



Metán: az ózonképződéstől az éghajlatváltozásig

Haszpra László

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

DOI: 10.56474/legkor.2024.1.3

A metán a légkörben legnagyobb mennyiségben előforduló szerves vegyület. Kémiai reakciói révén meghatározó szerepet tölt be a troposferikus ózonképződésben, üvegházhatású gázként pedig nem elhanyagolható mértékben befolyásolja a Föld éghajlatát. A tanulmány áttekinti a légköri metán forrásait és nyelőit, a metán által vezérelt légköri kémiai folyamatokat, továbbá a metánkoncentráció időbeli alakulását.

Methane: from ozone formation to climate change

Methane is the most abundant organic compound in the atmosphere. Through its chemical reactions, it plays a major role in the formation of tropospheric ozone, and as a greenhouse gas, it has a non-negligible influence on the Earth's climate. The paper reviews the sources and sinks of atmospheric methane, the chemical processes driven by methane, and the evolution of the atmospheric methane concentration.

Bevezetés

A légkört alkotó nyomgázok között mennyiségi szempontból a metán meglehetősen előkelő helyet foglal el. Az oxigén után a második legnagyobb mennyiségben jelen lévő kémiaiilag reaktívnak mondható anyag a száraz levegőben, emellett fizikai tulajdonságai miatt jelentős hatást gyakorol a Föld éghajlatára is.

A metán felfedezése Alessandro Volta nevéhez fűződik, aki 1777-ben tette közzé, hogy a mocsarakból feltörő légbuborékokban éghető gázt azonosított (*Volta*, 1777). A jelenségből, mai szemmel nézve, következtethetett volna arra, hogy akkor a metán bizonyára a levegőben is megtalálható, de ez nem történt meg. Így, e felismerés hiányában, a metán légköri jelenlétének felfedezését általában Marcel Migeotte flamand csilla-

gász nevéhez kötik, aki 1948-ban a légkörön áthatoló napsugárzás infravörös spektrumát elemezve bukkant a metánra (*Migeotte*, 1948).

A metán forrásai és nyelői

Metán képződhet biogén, pirogén és termogén módon. Biogén metánról akkor beszélünk, amikor a szerves anyagok anaerob lebontása során a metanogén mikroorganizmusok anyagcseretermékeként keletkezik metán. Ilyen folyamatok zajlanak a lápos, mocsaras, vizenyős területeken, a hasonló környezetet mutató rizsföldeken, a szerves hulladékok lebomlása, kezelése során, de ez történik a természetes és a kérődzők emésztőrendszerében is. A szerves anyagok tökéletlen égése során keletkező metán a pirogén metán.

Ez a biomassza égésekor, égetésekor, illetve a biomasszából készülő bioüzemanyagok felhasználása során kerülhet a levegőbe. A föld mélyébe süllyedő szerves anyagokból a nagy nyomás és magas hőmérséklet hatására is keletkezhet metán. Az ily módon keletkező metánt nevezzük termogén metánnak. Ez jelenik meg a kőolaj és széntelepek kísérőgázában, ez alkotja a földgáz döntő részét, de a különböző vulkanikus jellegű folyamatokból felszabaduló metán is jellemzően termogén eredetű.

A metán egy szénatomból és négy hidrogénatomból álló molekula (CH₄), amelyben a szén lehet 12-es, 13-as és 14-es tömegszámú, míg a hidrogén 1-es, 2-es és 3-as tömegszámú. Legnagyobb gyakorisággal a könnyű, 12-es tömegszámú szénből és könnyű hidrogénatomból álló metánmolekulákkal (¹²C¹H₄) találkozunk, de néhány más izotopológia¹ is mérhető mennyiségben van jelen a természetben (pl. ¹³C¹H₄, ¹²C¹H₃²H, ¹³C¹H₃²H stb.). A különböző folyamatokban a metánizotopológok más és más arányban keletkeznek, ezért az izotópösszetétel-vizsgálatok segítenek a források beazonosításában (Sherwood et al., 2017).

A globális metánkibocsátást, hasonlóan más légköri nyomanyagok kibocsátásához, két módon becsülhetjük meg. Egyrészt általánosíthatjuk az egyes jellemző forrástípusokra vonatkozó közvetlen hozamméréseket, mintegy alulról felfelé megbecsülve a légkörbe kerülő teljes anyagmennyiséget. Ezt az „alulról felfelé” módszert a szaknyelv bottom-up közelítésnek nevezi. Másrészt kihasználhatjuk, hogy a légköri koncentráció tér- és időbeli változásaiból, a légköri terjedést figyelembe véve, „felülről lefelé” következtethetünk a különböző földrajzi területek kibocsátására (top-down közelítés), melyeket összegezhethetünk. A top-down megközelítéssel csak területekre tudunk forráshozamot becsülni. Forrástípusra vonatkozó adatot csak akkor kaphatunk, ha az adott forrástípus a számítási területet kizárólagosan jellemzi (pl. óceán). A területi felbontást erősen korlátozza a rendelkezésre álló mérőhálózat sűrűsége, illetve a terjedési modellek bizonytalansága. Elvileg a bottom-up és a top-down közelítésnek ugyanarra a globális kibocsátásértékre kell vezetnie. Mindkét eljárásnak megvannak azonban a módszertani problémái, melyek miatt kisebb-nagyobb mértékben eltérő eredményre vezetnek. A globális természetes metánkibocsátás esetében az eltérés különösen nagy, jelezve a becslések nagy bizonytalansági tartományát (1. táblázat). Az eseti, pontszerű méréseken alapuló bottom-up becslés lényegesen nagyobb hozamokat becsül az édesvízi és geológiai forrásokra, mint a top-down megközelítés (Saunois et al., 2020).

Természetes források	Tg/év
folyók, tavak	159 (117-212)
mocsarak, lápok	149 (102-182)
geológiai források	45 (18-65)
természetes	9 (3-15)
óceánok	6 (4-10)
vadon élő állatok	2 (1-7)
permafroszt	1 (0-1)
Összesen (bottom-up)	371 (245-488)
Összesen (top-down)	215 (183-248)

Antropogén források	Tg/év
állattenyésztés	109 (106-115)
olaj- és földgázkiterm.	70 (68-73)
hulladékkezelés	64 (55-77)
szénbányászat	38 (36-39)
rizstermesztés	31 (25-37)
biomassza égetés	17 (14-26)
bioüzemanyagok	10 (8-13)
közlekedés	5 (1-11)
ipari folyamatok	3 (1-5)
Összesen	356 (335-383)

1. táblázat. A természetes és antropogén metánkibocsátás 2008-2017 között és a becslések bizonytalansági tartománya (Canadell et al., 2021). Az adatok kis mértékben eltérnek a Saunois és munkatársai által számított (Saunois et al., 2020), a Légkör 2022. évi 2. számában is idézett (Haszpra, 2022) értékektől az időközben elvégzett pontosítások miatt.

Az antropogén források becslése kevésbé bizonytalan, a kétféle megközelítés lényegében egyező eredményt ad (1. táblázat). A legnagyobb tétel az állattenyésztés, a kérődzők metabolizmusa és a kapcsolódó trágyakezelés. A második legnagyobb tétel a kőolaj- és földgázkitermelés, a gázvezetékek szivárgása. A szénbányákban a széntelepek kísérőgázaként van jelen a metán, a süjtőlég, amelyet mindenképpen ki kell szellőztetni a robbanásveszély elkerülésére. Hasonló nagyságrendű a rizstermesztés metánkibocsátása, ami a vízzel elárasztott termőföldeken zajló anaerob bomlás eredménye. Mindent összevetve, napjainkban a légkörbe kerülő metán 50–60%-a antropogén eredetű lehet.

¹ Azokat az azonos atomi összetételű és szerkezetű molekulákat nevezzük izotopológoknak, melyek csak izotópösszetételükben térnek el egymástól.

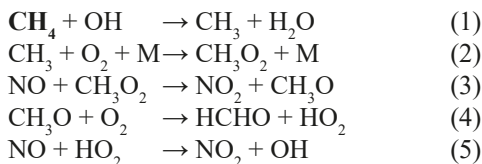
Feltételezve egy (kvázi)stabil összetételű légkört, ami bekerül, annak valamilyen formában, valamilyen módon ki is kell kerülnie onnan (2. táblázat). A metán egy kis része a talaj felé távozik a troposzférából: a talajlakó metanotróf mikroorganizmusok feldolgozzák, szén-dioxiddá oxidálják. A troposzférából a talaj felé távozó metánmennyiséghez hasonló mennyiség távozik a sztratoszférába. A légkörbe kerülő metán bő 90%-át azonban a troposzférikus kémiai reakciók távolítják el a levegőből. Itt a döntő szerepet a hidroxil gyökkel (OH) való reakció játssza.

Nyelők	Tg/év
talaj	30 (11-49)
sztratoszféra	31 (12-37)
CH ₄ + Cl	11 (1-35)
CH ₄ + OH	560 (483-682)
Összesen (bottom-up)	632 (507-803)
Összesen (top-down)	551 (501-572)

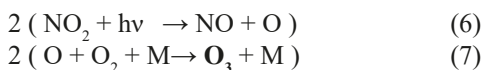
2. táblázat. A troposzférikus metán nyelőfolyamatainak hozama 2008-2017 között és a becslések bizonytalansági tartománya (Canadell et al., 2021).

A metán szerepe az ózonképződésben

A metán oxidációját a hidroxil gyök indítja be. A reakcióláncban képződő szerves és szervetlen gyökök, külső elektronhéjukon párosítatlan elektront tartalmazó, és ezért igen reaktív molekulák, a légkörben természetes módon is jelen lévő nitrogén-monoxidot (NO) nitrogén-dioxiddá oxidálják (NO₂):



Egy metánmolekula oxidációja során két molekula nitrogén-monoxid oxidálódik nitrogén-dioxiddá. A nitrogén-dioxid fény (hv) hatására elbomlik nitrogén-monoxidra és atomos oxigénre, ez utóbbi pedig a levegő oxigénmolekuláival ózonná egyesül:

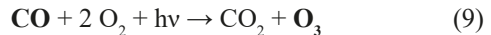


Ha végignézzük a reakcióláncot, akkor azt látjuk, hogy az (1) reakcióban felhasznált hidroxil gyökök

az (5) lépésben visszakapjuk, a keletkező metil (CH₃), metil-peroxi (CH₃O₂), metoxi (CH₃O) és hidroperoxil gyököt (HO₂) pedig fel is használjuk a reakcióláncon belül, de ugyanez történik a (6) reakcióban keletkező atomos oxigénnel is. A (3) és (5) lépésben elhasznált két nitrogén-monoxid molekulát pedig a (6) reakcióval kapjuk vissza. Az összevont, bruttó kémiai reakcióban tehát egy metánmolekulából két ózonmolekula keletkezik:



Az anyagmérleg tekintetében hasonlóan zajlik le a szén-monoxidnak (CO) az ugyancsak a hidroxil gyök által elindított (CO + OH) oxidációja is. Ebben a folyamatban azonban egy szénmonoxid-molekulából csak egy ózonmolekula keletkezik, ahogy ezt az összevont, bruttó reakció mutatja:



Bár a szén-monoxid jóval reaktívabb, mint a metán, légköri koncentrációja azonban egy nagyságrenddel kisebb, és fent látható módon ózonképző hatékonysága is alacsonyabb. A szennyeztelen troposzférában az ózon döntő része metánból keletkezik, így a metán-koncentráció alakulása kihat a növényi károkat okozó troposzférikus ózon mennyiségére is.

A teljesség kedvéért meg kell említeni, hogy ózon a természetes forrásokból származó reaktív szénhidrogénekből is keletkezik, ezek mennyisége azonban a szennyeztelen troposzférában csekély, járuléka kicsi. Merőben más azonban a helyzet a szennyezett légkörben. Az emberi kibocsátás, az eleve magas háttérkoncentráció miatt, a metánkoncentrációt ilyen környezetben is csak néhányszor tíz százalékkal növeli, miközben a tiszta levegőben csak nagyon csekély mennyiségben jelen lévő reaktív szénhidrogénekét nagyságrendekkel. Szennyezett területeken ezért az ózonképződésben a reaktív szénhidrogének játsszák a meghatározott szerepet, a metán hozzájárulása olyannyira csekély lehet, hogy adott esetben esetleg el is hanyagolható.

Egy kis reakciókinetikai kitérő

Hogy melyik nyomanyagból mennyi ózon lesz, azt alapvetően meghatározza a kiinduló lépés, az adott anyag és a hidroxil gyök reakciójának a sebessége, az időegység alatt elreagáló molekulák száma. Egy kémiai reakció sebessége, a kiindulási anyagok időegység alatti koncentráció-változása arányos a reakcióban részt vevő anyagok koncentrációjának szorzatával [1].

A reakció végbemenetelének az atomok/molekulák találkozásán kívül energetikai feltétele is van. Ezt fejezi ki a k arányossági tényező, amit az adott reakció sebességi együtthatójának nevezünk. Ha az összefüggést nem a keletkező, hanem az elreagáló, fogyó anyagokra írjuk fel, akkor szükségünk van még egy negatív előjelre is, hiszen az anyagmennyiség csökken:



$$d[A]/dt = -k[A][B], \quad (11)$$

ahol szögletes zárójellel a reakcióban résztvevő anyagok koncentrációját jelöltük. Feltételezve a B reagens állandó koncentrációját és eltekintve attól, hogy a sebességi együttható jellemzően a hőmérséklet függvénye, az A anyag koncentrációjának időbeli alakulása egyszerű formában megadható:

$$[A]_t = [A]_0 e^{-k[B]t}, \quad (12)$$

ahol $[A]_0$ a 0 időpontra, míg $[A]_t$ a t időpillanati koncentrációt jelöli. A fenti feltételek mellett A anyag koncentrációja időben exponenciálisan csökken. Azt az időt, amennyi idő alatt a kiindulási koncentráció e -ad részére csökken az adott anyag (kémiai) élettartamának nevezzük. Átlagos légköri viszonyok között metán esetében ez kb. 12 év, ami jelzi, hogy eléggé mérsékelten reaktív anyagról van szó.

A légkör nagyjából állandó összetétele megköveteli, hogy a kémiai reakciókban fogyatkozó (vagy más módon a légkörből kikerülő) anyagoknak utánpótlása is legyen. Ezért is bátorítottunk a fenti differenciálegyenletben B koncentrációját állandóként kezelni. Az anyagutánpótlást a fenti (11) differenciálegyenletnek egy nyereséget jelző taggal (E) való kibővítésével vehetjük figyelembe:

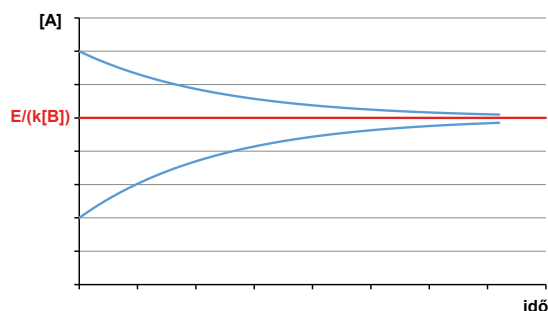
$$d[A]/dt = -k[A][B] + E, \quad (13)$$

Feltételezve ennek a tagnak az állandóságát, A anyag koncentrációjának időbeli alakulása a következő formában írható le:

$$[A]_t = [A]_0 e^{-k[B]t} + E(1 - e^{-k[B]t})/(k[B]) \quad (14)$$

A (14) egyenletben az exponenciális tagok idővel nullához tartanak, ezért a koncentráció exponenciális lefutással egy, az anyagutánpótlás által meghatározott koncentrációhoz tart (1. ábra). Konkrétan, a metánra megfogalmazva: ha a környezeti feltételeket állandónak tekintjük, akkor bármilyen kibocsátáshoz létezik

egy egyensúlyi koncentráció, melynél a koncentráció-függő kémiai fogyás egyensúlyba kerül a kibocsátás általi anyagutánpótlással. Ennek értéke a fentiek alapján $E/(k[B])$.

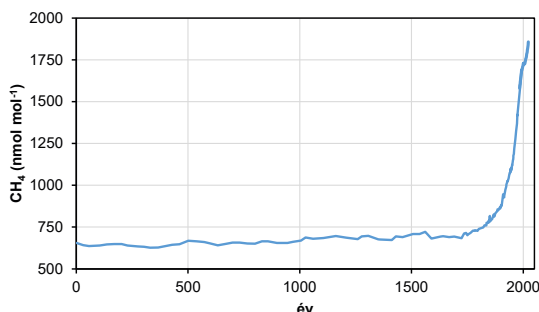


1. ábra. A koncentráció a kiindulási értéktől függően alulról vagy felülről időben exponenciálisan közelít az egyensúlyi értékhez, melynél az időegység alatti koncentráció-függő kémiai fogyás azonossá válik a kibocsátás által a légkörbe juttatott anyagmennyiséggel.

A metánkoncentráció alakulása

A légköri metán forrásainak tárgyalása során láttuk, hogy jelenleg az emberi tevékenység révén kerül a légkörbe a metánmennyiség legalább fele. Ennek nagy része az élelmiszertermeléshez és az energiatermeléshez kapcsolódik, így élelmiszer- és iparstatisztikai adatok böngészése nélkül is sejthető, hogy a távolabbi múltban az emberi kibocsátás lényegesen alacsonyabb lehetett. Az emberiség lélekszámának növekedésével egyre több élelmiszerre lett szükség, így nőtt az állattenyésztéshez és a rizstermesztéshez kapcsolódó metánkibocsátás. Nőtt ezzel a szerves hulladék képződése is. Különösen az elmúlt két-háromszáz évben az energiaigény is intenzív növekedésnek indult. Kezdetben a szén, a 20. századtól pedig egyre inkább a földgáz és a kőolaj is meghatározó energiahordozóvá vált. Az ipari folyamatok mellett belépett a közlekedés is a nagy kibocsátók közé. Összességében az elmúlt évtizedekben, néhány évszázadban jelentősen nőtt az emberi tevékenységhez köthető metánkibocsátás, ennek következtében pedig gyors ütemben nőni kezdett az egyre emelkedő kibocsátáshoz tartozó egyensúlyi szintet elérni próbáló légköri metánkoncentráció is (2. ábra).

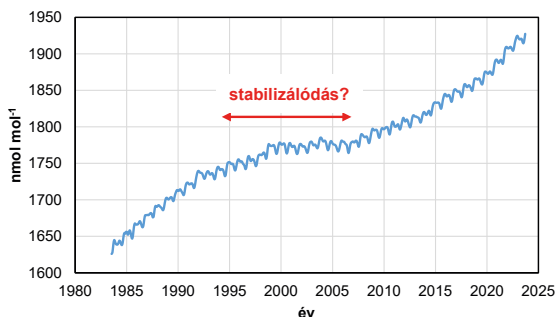
A metán úgynevezett üvegházhatású gáz, amely részben elnyeli a felszínről kiinduló, illetve magából a légkörből származó hőmérsékleti sugárzást. Az elnyelt energiát részben a felszín felé sugározza vissza, szabályozva ezzel bolygónk éghajlatát.



2. ábra. A metán légköri koncentrációjának alakulása a Déli-sarkvidéken idősámításunk kezdetétől napjainkig Macfarling Meure et al. (2006) (1-1993) és a NOAA [2] (1983-2022) adatai alapján. Az északi félgömbön tapasztalható magasabb koncentrációk miatt a globális átlagkoncentráció [3] mintegy 50 nmol mol⁻¹-al haladja meg a Déli-sarkvidéken mért értéket².

Az emelkedő metánkoncentráció tehát nem csak a környezetkárosító troposferikus ózon termelődését erősíti, de a Föld éghajlatának megváltozását is okozza. Ráadásul a nagy természetes metánforrások, például a mocsarak, vizenyős területek kibocsátása erősen éghajlatfüggő, azaz az emelkedő koncentráció bonyolult visszacsatolási folyamatokat indít meg. Az iparosodás kezdetétől az emberi tevékenységgel okozott légköri energetikai változásokat a sugárzási kényszerrel jellemezzük. Manapság ennek kb. 22%-át adja a metán, beleértve a sztratoszférában a metán oxidációjából keletkező vízgőzt is (Forster et al., 2021).

Kiterjedtebb rendszeres légköri metánkoncentráció mérések az 1980-as évek óta folynak egyrészt a NOAA globális mérőhálózatában, másrészt a WMO Global Atmosphere Watch program keretében. Az 1990-es évekre a metánkoncentráció emelkedése lelassult,



3. ábra. A metán globális átlagkoncentrációjának alakulása a kiterjedtebb mérések kezdetétől napjainkig a NOAA mérőhálózatának adatai alapján [3].

gyakorlatilag megállt. Ez azt sugallta, hogy a kibocsátás növekedése megállt, stabilizálódott, a koncentráció konvergálni kezdett az adott kibocsátásnak megfelelő egyensúlyi koncentrációhoz (3. ábra). A kibocsátás-becslések bizonytalansága mellett nem lehetett megmondani, hogy mely források kibocsátása csökkent, melyeké nőtt, hogyan állt elő a bruttó kibocsátás stabilizálódása, de tudományosan és éghajlatpolitikailag is jó volt abban bízni, hogy a metánkibocsátás növekedése talán már nem okoz tovább növekvő gondokat – ha már a szén-dioxid kibocsátás mérséklésében egy tapodtat sem sikerült előre lépni. Racionális magyarázatnak tűnt, hogy a Szovjetunió és a kelet-európai országok nehéziparának 1990-es évek elejei összeomlása eredményezhette a globális antropogén metánkibocsátás csökkenését vagy stabilizálódását.

A 2000-es évek végén azonban a koncentráció ismét emelkedni kezdett, és gyorsan kiderült, hogy nem valami természetes ingadozást, hanem egy erőteljesen emelkedő trend kezdetét látjuk. Az emberi kibocsátás növekedéséből ilyen gyors emelkedésre nem lehet következtetni. Felmerült, hogy talán a korábbi évek koncentrációnövekedés-lassulása volt valamilyen természetes anomália, és ez után csupán helyreállt a világ rendje, a gyorsuló növekedést az emberi kibocsátással azonban így sem lehet meggyőző módon alátámasztani.

A metánkoncentráció növekedésének okai

A légköri koncentráció akkor is emelkedik, ha nem a kibocsátás nő, hanem a nyelő gyengül. Amint az (1) reakciónál láttuk, a metánt meghatározó mértékben a hidroxil gyök fogyasztja. A második legfontosabb hidroxil gyök fogyasztó a szén-monoxid. Ha nő a szén-monoxid koncentrációja, akkor elvonja a hidroxil gyökök egy részét a metántól, lassul a metán oxidációja, a kikerülése, így végső soron változatlan kibocsátás mellett is nőni fog a koncentrációja. A légkör szén-monoxid tartalma azonban, ha enyhén is, de tendenciájában inkább csökkenő, mint növekvő (Zheng et al., 2019). Azaz a metán nyelője feltehetően nem csökken. A hidroxil gyök termelődés tartósabb megemelkedésére sem látszik ok, ami a 2000-es évek elején a metánfogyasztás megnövekedésével

² A metán száraz levegőre vonatkozó mol-arányát, melyet a szakirodalomban is gyakran leegyszerűsítve koncentrációként említenek, ma még sok helyen ppb-ben (parts per billion, 10⁹ térfogatrészt) adják meg. A ppb azonban nem SI mértékegység, ezért a mol-arány (koncentráció) megadására egyre inkább a vele számértékben azonos, SI mértékegységen alapuló nmol mol⁻¹ (nanomol/mol) a használatos.

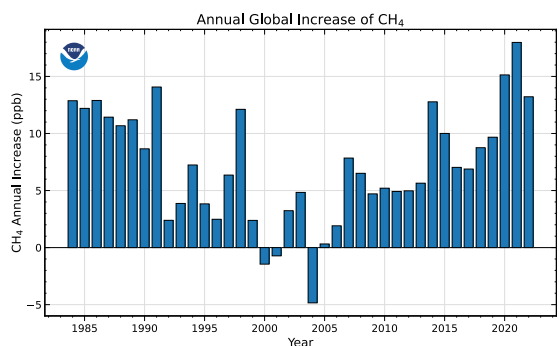
a metánkoncentráció emelkedését lefékezte volna (Zhao *et al.*, 2020). Sajnos, hidroxil gyökből magas reaktivitása miatt olyan kevés van a légkörben (átlagosan csupán minden 10-100 billiomodik molekula a levegőben), hogy mennyiségének közvetlen rendszeres és kiterjedt mérése még jelenleg sem lehetséges.

Ahogy már a metánforrások tárgyalásánál említettük, a különböző források a metánt más és más jellemző izotopológ arányban bocsátják a légkörbe, ami segít a források azonosításában és hozamuk megbecslésében [4]. Ilyen jellegű kutatások Magyarországon is folynak (Varga *et al.*, 2021). Az intenzív iparosodás kezdetétől a közelmúltig a légköri metán fokozatosan egyre „nehézebbé” vált, nőtt a légkörben a $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ arány, ami a fosszilis eredetű és a biomassza égetésből származó pirogén metán növekvő részarányára utalt (Ferretti *et al.*, 2005). Ez a tendencia azonban éppen akkor fordult meg, amikor a 2000-es évek végén a metánkoncentráció újra növekedésnek indult, ami pedig a biológiai források, a mocsarak, vizenyős területek, az állattenyésztés és a rizstermelés növekvő hozzájárulását jelzi (Lan *et al.*, 2021). Alacsony $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ arányú metán származhat az elsősorban az óceánfenéken, a kontinentális talapzaton, másodszorban a tundraövezet fagyott talajában felhalmozódott nagymennyiségű metánhidrátból is.

A korábban szintén említett top-down kibocsátás-becslés során a légköri metánkoncentráció tér-és időbeli változásából, valamint a légköri áramlásokra vonatkozó adatokból az úgynevezett inverz terjedési modellekkel megbecsülhető, hogy hol és mennyi metán kerül a levegőbe. Sokan feltételezték, hogy az emberi kibocsátáson túlmutató metánmennyiség a melegedés miatt lassan felengedő, magas szervesanyag-tartalmú permafrosztból kerül a levegőbe. Az inverz terjedési modellek azonban egyértelműen a trópusi területekre mutattak, jelezve, hogy a metánkibocsátás növekményének legalább 50-60%-a innen kerül a levegőbe, míg a maradék más helyekről, illetve antropogén forrásokból (Thompson *et al.*, 2018; Yin *et al.*, 2021; France *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2022; Shaw *et al.*, 2022). A háttérben nagy valószínűséggel maga az éghajlatváltozás áll. Az éghajlatváltozás miatt a trópusi öv egyes részein, főleg Afrikában és az Amazonas-medence nyugati részén a növekvő csapadékmennyiség miatt nő a mocsaras területek kiterjedése és hosszabb ideig maradnak fenn az időszakos mocsarak is. Mindez emelkedő metánkibocsátáshoz vezet (Nisbet, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

A 2020-2021-es COVID-járvány miatt az üvegházhatású gázok kibocsátásában meghatározó országok többségében kiterjedt lezárások voltak, melyek jelentősen

visszavetették az ipari termelést és a közlekedést, az energiahordozók iránti igényt. Bár az antropogén metánkibocsátás nagyobb része a mezőgazdasághoz kapcsolódik, az energetikai szektor metánkibocsátásának 2020-ra becsült bő 5%-os csökkenése [5] alapján a metánkoncentráció esetében legalább a növekedés ütemének mérséklődését vártuk. Ezzel szemben 2020-ban a növekedés üteme nagyobb volt, mint bármikor korábban a kiterjedtebb mérések kezdete óta. A tempó 2021-ben tovább nőtt, 2022 pedig a 4. legnagyobb éves növekedési ütemet láttuk (4. ábra).



4. ábra. A légköri metánkoncentráció globális átlagának növekedési üteme a NOAA mérőhálózatának adatai alapján [3].

Felmerült, hogy ennek háttérben esetleg a légkör összetételének átmeneti megváltozása áll. Az ipari és közlekedési kibocsátás csökkenése ugyanis nemcsak a metán kibocsátását, hanem a nitrogén-oxidok légköri koncentrációját is csökkentette, ami az (5) folyamaton keresztül a metán oxidációjához rendelkezésre álló hidroxil gyök mennyiséget csökkentette, ezzel fékezve a metán távozását a légkörből (Stevenson *et al.*, 2022). A becsülhető változások azonban nem elegendők a tapasztalt metánkoncentráció-növekedés megmagyarázásához, és a földrajzi eloszlás sem támasztja alá, hogy ez lenne a fő ok. Nagy valószínűséggel a természetes metánkibocsátás további növekedése is benne van a 2020-ban észlelt erőteljes koncentráció-emelkedésben (Feng *et al.*, 2023).

A növekvő metánkoncentráció erősödő üvegházhatáshoz, gyorsuló éghajlatváltozáshoz és potenciálisan még több metán légkörbe kerüléséhez vezethet. Ez a pozitív visszacsatolás az éghajlatváltozás és a metánkibocsátás között ellehetlenítheti éghajlatvédelmi céljaink elérését.

A cikk a Magyar Meteorológiai Társaság Levegőkörnyezeti Szakosztályának 2023. április 13-i ülésén elhangzott előadás szerkesztett, rövidített változata.

Irodalom

- 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., and 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>, 2021
- Feng, L., Palmer, P. I., Parker, R. J., Lunt, M. F., and Bösch, H., 2023: Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 4863–4880, <https://doi.org/10.5194/acp-23-4863-2023>, 2023
- Feng, L., Palmer, P. I., Zhu, S., Parker, R. J., and Liu, Y., 2022: Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate, *Nature Communications*, 13, 1378, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>, 2022
- Ferretti, D. F., Miller, J. B., White, J. W. C., Etheridge, D. M., Lassez, K. R., Lowe, D. C., Meure, C. M. M., Dreier, M. F., Trudinger, C. M., van Ommen, T. D., and Langenfelds, R. L., 2005: Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years., *Science*, 309, 1714–1717, <https://doi.org/10.1126/science.1115193> 2005
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J. L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H., 2021: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity, 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., 2021.
- France, J. L., Lunt, M. F., Andrade, M., Moreno, I., Ganesan, A. L., Lachlan-Cope, T., Fisher, R. E., Lowry, D., Parker, R. J., Nisbet, E. G., and Jones, A. E., 2022: Very large fluxes of methane measured above Bolivian seasonal wetlands, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, e2206345119, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2206345119>, 2022
- Haszpra, L., 2022: Metán a légkörben: kockázatok és lehetőségek, *Légekör*, 67, 70-76, <https://doi.org/10.56474/legkor.2022.2.1>, 2022
- Lan, X., Basu, S., Schwietzke, S., Bruhwiler, L. M. P., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Sherwood, O. A., Tans, P. P., Thoning, K., Etiope, G., Zhuang, Q., Liu, L., Oh, Y., Miller, J. B., Pétron, G., Vaughn, B. H., and Crippa, M., 2021: Improved Constraints on Global Methane Emissions and Sinks Using $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, *Global Biogeochemical Cycles*, 35, e2021GB007000, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GB007000>, 2021
- MacFarling Meure, C., Etheridge, D., Trudinger, C., Steele, P., Langenfelds, R., van Ommen, T., Smith, A., and Elkins, J., 2006: Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP, *Geophysical Research Letters*, 33, L14810, <https://doi.org/10.1029/2006gl026152>, 2006
- Migeotte, M. V., 1948: Methane in the Earth's Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 107, 400–403, <https://doi.org/10.1086/145024>, 1948
- Nisbet, E. G., 2023: Climate feedback on methane from wetlands, *Nature Climate Change*, 13, 421–422, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01634-3>, 2023
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P. M., Covey, K., Curry, C. L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M. I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K. M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P. B., Langenfelds, R. L., Laruelle, G. G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., McNorton, J., Miller, P. A., Melton, J. R., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R. J., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W. J., Rosentretter, J. A., Segers, A., Simpson, I. J., Shi, H., Smith, S. J., Steele, L. P., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F. N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T. S., van Weele, M., van Werf, G. R., Weiss, R. F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., and Zhuang, Q., 2020: The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>, 2020
- Shaw, J. T., Allen, G., Barker, P., Pitt, J. R., Pasternak, D., Bauguutte, S. J.-B., Lee, J., Bower, K. N., Daly, M. C., Lunt, M. F., Ganesan, A. L., Vaughan, A. R., Chibesakunda, F., Lambakasa, M., Fisher, R. E., France, J. L., Lowry, D., Palmer, P. I., Metzger, S., Parker, R. J., Gedney, N., Bateson, P., Cain, M., Lorente, A., Borsdorff, T., and Nisbet, E. G., 2022: Large Methane Emission Fluxes Observed From Tropical Wetlands in Zambia, *Global Biogeochemical Cycles*, 36, e2021GB007261, <https://doi.org/10.1029/2021GB007261>, 2022
- Sherwood, O. A., Schwietzke, S., Arling, V. A., and Etiope, G., 2017: Global inventory of gas geochemistry data from fossil fuel, microbial and burning sources, version 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 639–656, <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>, 2017
- Stevenson, D. S., Derwent, R. G., Wild, O., and Collins, W. J., 2022: COVID-19 lockdown emission reductions have the potential to explain over half of the coincident increase in global atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 14243–14252, <https://doi.org/10.5194/acp-22-14243-2022>, 2022
- Thompson, R. L., Nisbet, E. G., Pisso, I., Stohl, A., Blake, D., Dlugokencky, E. J., Helmig, D., and White, J. W. C., 2018: Variability in atmospheric methane from fossil fuel and microbial sources over the last three decades, *Geophysical Research Letters*, 45, 11499–11508, <https://doi.org/10.1029/2018GL078127>, 2018
- Varga, T., Fisher, R. E., France, J. L., Haszpra, L., Jull, A. J. T., Lowry, D., Major, I., Molnár, M., Nisbet, E. G., and László, E., 2021: Identification of potential methane source regions in Europe using $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ measurements and trajectory modeling, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033963, <https://doi.org/10.1029/2020JD033963>, 2021
- Volta, A., 1777: Sull' aria infiammabile nativa delle paludi, Nella Stamperia di Giuseppe Marelli, 1777.
- Yin, Y., Chevallier, F., Ciais, P., Bousquet, P., Saunois, M., Zheng, B., Worden, J., Bloom, A. A., Parker, R. J., Jacob, D. J., Dlugokencky, E. J., and Frankenberg, C., 2021: Accelerating methane growth rate from 2010 to 2017: leading contributions from the tropics and East Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 12631–12647, <https://doi.org/10.5194/acp-21-12631-2021>, 2021
- Zhang, Z., Poulter, B., Feldman, A. F., Ying, Q., Ciais, P., Peng, S., and Li, X., 2023: Recent intensification of wetland methane feedback, *Nature Climate Change*, 13, 430–433, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01629-0>, 2023
- Zhao, Y., Saunois, M., Bousquet, P., Lin, X., Berchet, A., Hegglin, M. I., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Deushi, M., Jöckel, P., Kinnison, D., Kirner, O., Strode, S., Tilmes, S., Dlugokencky, E. J., and Zheng, B., 2020: On the role of trend and variability in the hydroxyl radical (OH) in the global methane budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 13011–13022, <https://doi.org/10.5194/acp-20-13011-2020>, 2020
- Zheng, B., Chevallier, F., Yin, Y., Ciais, P., Fortems-Cheiney, A., Deeter, M. N., Parker, R. J., Wang, Y., Worden, H. M., and Zhao, Y., 2019: Global atmospheric carbon monoxide budget 2000–2017 inferred from multi-species atmospheric inversions, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1411–1436, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1411-2019>, 2019

[1] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Reakcióössesség> (2023.05.12.)

[2] <https://gml.noaa.gov/dv/iadv/graph.php?code=SPO&program=ccgg&type=ts> (2024.01.09.)

[3] https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (2024.01.09.)

[4] <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2769/New-analysis-shows-microbial-sources-fueling-rise-of-atmospheric-methane> (2023.05.12.)

[5] <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023> (2023.05.12.)