

Jak velký je skleníkový jev?

Obsah

1 Úvod o sálání.....	1
2 Jev už začátkem století dosáhl 342 W.m^{-2}	2
3 Jak se skleníkový jev mění.....	3
4 Kolik tepla posílá na povrch Slunce: 183 W.m^{-2}	3
5 A kolik jej povrch pohltí: 160 W.m^{-2}	4
6 Jak je tedy skleníkový jev relativně silný? Dvakrát silnější než slunce!.....	6
7 Jak globální ohřívání narostlo.....	6
8 Tepelné toky z vesmíru dolů a z povrchu do vesmíru podrobně.....	7
8.1 Schéma globálních toků energie ovzduším pro období 2000 až 2020.....	7
8.1.1 Ke žlutým šipkám, levé části schématu.....	7
8.1.2 K modrošedým šipkám, pravé části schématu.....	7
8.1.3 K bilanci toků záření.....	8
8.2 Jak nepříznivá bilance narostla.....	8
9 Skleníkový jev v průběhu dne, týdnů, sezón a roků.....	9
10 Odkazy.....	12

1 Úvod o sálání

Sousloví „skleníkový jev“ slyšíme už desítky let. Když to někdo vysvětluje, často se pouští do toho, jaké molekuly pohlcují jaké záření, kam ony vyzařují, až se do toho zaplete. Přitom to jde pochopit snadno! I díky tomu, že v češtině máme pojmenování pro věc, kterou všichni znají: totiž že předměty vydatně září tím více, čím jsou teplejší: **sálají**. Slunce z metru čtvereční svého horkého „povrchu“ náramně moc, ale ve vzdálenosti Země je to na metr čtvereční obráceného ke Slunci v průměru jen 1361 W , skrz ovzduší je to ale nanejvýš 1 kW.m^{-2} . Stojít-li u rozpálené plotny kamen, může sálání na vaši tvář být i několikrát větší. A sama tvář sálá výkonem $0,5 \text{ kW.m}^{-2}$.

Sálají i věci velmi chladné, například otevřená mraznička, ale sálají o tolik méně než naše tvář, že cítíme chlad. Ovzduší na nás sálá více než mrazák, nejde-li o bezoblačnou oblohu za velkých mrazů, není totiž o mnoho chladnější než krajina kolem nás. Sálá přitom ze svého objemu, na rozdíl od zdi, která sálá pouze ze svého povrchu (podobně se ale chová i spodní základna neprůhledné oblačnosti). Valná většina sálání z ovzduší na zem přichází z nejnižších stovek metrů. A na rozdíl od sálání zdi či lesa jsou v sálání z bezoblačného nebe málo zastoupené některé vlnové délky, na nichž skleníkové plyny téměř nevyzařují ani záření nepohlcují (zejména oblast 8 až 14 mikrometrů, čehož využívají termokamery sledující teploty povrchů).

Sálání ovzduší na zem, to je ten skleníkový jev. V létě v našich šířkách silnější (až tak 375 W.m^{-2}), v zimě slabší (třeba jen 225 W.m^{-2} , jak ukazuje [Obrázek 8a](#). Kromě teploty záleží i na vlhkosti vzduchu a přítomnosti nízké oblačnosti – obojím se sálání také zvětšuje. A na rozdíl od slunečního sálání, které v noci chybí, kolísá skleníkový jev mezi dnem a nocí jen málo ([Obrázek 7](#)). Proto je roční úhrn sálání atmosféry na pevniny a moře větší než úhrn, který povrch planety pohltí ze slunce. Ten činí u nás zaokrouhleně 1000 kWh za rok na metr čtvereční (jak vědí ti, co mají fotovoltaiku), vyděleno délkou roku ($365 \cdot 24 \text{ h} = 8760 \text{ h}$) to znamená průměrný příkon jen kolem 115 W.m^{-2} . Ze skleníkového jevu ale krajina (konkrétně švýcarského podhůří) dostává téměř trojnásobek, jak ukazuje modrá přímková čára na obrázku 8a. V dalších kapitolách oba druhy sálání podrobně kvantifikujeme...

2 Jev už začátkem století dosáhl 342 W.m⁻²

Skleníkový jev opravdu velký, i když není vidět, jen cítit. Vidět není proto, že se odehrává neviditelným zářením, totiž dlouhovlnným infračerveným. Takového záření je všude kolem nás velmi mnoho, do prostředí dopadají, a rovněž z něj vyzařují, stovky wattů na metr čtvereční.

Ale teď k přesné odpovědi. Začneme tím, že si uvědomíme, co to ten skleníkový jev je. Je to jednoduché: **Skleníkový jev je sálání ovzduší na zemský povrch**. Takže stačí vyčíslit, kolik toho sálání, čili záření z ovzduší vlivem jeho teploty, na povrch planety dopadá.

Měřením takové veličiny se zabývá více než 200 stanic rozestých po celém světě. 183 z nich, které měří již desítky let, je zahrnuto do rozsáhlé studie *Assessment of surface downward longwave radiation in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5*¹ (přehled stanic a mapa je na Fig. 1 v oné studii Xu et al.). Ta k nim přibírá data spočítaná ze satelitních měření (CERES), z reanalýz (detailních modelů minulého počasí opřených o skutečně naměřená data, zde ERA5) a z výpočtů „Obecných cirkulačních modelů“ – ty modelují fyzikální procesy v ovzduší a oceánech a ladí se tak, aby co nejlépe reprodukovaly klima od poloviny 19. století do současnosti.

Přehled odpovědí na otázku „Jak velký je skleníkový jev?“ je uveden v tabulce z oné studie, kterou zde přebíráme. Za nejspolehlivější hodnotu se považuje ta získaná metodou „BMA“, tedy pro počátek našeho tisíciletí to byla hodnota **342 W.m⁻²**. Jak je ale z tabulky vidět, údaje jiných autorů a z jiných metod se liší nejvýše o jedno procento z této hodnoty. Velikost skleníkového jevu známe tedy velmi dobře. (Z představitelného metru čtverečního si ji můžete vynásobit, abyste dostali gigantickou sumu pro úhrn povrchu Země, to je snadné cvičení už pro žáky základní školy.)

Tabulka 1:

Globální průměr dolů směřujícího dlouhovlnného záření u zemského povrchu dle modelů všeobecné cirkulace oceánů a atmosféry (GCMs), reanalýz a satelitních dat, a srovnání s dalšími studii. Hodnoty jsou vyjádřeny ve wattch na metr čtvereční zemského povrchu.

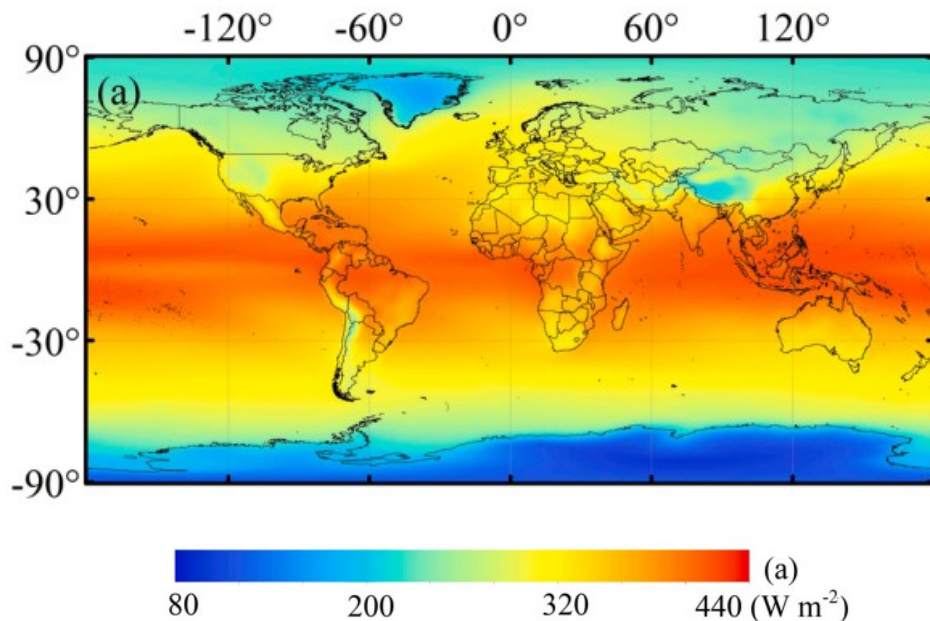
Převzato z práce Xu et al. (2022), kde je to jako

„Table 2. The averaged global annual mean SDLR of the CMIP6 GCMs, CMIP5 GCMs, ERA5, CERES EBAF and reference estimates (in units of W m⁻²).“

Období	CMIP6 GCMs		CMIP5 GCMs		ERA5	CERES EBAF	Referenční odhady
	SMA	BMA	SMA	BMA			
1992–2005	342.0	340.5	339.0	341.1	338.6	–	341 (Ma et al., 2014)
2000–2004	343.2	341.6	340.0	342.1	339.0	345.5	342 (Wild et al., 2013)
2000–2009	343.5	341.9	–	–	339.3	345.2	341 (L'Ecuyer et al., 2015)
2003–2010	343.8	342.1	–	–	339.6	345.2	342 (Wang and Dickinson, 2013)
2000–2014	343.9	342.2	–	–	339.5	345.2	344 (Wild, 2020)

Samozřejmě je skleníkový jev silnější tam, kde je vzduch teplý (sálání s teplotou roste) a vlhký, vodní pára je totiž silný skleníkový plyn. Více skleníkových plynů přitom znamená, že přibude sálání pocházejícího z nejnižších vrstev ovzduší, které jsou zpravidla nejteplejší. Nejsilnější sálání, tedy nejsilnější skleníkový jev, je proto v ročním průměru v tropech. A nejslabší je tam, kde je vzduch studený a s velmi malým obsahem páry, jako ve velké nadmořské výšce nad Tibetem nebo Grónskem. To ukazuje následující mapa:

1 Jiawen Xu et al., 'Assessment of Surface Downward Longwave Radiation in CMIP6 with Comparison to Observations and CMIP5', *Atmospheric Research* 270 (1 June 2022): 106056, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106056>.



Obrázek 1: Celoroční průměr sálání ovzduší dopadajícího na povrch, Fig. 7a z práce *Xu et al. 2022* dle výpočtů [CMIP6 GCM](#) s užitím metody BMA pro období 2000 až 2005

3 Jak se skleníkový jev mění

Z tabulky 1 je patrné, že globálně průměrovaný skleníkový jev roste, za desetiletí o více než watt na metr čtvereční. Je dáno jak tím, že je teplejší ovzduší, tak i tím, že obsahuje více skleníkových plynů. V našem okolí roste ještě více – oteplení je zde dvojnásobné oproti tomu globálnímu (hlavně proto, že oceány se oteplují pomaleji než pevnina) a nárůst obsahu vodní páry má významnější roli než v tropech. Na stanicích ve Švýcarsku, které měří už téměř 30 let, sálání rostlo tempem přes $3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ za desetiletí ([Obrázek 8](#)), v desátých letech našeho století ale ještě dvakrát rychleji². Teplota krajiny ovšem nerostla tak velkým tempem, které by takovému rychlému nárůstu dlouhodobného příkonu odpovídalo, protože jak její teplota rostla, rostlo i sálání povrchu směrem vzhůru.

V roce 2024 bylo a v roce 2025 je a bude sálání ovzduší na povrch zajisté ještě silnější, jak vlivem vyšších koncentrací skleníkových plynů, tak především i rekordních teplot, daleko přesahujících minulá desetiletí (teploty viz [Climate Pulse](#)).

Skleníkový jev samozřejmě kolísá v denním cyklu, dle toho, jak kolísá teplota vzduchu zejména v první stovce metrů nad zemí. Ale kolísání není veliké, mnohem větší plyne ze střídání ročních období. A jev vždy zesílí, je-li přítomna oblačnost – pak se totiž uplatňuje její sálání místo slabšího sálání vzduchu ve výškách nad oblaky. O tom v kapitole 9.

4 Kolik tepla posílá na povrch Slunce: $183 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

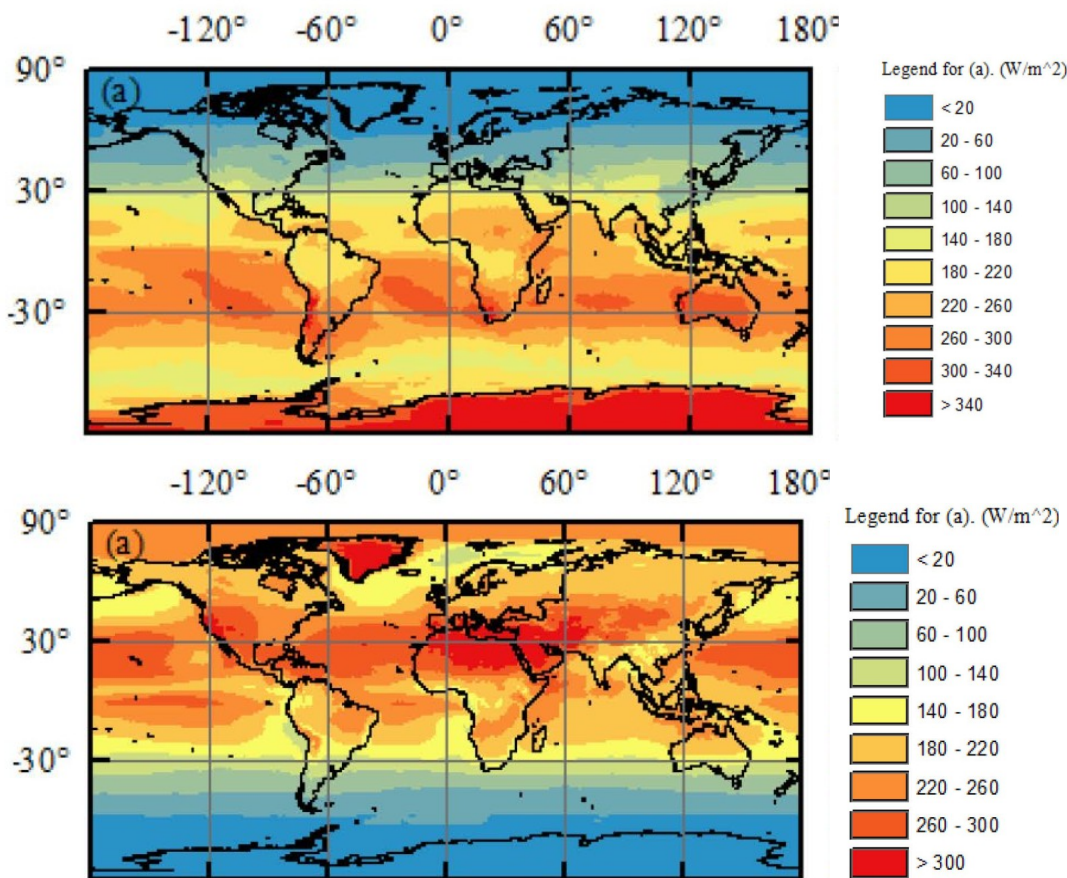
Pro pochopení, jak je sálání ovzduší mohutné, je vhodné porovnat je se sáláním Slunce, tedy s příkonem slunečního záření dopadajícího až na povrch planety.

I tento příkon se měří na stovkách stanic po světě, někde už sto let, a také se počítá ze satelitních dat. Globální celoroční průměr vychází kolem $183 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, jak dokládá práce „*Evaluation of the Reanalysis Surface Incident Shortwave Radiation...*“³ s oporou o kalibraci ze 674 stanic (mapa je

2 Laurent Vuilleumier et al., ‘Thermal Infrared Radiation Trends in Switzerland’, *AIP Conference Proceedings* 2988, no. 1 (18 January 2024): 060003, <https://doi.org/10.1063/5.0183492>.

3 Xiaotong Zhang et al., ‘Evaluation of the Reanalysis Surface Incident Shortwave Radiation Products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA Using Satellite and Surface Observations’, *Remote Sensing* 8, no. 3 (March 2016): 225, <https://doi.org/10.3390/rs8030225>.

tam jako Fig. 1). Sluneční příkon na povrch je tedy téměř dvakrát menší, než ten ze sálání zemského ovzduší, ze skleníkového jevu. Proč je tak malý, je snadné pochopit. Za letního poledne, je-li jasno a průzračno a slunce je velmi vysoko na nebi, se sice blíží jednomu kilowattu na metr čtvereční a slunce náramně hřeje, ale ráno a večer je oslunění krajiny mnohem menší a v noci není žádné. A na rozdíl od skleníkového jevu oblačnost sluneční příkon nezesiluje, ale velmi snižuje... A ovšem také máme různá roční období, viz následující mapy z oné práce:



Obrázek 2:

Průměry slunečního záření dopadajícího na povrch. Nahoře pro prosinec až únor, dole pro červen až srpen. Jde o výřezy z Fig. 4 a 5 práce *Zhang et al. 2016*, mapy vycházejí z CERES-EBAF. (Další částí obou obrázků v oné práci představují odchylky od této mapy dle jiných analýz.)

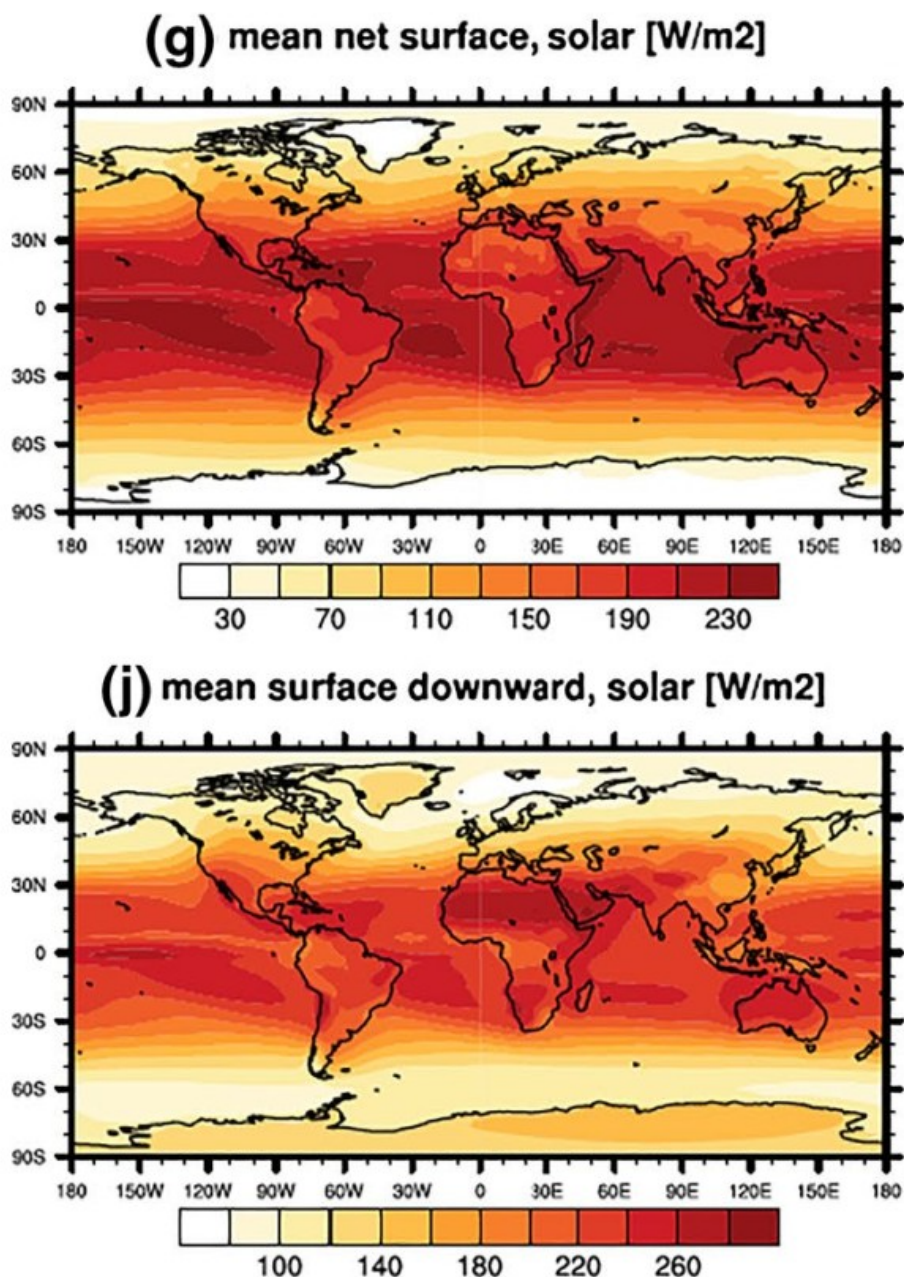
5 A kolik jej povrch pohltí: $160 W.m^{-2}$

Sluneční záření se ale kromě toho liší od sálání ovzduší v tom ohledu, že krátkovlnné elektromagnetické záření (polovina toho slunečního připadá na světlo) je do značné míry odráženo. Pohlcený příkon je často mnohem menší než ten dopadající, jako v případě sněhu nebo světlých pouští. A i vegetace sice dobře pohlcuje světelnou část slunečního spektra, ale krátkovlnnou infračervenou odráží (aby se nepřehřála, ale i proto, že absorbující barviva, jako je chlorofyl, jsou energeticky náročná, proto je rostliny z listů na podzim stahují a listy světlají). Od dopadajícího slunečního záření je proto potřeba odečíst podíl, vyjádřený tzv. albedem povrchu. To je velmi nízké jen u oceánů s klidnou hladinou nebo u lesů, hlavně těch jehličnatých.

Globální průměr pohlceného slunečního příkonu je tak o kus menší než toho dopadajícího. Činí jen kolem $160 W.m^{-2}$, jak zjišťuje práce „*The Energy Balance over Land and Oceans...*“⁴. Táž práce,

⁴ Martin Wild et al., ‘The Energy Balance over Land and Oceans: An Assessment Based on Direct Observations and CMIP5 Climate Models’, *Climate Dynamics* 44, no. 11 (1 June 2015): 3393–3429, <https://doi.org/10.1007/s00382->

opírající se o kalibraci z 844 stanic (mapa je tam jako Fig. 3), také obsahuje mapky příkonu pohlcovaného a dopadajícího:



Obrázek 3:

Sluneční příkony na povrch. Horní mapka (g) udává pohlcovaný příkon – je vidět, že např. světlá Sahara pohltí v úhrnu méně krátkovlnného záření než sousední moře. Ale naopak, **dopadající příkon zobrazený na dolní mapce (j)** je tam výrazně větší než u sousedícího Atlantiku. Každý asi ví proč... nad pouští je mnohem méně oblačnosti.

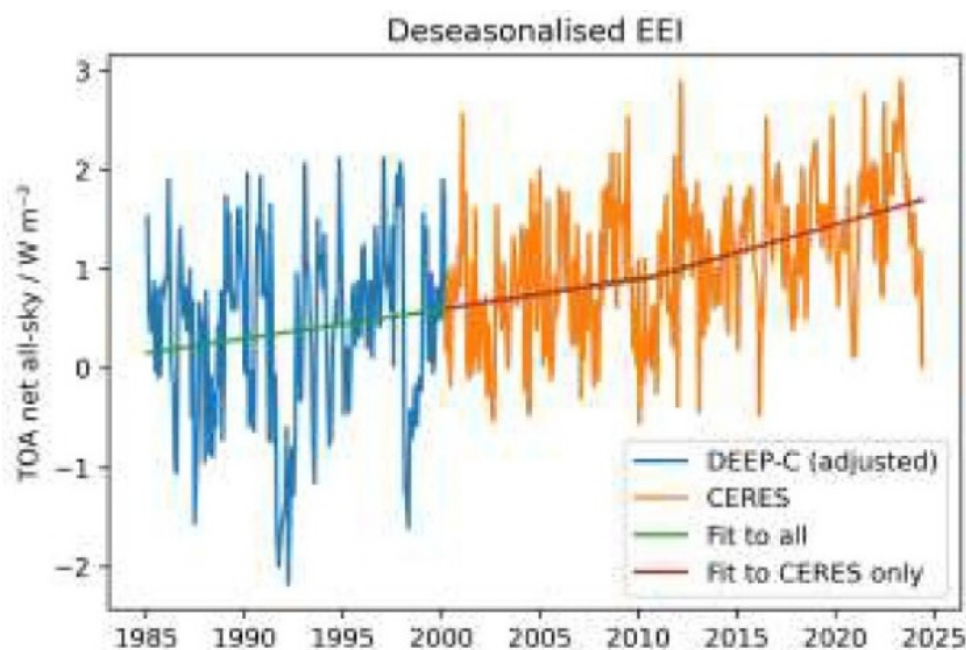
Jde o výřez z velkého Fig. 4 v práci *Wild et al. 2015*. (Jiné jeho části ukazují pohlcený úhrn vč. ovzduší, v ovzduší, standardní odchylky příkonů a standardní nejistoty průměrů.)

6 Jak je tedy skleníkový jev relativně silný? Dvakrát silnější než slunce!

A tak musíme konstatovat, že **tepelný příkon povrchu naší planety ze skleníkového jevu je opravdu dvakrát vyšší než ze slunečního záření, ba dokonce asi 2,14x (342/160).**

7 Jak globální ohřívání narostlo

Dobrá, skleníkový jev je ohromně silný. Co to ale vypovídá o současném oteplování? Oproti dávným desetiletím či 19. století se zesílil o „pěkných“ pár wattů na metr čtvereční. Ale taky se povrch oteplil, a sálá tedy také více. Výsledné tempo oteplování záleží až na tom, kolik planeta ze slunce pohltí a kolik vysálá do vesmíru. Nyní je situace taková, že **úhrn jejího sálání je již o více než 1 celý watt na metr čtvereční menší než pohlcovaný sluneční příkon** – tomu se říká Earth Energy Imbalance, *EEI*⁵. Z oné práce vybíráme obrázek (podrobnější graf viz v kapitole 8.2):



Obrázek 4:

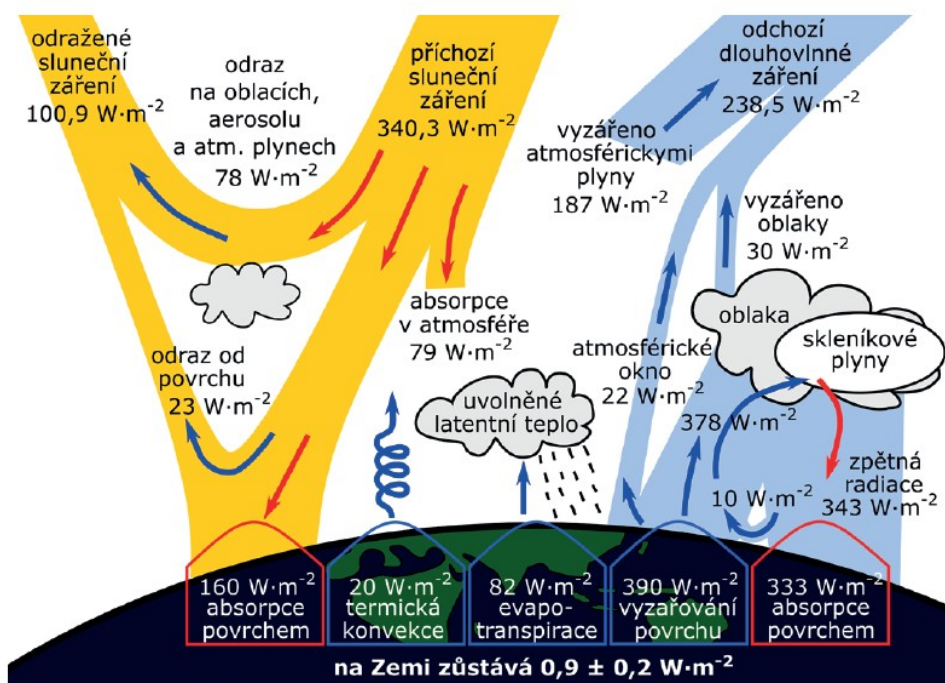
Nárůst *EEI* dle práce *Merchant et al. 2025*, Fig. 1 a. Lineární regrese od srpna 2010 ukazuje pro rok 2025 nerovnováhu dosahující už půldruného wattu na metr čtvereční. (*Další část, Fig 1 b ukazuje celkovou energii, kterou tím Země od r. 1985 naakumulovala.*)

Jeden watt, časem bohužel asi i dva... zdá se to jako malinko? Tak si spočtete, jak rychle by se tím ohřívalo ovzduší, kdyby nevrácené teplo nepronikalo do hloubek oceánů, pevnin a netavilo led. Nápověda: tepelná kapacita ovzduší je asi taková, jako vrstvy vody tlusté 3 m.

⁵ Christopher J Merchant, Richard P Allan, and Owen Embury, 'Quantifying the Acceleration of Multidecadal Global Sea Surface Warming Driven by Earth's Energy Imbalance', *Environmental Research Letters* 20, no. 2 (January 2025): 024037, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adaa8a>.

8 Tepelné toky z vesmíru dolů a z povrchu do vesmíru podrobně

8.1 Schéma globálních toků energie ovzduším pro období 2000 až 2020



Obrázek 5:

Globální energetická bilance atmosféry a zemského povrchu. Energetické toky (jejich roční průměry) jsou vztaženy na čtvereční metr povrchu.

Jde o toky záření krátkovlnného (slunečního – světlo, infračervené záření s vlnovou délkou pod 3 mikrometry, malý podíl má i záření ultrafialové) a dlouhovlnného (s délkami nad $3 \mu\text{m}$, vznikajícího na Zemi v závislosti na teplotě povrchů či vzduchu) ovzduším v letech 2000 až 2020. Schéma dle práce Kevin E. Trenberth, 'Understanding Climate Change through Earth's Energy Flows', *Journal of the Royal Society of New Zealand* 50, no. 2 (2 April 2020): 331–47, <https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404>.)

Převzato z [AVexu](#) 2/2020 „Planeta ve skleníku“, v němž je uvedeno jako Obr. 1.

8.1.1 Ke žlutým šipkám, levé části schématu

Téměř polovina slunečního záření přicházejícího k Zemi je pohlcena po dopadu na povrch, další čtvrtina ovzduším. Světelnou část slunečního záření bezoblačné ovzduší téměř celou propouští. Země si ze slunce bere v průměru kolem 239,4 wattů na metr čtvereční.

8.1.2 K modrošedým šipkám, pravé části schématu

Povrch planety ale též vyzařuje, díky své teplotě – mluvíme o sálání. Úhrn činí více než dvojnásobek toho, co pohlcuje ze slunce. A povrch také ohřívá vzduch nad sebou skupenským

teplem vodní páry, která tam kondenzuje do mraků, i prostě tím, že ohřátý vzduch nad osluněnými povrchy stoupá vzhůru. Dohromady jde o trojnásobek toho, co získá ze slunce! Jak je to možné?

Hlavní tepelný příkon na povrch není ten sluneční, ale jde o sálání atmosféry. Ovzduší funguje jako výborná tepelná izolace. Dlouhovlnné záření z povrchu valnou většinou pohltí díky molekulám skleníkových plynů a oblačnosti. A pak samo vyzařuje v závislosti na své teplotě a obsahu skleníkových plynů a oblačnosti. Na zem přichází sálání vrstev blízkých povrchu, které jsou ještě dosti teplé. To, že ovzduší sálá na zem označujeme za **skleníkový jev**. Jak vidíte, je náramně silný – **povrchu poskytuje alespoň dvakrát více tepla než slunce**.

Do vesmíru uniká naopak záření většinou až z velkých výšek, kde je teplota velmi nízká. Před dvěma staletími bylo sálání Země do vesmíru v rovnováze s pohlcovaným zářením slunečním. Nyní se ale oblasti, odkud sálání unikne ven, posouvají výše, vlivem rostoucího obsahu skleníkových plynů. Vyšší oblasti jsou chladnější a sálají tedy méně.

8.1.3 K bilanci toků záření

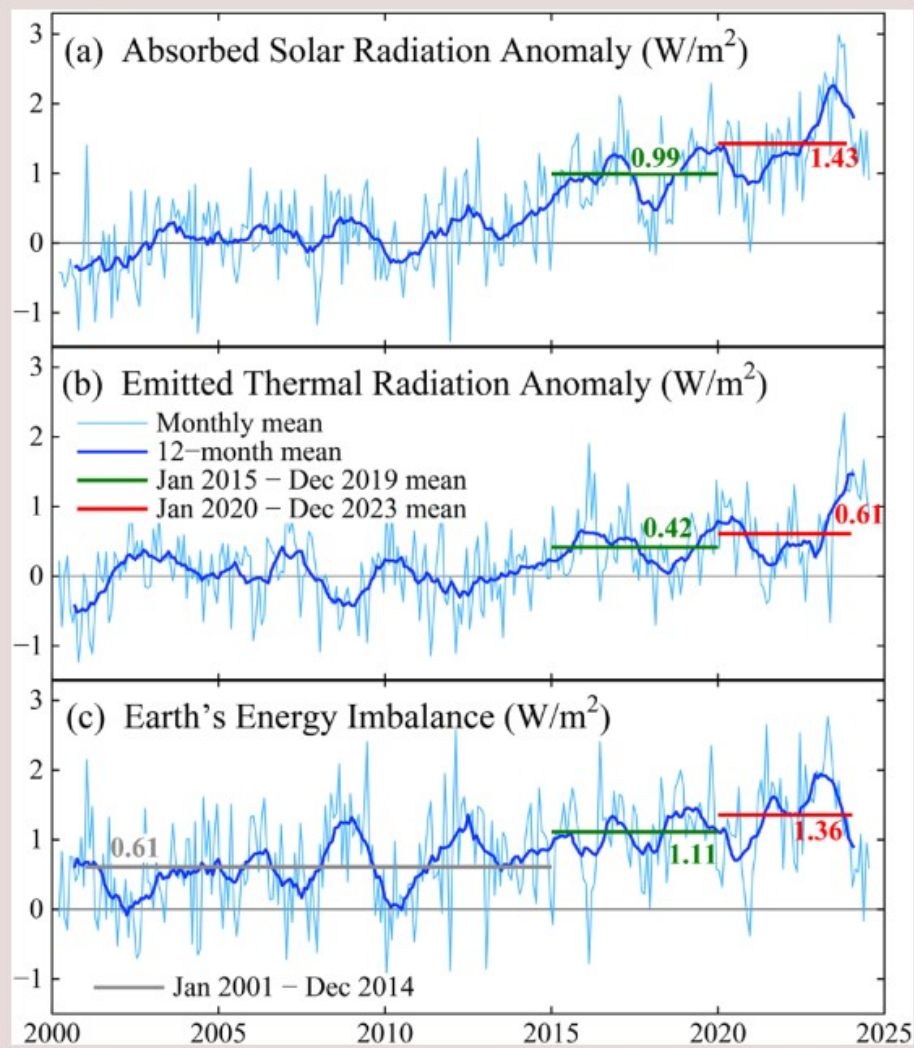
Země proto do vesmíru vracela v tom období o jeden watt na metr čtvereční méně, než získávala ze slunce. Velikost tohoto rozdílu víme hlavně díky měření teplot sondami [ARGO](#), potápějících se do hloubek 2 km, některé novější až do 6 km. Mechanismus ohřívání oceánu a pevnin býval jen ten, že oblasti, odkud sálání atmosféry dopadne až na zem, se posouvají naopak dolů, kde je vzduch teplejší a sálá proto více. Lze si to představit také tak, že tepelná izolace Země proti chladnému vesmíru ztloustla a dále sílí.

8.2 Jak nepříznivá bilance narostla

Od roku 2020, tedy po období, jehož bilance je znázorněná na schématu, ale [Nerovnováha zemské energetiky](#), čili Earth Energy Imbalance (EEI) roste. Zčásti vinou nárůstu emisí skleníkových plynů a jejich koncentrací v ovzduší, ale hlavně tím, že naše planeta ztmavla. Ubylo některé nízké oblačnosti, a také oxidů síry nad oceánem vinou odsíření paliv v námořní dopravě. To dokládá měření z vesmíru, kalibrované těmi sondami ARGO, viz práci „*Global Warming Has Accelerated...*“⁶. Z oné čerstvě publikované práce to ilustruje následující obrázek:

6 James E. Hansen et al., ‘Global Warming Has Accelerated: Are the United Nations and the Public Well-Informed?’, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 67, no. 1 (2 January 2025): 6–44, <https://doi.org/10.1080/00139157.2025.2434494>.

Figure 26. Earth's radiation balance.**



Obrázek 6:

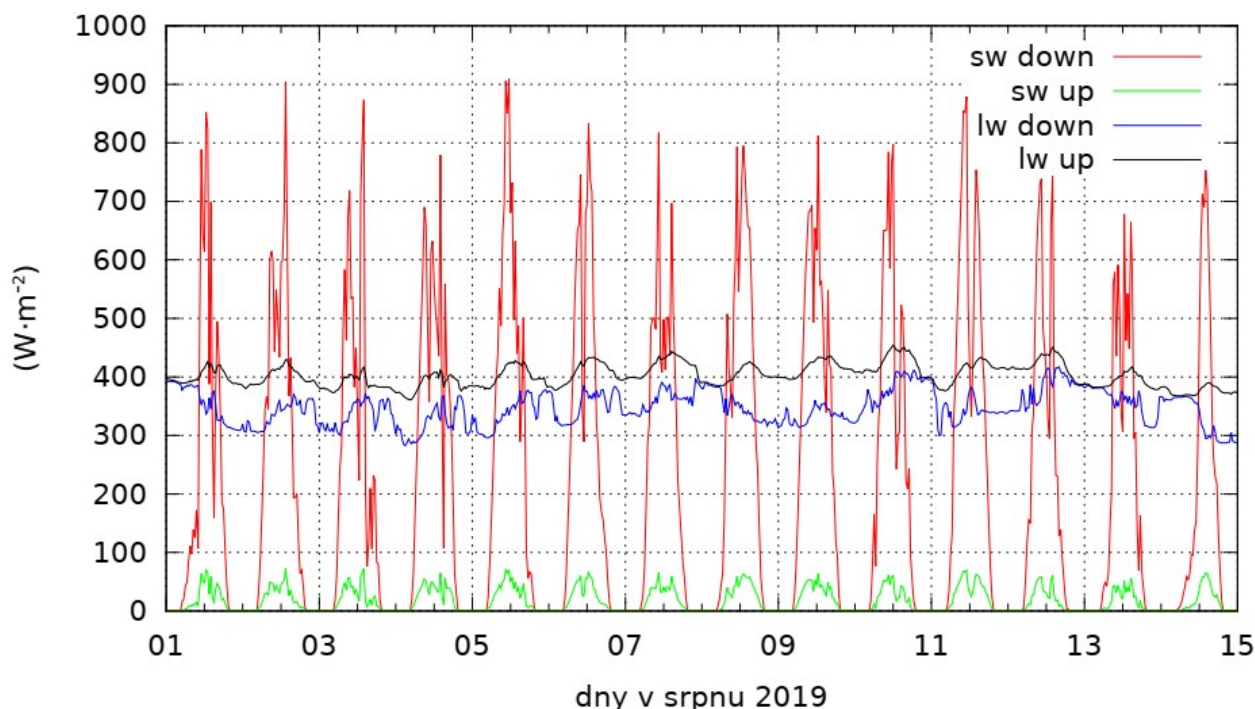
První dva grafy ukazují odchylky oproti prvnímu patnáctiletí našeho tisíciletí. V **horním grafu** je vidět, že **pohlceného slunečního záření přibýlo**, v maximu v roce 2024 snad až o 2 W.m^{-2} . **Zvýšilo se** ale i **sálání Země do vesmíru (prostřední graf)**, neb se ohřála, v maximu snad až o 1 W.m^{-2} .

Dolní graf: Rozdíl těch dvou hodnot vedl k tomu, že **nerovnováha energetického rozpočtu Země** (která činila v prvním patnáctiletí $0,6 \text{ W.m}^{-2}$, kalibrováno právě flotilou ARGO) vzrostl právě o něj. V letech 2000 až 2003 tak **EI činila už jeden a třetinu wattu na metr čtvereční**. Převzato z *Hansen et al. 2025*.

9 Skleníkový jev v průběhu dne, týdnů, sezón a roků

Skleníkový jev čili sálání ovzduší na zem se v dnešní době průběžně měří na mnoha stanicích po celém světě. U nás jsou to ty, které zkoumají energetickou bilanci ekosystémů. Příkladem je záznam ze dvou týdnů v srpnu 2019 ze stanice na Bílém kříži. Sálání na porost (skleníkový jev) je vyznačeno modrou křivkou:

záření na smrkový porost a z něj - Bílý Kříž



Obrázek 7: Měření [z ekosystémové stanice Bílý Kříž](#), kde jsou přístroje nad smrkovým porostem na věži ve výšce 20 m.

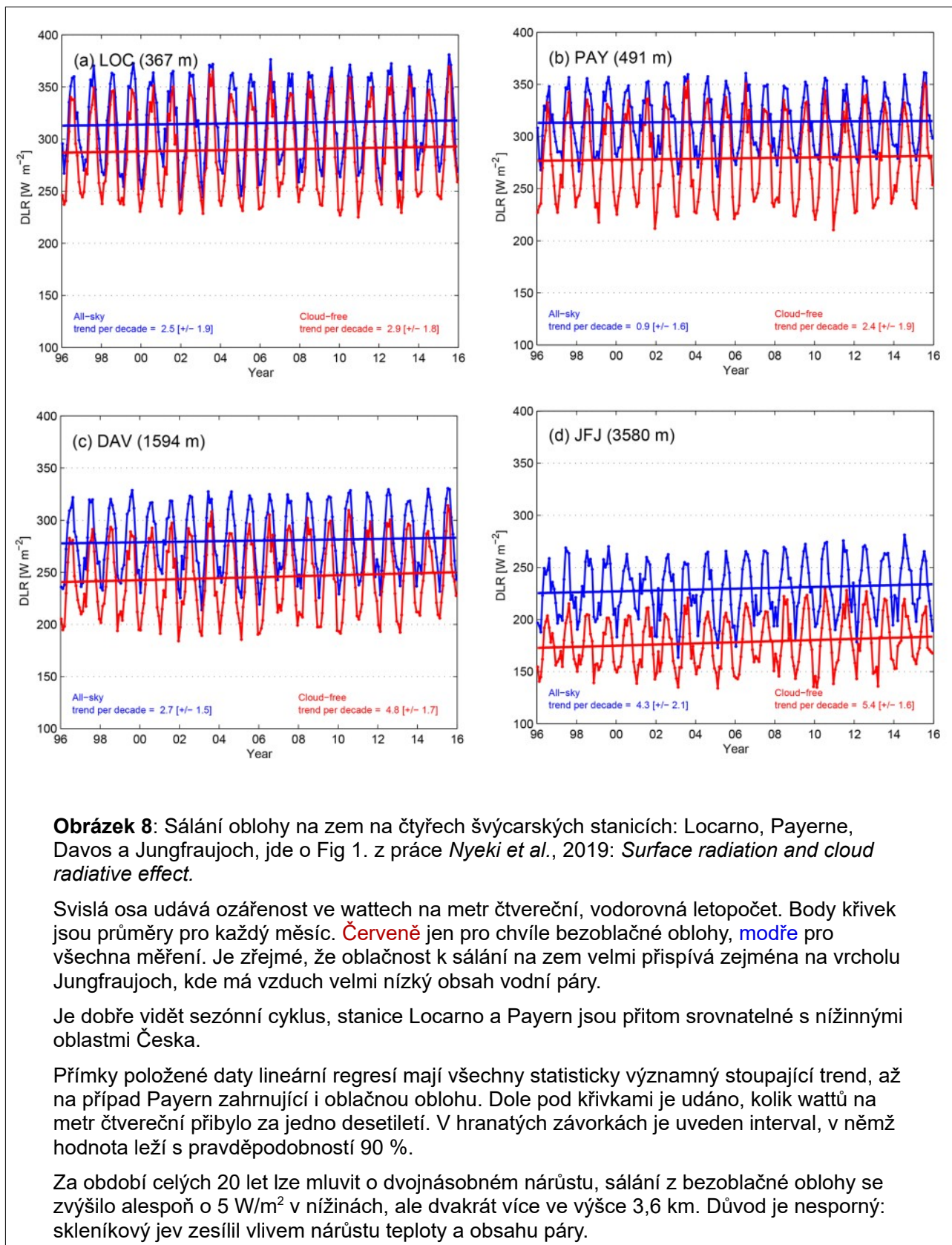
Černě je v grafu vyznačeno dlouhovlnné (**lw**) záření směrem vzhůru (kolem 400 W/m^2), to se mění dle teploty vegetace a terénu. **Modře je sálání z oblohy na vegetaci** (mezi 300 W/m^2 a 400 W/m^2) – to je onen **skleníkový jev**.

Červeně jsou vyznačeny velké proměny krátkovlnného (**sw**) záření z oblohy, což je přímé i rozptýlené sluneční záření; to v noci „není“ (i při úplňku je to jen miliwatt na metr čtvereční). **Zeleně** je znázorněno krátkovlnné záření vrácené terénem do nebe.

„Zubatost“ modré i červené křivky je dána chodem oblačnosti. Mraky zvyšují množství dlouhovlnného záření z nebe na zem. (*Graf užívaný v různých publikacích vyrobil z dat stanice Jan Hollan.*)

Samozřejmá je i proměnlivost dlouhovlnného sálání na zem během ročních dob. Příklad ze čtyř švýcarských stanic je níže ⁷:

⁷ Stephan Nyeki et al., ‘Trends in Surface Radiation and Cloud Radiative Effect at Four Swiss Sites for the 1996–2015 Period’, *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, no. 20 (25 October 2019): 13227–41, <https://doi.org/10.5194/acp-19-13227-2019>.



Jak je vidět, v nížinách je průměr sálání ovzduší na povrch třetina kilowattu na metr čtvereční. Takový údaj platí i pro průměr přes celou zeměkouli. Jde o veliký tok energie, který na rozdíl od toho slunečního nemá velké proměny během cyklu den-noc.

(pracovní text J. Hollana, únor 2025)

10 Odkazy

- Hansen, James E., Pushker Kharecha, Makiko Sato, George Tselioudis, Joseph Kelly, Susanne E. Bauer, Reto Ruedy, et al. 'Global Warming Has Accelerated: Are the United Nations and the Public Well-Informed?' *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 67, no. 1 (2 January 2025): 6–44. <https://doi.org/10.1080/00139157.2025.2434494>.
- Merchant, Christopher J, Richard P Allan, and Owen Embury. 'Quantifying the Acceleration of Multidecadal Global Sea Surface Warming Driven by Earth's Energy Imbalance'. *Environmental Research Letters* 20, no. 2 (January 2025): 024037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adaa8a>.
- Nyeki, Stephan, Stefan Wacker, Christine Aebi, Julian Gröbner, Giovanni Martucci, and Laurent Vuilleumier. 'Trends in Surface Radiation and Cloud Radiative Effect at Four Swiss Sites for the 1996–2015 Period'. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, no. 20 (25 October 2019): 13227–41. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13227-2019>.
- Trenberth, Kevin E. 'Understanding Climate Change through Earth's Energy Flows'. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 50, no. 2 (2 April 2020): 331–47. <https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404>.
- Vuilleumier, Laurent, Stephan Nyeki, Julian Gröbner, Christine Aebi, and Martine Collaud Coen. 'Thermal Infrared Radiation Trends in Switzerland'. *AIP Conference Proceedings* 2988, no. 1 (18 January 2024): 060003. <https://doi.org/10.1063/5.0183492>.
- Wild, Martin, Doris Folini, Maria Z. Hakuba, Christoph Schär, Sonia I. Seneviratne, Seiji Kato, David Rutan, Christof Ammann, Eric F. Wood, and Gert König-Langlo. 'The Energy Balance over Land and Oceans: An Assessment Based on Direct Observations and CMIP5 Climate Models'. *Climate Dynamics* 44, no. 11 (1 June 2015): 3393–3429. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2430-z>.
- Xu, Jiawen, Xiaotong Zhang, Weiyu Zhang, Ning Hou, Chunjie Feng, Shuyue Yang, Kun Jia, et al. 'Assessment of Surface Downward Longwave Radiation in CMIP6 with Comparison to Observations and CMIP5'. *Atmospheric Research* 270 (1 June 2022): 106056. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106056>.
- Zhang, Xiaotong, Shunlin Liang, Guoxin Wang, Yunjun Yao, Bo Jiang, and Jie Cheng. 'Evaluation of the Reanalysis Surface Incident Shortwave Radiation Products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA Using Satellite and Surface Observations'. *Remote Sensing* 8, no. 3 (March 2016): 225. <https://doi.org/10.3390/rs8030225>.