

Jsme na počátku zrychleného oteplování?

Někteří klimatologové jsou přesvědčeni, že ano. Jiní o tom pochybují. To, že skleníkové plyny mohou být odpovědné za globální oteplování, bylo objeveno již před více než sto padesáti lety. Převážně opačné působení atmosférických aerosolů bylo postupně odhalováno až během posledních šedesáti let. Antropogenně produkováné aerosoly donedávna kompenzovaly přes třetinu vlivu skleníkových plynů. Díky zvýšené péči o čistotu ovzduší se však nyní dostává do atmosféry podstatně méně aerosolů. Zároveň roste produkce skleníkových plynů, proto jsou obavy ze zvýšené rychlosti oteplování opodstatněné.

text **MARCEL REJMÁNEK**

GLOBALNÍ OTEPLOVÁNÍ je nesporně jedním z největších nebezpečí pro civilizaci i biodiverzitu na Zemi. Hlavní pozornost je v této souvislosti právem věnována skleníkovým plynům, zejména oxidu uhličitému a metanu. Ve hře jsou však ještě další radiční působení (obr. 1). Předpověď dlouhodobého vlivu zvýšené koncentrace CO₂ na oteplování pochází z roku 1856 a potvrdily ji pokusy a výpočty v druhé polovině 19. století. [2] Naproti tomu profesionální zájem o klimatický vliv aerosolů se rozvinul teprve v sedmdesátých letech minulého století. Zda aerosoly v ovzduší způsobují oteplování, nebo ochlazování, bylo po řadu let předmětem diskusí. Jedním z důvodů byla skutečnost, že některé složky aerosolů přispívají k oteplování (černý uhlík) a jiné (sulfáty a nitráty) k ochlazování (tab. I). Časová a prostorová

proměnlivost koncentrace a složení atmosférických aerosolů jejich studium rozhodně neulehčují. Reid Bryson (1920–2008), meteorolog z Wisconsinské univerzity, byl pravděpodobně první, kdo v roce 1968 jednoznačně rozpoznal sumární ochlazovací efekt aerosolů (je ovšem překvapující, že tehdy pochyboval o rozhodujícím významu antropogenního CO₂). Klimatologové nyní rychle dohánějí zkoumání nedoceneného významu aerosolů. Počet publikací na toto téma vzrůstá exponenciálně. V roce 2000 vyšlo 209 odborných publikací na téma aerosoly a klima, v roce 2022 jich bylo 1791. A ani výzkum v naší republice nezůstává pozadu [4].

Významně role aerosolů si byl velice brzy vědom také James Hansen, profesor klimatologie a ředitel programu *Climate Science*,

Důležité termíny

AEROSOLY — směs nepatrných pevných nebo kapalných částic (0,001 až 10 μm) v atmosféře. Podílejí se na radiční bilanci atmosféry buď přímo, rozptylem a absorpcí záření, nebo nepřímo, tvorbou kondenzačních jader mraků. Nejdůležitější aerosoly v atmosféře představují sulfáty, nitráty, minerální prach, organický aerosol a černý uhlík (saze). Stratosférické aerosoly jsou především produktem sopečné činnosti. Přírodním zdrojem troposférických aerosolů je mořská tříšť, prach z pouští a částice z přírodních požárů. Troposférické aerosoly jsou dnes z největší části výsledkem průmyslových aktivit, dopravy, antropogenních požárů a změně povrchu krajiny (odlesňování, orba).

ALBEDO — poměr odraženého slunečního záření a záření dopadajícího na povrch; obvykle vyjadřován v procentech nebo jako desetinná čísla na škále 0–1.

CITLIVOST KLIMATU (CLIMATE SENSITIVITY) — změna roční průměrné globální povrchové teploty v reakci na změnu koncentrace CO₂ nebo jeho ekvivalentu v atmosféře.

ROVNOVÁŽNÁ CITLIVOST KLIMATU (EQUILIBRIUM CLIMATE SENSITIVITY, ECS) — je definována jako ustálená změna roční průměrné globální teploty povrchu v důsledku zdvojnásobení koncentrace atmosférického CO₂ nebo jeho ekvivalentu. Je-li za výchozí hodnotu považována předindustriální koncentrace CO₂ (přibližně 280 ppm), pak bez radikálních opatření dosáhneme její dvojnásobné hodnoty (560 ppm) v polovině našeho století. Výsledné zvýšení teploty bylo v sedmdesátých letech odhadnuto ve zprávě Národní akademie věd Spojených států amerických na 1,5–4,5 °C. Stejně rozpětí hodnot je obvykle považováno za správné i dnes. K hodnotě podstatně vyšší (4,8 °C ± 1,2 °C) dospěli nedávno na základě paleoklimatických dat J. E. Hansen a jeho spolupracovníci [5].

CITLIVOST ZEMSKÉHO SYSTÉMU (EARTH SYSTEM SENSITIVITY, ESS) — dlouhodobá citlivost klimatu (řádově stovky tisíc let) zahrnuje dlouhodobé zpětné vazby vyvolané změnami ledového příkrovu, vegetace a globálního cyklu uhlíku.

EL NIÑO — součást nepravidelně periodického kolísání větrů a povrchových teplot moře v tropické oblasti východního Tichého oceánu, které ovlivňuje klima na celé planetě. Fáze oteplování moře, zejména

ve východním Pacifiku, je známá jako El Niño a fáze ochlazování jako La Niña. El Niño je doprovázeno vysokým průměrným tlakem vzduchu v tropickém západním Pacifiku a La Niña tendencí opačnou. Obě období trvají pokaždé několik měsíců a obvykle se objevují jednou za 2–7 let s různou intenzitou. Nedávné El Niño situace (1982–1983, 1997–1998, 2015–2016) byly klasifikovány jako velice silné (super El Niño). Současné El Niño (2023–2024) je zatím považováno za mírné či průměrné.

ENERGETICKÁ NEROVNOVÁHA ZEMĚ (EARTH'S ENERGY IMBALANCE, EEI) — rozdíl mezi energií, kterou Země přijímá ze Slunce, a energií, kterou Země odráží a vyzařuje zpět do vesmíru. Pozitivní energetická nerovnováha znamená, že Země energii získává a v důsledku toho dochází k jejímu oteplování. EEI byla v prvním desetiletí tohoto století odhadována na +0,6 Wm⁻². V současném desetiletí je odhadována na +1,37 Wm⁻². Přepočteno na celou planetu je to přibližně 35krát více než veškerá energie užívaná v současnosti lidstvem [6].

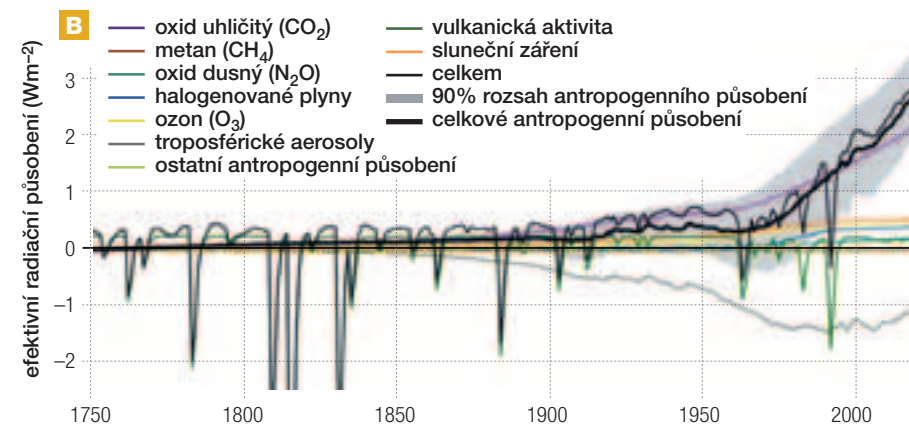
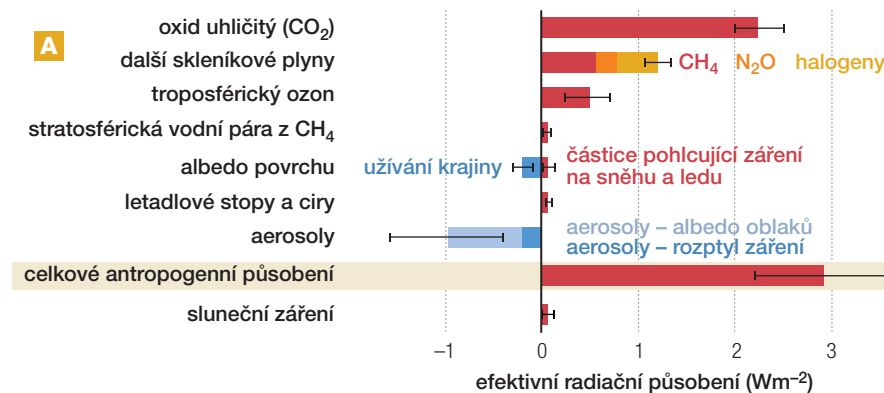
RADIČNÍ PŮSOBENÍ (RADIATIVE FORCING) — veličina udávající změnu energetické bilance klimatického systému Země, např. vlivem změny koncentrace skleníkových plynů, vlivem změny slunečního

záření nebo vlivem změny albeda zemského povrchu. V odborných studiích je radiční působení udáváno jako změna toku energie (vstupující minus vystupující) v tropopauze, tedy na hranici troposféry a stratosféry. Obvykle je vyjádřeno ve wattech na metr čtvereční zemského povrchu (Wm⁻²). Pokud není uvedeno jinak, všechny povrchové a troposférické podmínky jsou pro výpočty považovány za neměnné.

EFEKTIVNÍ RADIČNÍ PŮSOBENÍ — představuje výpočet změny radičního toku po krátkodobém (obvykle sezonním nebo kratším) přizpůsobení atmosférické teploty, vodní páry a mraků (tropospheric adjustment), ale beze změny globální průměrné povrchové teploty, teploty oceánů a plochy mořského ledu. Výsledkem je lepší predikce konečné teplotní reakce. Kladné radiční působení vede k oteplení zemského klimatu, záporné radiční působení vede k jeho ochlazování. V literatuře udávané hodnoty jsou většinou vztahovány k preindustriální době okolo roku 1750.

TEPLOTNÍ ANOMÁLIE — udává, o kolik byl zemský povrch v daném časovém intervalu teplejší než průměrná teplota v referenčním období, např. proti letům 1880–1920.

Awareness and Solutions na Kolumbijské univerzitě v New Yorku. Hansen je i neprofesionální veřejnosti znám jako neúnavný popularizátor, který znovu a znovu varuje před globálním oteplováním způsobeným spalováním fosilních paliv. Když 23. června 1988 vystoupil před Výborem pro energii a přírodní zdroje amerického Senátu, prohlásil, že globální oteplování je na 99 % způsobeno skleníkovými plyny uvolněnými člověkem, nikoliv přírodními výkyvy. Mnoha lidem to tehdy otevřelo oči. Situace je ovšem složitější. V dnes již klasickém článku „Slunce



a prach versus skleníkové plyny“, publikovaném v časopise *Nature* v roce 1990, James Hansen a Andrew Lacis poprvé zmínili metaforu „faustovská dohoda“ – antropogenní aerosolové znečištění ovzduší omezuje globální oteplování odražením slunečního záření zpět do vesmíru. O rozsahu chladičného působení aerosolů si můžeme udělat

1. ODHADY ZMĚN globálních průměrů efektivního radičního působení antropogenních faktorů a slunečního záření od roku 1750 do roku 2022 (sloupce). Úsečky znázorňují rozsahy pravděpodobných hodnot. V grafu A není zahrnuta sopečná činnost (negativní radiční působení), protože má epizodický charakter, a tím znesnadňuje srovnání s jinými působeními. V roce 1950 byla změna celkového antropogenního radičního působení pouze +0,57 Wm⁻². Tato změna vzrostla na +2,91 Wm⁻² v roce 2022. Odhadovaná změna by byla podstatně vyšší bez změny přímého (-0,21 Wm⁻²) a nepřímého (-0,77 Wm⁻²) negativního působení antropogenních aerosolů. Graf sestavený podle [1]

RNDr. MARCEL REJMÁNEK (*1946) vystudoval Přírodovědeckou fakultu UK v Praze. V letech 1979–1983 byl vedoucím Biomatematického střediska ČSAV v Českých Budějovicích. Nyní pracuje jako profesor ekologie na Kalifornské univerzitě v Davisu, zabývá se biologickými invazemi a dynamikou tropických lesů.



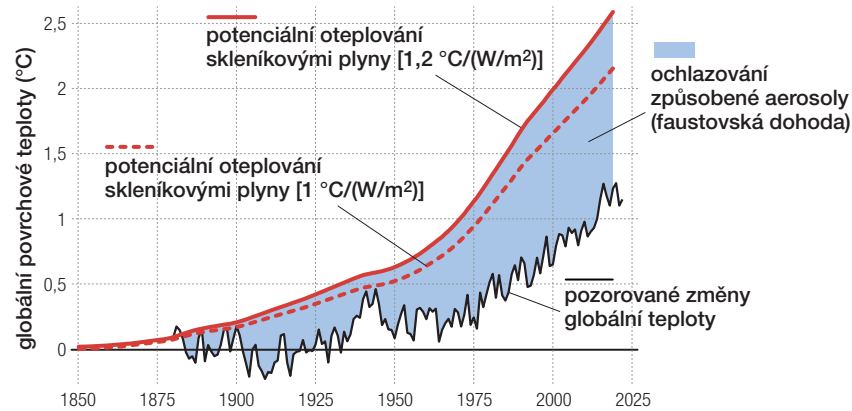
představu na základě diagramu (obr. 2), který pochází z velice obsáhlého článku Hansena a jeho spoluautorů [5].

Dnes víme, že celkové antropogenní působení aerosolů na energetickou bilanci Země je negativní, tedy zmírňující globální oteplování. Nejdůležitějším mechanismem negativního radičního působení aerosolů je tvorba kondenzačních jader pro mraky – více jader znamená menší kapky v mracích, a tedy světlejší (s albedem 40–90 %) a déle trávající mraky (obr. 1). Antropogenní aerosoly do určité míry kompenzují, a tedy maskují pozitivní radiční působení antropogenních skleníkových plynů (viz [2]). Splatnost faustovského dluhu se ale přiblížila. Snižováním zdraví škodlivého znečištění ovzduší se snižuje ochranná klimatická funkce atmosférických aerosolů. Na rozdíl od CO₂, který zůstává v atmosféře po staletí, životnost aerosolů trvá jen týdny a měsíce (v závislosti na výšce v atmosféře). Vedle stoupající koncentrace skleníkových plynů je zde tedy další faktor zvyšující energetickou nerovnováhu Země, a tím i rostoucí rychlost globálního oteplování. Souběžně s redukcí antropogenních aerosolů stoupá produkce a celkové energetické působení skleníkových plynů, které se nyní zvyšuje rychlostí 0,05 Wm⁻² za rok a dosahuje hodnoty 4,2 Wm⁻² jako rozdíl mezi rokem 1750 a 2023 [6].

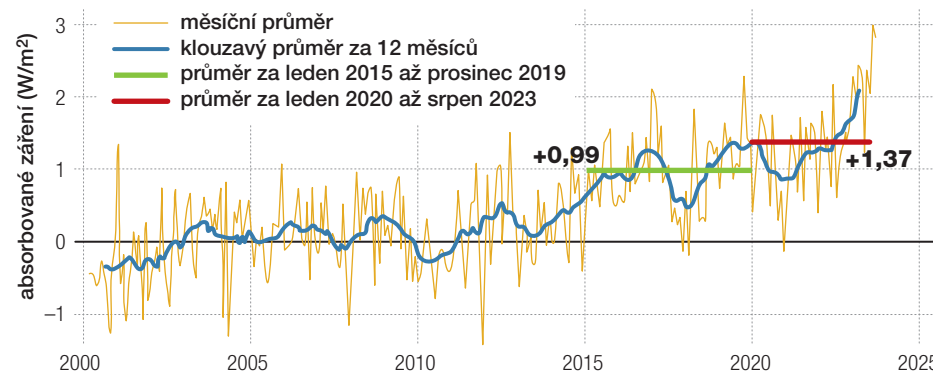
Z hlediska ochlazování klimatu jsou nejdůležitější složkou aerosolů sírany. Po odštěpení emisí tepelných elektráren se jedním z nejvýznamnějších zdrojů oxidů síry stala zaoceánská loďní doprava (tankery, trajekty a kontejnerové lodě). K prvním snížení emisí oxidů síry mezinárodní loďní dopravou došlo od 1. ledna 2015 a s platností od 1. ledna 2020 už nesmějí být v loďní dopravě používána paliva s obsahem síry větším než 0,5 %. Emise oxidů síry nad oceány se snížily o více než 50 %.

Hansen a jeho spolupracovníci jsou přesvědčeni, že všeobecný úbytek atmosférických aerosolů se již projevil a globální oteplování se urychluje. Jednou z indikací je recentní změna radiční bilance Země, která je od počátku tohoto století měřena v projektu CERES (Clouds and Earth's Radiation Energy System). Recentní vzrůst absorbovaného slunečního záření (obr. 3) je Hansenem a jeho spolupracovníky interpretován jako pokles albeda zemské atmosféry o 0,4 %. Zdá se to jen jako nepatrný rozdíl, ale odpovídá to náhlému zvýšení atmosférického CO₂ z 420 ppm na 525 ppm. Albedo je ovšem také snižováno úbytkem plochy mořského ledu, který je způsoben vzrůstající teplotou – jeden z příkladů destabilizující zpětné vazby.

Není překvapivé, že podle klimatického modelu Hansena a jeho spolupracovníků můžeme očekávat, že výsledkem je zrychlené globální oteplování. Zatímco v období 1970–2010 byla rychlost globálního



2. GLOBÁLNÍ PRŮMĚRNÉ povrchové teploty (černá křivka) a potenciální oteplování s dvěma volbami rovnovážné klimatické citlivosti (1,0 a 1,2 °C/Wm⁻²) ve srovnání se stavem v roce 1850. Modrá plocha představuje odhadované chladící působení aerosolů. Teplotní vrchol v době druhé světové války je částečný artefakt způsobený neúplnými daty z tohoto období. Graf převzatý z [5]



3. ABSORBOVANÉ globální sluneční záření ve dvou recentních časových intervalech v porovnání s průměrem 120 měsíců dat z projektu CERES (červenec 2005 – červen 2015). Graf převzatý z [6]

oteplování 0,18 °C za desetiletí, nyní můžeme očekávat zvýšení o 50 až 100 procent, tedy 0,27 až 0,36 °C za desetiletí (hranice žluté plochy v obr. 5). Pokud nedojde k radikálnímu snížení produkce skleníkových plynů, překročí měsíční průměry globálního oteplování 2 °C před rokem 2040. Zda jde skutečně o zrychlené oteplování, zpochybnil jeden z nejznámějších současných klimatologů Michael Evan Mann, profesor na Pensylvánské univerzitě [7]. Podle Manna je skutečnost dostatečně špatná i bez zrychleného oteplování. Řada nedávných měření a výpočtů

je ale v souladu se závěry Hansenova týmu [8–10]. Nad severním Atlantikem a Tichým oceánem skutečně dochází k poklesu celkové oblačnosti, k poklesu albeda, a tedy k výraznějšímu oteplení. Nejistota klimatických předpovědí je vždy dosti vysoká. (Zásadním nedostatkem je, že stále ještě postrádáme soustavné monitorování globálního aerosolového působení.) Definitivní odpověď na sebe ale nenechá dlouho čekat.

Podstatné snížení produkce skleníkových plynů je nutným cílem. Jsou ale ještě nějaké jiné možnosti, jak lze napravit energetickou

složky aerosolů	odhad (Wm ⁻²)	rozsah nejistoty
sulfáty (sírany)	-0,40	-0,60 až -0,20
nitráty (dusičnany)	-0,11	-0,30 až -0,03
aerosoly ze spálené biomasy	0	-0,20 až +0,20
primární organický uhlík z fosilních paliv	-0,09	-0,16 až -0,03
sekundární organické aerosoly	-0,03	-0,27 až +0,20
minerální prach	-0,10	-0,30 až +0,10
černý uhlík z fosilních paliv a biopaliv	+0,40	+0,05 až +0,80

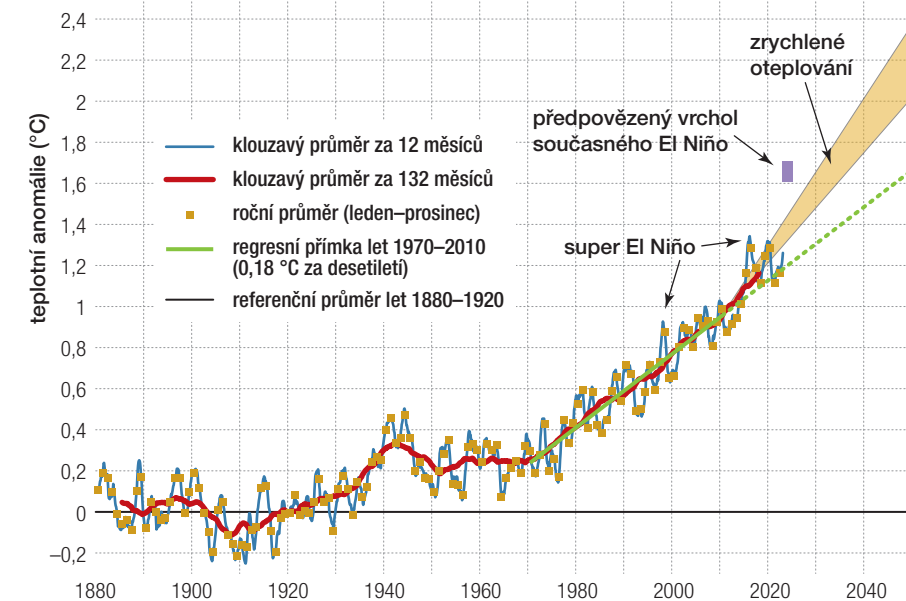
Tab. 1. ZMĚNY PŘÍMÉHO RADIČNÍHO PŮSOBNÍ různých složek aerosolů pro období 1750–2011. Odhadovaná sumární změna přímého působení aerosolů za toto období byla -0,33 Wm⁻². Změna nepřímého radičního působení aerosolů tvorbou mraků byla pro stejné období odhadována na -0,45 až -0,85 Wm⁻². Tabulka převzata z [3]



4. ALBATROSI ČERNOBRVÍ (*Thalassarche melanophris*) žijí zpravidla po celý život v monogamních párech. Francesco Ventura s kolegy (DOI: 10.1098/rspb.2021.2112) sledovali od roku 2003 rozpad párů na falklandském New Island, ke kterému docházelo zpravidla po neúspěšném rozmnožování. Zjistili, že rozchod se zvyšuje v letech s teplými anomáliemi povrchu oceánu. Pravděpodobně jde o přehlížený důsledek globálních změn.

bilanci Země? Významný běloruský klimatolog Michail I. Budyko (1920–2001) uvažoval již v roce 1974 o možnosti zvýšení albeda vstříkáváním aerosolů do stratosféry. Tato idea, která dnes spadá do oblasti zvané „solární geoinženýrství“, výrazně ožila v posledních deseti letech. Stále častěji se vyskytují úvahy, že solární geoinženýrství bude jediným reálným způsobem, jak zachránit arktický ledový příkrov. O možnosti dočasného řízení slunečního záření (SRM,

solar radiation management) uvažují i Hansen a jeho spolupracovníci [5]. Již delší dobu je známo, že sopečné stratosférické mraky způsobují ochlazování klimatu. Jelikož jsou tyto mraky produkovány především oxidem siřičitým (SO₂), zdá se být tento plyn vhodným pro umělou úpravu klimatu. Navrhované vstříkávání oxidu siřičitého do atmosféry je ale předmětem velice vyhraněných diskusí [11, 12]. Je to opět Michael Mann, kdo je zásadně proti (např.



5. GLOBÁLNÍ TEPLOTNÍ ANOMÁLIE povrchových teplot Země ve srovnání s průměrem let 1880–1920. Meze predikovaného zrychlení po roce 2010 (žlutá plocha) představují 0,36 a 0,27 °C za desetiletí. Graf převzatý z [5 a 6]

v knize *The New Climate War*, která nedávno vyšla v českém překladu). Rizik spojených s tvorbou sulfátových mraků je řada. Mimo jiné změny klimatického systému, které způsobí sucha v Africe a Asii, úbytek ozonu v stratosféře, kyselé srážky a acidifikace oceánů či drastické oteplení v případě náhlého ukončení importu aerosolů do atmosféry (termination shock). Použití mořské soli by mohlo být méně riskantní. Navržen byl také diamantový prach a prach z uhlíkatu vápenatého. Ještě by bylo také potřeba domyslet aspekty sociální a geopolitické. V žádném případě by ale řízená modifikace albeda atmosféry neměla být náhradou za podstatné snížení produkce skleníkových plynů. Mírného pokroku bylo dosaženo na klimatické konferenci COP 28 v Dubaji, pořádané OSN. Do závěrečného prohlášení se konečně dostal termín fosilní paliva. Klimatologové však nejsou ani zdaleka spokojeni (zde se Hansen a Mann naprosto shodují). Zcela oprávněně se dožadují konkrétnějších a zavazujících rozhodnutí. ●

K dalšímu čtení...

- [1] Foster P. M. et al.: Indicators of global climate change 2022. *Earth System Science Data* 15, 2295–2327, 2023, DOI: 10.5194/essd-15-2295-2023.
- [2] Rejmánek M.: Globální oteplování, změny krajiny a ztráty biodiverzity. *Živa* 68, 210–214, 2020/5.
- [3] Haywood J.: Atmospheric aerosols and their role in climate change. In: T. M. Letcher (ed.): *Climate Change*, Elsevier 2021, s. 645–659.
- [4] Novotný V. et al.: Exkurze do světa atmosférického aerosolu. *Vesmír* 101, 244, 2022/4.
- [5] Hansen J. E. et al.: Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change* 3, kgad008, 2023/1, DOI: 10.1093/oxfclm/kgad008.
- [6] Hansen J. et al.: How we know that global warming is accelerating and that the goal of the Paris agreements is dead. Sdělení z 10. listopadu a 14. prosince 2023. <http://www.columbia.edu/~jeh1>.
- [7] Mann M.: Comments on new article by James Hansen. Sdělení z 1. listopadu 2023. <https://michaelmann.net/content/comments-new-article-james-hansen>.
- [8] Quaas J. et al.: Robust evidence for reversal of the trend in aerosol effective climate forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 12221–12239, 2022, DOI: 10.5194/acp-22-12221-2022.
- [9] Li Z. et al.: Recent acceleration in global ocean heat accumulation by mode and intermediate waters. *Nature Communications* 14, 6888, 2023. DOI: 10.1038/s41467-023-42468-z.
- [10] Samsat B. H. et al.: Steady global surface warming from 1973 to 2022 but increased warming after 1990. *Communications Earth & Environment* 4, 400, 2023, DOI: 10.1038/s43247-01061-4.
- [11] Lee W. R. et al.: Quantifying efficiency of stratospheric aerosol geoengineering at different altitudes. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL104417, DOI: 10.1029/2023GL104417.
- [12] Wieners C. E. et al.: Solar radiation modification is risky, but so is rejecting it: a call for balanced research. *Oxford Open Climate Change* 3, kgad002, 2023/1, DOI: 10.1093/oxfclm/kgad002.