A globális felmelegedéssel és klímaváltozással kapcsolatos kutatások buktatói: Hiányosságok a légköri CO_2-koncentráció jégmagok alapján történő rekonstrukciójában – Az ipari forradalom idejére vonatkozó 280 ppm-es érték, mint „meztelen király”

Dai Ato

Független kutató, Oszaka, Japán

ORCID: 0000-0002-6049-5039

Email: ato.dai1@wind.ocn.ne.jp

Science of Climate Change, Vol. 5.1 (2025) pp. 29 - 58

ISSN: 2703-9072

Absztrakt

A globális felmelegedéssel és klímaváltozással foglalkozó közelmúltbeli tanulmányok gyakorta indulnak ki abból, hogy a légköri CO_2-szint emelkedése teljes egészében az emberi kibocsátásnak tulajdonítható. Ez a feltételezés különösen arra az adatra épül, miszerint az iparosodás előtti időszak végén a CO_2-koncentráció 280 ppm volt. Azonban az alapul szolgáló releváns adatok vizsgálata ellentmond e feltevésnek. Annyi legalábbis bizonyos, hogy a feltételezés nem tekinthető teljes mértékben megbízhatónak. Jelen tanulmány – a lehető legkevesebb szakterminológia használatával, közérthető nyelvezetet használva – rámutat az ezzel foglalkozó klímakutatásokat alapjaiban megrázó hiányosságokra. Emellett a függelékben tisztázásra kerül néhány pont, reagálva a szerző korábbi tanulmányával kapcsolatos – az interneten is felbukkanó – tipikus félreértésekre.

Kulcsszavak: CO_2; iparosodás előtti CO_2-szint, 280 ppm; jégmagadatokon alapuló rekonstrukció; jégmagok; Zbigniew Jaworowski; Ernst-Georg Beck; klímaváltozás

Benyújtva: 2024. 12. 09., elfogadva: 2025. 02. 08. https://doi.org/10.53234/scc202501/04

1. Bevezetés

A globális felmelegedéssel és az éghajlatváltozással kapcsolatos közelmúltbeli vitákban két fő álláspont rajzolódik ki. Az egyik szerint a változást teljes egészében vagy részben az ember okozza (ez az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület, azaz az IPCC [1] álláspontja). Az emberi eredetű tényezők közül a legjelentősebb a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása következtében megnövekedett légköri CO_2-koncentráció; ezt követi a metán hatása. E hipotézis alapján világszerte számos szabályozást és adózási formát vezettek be, amelyekre tipikus példa a kibocsátáskereskedelem.

A másik álláspont szerint az emberiség szerepe elhanyagolható, vagy az emberi tevékenységnek nincs érdemi hatása az éghajlatra. Ezt az álláspontot képviseli többek között a Global Warming Petition Project [2], az International Conference of Climate Change (ICCC, Singer [3]), a Global Climate Intelligence Group (CLINTEL [4]), a CO_2 Coalition [5], valamint több mint 90 olasz tudós nyilatkozata [6].

E nézet szerint az emberi hatások helyett a természetes változások – például a napsugárzási kényszer (Soon [7], Soon et al. [8]), illetve a felhőképződésre gyakorolt hatás, az úgynevezett Svensmark-effektus (Svensmark és mtsai [9], Nikolov és mtsai [10]) – játsszák a meghatározó szerepet.

Mindenesetre az IPCC által alkalmazott klímamodellek alapvetően hibásak, mivel gyakorlatilag figyelmen kívül hagyják a naptevékenység hatásait. John Clauser, a 2022-es fizikai Nobel-díj kitüntetettje azért bírálja az IPCC által elfogadott modellt, mivel az nem értékeli megfelelően a felhők hatását (Clauser [11]).

Továbbá, a klímaváltozással foglalkozó uralkodó tudományos irányzat képviselőinek többsége úgy véli, hogy a CO_2 a földi élet számára rendkívül előnyös [2–6].

Másrészről, a légköri CO2-koncentráció növekedésével kapcsolatban két fő nézet létezik. Az egyik szerint a jelenség teljes egészében az emberi tevékenység következménye [1, 5]; a másik álláspont szerint viszont az emberi hatás elhanyagolható vagy egyáltalán nem létezik – e második álláspontot képviseli többek között Ato [12], Salby és mtsai [13], Humlum és mtsai [14], Berry [15], valamint Koutsoyiannis és mtsai [16].

Ennek megfelelően a jelenlegi globális felmelegedéssel és klímaváltozással kapcsolatos vita nagyjából három csoportra osztható:

- A közelmúltbeli CO_2-növekedés és klímaváltozás teljes egészében vagy nagyrészt az emberi tevékenységre vezethető vissza.
- A CO_2-szint emelkedése teljes egészében vagy nagyrészt az emberi tevékenység következménye, ám a klímaváltozásért az emberiség nem felelős, vagy csak csekély mértékben járul hozzá ahhoz.
- Sem a CO_2-szint emelkedése, sem a klímaváltozás nem az emberi tevékenység következménye, illetve az antropogén hatások elhanyagolhatóak.

Jelen tanulmány elsősorban azokra a hiányosságokra mutat rá, amelyek a CO_2-szint növekedésének emberi eredetére vonatkozó feltételezéshez vezettek. Különös figyelmet szentel az antarktiszi jégmagokból történő rekonstrukció módszertani problémáinak, valamint annak az általánosan elfogadott nézetnek, miszerint az ipari forradalom kezdetén a légköri CO_2-koncentráció 280 ppm volt.

A tanulmány felépítése a következő:

- Az antarktiszi jégmagadatokon alapuló CO2-rekonstrukció pontossági korlátai, valamint a 280 ppm-es elmélettel kapcsolatos ellentmondások.

- A légköri metánkoncentráció 21. század elején megfigyelt csökkenésének jelentősége.
- A témához kapcsolódó korábbi tanulmányok áttekintése, valamint Zbigniew Jaworowski felvetéseinek ismertetése.
- Ellenőrzés a múltbeli, drasztikus klímaváltozással járó időszakok alapján.
- A szerző korábbi jelentésének [12] frissítése és az ahhoz kapcsolódó szimulációk.

A függelék további kiegészítő információkat tartalmaz. Ezek a szerző korábbi tanulmányával kapcsolatos félreértelmezéseket tisztázzák. Jelen jelentés elemzésében az emberi eredetű kibocsátásokra vonatkozó összes adat az Our World In Data (OWID, [17]) forrásból származik. Az adatoknak a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) adataival való összhangját a szerző e folyóiratban megjelent korábbi tanulmányában már igazolta, így az OWID adatainak önálló használata indokolt (lásd a [12] forrás 3. ábráját). Mivel pedig az IEA díjat számít fel a hosszabb időtávú adatokért, a szerző célja az, hogy a világ bármely pontján élő olvasók – alacsony költségráfordítással – maguk is reprodukálhassák a jelen tanulmányban foglaltakat.

2. A legújabb antarktiszi jégmagadatok pontosságának korlátai

Ezek az adatok a nyilvánosság számára elérhetők egy Excel-fájlban a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) weboldalán (NOAA [18], Bereiter és mtsai [19]). Az anyag az Antarktisz különböző pontjain végzett mintavételekből származó adatokat foglalja össze.

A CO_2-koncentráció rekonstrukciói jégmagokból származnak, ahol a kiindulási pont 1950 (a „CO_2 Composite” elnevezésű Microsoft® Excel®-munkalap). Még a viszonylag friss adatok – például a 20. század elejéről származók – esetében is előfordul azonban, hogy egyes évekre vonatkozóan hiányoznak az adatok. Másrészt vannak olyan évek, amelyekre vonatkozóan két vagy több adat is áll rendelkezésre.

Annak érdekében, hogy az adatokat 1850-ig visszamenőleg éves értékek formájában össze lehessen foglalni, meghatározott szabályok alapján számították ki az egyes évekre jellemző reprezentatív értékeket. Azokban az években, amelyekre több adat is rendelkezésre állt, az átlagértéket tekintették reprezentatívnak. Azoknál az éveknél, amelyekre nem volt adat, a hiányzó évet megelőző és követő adatok átlagát vették alapul. Az 1. táblázat példákat mutat be erre. Az e szabály alapján számított, 1850 óta rendelkezésre álló adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Példa az antarktiszi jégmagokból származó éves átlagos CO_2-adatok kiszámítására.

year	Gasage (yr BP)	CO_2 (original)	CO_2 Yearly average	CO_2 representative value
1958	-8.56	316.33	316.22	316.22
1958	-8.10	316.10		
1957	-7.87	314.57	315.15	315.15
1957	-7.26	315.27		
1957	-7.20	316.33		
1957	-7.10	314.44		
1956	-6.16	315.34	315.34	315.34
1955				315.03
1954	-4.80	314.71	314.71	314.71
1953	-3.79	313.17	312.73	312.73
1953	-3.71	312.80		
1953	-3.56	312.22		
1952	-2.38	312.18	312.18	312.18
1951				312.09
1950	-0.25	312.00	312.00	312.00
1949	0.33	313.66	313.66	313.66
1948	1.23	309.69	309.69	309.69
1947	2.29	311.57	311.57	311.57
1946	3.34	310.36	311.61	311.61
1946	3.37	312.87		

year	Gasage (yr BP)	CO_2 (original)	CO_2 Yearly average	CO_2 representative value
1889	60.13	290.92	291.63	291.63
1889	60.99	292.34		
1888				292.99
1887	62.61	294.34	294.34	294.34
1886				291.23
1885	64.40	288.12	288.12	288.12
1884	65.82	289.23	289.23	289.23
1883	66.21	289.76	289.76	289.76
1882	67.08	292.46	292.46	292.46
1881				290.90
1880				289.34
1879	70.05	287.77	287.77	287.77
1878				288.29
1877				288.81
1876	73.09	289.33	289.33	289.33
1875				290.07
1874				290.81
1873	76.26	291.56	291.56	291.56
1872	77.17	286.66	286.66	286.66

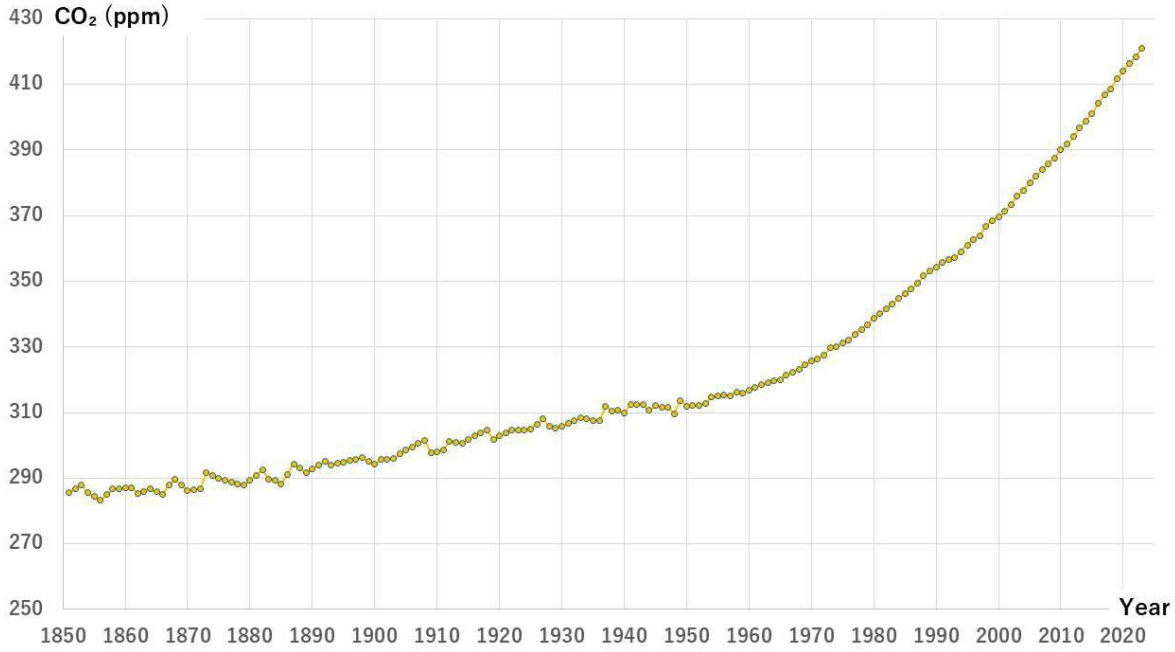
BP = 1950 (i. sz.), a CO_2-koncentráció mértékegysége: ppm. A fenti példákban az 1951., 1955., 1888., 1886., 1881., 1880., 1875. és 1874. évre vonatkozó adatok nem szerepelnek. Ha egy adott évre több adat is rendelkezésre áll, akkor azok átlagát számítják ki. Azokban az években, amelyekre nincs adat, a környező évek adatainak átlagát vették alapul.

2. táblázat: CO_2 adatok antarktiszi jégmagokból. A CO_2 mérőegysége: ppm. Az adat nélküli éveket az eredeti Excel táblában piros szín jelöli.

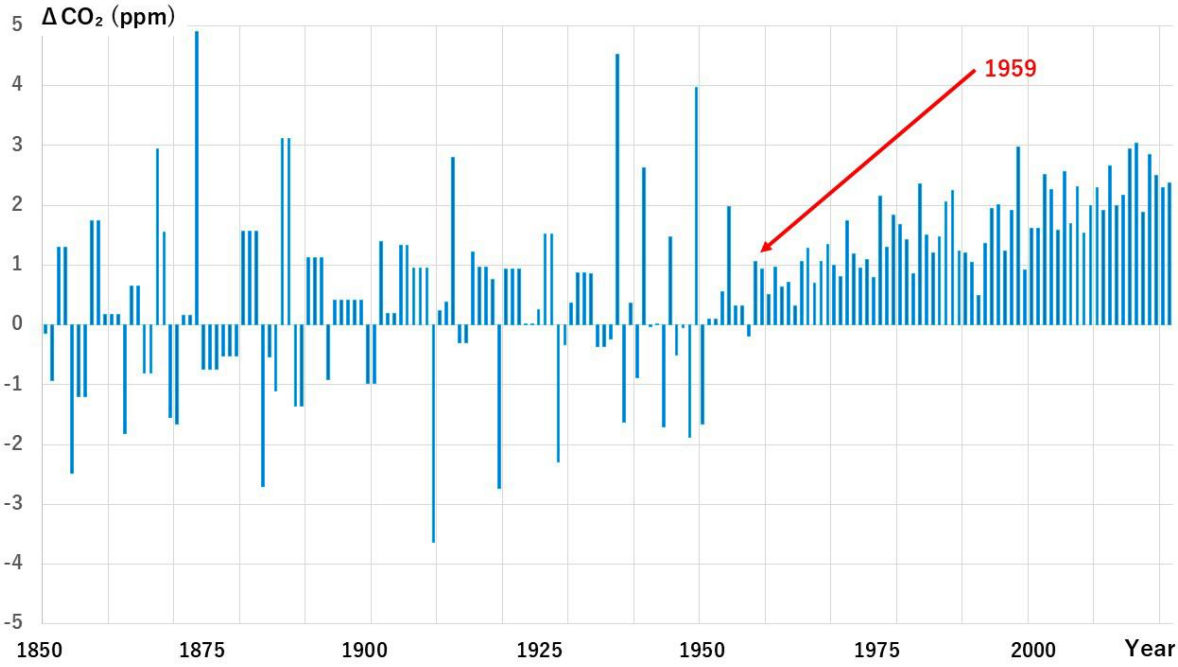
year	CO_2 representative value	year	CO_2 representative value	year	CO_2 representative value	year	CO_2 representative value	year	CO_2 representative value	year	CO_2 representative value
		1940	309.77	1920	302.81	1900	294.22	1880	289.34	1860	286.99
		1939	310.65	1919	301.88	1899	295.19	1879	287.77	1859	286.81
1958	316.22	1938	310.29	1918	304.61	1898	296.16	1878	288.29	1858	286.63
1957	315.15	1937	311.92	1917	303.85	1897	295.75	1877	288.81	1857	284.90
1956	315.34	1936	307.41	1916	302.88	1896	295.34	1876	289.33	1856	283.16
1955	315.03	1935	307.64	1915	301.92	1895	294.92	1875	290.07	1855	284.36
1954	314.71	1934	308.00	1914	300.70	1894	294.51	1874	290.81	1854	285.57
1953	312.73	1933	308.35	1913	301.00	1893	294.10	1873	291.56	1853	288.05
1952	312.18	1932	307.49	1912	301.30	1892	295.02	1872	286.66	1852	286.76
1951	312.09	1931	306.62	1911	298.49	1891	293.89	1871	286.49	1851	285.47
1950	312.00	1930	305.74	1910	298.11	1890	292.76	1870	286.33	1850	286.40
1949	313.66	1929	305.38	1909	297.87	1889	291.63	1869	287.99		
1948	309.69	1928	305.72	1908	301.50	1888	292.99	1868	289.54		
1947	311.57	1927	308.02	1907	300.56	1887	294.34	1867	287.99		
1946	311.61	1926	306.49	1906	299.61	1886	291.23	1866	285.05		
1945	312.11	1925	304.97	1905	298.66	1885	288.12	1865	285.85		
1944	310.65	1924	304.72	1904	297.33	1884	289.23	1864	286.65		
1943	312.36	1923	304.70	1903	295.99	1883	289.76	1863	286.00		
1942	312.36	1922	304.69	1902	295.80	1882	292.46	1862	285.35		
1941	312.39	1921	303.75	1901	295.61	1881	290.90	1861	287.17		

Ezeket az adatokat összekapcsolták a Hawaii-szigeteki Mauna Loánál közvetlenül mért modern adatokkal (NOAA [20]).

Az 1851 óta mért abszolút értékeket az 1. ábra, az éves növekményeket (ΔCO_2) pedig a 2. ábra mutatja.



1. ábra: A Hawaii Mauna Loáról és antarktiszi jégmagokból származó CO_2 adatok összekapcsolása



2. ábra. A légköri CO_2 éves növekedése 1851 óta; ΔCO_2 = a CO_2-koncentráció évenkénti változása.

Az 1. ábrán a görbe első pillantásra simának tűnhet. A 2. ábra azonban számos megmagyarázhatatlan ingadozást mutat a ΔCO_2 értékekben. 1959 óta a ΔCO_2 értéke ugyan ingadozott, de folyamatosan emelkedett, és sosem csökkent. Ráadásul 1959 óta a ΔCO_2 maximális értéke körülbelül 3 ppm.

Ezzel szemben 1958 előtt több olyan év is akad, amelyben körülbelül 5 ppm-es növekedés, illetve mintegy 3,5 ppm-es csökkenés figyelhető meg. Ezek az adatok arra késztetnek bennünket, hogy megkérdőjelezzük az adatok pontosságát. Ha ezek a rekonstruált értékek helytállóak, akkor az ipari forradalom óta valójában számos olyan év volt, amelyben a légköri CO_2-szint csökkent. Más szóval: megdől az az elképzelés, miszerint az emberi eredetű kibocsátások folyamatosan halmozódtak volna a légkörben.

Hasonlóképpen, a koncentrációnövekedést mutató évek esetében is felszínre kerül az alapvető probléma.

Efféle CO_2-értékekről még akkor sem jöhettek volna létre, ha az adott időszakban keletkező összes emberi eredetű kibocsátás [17] teljes egészében a légkörben maradt volna.

A legszembetűnőbb adat az 1873-as évre vonatkozó 4,9 ppm-es ΔCO_2-érték. Az 1872-es és 1873-as évre vonatkozó, e ΔCO_2-értékhez tartozó adatok megtalálhatók az eredeti adatsorban (Excel®-fájl: „CO2 Composite”, [18]).

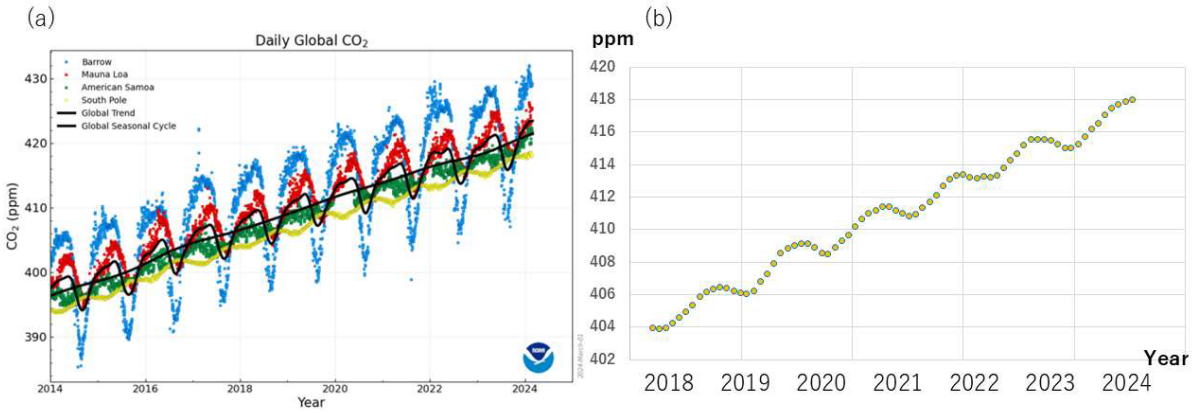
Ezek rendre 286,66 ppm (77,17 évvel a jelen előtt – BP, ahol BP = 1950) és 291,56 ppm (76,26 évvel a jelen előtt) értéket mutatnak (a félreértések elkerülése végett: ez nem a szerző saját számítása). Ezek az értékek az 1. és 2. táblázatban is szerepelnek.

Az emberi eredetű kibocsátás 1913-ban haladta meg a 7,8 gigatonnát (Gt – ami 1 ppm-nek felel meg) [17]. 1913-at megelőzően évi 1 ppm-nél nagyobb növekedés lehetetlen – még akkor is, ha feltételezzük, hogy az ipari forradalom kezdete óta tapasztalt CO_2-növekedés kizárólag antropogén eredetű.

Másrészről, ez azon évek esetében is problémás, amikor a CO_2-szint csökkenést mutat. Nincs ésszerű magyarázat arra, hogy a természet miért nyelt volna el ilyen nagy mennyiséget az adott időszakban. A NOAA adatai szerint [21, 22] a légköri CO_2-szint éven belüli maximális ingadozása a mai Antarktiszon körülbelül 3 ppm (3. ábra). Továbbá, a jégmagok alapján végzett rekonstrukciókban az előtte és utána következő időszakok értékeit átlagolják. Ebből következik, hogy az 1958 előtti, 2. ábrán látható ΔCO_2-értékek semmiképpen sem tekinthetők hihetőnek; a jelentősebb ingadozások pedig kizárólag az évről évre történő relatív mérések pontatlanságával magyarázhatók – függetlenül az abszolút CO_2-szint meghatározásakor felmerülő egyéb hibáktól.

Ez a ΔCO_2-vel kapcsolatos jelenség egy további problémára is rávilágít. Olyan megmagyarázhatatlan jelenségről van szó, amely még a legfiatalabb jégmagminták adataiban is megjelenik. E tény igazolja a Jaworowski által is megnevezett, a légköri összetevők koncentrációjának jégmagok alapján történő rekonstrukcióját jellemző korlátokat. Ez

különösen igaz lehet a régebbi jégmagadatokra. Jaworowski észrevételeit a későbbiekben foglaljuk össze.



3. ábra. Légköri CO_2-koncentráció világ több tájáról (adatok a NOAA-tól): (a) globális, (b) kizárólag az Antarktiszra vonatkozó adatok

Ez az oka annak is, hogy a szerző (Ato, [12]) a korábbi tanulmányában nem vette figyelembe az 1958 előtti adatokat (lásd még a Függeléket). Számos olyan ΔCO_2-érték létezik ugyanis, amely nem magyarázható az akkori emberi kibocsátással, így ezek nem használhatók fel egy többváltozós elemzésben. Ezen értékek alkalmazása kizárólag téves statisztikai eredményekhez vezetne.

3. Ellentmondás a kumulatív antropogén CO_2-kibocsátás és a feltételezett elnyelődés között a 280 ppm-es hipotézis tükrében

Az IPCC hatodik értékelő jelentése (AR6) [1] leszögezi, hogy az üvegházhatású gázok koncentrációjának a kb. 1750 óta tapasztalt teljes növekedése kétségtelenül emberi tevékenységre vezethető vissza. Továbbá a jelentés szerint az elmúlt 60 évben az emberi eredetű CO_2-kibocsátás 56%-a került a légkörből az óceánokba, illetve a szárazföldi területekre, méghozzá közel állandó ütemben.

E magyarázat és az adott időszakra feltételezett CO_2-koncentráció (280 ppm) egyszerű számszerű ellenőrzése azonban ellentmondást tár fel. Mivel az AR6 első munkacsoportjának (WG 1) jelentése 2021-ben jelent meg, az ebben a szakaszban végzett elemzés addig az évig terjedő adatokat veszi alapul. A légköri CO_2-koncentrációra vonatkozó adatok a hawaii Mauna Loa obszervatóriumból származnak.

1959 és 2021 között a légköri CO_2-koncentráció 100,43 ppm-mel növekedett. Az emberi tevékenységből származó CO_2-kibocsátás mennyisége ugyanebben az időszakban 225,69 ppm-nek felel meg (beleértve a földhasználat-változást is; 1760,39 Gt ÷ 7,8 = 225,69 ppm, 1960–2021 közötti időszak). Ennélfogva a maradványarány erre az időszakra 44,5% (a megkötési arány 55,5%) (100,43 ÷ 225,69). Ez a rész tehát helytálló.

Ezt követően vizsgáljuk meg az 1959 előtti adatokat. Mivel 1850-től kezdődően kizárólag a földhasználat-változással (LUC) kapcsolatos adatokat tartalmazó adatsorok állnak rendelkezésre, a további elemzéshez az 1850 és 1959 közötti időszak adatait használjuk fel.

Az 1850 és 1959 közötti teljes kibocsátás – a földhasználat-változással (LUC) együtt – 768,45 Gt volt (ami 98,52 ppm-nek felel meg) (4. ábra). Ha feltételezzük, hogy a természetes megkötési arány ebben az időszakban szintén 55,5% volt, akkor az 1850-es légköri CO_2-koncentráció 272,14 ppm-re tehető (315,98 – 98,52 × 0,445).

Ez az érték 280 ppm alatt van. Ahhoz tehát, hogy 1850-ben elérjük a 280 ppm-es szintet, a maradványarányt – más néven légköri hányadot (Airborne Fraction, AF) – 36,5%-nak kellene feltételeznünk ((316 – 280) ÷ 98,52 ≅ 0,365).

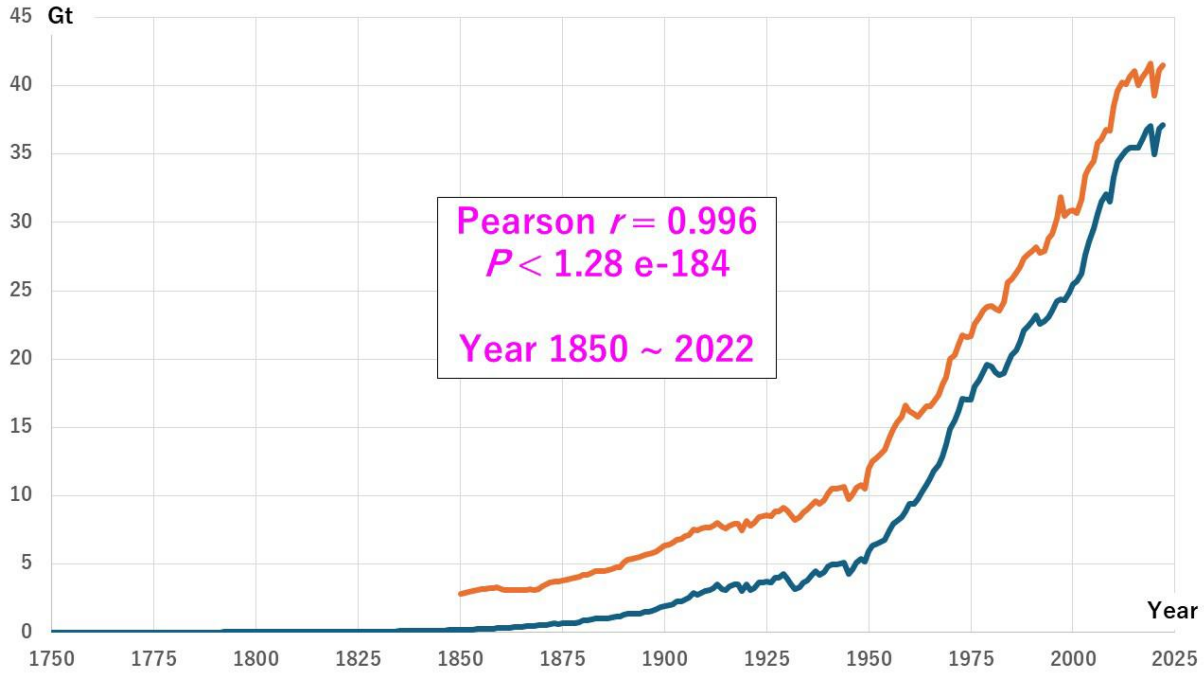
Bár a maradványarány 1960 óta közel állandó, 44,5%-os szinten mozog, nincs ésszerű magyarázat arra, miért volt ez az érték az azt megelőző 110 évben átlagosan 36,5%.

Továbbá, bár az 1849 előtti pontos számadatok nem ismertek, az biztos, hogy létezett emberi eredetű kibocsátás – beleértve a földhasználat-változást (LUC) is. Ebből következően az 1750 és 1959 közötti időszakra vonatkozó maradványaránynak még 36,5%-nál is alacsonyabbnak kellett volna lennie.

Az eltérés mennyiségi szempontból is egyértelmű. 1960 és 2021 között a Föld természeti környezete – feltételezhetően – évente átlagosan 15,76 Gt (1760,39 × 0,555 ÷ 62) CO_2-t nyelt el.

Másrészről, még ha feltételezzük is, hogy a légköri CO_2-koncentráció 1850-ben 280 ppm volt, és 1750-től 1849-ig ezen a szinten maradt, akkor 1850 és 1959 között évente átlagosan mindössze 4,44 Gt (768,45 × 0,635 ÷ 110) CO_2-t nyelt el a természet. Ebben az esetben az 1750 és 1849 közötti időszakra vonatkozó maradékértékek 0%-ot tennének ki.

Nincs ésszerű magyarázat ilyen drasztikus különbségekre az 1959 előtti és az 1960 utáni időszakok között. Más szóval, ez rávilágít arra, hogy a természet általi elnyelési arányt az emberi kibocsátáshoz viszonyított, viszonylag állandó hányadosként értelmezni: korlátokba ütközik. Ráadásul – amint azt a 2. ábra is mutatja – amennyiben a jégmagokból rekonstruált CO_2-adatok helytállók, úgy az az elképzelés, miszerint a természetes elnyelés (vagyis az óceánokba és a szárazföldre irányuló áramlás) az emberi kibocsátáshoz képest állandó arányt képvisel, az 1959 előtti időszakra nem érvényes.



4. ábra. Emberi eredetű CO_2-kibocsátás (1750–2022); kék: kizárólag fosszilis tüzelőanyagok; narancssárga: földhasználat-változással együtt. Az emberi kibocsátásra vonatkozó adatok forrása: OWID ([17] hivatkozás).

A valóságban a légköri CO_2-koncentrációt a természetes és az antropogén (emberi) be- és kiáramlások egyensúlya határozza meg, miközben a természetes folyamatok dominálnak. Erre már Salby és Harde [13], valamint Berry [15] is rámutatott.

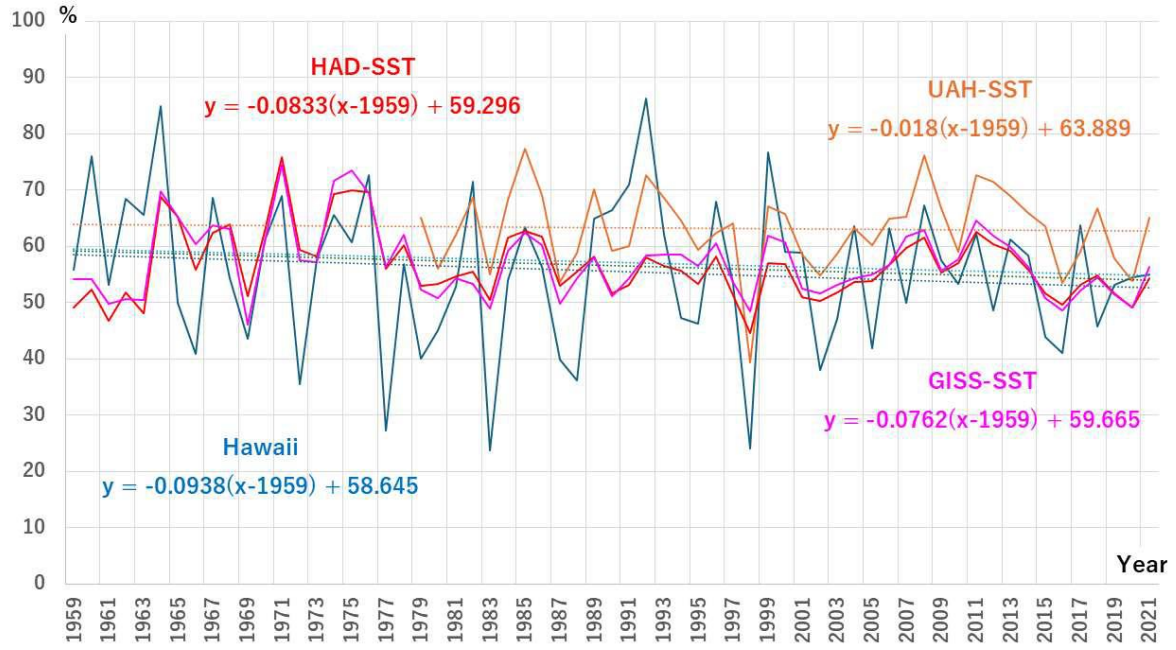
Ebből a szemszögből nézve is látható, hogy az ipari forradalom idejére vonatkozó 280 ppm-es érték nem tekinthető megbízhatónak. Ez az ellentmondás egyben alátámasztja Beck [23] és Harde [24] tanulmányainak érvényességét is. Beck meglehetősen pontos kémiai módszerekkel határozta meg a légköri CO_2-koncentrációt; az így kapott értékek több tíz ppm-mel magasabbak, mint a jégmagokból származó adatok [23]. Harde szintén megerősíti Beck kémiai módszerének helytállóságát a CO_2-szintek rekonstrukciója tekintetében (Harde, [24] tanulmány, 2. ábra).

Továbbá, a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) alapján becsült ΔCO_2-értéket összevetjük a feltételezett természetes elnyelési rátával (5. ábra).

Az SST-n alapuló ΔCO_2-becslés részleteit a szerző egy korábbi tanulmánya (Ato [12]) ismerteti.

Az Alabamai Egyetem (Huntsville-i kampusz, UAH) SST-adatai (mint közvetett mutató) alapján becsült CO_2-elnyelési ráta körülbelül 10%-kal magasabb, mint a Hawaiin végzett tényleges ΔCO_2-mérésekből feltételezett érték. A fluktuációk általános tendenciája azonban hasonló. Ezzel szemben az Egyesült Királyság Hadley Központjának (HAD), valamint a NASA Goddard Űrkutatási Intézetének (GISS) SST-adatai alapján becsült elnyelési ráták egymáshoz hasonló

eredményeket mutatnak. Bár az ingadozások kisebbek, mint a hawaii tényleges mérésekből feltételezett abszorpciós ráta, a tendenciák hasonlóak. Ugyanakkor felmerülhet az eltérés lehetősége is, különösen az 1963–1964-es időszakban és azt megelőzően. Ez az eltérés rávilágít a globális tengerfelszín-hőmérsékletre (SST) vonatkozó, 1960 előtti mérések pontosságának és az adatok integrálásának korlátaira.



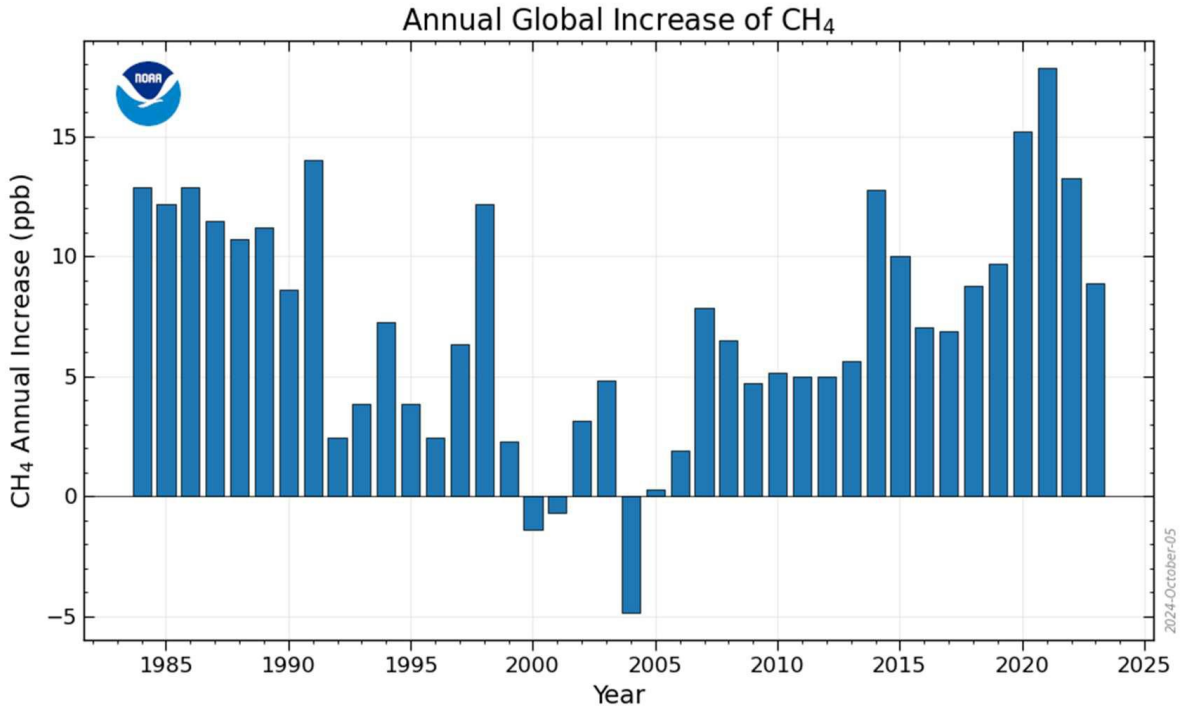
5. ábra. A tengerfelszín-hőmérséklet alapján becsült, illetve a természet által elnyeltnek feltételezett abszorpciós arány összehasonlítása 1959-től kezdődően. Az egyenletben „x" az évet (i. sz.) jelöli; hipotetikus abszorpciós arány (%) = (emberi eredetű kibocsátás (ppm) – előrejelzett ΔCO_2) ÷ emberi eredetű kibocsátás (ppm) × 100. A ténylegesen mért érték (kék színnel) a következőképpen számítandó: (emberi eredetű kibocsátás (ppm) – az adott évre vonatkozó ΔCO_2) ÷ emberi eredetű kibocsátás (ppm) × 100. Az emberi eredetű kibocsátás ppm-ben van megadva (1 ppm = 7,8 Gt); a tengerfelszín hőmérséklete (SST) alapján előrejelzett ΔCO2-re vonatkozó részletekért lásd a korábban közzétett jelentést. Az elemzett időszak 2021-ig tart, összhangban az IPCC hatodik értékelő jelentésének első kiadásával.

4. A légköri metánszint csökkenésének jelentősége a 21. század elején

Gyakran felmerül az az állítás, hogy az emberi tevékenység felelős a légköri metánszint közelmúltbeli emelkedéséért is.

Azonban, ahogy a szerző (Ato [12]) egy korábbi tanulmányában rámutatott, ez az érték a 21. század kezdete óta kétszer is csökkent (6. ábra, NOAA, [25]). Ez a jelenség az emberi eredetű kibocsátások tömeges mértékűvé válásának korában, napjainkban történt. Ha az emberi tevékenységből származó összes kibocsátás a légkörben maradna, akkor a metánszintnek a 21. században és az azt követő időszakban évente legalább 100 ppb-vel kellene emelkednie (Ato, [12]).

Ezzel szemben valójában előfordultak csökkenést mutató évek is. Ráadásul az éves ingadozások mértéke sem mutat következetességet.



6. ábra. A metán légköri koncentrációjának alakulása az utóbbi időben; a kép forrása: NOAA [25]

E jelenség legalább három dolgot jelent.

Először is, a Föld metánciklusában a természet hatása messze meghaladja a mai kor emberéét.

Másodszor, még azokat az értékeket sem lehet az emberi tevékenységnek tulajdonítani, amelyek az elmúlt években mintegy 10 ppb-vel (milliárdodrésszel) emelkedtek. Ez már csak azért is így van, mivel előfordulnak olyan évek, amikor a koncentráció csökken, illetve olyanok is, amikor a természetes forrásokból származó mennyiség meghaladja az emberi kibocsátást.

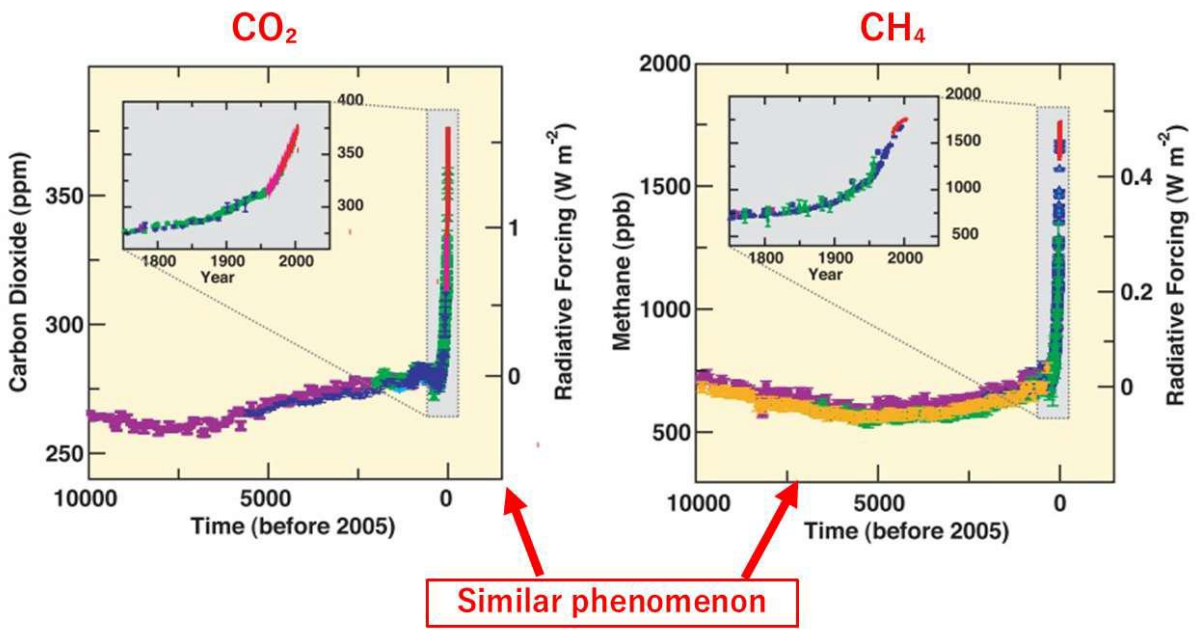
Harmadszor, ez a jelenség a rekonstruált CO_2-adatoknál is megfigyelhető; ennek jelentőségét később fejtjük ki.

Ha a metánszint emelkedése minden évben az emberi tevékenységből származó metánból származott volna, akkor ellentmondásos lenne, hogy a növekedés nem volt folyamatos, és mértéke sem volt minden évben hasonló. Ebből következően az IPCC azon adatai is ellentmondásosak, amik szerint a metánszint az ipari forradalom óta mintegy 1000 ppb-vel emelkedett (Ato, [12]).

Mivel a légköri metánszint még napjainkban is – amikor az emberiség nagy mennyiségben bocsát ki metánt – csökkenhet, nem feltételezhető, hogy a korábbi, alacsonyabb kibocsátású időszakokban mintegy 1000 ppb-nyi többlet halmozódott volna fel.

Továbbá (harmadik szempont), a metán e viselkedése arra késztet bennünket, hogy megkérdőjelezzük a légköri CO_2 rekonstruált értékeit, mivel az ipari forradalommal egybeeső hirtelen növekedés is ugyanilyen jelenségnek tekinthető (7. ábra, IPCC, [26]).

Ennek oka, hogy a jégmagokból rekonstruált adatokat időben előre tolták, és hozzákapcsolták a modern mérési eredményekhez. Ám mivel immár világossá vált, hogy a jégmagok alapján rekonstruált metánadatok ellentmondásosak, hasonló problémákat kell feltételeznünk a CO_2 esetében is. Ezért az alkalmazott módszer helytállóságát felül kell vizsgálni.



7. ábra. A metán és a CO_2 rekonstruált értékeiben megfigyelhető közös jelenségek; a kép az IPCC negyedik értékelő jelentéséből [26] származik.

5. Az 1980-as évekből származó, jégmagok alapján rekonstruált CO_2- és metánszintekre vonatkozó, egymásnak ellentmondó jelentések

Ebben a fejezetben az 1980-as években megjelent, a CO_2- és metánadatok összefüggéseit tárgyaló el/ső tanulmányokat tekintjük át.

A témával kapcsolatos első jelentős beszámoló a metánra vonatkozott. Az áttekintést a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Az 1980-as években készült, jégmagokból származó CO_2- és metánrekonstrukciókkal, valamint az adatok összefüggéseivel foglalkozó legfontosabb jelentések főbb megállapításai

Reconstructed gas	year	Authors, Journal	Key points
CO_2	1985	A. Neftel, E. Moor, H. Oeschger & B. Stauffer Nature volume 315, pages45–47 (1985)	CO_2 concentration from the Antarctic ice is reconstructed (Siple Station). Data is presented for depths below 68.2m from the surface. The age of the ice at this location is set at 1891, and it is concluded that the gases within it are 95 years younger.
	1986	H. Friedli, H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler & B. Stauffer Nature volume 324, pages237–238 (1986)	In the first paragraph of the main text, the authors explain that, "One of the prerequisites for reproducing the gases in an ice core is that there is no melting layer, and the sample from Siple station satisfies this." The age of the gas was then moved forward by 83 years and linked to the data from Hawaii. Furthermore, the method was deemed consistent based on the verification of carbon isotopes.
CH_4	1982	H. Craig, C. C. Chou Geophysical Research Letters Volume 9, No. 11, Pages 1221-1224, November 1982,	The methane values reconstructed from the Greenland ice core were linked to modern data (Cape Meares, Oregon). For this purpose, the data from the ice core was moved forward 90 years to the present day. In this report, no rigorous verification was carried out using carbon isotopes.
	1988	H. Craig, C. C. Chou, J. A. Welhan, C. M. Stevens, and A. Engelkemeir Science, 16 Dec 1988, Vol 242, Issue 4885, pp. 1535-1539	Verification of the above-mentioned age shifting was performed. Based on the divergence in carbon isotope concentrations, the age of the gas is virtually equivalent to the age of the ice itself, and the authors pointed out that the procedure of age shifting is not reasonable.

Először egy 1982-ben közzétett, metánkoncentráció-rekonstrukciókat tartalmazó tanulmány (Craig és mtsai [27]) adatait, valamint a Grönlandról származó adatokat kapcsolták össze a korabeli mérésekkel. E munka nem tartalmazta a gáz korának szénizotópok segítségével történő, szigorú ellenőrzését.

Ezt követően két tanulmány jelent meg a CO_2-koncentráció rekonstrukciójáról. Az 1985-ös közleményben (Neftel et al. [28]) antarktiszi jégmagok alapján rekonstruált adatokat ismertettek.

Majd egy 1986-os tanulmányban (Friedli és mtsai [29]) ezeket az adatokat 83 évvel eltolták, és összekapcsolták a Hawaiiról származó, akkori, nagy pontosságú adatokkal (8. ábra; eredetileg az [29] forrás 1. ábrája).

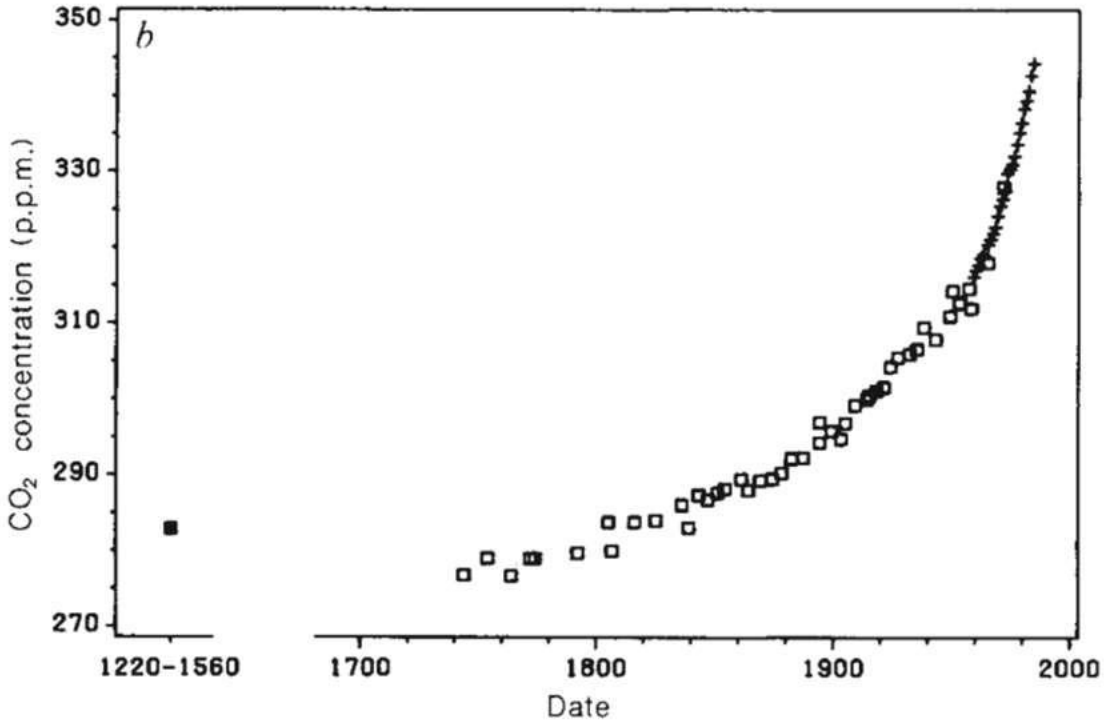


Fig. 1 *a*, $\delta^{13}C$ of CO_2 (in ‰ versus PDB standard[18] N_2O-corrected), *b*, CO_2 concentration in air extracted from ice cores from Siple Station (open squares) (data from this work and ref. 1) and from South Pole Station (black square)[6]. Also shown (crosses) are results from direct atmospheric samples at Mauna Loa (refs 8–10 and C. D. Keeling, personal communication).

8. ábra. Jégmagok és a modern, nagy pontosságú CO_2-mérések közötti összefüggést bemutató diagram; a kép Friedli és mtsai [29] munkájából származik.

A tanulmány elején leszögezik: *„A közelmúltra vonatkozó, jó minőségű jégmag-adatsor megszerzésének előfeltétele a nagy felhalmozódási ráta – ami megfelelő időbeli felbontást biztosít –, valamint a nyári olvadás hiánya (az olvadékvíz ugyanis zavarja a CO_2-mérést).”* [29]. A szerzők e tanulmányban [29] kifejtik, hogy emindezek a feltételek teljesültek, és arra a következtetésre jutnak, hogy a szénizotóp-elemzésen alapuló kor-eltolódás (age-shifting) nem vezet ellentmondásra.

Ugyanakkor az 1985-ös tanulmány [28] elején említik, hogy a teljes jégmagban mindössze egyetlen, egyértelműen azonosítható, szabálytalan vastagságú (2–10 mm-es) olvadási réteget figyeltek meg, a felszín alatt 7 méterrel (45. oldal, bal hasáb). Azt is közlik, hogy a mintavételi helyen (Siple) az éves csapadékmennyiség 500 kg/m² volt. Ez azt jelenti, hogy az éves csapadék (havazás) mennyisége körülbelül 0,5 méternek felel meg.

Ebből következik, hogy az olvadási réteg mintegy 14 évvel a jég kitermelése előtt keletkezett. Így – figyelembe véve a jégfúrás évét, amelyre a tanulmány adatai épülnek (az 1983–1984-es nyári munkálatok [28, 29]) – az e réteg közvetlen közelében (a 7 méteres mélység alatt) található jégtakaróban lévő gázok még 1970 előtt záródtak be, függetlenül attól, hogy milyen „fiatalnak” tűnnek.

Másrészről az 1985-ös tanulmány [28] szerint a felszín alatt 68,2–68,6 méter mélységből származó mintákban a jég maga 1891-ben keletkezett, míg a benne található gázok 1962 és 1983 közötti időszakból származnak ([28], 1. táblázat). Ugyanakkor a minta teljes egészében, körülbelül 1970-ben vagy azt megelőzően, egy jól elkülöníthető olvadási réteg keletkezett. Ebből következően lehetetlen, hogy az adott évtől kezdődően gázok jussanak be az alsó rétegbe (amely több mint 7 méterrel a felszín alatt található).

Továbbá a szerzők a módszer érvényességét azzal támasztották alá, hogy összefüggést mutattak ki az évszakos ingadozások és a különböző korokhoz tartozó CO_2-rekonstrukciók között (a [28] forrás 2. ábrája). Léteznek azonban olyan adatok, amelyek a felszín alatt körülbelül 82,4 méteres mélységben mintegy 15 ppm-es eltérést mutatnak, holott az időbeli különbség csupán néhány hónap (a jégmag vastagságában mutatkozó, néhány centiméteres eltérés alapján valójában inkább 1-2 hónap; a [28] forrás 1. táblázata szerint a 82–83 méteres mélységből származó minta 1867-ben keletkezett) (a [28] forrás alapján készült 9. ábra). Még az ingadozások kisimítása esetén is, a jégmagokban mutatkozó 10 cm-es különbség ezekben az adatokban több mint 5 ppm-es eltérésnek felel meg (9. ábra).

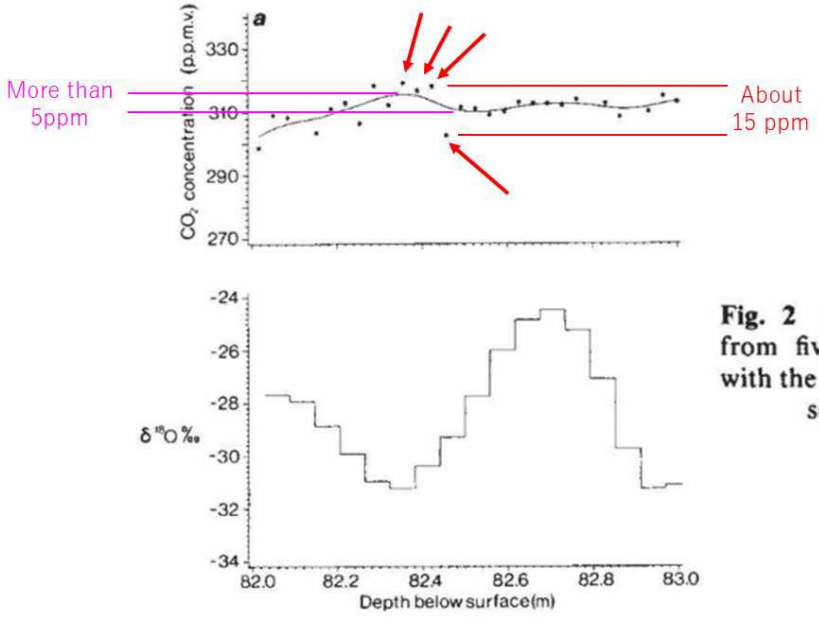


Fig. 2 *a–e*, Detailed CO_2 record from five depth intervals together with the $\delta^{18}O$ as an indication of the seasonality of the ice.

9. ábra. A CO_2 szezonális ciklusa jégmagokban; a képek Neftel és mtsai [28] munkájából származnak, a piros és rózsaszín kiegészítő vonalakat a szerző (Ato) adta hozzá. Az eredeti tanulmány [28] 1. táblázata szerint az ábrán látható adatok 1867-ben keletkezett jégből származnak.

Ráadásul ez az eltérés (10–15 ppm) nemcsak az idézett évre vonatkozó (a) ábrán figyelhető meg, hanem más években is (a [28] tanulmány 2. ábrájának b–e részei).

A valóságban azonban – még a mai Antarktiszon is – az éves maximális különbség mindössze körülbelül 3 ppm (3. ábra). Ha abból indulunk ki, hogy a jégmagokban található gázkomponensek koncentrációja a jég bezáródásáig átlagolódik, akkor ilyen jelentős eltérések nem jöhetnének létre. Úgy tűnik, valamilyen megmagyarázhatatlan jelenségről van szó.

Ez ugyanaz a fajta, jégmagokból származó, megmagyarázhatatlan ΔCO_2-jelenség, mint amit a 2. fejezetben ismertettünk.

Továbbá, egy 1986-os tanulmányban [29] a szerzők azt állították, hogy az óceánokból származó CO_2-kibocsátás elhanyagolható hatással van a légköri $\delta^{13}C$-értékek változására. Ezt azzal magyarázzák, hogy a szénizotóp-arányok a légköri és az óceáni kibocsátások esetében nagyon hasonlók.

A valóságban azonban az óceánokban és a bioszférában a $\delta^{13}C$-érték (a C^{13}/C^{12} izotóparány, illetve a normalizált, ezrelékben kifejezett eltérés) alacsonyabb, mint a légkörben (Spencer, [30]; Koutsoyiannis, [31]; Ollila, [32]).

Ezek a folyamatok és jelenségek ismét arra utalnak, hogy problémák merülnek fel a jégmagokon alapuló rekonstrukciókkal és az úgynevezett „kor-eltolódással" (age shifting) kapcsolatban.

Ezt követően, 1988-ban megjelent egy további tanulmány a metánról. E munkában a szerzők (Craig és mtsai [33]) rámutattak, hogy a szénizotópok szempontjából a jégmagokban található metán esetében a kor-eltolódás problémásnak tekinthető. Ennek oka a legfiatalabb jégmagban mért $\delta^{13}C$-érték és a modern (1980-as) metánban mért (ténylegesen meghatározott) érték közötti jelentős eltérés volt. A 10. ábra a szerzők által megadott leírást és ábrafeliratot mutatja be.

A metánrekonstrukcióval foglalkozó kutatócsoport emellett ellentmondást jelzett e tekintetben a CO_2-rekonstrukciót végző csoporttal szemben. Megállapították ugyanis, hogy a jégmagokban található gázok korának eltolása (korrekciója) szakmailag nem megalapozott (3. táblázat, 10. ábra).

Ezenkívül egyéb problémák is felmerülnek e kutatásokkal kapcsolatban. A CO_2-rekonstrukciót végző csoport úgy hajtotta végre a gázok korának eltolását, hogy közben – amint az az 1986-os jelentésükből kiderül – a felszín közelében egyértelműen jelen volt egy olvadási réteg [28, 29]. A CO_2-rekonstrukciót végző csoport ennek ellenére elfogadhatónak minősítette az alkalmazott módszert és az eredményül kapott értékeket. Jaworowski igen alaposan rámutatott azokra a problémákra, amelyek ezeket a kutatási folyamatokat jellemezték.

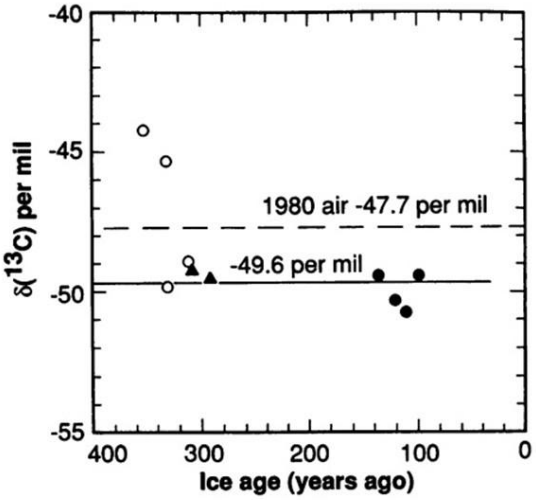


Fig. 2. $\delta(^{13}C)$ values of methane in Greenland ice versus age of the enclosing ice. Each sample represents ~0.002 cm^3 (STP) of CH_4 extracted from ~25 kg of ice. Triangles, samples from "Crete," Site A; circles, Dye 3 core samples; solid circles, solid ice; open circles, wafered ice. The means of the two groups of samples differ by only 0.6 per mil: -49.3 ± 0.2 per mil at 310 years, and -49.9 ± 0.3 per mil at 120 years. This difference is insignificant with respect to the mean value of -49.6 ± 0.2 per mil for the set of eight good samples and the ± 0.7 per mil errors on the individual data points. [Errors for the two groups of samples and the total set refer to the means; uncertainty in $\delta(^{13}C)$ of 1980 air is ± 0.2 per mil.]

<related explanation, P1537>
Thus we assumed that trapped air at Dye 3 is as much as 90 years younger than the ice in which it is sealed. Schwander and Stauffer reached the same conclusion. However, the isotopic data seem to preclude such a large difference in age between air and ice. As shown in Fig. 2, this large an age difference at Dye 3 would require an extremely steep rate of change: 2 per mil in isotopic composition in the last 10 years (that is, if the 100-year-old ice contains 10-year-old air). Such a large change seems unreasonable.

10. ábra. A metán $\delta^{13}C$-értékében mutatkozó eltérés a jégmagok és a jelenkori légkör között; az ábra és a magyarázó szöveg Craig és mtsai [33] munkájából származik.

6. A jégmagokban található gázkoncentrációk rekonstrukciós módszerének korlátai – Zbigniew Jaworowski megállapításai alapján

A múltbeli gázkoncentrációk sarki jégmagok segítségével történő rekonstrukciója során az alábbi feltételezésekkel élnek (Jaworowski és mtsai [34, 35], Jaworowski [36]):

- 1. Azokon a sarki területeken, ahol az átlaghőmérséklet -24 °C vagy annál alacsonyabb, nincs jelen folyékony fázis.

- 2. A gázok jégmagba történő beágyazódása mechanikai folyamat, ami nem jár a csapdába került gázkomponensek frakcionálódásával (megváltozásával).

- 3. A gáz összetétele a bezáródás pillanatában változatlan marad, örökre.

- 4. A légbuborékok kora kisebb, mint az adott helyen található jégé; a különbség néhány tíz évtől akár több ezer évig is terjedhet.

E feltételezések a következőképpen foglalhatók össze:

Amíg a jégmag egy adott része nem válik teljesen elszigeteltté a külső légkörtől, a légbuborékok továbbra is kicserélődhetnek a külső levegővel. Amint azonban a lezáródás megtörténik, a rendszer teljesen elszigetelődik. Ebből adódóan időbeli eltérés keletkezik. Ezt követően a légbuborékokban már nem mennek végbe tartós kémiai vagy fizikai változások.

Jaworowski azonban 1992-ben megjelent két tanulmányában [34, 35] részletesen rámutatott e feltételezések hiányosságaira. 1994-ben egy egyszerűsített összefoglalót is közzétett a témában [36]. A Jaworowski által felvetett szempontok összegzését a 4. táblázat tartalmazza. A valóságban mintegy 20 olyan kémiai és fizikai folyamat létezik, amely befolyásolhatja a gázkoncentrációk rekonstrukcióját. Emellett a következőkre is felhívja a figyelmet:

4. táblázat. A jégmagokon alapuló rekonstrukciós módszer problémái – Jaworowski megállapításai alapján

	Key Elements and Phenomena	Fractionation
During snow falls and accumulation	The surface of the falling snow is covered in extremely cooled water or salt water (2-3% by volume). After snowfall, a process called snow stratification occurs (due to sunlight and chemical reactions), and a temperature gradient also occurs. In some reports, a gradient of 500° C/m occurs near the surface even in Antarctica. In the upper layers, sunlight is absorbed, the temperature rises, ice crystals melt and evaporate, and then recrystallization occurs repeatedly. In reality, there are an average of 15 melting layers per meter. During this process, separation occurs at each layer (a break occurs), making it difficult or impossible for the gas to be mixed. Even in this process, moisture is present in the microscopic gaps and thin film layers between each ice crystal. At 80-160m, due to pressure, CO_2 (and N_2 and methane) undergo clathrate formation (change from a gas state to a crystalline state). At 900 to 1200 meters, all gases, including N_2 and O_2, become clathrate.	CO_2 is 73 times more soluble in water than N_2 or O_2 (N_2O and methane are also several times more soluble). In addition, these gases are more easily dissolved in very cold water or salt water. The ice contains rare gases and various reactive substances (such as HNO_3, HCL, H_2O_2, SO_2, O_3, etc.), as well as copper, iron, manganese, other molecules, and carbonates, and when these react, they change the CO_2 concentration during reconstruction. The solubility of CO_2 and other gases in water also increases significantly with pressure (from 0.31 to 37.5% from 1 to 200 bar at 0 °C. The amount of salt water as a liquid itself is 100 times more at the 2000m point. At -20°C, the pressure at which the slow release of the clathrate begins is, 5 bar (approx. 70m) for CO_2, 120 bar (approx. 900m) for N_2, and 160 bar (approx. 1200m) for O_2 (CO_2 disappears from the bubbles faster than N_2 and O_2).
During excavation	In these types of ice sheets, secondary gases are generated when the pressure is released during drilling due to differences in the slow release of clathrates. This becomes an artifact and is not the same as the original gas. shock, large and small tears occur, and the drilling liquids contaminate them. During drilling, mechanical and thermal stress, as well as rapid decompression, can cause large and small fissures to form, resulting in condensation, recrystallization and other structural changes. The fissure will become contaminated regardless of whether or not drilling liquids are used (when the ice core is pulled up to the surface, not only the liquids but also modern gases will be mixed in). The fact that it seeps in from the outside means that the internal gases that may have remained in the fissure area are released outside. For these reasons, it is almost certainly impossible to reconstruct the atmosphere of that time. Due to decompression, it expands particularly in the long axis direction, and after a few minutes, the volume generally expands by 0.2%, and in the case of further relaxation, it expands by 0.6%.	Conversely, during drilling, partial pressure release causes O_2 and N_2 to be released from clathrate far before greenhouse gases such as CO_2, generating secondary gases (which become artifacts). and the pressure release during excavation of ice core, both reduce the amount of greenhouse gases such as CO_2 (even the ratio of N_2 and O_2 changes).
All of these processes will result in a reduction in the amount of relative CO_2 and greenhouse gases.		

„Nem létezik olyan kísérleti bizonyíték, amely alátámasztaná e módszer alapfeltevését, miszerint »a felső rétegekben lévő gázok évekig, sőt évezredekig keverednek egymással, majd miután bezáródnak [a jégbe], összetételük változatlan marad, és semmilyen változás nem következik be«.”

Ebből arra a következtetésre jutott, hogy a sarki jégmagokból rekonstruált CO_2-koncentrációk értékei összességében 30–50%-kal alacsonyabbak a valóságosnál.

Rámutatott továbbá arra is, hogy az értékek – az értékek tényleges meghatározása során – drasztikusan változhatnak attól függően, hogy milyen módszerrel olvasztják meg a jeget, és hogyan szabadítják fel belőle a gázokat.

Amint y azt a 4. szakasz bemutatja, a metánkoncentráció modern kori csökkenése nyilvánvalóvá tette a jégmagokon alapuló rekonstrukciók hiányosságait.

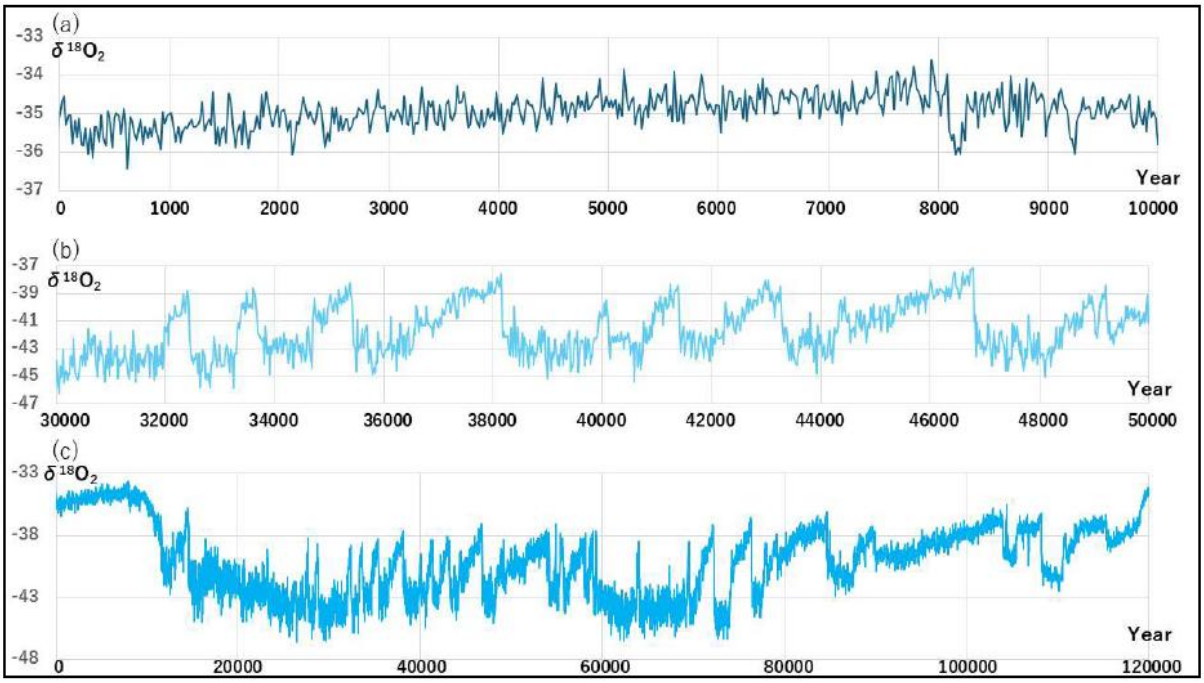
Ezenkívül a jelenség a metán és a CO_2 esetében azonos: a koncentrációk az ipari forradalom kezdetétől hirtelen emelkedésnek indultak. Más szóval, a CO_2-re is eleve jellemzőek ugyanezek a problémák.

Jaworowski arra is felhívta a figyelmet, hogy e kutatási területen igen kevés statisztikai megerősítés történt [36]. Sőt, a 2. és 3. szakaszban bemutatottak szerint világossá váltak a rekonstruált CO_2-értékek, valamint az iparosodás előtti 280 ppm-es érték alapjául szolgáló feltevések következetlenségei. Különösen nyilvánvaló, hogy a 2. ábrán látható, megmagyarázhatatlan jelenség nem felel meg a jégmagokból történő gázkoncentráció-rekonstrukció előfeltételeinek. A szerző korábbi tanulmánya (Ato, [12]) pontosan bemutatja azokat a statisztikai módszereket, amelyekkel az eredmények ellenőrizhetők lennének. Ezt a jelen tanulmány 8. és 9. szakasza is tárgyalja. Ez újabb bizonyíték arra, hogy Jaworowski aggályai megalapozottak.

Emiatt Jaworowski felvetései helytállónak tekinthetők.

7. Az antarktiszi jégmagokból származó CO_2-adatok problémái a múltbeli hirtelen felmelegedési események idején

A grönlandi klímarekonstrukciók szerint a múltban a modern kornál jóval nagyobb mértékű éghajlatváltozás ment végbe; ezt a $\delta^{18}O_2$ oxigénizotóp-adatok is alátámasztják (Badgeley és mtsai [37]). 100 éven belül 2–3 °C-nak megfelelő ingadozások rendszeresen megfigyelhetők (11. ábra).

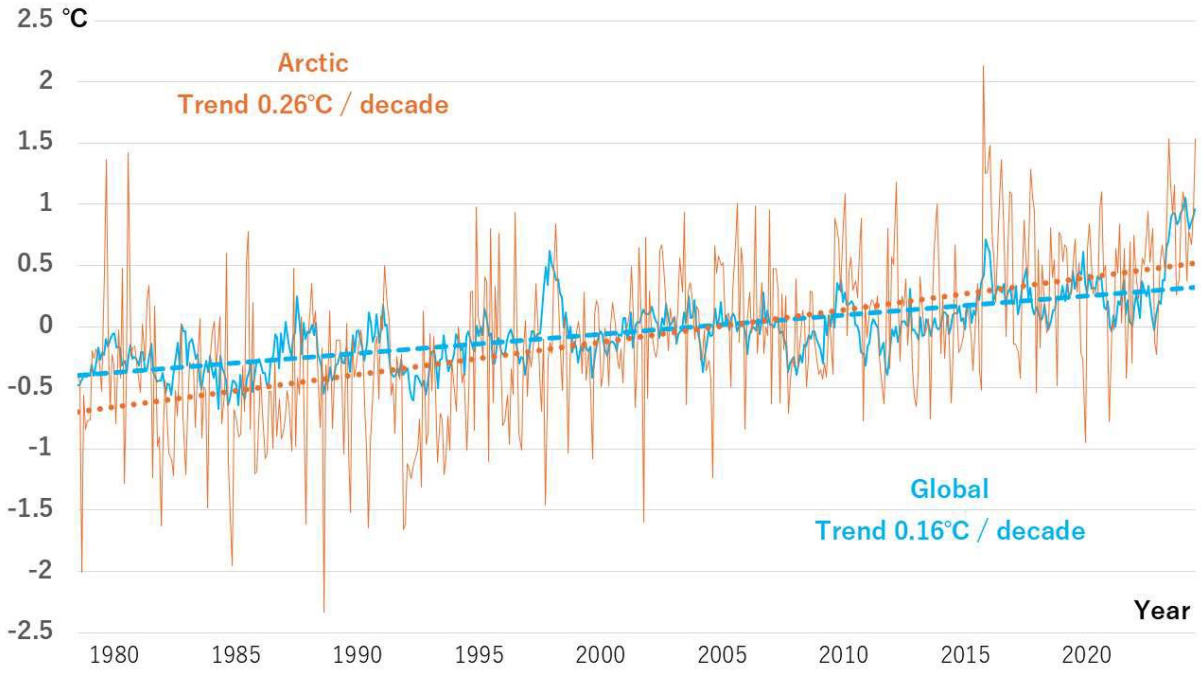


11. ábra. Grönlandi klímarekonstrukció: (a) az elmúlt 10 000 évben, (b) 30 000–50 000 évvel ezelőtt, (c) az elmúlt 120 000 évben. Forrás: North Greenland Ice Core Project (NGRIP); a 0 érték a 2000. évet jelöli. Megjegyzendő, hogy a függőleges tengelyek léptéke eltérő. Az adatok Badgeley és mtsai. [37] munkájából származnak; felhasznált fájl: Oxygen_Isotope_Records_Raw.csv (letöltve: 2024. szeptember 5.).

Ez még a holocén klímaoptimum idején is igaz volt, amikor sokkal melegebb volt, mint napjainkban.

Továbbá, a nagy eljegesedések idején számos, akár 10 °C-os vagy annál nagyobb ingadozás is előfordult.

Ebben a részben modern meteorológiai műhold-adatokat használunk fel az arktikus (északi-sarkvidéki) és a globális alsó troposzféra hőmérsékletének összehasonlítására. A globális hőmérséklet-ingadozás mértéke alig több mint fele az arktikus régióban tapasztalhatónak (12. ábra; Spencer, [38]). Az 1978 decembere óta számított évtizedes trend globális szinten 0,16 °C, az északi-sarkvidéki régióban pedig 0,26 °C volt.



12. ábra. Az arktikus régió és a Föld globális hőmérséklete meteorológiai műholdak adatai alapján (alsó troposzféra); a 0 hőmérsékleti érték az 1991 és 2020 közötti átlagot jelöli. Az adatok 1978 decembere és 2024 szeptembere közötti időszakot ölelik fel, és az Alabamai Egyetem (Huntsville) kutatócsoportjától származnak (6.0-s verzió) [38].

Ebből következik, hogy a jelenlegi, évszázadonként mintegy 0,8 fokos globális hőmérséklet-emelkedés – ahogyan azt az IPCC is jelzi – egyáltalán nem tekinthető rendellenesnek. Sokkal valószínűbb, hogy inkább a természetes ingadozás tartományába esik.

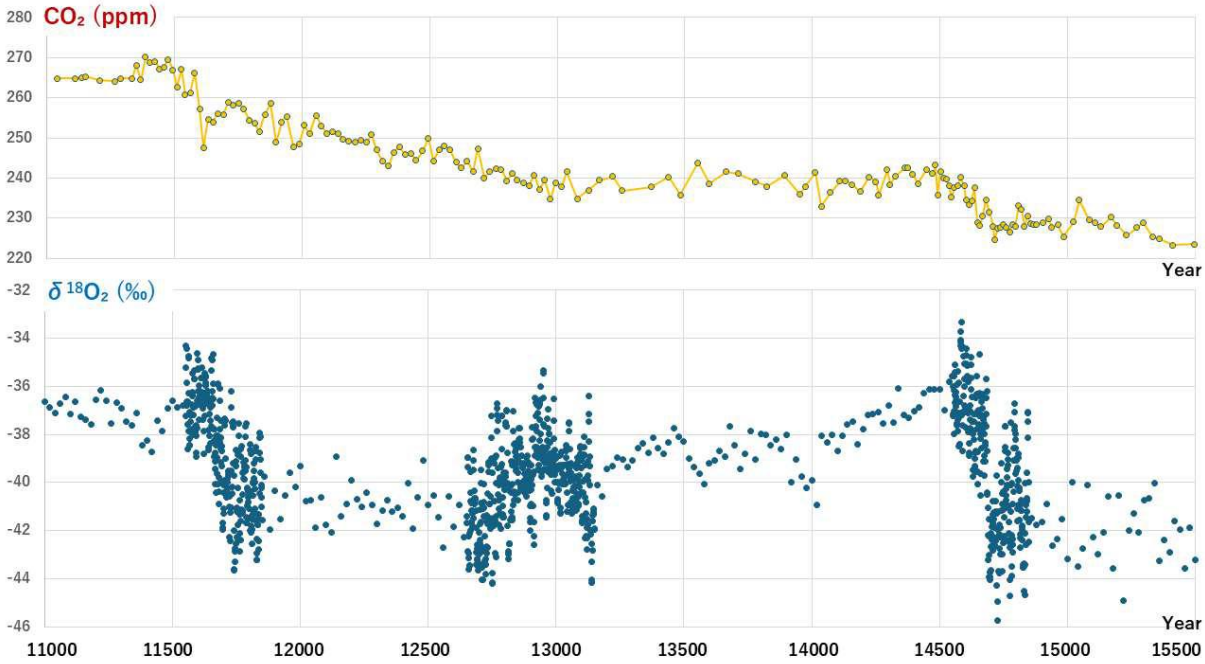
Az is egyértelmű, hogy a „fiatalabb driász” (Younger Dryas) időszakában – a Steffensen és munkatársai [39] által közöltek szerint – gyors, mintegy 10 °C-os felmelegedés következett be, ami 3 és 50 év közötti időintervallum alatt zajlott le. Ezenkívül a japán Fukui prefektúrában található Suigetsu-tóból származó klímarekonstrukciós adatok is drasztikus változásokra utalnak ugyanebben az időszakban (Nakagawa és munkatársai [40]). Sőt, legalábbis a folyamat későbbi, drámai szakasza (2000 előtt körülbelül 11 700 évvel) szinte egyidejűleg zajlott le [40].

Ez azt jelenti, hogy – legalábbis ezekben az években – globális léptékű, hirtelen felmelegedés történt. Természetesen ebben az időszakban még nem volt jellemző a fosszilis tüzelőanyagok olyan mértékű emberi használata, mint napjainkban.

Mindebből világosan látszik, hogy az éghajlat drasztikusan megváltozhat – akár a CO_2-szint ingadozásától függetlenül is –, méghozzá a modern kori ingadozásoknál jóval nagyobb mértékben (tehát a 100 év alatt bekövetkező, nagyjából 0,8 fokos változás egyáltalán nem rendellenes).

Továbbá, az akkori adatok a jégmagokból származó CO_2-rekonstrukciókkal kapcsolatban is felvetnek bizonyos kérdéseket. A 13. ábra az antarktiszi jégmagokból nyert CO_2-értékeket, valamint a grönlandi hőmérséklet-változásokat mutatja be erre az időszakra vonatkozóan.

A CO_2-szint jelentős változásai szemmel láthatóan a hőmérséklet emelkedésének kezdete után, mintegy 100 évvel később jelentkeznek. Ez az időbeli eltolódás azonban a modern mérési adatok értelmezése szempontjából önmagában is problematikus.



13. ábra. Rekonstruált hőmérséklet Grönlandon és CO_2-szint az Antarktiszon; a 0. év 2000-nek felel meg (i. sz.), így a 11 500. év i. e. 9500-at jelent. Grönlandi hőmérséklet: NGRIP (az adatok megegyeznek a 12. ábrán láthatókkal); a nagy felbontású adatok a [39] számú tanulmányhoz mellékelt kiegészítő fájlból (PDF) származnak, és a 11 511–11 850, 12 651–13 150, valamint 14 551–14 850 közötti évekre állnak rendelkezésre. A többi adat Badgeley és mtsai. [37] munkájából származik (megegyezik a 11. ábrán láthatókkal). A CO_2-adatkészlet megegyezik az 1–2. táblázatban és az 1–2. ábrán [19] szereplő adatokkal. Megjegyzendő, hogy az eredeti CO_2-adatoknál a 0. év 1950-nek (i. sz.) felel meg, ezért ezt az időskálát szinkronizáltuk (50 évet hozzáadva) a $\delta 18O_2$ adatokhoz. Bár a CO_2-adatoknál a hónapok is decimális formátumban szerepelnek, feltételezzük, hogy az adatok az adott évre vonatkoznak.

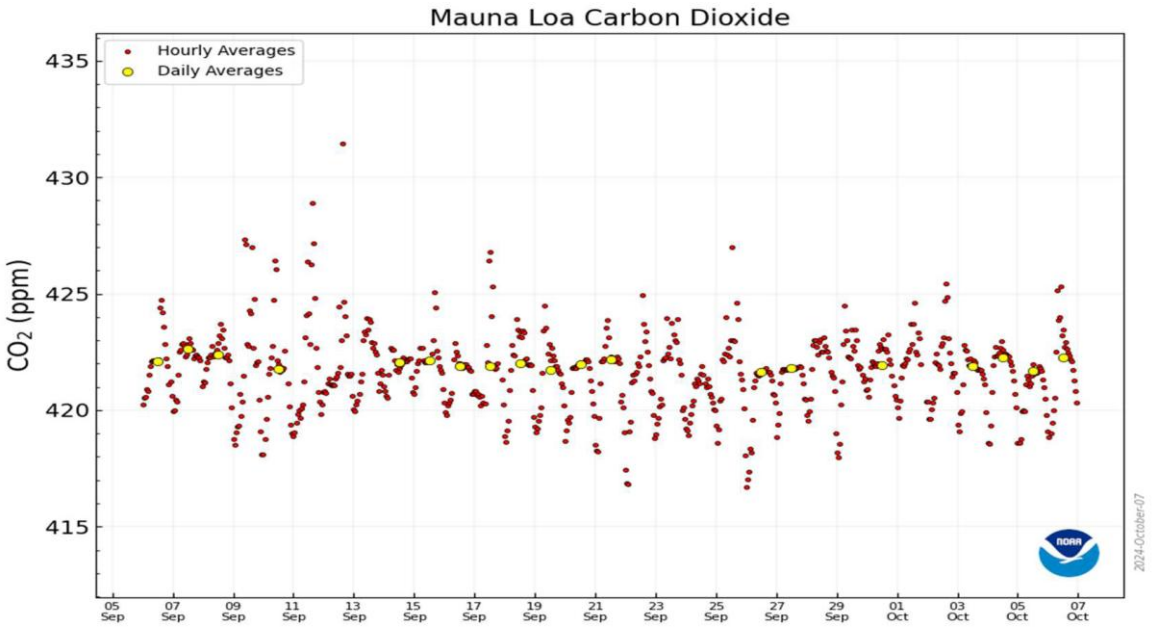
A 14. ábra a napi ingadozást mutatja a hawaii Mauna Loán, 2024 szeptemberétől 2024 októberéig (NOAA, [41]). E változékonyság nagy részét feltehetően a környező óceán felszíni hőmérsékletének (SST) ingadozása okozza. Ennek oka, hogy a Hawaii-szigetek térségében – a kontinensekhez képest – jóval kevesebb a fotoszintetizáló növényzet. Ebből adódóan a felszíni vízhőmérséklet változásaiból eredő légköri CO_2-ingadozások korlátozott területeken, gyakorlatilag azonnal (valós időben) jelentkeznek. Ahogy a 3(a) ábra is mutatja, a légköri CO_2-

koncentráció időbeli alakulása hasonló az északi és a déli féltekén, bár a szezonális változásokban ellentétes irányok is előfordulnak.

Következésképpen, ha globális szinten drasztikus felmelegedés következne be, az éves átlagokat tekintve hasonló jelenség játszódna le, időbeli késleltetés nélkül. Ennek az az oka, hogy az óceánokból származó CO_2-kibocsátásnak meg kellene jelennie (mivel az óceánok és a légkör relatív hőkapacitása miatt az óceánok felmelegedése megelőzi az ilyen eseményeket).

Humlum és munkatársai [14, 42] globális léptékben a közelmúltbeli adatokra kiterjedően alapján is kimutatták, hogy a változások sorrendje a következő: tengerfelszín-hőmérséklet (SST), globális felszínhőmérséklet, troposzferikus hőmérséklet, majd a légköri CO_2-szint. Az egyes tényezők közötti időbeli eltolódás a hőmérsékleti adatok esetében 1–3 hónap, míg a tengerfelszíni hőmérséklet és a CO_2-szint között körülbelül egy év. Emiatt a 13. ábrán látható, mintegy 100 éves időbeli eltérés természetellenesnek tekinthető.

További ellentmondások is felmerülnek. Egy olyan időszakban, amikor 3 vagy 50 év alatt hirtelen 10 fokos felmelegedés következik be (még ha globális átlagban csak 5 fokkal számolunk is), a CO_2-szint mindössze 10 ppm-mel emelkedik. Ráadásul az utolsó drasztikus időszakot követően a hőmérséklet évszázadokon át stabil maradt. Jaworowski rámutatott, hogy ezt a 10 ppm-es növekedést is alulbecslésnek kell tekinteni.



14. ábra. A légköri CO_2 napi ciklusa a hawaii Mauna Loa állomáson; forrás: NOAA [41]. A kép letöltésének dátuma: 2024. október 8.

Emellett a jégmagok elemzése révén körvonalazódott egy általános elmélet is, miszerint a CO_2-szint – több száz vagy akár 1000 éves késéssel – követi a hőmérséklet-ingadozásokat. Érdemes lenne újragondolni magának ennek a „hatalmas időbeli szakadéknak” az

értelmezését. Továbbá, a jégmagokból rekonstruált gázkoncentrációk jelentős eltérést mutatnak a két pólus között (15. ábra, Anklin és mtsai [43]).

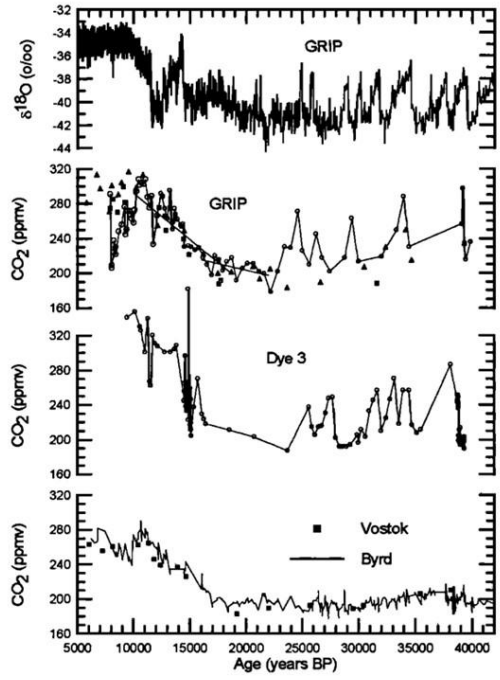


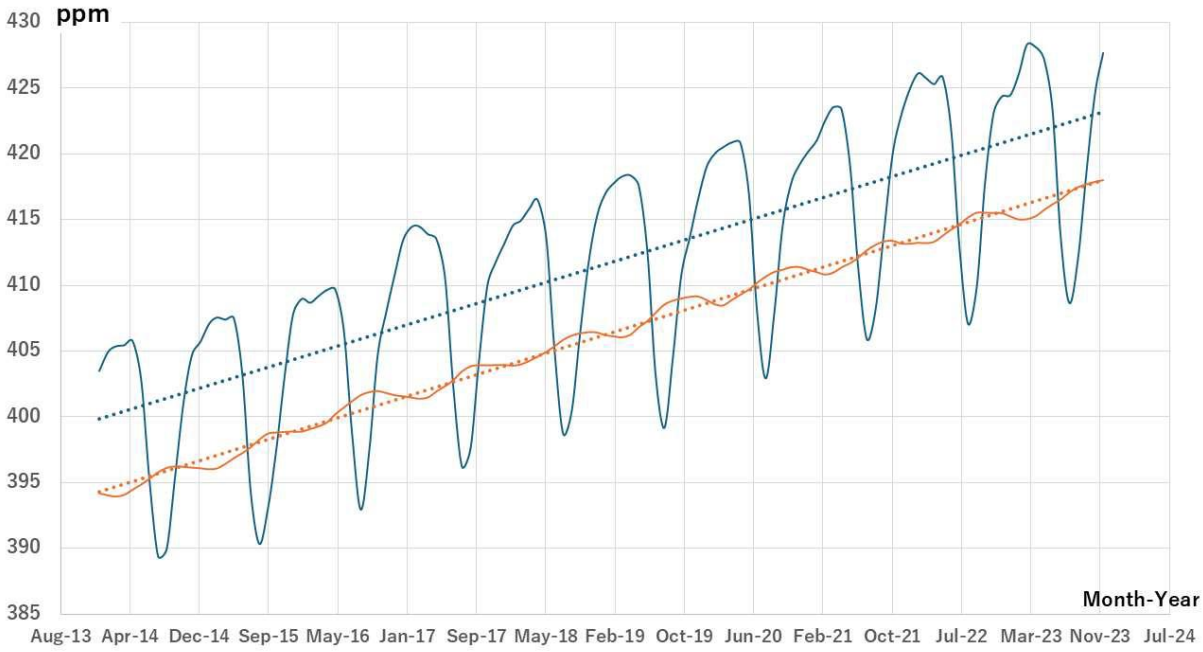
Figure 2. The $\delta^{18}O$ profile from the GRIP ice core versus ice age [*Johnsen et al.*, 1992], and CO_2 profiles from Greenland (GRIP, Dye 3) and Antarctica (Byrd, Vostok) versus gas age. Open circles (IRLS) and solid triangles (volumetric method) are mean CO_2 values obtained in Bern, and solid squares are mean values from Grenoble for both the GRIP and the Vostok ice core. All CO_2 profiles show increasing CO_2 values from the LGM at about 20 kyr B.P. to the Holocene. Elevated CO_2 concentrations are measured in the GRIP ice core during mild periods of the last glaciation as indicated by the isotopic temperature. Two linear regression lines are calculated from the CO_2 concentrations (IRLS measurements) between 16 and 10 kyr B.P. and 22 and 17 kyr B.P., respectively.

15. ábra. CO_2-rekonstrukció mindkét sarkvidéken; a kép Anklin és mtsai [43] munkáján alapul.

Az antarktiszi adatokat tekintették etalonnak, mivel azok abszolút értéke valamivel kisebb, ingadozásuk pedig csekélyebb. A numerikus stabilitás azonban önmagában nem feltétlenül garantál pontosságot.

Az antarktiszi adatokkal kapcsolatban nem csupán a 2. és 3. szakaszban ismertetett eltérések jelentenek problémát – amint arra az 1850 utáni (tehát a jelenkorhoz közeli) időszakra vonatkozó rekonstrukciók vizsgálatakor fény derült: ezek az adatok ugyanis meglehetősen, sőt természetellenes módon instabilak. A paleoklimatológiai adatok esetében emellett figyelembe kell venni az időbeli felbontás korlátait és az alacsony érzékenységet is.

Amint a 3. ábra mutatja, a légköri CO_2 éves átlagos értéke napjainkban sem mutat jelentős különbséget a két sarkvidék között – még akkor sem, ha feltételezzük, hogy az emberi tevékenység révén a légkörbe kerülő CO_2 mennyisége ma nagyobb, mint a múltban volt. Barrow (kék pont a 3a ábrán) Alaszka Jeges-tenger felőli partvidékén található; az itteni, éven belüli ingadozás jóval nagyobb, mint az Antarktiszon, ám az éves átlagértékek tekintetében nincs számottevő különbség a két régió között. A regressziós egyenesek összehasonlítása alapján ez az eltérés körülbelül 5 ppm-et tesz ki (16. ábra; NOAA [22, 44]).



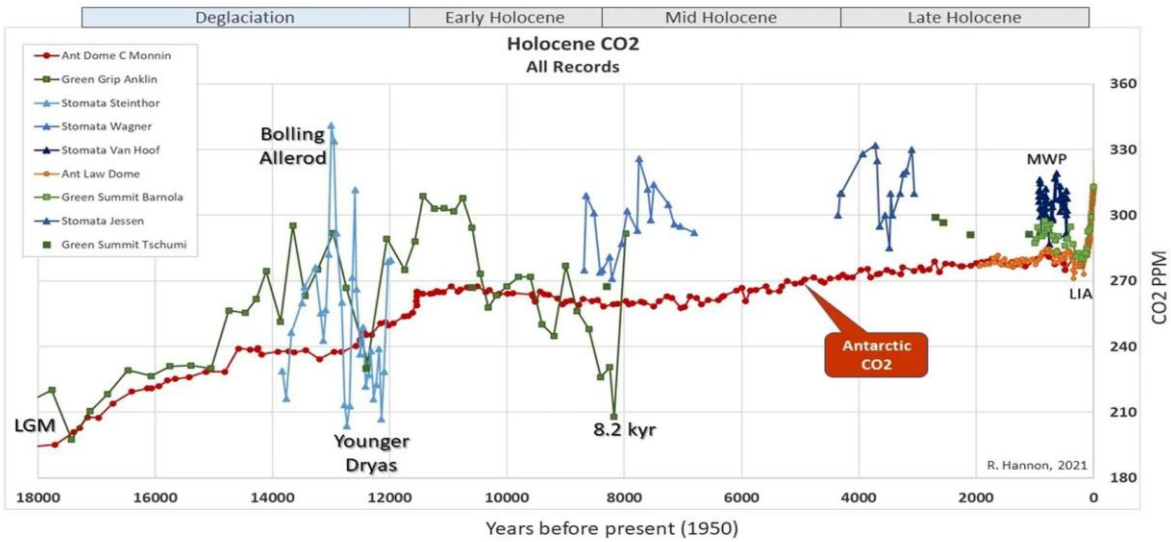
16. ábra. A légköri CO_2-koncentráció alakulása napjainkban Barrow-ban (sarkvidéki régió, kék) és az Antarktiszon (narancssárga); függőleges tengely: CO_2 (ppm), vízszintes tengely: év és hónap (2014 januárjától 2023 decemberéig); szaggatott vonal: regressziós egyenes (legkisebb négyzetek módszere).

Következésképpen – még az ősklíma-vizsgálatok körében is – nem várható jelentős eltérés a két pólus között, legalábbis ami az éves átlagokat illeti. Ráadásul a jégmagok esetében a rekonstrukciós elmélet szerint több évre vonatkozó átlagértékeket kapunk. Ennek ellenére a grönlandi és az antarktiszi CO_2-rekonstrukciók között egyértelmű különbség mutatkozik (15. ábra).

Az antarktiszi CO_2-szint határozottan alacsonyabb, mint a grönlandi. Ez az eltérés egyértelműen meghaladja a fentebb említett 5 ppm-es értéket. Továbbá a grönlandi adatok jelentős ingadozást mutatnak. Emiatt a grönlandi adatokat – a pontosság kérdését is figyelembe véve – inkább tekinthetjük az akkori drasztikus klímaváltozások reprezentatívabb mutatójának. Bár messze nem ideálisak, mégis jobbak, mint az antarktiszi adatok. Mindazonáltal a grönlandi adatokat is alulbecslésnek kell tekintenünk. Emellett a Clintel közzétett egy tanulmányt, ami a légköri CO_2-koncentrációra vonatkozó korábbi kutatásokat összegzi (Hannon [45]). A 17. ábra a tanulmány tartalmát és záró szakaszát szemlélteti. Az utolsó bekezdés így szól:

„A jégmagokból és a növényi sztómákból származó CO_2-adatok nem tökéletesek; ezért a globális CO_2-összesítésnek mind az évszázados, mind az évezredes léptékű, determinisztikus méréseket magában kell foglalnia. Lehet, hogy éppen az antarktiszi globális CO_2-összesítés tekinthető kiugró értéknek, amelyet az extrém antarktiszi hőmérséklet és a betemetődési körülmények elnyomtak, elsimítottak és tompítottak. Ráadásul az elmúlt évszázadokban tapasztalt CO_2-növekedés sem tekinthető annyira egyedülállónak.”

Jaworowski fő érve alapján pedig számolni kell azzal a lehetőséggel is, hogy más értékelési módszerek szintén alulbecslést eredményeznek. Ide tartoznak a növényi sztómákon alapuló, valamint a kémiai módszerekkel végzett becslések, különösen a modern kor előtti időszakokra vonatkozóan (beleértve a középkori meleg periódust és az azt megelőző időket is).



17. ábra. Különféle módszerekkel meghatározott CO_2-rekonstrukciós adatok (összeállította: Hannon, Clintel [45]).

8. A szerző korábbi tanulmányának frissítése

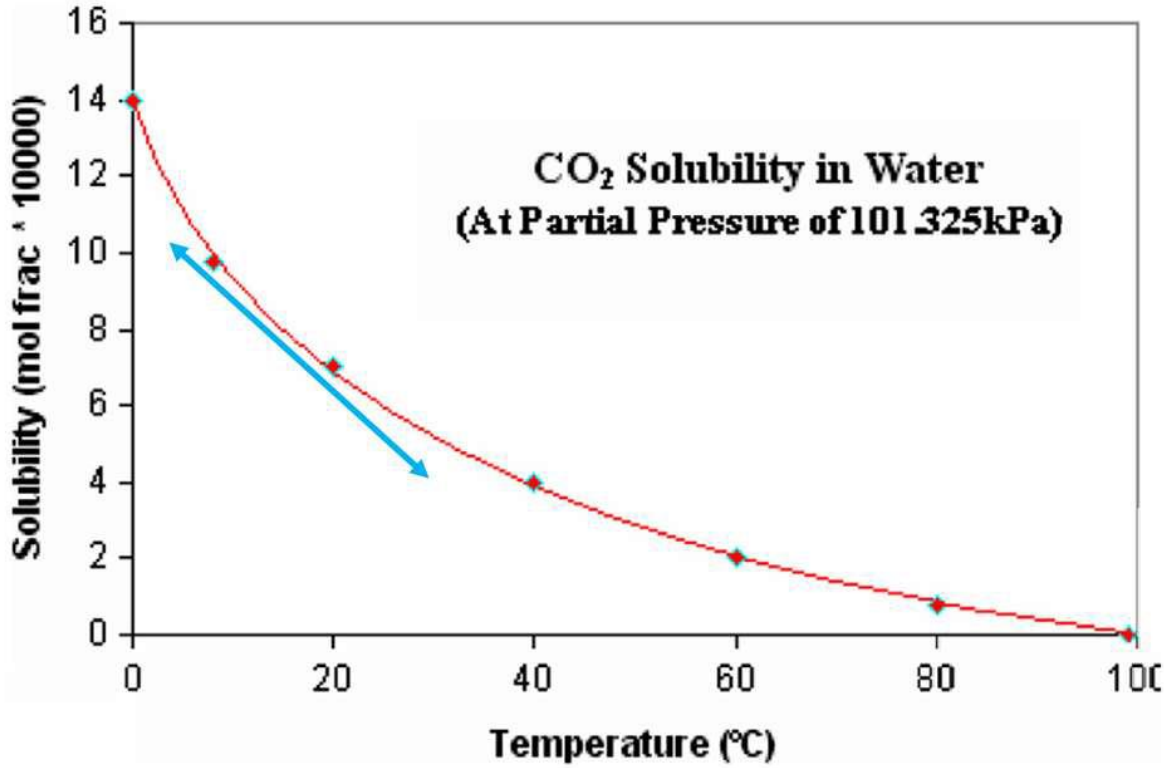
Ato [12] a jelen folyóiratban megjelent korábbi tanulmányában a következőket közölte:

„A többváltozós elemzés kimutatta, hogy a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) volt az egyetlen olyan tényező, amely független módon meghatározta a légköri CO_2 éves változását; az antropogén fosszilis tüzelőanyag-felhasználás ezzel szemben nem bizonyult ilyen tényezőnek.”

Ez az eredmény logikus, mivel a CO_2 vízben való oldhatósága – a napjainkban jellemző globális tengerfelszíni hőmérsékleti tartományon belül – szinte lineárisan változik (18. ábra; Carroll és mtsai [46], Abas és mtsai [47]).

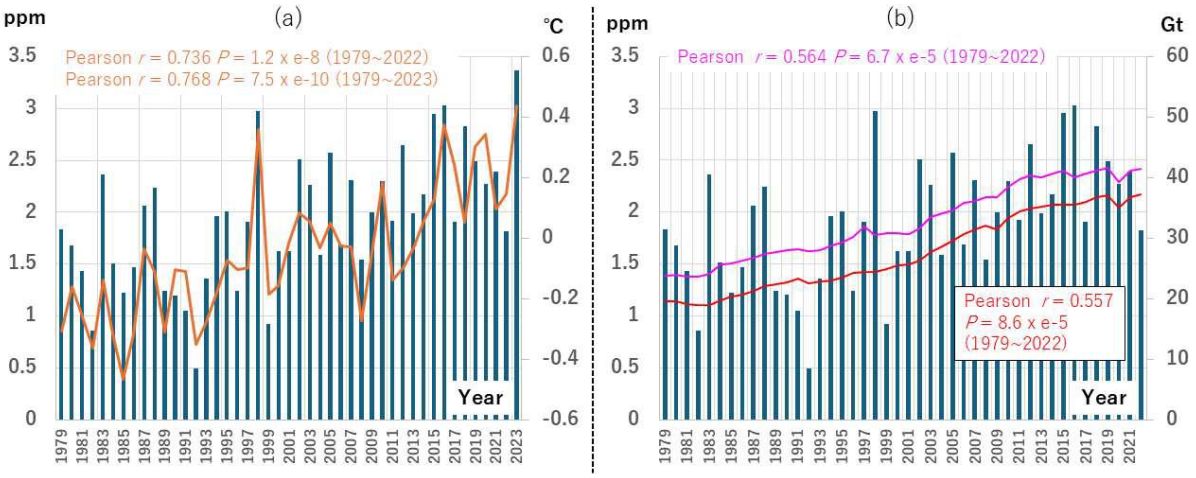
A korábbi jelentésben az OWID adatai 2021-ig voltak elérhetők, így a többváltozós elemzés is az addig terjedő adatsorok alapján készült. Jelen tanulmány írásakor az OWID adatai már 2022-ig álltak rendelkezésre, ezért a többváltozós elemzést az addig terjedő adatok felhasználásával végeztük el.

A légköri CO_2-szintre és a tengerfelszíni hőmérsékletre (SST) vonatkozó adatok 2023-ig ismertek; a többváltozós elemzés eredményei alapján pedig az SST segítségével a ΔCO_2 (a CO_2-szint változása) értéke is megbecsülhető 2023-ig. Ennek megfelelően összehasonlítjuk a ténylegesen közzétett adatokat és az SST-alapú becsléseket a teljes ΔCO_2-re vonatkozóan, 2023-ig bezárólag.



18. ábra: A CO_2 oldhatósága vízben (1 atm). A kép Abas et al. [47] 12. ábrájából származik. A kék nyilat a szerző (Ato). tette hozzá.

Az elemzési eljárás megegyezett az előző jelentésben (Ato [12]) alkalmazottal. Emellett háromféle tengerfelszíni hőmérséklet-adatkészletet (SST) is felhasználtunk. Ebben a frissített elemzésben a ΔCO_2-re vonatkozó számításokat új adatok (NOAA, [20]; letöltve: 2024. június 2., JST) alapján végeztük el. A 2017 utáni adatokban egy csekély mértékű (0,01–0,02 ppm-es) korrekció történt. Továbbá a következő szakaszban bemutatott, ΔCO_2-szimulációval kapcsolatos vizsgálat szintén ezekkel az új ΔCO_2-adatokkal készült. A 19. ábra az UAH-SST-adatokat és az emberi eredetű CO_2-kibocsátást mutatja be a ΔCO_2 vonatkozásában. Összességében az ábra ugyanazt a tendenciát tükrözi, mint az előző jelentés: a ΔCO_2-re és az UAH-SST-re vonatkozó adatok 2023-ig láthatók rajta.



19. ábra. ΔCO_2, UAH-SST és emberi eredetű kibocsátás. (a) ΔCO_2 és UAH-SST, (b) ΔCO_2 és emberi eredetű kibocsátás. ΔCO_2 (kék oszlopdiagram), UAH-SST (narancssárga vonal; anomália, azaz az 1991–2020-as átlagtól való eltérés), emberi eredetű kibocsátás (piros: fosszilis tüzelőanyagok és ipari folyamatok [FFO]; rózsaszín: földhasználat-változással [LUC] együtt, CO_2-egyenértékben).

Mivel 2023 globálisan melegebb évnek bizonyult, és a ΔCO_2 értéke körülbelül kétszerese volt a 2022-esnek, ez figyelemre méltó eredmény. Ez a jelenség szimbolikus jelentőségű is, hiszen várható volt, hogy az emberi eredetű kibocsátás nem tér majd el jelentősen a korábbi trendektől (2011 és 2022 között az FFO esetében +0,201 Gt/év, a földhasználat-változással [LUC] együtt pedig +0,095 Gt/év volt a növekedés).

Az 5. táblázat a lineáris többszörös regressziós elemzés eredményeit mutatja be. Ismét kiderült, hogy a ΔCO_2 értékét statisztikailag szignifikáns módon kizárólag az SST (tengerfelszín-hőmérséklet) határozta meg. Az emberi eredetű kibocsátás nem bizonyult magyarázó tényezőnek.

5. táblázat. A lineáris többszörös regressziós elemzés eredményei. B: regressziós együttható; Konstans: a regressziós egyenlet állandó tagja. Például az UAH-SST és az FFO (fosszilis tüzelőanyagok és ipari folyamatok) szerinti emberi kibocsátás kombinációja esetén: ΔCO_2 = 1,968 × UAH-SST + 1,780.

		Human emissions Fossil Fuel Only			Human emissions Including Land Use Change		
Year	Explanatory Factors	*B*	*P*	*Model R²*	*B*	*P*	*Model R²*
1979 ~2022	Constant (ppm)	1.780	7.1 x e-05	$R^2 = 0.546$ $P = 9.2 \times e\text{-}8$	1.695	0.0012	$R^2 = 0.547$ $P = 8.8 \times e\text{-}8$
	UAH-SST (ppm/°C)	1.968	3.8 x e-05		1.947	4.6 x e-05	
	OWID Emission (ppm/Gt)	0.009	0.54		0.010	0.50	
1959 ~2022	Constant (ppm)	1.165	1.3 x e-04	$R^2 = 0.639$ $P = 3.2 \times e\text{-}14$	1.264	0.0033	$R^2 = 0.639$ $P = 3.1 \times e\text{-}14$
	HAD-SST (ppm/°C)	1.964	3.4 x e-04		2.096	4.0 x e-04	
	OWID Emission (ppm/Gt)	0.007	0.97		-0.004	0.83	
	Constant (ppm)	0.983	1.0 x e-04	$R^2 = 0.647$ $P = 1.6 \times e\text{-}14$	1.020	0.0039	$R^2 = 0.647$ $P = 1.6 \times e\text{-}14$
	GISS-SST (ppm/°C)	2.376	1.6 x e-04		2.452	1.9 x e-04	
	OWID Emission (ppm/Gt)	0.001	0.94		-0.001	0.95	

A 6. táblázat a 2023-ig terjedő teljes ΔCO_2-értéket, valamint az egyes SST-adatkészletek alapján kapott előrejelzések összegét mutatja. Jelen tanulmányban a HAD-SST és az FFO-kibocsátások kombinációja (1,40 ppm-es alulbecslés), illetve a GISS-SST és a LUC-ot is magában foglaló kibocsátások kombinációja (1,49 ppm-es túlbecslés) eredményezte a legkisebb hibát; ezzel szemben az UAH-SST – a korábbi tanulmányhoz hasonlóan – mintegy 10 ppm-es hibát mutatott.

6. táblázat. A közzétett ΔCO_2-értékek és az SST-alapú ΔCO_2-előrejelzések összege. Mértékegység: ppm. Az FFO jelölés az emberi eredetű fosszilis tüzelőanyag-kibocsátást (FFO) figyelembe vevő modellt, a LUC pedig a földhasználat-változást (LUC) is magában foglaló modellt jelöli.

Year	Published ΔCO_2	SST	FFO	LUC
1979~2023	86.81	UAH	75.76	71.97
1959~2023	107.34	HAD	105.94	114.39
		GISS	105.10	108.83

Mindenesetre a korábbi (Ato, [12]) és a jelenlegi elemzések lényege ugyanaz.

Az emberi eredetű kibocsátások és azok éves ingadozása statisztikailag nem ad magyarázatot a légköri CO_2-szintre. Mivel pedig ez az eredmény a 20. század második felét követő időszakra igazolódott be, ugyanez feltételezendő a korábbi időszakra is, amikor az emberi kibocsátás még jóval alacsonyabbak volt. Így – a fenti magyarázatokkal együtt – ez ismét rámutat arra, hogy hibás az az előfeltevés, miszerint az ipari forradalom kezdetekor a légköri CO_2-koncentráció 280 ppm lett volna.

9. Adatszimuláció a korábbi tanulmány adatai alapján, valamint az eredmények jelentősége az emberi kibocsátások magyarázó tényezőként való szerepét illetően

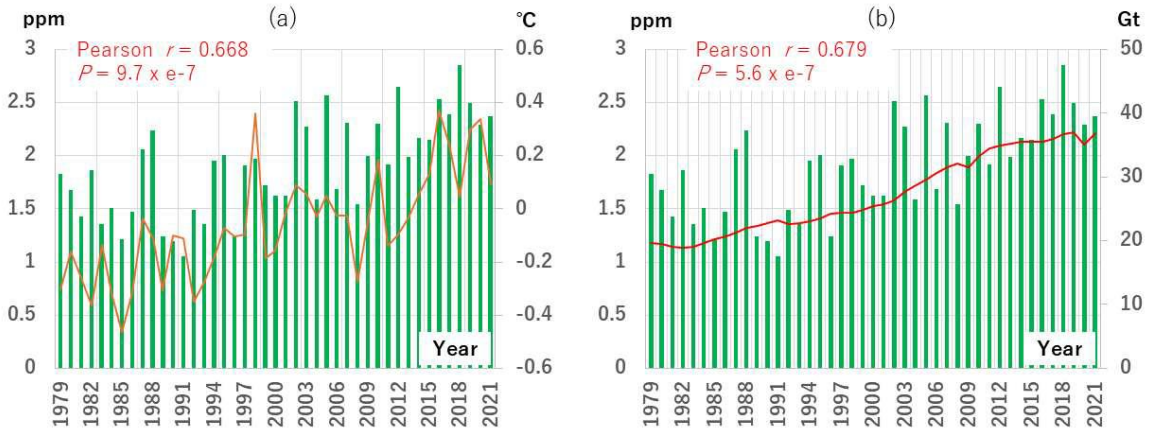
Ez az elemzés a lineáris többszörös regresszió hatékonyságát hivatott szemléltetni egy eltérő megközelítésből; mondhatni, egyfajta szimulációról van szó. Az egyszerűség kedvéért az elemzés kizárólag az 1979 és 2021 közötti időszakra vonatkozik – arra az időszakra, amelyre a korábbi tanulmányban a többváltozós elemzést végeztük. A tengerfelszíni hőmérséklet (SST) esetében kizárólag az UAH adatait használjuk, a kibocsátásoknál pedig – a korábbiakhoz hasonlóan – az FFO-adatokat vesszük alapul.

A ΔCO_2 értékeknél azonban a fentebb ismertetett frissített adatokat alkalmazzuk. A teljes ΔCO_2-érték nem változott, de az egyes évekre vonatkozó adatok eloszlása némileg kiegyenlítettebbé vált.

A 7. táblázat a módosítás előtti és utáni ΔCO_2-értékeket mutatja. A 20. ábrán az UAH-SST, az antropogén kibocsátások és a szimulált ΔCO_2 látható. A ΔCO_2 és az UAH-SST közötti korreláció gyengült, míg az emberi kibocsátásokkal való összefüggés erősödött.

7. táblázat. Tényleges és szimulált ΔCO_2-adatok az elemzésben (1979–2021)

year	Actual ΔCO_2	Simulated ΔCO_2	year	Actual ΔCO_2	Simulated ΔCO_2	year	Actual ΔCO_2	Simulated ΔCO_2
1979	1.83	1.83	1994	1.96	1.95	2009	2	2
1980	1.68	1.68	1995	2.01	2.01	2010	2.3	2.3
1981	1.43	1.43	1996	1.24	1.24	2011	1.92	1.92
1982	0.86	1.86	1997	1.91	1.91	2012	2.65	2.65
1983	2.36	1.36	1998	2.97	1.97	2013	1.99	1.99
1984	1.51	1.51	1999	0.92	1.72	2014	2.17	2.17
1985	1.22	1.21	2000	1.62	1.62	2015	2.95	2.15
1986	1.47	1.47	2001	1.62	1.62	2016	3.03	2.53
1987	2.06	2.06	2002	2.51	2.51	2017	1.91	2.39
1988	2.24	2.24	2003	2.26	2.27	2018	2.83	2.85
1989	1.24	1.24	2004	1.59	1.59	2019	2.49	2.5
1990	1.2	1.2	2005	2.57	2.57	2020	2.27	2.29
1991	1.05	1.05	2006	1.69	1.69	2021	2.39	2.37
1992	0.49	1.49	2007	2.31	2.31	Total	81.62	81.62
1993	1.36	1.36	2008	1.54	1.54			



20. ábra: ΔCO_2, UAH-SST és emberi eredetű kibocsátás (szimuláció); a zöld oszlopok a szimulált ΔCO_2-t jelölik, a többi elem megegyezik a 19. ábráéval.

A 8. táblázat a ΔCO_2-t célváltozóként kezelő lineáris többszörös regressziós elemzés eredményeit mutatja be.

Mind az UAH-SST, mind az emberi eredetű kibocsátás szignifikáns előrejelzője volt a ΔCO_2-nek, de az emberi kibocsátás prediktív ereje valamivel magasabbnak bizonyult. A szimulációs eredmény arra utal, hogy az antropogén elmélet helytállónak bizonyulhat (legalábbis részben), mivel a ΔCO_2 ingadozása közelebb állt az emberi eredetű kibocsátás ingadozásához.

Más szóval, a hipotézis szerint az ember okozta a légköri CO_2-szint növekedését. Az eredmények azt is mutatják, hogy a többváltozós elemzés hatékony módszer. A valóságban azonban el kell ismernünk, hogy a tényleges adatok alapján az antropogén elmélet statisztikailag határozottan cáfolható.

8. táblázat: Lineáris többszörös regressziós elemzés eredményei (szimulált ΔCO_2; B: regressziós együttható)

Year	Explanatory Factors	*B*	*P*	*Model R^2*
1979 ~2021	Constant (ppm)	1.113	0.0010	$R^2 = 0.540$
	UAH-SST (ppm/°C)	0.869	0.012	$P = 1.8 \times e\text{-}7$
	OWID Emission (ppm/Gt)	0.0308	0.0068	

10. Diszkusszió

A 2. és 3. fejezetben az antarktiszi jégmagok alapján végzett, a múltbeli légköri CO_2-szintekre vonatkozó rekonstrukciókkal kapcsolatos problémákat ismertetjük. Még a viszonylag fiatal – a 19. század közepétől származó – légbuborékokat tartalmazó minták is számos megmagyarázhatatlan adatértéket mutatnak (2. ábra). Az adatok emellett rávilágítanak egy ellentmondásra: egyfelől ott van a természet – az emberi kibocsátáshoz viszonyított – mintegy 60 éven át feltételezett, közel állandó abszorpciós (elnyelési) aránya, másfelől pedig az ezt megelőző időszakban bekövetkezett változások. Ez az összefüggés már pusztán elemi numerikus elemzéssel is feltárható.

Továbbá, a metánszint 21. század elején tapasztalt csökkenése cáfolja azt az elméletet, miszerint az ipari forradalom óta bekövetkezett metánnövekedés kizárólag emberi tevékenységre vezethető vissza. Ez a jelenség egyúttal rávilágít a jégmagok alapján történő gázkoncentráció-rekonstrukciók problémakörére is. Hasonló a helyzet a CO_2 esetében is, ahol az adatok drámai növekedést mutatnak az ipari forradalom óta (7. ábra).

Emiatt a következő fejezetben rámutatunk az e kutatási területen született eredeti jégmag-vizsgálati jelentések közötti ellentmondásokra (3. táblázat). A CO_2-szinteket rekonstruáló

kutatócsoport azt állította, hogy a gázok „koreltolása” (age shift) a szénizotópok szempontjából megfelelő volt. Ezzel szemben a metánszinteket rekonstruáló csoport szerint ez – legalábbis az ő adataik alapján – gyakorlatilag lehetetlen.

Jaworowski alapos és átfogó választ adott a kutatási folyamatra (4. táblázat). Különösen élesen bírálta a gázok koreltolásával kapcsolatos eljárásokat. Jaworowski emellett összefoglalta a jégmagokból történő gázkoncentráció-rekonstrukciókkal járó különféle nehézségeket.

A hóeséstől a hó felhalmozódásáig tartó folyamat során – különösen hosszú időtávlatban – számos fizikai és kémiai hatás érvényesül, amelyek elkerülhetetlenek. Emiatt nem tartható az a feltételezés, hogy a múltbeli állapot minden változás nélkül megőrződött volna. Különösen szemléletes példája ennek a problémának a 19. század közepéről származó jégmagadatokban megjelenő ΔCO_2-értékek esete, amelyek a 20. század vége óta már nem figyelhetők meg (2. ábra). Ennélfogva az az előfeltevés, miszerint az ipari forradalom idején a légköri CO_2-koncentráció 280 ppm volt, immár nem tartható. Azok a kapcsolódó tanulmányok, amelyek erre a hipotézisre épülnek, szintén nem tekinthetők helytállónak. A szerző (Ato) korábbi jelentésének frissítése rámutatott, hogy az éves ΔCO_2-értéket kizárólag a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) határozza meg, és az emberi eredetű kibocsátásnak nincs előrejelző ereje a légköri CO_2-tartalomra nézve (5. táblázat).

A legfontosabb megállapítás az, hogy a tengerfelszín-hőmérséklete(SST) következetesen alkalmas a CO_2-szint előrejelzésére, csekély végső hibával. Ezért a légköri CO_2-szint elsődleges meghatározó tényezője nagy valószínűséggel nem az emberi kibocsátás, hanem a tengerfelszín-hőmérséklet. Következésképpen természetes jelenségről van szó – még napjainkban is, a fosszilis tüzelőanyagok tömeges felhasználása mellett. Ez az elemzés alátámasztja a meglévő jelentések [13–16, 23, 24, 31, 32, 34–36, 45] érvényességét.

Az IPCC álláspontja szerint az emberi tevékenységből származó CO_2 hosszú ideig a légkörben marad, elkülönülve a természetes forrásokból származó CO_2-tól. A valóságban azonban a CO_2 molekulák azonosak, függetlenül attól, hogy természetes forrásból vagy fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származnak-e.

Berry [48] a $\Delta^{14}C$ adatok alapján kimutatta, hogy a $^{14}CO_2$ tartózkodási ideje (az IPCC definíciója szerinti átfutási idő) 10,0 év; ebből következően a $^{12}CO_2$ tartózkodási ideje ennél rövidebb, kevesebb mint 10 év.

Salby és Harde kimutatták, hogy a légköri CO_2 tartózkodási ideje – eredetétől függetlenül – mindössze néhány év [49–52]. Továbbá Koutsoyiannis [53] nemrégiben rámutatott, hogy a légköri CO_2 – beleértve az emberi kibocsátást is – tartózkodási ideje körülbelül 4 év.

Ez azt jelenti, hogy a tartózkodási idő még az emberi eredetű kibocsátás esetében sem hosszú távú, és nem is „félig állandó” jellegű, ahogyan azt az IPCC állítja. Ezek a jelentések [48, 49] szintén összhangban állnak az elemzések ezen sorozatával [12–16, 23, 24, 31, 32, 34–36, 45].

A tengerfelszín-hőmérséklet (SST) meghatározó ingadozásai pedig elsősorban a Napnak tulajdoníthatók. Az is biztos, hogy bizonyos mértékig a Föld belső tényezői is szerepet játszanak. Ilyen tényező például az El Niño, a La Niña és a vulkáni tevékenység. E földi jelenségek rövid távon minden bizonnyal hatást gyakorolnak. Hatásuk és kölcsönhatásuk pontos elemzése a jövő kutatásainak feladata.

Végezetül néhány szó a jövőbeli kilátásokról. A korábbi és a jelenlegi többváltozós elemzések kizárólag a 21. század elejéig terjedő adatokon alapultak. Jelenleg az emberi eredetű kibocsátás a teljes globális CO_2-körforgás kevesebb mint egyhuszad részét teszi ki (NASA, [54]).

Ha az emberi eredetű CO_2-kibocsátás a jövőben drasztikusan – kétszeresére, háromszorosára vagy még nagyobb mértékben – megnövekedne, annak észrevehető hatása lehetne a légköri CO_2-koncentrációra, ám ez aligha valószínű.

Egy ilyen helyzetre példa lehet, amikor megnő a különbség a tengerfelszín-hőmérsékletből (SST) becsült értékek és a ténylegesen mért értékek között – amint arra korábban [12], valamint a jelen tanulmányban a szerző is rámutatott. Egy másik lehetőség, amikor a többváltozós elemzés prediktív ereje gyengül. Ez azt jelenti, hogy a többszörös regressziós modell pontossága csökken, és a szignifikancia valószínűsége is romlik (nagyobb P-érték). Előfordulhat az is, hogy az SST-hez, illetve a többváltozós modell konstans tagjához tartozó P-értékek nőnek, míg az emberi kibocsátáshoz tartozó P-érték csökken. Az efféle változások az emberi kibocsátás hatásaira utalhatnak.

Az emberiségnek azonban emiatt egyáltalán nem kell aggódnia; sőt, ez inkább örvendetes fejlemény.

Mindennek pedig az az oka, hogy az emberiség hozzájárul a fotoszintézis és az élő szervezetek mennyiségének növekedéséhez [2–6].

11. Következtetések

Jelen tanulmány rámutat, hogy az ipari forradalom kezdetén fennálló 280 ppm-es légköri CO_2-koncentráció feltételezése – ami a modern klímakutatás alapját képezi – téves.

Kétségtelen, hogy a 280 ppm-es érték jelentős alulbecslés. Az antarktiszi jégmagokból rekonstruált CO_2-adatokban megfigyelhető különféle megmagyarázhatatlan jelenségek és ellentmondások az adatok hibáira utalnak. Ez magából a jégmagokon alapuló rekonstrukciós módszer természetéből fakadó korlátokból ered.

A légköri CO_2-szint emelkedésének fő oka a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) növekedése, amely némiképp az egyetemes tömegvonzáshoz hasonlóan hat. Emellett természetesen szerepet játszanak a szénkörforgásra ható egyéb földi tényezők is – például a fotoszintézis és a légzés, valamint az ezeket befolyásoló légköri hőmérséklet. Továbbá, statisztikai szempontból az antropogén (emberi eredetű) kibocsátásnak nincs jelentős hatása a légköri CO_2-szintre.

Következésképpen a CO_2-szint növekedése nagyrészt természetes folyamatoknak tulajdonítható. Az SST ingadozását kiváltó külső és belső tényezők, valamint ezek hatásmértékének pontosabb feltárása további kutatásokat igényel.

Finanszírozás

A szerző a munkához semmilyen támogatásban nem részesült.

Érdekeltségi nyilatkozat

A szerző kijelenti, hogy nem áll fenn összeférhetetlenség. Dai Ato, független kutató, ezt a cikket tudományos tevékenység keretében írta, a japán alkotmány 23. cikkében biztosított akadémiai szabadságjog, valamint az alkotmány 98. cikkében rögzített legfelsőbb jogszabályi rendelkezés alapján.

Vendégszerkesztő: Stein Storlie Bergsmark; **Lektorok:** névtelenek.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki minden intézetnek és kutatónak, akik az e tanulmányhoz szükséges adatokat és ismereteket rendelkezésre bocsátották.

Függelék

Az előző tanulmánnyal (Ato, [12]) kapcsolatban az interneten megjelenő tipikus téves információk cáfolata

1. Megjegyzések, amelyek szerint a korreláció nem bizonyít ok-okozati összefüggést (ebből következően azt sugallva, hogy a tanulmány téves)

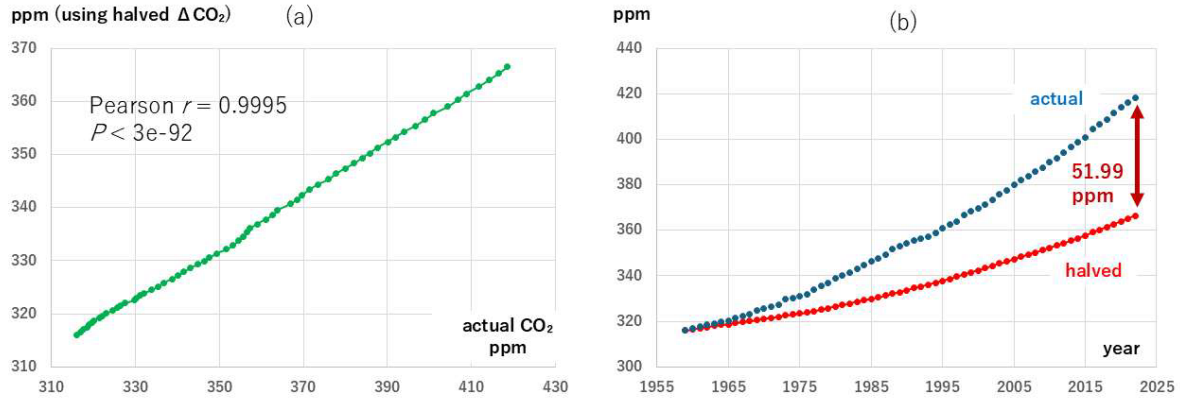
Tudományos körökben közismert tény, hogy önmagában a korreláció nem bizonyít ok-okozati összefüggést. Ha azonban a korreláció hátterében egyértelmű mechanizmus áll, akkor ok-okozati kapcsolat is feltételezhető. Ahogy fentebb említettük, a vízhőmérséklet és a CO_2-oldhatóság között ok-okozati összefüggés áll fenn; a Föld óceánjainak hőmérséklettartományán belül ez az összefüggés közel lineáris (18. ábra).

Valójában erős lineáris korreláció mutatkozott a ΔCO_2 és a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) között. Ami pedig a legfontosabb: bár az emberi eredetű kibocsátást is bevontuk a többváltozós modellbe, az nem bizonyult a ΔCO_2 meghatározó tényezőjének. Ha az emberi tevékenységből származó CO_2-kibocsátás valóban befolyásolná az éves ΔCO_2-értéket, akkor ezt statisztikailag is ki lehetne mutatni. A 9. szakaszban ismertetett eredmények azt mutatják, hogy a valóságban nem ez a helyzet. Ezért az elemzett adatok alapján megalapozottan vonható le az a következtetés, hogy a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) és a ΔCO_2 között ok-okozati összefüggés áll fenn.

Továbbá, azok, akik hangsúlyozzák, hogy „a korreláció nem bizonyít ok-okozati összefüggést”, gyakran figyelmen kívül hagynak bizonyos szempontokat. Egyrészt nem említik, hogy az emberi kibocsátás mennyisége semmilyen előrejelző erővel nem bírt. Másrészt tudományos körökben az is közismert, hogy „ha – a releváns, illetve zavaró tényezők figyelembevétele után – nem mutatható ki korreláció, akkor ok-okozati kapcsolat sem áll fenn”. Ez az emberi kibocsátásokra vonatkozik, amelyek a többváltozós modellben alulmaradtak a tengerfelszíni hőmérséklettel (SST) szemben.

2. Megjegyzések, amelyek azt a látszatot keltik, mintha Ato [12] kizárólag az erős korrelációkra alapozna

Ahogy fentebb már említettük, önmagában a korreláció nem bizonyít ok-okozati összefüggést. Ugyanakkor a korrelációs együtthatót a becslési pontosság objektív mutatójaként kell kezelni. Továbbá – mind a korábbi, mind a jelenlegi cikkben – bemutatásra kerülnek a becslési képlet végső eltérései. Ha a végső becsült érték jelentősen eltér a valóságostól, akkor a becslési képlet nem megfelelő. Az A1. ábra egy olyan példát mutat, amelyben nagy végső hiba mellett is erős korreláció figyelhető meg. Ez esetben egyszerűen a HAD-SST adatok alapján becsült ΔCO_2-értéket felezték meg; a Pearson-féle korrelációs együttható azonban változatlan maradt. Ebből következik, hogy az erős korreláció önmagában nem garantálja a becslési képlet helyességét; a végső eltérés vizsgálata szintén elengedhetetlen.



A1. ábra. A tényleges CO_2-szint összehasonlítása a HAD-SST adatok alapján becsült, felezett ΔCO_2-értékkel számított előrejelzett CO_2-szinttel (1959–2022). (a) Tényleges légköri CO2-szint és a szimulált (felezett ΔCO_2-értékkel számított) légköri CO_2-szint; a ΔCO_2 kiszámítása: (2,006 × HAD-SST + 1,143) / 2. (b) A tényleges és a szimulált légköri CO_2-szint éves változása; a különbség 2022-ben 51,99 ppm. A tényleges CO_2-adatok megegyeznek az előző cikkben szereplőkkel (letöltve a NOAA-tól 2023. augusztus 27-én). Megjegyzendő, hogy a korrelációs együttható az 1960 és 2022 közötti adatokon alapul (1959-et nem számítva). Az 1959-es év kihagyásának oka a korrelációs elemzésből az, hogy az 1959-es ΔCO_2-érték nem tekinthető teljes mértékben megbízhatónak, mivel a hawaii mérések 1958-ban nem fedték le a teljes évet.

Az előző tanulmányban – kizárólag az adatok pontossága miatt – az 1979-től kezdődő UAH-SST adatokat használtuk fel. 1978 előtt nem álltak rendelkezésre UAH-SST adatok. A többszörös regressziós elemzés eredményei figyelemre méltóak voltak, ugyanakkor 2022-ben felmerült egy hiba, amelyet figyelembe kellett volna venni (14,5 ppm-es alulbecslés). Még jelentősebb azonban az a tény, hogy az elemzés kizárta az emberi kibocsátás szerepét.

Ezért az eredmények megerősítése céljából további többszörös regressziós elemzéseket végeztünk, az 1959-től kezdődő HAD- és GISS-SST adatok felhasználásával. A hagyományos SST (tengerfelszín-hőmérséklet) adatok – a szárazföldi mérésekhez hasonlóan – számos mérési és adatintegrációs problémával terheltek. Mindazonáltal alapvető fontosságú annak tisztázása, hogy ugyanazok az eredmények kaphatók-e meg. Mivel a HAD és a GISS-SST adatsorok ingadozásai kisebbek, mint az UAH-SST esetében, ugyanakkor hasonló tendenciát mutatnak (lásd Ato [12] tanulmányának 2. ábráját), érdemesnek bizonyultak az elemzésre.

A többszörös regressziós elemzés eredményei is hasonlóak voltak. A HAD-SST adatok alapján becsült érték és a 2022-ben ténylegesen mért érték közötti eltérés 1,45 ppm volt; ez kielégítő pontosságnak tekinthető, figyelembe véve, hogy az 1959 óta bekövetkezett teljes koncentrációnövekedés megközelítőleg 100 ppm. Mivel ez a hiba nagyságrendileg megegyezik az UAH-SST adatokból becsült hibával, arra következtethetünk, hogy egyéb tényezőket is figyelembe kell venni, amelyeket a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) önmagában nem képes megmagyarázni.

Ezért a korábbi és a jelenlegi tanulmányban – a korrelációs együtthatók mellett – a végső eltéréseket is feltüntettük (lásd a [12] számú tanulmány kivonatát, főszövegét és 4. ábráját). Az interneten megjelenő, félrevezető hozzászólások szerzői azonban ezt vagy nem ismerik fel, vagy szándékosan figyelmen kívül hagyják.

3. Megjegyzés arról, hogy a túl magas korreláció hibás elemzésre utalhat

Ahogy fentebb említettük, a korábbi és a jelenlegi jelentésekben a ΔCO_2 értékét lineáris többszörös regressziós elemzésből származó együtthatók és konstansok segítségével becsültük meg. Az eredmény az emberi eredetű kibocsátások teljes kizárását vonta maga után. Ebből következően a becslési képlet megfelelőnek tekinthető. Az a tény, hogy a mért és a becsült értékek közötti korrelációs együttható rendkívül magas, az elemzés konkrét eredménye. Önmagában ez a tény nem szolgálhat érvként arra, hogy maga az elemzés hibás lenne.

4. A vád: Az elemzés során kizárólag az 1959 utáni adatokat vették figyelembe, hogy elrejtsék a CO_2-szint és a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) közötti, korábbi időszakra jellemző eltérést, anélkül, hogy megmagyaráznák, hol és miért vall kudarcot a modell.

Ahogy a 2. szakaszban röviden említettük, az 1958 előtti időszakra vonatkozó, jégmagokból származó ΔCO_2-adatok nem használhatók fel az elemzéshez. Mivel számos oka van annak, hogy a ΔCO_2-t miért nem lehet az akkori emberi kibocsátásokkal magyarázni, ezen adatok

statisztikai elemzésre történő felhasználása lehetetlen. Közzétételük mesterségesen és hamisan előállított statisztikai eredmények terjesztését jelenti.

5. Ato [12] módosította (vagy manipulálta) az adatokat és/vagy a matematikai képleteket a kívánt eredmény elérése érdekében.

Más szóval, ez burkoltan tudományos csalással vádol. Ez nem csupán felelőtlen kijelentés, hanem egy igen súlyos, rágalmazó vád is, amelynek egyetlen célja a szerző lejáratása. Az adatok rendelkezésre állnak a kiegészítő Excel®-adatkészletben [12]. Mivel a felhasznált adatok mindössze hét változót tartalmaztak, és csupán körülbelül 60 évre vonatkoztak (CO_2, ΔCO_2, a tengerfelszíni hőmérséklet – SST – három típusa, valamint az emberi kibocsátás két típusa), egy valódi szakértő számára az ellenőrzés egyszerű és könnyű feladat. Az adatforrások szintén fel vannak tüntetve a hivatkozások között. Továbbá, az Excel® segítségével lineáris többszörös regressziós elemzés is végezhető; ehhez útmutató is elérhető. Ugyanez igaz más statisztikai elemző szoftverekre is.

Mindenekelőtt: ha valóban csalás történt, a tudományos gyakorlat szerint konkrét észrevételeket kell küldeni a folyóiratnak, rámutatva a problémára. Ha pedig az SCC folyóirat nem hajlandó válaszolni, akkor – és csakis akkor – lehet kritikát megfogalmazni, akár más folyóiratokban is. Végtére is, konkrét részletek megjelölése nélkül csalást sejtetni tudományetikai szempontból elfogadhatatlan.

6. A ΔCO_2 kizárólag a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) és egy konstans alapján történő modellezésének kritikája

Ahogy fentebb említettük, a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) és a ΔCO_2 közötti kapcsolat mögött meghatározott mechanizmus áll. Az SST-t – az emberi kibocsátásokkal együtt – bevonták egy többszörös regressziós modellbe, amelyben az SST erős előrejelző képességet mutatott.

A korábbi és a jelenlegi vizsgálatok eredményeinek lényege megegyezik. Ebből kifolyólag ezen adatok felhasználása a ΔCO_2 előrejelzésére nem vet fel statisztikai problémát. Más tényezők (a bioszféra és a vulkáni tevékenység) esetében nem várható olyan pontosság, mint az éves ΔCO_2, a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) és az antropogén kibocsátás tekintetében. Kockázatos nagy bizonytalansággal terhelt értékeket beépíteni egy többváltozós modellbe. A fentebb említett, 1958 előtti ΔCO_2-adatokhoz hasonlóan itt is fennáll a téves eredmények (artefaktumok) keletkezésének jelentős kockázata. A jövőben azonban – amennyiben más mutatók pontossága jelentősen javul – érdemes lehet újra megfontolni a bevonásukat.

References

1. Sixth Assessment Report (AR6), IPCC, 2021: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al.: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

University Press.

2. Oregon Institute of Science and Medicine, Year: Global Warming Petition Project http://www.petitionproject.org/index.php

3. Singer S.F., 2008: Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change, Chicago, IL: The Heartland Institute, 2008. https://yosemite.epa.gov/oa/EAB_Web_Docket.nsf/Filings%20By%20Appeal%20Number/5E65BBBD50EED79A85257416005ACE06/$File/Exhibit...32.pdf

4. GLOBAL CLIMATE INTELLIGENCE GROUP: World Climate Declaration, There is no climate emergency, https://clintel.org/world-climate-declaration/

5. CO_2 Coalition, Providing the facts about CO_2 and climate change https://co2coalition.org/

6. Clima, una petizione controcorrente, 2019: https://opinione.it/cultura/2019/06/19/redazione_riscaldamento-globale-antropico-clima-inquinamento-uberto-crescenti-antonino-zichichi/?altTemplate=Stampa&fbclid=IwAR1YAoqulAKKXJTY-uzRf-SEaXG6NRpVOckp3nVE7iiTAgOQu8DMHGUxRnE

7. Soon W., 2005: Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations inthe Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years, Geophysical Research Letters 32, 2005GL023429. https://doi.org/10.1029/2005GL023429

8. Soon W., Connolly R., Connolly M., Akasofu S., Baliunas S., Berglund J., Bianchini A., Briggs W.M., Butler C.J., Cionco R.G., Crok M., Elias A.G., Fedorov V.M., Gervais F., Harde H., Henry G.W., Hoyt D.V., Humlum O., Legates D.R., Lupo A.R., Maruyama S., Moore P., Ogurtsov M., ÓhAiseadha C., Oliveira M.J., Park S., Qiu S., Quinn G., Scafetta N., Solheim J.E., Steele i., Szarka L., Tanaka H.L., Taylor M.K., Vahrenholt F., Herrera V.M.V., Zhang W., 2023: The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data, Climate 2023, 11(9), 179 https://doi.org/10.3390/cli11090179

9. Svensmark H., Pedersen J.O.P, Marsh N.D., Enghoff M.B., Uggerhøj U.I., 2006: Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric condi-tions, Proc. R. Soc. A.463385–396 http://doi.org/10.1098/rspa.2006.1773

10. Nikolov N., Zeller K.F., 2024: Roles of Earth's Albedo Variations and Top-of-the-Atmosphere Energy Imbalance in Recent Warming: New Insights from Satellite and Surface Observations, Geomatics 2024, 4(3), 311-341 https://doi.org/10.3390/geomatics4030017

11. Clauser J.F., 2024: Nobel laureate John Clauser's ICSF/CLINTEL Lecture, https://www.youtube.com/watch?v=Nd2GIx1tX8A

12. Ato D., 2024: Multivariate Analysis Rejects the Theory of Human-caused Atmospheric Carbon Dioxide Increase: The Sea Surface Temperature Rules, Science of Climate Change Vol. Dai Ato: Pitfalls in Global Warming and Climate Change Research Science of Climate Change https://scienceofclimatechange.org 4.2 (2024) pp. 1-15 https://doi.org/10.53234/SCC202407/19

13. Salby M., Harde H., 2022: Theory of Increasing Greenhouse Gases, Science of Climate Change, Vol. 2.3 (2022) pp. 212-238, https://doi.org/10.53234/scc202212/17

14. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.E., 2013: The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature, Global and Planetary Change 100 (2013) 51–69 https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.08.008

15. Berry E.X., 2023: Nature Controls the CO_2 Increase, Science of Climate Change, Vol. 3.1 (2023), pp. 68-91 https://doi.org/10.53234/scc202301/21

16. Koutsoyiannis D., Kundzewicz Z. W., 2020: Atmospheric Temperature and CO_2: Hen – Or Egg Causality? Sci 2020, 2(4), 83, https://doi.org/10.3390/sci2040083

17. Data on CO_2 and Greenhouse Gas Emissions by Our World in Data https://github.com/owid/co2-data Downloaded on 21, Sept. 2024, the data "World" in the csv file was used.

18. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information, Antarctic Ice Cores Revised 800KYr CO_2 Data, https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/17975 Downloaded on 24, Sept. 2024

19. Bereiter B., Eggleston S., Schmitt J., Nehrbass-Ahles C., Stocker T.F., Fischer H., Kipfstuhl S., Chappellaz J., 2015: Revision of the EPICA Dome C CO_2 record from 800 to 600 kyr before present. Geophysical Research Letters, 42(2), 542-549. https://doi.org/10.1002/2014GL061957

20. NOAA, Global Monitoring Laboratory, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO_2) https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html

21. NOAA, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO_2), Recent Global CO_2 Trend https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_trend.html

22. NOAA, South Pole Observatory, https://gml.noaa.gov/aftp/data/trace_gases/co2/flask/surface/txt/co2_spo_surfaceflask_1_ccgg_month.txt

23. Beck E.G., 2022: Reconstruction of Atmospheric CO_2 Background Levels since 1826 from direct measurements near ground, Science of Climate Change, Vol 2.2 (2022) pp.148-211, https://doi.org/10.53234/scc202112/16

24. Harde H., 2023: About Historical CO_2-Data since 1826: Explanation of the Peak around 1940, Science of Climate Change, Vol. 3.2 (2023) pp. 211-218, https://doi.org/10.53234/scc202304/21

25. NOAA, Trends in Atmospheric Methane (CH4) https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

26. The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: IPCC Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-spm-1.pdf

27. Craig H., Chou C.C., 1982: Methane: The record in polar ice cores, Geophysical Research Letters, Volume 9, No. 11, Pages 1221-1224, November 1982 https://doi.org/10.1029/GL009i011p01221

28. Neftel A., Moor E., Oeschger H., Stauffer B., 1985: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries, Nature volume 315, pages 45-47(1985), https://www.nature.com/articles/315045a0

29. Friedli H., Lötscher H., Oeschger H., Siegenthaler U., Stauffer B., 1986: Ice core record of the 13C/12C ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries, Nature volume 324, pages237–238 (1986) https://www.nature.com/articles/324237a0

30. Spencer R., 2009: Increasing Atmospheric CO2: Manmade…or Natural? https://www.drroyspencer.com/2009/01/increasing-atmospheric-co2-manmade%e2%80%a6or-natural/

31. Koutsoyiannis D., 2024: Net Isotopic Signature of Atmospheric CO_2 Sources and Sinks: No Change since the Little Ice Age, Sci 2024, 6(1), 17 https://doi.org/10.3390/sci6010017

32. Ollila A., 2023: Testing Carbon Cycle Models and Budgets, Science of Climate Change, Vol 3.5 pp. 463-486 https://doi.org/10.53234/scc202310/44

33. Craig H., Chou C.C., Welhan J.A., Stevens C.M., Engelkemeir A., 1988: The Isotopic Composition of Methane in Polar Ice Cores, Science, 16 Dec 1988, Vol 242, Issue 4885, pp. 1535-1539 https://doi.org/10.1126/science.242.4885.1535

34. Jaworowski Z., Segalstad T.V., Hisdal V., 1992: Atmospheric CO_2 and global warming: a critical review. 2nd edition, 1992 https://www.researchgate.net/publication/307215789_Atmospheric_CO_2_and_global_warming_a_critical_review_2nd_edition

35. Jaworowski Z., Segalstad T.V., Ono N., 1992: Do glaciers tell a true atmospheric CO_2 story? The Science of The Total Environment 114(12):227-284 https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90428-U

36. Jaworowski Z., 1994: Ancient atmosphere- Validity of ice records, Environ. Sci. & Pollut. Res. 1, 161–171 (1994) https://doi.org/10.1007/BF02986939

37. Badgeley J.A., Steig E.J., Hakim G.J., Fudge T.J., 2020: Reconstructions of mean-annual

Greenland temperature and precipitation for the past 20,000 years and the ice-core records used to create the reconstructions 2020. Arctic Data Center. https://doi:10.18739/A2599Z26M.

38. Spencer R.: Latest Global Temps https://www.drroyspencer.com/latest-global-temperatures/ Accessed on 21, Oct. 2024

39. Steffensen J.P., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Fischer H., Goto-Azuma K., Hansson M., Johnsen S.J., Jouzel J., Masson-Delmotte V., Popp T., Rasmussen S.O., Röthlisberger R., Ruth U., Stauffer B., Siggaard-Andersen M.L., Sveinbjörnsdóttir Á.E., Svensson A., White J.W.C., 2008: High-Resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years. Science321,680-684(2008). https://DOI:10.1126/science.1157707

40. Nakagawa T., Tarasov P., Staff R., Ramsey C.B., Marshall M., Schlolaut G., Bryant C., Brauer A., Lamb H., Haraguchi T., Gotanda K., Kitaba I., Kitagawa H., van der Plicht J., Yonenobu H., Omori T., Yokoyama Y., Tada R., Yasuda Y., 2021: The spatio-temporal structure of the Lateglacial to early Holocene transition reconstructed from the pollen record of Lake Suigetsu and its precise correlation with other key global archives: Implications for palaeoclimatology and archaeology, Global and Planetary Change, Volume 202, 2021, 103493, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103493.

41. NOAA, Recent Daily Average Mauna Loa CO_2, https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html

42. Humlum O., Atmospheric carbon dioxide (CO_2) https://www.climate4you.com/GreenhouseGasses.htm

43. Anklin M., Schwander J., Stauffer B., Tschumi J., Fuchs A., Barnola J.M., Raynaud D., 1997: CO_2 record between 40 and 8 kyr B.P. from the Greenland Ice Core Project ice core, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 102, NO. C12, PAGES 26,539- 26,545, NOVEMBER 30, 1997 https://doi.org/10.1029/97JC00182

44. NOAA, Barrow Observatory https://gml.noaa.gov/aftp/data/trace_gases/co2/flask/surface/txt/co2_brw_surfaceflask_1_ccgg_month.txt

45. Hannon R., 2021: Clintel, Holocene CO_2 Variability and Underlying Trends https://clintel.org/holocene-co2-variability-and-underlying-trends/

46. Carroll J.J., Slupsky J.D., Mather A.E., 1991: The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure, J. Phys. Chem. Ref. Data 1 November 1991; 20 (6): 1201–1209. https://doi.org/10.1063/1.555900

47. Abas N., Khan N., 2014: Carbon conundrum, climate change, CO_2 capture and consumptions, Journal of CO_2 Utilization, Volume 8, 2014, Pages 39-48, https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.06.005

48. Berry E.X., 2021: The Impact of Human CO_2 on Atmospheric CO_2, Science of Climate Change, Vol. 1.2 (2021), pp. 214-250 https://doi.org/10.53234/scc202112/13

49. Harde H., 2017: Scrutinizing the carbon cycle and CO_2 residence time in the atmosphere, Global and Planetary Change, Volume 152, May 2017, Pages 19-26 https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.02.009

50. Harde H., Salby M., 2021: What Controls the Atmospheric CO_2 Level?, Science of Climate Change, Volume 1.1 https://doi.org/10.53234/scc202106/22

51. Salby M., Harde H., 2021: Control of Atmospheric CO_2 Part I: Relation of Carbon 14 to the Removal of CO_2, Science of Climate Change, Vol. 1.2 (2021), pp. 177-196 https://doi.org/10.53234/SCC202112/30

52. Salby M., Harde H., 2021: Control of Atmospheric CO_2 Part II: Influence of Tropical Warming, Science of Climate Change, Vol. 1.2 (2021), pp. 197-213 https://doi.org/10.53234/scc202112/12

53. Koutsoyiannis D., 2024: Refined Reservoir Routing (RRR) and Its Application to Atmospheric Carbon Dioxide Balance, Water 2024, 16(17), 2402 https://doi.org/10.3390/w16172402

54. NASA earth observatory: The Carbon Cycle, https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle

Magyar fordítás: Szarka László Csaba

2026. 10. 30.

Science of Climate Change (SCC)

https://scienceofclimatechange.org/

A Science of Climate Change (SCC) független, szakmai lektoráláson (peer review) áteső írásokat közlő, nyílt hozzáférésű tudományos folyóirat. Célja a Föld éghajlati rendszerének és az éghajlatot meghatározó folyamatok tudományos megismerése. A folyóirat eredeti kutatási cikkeket, áttekintő tanulmányokat, módszertani írásokat, adatelemzéseket és tudományos vitákat közöl, amelyek az éghajlati változékonysággal és változással foglalkoznak, különböző térbeli és időbeli léptékekben.

Az SCC várja a tudományosan megalapozott írásokat az éghajlattal kapcsolatos tudományterületek széles köréből, beleértve a légkörtudományokat, a meteorológiát, a hidrológiát, a felszín és a légkör közötti kölcsönhatásokat, az óceáni és krioszféra-folyamatokat, az éghajlatra ható naptevékenységi és csillagászati tényezőket, az éghajlati adatok elemzését, valamint a Föld-rendszer modellezését.

A 2021-ben alapított SCC nemzetközi kiadvánnyá fejlődött, ami nonprofit keretek között működik. Működését – beleértve a szerkesztési feladatokat, a lektorálási folyamat koordinálását és a digitális közzétételt – mérsékelt cikkfeldolgozási díjak (APC) fedezik. Minden megjelent tartalom a megjelenés pillanatától kezdve világszerte szabadon hozzáférhető, előfizetési korlátok nélkül biztosítva a széles körű tudományos eszmecserét. 2025 óta a folyóiratot az SCC Publishing Association adja ki.

Stein Storlie Bergsmark Nikolaos Malamos