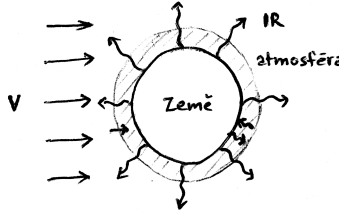


Jak je možné, že existují popírači globálního oteplování? Rozumějí radiační bilanci (obr. 2)? Ověřují všechna čísla? Znají fyzikální zákony? Zkusili si to spočítat? Nevím. Zkusím si to sám.

Skleníkový jev

*

Nejjednodušší popis skleníkového jevu je následující. Uvažujme zvláště: (i) Zemi, resp. její povrch, a (ii) atmosféru. Na náčrtu vidíme, že od Slunce přichází energie jako záření viditelné (V^1), kdežto ze Země a atmosféry odchází jako infračervené (IR). Nesmíme ovšem přehlédnout malé šipečky, znázorňující též výměnu energie mezi Zemí \leftrightarrow atmosférou!



Napišme pro Zemi a pro atmosféru příslušné zákony zachování energie:

$$(1 - k_V)(1 - A)\Phi + \sigma T_{\text{atm}}^4 = \sigma T^4, \quad (1)$$

$$k_V(1 - A)\Phi + k_{\text{IR}}\sigma T^4 = 2\sigma T_{\text{atm}}^4, \quad (2)$$

kde T označuje termodynamickou teplotu (v K) povrchu Země, T_{atm} totéž pro atmosféru, $\sigma \doteq 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W K}^{-4}$ Stefanovu–Boltzmannovu konstantu, Φ zářivý tok (ve W m^{-2}) od Slunce, A albedo (odrazivost) Země vč. atmosféry, k_V absorpční koeficient atmosféry v oboru viditelném, k_{IR} totéž v infračerveném (tepelném). Celkem jde o 6 členů. Lze je označit jako toky: $\Phi_{\odot \rightarrow \oplus}$, $\Phi_{\text{a.} \rightarrow \oplus}$, $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{o.}}$, $\Phi_{\odot \rightarrow \text{a.}}$, $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{a.}}$, $\Phi_{\text{a.} \rightarrow \text{o.}}$, kde „a.“ znamená atmosféra a „o.“ okolí.

Popis se vyznačuje značnou jednoduchostí: je psán pro 1 m^2 ; uvažuje planparalelní atmosféru se 2 povrchy, vyzařujícími stejně nahoru/dolů, zanedbali jsme jiné způsoby přenosu energie (fázové přeměny, proudění) atd. Neuvažujeme ani žádný tepelný profil $T_{\text{atm}}(r)$.

Důležitý parametr je solární konstanta $S = 1361 \text{ W m}^{-2}$ (Kopp a Lean 2011), tj. energie (v J) dopadající za 1 s na plochu 1 m^2 kolmo k paprsku *mimo* atmosféru.

1. též NIR

Průměrný tok na vrchu atmosféry je ovšem pouze $\Phi = \mathcal{S}/4$, protože: (a) Země je koule; (b) Slunce svítí jen z jedné strany. Jinými slovy, Slunce je malá světlá skvrna na jinak tmavé obloze.

Zde budeme předpokládat, že \mathcal{S} je konstantní; beztak nehraje žádnou roli v oteplování! Hodnotu albeda uvažujeme standardní, $A = 0,31$, společnou pro Zemi a atmosféru.

Experiment. Co můžeme sami měřit? Nejjednodušší je asi měření teploty. Vzal jsem proto infrateploměr, namířil jsem jej na oblohu, $T_{\text{atm}} = -25^\circ\text{C} \doteq 248\text{ K}$, a na zem, $T = 10^\circ\text{C} \doteq 283\text{ K}$ (viz tab. 1). Samozřejmě je takové měření příliš ledabylé! Vždyť jsme neuvažovali žádné rozdíly den/noc, léto/zima, rovník/pól, oblačnost, různost povrchů atd. Nicméně berme to jako ledabylý experiment anebo okamžitý stav.

čas UT	podmínky	T °C	T_{atm} °C
4. 11. 14 h	den, skoro jasno	+10	−25
5. 11. 19 h	noc, jasno	0	−34
8. 11. 8 h	den, mlha	+1	−1

Tab. 1 — Měření okamžité teploty povrchu Země a atmosféry pomocí infrateploměru. Nejistota měření je sice $\sigma_T \simeq 1^\circ\text{C}$, ale podstatně větší je její proměnlivost v čase a prostoru, řádově $\Delta T \simeq 30^\circ\text{C}$.

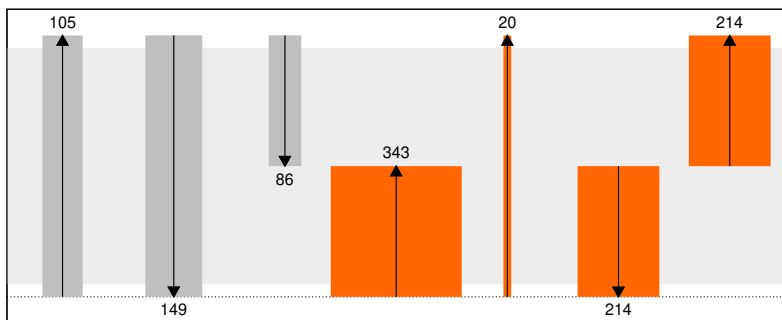
Z rovnic (1), (2) pak lze vyjádřit:

$$k_V = 1 - \frac{\sigma T^4 - \sigma T_{\text{atm}}^4}{(1 - A)\Phi}, \quad (3)$$

$$k_{\text{IR}} = \frac{2\sigma T_{\text{atm}}^4 - k_V(1 - A)\Phi}{\sigma T^4}. \quad (4)$$

Vychází $k_V = 0,36$, $k_{\text{IR}} = 0,94$. Zajímavé. Asi třetina viditelného záření je pohlcena, což by odpovídalo obvyklé extinkci při astronomických pozorováních. V infračerveném oboru atmosféra pohlcuje mnohem víc než ve viditelném. Zajímavější jsou jednotlivé toky (ve W m^{-2}): $\Phi_{\odot \rightarrow \text{o.}} = 105$, $\Phi_{\odot \rightarrow \oplus} = 149$, $\Phi_{\odot \rightarrow \text{a.}} = 85$, $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{a.}} = 343$, $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{o.}} = 20$, $\Phi_{\text{a.} \rightarrow \oplus} = \Phi_{\text{a.} \rightarrow \text{o.}} = 214$; znázorňuje je obr. 1. Soustředíme se a dejme si pozor na jazyk. Platí *zde* totiž následující tvrzení:

1. **Atmosféra nás hřeje víc než Slunce!**
2. Slunce nám dává světlo.
3. Atmosféra nám dává neviditelné světlo.
4. Země svítí víc než Slunce.



Obr. 1 — Radiální bilance dle jednoduchého popisu. Dole povrch Země, nahoře vršek atmosféry. Číselné hodnoty udávají toky (ve W m^{-2}). Viditelné světlo šedě, neviditelné červeně. Výpočet byl proveden pro parametry $T = 283 \text{ K}$, $T_{\text{atm}} = 248 \text{ K}$, $k_V = 0,36$, $k_{\text{IR}} = 0,94$.

5. Vzduch je zahříván Zemí.
6. Vzduch je neprůhledný (v IR).
7. Slunce má 6000 K , ale pouze $6 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$ (steradiánů).
8. Atmosféra má okolo 248 K , ale celých $2\pi \text{ sr}$.
9. Bez Slunce by samozřejmě $T_{\text{atm}} \rightarrow 0$ i $T \rightarrow 0$.

Naopak neplatí tvrzení:

1. ~~Slunce nám dává světlo a teplo.~~
2. ~~Vzduch je zahříván Sluncem.~~
3. ~~Vzduch je průhledný.~~

Trochu přeháním, tvrzení nejsou zcela nepravdivá, ale polopravdivá. Nikdo nezpochybňuje, že Slunce svítí v NIR nebo že vzduch je částečně průhledný (zejm. ve V). Také záměrně užíváme protimluv „neviditelné světlo“, protože IR je svou podstatou stejné jako V.

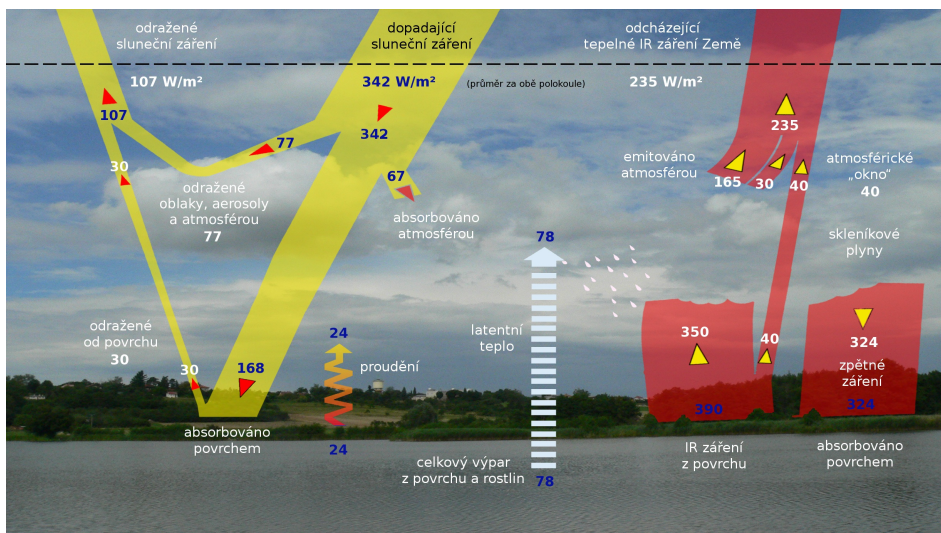
Zkontrolujme radiální bilanci v literatuře, založenou na globálních měřeních a podstatně složitějším modelování (viz obr. 2). Co vidíme? Že i naše okamžité měření a úplně jednoduchý popis mají smysl! Odchyly sice dosahují mnoha desítek procent (zejm. $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{o.}}$, $\Phi_{\text{a.} \rightarrow \oplus}$), ale všechna výše uvedená tvrzení jsou kvalitativně správná.

Opacita

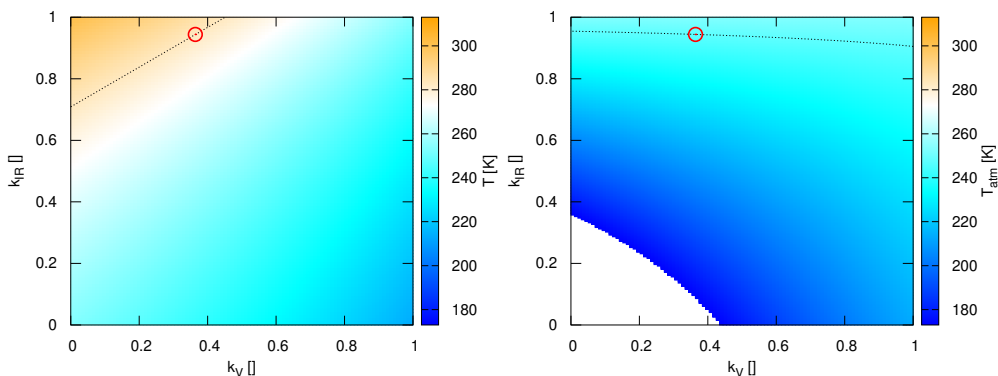
*

Co kdyby se měnily absorpční koeficienty k_V , k_{IR} ? Z (1), (2) bychom vyjádřili:

$$T = \left[\frac{(1 - 0,5k_V)(1 - A)\Phi}{(1 - 0,5k_{\text{IR}})\sigma} \right]^{0,25}, \quad (5)$$



Obr. 2 — Radiční bilance dle [1].



Obr. 3 — Teplota Země T (vlevo) a atmosféry T_{atm} (vpravo) v závislosti na absorpčním koeficientu k_V ve viditelné a k_{IR} v infračervené oblasti spektra. Červený bod odpovídá našemu měření.

$$T_{atm} = [T^4 - (1 - k_V)(1 - A)\Phi/\sigma]^{0.25} \quad (6)$$

a podle obr. 3 bychom viděli, jak se mění teplota T i T_{atm} , bez ohledu na hodnotu $S = \text{konst.}$ Evidentně, atmosféra má zásadní vliv, a to k_{IR} více než k_V . Bez atmosféry ($k_V = k_{IR} = 0$) bychom byli na $T = 253 \text{ K}$, brr... A to jsme nezměnili A , které by při sněhové pokrývce mohlo vzrůst až na 0,90!

Zkontrolujme absorpci celé atmosféry tak, že ji přepočítáme na opacitu κ (čes. neprůhlednost). Je definována jako *relativní* úbytek intenzity I na jednotku délky dx a jednotku hustoty ρ :

$$dI = -\kappa \rho I dx. \quad (7)$$

Její jednotka $[\kappa] = \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$; čili jaká plocha (z 1 m^2) by byla geometricky zastíněna, kdybychom rozptýlili 1 kg dané látky. Je-li dI/I velké, nelze rovnici použít přímo v diferenciálním tvaru, nýbrž v integrálním tvaru:

$$I(x) = I(0) e^{-\kappa \rho x}, \quad (8)$$

neboli:

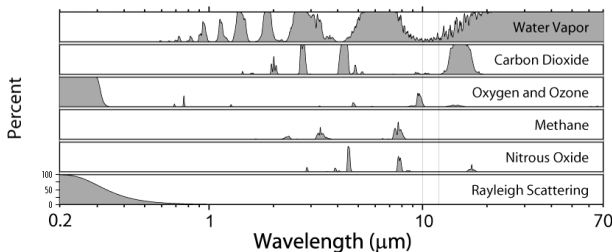
$$\kappa = -\frac{1}{\rho x} \ln \frac{I(x)}{I(0)}. \quad (9)$$

V našem případě $x \simeq 10 \text{ km}$, $\rho \simeq 1 \text{ kg m}^{-3}$, když uvažujeme atmosféru jako homogenní. Celková hmotnost atmosféry pak vychází správně asi $5 \cdot 10^{18} \text{ kg}$. Dále $I(x)/I(0) = 1 - k_V = 0,64$, tedy $\kappa_V = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$. Je to hodně, nebo málo? Málo. Látka je totiž v neutrálním stavu, fotony z oboru V nezpůsobují excitace/ionizace elektronových stavů molekul N_2 , O_2 , čili se šíří snadno.² Otázka je, co způsobuje zvýšenou absorpci (opacitu) v IR?

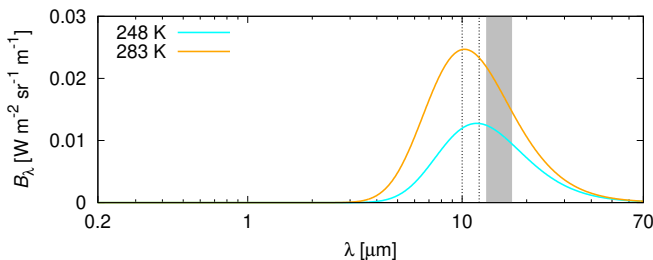
Experiment. Počítání beráneků. 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... Proč je počítám? Abych si uvědomil, že zvýšená opacita oblaků (ve V) není způsobena běžnými plyny (N_2 , O_2), nýbrž vzácnými (H_2O). V tomto případě došlo k fázovému přechodu (kondenzaci), čili vzniku kapiček, které účinně rozptylují světlo. Ostatně vidím, že v mlze nevidím. Infrateploměrem lze ověřit, že oblaky způsobují změny také v oboru IR. Zde může jít o projev zmiňovaných kapiček, teplotního profilu $T_{\text{atm}}(r)$ nebo tepla odevzdaného okolí při kondenzaci.

Dokonce ani kdyby žádné oblaky vidět nebyly, teplota by kolísala, protože sama vodní pára způsobuje absorpci v IR. Astronomové na observatoři ALMA by mohli vyprávět. Celá observatoř byla navržena tak, aby pozorovala v mezerách mezi absorpčními pásy. Důvodem jsou vibrační přechody v molekule H_2O , resp. vazbě O–H. Obsah vodní páry je průměrně 0,4 % (na objem), resp. 0,25 % (na hmotnost). Podle (9) dělíme menším ρ , tzn. že opacita samotné páry v IR je řádově vyšší, $\kappa_{\text{IR}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$.

2. Naopak fotony z UV způsobují excitace/ionizace ve vysoké atmosféře (termosféře), a proto se nešíří snadno.



Obr. 4 — Závislost procentuální absorpce atmosférou na vlnové délce λ , způsobená molekulami: H_2O , CO_2 , O_2 , O_3 , CH_4 , NO_2 . Uveden je také Rayleighův rozptyl (ve V, UV), účinný pro všechny molekuly. Převzato z (http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_band).



Obr. 5 — Monochromatická intenzita B_λ v závislosti na λ pro vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě 248 K (modře) a 283 K (oranžově) dle Planckova zákona. Skutečné vyzařování je zásadně ovlivněno propustností atmosféry; mezi 13 a 17 μm je jeden z absorpčních pásů CO_2 .

Experiment. Na pružině se závaží si ověřím, že zrychlení:

$$a = -\frac{kx}{m}, \quad (10)$$

kde k je tuhost pružiny, x výchylka, m hmotnost závaží. Čím tužší, tím je frekvence kmitů vyšší, protože vratné zrychlení je větší. Jednotky jsou $[k] = \text{kg s}^{-2}$, $[m] = \text{kg}$, čili úhlová frekvence těžko může být něco jiného než:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (11)$$

Co kmitá v molekule H_2O ? Vodík, čili $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Co přitahuje H a O? Kdyby byla vazba iontová, tzn. H^+ a O^- , pak podle Coulombova zákona:

$$k = -\frac{am}{x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{x^3}, \quad (12)$$

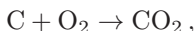
což při $\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$, $e = 1,6 \text{ C}$ a $x = 0,27 \text{ nm}$ vychází 12 kg s^{-2} . Kmity umožňují absorpci/emisi fotonu s $E = \hbar\omega = 0,05 \text{ eV}$ a $\lambda = 2\pi c/\omega \doteq 23 \mu\text{m}$, tj. IR. Ve skutečnosti je vazba slabší (kovaletní) a pružina poddajnější. Také by se měla užít redukováná hmotnost, $\mu^{-1} = m_1^{-1} + m_2^{-1}$, a uvážit odpudivá síla, neboť kmitání je okolo rovnovážné polohy; nicméně musí být řádově stejně velká jako přitažlivá. Přitom jde o kvantový systém, tedy s kvantovanými hladinami E a různými λ zahrnujícími prakticky celý obor IR. V případě CO_2 lze obdobnou úvahou dojít k obdobnému λ , neboť $x \downarrow$, $m \uparrow$.

V literatuře je možno zkontrolovat, že právě tyto dva plyny, H_2O , CO_2 , mají široké absorpční pásy přes celé IR (viz obr. 4). Naopak N_2 , O_2 nehrají roli, i když jejich hmotnostní podíl je řádově větší, protože jsou prostě příliš průhledné (v IR).

Emise CO_2

*

Obsah CO_2 ve vzduchu je asi 0,04 % (na objem), neboli 400 ppm (částí na milión). Jak odhadnout emise od doby průmyslové revoluce? Například podle údajů IEA se mezi roky 1971 až 2019 těžilo od 3 500 do 8 000 megatun uhlí za rok, tzn. asi 276 000 Mt celkem (obr. 6). Obsah C bývá 70 %. Hmotnost CO_2 je pochopitelně větší, neboť:



odkud plyne $7 \cdot 10^{14} \text{ kg}$, což po přepočtení na objem činí 90 ppm! Je sice poněkud obtížné vidět neviditelný plyn v neviditelném oboru, nicméně jámy v Severočeské hnědouhelné pánvi vidí všichni. Samozřejmě ne všechny plyn zůstává v atmosféře, část je opět vázána v přírodě (v jiné podobě). Na druhou stranu máme také jiné zdroje emise — zemní plyn, ropu, cement, odlesňování atd.

V literatuře lze ověřit, že tyto antropogenní emise nejsou vázány zcela, měřené množství CO_2 totiž neustále roste (obr. 7); příp. poklesy jsou sezónní změny. Od průmyslové revoluce je nárůst přinejmenším 130 ppm (z 270 na dnešních 400).

Globální oteplování

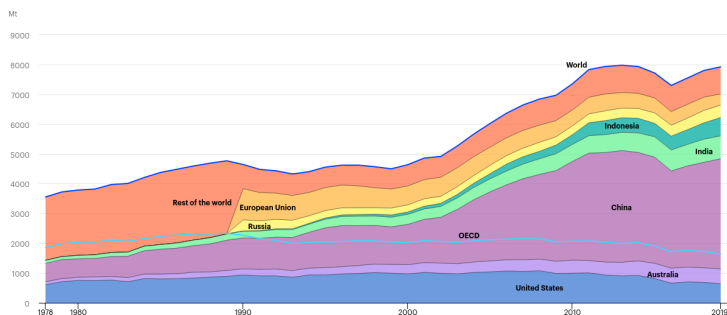
*

Zásadní otázka je, jak se mění k_{IR} ? Pokud by absorpce v IR byla způsobována pouze CO_2 , pak by byla úměrná jeho ρ podle (9), $k = 1 - e^{-\kappa\rho x}$. Je-li dnešní $k_{\text{IR}} = 0,94$, pak původní by bylo 0,88. Protože se však CO_2 podílí na absorpci jen částečně (asi 1/6; viz obr. 4 v rozsahu obr. 5), zbytek (5/6) zajišťuje H_2O , vezmeme jen 1/6 změny, tzn. 0,93. Protože se však při změně T zároveň změní obsah H_2O , vezmeme dvojnásobek změny, tzn. 0,92.

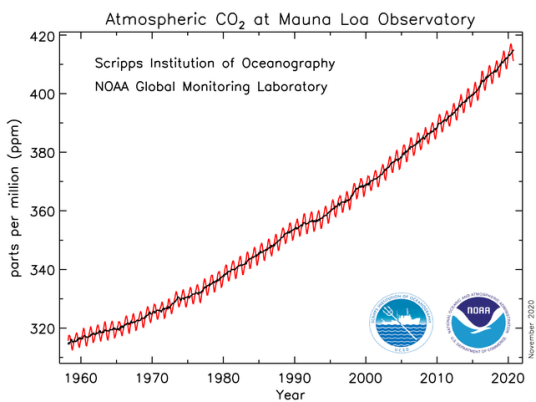
Jde o zásadní změnu radiační bilance (ve W m^{-2}): $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{a.}} = 330$, $\Phi_{\oplus \rightarrow \text{o.}} = 27$, $\Phi_{\text{a.} \rightarrow \oplus} = \Phi_{\text{a.} \rightarrow \text{o.}} = 208$ (srov. obr. 1 a 8). Teplota v minulosti musela být nižší $T' = 281,7 \text{ K}$, čili $\Delta T = T - T' = +1,3 \text{ K}$. Tj. podstata globálního oteplování.

Závěr? Pomocí zákona zachování energie a Stefanova–Boltzmannova zákona jsme popsali, jak funguje skleníkový jev a globální oteplování. Jejich podstatou jsou plyny H_2O a CO_2 , absorbující v oboru IR. Některé parametry (k_V , k_{IR}) jsme přitom ověřovali vlastním měřením, abychom si věřili. Jiné (např. těžbu uhlí) jsme získávali z důvěryhodných zdrojů. Došli jsme k závěru, že se teplota zvýšila asi o 1 K, což je zcela v souladu se zprávami panelu IPCC [3]. Jaká je tedy odpověď na první otázku? Nevím.

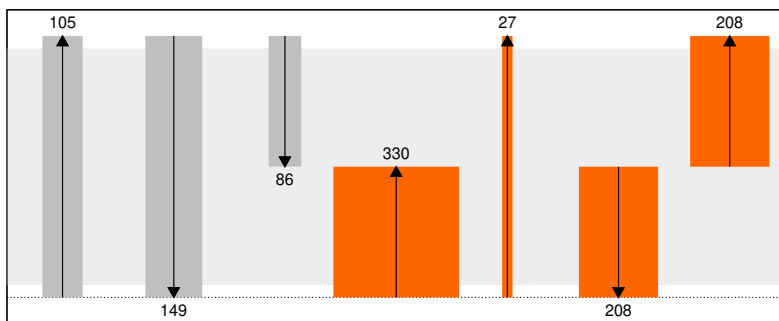
- [1] HAIGH, J. D. *The Sun and the Earth's climate*. Living Rev. Solar Phys., **4**, 2, 2007.
- [2] KOPP, G., LEAN, J. L. *A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance*. Geophys. Res. Lett., **38**, L01706, 2011.
- [3] STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A. A. J. (EDS.) *IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.



Obr. 6 — Roční těžba uhlí v megatunách (Mt) v období let 1978 až 2019 podle IEA. Převzato z <https://www.iea.org/>.



Obr. 7 — Měření obsahu CO₂ ve vzduchu v jednotkách ppm (části na milión) na observatoři Mauna Loa, Hawaii. Převzato z <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html>.



Obr. 8 — Totéž jako obr. 1, ale pro nižší absorpční koeficient $k_{IR} = 0,92$.

