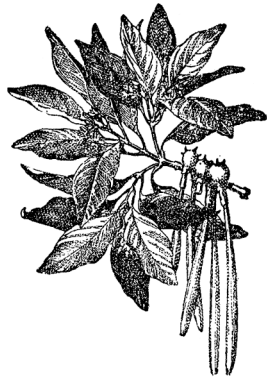


hogy különféle szakterületeket képviseltek, mégis jóval több volt a közös elem, mint a különbözőség. Noha a hangsúlyokat az adott diszciplínákhoz igazodva picit mindenki máshová helyezte, az egymás megértésének szándékával folytatódó további diszkusszió elősegítheti e súlyos kérdésekben a tisztábban látást, és egyértelműen hozzájárulhat a megválaszolatlan kérdésekre adható közös vála-

szok, megoldási lehetőségek megtalálásához és azok megvalósításához. Az előadások alapján készült tanulmányokat – továbbgondolás céljából – ezúton nyújtjuk át a *Magyar Tudomány* olvasóinak.

Kulcsszavak: *éghajlatváltozás, fenntarthatóság, globális változás, környezeti változás, növekedés, természeti erőforrás*



KLÍMAHELYZET 2016

Vida Gábor

az MTA rendes tagja
vid6952@ella.hu

Bevezetés

Paul Chefurka, az emberiség sorsáért aggódó kanadai gondolkodó keserűen jegyzi meg egy személyes hangvételű írásában (Chefurka, 2012): „Többé már nem látom értelmét kiemelt figyelmet vagy kritikát szentelni az emberi tevékenységek valamelyikére. Népeség-növekedés, klímaváltozás, multik globális hatalma, kémiai szennyezések, forráskimerülés, fajok kipusztulása, tengerek túlhalászása és savasodása, globális pénzügyi instabilitás, halmozódó társadalmi aránytalanságok és igazságtalanságok: mind csupán tünetei egy évszázadok óta kontrollálatlan rendszernek (annak ellenére, hogy buzgón igyekszünk magunkat meggyőzni ennek ellenkezőjéről). Nincs más választásunk, s talán nem is volt soha, mint nyeregben maradni a sárkányon, amíg az emberi túllövés kiigazítja magát, ahogyan ez mindig lenni szokott.”

A „környezeti” gondok valóban kolosszálisak (Vida, 2012), s a szokásos megnevezéssel szemben nem csupán a tőlünk elválaszthatóknak tűnő környezetünket érintik (klimatizált lakásból, munkahelyről vagy szupermarketből szemlélve), hanem már saját fajunk fennmaradását is. E gondok felismerése Chefurka „tudatosodási létráján” haladva fokozatosan történik, az emberiség egyre csökkenő hányadát érintve:

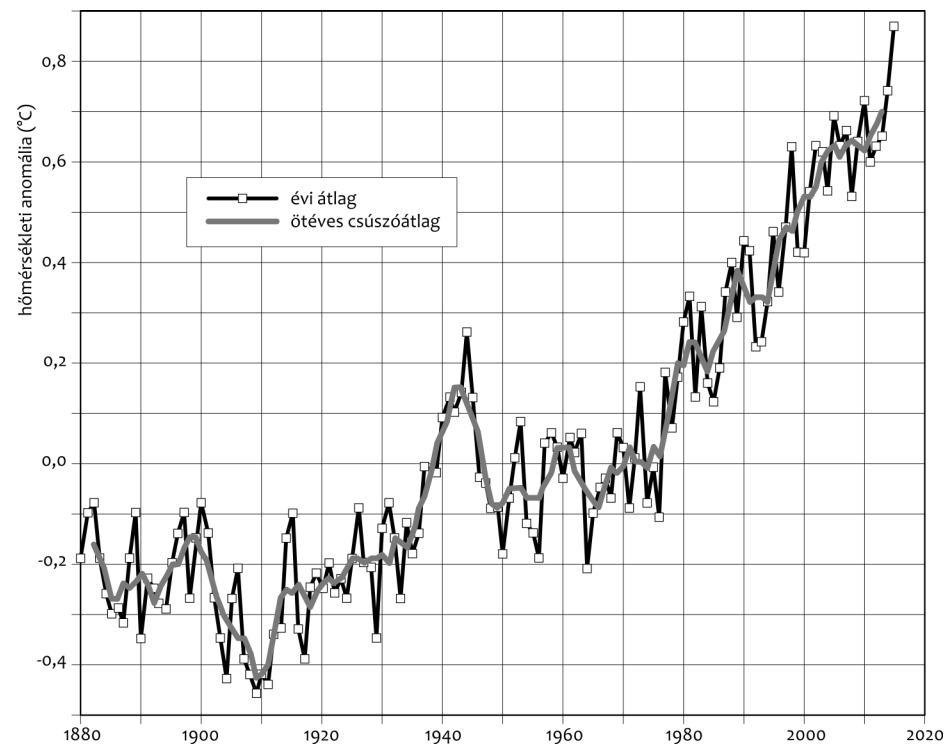
1. Az emberek legtöbbször nem foglalkozik a fentebb felsorolt kérdésekkel, napi gondok és örömeik töltik ki életüket.
 2. Az egyik alapvető bajt felismerő eleinte csak erre koncentrálnak, ennek aktív harcosa lesz.
 3. Több más gond képbe kerülésével bonyolódik a helyzet. A megoldás kereséséhez a prioritás és fókuszálás kérdéseire is éles vitákat folytat, mások kitüntetett szempontjait kritizálva.
 4. Annak felismerésével, hogy az egyik probléma „megoldása” egy másik gond súlyosságát növelheti, kezdetét veszi a rendszerben gondolkodás. A bonyolult összefüggések, kölcsönhatások komplex rendszere a jövőnkért aggódó, eltérő szakértői háttérrel bíró embereket összehozza a megoldás keresésére (lásd „Túlélés Szellemi Kör”, Láng – Kerekes, 2013).
 5. Annak tudatosulásával, hogy a megoldáshoz (ha van) szinte minden téren változtatnunk kellene, kétség támadhat a megvalósíthatóságát illetően. Ezen a ponton a feladás, kilépés vagy Don Quijote-szerű szélmalomharc, esetleg transzcendens reményekbe vagy valamilyen techno-optimizmusba menekülés lehet a következmény.
- A klímahelyzetről, annak okairól és megoldási mikéntjéről vitázva be kell látnunk, hogy részdiszciplínák tömegére hasadt tudományunk jelenleg nehezen kezeli e szinte min-

den szakterületet érintő, jövőnket meghatározó kérdést (Vida, 2015). Fontos lenne felismerni, hogy a jelenlegi trendek radikális változtatás nélkül óriási kockázatot jelentenek ma már nemcsak unokáinknak, hanem magunknak is. Rendszerszemléletben elemezve kellene keresni a leghatékonyabb megoldást. A bajok tagadása, bagatellizálása vagy áthárítása szó szerint életveszélyes.

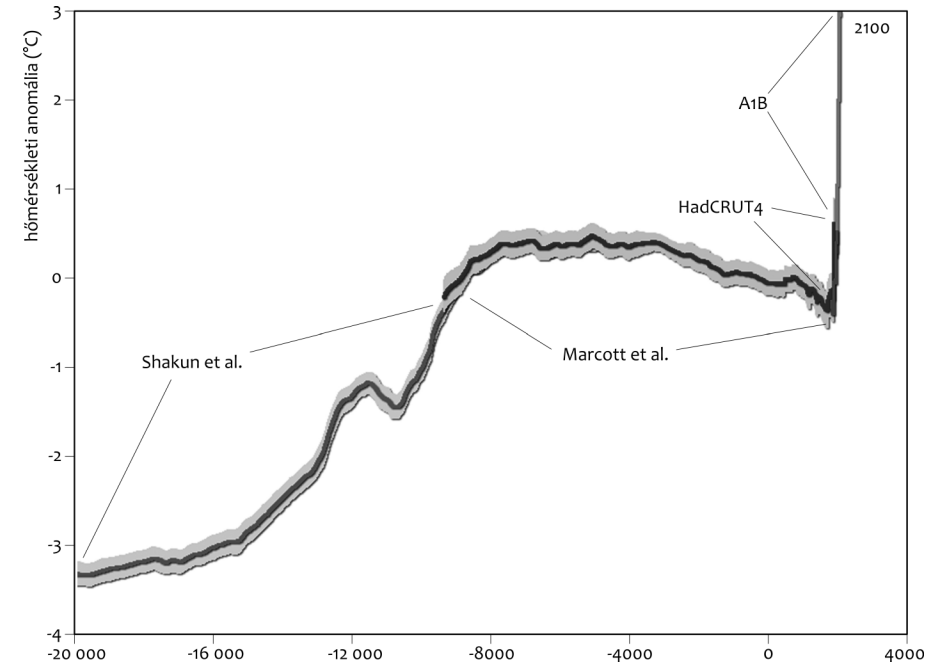
Nézzük a tényeket!

Földünk felszíni hőmérsékletének változása mára egyértelmű. Melegsünk. Szinte minden mérőállomás hosszabb távon (évtizedes átlagokban) növekedést mutat. Ezek összesítését egymástól függetlenül (és némiképp eltérő

metodikával, de csaknem azonos végeredménnyel) az USA (NASA, NOAA), Japán (*Japan Meteorological Agency*) és az Egyesült Királyság (*UK MetOffice*) intézményei végzik. Fontos tudni, hogy ezzel nem Földünk felszíni hőmérsékletét, hanem annak változását adják meg, alapos elemzések és szükségszerű korrekciók után. Ez utóbbiak legtöbbször inkább mérséklék, mint növelik a regisztrált változás nagyságát. A változást egy kitüntetett időszak (többnyire 1951-1980) átlagához viszonyítják. Az 1. ábrából egyértelműen kitűnik a globális melegedés trendje. Ha a viszonyítás alapjául a múlt század elejét vesszük, a felmelegedés már több mint 1 °C. A trend még ijesztőbb, ha az időskálát a legutóbbi jégkor-



1. ábra • Az 1951-1980 évek átlagához viszonyított globális évi középhőmérsékletek és a vastag vonallal jelölt ötéves csúszóátlaguk (NASA). Az ábra legutolsó pontja a 2015-ös értéket mutatja. Az azóta megismert 2016-os adat (1,0 anomália) a keretbe már be sem férne.

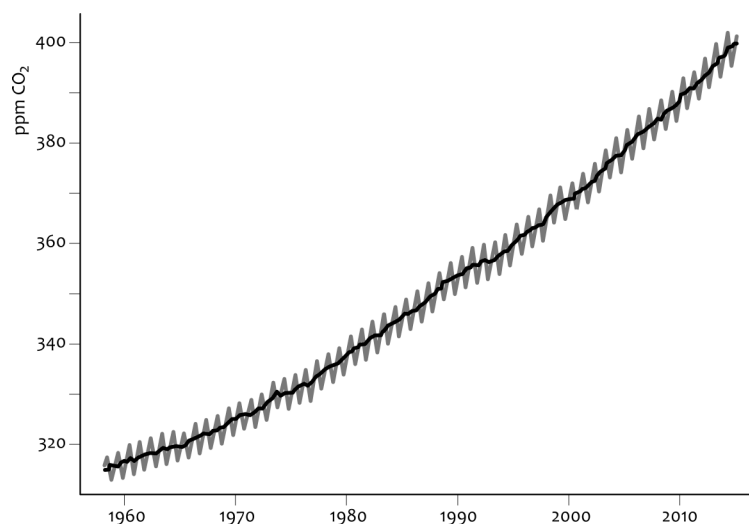


2. ábra • Földünk felszíni hőmérsékletének alakulása az elmúlt 22 ezer évben a holocén átlagához viszonyítva. Az utolsó jégkorszak (würm) után a legutóbbi tízezer év viszonylagos stabilitásában (holocén) alakult ki civilizációnk. A legutolsó száz évben a természetes (Milanković-ciklusokkal jellemzett) trenddel ellentétes robbanásszerű melegedés indult meg (Rahmsdorf, 2013).

szaktól indítjuk (2. ábra), közvetett (ún. *proxy*) hőmérsékleti mutatók alapján. Valóban, szinte katapultáljuk magunkat a holocénből (Rahmsdorf, 2013). Az ábrából az is kitűnik, hogy a globális átlaghőmérséklet milyen csatlóka lehet a helyi és regionális viszonyok vonatkozásában. A mostaninál alig négy fokkal alacsonyabb globális átlaghőmérséklet fél Európára vastag jégtakarót borított, s hazánk területén is csupán fátlan tundra-vegetáció tengődött. Elgondolkoztató ezek után, hogy mi lenne egy hasonló nagyságú, de pozitív irányú hőmérsékletváltozás hatása.

A hőmérsékletemelkedés oka az emberi tevékenységekkel értelmezhető. Jelentősen növekedett bolygónk légkörének üvegházha-

tása, főképp a fosszilis energiaforrások (szén, kőolaj, földgáz) növekvő használatával, erdőirtásokkal és talajműveléssel. A Föld hőegyensúlyát befolyásoló antropogén tényezők igen változatosak, de közülük kiemelkedő a szén-dioxid megváltozott légköri koncentrációja. Ennek értéke az ipari forradalom előtti 280 ppm (*part per millions*, milliommód rész) szintről mára már 400 ppm fölé emelkedett (3. ábra). Mindez érthető, ha figyelembe vesszük, hogy csak a fosszilis energiaforrások használatával eddig 555 gigatonnányi szén jutottunk a légkörbe szén-dioxid formájában. Szerencsénkre bioszféránk véges nyelőkapacitásával ennek jelentős hányada kivonódik. Egy nemrég készült felmérésből (Le Quére et



3. ábra • A Hawaii-szigeteken (Mauna Loa Observatory) 1958 óta folyamatosan mért légköri CO₂-koncentráció (NOAA). Lényegében hasonló képet mutat a világ számos más pontján mért szén-dioxid-érték is. 2016-ban már az Antarktison is 400 ppm feletti értéket jeleztek.

al., 2015) tudjuk, hogy a 2005 és 2014 közötti tízéves időszakban évenként a légkörbe kerülő átlag 9,9 gigatonnányi szénből (9,0 fosszilis + 0,9 „földhasználat” eredettel) csak 4,4 gigatonna növeli az aktuális CO₂ ppm értéket, 2,6 az óceánokban, 2,9 a szárazföldön „tűnik el”. Jelenleg a CO₂ teszi ki az üvegházhatás mintegy 60 százalékát, a többi a metán, N₂O, O₃ és különféle halokarbonok adják. (A vízgőz ugyan a légkör legjelentősebb üvegházhatású gáza, de ennek térben és időben állandóan változó mennyiségét kevésbé befolyásoljuk.)

Globális 400 ppm feletti szén-dioxid-koncentráció valószínűleg sohasem volt légkörünkben a legutóbbi 30 millió évben (Anagnostou et al., 2016). Fajunk a 180 és 300 ppm közötti tartományhoz adaptálódott. Számolnunk kell a további növekedéssel is. A szén-dioxid üvegházhatása egy sor újabb hatást vált ki. Növekszik a metánkoncentráció, kü-

lönösen a korábban állandóan fagyott (permafrost) talajok felengedésével és a tengeri metánhidrát bomlásával (valamint a palagáztermeléssel), nő a felmelegedés a besugárzást visszaverő sarki jégtakaró fogyásával, hogy csak néhány tényre utaljunk. A metán sokkal erősebb üvegházhatású gáz (a CO₂ 20–80-szorosra, időtartamtól függően, mivel fokozatosan eloxidálódik a légkörben szén-dioxiddá és vízzé), így légkörünk teljes üvegházhatása CO₂-egyenértékre megadva már 480 ppm körül van, s ezzel az értékkel már az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) javasolt határértékét is túlléptük. Ennek hőmérsékleti hatása a globális rendszer óriási inerciája folytán időelcsúszással, fokozatosan alakul ki. A hőtöbblet legnagyobb része az óceánokat fűti (93,4%), a jégtakarókat olvasztja, és a kontinenseket melegíti (4,3%). Az atmoszférára átlagosan csak 2,3% jut, időszakosan jelentős eltérésekkel.

Amióta közvetlenül műszeresen mérjük Földünk felszíni hőmérsékletét, az eddigi legmelegebb év a 2015-ös volt, s figyelemre méltó, hogy a tizenhat legmelegebb évből tizenöt ebben az évszázadban fordult elő. Minden jel arra mutat, hogy 2016 újabb rekorddöntő lesz.¹ Megdöbbentő, hogy az USA Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Intézete (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 2016. júniusi jelentése szerint az előző hónappal (május) megszakítás nélkül, folyamatosan már a tizenharmadik globálisan melegrekord-döntő hónapot regisztráljuk (URL1). Bár a kiugróan magas értékhez egy rendkívüli óceánáramlási jelenség (El Niño) is hozzájárult, a korábbi hasonló helyzeteket (legutóbb 1997–1998) a mostani messze túlszárnyalja. A 2016-os év a rendkívüli klímajelenségek tekintetében már eddig is hét rekordot állított fel egy összeállítás szerint (URL2).

E figyelmeztető jeleket nem lenne szabad negligálni. Mégis, a világ inkább másra figyel. Sokan úgy gondolják, hogy miután megszületett a Párizsi Egyezmény (2015), a problémát megoldottuk. „Elhatároztuk”, hogy nem engedjük 2 °C-nál többet melegedni Földünket, s reméljük, hogy a klíma engedelmesen be is tartja határozatunkat. Élhetünk, ahogy eddig (BAU, Business As Usual), egy „zöldebb” gazdasági növekedéssel. *Better Growth, Better Climate* – javasolja címében a megoldást a szakértői testület (URL3). Szó sem esik a „fejlett” (GDP/főben mérve) világ fogyasztáscsökkentéséről (Spash, 2014). A gazdaságnak növekednie kell a világ minden országában, gazdagokban és szegényekben egyaránt,

¹ A kézirat lezárása óta ez már tény. Három egymást követő rekorddöntő évet zártunk (2014, 2015, 2016), minden eddigi értéket jelentősen meghaladva. A trend alapos statisztikai elemzéssel igazolt (Rahmsdorf et al., 2017).

tovább fokozva az egyenlőtlenséget. A növekedés energiát igényel, s ennek forrása ma is döntően (>85%) a CO₂-kibocsátással járó fosszilis készlet égetése. Bár világszerte erőfeszítéseket tesznek a véges fosszilis energiaforrások megújulóakra cserélésére, energiatakarékosra, hatékonyságnövelésre, a gazdasági növekedés és környezeti hatás szétkapcsolására (*decoupling*), „anyagtalánításra”, az eredmény minimális, s többnyire csak átmeneti és lokális. Egy állandó növekedés korlátlan fenntartásához valójában a termodinamika főtételeinek cáfolatára lenne szükség.

Az üvegházhatás csökkentésének látszólagos megoldására jó példa az Egyesült Államok szénéreműveinek földgázra történő átváltása. 2014 szeptemberében a New Yorkban tartott klímakonferencián Barack Obama elnök büszkén bejelentette: az Egyesült Államok az utóbbi nyolc évben jobban csökkentette a karbonszennyezést, mint a Föld bármely más országa. Valóban tudjuk, hogy kőszén helyett metánt égetve azonos „energiatermelés” mellett jóval kevesebb CO₂ keletkezik. A baj csak ott van, hogy a palagáz kinyerése során bekövetkező metánszivárgás legalább ugyanakkora üvegházhatást adott, mint amennyi csökkenést eredményezett a kevesebb CO₂, ráadásul a felhasználatlan kőszén exportra ment, s bár elégetve más országok kibocsátási listáját terhelte, a CO₂ a közös globális légkörbe került (Turner et al., 2016). Hasonló példákat lehet felhozni a megújuló energiaforrásokra történő átváltások CO₂-„kiváltó” hatására is, ha a létesítmény teljes életciklusát követjük végig. Egy Kínában készült napelemes rendszer előállítása és európai üzembe helyezése sok esetben (helytől függően) harminc év alatt sem képes annyi CO₂-fogyasztást kiváltani, mint amennyit okozott a létesítése (Yue et al., 2014). Hiába, a gazdasági

szakemberek legtöbbször csak pénzben és rövid időtávban kalkulálnak.

A jövő?

A 2015 decemberében Párizsban elfogadott, majd 2016 áprilisában New Yorkban aláírt klímaegyezményben a világ kormányai elhatározták, hogy bolygónk felszíni hőmérsékletének további emelkedését igyekeznek jóval 2 °C fok alatt tartani. A megállapodás eredményeinek részleteiről és objektív értékeléséről Faragó Tibor cikke tájékoztat (Faragó, 2016): „A tárgyaló felek jelentősen eltérő álláspontjai, érdekkülönbségei miatt az elfogadott kompromisszumokkal a Megállapodásban foglalt összes lényegesebb témában csak az általános célokat, az együttműködés kereteit sikerült rögzíteni. A részletes feltételeket, szabályokat a következő években kell kidolgozni és jóváhagyni, s csak ezt követően várható e Megállapodás hatálybalépése, közös végrehajtásának megkezdése, valamint tényleges hatékonyságának megítélése.”

Mivel magyarázható a csaknem negyedszázadnyi késlekedés (és további végrehajtási halogatás) a célokat meghatározó első ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményt (1992) követően? – tehetnénk fel a naiv kérdést. Miért nem sikerült az ózonpajzsot károsító CFC- (teljesen halogénezett szénvegyületek) gázok korlátozásához (*Montreal Protocol*) hasonlóan néhány év alatt megoldani a kérdést? A válasz egyszerű. A CFC helyettesítése más gázokkal könnyen megoldható. A CO₂-kibocsátással járó fosszilis energiaforrásoknak viszont nincs igazi alternatívájuk energiasűrűség és általában felhasználhatóság tekintetében. A fosszilis energiaforrások hajtják ma is a világ gazdaságának döntő többségét. Ne feledjük, ezek használatától jöhetett létre az ipari forradalom, az ugrásszerű népességnövekedés, a technikai

és tudományos csodák tömege. Ezzel hozhatuk létre a mai „fogyasztói” társadalmat annak minden előnyével és fokozódó gondjaival. Az energiagond önmagában még megoldható lenne a megújulóokra történő átváltással, ez azonban egyrészt hosszabb időt és infrastruktúra-kifejlesztést (átállást) igényel, másrészt igen jelentős ellenérdekeltségekbe ütközik. Az ExxonMobil óriás cég például évtizedekig eltitkolta a saját cégének kutatásában feltárt, klímaváltozást okozó olajhasználatot. Egy referált folyóiratban megjelent cikk pedig arról tájékoztat, hogy az Egyesült Államokban a klímaváltozást tagadó szervezetek mielőtt finanszírozzák 900 millió dollárt meghaladó tevékenységeiket (Brulle, 2014).

A késlekedő cselekvés okozta kockázat, s ezzel a klímatagodók felelőssége óriási. A kételkedést propagálókat hatására a közvélemény nincs tisztában azzal, hogy a témához valóban értők körében lényegében egyetértés van a globális felmelegedés tényében és annak döntően emberi eredetében (Anderegg et al., 2010; Cook et al., 2013; Benestad et al., 2015; Hornsey et al., 2016), következképpen a szükséges radikálisabb akciók is elmaradnak. Eközben a légkörben tovább nő az üvegházhatású gázok koncentrációja, s vészesen közelítünk az IPCC által 2 fokos felmelegedési határt jelentő 450 ppm CO₂-értékhez. Hiábavaló volt a precíz kalkuláció annak meghatározására, hogy az ismert és kitermelhető fosszilis készletekből mennyit kellene a föld alatt hagyni a 2 °C fok alatt maradáshoz (McGlade – Ekins 2015). Valójában már azzal számolunk, hogy ezt a határt csak „negatív emisszióval”, azaz a légkörbe már kibocsátott CO₂ utólagos „visszaszívásával” tarthatjuk, ha ez globális méretekben egyáltalán megvalósítható lesz, tetemes költségekkel (Anderson, 2015). Ha ezek után tovább kutatunk az itt még említ

ésre sem került egyéb környezeti, társadalmi, politikai és gazdasági gondok egymást erősítő bonyolult rendszerében, beláthatjuk, hogy

a világunk előtt álló kihívás hatalmas. Ezzel el is érkezhünk a bevezetőben bemutatott tudatosodási létra legfelső fokára.

Kulcsszavak: *klímaváltozás, üvegházhatás, szén-dioxid, metán, rendszerszemlélet*

IRODALOM

- Anagnostou, Eleni – John, Eleanor H. – Edgar, Kirsty M. (2016): Changing Atmospheric CO₂ Concentration Was the Primary Driver of Early Cenozoic Climate. *Nature*. 533, 380–384. DOI:10.1038/nature17423 • <http://tinyurl.com/monbpr>
- Anderegg, William R. L. – Prall, James W. – Harold, Jacob et al. (2010): Expert Credibility in Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 107, 12107–1209. DOI: 10.1073/pnas.1003187107 • <http://tinyurl.com/lkayyph>
- Anderson, Kevin (2015): Talks in the City of Light Generate More Heat. *Nature*. 528, 437. DOI:10.1038/528437a • <http://tinyurl.com/mc4m78k>
- Benestad, Rasmus E. – Nuccitelli, Dana – Lewandowsky, Stephan et al. (2015): Learning from Mistakes in Climate Research. *Theoretical and Applied Climatology*. 2015, 1–5. DOI: 10.1007/s00704-015-1597-5 • <http://tinyurl.com/le6tcl4>
- Brulle, Robert J. (2014): Institutionalizing Delay: Foundation Funding and the Creation of U.S. Climate Change Counter-Movement Organizations. *Climatic Change*. 122, 681–694. DOI: 10.1007/s10584-013-1018-7 • <http://tinyurl.com/kp6vod8>
- Chefurka, Paul (2012): *Approaching the Limits to Growth*. <http://www.paulchefurka.ca/index.html>
- Cook, John – Nuccitelli, Dana – Green, Sarah A. et al. (2013): Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature. *Environmental Research Letters*. 8, 1–7. DOI:10.1088/1748-9326/8/2/024024 • <http://tinyurl.com/j3g8mcl>
- Faragó Tibor (2016): A párizsi klímátárgyalások eredményei. *Magyar Energetika*. 1, 8–12. • <http://tinyurl.com/lpnsb6d>
- Hornsey, Matthew J. – Harris, Emily A. – Bain, Paul G. – Fielding, Kelly S. (2016): Meta-analyses of the Determinants and Outcomes of Belief in Climate Change. *Nature Climate Change*. 6, 622–627. DOI: 10.1038/nclimate2943 • <http://tinyurl.com/lw6rfz0>
- Láng István – Kerekes Sándor (2013): Megalakult a Túlélés Szellemi Kör. *Magyar Tudomány*. 174, 1, 103–112. • <http://www.matud.iif.hu/2013/01/12.htm>
- Le Quéré, Corinne et al. (71 társszerző) (2015): Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*. 7, 2, 349–396. DOI: 10.5194/essd-7-349-2015 • <http://www.earth-syst-sci-data.net/7/349/2015/>
- McGlade, Christophe – Ekins, Paul (2015): The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2 °C. *Nature*. 517, 187–190. • <http://tinyurl.com/m2n76t6>
- Rahmsdorf, Stefan (2013): Paleoclimate: The End of the Holocene. Real Climate homepage. • <http://tinyurl.com/n9fjx8e>
- Spash, Clive L. (2014): *Better Growth, Helping the Paris COP-out? Fallacies and Omissions of the New Climate Economy Report. SRE - Discussion Papers*, 2014/04. Vienna: WU Vienna University of Economics and Business • <http://tinyurl.com/k6s3p76>
- Turner, Alex J. et al. (2016): A Large Increase in US Methane Emissions over the Past Decade Inferred from Satellite Data and Surface Observations. *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1002/2016GL067987 • <http://tinyurl.com/zyeg4h7>
- Vida Gábor (2012): *Honnan hívó Homo? Az Antropocén korszak gondjai. (Studia Physiologica 18)* Budapest: Semmelweis Kiadó • <http://tinyurl.com/khvk3s8>
- Vida Gábor (2015): Szétszabdalt tudomány, komplex problémák. In: Vásárhelyi Tamás (szerk.): *Herman Ottó a polihisztor munkássága, hatása*. Budapest: Függeden Pedagógiai Intézet, 165–172.
- Yue, Dajus – You, Fengqi – Darling, Seth B. (2014): Domestic and Overseas Manufacturing Scenarios of Silicon-based Photovoltaics: Life Cycle Energy and Environmental Comparative Analysis. *Solar Energy*. 105, 669–678. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.008
- URL1: NOAA National Centers for Environmental Information: *State of the Climate: Global Analysis for May 2016*, published online June 2016, • <http://tinyurl.com/mzlbjem>
- URL2: Vaughan, Adam (2016): *Seven Climate Records Set so far in 2016*. • <http://tinyurl.com/hpbazms>
- URL3: Global Commission on the Economy and Climate: *Better Growth Better Climate*. • <http://tinyurl.com/n6x9kt8>