

Utánpótlás-nevelés a numerikus modellezés szakterületen

Szépszó Gabriella

HungaroMet Nonprofit Zrt, szépszog@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.1.2

A modellezés iránt érdeklődő meteorológus hallgatók számára az egyetemi képzésük kulcseleme a numerikus modellezés oktatása, aminek alapját az ELTÉ-n a numerikus előrejelzés című tantárgy jelenti. A tantárgy többévtizedes múltra tekint vissza, mely miközben megtanítja a meteorológiai modellekben használt numerikus módszerek elméleti hátterét, lehetőséget ad a hallgatóknak a gyakorlati alkalmazásra is, évről évre követve a szakterület fejlesztéseit. Az órákat a HungaroMet Nonprofit Zrt. szakemberei tartják, akik így közvetlen kapcsolatba tudnak kerülni leendő munkatársaikkal. A jelen írás a Magyar Meteorológiai Társaság Dévényi Dezső születésének 75. évfordulójára 2023. december 7-én rendezett ülésen elhangzott előadás összefoglalója.

Education of new numerical modelling experts in meteorology

For meteorologist students at the Eötvös Loránd University who intend to work in the area of modelling, the graduate course entitled Numerical Modelling is of key importance. This course dates back to the 1980s; it explains the theoretical background of the numerical methods applied in meteorology and provides room for practical modelling following the evolution of the area. The lectures are given by modelling practitioners of the meteorological service, who can get in touch with their potential colleagues in this way. The current paper is a summary of the presentation shown in the event organized by the Hungarian Meteorological Society in memory of Dezső Dévényi for his 75th birthday anniversary.

Bevezetés

A numerikus prognosztika, a klímamodellezés vagy a levegőminőségi előrejelzések iránt érdeklődő meteorológus hallgatók számára egyetemi képzésük során nagy jelentősége van a modellezéshez kapcsolódó kurzusoknak. Ezek egyik legfontosabbja a numerikus előrejelzés elnevezésű tantárgy. A kurzus az elméleti és gyakorlati alapok elsajátítása

mellett szemléletmódot is kíván adni a hallgatók számára, amire később a munkájuk során is támaszkodhatnak. Ezek között külön hangsúlyozza az éghajlati és a rövidtávú modellezés közös gyökerét és módszertanát, kiemelten foglalkozik a modellezés közelítő jellegével, valamint az ensemble előrejelzések fontosságával és helyes értelmezésével. Az alábbiakban röviden áttekintjük a numerikus modellezés oktatásának alakulását az elmúlt évtizedek alatt.

Tematika

A numerikus előrejelzés tantárgy 2 félévet ölel fel: az első szemeszter inkább az elméleti alapokra szorítkozik, míg a második gyakorlatiasabb. A tematika épít a szilárd matematikai, fizikai és dinamikus meteorológiai alapokra. Az első órákat a 80-as években Dévényi Dezső adta, aki az „orosz iskolát” követve nagy hangsúlyt fektetett a pontos és mély matematikai háttérre, az adatasszimiláció témájában például részletesen ismertette *Lev Gangyin* számításait. Dezső az órákat kézzel írt jegyzetei alapján tartotta (*Dévényi, 1991*), s a hallgatónak a sikeres vizsgázáshoz érdemes volt az előadásokat látogatni. Amikor egyre több időt töltött az Egyesült Államokban, fiatal kollégáit is bevonta az oktatásba: a 90-es évektől *Horányi András* az adatasszimiláció és a Galjorkin-módszerek, míg *Radnóti Gábor* a véges differencia módszerek és a numerikus stabilitás témájában tartotta megosztva az órákat, illetve időnként *Ihász István* is beugrott.

András és Gábor új fejezetekkel is kiegészítették a tananyagot: például míg Dezső elsősorban az optimális interpolációról beszélt az adatasszimiláció témakörében, András és Gábor bővítette ezt a részt a variációs módszerekkel, amihez az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) továbbképzésére (*Bouttier and Courtier, 1999*) támaszkodtak. Több írott dokumentum is készült ebben az időben, például a Galjorkin-módszerekről a Haltiner-könyv (*Haltiner and Williams, 1983*) alapján. Az egyes fejezetek megértését számos papíron és táblán megoldható számítási példa segíti, melyek a mai napig részei a tananyagnak (egyébként az órákat akkor még írásvetítő segítségével tartották).

Gábor ECMWF-be való távozása után az óráit 2004-től *Szépszó Gabriella* vette át, és vele együtt *Hágel Edit* is csatlakozott az oktatókhoz. Kettejüknek köszönhető a tananyag nagy részének prezentációs formába öntése, az óra honlapjának kialakítása, a diszkretizációs módszerekről, a Galjorkin-módszerekről és az ensemble előrejelzésekről szóló fejezetek kisebb megújítása (pl. *Kalnay, 2002* alapján), valamint a re-analízisekről és az oldalsó határfeltételekről szóló előadások. Később *Böloni Gergely* bővítette az adatasszimilációt a Kálmán-filter elmélettel, illetve *Szűcs Mihálynak* köszönhetően kapnak a hallgatók ma részletes áttekintést a különböző perturbációs módszerekről. András, Gergely, Mihály és Gabriella 2013-ban két egyetemi jegyzetet is készítettek: az egyik (*Szépszó et al., 2013*) a főbb témaköröket tekinti át, a másik (*Szépszó, 2013*) pedig egy példatár. A parametizációk témájával *Práger Tamás* javaslatára bővült a tananyag, ezt az előadást *Allaga-Zsebeházi*

Gabriella gondozza. Az oktatók legfiatalabb generációja, *Jávorné Radnóczy Katalin* és *Kardos-Várkonyi Anikó* csatlakozásával az oktatásban használt eszközök is tovább bővültek, például gyakorlásra is használható, online megoldható kvíz kérdéssorokkal.

A kurzus 2. féléve mindig a hallgatók aktivizálását tűzte ki célul. Ebben a szemeszterben a 2010-es évekig olyan modellezési témákat dolgoztak fel a hallgatók, amiknek a részletes tárgyalására az előző félévben nem jutott idő. A kapcsolódó cikkek feldolgozása után a diákok előadást tartottak például az inicializációról, a szinguláris vektorok módszeréről vagy klímadinamikai témákról. 2010-től felkérés érkezett az ELTE Alkalmazott Analízis és Számításmatematikai Tanszékétől a Modellalkotás és természettudományos alkalmazások című gyakorlat oktatására. 2013-ban a mindkét tantárgyért felelős *Szépszó Gabriella* kísérleti jelleggel összevonta őket és kollégáival teljesen megújította a tartalmat. A szemeszter elején több numerikus modellezéshez kapcsolódó gyakorlati problémát kínálnak fel és mutatnak be. Miután a hallgatók ezek közül választottak, témavezetők segítségével kis csoportokban dolgozzák fel a témákat, az ahhoz kapcsolódó cikkek és szakirodalom áttekintésével, illetve a gyakorlati problémák numerikus szimulációjával. A szimulációkat többnyire az OMSZ szuperszámítógépén végzik, ahol az elmúlt években a különböző feladatokban használták az ALADIN/CHAPEAU, az OpenIFS (*Szépszó et al., 2019*), a SURFEX, az AROME és a Lorenz modelleket. Az elképzelés szerint a meteorológus és az alkalmazott matematikus hallgatók a vegyes csoportokban kölcsönösen megismerhetik az elmélet és a gyakorlat kapcsolatát, aminek hasznát vehetik későbbi pályafutásuk során is, amikor más tudományágak, szakterületek képviselőivel kell együttműködniük. A félév végén a csoportok bemutatják egymásnak és a többi témavezetőnek az elvégzett munkájukat. Az azóta is összevont kurzusra jelentkező hallgatók általában motiváltan dolgoznak a félév során. Ezt a következő idézet is bizonyítja, mely egy a diákoktól az évek során kapott pozitív visszajelzések közül: „Nagyon hasznosnak éreztem, hogy csoportokban kellett dolgoznunk, hiszen a későbbiekben ez elengedhetetlen, és érződött is, hogy e téren még sokat kell fejlődnünk. Szintén pozitívum, hogy a kurzust az Országos Meteorológiai Szolgálat numerikus modellezői tartották, így tőlük a legkorszerűbb tudást kaptuk meg. Véleményem szerint a numerikus előrejelzés 2. az egyik legjobb tantárgy volt az 5 év során, feltette az i-re a pontot, hiszen a megszerzett tudásra építve valós, korszerű feladatokon kellett csoportokban dolgoznunk.”

Az egyetemi keretrendszer

Mind a korábbi osztatlan, mind a jelenlegi bolognai rendszerre épülő egyetemi meteorológus képzésben a numerikus előrejelzésre az utolsó évben kerül sor. Ennek köszönhetően a modellezési szakterület, különösen a meteorológiai szolgálatnál folyó modellezés máig jelentős hátránnyal indul a szakdolgozók és diplomamunkázók bevezetésében, hiszen legkésőbb az utolsó előtti év nyarán a hallgatók már megkezdik a választott témájukkal kapcsolatos munkát. A tantárgy kötelező vagy választható jellege többször változott az elmúlt évtizedekben. Az osztatlan képzés során a teljesítése kötelező előfeltétele volt a meteorológus diploma megszerzésének. A bolognai rendszer kezdetén (ami a numerikus előrejelzés tantárgyat 2010-ben érte el) a Meteorológiai Tanszék kezdeményezésére csak a 2. félév maradt kötelező. Emiatt évekig az a furcsa helyzet állt fenn, hogy a hallgatóknak anélkül kellett gyakorlati feladatokkal foglalkozniuk, hogy előtte az elméleti háttérrel tanultak volna. Az OMSZ kérésére végül kötelezővé tették az 1. szemesztert (a 2. szemesztert pedig választhatóvá), de csak az időjárás-előrejelző szakirány számára. Az éghajlatkutató szakirány tananyagában így a modellezés marginális szerepet kapott, ami nem tűnt logikusnak tekintetbe véve, hogy Magyarországon már 2004 óta modellezési eszközökkel kutatják a jövőben várható éghajlatváltozást. Mára – részben az alacsony hallgató létszám miatt – a két szakirány egybeolvadt.

Az elhelyezkedés után

A modellező szakember képzése nem áll meg az egyetemi oktatással. Az elhelyezkedés után a pályakezdőnek számos tudnivalót kell elsajátítania. Az egyetemen hallgatott órák csak a meteorológiai modellezés felszínét érintik, így először is egy alapos irodalmi áttekintésre van szükség, ami mindig ahhoz a részterülethez kapcsolódik, amivel a kolléga foglalkozni fog. A meteorológiai szolgálatnál végzett fejlesztések azt a célt szolgálják, hogy az operatív modell-előrejelzések fokozatosan pontosabbak legyenek, s ez a közvetlen hasznosíthatóság nagy vonzereje az itt folytatott modellezési tevékenységnek. Sokak számára nem ismert, hogy a HungaroMetnél is van lehetőség doktori kutatással foglalkozni a fejlesztések irányvonalához kapcsolódó témákban. A fejlesztési folyamat során számos modellkísérlet elvégzésére van szükség, ehhez az ifjú munkatársnak meg kell ismernie a HungaroMet nagyszámítógépes és operatív futtatási környezetét; meg kell tanulnia a kísérletek

megszervezését mind szakmailag, mind az elérhető erőforrásokkal való gazdálkodás tekintetében; lényegében munka közben sajátítja el a verifikáció és az eredmények értelmezésének módszertanát. Ebben a hasonló témában dolgozó munkatársak is segítségére vannak, de idővel gyorsan nő az új kolléga felelőssége. A HungaroMetben végzett fejlesztői tevékenység az önálló és a csapatmunka elegye: általában minden munkatárs visz egy konkrét részterületet, míg az eredmények értelmezése és a célok kitűzése közösen történik. Kislétszámú csapatról lévén szó, az egymástól való tanulás lehetősége néhány év után kimerül, ezért a fejlődéshez elengedhetetlenek a nemzetközi kapcsolatok és továbbképzések. Ehhez kitűnő alapot adnak a konferenciák, a workshopok vagy az ECMWF képzései, de még inkább gyakorlat-orientált fejlődést tesznek lehetővé azok az ACCORD (A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development) és az RC-LACE (Regional Cooperation for Limited Area Modeling in Central Europe) modellezési konzorciumok által biztosított kutatói kiküldetések, amelyek során a kollégák általában 1-4 hetet töltenek egy fogadó intézménynél, és az ottani szakértőkkel közösen dolgoznak egy témán. Mindez igényli az angol nyelv bátor használatát, ugyanakkor a magyar modellezők az így szerzett tapasztalat birtokában nemzetközi munkakörnyezetben is megállják a helyüket.

Irodalom

- Bouttier F., Courtier P.*, 1999: Data assimilation concepts and methods. ECMWF, *Meteorological Training Course Lecture Series*.
- Dévényi D.*, 1991: Numerikus előrejelzés, 2. rész. Kézirat.
- Haltiner, G.J., Williams, R.T.*, 1983: Numerical Prediction and Dynamic Meteorology, 2nd Edition. J. Wiley & Sons Ltd.
- Kalnay, E.*, 2002: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press.
- Szépszó G.*, 2013: Feladatok a numerikus prognosztika témaköréből. In: Klasszikus dinamikus meteorológia feladatgyűjtemény II. (szerkesztette: *Weidinger T., Tasnádi P.*), elektronikus egyetemi jegyzet.
- Szépszó G., Bölöni G., Horányi A., Szűcs M.*, 2013: A numerikus időjárás modellek felépítése: tér- és időskála, adattaszimuláció, diszkretizáció, parametrizációk, valószínűségi előrejelzések, éghajlati modellezés. In: Alkalmazott számszerű előrejelzés (szerkesztette: *Weidinger T., Gyöngyösi A.Z.*), elektronikus egyetemi jegyzet.
- Szépszó, G., Sinclair, V., Carver, G.*, 2019: Using the ECMWF OpenIFS model and state-of-the-art training techniques in meteorological education. *Advances in Science and Research* 16, 39–47.



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 reaktívnek 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, következtetett 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 (CH_4), 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 ($^{12}\text{C}^1\text{H}_4$) találkozunk, de néhány más izotopológia¹ is mérhető mennyiségben van jelen a természetben (pl. $^{13}\text{C}^1\text{H}_4$, $^{12}\text{C}^1\text{H}_3^2\text{H}$, $^{13}\text{C}^1\text{H}_3^2\text{H}$ 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.

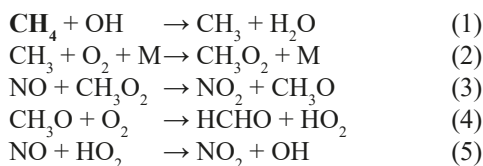
Feltételezve egy (kvázi)stabil összetételű légkört, ami bekerül, annak valamilyen formában, valamilyen módon ki is kell kerülnie onnan (2. táblázat). A metán egy kis része a talaj felé távozik a troposzférából: a talajlakó metanotróf mikroorganizmusok feldolgozzák, szén-dioxiddá oxidálják. A troposzférából 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)

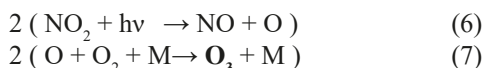
2. táblázat. A troposzférikus metán nyelőfolyamatainak hozama 2008-2017 között és a becslések bizonytalansági tartománya (Canadell et al., 2021).

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:

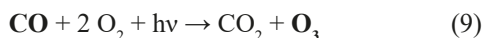


Ha végignézzük a reakcióláncot, akkor azt látjuk, hogy az (1) reakcióban felhasznált hidroxil gyökök

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 szennyezetlen troposzférában az ózon döntő része metánból keletkezik, így a metánkoncentráció 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 szennyezetlen 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 időponti, 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 mérsékelt 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:

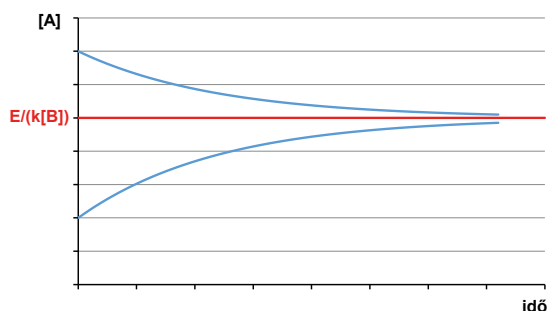
$$d[A]/dt = -k[A][B] + E, \quad (13)$$

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 $E/(k[B])$.

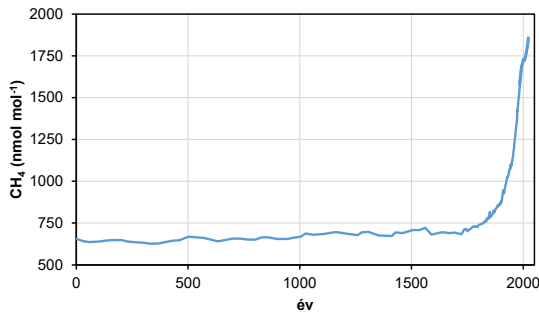


1. ábra. A koncentráció a kiindulási értéktől függően alulról vagy felülről időben exponenciálisan közelít az egyensúlyi értékhez, melynél az időegység alatti koncentráció-függő kémiai fogyás azonossá válik a kibocsátás által a légkörbe juttatott anyagmennyiséggel.

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).

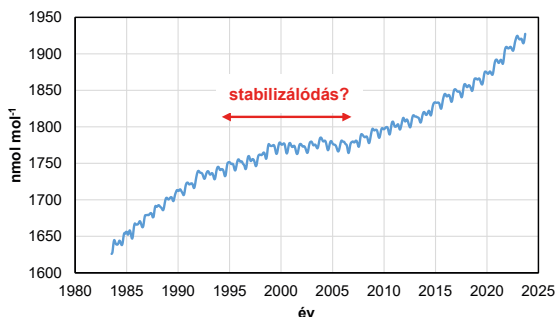
A metán úgynevezett üvegházhatású gáz, amely részben elnyeli a felszínről kiinduló, illetve magából a légkörből származó hőmérsékleti sugárzást. Az elnyelt energiát részben a felszín felé sugározza vissza, szabályozva ezzel bolygónk éghajlatát.



2. ábra. A metán légköri koncentrációjának alakulása a Déli-sarkvidéken időszámításunk 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.

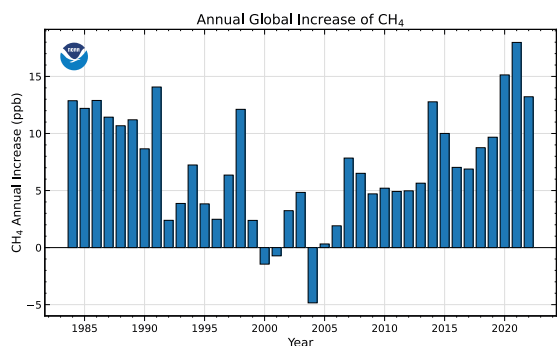
a metánkoncentráció emelkedését lefékezte volna (Zhao *et al.*, 2020). Sajnos, hidroxil gyökből magas reaktivitása miatt olyan kevés van a légkörben (átlagosan csupán minden 10-100 billiomodik molekula a levegőben), hogy mennyiségének közvetlen rendszeres és kiterjedt mérése még jelenleg sem lehetséges.

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 „nehezebbé” 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.)