



# A szén biogeokémiai körforgalma és az éghajlat

Haszpra László

HUN-REN Atommagkutató Intézet, HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, haszpra.l@gmail.com

DOI: 10.56474/legkor.2026.1.1

A szénvegyületek, döntő részben a szén-dioxid, meghatározó szerepet tölthet be a Föld éghajlatának alakításában. A tanulmány áttekinti a szén természetes biogeokémiai körforgalmát és azt, hogy ebben milyen változásokat okozott az emberi tevékenység. Bemutatja a légköri szén-dioxid legfontosabb forrásait és nyelőit, valamint az ezekkel kapcsolatos folyamatokat. Tisztázza, hogy bár a légkör és az egyéb szférák közötti bruttó anyagforgalomhoz képest az emberi kibocsátás viszonylag csekély, a légkör szén-dioxid tartalmát alakító nettó anyagforgalomban meghatározó jelentőségű.

## The biogeochemical cycle of carbon and the climate

Carbon compounds, primarily carbon dioxide, play an essential role in shaping the Earth's climate. The study reviews the natural biogeochemical cycle of carbon and the changes caused by human activity. It presents the most important sources and sinks of atmospheric carbon dioxide, as well as the associated processes. Although human emissions are relatively small relative to the gross exchange between the atmosphere and other spheres, the study clarifies that they are of decisive importance in the net mass flow that shapes the carbon dioxide content of the atmosphere.

A Föld egyes szférái<sup>1</sup> között folyamatos az anyagáramlás. A bolygó (kvázi)stabilitása azt tételezi fel, hogy az anyag, amely elhagy egy szférát, rövidebb-hosszabb idő után, esetleg többszörösen is átalakulva, több szférát is megjárva visszatér kiindulási szférájába. A folyamatos anyagmozgásban biológiai, geológiai és kémiai folya-

<sup>1</sup> A fő szférák: atmoszféra, bioszféra, hidroszféra, litoszféra vagy geoszféra. A krioszféra (hó és jég) általában beleértik a hidroszférába, míg a pedoszféra (talaj) többnyire a bioszférához, esetleg a litoszférához sorolják. A litoszféra csak a többi külső szférával kapcsolatot tartó szilárd földkéreg és a földköpeny vele együtt mozgó felső részét tartalmazza, míg a geoszféra a Föld belső részeit (köpeny, külső és belső mag) is magában foglalja.

matok egyaránt részt vehetnek, ezért ezt az anyagközlést biogeokémiai körforgalomnak nevezzük. Az átalakulások miatt a biogeokémiai körforgalmakat a vegyületeket alkotó elemek szintjén tudjuk követni. Ennek megfelelően az egyes szférák közötti anyagáramokat is az adott elem tömegáramaként adjuk meg, hiszen az anyagáramban többféle, különböző molekulásúlyú vegyület is részt vehet, és tömegáramaik egyszerű összegzése az adott elem körforgalmának leírása szempontjából félrevezető lehet.

Az élő szervezetek különösen erős kapcsolatban vannak a környező szférákkal. A velük való anyagcsere révén jutnak a létfenntartásukhoz nélkülözhetetlen elemekhez,

vegyületekhez és adják le anyagcseretermékeiket. Az általunk ismert életformák szénalapúak. Az élő szervezeteket – a vízen kívül – szinte kizárólagosan széntartalmú anyagok építik fel (fehérjék, szénhidrátok, zsírok, nukleinsavak, a csontokban, mészvázakban karbonátok stb.). Az anyagcseretermékként a légkörbe kerülő szénvegyületek pedig visszahatnak a bioszféra környezeti létfeltételeire. Mindezt a bioszféra szempontjából fontos elemek (szén, hidrogén, nitrogén, oxigén, foszfor, kén, magnézium, kálium, nátrium, kalcium, mikroelemek – *Remick and Helmann, 2023*) között a szén biogeokémiai körforgalma kiemelt jelentőségű.

### A természetes szénkörforgalom

A szén biogeokémiai körforgalmában részt vevő szférák közül a legtöbb szenet, 20–200 millió gigatonná<sup>2</sup> (Gt), a litoszférában találjuk (*Kellogg et al., 2019*)<sup>3</sup>. Az innen a légkörbe szenet juttató vulkáni tevékenység részben még a földköpeny külső részét is érinti. Jelenleg a vulkáni működés és az egyéb geológiai kigázósodások együttesen átlagosan évente mintegy 0,05–0,2 Gt szénmennyiséget, döntően szén-dioxidot (CO<sub>2</sub>) juttatnak a légkörbe. (*Foley and Fischer, 2017; Derry, 2024*). Mint látni fogjuk, ez az egyes szférák (rezervoárok) széntartalmához képest nagyon csekély mennyiség. A vulkáni tevékenység számottevő megváltozása is csak geológiai időtáv alatt tudja módosítani az egyéb szférák széntartalmát. Ugyanakkor a vulkáni tevékenység a Föld geológiai története során meghatározó szerepet játszott a légkör összetételének alakításában. Hasonló a helyzet a szilikátos kőzetek lassú karbonátosodásával, kémiai mállásával is, ami viszont szén-dioxidot von ki a légkörből (*Hilton and West, 2020*).

A különböző szférák légkörhöz kapcsolódó széntömegáramának több mint 99%-át a szén-dioxid teszi ki. A szén-dioxid vízben jól oldódik. A hidroszféra és a légkör közötti szén-dioxid áramot a Henry-törvény szabályozza. E szerint az oldatban az oldott gáz koncentrációja arányos a gázfázis gázkoncentrációjával. Melegebb oldat kevesebb anyagot tud oldott állapotban tartani, mint egy hidegebb. Esetünkben az oldat az óceán, míg a gázfázis a légkör. A két közeg között az egyensúlyi koncentráció beállta után nettó anyagáram már nem lép fel: időegység alatt ugyanannyi molekula lép ki az oldatból, mint amennyi beoldódik.

<sup>2</sup> 1 gigatonna (Gt) = 10<sup>9</sup> tonna = 10<sup>15</sup> gramm = 1 petagramm (Pg)

<sup>3</sup> A földköpenyben és a magban még legalább egy nagyságrenddel több szén van, mint a litoszférában, de a Föld ezen szerkezeti részei nincsenek közvetlen kapcsolatban a légkörrel, a bioszférával és a hidroszférával.

Az óceán azonban nem nyugvó közeg. Amikor a globális óceáni vízkörzésben a víz a hidegebb régiókból a melegebb zónákba érkezik, túltelítetté válik, mivel a felmelegedő víz kevesebb szén-dioxidot tud oldott állapotban tartani, mint a hidegebb. Ezeken a területeken az óceán részben szén-dioxidot bocsát a légkörbe, részben megindul a karbonátok kiválása a vízből. Amikor pedig a vízkörzés során a víz a melegebb területekről visszatér a hidegebb régiókba, lehűl, így szén-dioxidban telítetlenné válik, a Henry-törvényben megfogalmazott egyensúly elérése szén-dioxidot vesz fel a légkörből.

A vízben oldott szén-dioxidot a fotoszintetizáló fitoplankton felveszi, a Napból érkező energia felhasználásával szerves vegyületekké dolgozza fel. Az oldott szén-dioxid emellett beépül a mészvázás élőlények mészvázába. Az elhalt élő szervezetekben megkötött szén lesüllyed az óceánban, ahol részben más élő szervezetek táplálékául szolgál, részben a fenékre süllyedve üledéket, hosszabb idő után a litoszféra részévé váló üledékes kőzetet képez. Ezt a folyamatot az óceánok biológiai szénpumpájának nevezik, szemben a fizikai-kémiai folyamatok (oldódás, karbonát-kiválás a túltelített oldatból) képezte fizikai, más néven oldódási pumpával. Az üledékes kőzetekbe került szén a kéreglemezek mozgásával, alábukásával jut a Föld mélyebb rétegeibe, ahonnan a vulkáni tevékenység juttathatja ismét a légkörbe.

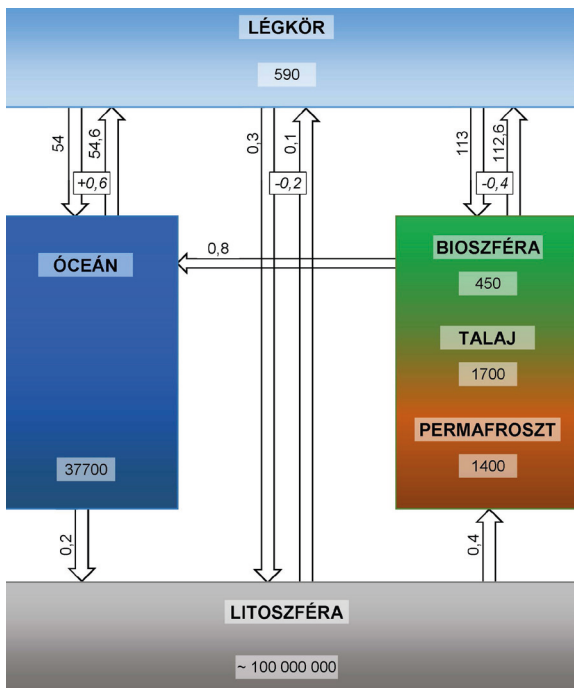
A holocén<sup>4</sup> intenzív ipari tevékenység előtti időszakban (i.e. ~9700 – i.u. ~1750) az óceánok teljes oldott szervetlen-szén-tartalma (döntő részben karbonát és bikarbonát ionok formájában) 37.000 Gt körül lehetett (*Gruber et al., 2023*). Az oldott szerves anyag becsült mennyisége ehhez képest jelentéktelen (széntömegben kifejezve ~660 Gt – *Hansell et al., 2009*). Az óceáni vízkörzésben a sarkvidéki, lehűlő, telítetlenné váló víztömegek évente 54 Gt szenet vettek fel a légkörből (*Canadell et al., 2021*), lényegében kizárólag szén-dioxid formájában, míg a trópusokon ennél egy kevéssel, körülbelül 0,6 Gt-val többet adtak le, ugyancsak elsősorban szén-dioxid formájában. A különbség oka, hogy a szárazföldről, a talajból, illetve a bioszférából a folyók szerves anyagokat szállítanak az óceánokba, mely tömegnek – egyensúly esetén – távoznia is kell onnan. Egy része a légkör felé távozik, míg a maradék biológiai-kémiai folyamatokon keresztül az üledékbe kerül.

A litoszférát borító talaj hozzátétel 1700 Gt szenet tartalmaz, míg az éghajlati körülményekre érzékeny permafroszt széntartalma 1400 Gt körül lehet

<sup>4</sup>A holocén a legutóbbi eljegesedés lezárultától, 11.700 évvel ezelőtől napjainkig tartó földtörténeti korszak.

(Jackson *et al.*, 2017). A szárazföldi biomasszában lévő széntömeg az iparosodás előtti időkben mintegy 450 Gt volt (Erb *et al.*, 2018; Canadell *et al.*, 2021). A növények fotoszintézise hatalmas mennyiségű szén (~113 Gt/év) vont ki a légkörből szén-dioxid formájában, de a respirációval, illetve a szerves anyagok bomlásával közel ugyanennyit (~112,6 Gt/év) vissza is jutott juttattak a levegőbe (Canadell *et al.*, 2021). Ez a különbség részben kivonta a légkörből az óceánok által kibocsátott szén-dioxidot, elősegítve a légköri széntartalom stabilitását.

A holocén 18. század előtti időszakának globális biogeokémiai szénkörforgalmát az 1. ábra foglalja össze. Mind az egyes szférák széntartalmára vonatkozó értékek, mind a szférák közötti anyagáramok jelentős bizonytalansággal terhelték. Az anyagáramoknál olyan, a bizonytalanságon belüli valószínű értéket szerepeltetünk Canadell és munkatársai munkája



1. ábra. A szén globális biogeokémiai körforgalma az iparosodás előtt (~1750) Canadell és munkatársai nyomán (Canadell *et al.*, 2021), Fridlingstein és munkatársainak pontosításával (Fridlingstein *et al.*, 2025). Az egyes szférák, rezervoárok széntartalma gigatonnában, az anyagáramok gigatonna per évben szerepelnek. Az anyagáramok a becsült tartományuk azon legvalószínűbb értékei, melyeknél az egyes szférák anyagmérlegei kiegyenlítették. Bekeretezve, dőlt karakterekkel a légkör és az egyéb szférák közötti nettó anyagáramokat adjuk meg légköri szemléletben, azaz a légkör számára anyagvesztéséget jelentő anyagáramok negatív, míg a bevettelt jelentők pozitív előjellel szerepelnek.

nyomán (Canadell *et al.*, 2021), melyekkel összességében kiadódik a körforgalom stabilitása, azaz minden szféra esetében a be- és a kiáramló anyagmennyiségek közelítőleg megegyeznek. A feltüntetett értékek azonban távolról sem jelentik azt, hogy ezeket az értékeket ilyen pontossággal ismerjük.

A fenti, idealizált modell állandó környezeti viszonyokra vonatkozik. A valóságban a környezeti viszonyok az idők során változnak, és ezért a folyamatok kiegyensúlyozottsága sem tökéletes. A széntartalom eloszlása a különböző szférák között nem állandó. A Föld története során a vulkáni aktivitás változásai miatt a légkör szén-dioxid tartalma széles tartományban ingadozott, de részben a kiömlési magmás kőzetek karbonátosodása, részben a szárazföldi és óceáni bioszféra életfolyamatai miatt összességében csökkenő tendenciát mutatott. A bolygó kozmikus okokból bekövetkező hőmérséklet-ingadozásai is átrendezik az egyes szférákban tárolt szénmennyiséget. A földtörténeti közelmúlt eljegesedései során a hidegebbé váló óceánvíz nagyobb mennyiségű oldott szén-dioxidot tudott tárolni, miközben a bioszféra hőmérséklet-függő respirációja, kibocsátása is lecsökkent. Ennek megfelelően az eljegesedési maximumok idején a légkör széntartalma mintegy harmadával volt alacsonyabb, mint a melegebb időszakok, az interglaciálisok idején. A csökkenésben szerepe volt a fitoplankton intenzívebb szén-dioxid felvételének is.

A holocén stabil éghajlata és a sarkvidéki jégbe fagyott légbuborékok elemzése lehetőséget ad számunkra a globális szénkörforgalom kiegyensúlyozatlanságának megbecslésére. A holocén kezdetén a légkör szén-dioxid koncentrációja 265 ppm<sup>5</sup>, míg metántartalma 700 ppb (0,7 ppm) körül volt (Monnin *et al.*, 2001), ami az ipari forradalom kezdetéig, az 1750-es évekig csekély ingadozásokkal 278 ppm-re, illetve 730 ppb-re nőtt (Rubino *et al.*, 2019). Átlagos viszonyok között 1 ppm térfogatarány-változás 2,124 gigatonnányi légköri széntömeg-változással egyenértékű (Ballantyne *et al.*, 2012). A 13 ppm-es növekedés tehát mintegy 28 Gt szénfelhalmozódást jelentett. Ez az időközben eltelt közel 11,5 ezer évre vetítve átlagosan 0,0024 Gt/év légköri kiegyensúlyozatlanságot mutat ~165 Gt/év-es bruttó anyagforgalom (óceán-légkör + bioszféra-légkör) mellett. Ha az i.e. 6000 táján beállt

<sup>5</sup> 1 ppm = 10<sup>-6</sup> térfogatrész (parts per million), 1 ppb = 10<sup>-9</sup> térfogatrész (parts per billion) = 0,001 ppm. A ppm és a ppb, mint nem SI mértékegységek, a szakirodalomból kikopóban vannak. A térfogatarányt egyre inkább mol-arányban fejezzük ki. A légköri viszonyok között ideális gázként viselkedő szén-dioxid és metán esetében a térfogatarány és a mol-arány számértékben megegyezik. 1 ppm térfogatarány azonos 1 mikromol per mol (μmol/mol) mol-aránnyal.

259 ppm körüli holocén minimum-koncentrációból indulunk ki, az átlagos kiegyensúlyozatlanságra akkor is rendkívül kicsi, 0,005 Gt/év-es értéket kapunk. Az elmúlt két és fél évszázadban azonban a légkör széntartalma egyre gyorsuló növekedésnek indult. A 2015-2024-es időszakban már elérte az 5,6 Gt/év-et (*Friedlingstein et al., 2025*), azaz a légköri anyagmérleg kiegyensúlyozatlansága pár száz év alatt három nagyságrenddel megnőtt. Ennek következtében a szén-dioxid légköri koncentrációja 2024-re elérte a 424 ppm-et, míg a metáné az 1942 ppb-t (*WMO, 2025*). A légkör szén-dioxid és metán tartalmának éghajlatbefolyásoló hatása bő 150 éve ismert (*Haszpra, 2022*), ezért a jelenlegi, a földtörténet korábbi időszakaiban soha nem látott ütemű felhalmozódásuk példátlanul gyors globális éghajlatváltozással és annak következményeivel fenyeget.

### A légköri szénmérleg megváltozásának okai

Ahogy az 1. ábrán látszik, a légkörnek közvetlenül a litoszférából, a talajt/permafrosztot is magában foglaló bioszférából és az óceánokból származik szénbevétele, illetve ezeknek a szférákba ad át szén. Ha a légköri többletszén a litoszférából származna, az a vulkáni tevékenység és az egyéb szén-dioxid kiáramlással járó geofizikai folyamatok intenzitásának legalább két nagyságrenddel való megnövekedését tételeznék fel az elmúlt 200–300 év során. Ezt bizonyára nemcsak a geológusok, geofizikusok, de valamennyien észrevettük volna. Az óceánokból a légkör felé irányuló szénáram ilyen mérvű megváltozását csak a vízhőmérséklet igen jelentős megváltozása válthatná ki, de ennek egyrészt nincs nyoma, másrészt a több mint 1,3 billió köbkilométernyi víztömeg felmelegítéséhez rengeteg többletenergiának kellett volna megjelennie az éghajlati rendszerben. A légkör-bioszféra anyagforgalom megváltozását az éghajlat megváltozása válthatná ki, ezt viszont ilyen rövid időszakon belül csak a légköri üvegházhatás megváltozása okozhatná, amiben a kulcsszereplő éppen maga a szén-dioxid<sup>6</sup>. Az esetleges okozatot nem cserélhetjük fel az okkal. Ugyanakkor az elmúlt bő két évszázadban jól dokumentált módon megjelent egy korábban lényegében nem létezett anyagforgalmi tag: az emberi kibocsátás.

A 18. századtól, a gőzgép feltalálásától egyre intenzívebbé váló ipari tevékenység energiaforrásként nagyrészt az évmilliók során a litoszférába épült, a hajdani

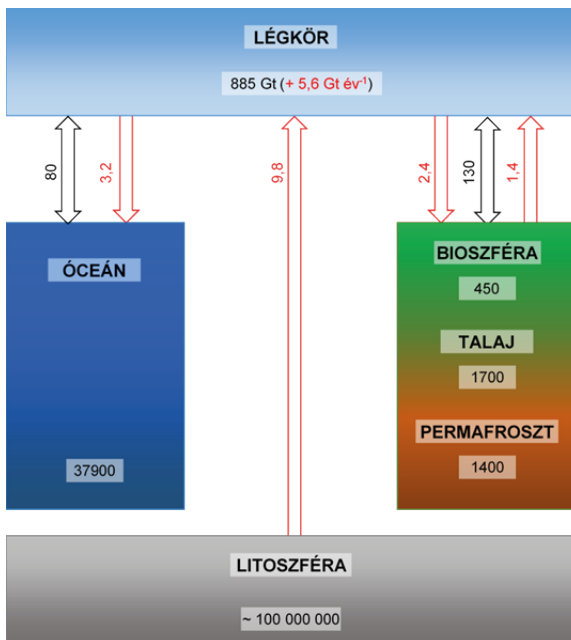
bioszférából származó szerves anyagokból képződött szenet, kőolajat, földgázt (fosszilis tüzelőanyagok) használja, melyek elégetése során, a légköri oxigén felhasználása mellett, szén-dioxid kerül a levegőbe. Hozzáadódik ehhez a modern építőipar nélkülözhetetlen alapanyagát adó cement előállításakor a felhasznált mészkőből felszabaduló szén-dioxid, illetve a mezőgazdasági és beépítési célú területek kialakítása érdekében végzett erdőirtás. Ez utóbbi nemcsak az ottani biomassza elégetésével, a talaj szervesanyag-tartalmának felgyorsuló lebomlásával, hanem a légkörből szén-dioxidot kivonó biomassza csökkenésével is hozzájárul a légkör felé irányuló nettó szénáram növekedéséhez. A mezőgazdasági termelés során a talaj esetleges szervesanyag-vesztesége szintén a légkör széntartalmát növeli.

Az emberi tevékenység ma már 12 Gt-hoz közelítő éves szénkibocsátása (*Friedlingstein et al., 2025*), amelynek döntő része szén-dioxid<sup>7</sup>, alapvetően bolygatta meg a szén biogeokémiai körforgalmát, részint közvetlenül, részint a többlet szén-dioxid és metán, valamint az egyéb halmozódó üvegházhatású gáz (dinitrogén-oxid, halogénezett vegyületek, ózon) éghajlatra gyakorolt, globális melegedést, éghajlatváltozást kiváltó hatásán keresztül (2. ábra).

Ahogy erről már szó esett, az óceán és a légkör közötti anyagáramlást a Henry-törvény szabályozza. Miközben az emelkedő hőmérséklet csökkenti a szén-dioxid oldhatóságát, a gyorsan növekvő légköri koncentráció növeli. Az ellentétes, de eltérő intenzitású folyamatok nagyon egyszerű illusztrálására álljon itt a következő példa: a szén-dioxiddal telített víz 280 ppm-es légköri koncentráció mellett 14 °C-on literenként 0,583 mg, míg egy fokkal melegebben 0,565 mg szén-dioxidot tartalmaz beoldódva oldott állapotban, nagyrészt karbonát és bikarbonát ionok formájában. Ugyanezekben a hőmérsékleteken, de 420 ppm-es légköri koncentráció mellett az értékek 0,875 mg/L és 0,848 mg/L (*Carroll et al., 1991*). Ez érzékelteti, hogy miért vált a korábbinál jóval intenzívebbé, ~54 Gt/év helyett ~75 Gt/év nagyságúvá az óceánokba irányuló szénfluxus. Az óceán lassú átkeveredése miatt azonban a légkörrel közvetlenül érintkező felszíni vízrétegbe beoldódott szén-dioxid döntő része nem tud mélyebbre kerülni. A melegebb régiókban kigázosodik, ezért a nettó anyagforgalom csak jóval kisebb mértékben változott meg: a kismértékű, ~0,6 Gt/év kibocsátásról napjainkra 3,2±0,4 Gt/év felvételre (2015-2024. közötti átlag – *Friedlingstein et al., 2025*). A térben erősen változó hőmérséklet,

<sup>7</sup> A kibocsátást tárgyaló munkák a kibocsátást általában szén-dioxid tömegben adják meg. 1 Gt szén = 3,67 Gt szén-dioxid.

<sup>6</sup> A légkör üvegházhatásának zömét adó vízgőz mennyisége az éghajlattól függ, azaz önmaga éghajlatváltozást nem indíthat el (*Haszpra, 2025*).



2. ábra. A szén globális biogeokémiai körforgalma a 2015-2024 közötti időszakban (Friedlingstein et al., 2025). Az egyes szférák, rezervoárok széntartalma gigatonnában, az anyagáramok gigatonna per évben szerepelnek. Az antropogén anyagáramokat piros nyilak jelzik. A litoszférából a légkörbe irányuló szénáram mind a fosszilis tüzelőanyagokból, mind a cementgyártásból származó szénmennyiséget tartalmazza. Az 1. ábrán szereplő kisebb hozamú természetes anyagáramokat az áttekinthetőség érdekében erről az ábráról lehagytuk.

víznyomás, a kapcsolódó fizikai-kémiai folyamatok és az áramlások miatt az óceánok szénfelvételének modellezése meglehetősen bonyolult, ezért a fenti példa csak az elmozdulások irányát és nagyságrendjét illusztrálja.

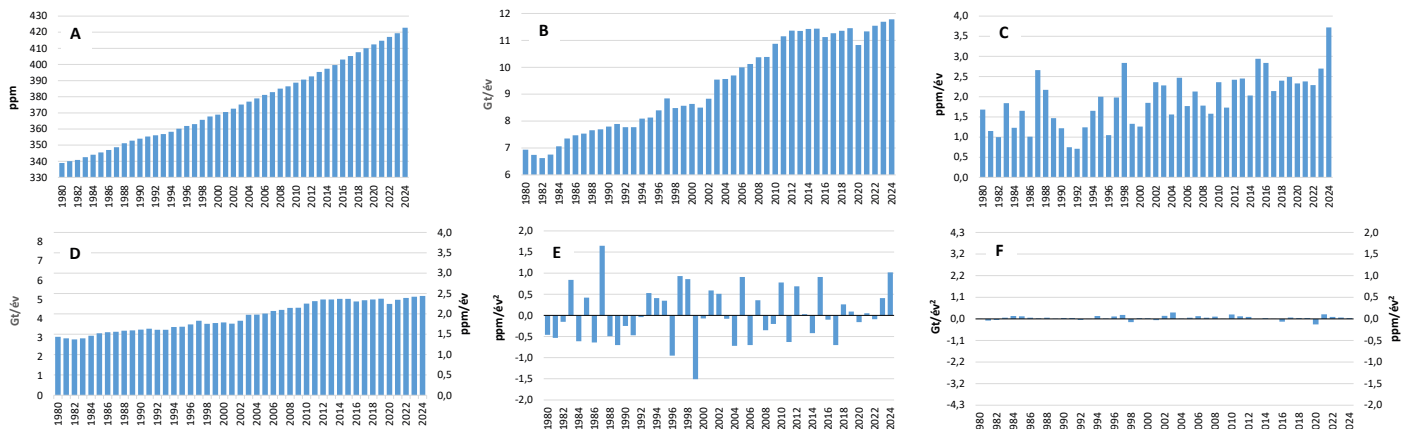
Hosszú ideig az volt a feltételezés, hogy az emberi beavatkozások, erdőirtások miatt a szárazföldi bioszféra inkább forrás, mint nyelő. Az 1980-as évekre azonban az óceáni szénforgalom-mérések bebizonyították, hogy az óceánok – lassú átkeveredésük miatt – képtelenek annyi szenet kivonni a légkörből, mint amennyi az emberi kibocsátásból a mérések alapján a légkörből hiányzik. Jó ideig a sejtés szintjén maradt, hogy a különbséget valamilyen módon mégis a szárazföldi vegetáció veszi fel (pl. Bolin, 1977). A vegetáció nettó szénfelvétele a mérések sokasodásával és a légköri inverz terjedési modellek megjelenésével az 1980-as évek végére bizonyosodott be (Tans et al., 1990; Friedlingstein et al., 1995). A szárazföldi bioszféra szerepét illető korabeli bizonytalanság érthető, hiszen mai ismereteink szerint ez a szféra csak az 1960-as, 1970-es

években változott nettó forrásból nettó nyelővé a szénfelvétel növekedésével és az erdőirtások lassú visszaszorulásával (Friedlingstein et al., 2025).

Ma a szárazföldi vegetáció évente 29 Gt-val több szenet vesz fel, mint az ipari forradalom kibontakozása előtt (Canadell et al., 2021). Ez egyrészt a magasabb légköri szén-dioxid koncentrációnak, az ún. szén-dioxid „trágyázásnak”, másrészt az ugyancsak emberi eredetű légszennyezéssel a természetbe kerülő, szintén növényi tápanyagként szolgáló többlet nitrogénnek és esetleg az éghajlat megváltozásának köszönhető. Ez utóbbi kérdéses, mert míg a melegebb és nedvesebb éghajlat valóban növelheti a szénfelvételt, az egyre gyakoribb hőhullámok és aszályok, erdő- és bozóttüzek ellentétes irányban hathatnak (Wolkovich et al., 2025; Dong et al., 2026). A biomassza tömegének és részben a hőmérséklet növekedésének következtében a respiráció is erősödik, ezért a nettó szénfelvétel csak  $2,4 \pm 0,8$  Gt/év-re nőtt (2015-2024 átlag – Friedlingstein et al., 2025). Az elmúlt néhány évtizedben megfigyelhető nettó szénfelvétel azonban csak hibahatáron belül gyarapíthatta eddig a szárazföldi biomassza össztömegét. Egyelőre éppen csak visszapótolta azt, amit az emberi tevékenység következtében korábban elveszített (Canadell et al., 2021; Chen et al., 2026).

Az egyre kiterjedtebb és nagy pontosságú mérőhálózatnak köszönhetően a szén-dioxid légköri mennyiségének évi növekedési ütemét nagyon pontosan, 3%-osnál kisebb bizonytalansággal meg tudjuk határozni. Hasonlóan kicsi (~5%) a bizonytalansága a fosszilis tüzelőanyagokból származó kibocsátásnak (Friedlingstein et al., 2025). Bár a különbségüket az előbbieik alapján elég pontosan kiszámolhatjuk, a bioszféra és a légkör, valamint az óceán és a légkör közötti nettó anyagforgalmat külön-külön lényegesen bizonytalanabban ismerjük (~30%). A legújabb modellszámítások szerint a nettó óceáni szén-dioxid felvétel valószínűleg valamelyest nagyobb, míg a bioszferikus felvétel ugyanennyivel kisebb, mint az e tanulmányban is idézett korábbi becslési középértékek, de belül vannak azok bizonytalansági tartományán (Friedlingstein et al., 2026).

Bár az emberi kibocsátás ma is csak alig több, mint 5%-a a bruttó légköri anyagforgalomnak, a rendszer kiegyensúlyozatlanságának három nagyságrenddel való megnövelésével alapvetően módosította a szén biogeokémiai körforgalmát. A 18. század közepe óta a teljes emberi kibocsátás  $750 \pm 65$  Gt körül lehetett. Eközben a légkör széntartalma 590 Gt-ról 900 Gt-ra nőtt. A kibocsátás légkörben maradó hányada az elmúlt bő fél évszázadban nem mutatott érdemi változást, de évről évre széles sávban ingadozott (20–80%) a ~44%-os átlag körül



3. ábra. A szén-dioxid globális átlagkoncentrációjának (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> - letöltve 2026.02.03.) (A) és az antropogén szén-dioxid kibocsátásnak (Friedlingstein et al., 2025) (B) az alakulása. A koncentráció növekedési ütemének időbeli menete (C), illetve az emberi kibocsátás okozta potenciális légköri széntartalom-növekedés az átlagos 44%-os légkörben maradó hányadot feltételezve (D). A légkörben megfigyelhető koncentráció-növekedés egyik évről a másikra bekövetkező ingadozása (E) és az ebből az emberi kibocsátás ingadozásának tekinthető rész, az átlagos 44%-os légkörben maradó hányad mellett (F). A (D) és (F) ábrán mind a légköri széntömeg-változást (bal tengely), mind az ebből számítható koncentráció-változást (jobb tengely) feltüntettük.

(Bennett et al., 2024). Az ingadozás mértéke sokkal nagyobb, mint az emberi kibocsátás ingadozása (3. ábra). A jelenség háttérben elsősorban a Déli Oszilláció, az El Niño/La Niña időszakok váltakozása, illetve egy-egy nagyobb vulkánkitörés időjárás-befolyásoló hatása áll.

El Niño időszakokban jellemzően az átlagosnál gyorsabb a légkör széntartalmának növekedési üteme, míg La Niña időszakokban lassabb, azaz az emberi kibocsátásból átmenetileg nagyobb, illetve kisebb hányad marad a légkörben. Kézenfekvő lenne feltételezni, hogy az El Niño időszakokban felmelegedő felszíni vizekből az átlagosnál több szén-dioxid gázosodik ki, azaz csökken a nettó szénfelvétel a légkörből, míg La Niña időszakokban nő. Ez azonban nem így van. A felmelegedő felszín, az így kialakuló stabilabb rétegződés akadályozza az oldott szénben gazdag hideg mélységi víztömeg feláramlását, és így még valamelyest csökken is a kigázosodás (Kim et al., 2016; Liao et al., 2020). A légköri szén-dioxid koncentráció növekedési ütemének pozitív anomáliájáért az El Niño/La Niña jelenség hatásaira érzékenyen reagáló szárazföldi bioszféra felel. Az El Niño időszakok sok helyen vízhiánnyal is párosuló magasabb hőmérséklete korlátozza a fotoszintézist és valamelyest növeli a respiráció intenzitását, miközben nő a kiterjedt erdő- és bozóttüzek előfordulása is.

Ugyancsak paradox módon, a nem kevés szén-dioxidot is a légkörbe juttató vulkánkitörések átmenetileg csökkenthetik a légköri koncentráció növekedési ütemét, adott esetben akár a koncentrációt is. Példa erre a Mount Pinatubo 1991. júniusi kitörése. Bár a kitörés egy erőteljes El Niño időszakra esett, a szén-dioxid légköri

koncentrációjának növekedési üteme 1991–1992-ben alacsonyabb volt, mint a környező években (3.C ábra). A sztratoszférába került nagymennyiségű vulkáni por, hamu és szulfátrészecskéket képző kén-dioxid hatására átmenetileg csökkent a felszín elé érő besugárzás. A globálisan alacsonyabb hőmérséklet mérsékelte a növényzet respirációját, a szórt sugárzás megerősödése pedig növelte a fotoszintézis intenzitását (Gu et al., 2003).

A bioszféra ez a nagyfokú érzékenysége egyik évről a másikra akár 1,5 ppm/év-vel is megváltoztathatja a légköri szén-dioxid koncentráció növekedési ütemét, ami már összemérhető a teljes emberi kibocsátás által okozott, az utóbbi évek átlagában 2,5 ppm/év körüli növekedési ütemmel. Az elmúlt évtizedek adatai alapján a légköri koncentráció növekedési ütemében a bioszféra változó viselkedésének tulajdonítható szórás 0,6 ppm/év körül van.

Az emberi kibocsátásban a 2020. évi COVID-19 járvány, a kapcsolódó lezárások csaknem 6%-os visszaesést okoztak. Ez, az átlagos, 44%-os légkörben maradó hányadot feltételezve kb. 0,15 ppm-mel foghatta vissza a 2020. évi CO<sub>2</sub> koncentráció növekedést. Ahogy ez a 3.F ábrán látható, ez bőven a fent említett jelentős természetes ingadozás tartományán (3.E ábra) belül van. Ezért sem ez, sem a kibocsátás következő évi „visszapattnása” a légköri növekedési ütemben, a koncentráció menetében nem mutatható ki. Hasonlóan kimutathatatlant volt a 2009. évi globális gazdasági válság hatása. Míg a hosszabb távú változásokat az emberi tevékenység dominálja (3.C és 3.D ábra), az évek közötti növekedésiütem-ingadozást a természet (3.E és 3.F ábra).

## Összefoglalás

A fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával és a cementgyártással az ember meglehetősen pontosan dokumentált módon évente 9,8 Gt szén-dioxidot bocsát a levegőbe (2015–2024. évi átlag), döntő részben szén-dioxid formájában. Ehhez járul – kevésbé pontos becslések alapján – 1,4 Gt az erdőirtásokból, a földhasználat változtatásból. A közel 200 nagypontosságú mérőhely adatai alapján kisebb mint 3%-os bizonytalansággal tudjuk, hogy a légkör széntartalma a 2015–2024 közötti időszakban évente 5,6 Gt-val gyarapodott (Friedlingstein et al., 2025). A növekmény döntő részének fosszilis eredetű (szén, kőolaj, földgáz) az izotóppszététel mérések igazolják. A növekvő légköri szén-dioxid koncentráció és néhány más tényező (nitrogénbevitel, éghajlatváltozás), továbbá fizikai-kémiai folyamatok hatására az emberi tevékenység révén a légkörbe bocsátott szénmennyiség mintegy felét a bioszféra és az óceánok kivonják, fékezve az ember gerjesztette globális éghajlatváltozást. Bár a mérésekkel is alátámasztott folyamatok egyértelműek, mégis időről időre találkozunk azzal a kérdéssel, hogy tényleg az ember okozza-e a szénfelhalmozódást a légkörben? Félretéve az eddig tárgyalt, a szén globális biogeokémiai körforgalmára vonatkozó ismereteinket, adódhat a kérdés: ha az évről évre növekvő, jelenleg évi 5,6 gigatonnányi légköri növekmény meghatározó módon a bioszférából és/vagy az óceánokból és/vagy a geológiai folyamatokból származna, akkor hová a manóba tűnik az ember által évente a légkörbe bocsátott 11,2 Gt?

## Irodalomjegyzék

- Ballantyne, A.P., Alden, C.B., Miller, J.B., Tans, P.P., White, J.W.C., 2012: Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* 488, 70-72. <https://doi.org/10.1038/nature11299>
- Bennett, B.F., Salawitch, R.J., McBride, L.A., Hope, A.P., Tribett, W.R., 2024: Quantification of the airborne fraction of atmospheric CO<sub>2</sub> reveals stability in global carbon sinks over the past six decades. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129, e2023JG007760. <https://doi.org/10.1029/2023JG007760>
- Bolin, B., 1977: Changes of land biota and their importance for the carbon cycle. *Science* 196, 613-615. <https://doi.org/10.1126/science.196.4290.613>
- Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cunha, L.C.d., Cox, P.M., Eliseev, A.V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P.K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., Zickfeld, K., 2021: Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 673-816. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
- Carroll, J.J., Slupsky, J.D., Mather, A.E., 1991: The solubility of carbon dioxide in water at low pressure. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 20, 1201-1209. <https://doi.org/10.1063/1.555900>
- Chen, W., Ciais, P., Yu, K., Viovy, N., Li, S., Tan, L., 2026: Millennial land carbon emissions in China offset by carbon sinks of the past four decades. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70049-3>
- Derry, L.A., 2024: Closing the geologic carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121, e2409333121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2409333121>
- Dong, G., Jiang, F., Zhang, Y., Ju, W., Piao, S., Ciais, P., Peters, W., Lujikx, I.T., Liu, J., Chevallier, F., Zeng, N., Tian, X., Maksyutov, S., Sonnentag, O., Arain, M.A., Barr, A.G., Huang, Y., Yue, C., Yuan, W., Liu, L., Fan, L., Yue, X., Xiao, J., Li, X., Sitch, S., Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Knauer, J., Arora, V., Kennedy, D., Ma, L., Thornton, P.E., Séférian, R., Nützel, T., Heinke, J., Sun, Q., Zaehle, S., Peylin, P., Kato, E., Alcock, H., Lecavalier, B., Wu, M., Wang, J., Zhang, L., Lv, G., Zhang, Y., Zhao, D., Chen, J.M., 2026: Canadian net forest CO<sub>2</sub> uptake enhanced by heat drought via reduced respiration. *Nature Geoscience* 19, 145-152. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01875-1>
- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Nierdtscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., Luyssaert, S., 2018: Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature* 553, 73-76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- Foley, S.F., Fischer, T.P., 2017: An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle. *Nature Geoscience* 10, 897-902. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0002-7>
- Friedlingstein, P., Funck, I., Holland, E., John, J., Braeser, G., Erickson, D., Schimel, D., 1995: On the contribution of CO<sub>2</sub> fertilization to the missing biospheric sink. *Global Biogeochemical Cycles* 9, 541-556. <https://doi.org/10.1029/95GB02381>
- Friedlingstein, P., Le Quéré, C., O'Sullivan, M., Hauck, J., Landschützer, P., Lujikx, I.T., Li, H., van der Woude, A., Schwingshackl, C., Pongratz, J., Regnier, P., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Canadell, J.G., Ciais, P., Gasser, T., Jones, M.W., Lan, X., Morgan, E., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Sitch, S., Tian, H., 2026: Emerging climate impact on

- carbon sinks in a consolidated carbon budget. *Nature* 649, 98-103. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09802-5>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijckx, I.T., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J.G., Ciais, P., Aas, K., Alin, S.R., Anthoni, P., Barbero, L., Bates, N.R., Bellouin, N., Benoit-Cattin, A., Berghoff, C.F., Bernardello, R., Bopp, L., Brasika, I.B.M., Chamberlain, M.A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Collier, N.O., Colligan, T.H., Cronin, M., Djeutchouang, L., Dou, X., Enright, M.P., Enyo, K., Erb, M., Evans, W., Feely, R.A., Feng, L., Ford, D.J., Foster, A., Fransner, F., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Goncalves De Souza, J., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Guenet, B., Gürses, Ö., Harrington, K., Harris, I., Heinke, J., Hurtt, G.C., Iida, Y., Ilyina, T., Ito, A., Jacobson, A.R., Jain, A.K., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jones, S.D., Kato, E., Keeling, R.F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Kong, Y., Korsbakken, J.I., Koven, C., Kunimitsu, T., Lan, X., Liu, J., Liu, Z., Lo Monaco, C., Ma, L., Marland, G., McGuire, P.C., McKinley, G.A., Melton, J., Monacci, N., Monier, E., Morgan, E.J., Munro, D.R., Müller, J.D., Nakaoka, S.I., Nayagam, L.R., Niwa, Y., Nutz, T., Olsen, A., Omar, A.M., Pan, N., Pandey, S., Pierrot, D., Qin, Z., Regnier, P.A.G., Rehder, G., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan, T.M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Skjelvan, I., Smallman, T.L., Spada, V., Sreesh, M.G., Sun, Q., Sutton, A.J., Sweeney, C., Swingedouw, D., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tian, X., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van Ooijen, E., van der Werf, G., van de Velde, S.J., Walker, A., Wanninkhof, R., Yang, X., Yuan, W., Yue, X., Zeng, J., 2025: Global Carbon Budget 2025. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 2025, 1-139. <https://doi.org/10.5194/essd-2025-659>
- Gruber, N., Bakker, D.C.E., DeVries, T., Gregor, L., Hauck, J., Landschützer, P., McKinley, G.A., Müller, J.D., 2023: Trends and variability in the ocean carbon sink. *Nature Reviews Earth & Environment* 4, 119-134. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00381-x>
- Gu, L., Baldocchi, D.D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Michalsky, J.J., Urbanski, S.P., Boden, T.A., 2003: Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science* 299, 2035-2038. <https://doi.org/10.1126/science.1078366>
- Hansell, D., Carlson, C., Repeta, D., Schlitzer, R., 2009: Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography* 22, 202-211. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.109>
- Haszpra, L., 2022: Fejezetek az üvegházhatás-kutatás történetéből. *Magyar Tudomány* 183, 57-68. <https://doi.org/10.1556/2065.183.2022.1.5>
- Haszpra, L., 2025: A légkör szerepe az éghajlati rendszerben. *Légkör* 70, 134-142. <https://doi.org/10.56474/legkor.2025.3.1>
- Hilton, R.G., West, A.J., 2020: Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 284-299. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>
- Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S.E., Hugelius, G., Kramer, M.G., Piñeiro, G., 2017: The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48, 419-445. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>
- Kellogg, L.H., Turcotte, D.L., Lokavarapu, H., 2019: On the role of the Urey reaction in extracting carbon from the Earth's atmosphere and adding it to the continental crust. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 6. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00062>
- Kim, J.-S., Kug, J.-S., Yoon, J.-H., Jeong, S.-J., 2016: Increased atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate during El Niño driven by reduced terrestrial productivity in the CMIP5 ESMs. *Journal of Climate* 29, 8783-8805. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00672.1>
- Liao, E., Resplandy, L., Liu, J., Bowman, K.W., 2020: Amplification of the ocean carbon sink during El Niños: Role of poleward Ekman transport and influence on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles* 34, e2020GB006574. <https://doi.org/10.1029/2020gb006574>
- Monnin, E., Indermuhle, A., Dällenbach, A., Flückiger, J., Stauffer, B., Stocker, T.F., Raynaud, D., Barnola, J.-M., 2001: Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the Last Glacial Termination. *Science* 291, 112-114. <https://doi.org/10.1126/science.291.5501.112>
- Remick, K.A., Helmann, J.D., 2023. Chapter One - The elements of life: A biocentric tour of the periodic table, In: *Advances in Microbial Physiology* [Eds.: Poole, R.K., Kelly, D.J.], Academic Press, 1-127.
- Rubino, M., Etheridge, D.M., Thornton, D.P., Howden, R., Allison, C.E., Francey, R.J., Langenfelds, R.L., Steele, L.P., Trudinger, C.M., Spencer, D.A., Curran, M.A.J., van Ommen, T.D., Smith, A.M., 2019: Revised records of atmospheric trace gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 473-492. <https://doi.org/10.5194/essd-11-473-2019>
- Tans, P.P., Fung, I.Y., Takahashi, T., 1990: Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science* 247, 1431-1438. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1431>
- WMO, 2025: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2024. *WMO Greenhouse Gas Bulletin* 21, <https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-21>
- Wolkovich, E.M., Ettinger, A.K., Chin, A.R., Chamberlain, C.J., Baumgarten, F., Pradhan, K., Manzanedo, R.D., Hille Ris Lambers, J., 2025: Why longer seasons with climate change may not increase tree growth. *Nature Climate Change* 15, 1283-1292. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02476-x>