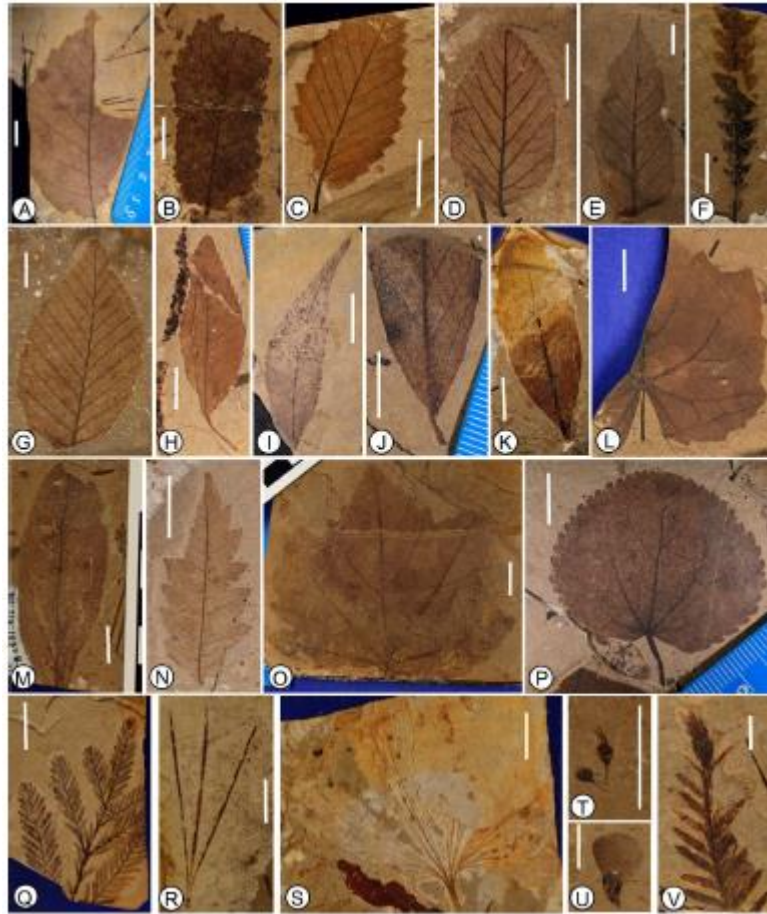
megbízható, jó időfelbontású adatsort kaptunk mind a hőmérséklet mind pedig CO<sub>2</sub> változásáról, azaz a kainozóikumi klímaváltozásokról és annak lehetséges okairól. Ma már részleteiben is látjuk hogyan változott az eocén meleg üvegház klímája a közelmúlt jégkorszakokig (a ‘Hothouse-Warmhouse-Coolhouse-Icehouse’) állapotokon keresztül, (2. Ábra), valamint azt is, hogy az utolsó 66 millió év geológiai képződményeiben erős összefüggés van a globális hőmérséklet és CO<sub>2</sub> között. (pl. Westerhold et al. 2020; Rae et al. 2021). Mindez döntő szerepet játszott a kainozóikum ideje során történt alább részletezett hosszabb-rövidebb ideig tartó klímaingadozási eseményekben is.



Az utolsó 66 millió év hőmérséklet (felső görbe) és CO<sub>2</sub> (alsó görbe) változásai. Az iparosodás előtti és a 2021 CO<sub>2</sub> szintek jelölve. (Rae et al., 2021 után)

A **Korai Eocén Klíma Optimum (EECO)**, 54-49 millió év közötti szakasz, egy extrém meleg üvegház éghajlatú periódus volt, voltaképpen az egész Kainozóikum legmelegebb és leghosszabban tartó időszaka. Igazi hothouse, a jelenlegihez képest több, mint 10 °C fokkal, melegebb hőmérséklettel. A Föld jégmentes volt és tengerszint akár 150 méterrel is magasabb lehetett. A geokémiai és izotóp geokémiai proxiktól teljesen független, paleontológiai és paleobotanikai bizonyítékunk is van arra, hogy az EECO idején még magas szélességi fokoknál is meleg időjárás uralkodott. A rekonstruált klíma viszonyok például Brit Kolumbia területére azt mutatták, hogy télen sem volt fagy (a leghidegebb hónap ~5 °C, éves 1000 mm csapadék). A híres McAbee, kora eocén korú tavi üledékben talált gazdag ősnövényteni leletekben (3. Ábra) még olyan fajt is találtak, amely ma közép és dél Kínában honos (Lowe et al. 2018). Még meglepőbb az Antarktisz esete, 20-24 fok nyári átlag hőmérséklettel, fagymentes téllal és ennek megfelelő dús vegetációval (4. Ábra; Francis et al. ; 2008). Mindez

annak ellenére, hogy az Antarktisz már 80 millió éve, a felső kréta korszakban is közelítőleg a jelenlegi földrajzi helyén volt.



3. Ábra Dús erdei vegetáció, korai eocén klíma optimum, Brit Kolumbia Kanada

S=Ginkgo dissecta (Lowe et al, 2018 nyomán)



4. Ábra Művész által készített tájkép Antarktisz a felső kréta korban

A **Közép Eocén Klíma Optimum (MECO)**, 40 millió éve volt mely kb. 400 ezer évig tartó globális felmelegedést hozott, melyet az atmoszféra CO<sub>2</sub> koncentrációjának emelkedése és óceánok savasodása kísért. Ez az esemény rövid időre szakította meg az eocén hosszú lehülési trendjét.

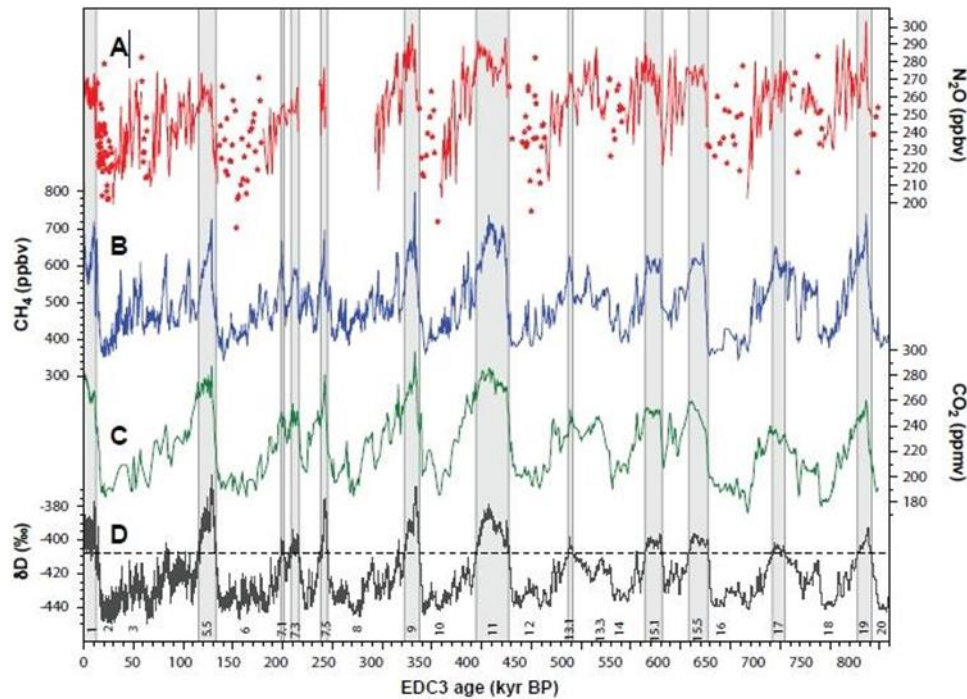
Az **Eocén-Oligocén Átmenet (EOT)** kb. 34 millió éve a kainozóikum legjelentősebb éghajlatváltozása volt: a kréta-paleogén határtól tartó Hothouse majd Warmhouse klímából a mérsékeltebb Coolhouse klímába (2. Ábra). Ez magával hozta az Antarktisz első nagymértékű eljegesedési fázisát. Maga az átmenet kb. 790.000 évig tartott, de a Coolhouse állapot 34 millió évtől 3,3 millió évig húzódott.

Az **Oligocén-Miocén Átmenet** (23 millió éve) egy globális lehülési esemény volt, mely jelentős mértékű növekedést hozott az Antarktisz eljegesedésében. A globális tengerszint csökkent, a hőmérséklet legalább 2 fokkal lett kevesebb és jelentősen csökkent a CO<sub>2</sub> is (Steinthorsdottir et al., 2019). Hangsúlyoznunk kell, hogy sarki jégtakarók megjelenése és növekedése új és fontos faktort hozott a klímaváltozásba, mivel a jég albedója nagyon magas, így a Föld hőkiszugárzását az űrbe jelentősen megnöveli.

A **Miocén Klíma Optimum (MCO)** egy jelentős globális klíma és oceanográfiai változás volt. A 17-15 millió év közötti meleg periódus félbeszakította a kainozoikum hosszú távú lehülési trendjét, a csökkenő CO<sub>2</sub> szintet és az Antarktisz eljegesedésének folyamatát. A hosszú távú paleoklimatikai adatok a miocénben viszonylag alacsony CO<sub>2</sub> koncentrációkat jeleznek, de az **MCO** globális felmelegedés idején, egyre több bizonyíték van emelkedő CO<sub>2</sub> koncentrációról (400-ról 630 ppm-ig). Paleotalajokból még 852 ppm-es adatot is lehet találni. Általánosan elfogadott vélemény szerint a CO<sub>2</sub> emelkedés elsődleges oka egy különösen intenzív vulkáni periódus volt. Időbeli megegyezés alapján, a zömmel 16,7 és 15,9 millió év között aktív Columbia River nagy magmás provincia az USA észak-nyugati részén, jöhet szóba. A nagy magmás provinciák globális éghajlatváltozásokat okoznak, mert geológiailag viszonylag rövid idő alatt nagyon sok CO<sub>2</sub> és SO<sub>2</sub> gázt hoznak a felszínre. Ez a geológiai esemény tehető felelőssé az MCO globális éghajlatváltozás kialakulásáért is (Kasbohm & Schoene, 2018).

**Pliocén, Jégkorszak, Holocén** Az eocén második felétől kb. 50 millió évtől tartó globális lehülési trend és az ezzel párhuzamosan a CO<sub>2</sub> csökkenés a Pliocén (5,3-2,6 millió év) idején tovább folytatódott. A pliocén végétől az arktiszi jégtakaró is kialakult. A jégkorszak, más néven a negyedidőszak alatt hét glaciális és ezek közötti interglaciális szakasz volt (Milankovitch ciklusok). A jelenlegi globális hőmérsékletemelkedés miatt meglepőnek tűnhet, de valójában még ma is a jégkorszakban, pontosabban annak egy interglaciális szakaszában élünk. A holocén, vagyis a jelenkor mindössze csak 11 700 éve kezdődött el. Az atmoszféra CO<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> és egyéb üvegházhatású gáz tartalmát a legutóbbi 800 000 évre az antarktiszi jégtakaróba mélyített furások fúrómagaiból, pontosabban az abban bezárt légbuborékokból nagy pontossággal ismerjük. A buborékokban a CO<sub>2</sub> és egyéb gázok koncentrációja szorosan követi az interglaciális és glaciális periódusok közötti emelkedő és csökkenő hőmérsékleteket (5. Ábra). Például a CO<sub>2</sub> szintek 180 ppm (parts per million) glaciális maximumtól 280 ppm-re emelkedtek az interglaciálisok idejére. A

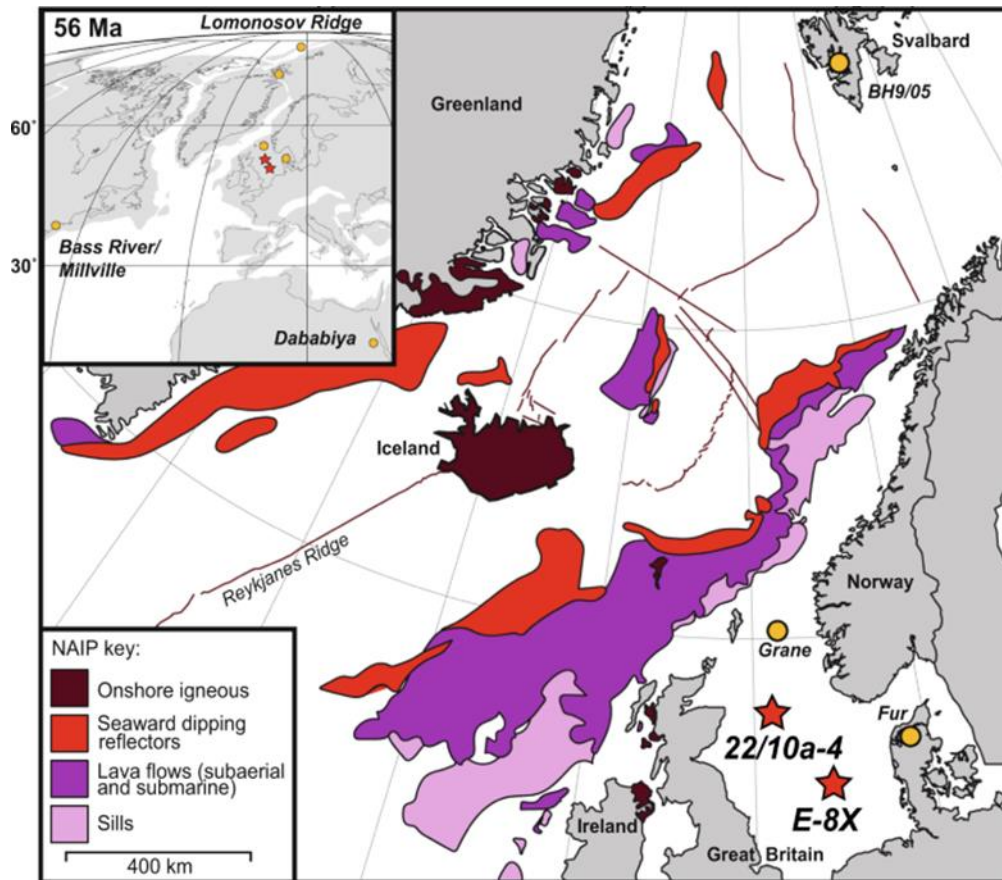
paleoklimatológusok úgy gondolják, hogy a kezdeti melegedés, melyet a Föld keringési pályájának és a tengely ferdeségének változásai váltottak ki, a felmelegedő óceánokból széndioxidot szabadított fel és ezek pozitív visszacsatolással újabb lendületet adtak a már folyamatban lévő hőmérsékletemelkedésnek.



5. Ábra Az utolsó 800 000 év változásai, D: deutérium (egy lokális hőmérséklet proxy); C: atmoszféra CO<sub>2</sub>; B: atmoszféra CH<sub>4</sub>; A: atmoszféra dinitrogén-oxid (Schilt et al., 2010 után).

**Paleocene-Eocén Termális Maximum (PETM)** Bár időrendben ezt a paleocén-eocén határon 56 millió éve megtörtént eseményt elsőként kellett volna tárgyalni, a jelennel kapcsolatos különös jelentősége, valamint unikum volta miatt csak most kerül rá sor. Ezt a hirtelen hipertermális felmelegedést (2. Ábra), ugyanis egy geológiailag hihetetlenül gyors, mindössze 2-20 ezer év közötti intenzív CO<sub>2</sub> kibocsátás váltott ki. Becslések szerint rekord mennyiségű, mintegy 1500-2000 milliárd tonna szén kerülhetett az atmoszférába és az óceánokba (Kender et al. 2021). Bár a PETM kori nagy szénkibocsátását általánosan elfogadták, az mégis sokáig rejtély maradt, hogy ez a hatalmas szénmennyiség honnan és milyen forrásból származott. A felmerült változatos javaslatok között volt többek között mélytengeri metánklatrát bomlása, erdőtüzek, aszteroida becsapódás, de ellentmondásos maradt az, hogy ezek képesek lettek volna globális felmelegedést kiváltani. Végül is az Észak Atlanti Magmás Provincia került reflektorfénybe (Gutjahr et al. 2017 és Kender et al. 2021). Ez nagy magmás provincia az Észak Atlanti Óceán kinyílásakor a paleogén idején 1.3 millió km<sup>2</sup> nagyságú bazalt platót hozott létre, mely a kinyílás alatt széttört és maradványai ma is láthatóak Írország, Skócia, Faroe szigetek, Izland, Grönland és Norvégia partjainál (6. Ábra). Az ekkor felszínre jutott hatalmas szén tömeg válthatta ki az utolsó 100 millió évben egyedül álló PETM eseményt. A már elve magas hőmérséklet globálisan 6°C- al, a pólusokon 10-20 °C –al emelkedett. Frieling et al. (2017) szerint a PETM idején az óceánok felszíni hőmérséklete a trópusokon meghaladta a 36 °C értéket, mely még olyan hó rezisztens

szervezetekben is, mint a dinoflagelláták, hőstressz okozott és jelentős mennyiségű fajuk pusztult ki. A felmelegedés mellett az óceánok savasodtak és oxigén hiány lépett fel.



6. Ábra Vázlatos térkép az Észak Atlanti Magmás Provincia különböző vulkáni képződményeiről. A bal felső beágyazott térkép az 56 millió évvel ezelőtti állapotot mutatja. Kender et al. (2021) nyomán

A PETM egyik legjobb geológiai analógia egy “hothouse ” világ kialakulásának megértéséhez. Elgondolkodtató, hogy bár a felmelegedés nagyon gyors volt, mégis 100 ezer év kellett ahhoz, hogy bolygónk ebből az éghajlati sokkból felépüljön. Ez arra figyelmeztet, hogy létezhetnek olyan fordulópontok, ahonnan már nagyon nehéz a visszatérés. Tekintve az esemény kialakulásának geológiai gyorsaságát és a klíma rendszer szétbomlásának mértékét, a PETM fontos tanulság számunkra arra, hogy miként válaszol a klíma rendszer az üvegházhatású gázok hirtelen emelkedésére. Sokak szerint ez a legjobb természetes példa a jelenlegi éghajlatváltozásra. A legutóbbi ötven év alatt tapasztalt globális éghajlatváltozás okainak megértéséhez bölcs dolog a Föld geológiai múltjából, annak globális klíma változásaiból és fejlődéséből, a megismert tényekből kiindulni. Ilyen tény pl., hogy bolygónk egyik legjelentősebb hosszú távú klímaszabályozó rendszere légkörének üvegházhatású gázkoncentrációja. Érvényes ez most is, amikor 1970 óta a széndioxid szint az atmoszférában megduplázódott és a globális hőmérséklet megemelkedett. Ez azonban olyan gyors sebességű változás volt, amelyre a geológiai múltból példát nem ismerünk. Az ugyan igaz, hogy a legközelebbi analógia a PETM esemény, de ennek kialakulásához nem 50, hanem 20000 év



kellett. A Föld történetéből megismertük továbbá azt is, hogy a globális klímaváltozások zömmel olyan folyamatok eredményei, melyek magán a Földön játszódtak le. Azonban a jelenlegi változással probléma van, ugyanis nem ismerünk semmilyen természetes kiváltó okot, ami valamilyen ismert geológiai eseményhez lenne köthető (pl. vulkáni tevékenység, kontinentális eltolódás, napenergia változás). Ha a Nap növelné az energia kibocsátást, valóban emelkedhetne a hőmérséklet. Azonban ezt 1970-től mostanig nem tapasztaltuk. Egy másik ok is van arra, hogy a szakértők kizárták a Nap szerepét a globális hőmérséklet emelkedés okai közül. Ha ugyanis a napenergia intenzívebbé válna, akkor azt várnánk, hogy a légkör minden rétegének hőmérséklete egyformán emelkedjen. De ez közel sincs így. Csupán az alsó réteg (troposzféra) mutat hőmérsékletemelkedést, de a felső réteg (sztratoszféra) éppenséggel lehűlést jelez. Ez pontosan az az eredmény, amit akkor várhatunk, ha a növekedő üvegházhatású gázok a hőt fokozottabban ejtik csapdába az alsó atmoszférában (Aquila et al., 2016). Úgy tűnik, plauzibilis természeti okot nem tudunk találni a jelenlegi globális éghajlatváltozásra. Akkor nem kellene-e legalább kizárásos alapon megfontolni az antropikus tényezőt? Ezt azonban már sokan meg is tették. Lynas et al. (2021) éppen azt vizsgálták, hogy a jelenlegi globális éghajlatváltozást kutató tudósok milyen arányban gondolják azt természetes, vagy ellenkezőleg, ember által kiváltott eseménynek. A témáról közreadott publikációk közül csak azokat vették számításba, amelyek komoly tudományos folyóiratokban jelentek meg és az ún. ‘peer review‘ procedúrán is sikeresen átmentek. Eredményük szerint a tudósok több, mint 99% -os arányban gondolják úgy, hogy a jelenkori globális felmelegedés oka nem természetes, hanem az emberi tevékenység következménye. Ez a tudományos konszenzus.

## Irodalom

Aquila, V., Swartz, W. H., Waugh, D. W., Colarco, P. R., Pawson, S., Polvani, L. M., & Stolarski, R. S. (2016). Isolating the roles of different forcing agents in global stratospheric temperature changes using model integrations with incrementally added single forcings. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(13), 8067-8082.

Baker et al. Exploratory Analysis of Similarities in Solar Cycle Magnetic Phases with Southern Oscillation Index Fluctuations in Eastern Australia. *Geographical Research*, 2008; 46 (4): 380 DOI: 10.1111/j.1745-5871.2008.00537.x

Francis, J. E., Ashworth, A., Cantrill, D. J., Crame, J. A., Howe, J., Stephens, R., ... & Thorn, V. (2008). *100 million years of Antarctic climate evolution: evidence from fossil plants* (pp. 19-27). National Academies Press, Washington, DC.

J. Frieling ., Gebhardt, H., Huber, M., Adekeye, O. A., Akande, S. O., Reichert, G. J., ... & Sluijs, A. (2017). Extreme warmth and heat-stressed plankton in the tropics during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science advances*, 3(3), e1600891.

Gutjahr, M., A. Ridgwell, P.F. Sexton, E. Anagnostou, P.N. Pearson, H. Pälike, R.D. Norris, E. Thomas and G.L. Foster, 2017: Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature*, <http://dx.doi.org/10.1038/nature23646>

Kasbohm J, Schoene B. Rapid eruption of the Columbia River flood basalt and correlation with the mid-Miocene climate optimum. *Sci Adv*. 2018 Sep 19;4(9):eaat8223. doi: 10.1126/sciadv.aat8223. PMID: 30255148; PMCID: PMC6154988.

Kasting, J. F. (2019). The Goldilocks planet? How silicate weathering maintains Earth “just right”. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 15(4), 235-240.

Kender, S., Bogus, K., Pedersen, G. K., Dybkjær, K., Mather, T. A., Mariani, E., ... & Leng, M. J. (2021). Paleocene/Eocene carbon feedbacks triggered by volcanic activity. *Nature communications*, 12(1), 5186.

Lowe, A. J., Greenwood, D. R., West, C. K., Galloway, J. M., Sudermann, M., & Reichgelt, T. (2018). Plant community ecology and climate on an upland volcanic landscape during the Early Eocene Climatic Optimum: McAbee Fossil Beds, British Columbia, Canada. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 511, 433-448

Lynas, M., Houlton, B. Z., & Perry, S. (2021). Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114005

Pearson, P. N., & Palmer, M. R. (1999). Middle Eocene seawater pH and atmospheric carbon dioxide concentrations. *Science*, 284(5421), 1824-1826.

J.W. Rae *et al.*, Atmospheric CO<sub>2</sub> over the past 66 million years from marine archives. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **49**, 609–641 (2021).

Ramstein, G. 2011. Climates of the earth and cryosphere evolution. *Surveys in Geophysics*, 32, 329, <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9140-4>

N. J. Shackleton, J. P. Kennett, in *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project (U.S. Government Printing Office, 1975)*, vol. 29, pp. 743–755.

Schilt, A., Baumgartner, M., Blunier, T., Schwander, J., Spahni, R., Fischer, H., & Stocker, T. F. (2010). Glacial–interglacial and millennial-scale variations in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 800,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 29(1-2), 182-192.

Sosdian, S. M., Greenop, R., Hain, M. P., Foster, G. L., Pearson, P. N., & Lear, C. H. (2018). Constraining the evolution of Neogene ocean carbonate chemistry using the boron isotope pH proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 498, 362-376.

Steinthorsdottir, M., Vajda, V., & Pole, M. (2019). Significant transient pCO<sub>2</sub> perturbation at the New Zealand Oligocene-Miocene transition recorded by fossil plant stomata. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 515, 152-161.

Tierney, J. E., Zhu, J., Li, M., Ridgwell, A., Hakim, G. J., Poulsen, C. J., ... & Kump, L. R. (2022). Spatial patterns of climate change across the Paleocene–Eocene Thermal Maximum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(42), e2205326119.

Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A. J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., ... & Zachos, J. C. (2020). An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, *369*(6509), 1383-1387.