



Metán a légkörben: kockázatok és lehetőségek

Haszpra László

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

DOI: 10.56474/légkor.2022.2.1

A légköri metánkoncentráció jelenlegi felgyorsult növekedési ütemének pontos okát egyelőre nem ismerjük. Amennyiben a növekedés meghatározó részét a már bekövetkezett éghajlat-változás kelti a természetes metánforrások kibocsátásának növelésével, az megkérdőjelezheti a kitűzött éghajlatvédelmi célok elérhetőségét. A metán kémiai tulajdonságai miatt a légköri koncentráció a kibocsátáscsökkentésre viszonylag gyorsan reagálna. Egyes ipari szektorokban jelenleg is ismertek azok a műszaki megoldások, amelyekkel gazdaságosan csökkenteni lehetne a metánkibocsátást. Az ennek nyomán csökkenő metánkoncentráció 2050-ig 0,1–0,3 °C-kal mérsékelhetné a várható felmelegedést, ezzel több időt biztosítva a még nem kiforrott kibocsátáscsökkentési technológiák bevezetésére a kitűzött éghajlatvédelmi célok veszélyeztetése nélkül.

Atmospheric methane: risk and opportunities

The exact cause of the current accelerated increase in atmospheric methane concentration is not known yet. If the bulk of the increase is due to the increasing emissions from natural sources triggered by the climate change that already occurred, it could question the achievability of the climate protection targets. Due to the chemical properties of methane, its atmospheric concentration would respond relatively rapidly to emission reductions. In some industrial sectors, technical solutions for economical reduction of methane emissions are already known. The resulting reduction in methane concentration could reduce the projected warming by 0.1–0.3 °C by 2050, allowing more time for the introduction of presently immature abatement technologies without compromising climate protection targets

Bevezetés

Az emberi tevékenység által közvetlenül befolyásolt üvegházhatású gázok között, az energia-mérlegre gyakorolt hatás alapján, a metán (CH₄) a második legfontosabb. A szén-dioxid kibocsátás remélt csökkenése mellett relatív jelentősége

a jövőben várhatóan nő, miközben forrásait, nyelőit, a légköri mennyiségét szabályzó folyamatokat, ezek éghajlati érzékenységét számos más üvegházhatású gázhoz képest egyelőre aggasztóan kevésbé ismerjük. Mindez alapvetően csak a kutatókat foglalkoztatta a közvetlen közelmúltig, mígnem az éghajlatpolitika is felfedezte magának a metánt, a benne rejlő éghajlatvédelmi lehetőségeket.

Kockázatok

A légkörbe kerülő metán meghatározó része a szerves anyagok anaerob bomlása révén keletkezik. Ez a folyamat a természetben elsősorban a mocsaras, lápos, tőzeges, szerves anyagokban gazdag vizenyős területeken zajlik (1. táblázat).

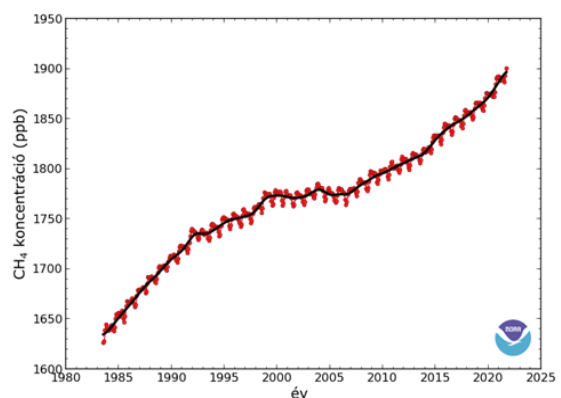
Természetes források		
lápos, mocsaras területek	181	(159-200)
egyéb források (édesvízi területek, állatok, rovarok, óceán, permafroszt talaj, geológiai források)	37	(21-50)
Természetes források összesen	218	(183-248)
Antropogén források		
állattenyésztés	111	(106-116)
hulladékkezelés	65	(60-69)
rizstermelés	30	(25-38)
szénbányászat	42	(29-61)
olaj- és gázipar/elosztás	80	(68-92)
egyéb ipar, közlekedés	7	(1-19)
biomassza égetés	30	(22-36)
Antropogén források összesen	365	(349-393)
Természetes és antropogén források összesen	583	(550-594)
Nyelők		
kémiai reakciók	518	(474-532)
talaj	38	(27-45)
Nyelők összesen	556	(501-574)
Források mínusz nyelők (mért)	18,2	(17,3-19,0)

1. táblázat. A légköri metán forrásainak és nyelőinek becsült éves hozama a 2008-2017 közötti időszakban, az értékek bizonytalansági tartománya, valamint a források és nyelők hozamának különbségeként a légkörben maradó, közvetlenül mérhető anyagmennyiség Mt/év mértékegységben Sauniois és munkatársai (2020) munkája nyomán. A forrás- és nyelőhozamokból becsülhető légkörben maradó hányad a becslések bizonytalansága miatt nem egyezik meg a közvetlen légköri mérések által kimutatott hányaddal.

Metán emberi tevékenység révén is kerül a légkörbe, ugyancsak elsősorban biológiai folyamatok révén. Ezen kategórián belül a legnagyobb tételt

az állattenyésztés jelenti. Fontos forrás a szennyvíz és a szilárd szerves hulladék bomlása is. A rizsföldeken a mocsarakéhoz hasonló folyamatok zajlanak. A fosszilis tüzelőanyagokhoz kapcsolódó kibocsátás, a szénbányászat, az olaj- és gázipari tevékenység, a fosszilis tüzelőanyagok szállítása és tökéletlen égetése során a levegőbe kerülő metán-mennyisége megközelíti az élelmiszer-termelés kibocsátását. A légköri metán csekély részét a talajlakó metanotróf baktériumok veszik fel, oxidálják, döntő részét azonban a kémiai folyamatok távolítják el a légkörből. A források és a nyelők hozamának különbsége adja azt a mennyiséget, amellyel a légkör metán-tartalma változik. Ezt a légköri mérőállomások meglehetősen nagy pontossággal tudják mérni, miközben az egyes források és nyelők hozamára vonatkozó becslések eléggé bizonytalanok.

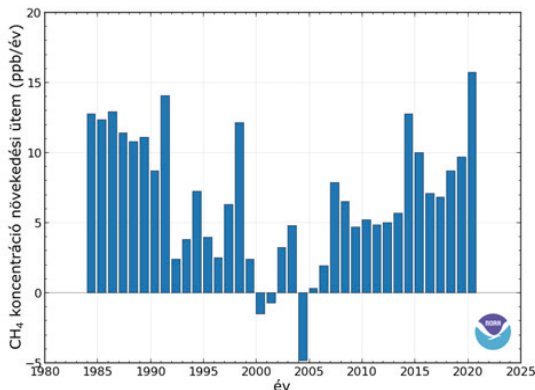
A legutóbbi jégkorszak lezárultát követő holocén időszak közepétől az ipari forradalom kezdetéig a metán koncentrációja, szakszerűben a száraz levegőre vonatkozó térfogataránya kb. 550 ppb-ről 720 ppb-re* emelkedett (Flückiger et al., 2002; WMO, 2021). Innentől viszont a gyorsan növekvő létszámú emberiség élelmiszerigénye és az ipari fejlődés következtében egyre gyorsuló növekedésnek indult. Közvetlen légköri koncentráció-mérések nagyobb számban az 1980-as évek elejétől állnak rendelkezésünkre, amikor a légköri metánmennyiség az ipari



1. ábra. A metán globális légköri átlagkoncentrációja a NOAA mérései alapján. (Forrás: Ed Dlugokencky, NOAA/GML https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/)

* 1 ppb = 10⁻⁹ térfogatrész

forradalom kezdete előtti időkhöz képest már bőven megduplázódott, koncentrációja meghaladta az 1600 ppb-t (1. ábra). Az 1980-as évek elején a koncentráció évenként 10 ppb-t meghaladó ütemben növekedett (2. ábra), ami azt jelentette, hogy mintegy 30-35 Mt-val (1 Mt = 1 millió tonna) több metán került évente a levegőbe, mint amennyi onnan távozni tudott.



2. ábra. A metán globális légköri átlagkoncentrációjának növekedési üteme a NOAA mérései alapján. (Forrás: Ed Dlugokencky, NOAA/GML https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/)

A növekedési ütem azonban fokozatosan lelassult, az 1990-es évek közepére lényegében stabilizálódott a koncentráció. Úgy tűnt, hogy a természeténél fogva koncentráció-függő kémiai nyelő a koncentráció növekedésével végül egyensúlyba került az ez idő tájt a kelet-európai országok gazdasági megroppanásának is köszönhetően feltételezhetően megtorpanó antropogén kibocsátással. A források és a nyelők hozamára vonatkozó becslések nagyfokú bizonytalansága miatt tudományosan megalapozott álláspontot nem lehetett kialakítani az okokról. Éghajlatvédelmi szempontból azonban megnyugtató volt azt hinni, hogy ha a szén-dioxid koncentráció növekedését nem is sikerült megállítani, legalább a metán megállt. Mintegy egy évtized elmúltával azonban, 2006–2007-től fogva újraindult a metánkoncentráció emelkedése, és egyre gyorsuló ütemmel a 2010-es évek második felére már ismét 10 ppm/év közeli növekedést tapasztaltunk. A mérések kezdete óta éppen 2020-ban mértük a legmagasabbat, miközben a fosszilis tüzelőanyagok ipari és

közlekedési felhasználásának a világvárvány miatti átmeneti csökkenése alapján inkább némi visszaesésre számítottunk. A növekedés gyors ütemű újraindulásának nem ismerjük az okát, csak feltételezéseink vannak. Márpedig, ha nem tudjuk, hogy miért történik az, ami történik, akkor aligha tudunk megalapozott előrejelzéseket készíteni, és felkészülni a várható következményekre.

A forrás- és nyelőhozamokra vonatkozó becslések jelentős bizonytalansága miatt a köztük 2020-ra kialakult több mint 40 Mt/év-es különbség eredetét nem lehet közvetlenül beazonosítani. (Körülbelül 2,8 Mt metán okoz 1 ppb koncentráció-változást a légkörben — *Fung et al.*, 1991). A fosszilis tüzelőanyagoknak az emelkedő szén-dioxid koncentrációban is tükröződő növekvő felhasználása indokolhatná a metánkoncentráció emelkedését is, az izotóp-összetétel adatok azonban ezt nem igazán támasztják alá. A fosszilis tüzelőanyagokból származó metán nagyobb arányban tartalmaz 13-as tömegszámú szénizotópot (¹³C), mint a biológiai folyamatokból (anaerob bomlás) származó. Ennek megfelelően az intenzív iparosodás kezdetétől a közelmúltig a légköri ¹³CH₄/¹²CH₄ arány emelkedő tendenciát mutatott (*Ferretti et al.*, 2005). Ehhez a fosszilis tüzelőanyagok növekvő felhasználása mellett hozzájárult a biomassza égetése is, amely ugyancsak magasabb ¹³C/¹²C arányú metánt juttat a levegőbe. A 2000-es évek elején a ¹³CH₄ arány növekedés megállt, azóta folyamatosan csökken. Alacsony ¹³C/¹²C arányú metán azokban az anaerob folyamatokban keletkezik, amelyek a mocsaras területeken vagy a rizsföldeken, illetve a kérődzők emésztőrendszerében zajlanak (*Sherwood et al.*, 2017). Hasonlóan alacsony az izotóparánya az olvadó permafrosztból, illetve a metán-hidráttól felszabaduló metánnak is. A nehezen megbecsülhető biomassza-égés/égetés esetleges csökkenése emelkedő fosszilis kibocsátás mellett is előidézhetette az izotóparány-trend előjelváltását. De ugyanez történik akkor is, ha az anaerob bomlásból származó metánmennyiség gyorsabban nő, mint a fosszilis eredetű. A metánkoncentráció emelkedését természetesen a nyelők gyengülése is előidézheti (*Rigby et al.*, 2017; *Turner et al.*, 2017). A metán fő

nyelője a hidroxil-gyökkel (OH) való reakciója. A hidroxil-gyökök légköri mennyiségét azonban számtalan folyamat befolyásolhatja a légkör UV-átbocsátó képességétől (pl. ózonnemesség, aeroszolmennyiség) számos más nyomanyag (szén-monoxid, ózon, nitrogén-oxidok, vízgőz stb.) mennyiségéig, miközben igen alacsony koncentrációja miatt közvetlenül gyakorlatilag nem mérhető. Az OH-gyök mennyiség reálisan feltételezhető változása azonban önmagában nem idézhet elő akkora változást az izotópösszetételben, mint amekkorát a mérések mutatnak.

A koncentráció-növekedés földrajzi eloszlása nem elsősorban az iparosított vagy sarkvidéki területek, inkább a trópusi, szubtrópusi területek növekvő metánkibocsátását sugallja (Nisbet *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2021). Nincs dokumentált jele annak, hogy a mezőgazdasági tevékenységben, rizstermesztésben, állattenyésztésben az elmúlt másfél-két évtizedben ugrásszerű változások következtek volna be itt. Valószínűbbnek tűnik inkább, hogy az észlelt koncentráció-növekedés mögött az egyes trópusi régiókban megnövekedett csapadékmennyiség miatti mocsarasodás áll. Az időszakosan mocsaras területek kiterjedése azonban még műholdról is nehezen követhető, e mocsarak metánkibocsátást meghatározó sajátosságairól pedig lényegében nincs adatunk.

Ha valóban a mocsarasodó területek – akár a trópusokon, akár később a sarkvidéki területeken – játsszák a meghatározó szerepet a metánkoncentráció növekedésében, az az emberi eredetű éghajlatváltozás egy igen aggasztó öngerjesztő folyamatára mutathat rá, ami önmagában is alááshatja a kitűzött éghajlatpolitikai célok elérhetőségét (Ganesan *et al.*, 2019; Cain *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2022; Nisbet *et al.*, 2022b). A tisztánlátáshoz sokkal több mérésre lenne szükség. A metánkoncentráció-mérések örvendetesen szaporodnak a világ fejlettebb országaiban. Sajnos, éppen a kritikus trópusi területek lefedetlenek, ezért ott az eseti expedíciós mérések mellett (Gondwe *et al.*, 2021; Stell *et al.*, 2021; Gauci *et al.*, 2022; Nisbet *et al.*, 2022a) mindenképpen folyamatos megfigyelésekre is szükség lenne. A kulcsfontosságú stabilizotóp-összetétel mérések ($^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$) még meglehetősen ritkák

a világban, de Magyarországon már folytak ilyen mérések (Varga *et al.*, 2021). A legkritikusabb kérdés, hogy ténylegesen mekkora a fosszilis és a biológiai források hozzájárulásának az aránya a jelenlegi koncentráció-növekedésben? Ennek eldöntését szolgálhatná a szén 14-es tömegszámú, radioaktív izotópját tartalmazó metán ($^{14}\text{CH}_4$) légköri mennyiségének mérése, mivel a fosszilis eredetű metán ezt a felső légkörben keletkező, gyorsan lebomló izotópot egyáltalán nem tartalmazza. Ilyen mérések azonban egyelőre csak elvétve folynak (Ganesan *et al.*, 2019; Graven *et al.*, 2019; Zazzeri *et al.*, 2021). Reméljük azonban, hogy Magyarországon, az Atommagkutató Intézetben néhány éven belül már tudunk ilyen méréseket is végezni.

Lehetőségek

A globális éghajlatváltozás előrehaladtával, a magasabb hőmérséklet és a regionálisan megnövekvő csapadékmennyiség miatt a mocsaras területek intenzívebb metánkibocsátása várható. Számítani kell az olvadó permafroszt talajokból származó metánmennyiség növekedésére is (Dean *et al.*, 2018; Kleinen *et al.*, 2021). Bár a jómódú országokban több millióan lehetnek készek csökkenteni a húsfogyasztásukat a környezet védelme érdekében redukálva az állattenyésztésből származó metán mennyiségét, számolnunk kell azzal a néhány milliárd emberrel is, aki örülne, ha néha neki is kerülne hús a tányérjába. És persze valamivel több rizs is. Változatlan technológiák mellett, rövidtávon belül reálisan nem várható az élelmiszertermelés metánkibocsátásának számottevő csökkenése, sőt, némi növekedés sem lenne meglepő. A széntüzelés visszaszorulásával a bányászathoz kapcsolódó kibocsátás csökkenni fog. Ellátásbiztonsági okokból azonban a széntüzelésű erőművek egy részének helyére egyelőre földgázüzemelésű erőművek lépnek, ami a földgázkitermelés, szállítás és a kapcsolódó metánkibocsátás növekedését okozhatja. Mindez növekvő légköri metánkoncentrációt, növekvő metánból fakadó melegedési járulékot jelentene, annak minden nemkívánatos következményével.

A metán lényegesen reaktívabb gáz, mint a többi nemkondenzálódó üvegházhatású gáz. Kémiai élettartama, a számítási módtól függően, 9–12 év (Forster et al., 2021; Lan et al., 2021), azaz utánpótlás nélkül és az egyéb feltételek változatlansága mellett koncentrációja exponenciális lecsengéssel 9–12 év alatt e-ad részére (~0,368), 20–30 év alatt pedig tizedére csökkenne. Valós helyzetben ez azt jelenti, hogy a légköri metánkoncentráció ilyen késleltetéssel igazodik a kibocsátás megváltozásához. Más üvegházhatású gázok esetében ez a késleltetés lényegesen nagyobb. A metánkibocsátás csökkenésével tehát viszonylag gyorsan csökken a légköri metánkoncentráció, ami a megváltozó energetikai kényszeren keresztül kihat az éghajlat alakulására.

Az antropogén kibocsátás csökkentésére ma is léteznek technológiák, ráadásul egy részük nem jár nettó költséggel. A bevezetésük során felmerülő kiadások a ki nem bocsátott metán piaci hasznából megtérülnének. A szénbányákban és a hulladéklerakókban felszabaduló metán összegyűjthető és energiatermelésre használható. Hatalmas potenciál van a földgázkitermelésben és -elosztásban. A különböző szivárgások megszüntetésével a kibocsátás úgy csökkenthető felére, hogy az a megmentett metán értékéből közvetlenül megtérül. A cégek által már ma betervezett beruházásokkal e szektorban a 80%-os csökkentés is elérhető. Nettó költségek nélkül a teljes antropogén metánkibocsátás körülbelül negyedével lenne mérsékelhető. A technikailag ma is lehetséges, de már közvetlenül meg nem térülő kiadásokat igénylő módszerekkel ez a megtakarítás akár 57%-ig növelhető (Ocko et al., 2021) (2. táblázat).

A metán az energetikai kényszernek csak egy kisebb szeletéért felel, így kibocsátásának visszafogásával az éghajlatváltozás nem állítható le. Ami az éghajlati modellek szerint elérhető, az az, hogy ha gyorsan, egy évtizeden belül bevezetjük a nettó költségeket nem igénylő kibocsátás-csökkentési eljárásokat, azaz mintegy negyedével csökkentjük kibocsátást, akkor 2050-re kb. 0,1 °C-kal, 2100-ra pedig kb. 0,2 °C-kal kisebb felmelegedést kapunk, mint ezek nélkül az intézkedések nélkül. Ha valamennyi ma technikailag lehetséges

	részesedés a kibocsátásból*	csökkentés nettó költségek nélkül	technikailag lehetséges csökkentés
állattenyésztés	31%	2%	30%
olaj- és gázipar	26%	80%	85%
hulladéklerakók	14%	16 %	80%
szénbányászat	11%	6%	60%
rizstermelés	8%	6%	50%
szennyvízkezelés	6%	1%	70%
biomassza égetés	3%	0%	0%
fossz. tüzelőanyagok égetése	1%	0%	0%
súlyozott átlag		24%	57%

* A kibocsátás-eloszlás kis mértékben különbözik az 1. táblázatban szereplőtől a biomassza-égetés hozamára vonatkozó eltérő becslés miatt.

2. táblázat. Az antropogén metánkibocsátás csökkentési lehetőségei Ocko és munkatársai (2021) tanulmánya nyomán.

kibocsátás-csökkentési eljárást bevetjük, akkor az elkerülhető melegedés 2050-ig negyed fok, 2100-ra pedig kb. fél fok. Ha a már ma is lehetséges intézkedéseket elhúzzuk 2040-ig, akkor 2050-re csak kisebb hatást kapunk, de a század végére az elkerült melegedés lényegében ugyanannyi lenne, ami a metán gyors légköri kiürülésének a következménye. 50–60 év alatt így is, úgy is lecsökken a koncentráció a megmaradt kibocsátásnak megfelelő szintre (Ocko et al., 2021).

A néhány tized fokos melegedés-megtakarítás nem tűnik soknak, de ne felejtjük el, hogy az éghajlatvédelmi stratégiák éppen tized fokokért harcolnak ahhoz, hogy a melegedést bizonyos határértékek alatt tartsák. Az antropogén metánkibocsátás visszafogására rendelkezésre álló technológiák bevetésével a 2030 és 2100 között várható melegedés körülbelül negyedével lenne csökkenthető. Fontos ez egyrészt azért, mert a megvalósuló éghajlatváltozás a természetes források hozamát is módosítja, másrészt abból a szempontból is, hogy a legnagyobb problémát nem a felmelegedés mértéke okozza, persze az is, hanem a melegedés, az éghajlatváltozás üteme. Az antropogén metánkibocsátás viszonylag egyszerű visszafogásával az ütem valamelyest mérsékelhető, azaz valamennyivel több időt nyerhetünk az elkerülhetetlen alkalmazkodáshoz. Aki pedig

időt nyer, az az éghajlatváltozás miatt potenciálisan kihaló fajokra gondolva szó szerint is életet nyerhet. Ezért mondható nagyon fontosnak, hogy a metán jelentőségét végre az éghajlatpolitika is felismerte.

2021. szeptember közepén az Amerikai Egyesült Államok, az Európai Unió és néhány más ország ígéretet tett az antropogén metánkibocsátás 2030-ig történő 30%-os csökkentésére (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_4785), amelyhez az ENSZ 2021. november elejei Éghajlatváltozási Konferenciáján (COP26) további mintegy 100 ország csatlakozott (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_21_5766). A 30%-os kibocsátás-csökkentés éghajlatpolitikai szempontból komoly előrelépés, de – mint láttuk – csaknem nettó ráfordítások nélkül is elérhető. Nem kevesen vetik fel, hogy ennél többet is tehetnénk az éghajlatváltozás mérséklése érdekében (*Hausfather and Forster, 2021; Nature Geoscience Editorial, 2021*).

Irodalom

- Cain, M., Jenkins, S., Allen, M.R., Lynch, J., Frame, D.J., Macey, A.H., Peters, G.P., 2022. Methane and the Paris Agreement temperature goals. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20200456. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0456>
- Dean, J.F., Middelburg, J.J., Röckmann, T., Aerts, R., Blauw, L.G., Egger, M., Jetten, M.S.M., de Jong, A.E.E., Meisel, O.H., Rasigraf, O., Slomp, C.P., in 't Zandt, M.H., Dolman, A.J., 2018. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Rev. Geophys.* 56, 207–250. <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
- Feng, L., Palmer, P.I., Zhu, S., Parker, R.J., Liu, Y., 2022. Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate. *Nat. Commun.* 13, 1378. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>
- 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., Ommen, T.D.v., 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>
- Flückiger, J., Monnin, E., Stauffer, B., Schwander, J., Stocker, T.F., Chappellaz, J., Raynaud, D., Barnola, J.-M., 2002. High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 16, 10–11–10–18. <https://doi.org/10.1029/2001GB001417>
- 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., 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.
- Fung, I., John, J., Lerner, J., Matthews, E., Prather, M., Steele, L.P., Fraser, P.J., 1991. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 96, 13033–13065. <https://doi.org/10.1029/91JD01247>
- Ganesan, A.L., Schwietzke, S., Poulter, B., Arnold, T., Lan, X., Rigby, M., Vogel, F.R., van der Werf, G.R., Janssens-Maenhout, G., Boesch, H., Pandey, S., Manning, A.J., Jackson, R.B., Nisbet, E.G., Manning, M.R., 2019. Advancing Scientific Understanding of the Global Methane Budget in Support of the Paris Agreement. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 33, 1475–1512. <https://doi.org/10.1029/2018GB006065>
- Gauci, V., Figueiredo, V., Gedney, N., Pangala, S.R., Stauffer, T., Weedon, G.P., Enrich-Prast, A., 2022. Non-flooded riparian Amazon trees are a regionally significant methane source. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20200446. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0446>
- Gondwe, M.J., Helfter, C., Murray-Hudson, M., Levy, P.E., Mosimanyana, E., Makati, A., Mfundisi, K.B., Skiba, U.M., 2021. Methane flux measurements along a floodplain soil moisture gradient in the Okavango Delta, Botswana. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200448. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0448>
- Graven, H., Hocking, T., Zazzeri, G., 2019. Detection of Fossil and Biogenic Methane at Regional Scales Using Atmospheric Radiocarbon. *Earth's Future* 7, 283–299. <https://doi.org/10.1029/2018EF001064>
- Hausfather, Z., Forster, P., 2021. Analysis: Do COP26 promises keep global warming below 2C? Carbon Brief 10.11.2021. <https://www.carbonbrief.org/analysis-do-cop26-promises-keep-global-warming-below-2c>. (Last accessed: 21 January 2022)
- Kleinen, T., Gromov, S., Steil, B., Brovkin, V., 2021. Atmospheric methane underestimated in future climate projections. *Environ. Res. Lett.* 16, 094006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1814>
- Lan, X., Nisbet, E.G., Dlugokencky, E.J., Michel, S.E., 2021. What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄

- observations and the way forward. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200440. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0440>
- Nature Geoscience Editorial, 2021. Methane matters. *Nat. Geosci.* 14, 875–875. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00875-1>
- Nisbet, E.G., Allen, G., Fisher, R.E., France, J.L., Lee, J.D., Lowry, D., Andrade, M.F., Bannan, T.J., Barker, P., Bateson, P., Bauguitte, S.J.-B., Bower, K.N., Broderick, T.J., Chibesakunda, F., Cain, M., Cozens, A.E., Daly, M.C., Ganesan, A.L., Jones, A.E., Lambakasa, M., Lunt, M.F., Mehra, A., Moreno, I., Pasternak, D., Palmer, P.I., Percival, C.J., Pitt, J.R., Riddle, A.J., Rigby, M., Shaw, J.T., Stell, A.C., Vaughan, A.R., Warwick, N.J., E. Wilde, S., 2022a. Isotopic signatures of methane emissions from tropical fires, agriculture and wetlands: the MOYA and ZWAMPS flights. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20210112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0112>
- Nisbet, E.G., Jones, A.E., Pyle, J.A., Skiba, U., 2022b. Rising methane: is there a methane emergency? *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20210334. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0334>
- Nisbet, E.G., Manning, M.R., Dlugokencky, E.J., Fisher, R.E., Lowry, D., Michel, S.E., Myhre, C.L., Platt, S.M., Allen, G., Bousquet, P., Brownlow, R., Cain, M., France, J.L., Hermansen, O., Hossaini, R., Jones, A.E., Levin, I., Manning, A.C., Myhre, G., Pyle, J.A., Vaughn, B.H., Warwick, N.J., White, J.W.C., 2019. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 33, 318–342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>
- Ocko, I.B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, A.N., Pacala, S.W., Mauzerall, D.L., Xu, Y., Hamburg, S.P., 2021. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environ. Res. Lett.* 16, 054042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf9c8>
- Rigby, M., Montzka, S.A., Prinn, R.G., White, J.W.C., Young, D., O'Doherty, S., Lunt, M.F., Ganesan, A.L., Manning, A.J., Simmonds, P.G., Salameh, P.K., Harth, C.M., Mühle, J., Weiss, R.F., Fraser, P.J., Steele, L.P., Krummel, P.B., McCulloch, A., Park, S., 2017. Role of atmospheric oxidation in recent methane growth. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 114, 5373–5377. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616426114>
- Saunio, 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 der Werf, G.R., Weiss, R.F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., 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>
- Sherwood, O.A., Schwietzke, S., Arling, V.A., 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>
- Stell, A.C., Douglas, P.M.J., Rigby, M., Ganesan, A.L., 2021. The impact of spatially varying wetland source signatures on the atmospheric variability of d-CH₄. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200442. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0442>
- Turner, A.J., Frankenberg, C., Wennberg, P.O., Jacob, D.J., 2017. Ambiguity in the causes for decadal trends in atmospheric methane and hydroxyl. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 114, 5367–5372. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616020114>
- Varga, T., Fisher, R.E., France, J.L., Haszpra, L., Jull, A.J.T., Lowry, D., Major, I., Molnár, M., Nisbet, E.G., László, E., 2021. Identification of potential methane source regions in Europe using $\delta^{13}\text{CCH}_4$ measurements and trajectory modeling. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 126, e2020JD033963. <https://doi.org/10.1029/2020JD033963>
- WMO, 2021. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin 17
- Yin, Y., Chevallier, F., Ciais, P., Bousquet, P., Saunio, M., Zheng, B., Worden, J., Bloom, A.A., Parker, R.J., Jacob, D.J., Dlugokencky, E.J., 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>
- Zazzeri, G., Xu, X., Graven, H., 2021. Efficient sampling of atmospheric methane for radiocarbon analysis and quantification of fossil methane. *Environ. Sci. Technol.* 55, 8535–8541. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03300>

A 47. Meteorológiai Tudományos Napon, 2021. november 18-án elhangzott előadás bővített és szerkesztett változata.