

Změny erytémového UV záření v České republice v období 1996–2024

Changes in erythema UV radiation in the Czech Republic in the period 1996 to 2024

Ladislav Metelka, Martin Stráník, Martin Staněk

Český hydrometeorologický ústav
Solární a ozonové oddělení
Zámeček 456
500 08 Hradec Králové 8
✉ ladislav.metelka@chmi.cz

The doses of erythemal UV radiation in the Czech Republic have shown a clearly increasing and statistically significant trend since 1996. However, it is not primarily caused by decreases in total ozone. With the exception of July and August, total ozone does not show clearly decreasing trend. But there is a close connection between the increase in erythemal radiation and the energy sums of global radiation, which are strongly dependent on the duration of sunshine and therefore primarily on cloud cover. A neural model was trained to simulate the dependence of erythemal radiation on ozone and global radiation, with the ability to simulate the annual course of the dependencies between predictors and the predicant. Several experiments were subsequently performed with the model in order to distinguish the influence of individual predictors (ozone, global radiation) on erythemal UV radiation. These also confirmed that the decisive factor for the increase in erythemal UV radiation in the monitored period was not ozone, but the increase in the duration of sunshine.

KLÍČOVÁ SLOVA: záření erytémové – záření globální – ozon celkový – svit sluneční – modelování empirické – síť neuronové

KEYWORDS: erythema radiation – global radiation – total ozone – sunshine duration – empirical modelling – neural networks

1. Úvod

Destrukce ozonové vrstvy v našich oblastech dosáhla maxima kolem poloviny 90. let 20. století (Vaníček et al. 2012). Byl s tím spojen i nárůst intenzity UV záření, které má nepříznivý vliv na lidské zdraví (Čížková et al. 2018). Následně se předpokládala pozvolná regenerace ozonové vrstvy s tím, že k původním hodnotám, běžným do roku 1980, by se ozonová vrstva měla vrátit kolem poloviny 21. století (Vaníček et al.

2012). Poslední výzkumy ale ukazují, že proces regenerace ozonové vrstvy pokračuje pomaleji, než se předpokládalo. Změna množství ozonu ve spodní stratosféře a množství celkového ozonu vykazují v posledních 20 letech spíše stagnaci, v některých oblastech ještě docházelo i k mírnému poklesu ozonu (ORMM 2024). Může to být způsobeno vlivem globálního oteplování, při kterém roste teplota troposféry, ale klesá teplota stratosféry, což narušuje meridionální Brewer-Dobsonovu cirkulaci, zodpovědnou za transport na ozon bohatých vzduchových hmot z nízkých do vyšších zeměpisných šířek. Také změny koncentrací některých látek, jako např. oxid uhličitý, metan nebo oxid dusný, a případně další (i nepovolené) emise chlorovaných uhlovodíků (CFC) mohou proces regenerace ozonové vrstvy i v budoucnosti ovlivňovat (ORMM 2024; Forster et al. 2021).

2. Měření celkového ozonu a erytémového UV záření v ČR

V České republice se celkový ozon měří od roku 1961 na Solární a ozonové observatoři ČHMÚ v Hradci Králové. Od počátku měření byl používán Dobsonův spektrofotometr č. 074, který je používán dodnes, ale pouze pro nejpřesnější typ měření, tedy DS (Direct Sun). Od roku 1994 je zde k dispozici i novější přístroj – Brewerův spektrofotometr č. 098 (jednoduchý monochromátor) a od roku 2004 i Brewerův spektrofotometr č. 184 (dvojitý monochromátor). Z důvodu přístrojové homogenity je od roku 1994 základním přístrojem pro měření celkového ozonu spektrofotometr č. 098. Spektrofotometr č. 184 se primárně používá k měření spektrálních intenzit UV záření. Podrobněji viz práce Vaníčka et al. (2012).

Pro měření erytémového UV záření jsou zde od roku 1996 v provozu UV biometry, které detekují erytémově vážené hodnoty UV záření, dopadajícího na zemský povrch. Erytémové záření je UV záření, spektrálně vážené tzv. akčním spektrem, kvantifikujícím citlivost lidské pokožky na UV záření dané vlnové délky, a vyjadřuje tak předpokládanou reakci pokožky na dopadající UV záření (zčervenání, při vyšších dávkách puchýře apod.) (CIE 2019). UV biometry mají nastavenou spektrální citlivost na UV záření podobnou, jako má lidská pokožka. Podrobněji viz práce Vaníčka et al. (2015) a Metelky (2018).

3. Data

Ke zpracování studie vývoje energetických sum erytémového UV záření byla použita následující data, naměřená na stanici Solární a ozonové observatoře v Hradci Králové (50°10'38,0" N, 15°50'19,2" E) v letech 1996–2024 (tab. 1):

Tab. 1 Použitá meteorologická data a jejich označení, období 1996–2024, stanice Nový Hradec Králové.

Table 1. Used meteorological data and their designation, period 1996–2024, station Nový Hradec Králové.

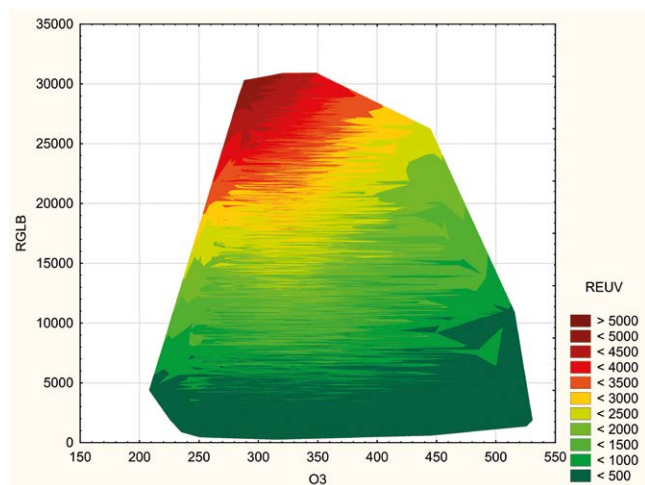
Označení	Prvek	Jednotky	Přístroj
R_{EUV}	denní energetické sumy erytémového UV záření	$J \cdot m^{-2}$	UV biometry Solar Light 501
O_3	denní průměry celkového ozonu	DU (Dobsonovy jednotky)	Brewerův spektrofotometr č. 098
R_{GLB}	denní energetické sumy globálního slunečního záření	$kJ \cdot m^{-2}$	Pyranometry CM-11 a CMP-11
SSV	denní doba slunečního svitu	hodiny	Campbell-Stokes, DSU-12, SD-5, SD-6

Homogenita časových řad R_{GLB} a SSV a korektní návaznost při změně přístrojů byly na SOO kontrolovány průběžně, podrobnosti a výsledky byly zveřejněny např. ve studii Vaníčka et al. (2015) a Pokorného a Vaníčka (2007).

4. Faktory, ovlivňující R_{EUV}

Mezi známé faktory, ovlivňující hodnoty R_{EUV} , patří zejména ozon (O_3) a globální sluneční záření (R_{GLB}). Závislost R_{EUV} na R_{GLB} a O_3 znázorňuje obr. 1.

Z obrázku je vidět jasná závislost R_{EUV} na O_3 i na R_{GLB} . Pro dané množství ozonu s rostoucími hodnotami R_{GLB} roste i R_{EUV} , pro dané hodnoty R_{GLB} s rostoucím množstvím ozonu R_{EUV} klesá. Jako další možný faktor se někdy uvádí i množství aerosolů v atmosféře (optická tloušťka atmosféry). Ta působí jak na R_{EUV} , tak i na R_{GLB} , ale poněkud různým způsobem a v různé míře, vzhledem k rozdílným vlnovým délkám detekovaného záření.



Obr. 1 Závislost naměřených hodnot R_{EUV} [$J \cdot m^{-2}$] (barevná škála) na R_{GLB} [$kJ \cdot m^{-2}$] a O_3 [DU], denní data, období 1996–2024.

Fig. 1. The dependency of measured R_{EUV} [$J \cdot m^{-2}$] (colour scale) on R_{GLB} [$kJ \cdot m^{-2}$] and O_3 [DU], daily data, period 1996–2024.

5. Lineární trendy v období 1996–2024

Vývoj celkového množství ozonu v období 1961–2011, včetně kombinace měření Dobsonovým a Brewerovým spektrofotometrem a doplnění chybějících dat v řadě měření Dobsonovým spektrofotometrem, je podrobně popsán v práci Vaníčka et al. (2012). Z tohoto zpracování je zřejmé, že minimálních hodnot dosahoval celkový ozon kolem roku 1995, po něm je naznačen mírný vzestup množství celkového ozonu.

Erytémové UV záření ale nebylo v práci Vaníčka et al. (2012) analyzováno, především z důvodu krátké datové řady, která byla v době zpracování k dispozici. Další informace o vývoji erytémového UV záření na stanici Hradec Králové byly ale publikovány v práci Čížkové et al. (2018).

Tab. 2 ukazuje měsíční a roční lineární trendy zkoumaných veličin (tj. denních energetických sum R_{EUV} a R_{GLB} , denních průměrů O_3 a denních délek SSV) za roky 1996–2024, včetně jejich statistické významnosti.

Tab. 2 Lineární trendy zpracovávaných denních sum (pro R_{EUV} , R_{GLB} a SSV) nebo průměrů (pro O_3) po měsících a za rok, období 1996–2024, stanice Nový Hradec Králové.

Table 2. Linear trends of processed daily sums (for R_{EUV} , R_{GLB} and SSV) or daily averages (for O_3) by month and for the year, period 1996–2024, Nový Hradec Králové station.

	R_{EUV} [$J \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}$]	R_{GLB} [$kJ \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}$]	O_3 [DU·rok ⁻¹]	SSV [h·rok ⁻¹]
I	+2,25 **	+4,82 –	+0,88 **	+0,003 –
II	+4,59 **	+8,79 –	-0,21 –	-0,003 –
III	+7,16 **	+58,03 **	+0,11 –	+0,041 *
IV	+6,21 **	+26,89 –	+0,10 –	+0,000 –
V	+1,79 –	+25,06 –	+0,21 *	-0,019 –
VI	+14,07 **	+100,01 **	-0,15 –	+0,038 –
VII	+24,75 **	+175,21 **	-0,24 **	+0,080 **
VIII	+10,72 **	+28,42 –	-0,21 **	-0,020 –
IX	+17,42 **	+127,23 **	-0,21 *	+0,089 **
X	+9,89 **	+58,61 **	-0,17 –	+0,032 *
XI	+3,11 **	+7,75 –	+0,23 –	-0,000 –
XII	+2,38 **	-3,89 –	-0,18 –	-0,028 **
I–XII	+7,55 **	+45,94 **	+0,03 –	+0,016 **

** = statisticky významný trend na 1% hladině významnosti / statistically significant trend at 1% significance level

* = statisticky významný trend na 5% hladině významnosti / statistically significant trend at 5% significance level

– = statisticky nevýznamný trend / statistically insignificant trend

Analýza lineárních trendů zpracovávaných veličin za období 1996–2024 (viz tab. 2) ukázala, že:

- lineární trend denních energetických sum R_{EUV} je okolo $+7,5 J \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}$ a je statisticky významný na 1% hladině významnosti. To potvrzuje, že v posledních cca 30 letech došlo nad naším územím k nárůstu energetických sum erytémového UV záření. Při dlouhodobě průměrných denních energetických sumách R_{EUV} cca $1\ 390 J \cdot m^{-2}$ jde o nárůst v průměru o cca 0,5 % ročně. Trendy R_{EUV} v jednotlivých měsících jsou vesměš rostoucí a s výjimkou května i statisticky významné na 1% hladině významnosti.

- lineární trend denních energetických sum R_{GLB} je kolem $+46 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ a je statisticky významný na 1% hladině významnosti. Při dlouhodobém průměru denních dávek R_{GLB} cca $11\,320 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ jde o průměrnou roční změnu o cca $+0,4\%$. Až na prosinec jsou trendy rostoucí a v 5 měsících z 12 mají i stejnou statistickou významnost jako trendy denních sum R_{EUV} . Navíc v případě R_{EUV} a R_{GLB} jde o principiálně podobná měření (energetická suma záření z celé horní polosféry), která se liší jen vlnovými délkami detekovaného záření a vážením intenzit UV záření pomocí erytémového akčního spektra v případě R_{EUV} , viz např. Metelka (2018). Nejvíce se shodné trendy R_{EUV} a R_{GLB} projevují v období červen až říjen (s výjimkou srpna), které je z hlediska radiační energie velice bohaté.
- hodnoty denních průměrů O_3 vykazují v tomto období prakticky nulový trend (průměrný vzestup je v řádu jen setin DU ročně, což je výrazně pod nejistotou samotného měření). Trend je pochopitelně statisticky nevýznamný i na hladině významnosti 10 %. Výraznější a statisticky významný pokles na 1% hladině významnosti byl zaznamenán jen v červenci a srpnu.
- lineární trend denních sum SSV je $+0,016 \text{ h}\cdot\text{rok}^{-1}$ (cca 1 minuta za rok) a rovněž je statisticky významný na 1% hladině významnosti. Při střední denní době slunečního svitu 5 hodin je to nárůst v průměru o cca $0,3\%$ ročně. U řady SSV nelze ale zcela vyloučit, že se zde i přes veškerou snahu o homogenizaci dat mohly mírně projevit zásadní změny přístrojového vybavení a metod měření ve zpracovávaném období (Campbell-Stokes versus SD5 a SD6), viz práce Vanička et al. (2015) a Pokorného a Vanička (2007). Z měsíčních trendů se statisticky významné (na 1% hladině významnosti) nárůsty SSV projevují jen v červenci a září a poklesy v prosinci.

Analýza trendů vede k závěru, že k vysvětlení trendů denních sum R_{EUV} nemusejí stačit jen změny O_3 , ale že by tyto trendy měly být ovlivňovány ještě nějakým dalším faktorem. Tím by mohly být trendy energetické sumy globálního záření R_{GLB} .

6. Modelování vztahu mezi

R_{GLB} , O_3 a R_{EUV}

Závislost R_{EUV} na R_{GLB} a O_3 může být obecně poměrně složitá a nelineární. Konkrétní analytickou podobu parciálních závislostí však lze jen těžko odhadnout bez poměrně komplikovaného modelování transformace UV záření v atmosféře, at již působením ozonu, oblačností nebo obou faktorů zároveň. Z tohoto důvodu jsme přistoupili k empirickému modelování pomocí neuronových sítí regresního typu. Velkou výhodou neuronových sítí je, že na rozdíl od klasických regresních metod nevyžadují předem definovaný tvar závislosti mezi nezávisle a závisle proměnnými (regresní rovnici, pro kterou jen hledáme optimální parametry), ale jsou schopny tvar závislosti odvodit a nasimulovat samy přímo z dat. Jsou tedy velice adaptabilní, což je velká výhoda, zejména u komplikovaných nebo nejasných závislostí.

Neuronové sítě se trénují z náhodného počátečního stavu. Do sítě se postupně zadávají data z tréninkového subsetu, síť spočítá výstup, porovná ho s daty závisle proměnné (tj. s požadovaným výstupem) a upraví volné parametry sítě tak, aby se chyba sítě zmenšila a výkon sítě zlepšil. Datový soubor se takto vkládá do sítě opakovaně, v mnoha cyklech (epochách), dokud se výkon sítě na nezávislém testovacím subsetu zlepšuje.

Vstupními daty do neuronového modelu jsou hodnoty R_{GLB} a O_3 , výstupní proměnnou je R_{EUV} . Zde je ale nutno připomenout, že závislost mezi R_{GLB} a O_3 na jedné straně a R_{EUV} na straně druhé, může mít nezanedbatelný roční chod. V tom případě je nutné do modelu zadat informaci o poloze zpracovávaného dne v rámci ročního chodu, aby se model naučil pracovat i s ročním chodem závislosti mezi prediktory (R_{GLB} a O_3) a prediktandem (R_{EUV}), jinak by modeloval závislosti bez ohledu na pozici dat v rámci ročního chodu.

Definovat pozici v rámci ročního chodu např. pomocí pořadového čísla dne v roce (*DoY* – Day of Year) zde ale není optimální. Rozdíly tvaru závislosti mezi 31. 12. a 1. 1. následujícího roku budou minimální (jsou to „sousední“ dny), ale rozdíl v pořadovém čísle dne je tu velký (365 versus 1). Hodnoty tedy „sousední“ nejsou, je tam zřejmá diskontinuita a neuronová síť by ji přenesla i do způsobu modelování závislosti. Pro tyto účely je vhodné definovat dva dodatečné tzv. cirkulární neurony ve vstupní vrstvě sítě, a to pomocí sinové a kosinové transformace pořadového čísla dne v roce jako:

$$\text{COS}(DoY) = \cos\left(\frac{DoY}{365,25} \cdot 2 \cdot \pi\right) \quad (1)$$

$$\text{SIN}(DoY) = \sin\left(\frac{DoY}{365,25} \cdot 2 \cdot \pi\right) \quad (2)$$

kde *DoY* je pořadové číslo dne v roce.

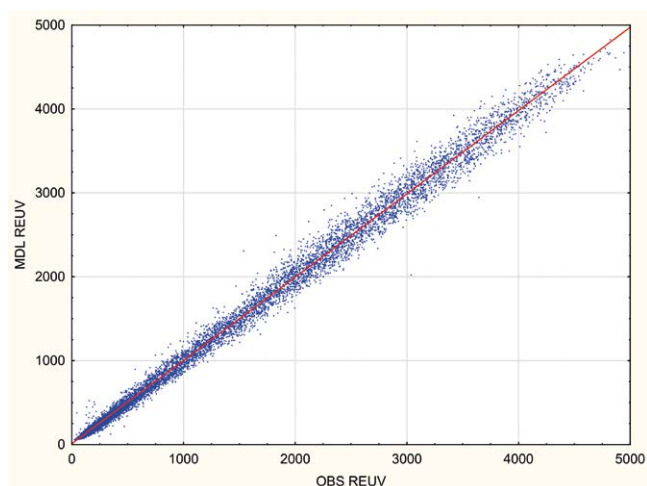
Je zřejmé, že jak kosinová, tak sinová složka jsou spojitě, ale žádná z nich sama o sobě nepopisuje pozici v rámci ročního chodu jednoznačně (např. $\sin 0 = \sin \pi$, $\cos \pi/2 = \cos 3\pi/2$ apod.). Proto je nutné vždy použít obě transformace současně, ty v kombinaci pak už spojitě i jednoznačně jsou.

Jako prediktory byla tedy použita data R_{GLB} a O_3 a společně s nimi *SIN(DoY)* a *COS(DoY)* k vyjádření pozice daného dne v rámci ročního chodu podle rovnice (1) a (2). Model tedy měl 4 prediktory – O_3 , R_{GLB} , *SIN(DoY)* a *COS(DoY)* a jeden prediktand (R_{EUV}).

Následně bylo nutné odhadnout (kvazi)optimální hyperparametry neuronové sítě. Byla provedena řada testů, na základě kterých byla vybrána síť s jednou skrytou vrstvou, 15 neuronů ve skryté vrstvě, tedy síť s architekturou 4-15-1. Taková síť má celkem 95 stupňů volnosti. To je výrazně méně, než je rozsah datového souboru (9 226 datových vektorů), což je nezbytné k tomu, aby se omezilo riziko přetrérování sítě a aby síť byla schopna nalezené závislosti mezi prediktory a prediktandem dobře zobecnit. Jako aktivační funkce neuronů byla použita logistická funkce, což je poměrně obvyklá volba. Obvyklá je i volba chybové funkce, v tomto případě součet čtverců chyb. K tréninku sítí byl použit tréninkový algoritmus BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, patří mezi kvazi-Newtonovské metody), inicializace sítí byla náhodná podle normálního rozdělení. Jako další opatření proti přetrérování sítí bylo použito včasné zastavení tréninku („early stopping“), při kterém se trénink sítí ukončoval, pokud nedošlo ke zlepšení výkonu sítě na testovacím subsetu během 100 epoch. Dále bylo rozhodnuto nespolehat na jednu síť, ale vytrénovat ansámbly 100 sítí, přičemž pro každou z nich bylo provedeno nové náhodné dělení datového souboru na tréninkový a testovací subset v poměru 80 % / 20 % (testovací data jsou nutná k odhadu výkonu sítě během tréninku). Použitím ansámbly sítí se potlačí vliv náhodných efektů, které mohou nastat při dělení datového

souboru na tréninkový a testovací subset. Validací subsety nebyly použity, protože jde o zpracování dat za uzavřené časové období a do vytrénovaných sítí nebudou vkládána žádná nová nezávislá data mimo toto období.

Výsledný model se ukázal jako velice dobrý. Korelační koeficienty mezi naměřenými a modelovanými hodnotami byly pro všechny sítě i jejich ansámbl ve všech měsících v rozmezí 0,996–0,997. Závislost ansámblových průměrů modelovaných hodnot ($MDL R_{EUV}$) na naměřených hodnotách ($OBS R_{EUV}$) je na obr. 2. To ukazuje, že hodnoty R_{EUV} lze poměrně přesně namodelovat pomocí dat R_{GLB} a O_3 , pokud neuronová síť pracuje i s ročním chodem závislostí.



Obr. 2 Závislost modelovaných hodnot $MDL R_{EUV}$ (ansámblový průměr) a naměřených hodnot $OBS R_{EUV}$ [$J \cdot m^{-2}$].

Fig. 2. The relation between modelled values $MDL R_{EUV}$ (ensemble mean) and measured values of $OBS R_{EUV}$ [$J \cdot m^{-2}$].

7. Experimenty s výsledným modelem

Model, který dobře popisuje vztah mezi R_{GLB} a O_3 na jedné straně a R_{EUV} na straně druhé, navíc v závislosti na pozici dne v rámci ročního chodu, umožňuje provádět i určité experimenty. Jedním z možných experimentů je separace variability způsobené různými prediktory. Pro tento účel je možné jeden z prediktorů zafixovat na jeho průměrných hodnotách, eliminuje se tím jeho časová variabilita a časový vývoj vypočítaných hodnot je pak závislý pouze na časovém vývoji hodnot druhého prediktoru. Vzhledem k tomu, že byl model sestaven i s uvážením ročního cyklu závislostí, nelze tady jednoduše zafixovat hodnoty prediktorů na jejich průměrných hodnotách. Je třeba zafixovat je na hodnotách průměrného ročního chodu, který zachovává charakter průběhu hodnot v průběhu roku, ale eliminuje dlouhodobější trend dané veličiny.

Je řada možností, jak odhadnout průměrný roční chod dané veličiny, např. průměrování hodnot přes delší časový úsek v určitém „okně“ kalendářních dní, případně zprůměrování hodnot pro daný den za více let a následně shlazení výsledků. Některé tyto metody ale mají nevýhodu např. v tom, že výsledný roční chod příliš shlazuje.

Neuronové sítě nabízejí ještě další možnost – použít jako prediktory pouze $SIN(DoY)$ a $COS(DoY)$ a jako prediktand danou

veličinu (O_3 nebo R_{EUV}). Síť se takto naučí simulovat hodnoty dané veličiny pouze v závislosti na pozici dne v rámci ročního chodu. Výhodou této metody je to, že neshlazuje a nejsou třeba žádné předpoklady o tvaru křivky ročního chodu. Navíc na dobré vyjádření ročního chodu stačí zpravidla velice jednoduché sítě se standardním nastavením hyperparametrů (algoritmus BFGS, součet čtverců chyb jako chybová funkce, náhodné převzorkování, atd.).

Tato metoda byla tedy použita k odhadu průměrného ročního chodu O_3 a R_{GLB} , použity byly jen malé sítě s architekturou 2-2-1. Výsledkem byl i zde průměr přes vytrénovaný ansámbl 100 sítí.

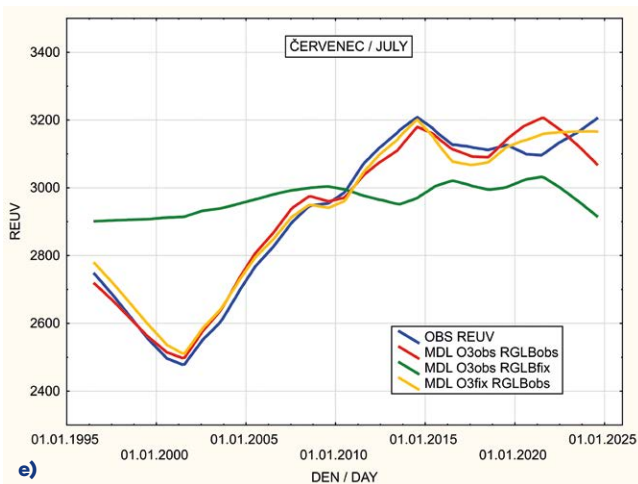
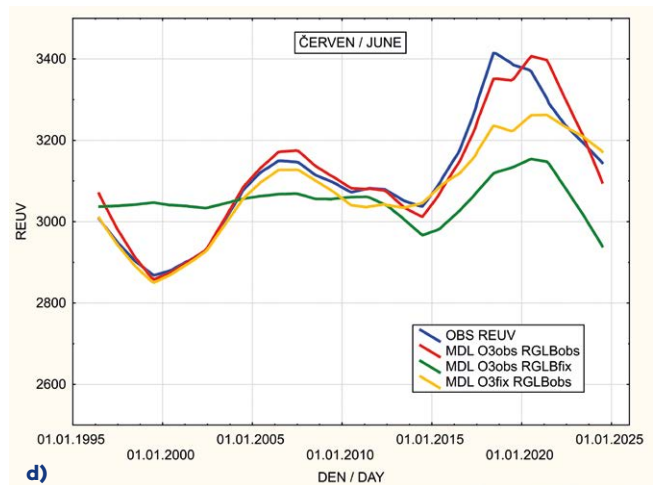
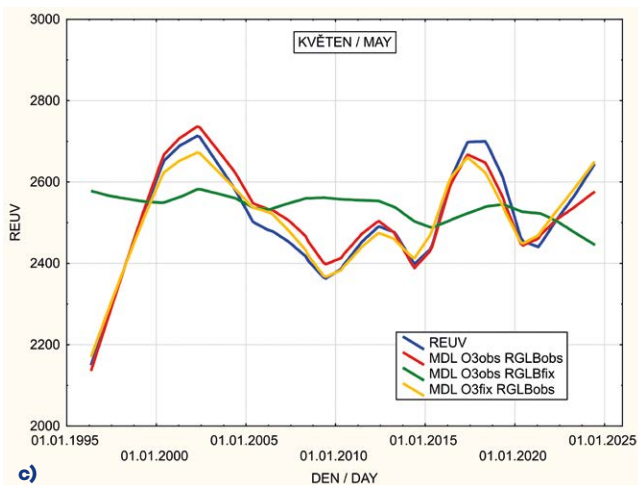
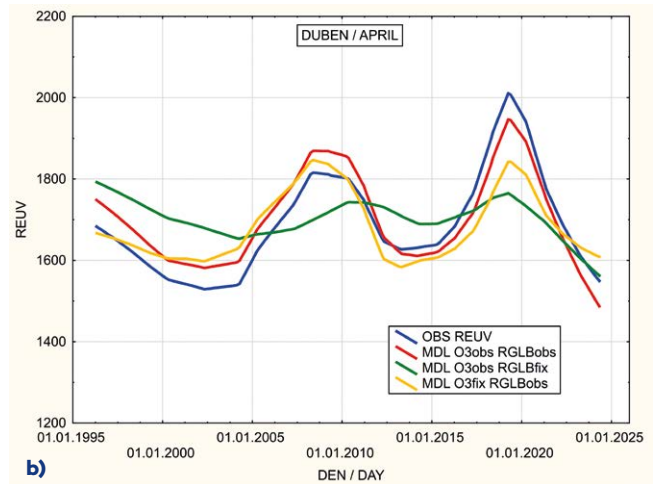
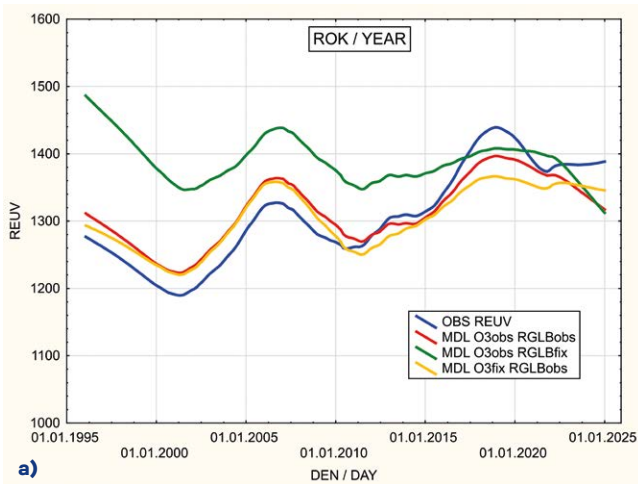
S využitím dat průměrných ročních chodů byly následně provedeny některé experimenty s modelem pro výpočet hodnot R_{EUV} :

- Experiment A: R_{EUV} počítáno pro O_3 i R_{GLB} z měření (označeno „MDL O3obs RGLBobs“). Porovnání modelovaných hodnot R_{EUV} s naměřenými ukazuje, jak je neuronový model ve shodě s realitou.
- Experiment B: R_{EUV} počítáno pro O_3 , fixované na jeho průměrném ročním chodu a R_{GLB} z měření (označeno „MDL O3fix RGLBobs“). Porovnání s naměřenými hodnotami R_{EUV} ukazuje, jaký je vliv samotného R_{GLB} na hodnoty R_{EUV} , bez dlouhodobých změn O_3 .
- Experiment C: R_{EUV} počítáno pro O_3 z měření a R_{GLB} , fixované na jeho průměrném ročním chodu (označeno „MDL O3obs RGLBfix“). Porovnání s naměřenými hodnotami R_{EUV} ukazuje, jaký je vliv samotného O_3 na hodnoty R_{EUV} , bez dlouhodobých změn R_{GLB} .
- Experiment D: V červenci a srpnu byly zaznamenány statisticky významné poklesy O_3 o 0,21 až 0,24 DU za rok. To představuje za zpracovávaných 29 let systematický pokles o cca 6–7 DU. Proto byl pro červenec a srpen spočítán experiment podobný jako B, ale s hodnotami O3fix sníženými o 6 DU. Rozdíl mezi simulací se zafixovaným ročním chodem O_3 a ročním chodem, sníženým o 6 DU, by měl ukázat, jaký vliv na R_{EUV} má snížení množství ozonu právě o 6 DU za jinak stejných podmínek.

8. Výsledky experimentů

Experimenty A až C: Výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 3 pro roční hodnoty a 4 energeticky bohaté měsíce – duben, květen, červen a červenec. Na grafech pro přehlednost nejsou vykresleny všechny jednotlivé hodnoty, ale pouze jejich průběh a vývoj v čase, shlazený pomocí robustní lokálně vážené regrese.

V zimních měsících je vypovídací schopnost výsledných grafů nižší, což je způsobeno především tím, že neuronová síť se v procesu tréninku snaží dobře zachytit závislosti především v energeticky bohatých měsících. I relativně malá chyba tam totiž může výrazně zvýšit součet čtverců chyb, zatímco v energeticky chudších měsících s podstatně nižšími energetickými sumami je vliv jednotlivých chyb na součet chybových čtverců výrazně menší. Nicméně roční energetická bilance záření je závislá především na energeticky bohatých měsících v teplém půlroce a kromě toho měsíce duben až červenec bývají nejproblematičtější právě z hlediska příkonu erytmového UV záření.



Obr. 3 Výsledky experimentů A až C pro rok a měsíce duben, květen, červen a červenec. Denní energetické sumy R_{EUV} [$J \cdot m^{-2}$].
 Fig. 3. Results of experiments A to C for the year and for April, May, June and July. Daily energetic sums of R_{EUV} [$J \cdot m^{-2}$].

Na základě grafů na obr. 3 lze formulovat několik dílčích závěrů:

- a) Simulace naměřených hodnot R_{EUV} pomocí naměřených hodnot O_3 a R_{GLB} je poměrně dobrá (modrá křivka versus červená křivka).
- b) Zafixování hodnot O_3 nevede k výraznějšímu zhoršení výsledků, O_3 tedy nebyl v období 1996–2024 dominantním

faktorem, ovlivňujícím dlouhodobé změny R_{EUV} (modrá křivka versus žlutá křivka). Žlutá křivka znázorňuje předpokládaný vývoj R_{EUV} pokud by byl vliv O_3 bez dlouhodobého trendu a trend R_{EUV} byl závislý jen na trendu R_{GLB} .

- c) Naopak zafixování hodnot R_{GLB} podstatně změnilo časový vývoj simulovaných hodnot, hlavně snížilo časovou variabilitu výsledků, což lze vysvětlit silnou závislostí R_{EUV} právě na R_{GLB} (modrá křivka versus zelená křivka). Zelená křivka znázorňuje předpokládaný vývoj R_{EUV} pokud by byl vliv R_{GLB} bez dlouhodobého trendu a trend R_{EUV} byl tak závislý jen na trendu O_3 . Je vidět, že v měsících s výrazně rostoucím trendem R_{EUV} (duben, červen, červenec, ale i v ročních průměrech) zafixování hodnot R_{GLB} vede ke snížení, vymizení nebo dokonce otočení trendu R_{EUV} .

Experiment D: Výsledkem snížení O_3 na 6 DU při zachování ostatních hodnot bylo zvýšení hodnot R_{EUV} v červenci a srpnu o cca 55–60 $J \cdot m^{-2}$ v denních průměrných energetických sumách. Pro srovnání v zimním období byl nárůst R_{EUV} jen do 10 $J \cdot m^{-2}$. Skutečný systematický nárůst R_{EUV} za 29 let byl ale podle lineárního trendu cca 700 $J \cdot m^{-2}$ pro červenec a 300 $J \cdot m^{-2}$ pro srpen, tedy podstatně více než kolik vychází při pouhém snížení množství ozonu o 6 DU. Znamená to, že zjištěný pokles celkového ozonu v červenci a srpnu nelze považovat za dominantní příčinu naměřeného nárůstu R_{EUV} , i když zřejmě tento vliv nebyl v uvedených měsících zcela zanedbatelný. Vliv snížení množství O_3 o 6 DU na R_{EUV} lze odhadnout na 10–20 %.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že v období 1996–2024 souvisí nárůst hodnot R_{EUV} především s nárůstem R_{GLB} , změny O_3 hrály v tomto procesu jen malou roli, a to i v energeticky bohatším letním období.

9. Příčiny rostoucího trendu R_{GLB}

Globální záření se skládá z přímé složky (záření z oblasti slunečního kotouče) a difuzní složky (záření oblohy mimo sluneční kotouč). Průměrný energetický poměr difuzní složky na celkovém globálním záření se během roku mění. V období 1996–2024 byl v zimních měsících v průměru kolem 80 %, v letních pak kolem 50–55 %.

Silně ale záleží na oblačnosti. Pokud je Slunce zakryto oblačností, je podíl difuzního záření 100%, naopak při jasné obloze v létě může být jen kolem 10 %. Dlouhodobý průměr za období 1996–2024 byl kolem 65 %.

Globální záření je ovlivňováno nejen oblačností, ale i množstvím aerosolů (drobných pevných nebo kapalných částic) v atmosféře. Aerosoly zvyšují jak absorpci, tak i rozptyl slunečního záření ve viditelné i UV oblasti a ovlivňují tím i energetické sumy R_{GLB} a R_{EUV} . Rostoucí trend R_{GLB} má tedy dvě možná vysvětlení, buď pokles oblačnosti, nebo pokles koncentrace aerosolů.

Dobrou charakteristikou množství oblačnosti je délka slunečního svitu. Je to doba, po kterou intenzita přímého slunečního záření je alespoň $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato hodnota je zvolena tak, aby při zakrytí Slunce oblačností nebyla dosažena, a naopak pokud je Slunce viditelné, aby byla překračována, i když je Slunce jen nízko nad obzorem.

Délka slunečního svitu je silně závislá především na oblačnosti. Její závislost na množství aerosolů je velice slabá. Zatímco aerosoly snižují hodnoty R_{GLB} po celý den, sluneční svit ovlivňují jen v okolí limitní hodnoty intenzity přímého záření $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Při slunečním svitu a Slunci výše nad obzorem jsou ale intenzity přímého záření zpravidla poměrně vysoko nad limitní hodnotou pro sluneční svit $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, takže ani mírné

snížení nebo zvýšení intenzity přímého záření vlivem změn množství aerosolů po naprostou většinu dne nevede k jejímu poklesu pod $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a tedy ani ke zkrácení doby slunečního svitu. Vliv aerosolů na délku slunečního svitu by se mohl projevit prakticky jen v extrémně znečištěných oblastech (což lokalita Hradce Králové není), nebo jen v krátké době po východu nebo před západem Slunce, kdy sluneční paprsky procházejí znečištěnou atmosférou po delší dráze a vliv aerosolů na přímé sluneční záření se tak může uplatnit nejvíce. To jsou ale jen poměrně krátké časové úseky v průběhu každého dne.

Rozhodujícím faktorem, který ovlivňuje délku slunečního svitu, je tedy evidentně množství oblačnosti. Analýza vztahu mezi vývojem R_{GLB} a SSV pak může ukázat, zda jsou změny R_{GLB} způsobeny změnami SSV (a tedy změnami oblačnosti), nebo jinými faktory. Za tímto účelem byly analyzovány časové průběhy ročních průměrů R_{GLB} a SSV za roky 1996–2024. Výsledek je na obr. 4.

Na obr. 4 opět nejsou znázorněny jednotlivé hodnoty, ale pouze jejich shlazený průběh pomocí robustní lokálně vážené regrese. Je ale patrné, že vývoj R_{GLB} velice silně souvisí s vývojem SSV a tedy především s oblačností. Z grafu je také vidět jasný rostoucí trend obou veličin.

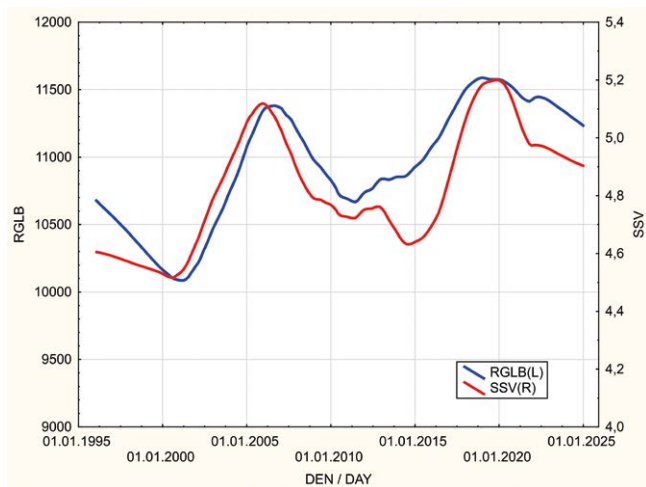
10. Závěr

Studie na období 1996–2024 ukázala, že detekovaný statisticky významný rostoucí trend denních sum erytémového UV záření (v posledních cca 30 letech v průměru asi o 0,5 % ročně) zřejmě nemá primární příčinu v klesajících hodnotách celkového ozonu. Poklesy ročních průměrů ozonu totiž nebyly v tomto období detekovány. K podobným výsledkům ale došli i další studie z prostoru střední Evropy, např. (Czerwińska et al. 2025), což naznačuje, že nejde o čistě lokální jev. Z energetiky bohatších měsíců ale byly detekovány statisticky významné poklesy ozonu v červenci a srpnu, a to průměrně o cca 6–7 DU za 29 let, a ty se mohly částečně podílet na růstu erytémového UV záření v těchto měsících.

Dominantní příčinou změn erytémového UV záření jsou zřejmě rostoucí délky slunečního svitu. V průměru je to v denních sumách asi o minutu za rok, během téměř 30 let to ale představuje prodloužení průměrné denní délky slunečního svitu téměř o 30 minut. To se pochopitelně projevuje nejen na hodnotách globálního slunečního záření, ale i na energetických sumách erytémového UV záření, protože narůstala doba, po kterou byla detekována přímá složka těchto záření.

Byl vytrénován neuronový model vztahu mezi globálním zářením a celkovým ozonem jako prediktory a sumami erytémového UV záření jako prediktandem, přičemž model bral v úvahu i roční chod závislosti mezi veličinami. Tento model následně umožnil separovat vlivy globálního záření a ozonu na sumy erytémového UV záření. Ukázalo se velice jasně, že dominantním faktorem, ovlivňujícím dávky erytémového záření je rostoucí délka slunečního svitu, která se projevuje velice podobně v datech erytémového UV záření i globálního slunečního záření. Vliv ozonu a aerosolů, pokud zde je, je podružný nebo v případě aerosolů nepřímý (možné ovlivňování procesu kondenzace vodní páry a tvorby oblačnosti).

Modelem simulovaný vliv systematického poklesu ozonu v červenci a srpnu o cca 6 DU za 29 let ukázal, že v těchto měsících by bylo možné připustit určitý nezanedbatelný vliv systema-



Obr. 4 Časový vývoj ročních průměrů denních sum R_{GLB} a SSV, shlazeně robustní lokálně váženou regresí. R_{GLB} [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$], SSV [h].

Fig. 4. Time evolution of annual means of daily sums of R_{GLB} and SSV, smoothed with robust locally weighted regression. R_{GLB} [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$], SSV [h].

tického poklesu ozonu na dávky erytémového UV záření (ten-to vliv lze odhadnout na cca 10–20 % celkového růstu dávek erytémového UV záření), i když i tady zůstává dominantním faktorem nárůst délky slunečního svitu.

V případě erytémového záření tedy nejde většinou o zvýšení intenzity záření (k tomu by docházelo v případě výrazných poklesů celkového ozonu), energetické sumy erytémového záření jsou ovlivněny spíše prodloužením délky expozice přímé složce erytémového UV záření při prodloužení délky slunečního svitu. Jen v červenci a srpnu lze připustit malé zvýšení intenzit UV záření vlivem detekovaného poklesu množství celkového ozonu.

Nárůst délky slunečního svitu a hodnot globálního záření je v souladu s výsledky (Vaníček 2015), kde byly nárůsty globálního záření na našem území na konci 20. století detekovány. Souvisejí s jevem, kterému se říká „global brightening“, tedy s nárůstem krátkovlnného slunečního záření na zemském povrchu od 90. let 20. století, který byl zjištěn i na mnoha dalších místech na světě (Evropa, USA, Japonsko) (Forster et al. 2021).

Literatura:

- CIE, 2019. Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose. Commission Internationale de l'Éclairage, ISO/CIE 17166:2019(E).
- CZERWIŃSKA, A., KRZYŚCIN, J., JAROSLAWSKI, J., SOBOLEWSKI, P. S., PIETRUCZUK, A., 2025. Trends in Erythemal Radiant Exposure from Re-evaluated Measurements (1976–2023) with Biometers in Belsk, Poland, and their Sources from Corresponding Ozone, Aerosol and Cloud Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 25, Issue 19, s. 12 497–12 512. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-25-12497-2025>.
- ČÍŽKOVÁ, K., LÁSKA, K., METELKA, L., STANĚK, M., 2018. Reconstruction and Analysis of Erythemal UV Radiation Time Series from Hradec Králové (Czech Republic) over the Past 50 Years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 18, Issue 3, s. 1 805–1 818. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-18-1805-2018>.
- FORSTER, P. T., STORELMO, K., ARMOUR, W., COLLINS, J.-L., DUFRESNE, D. et al., 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. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 923–1054, doi: 10.1017/9781009157896.009 [on-line]. [cit. 10. 9. 2025]. Dostupné z https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf.
- METELKA, L., 2018. Hodnoty Clear-Sky UV indexu na území ČR. *Meteorologické zprávy*, roč. 71, č. 2, s. 33–38. ISSN 0026-1173.
- ORMM, 2024. Report of Part I of the Twelfth Meeting of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. Geneva, 24–26 April 2024 [on-line]. [cit. 10. 9. 2025]. Dostupné z: https://ozone.unep.org/system/files/documents/ORM12_Report-part1.pdf.
- POKORNÝ, J., VANÍČEK, K., 2007. Automatizace měření slunečního svitu na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu pomocí elektronických slunoměrů. *Meteorologické zprávy*, roč. 60, č. 4, s. 106–116, ISSN 0026-1173.

VANÍČEK, K., METELKA, L., SKŘIVÁNKOVÁ, P., STANĚK, M., 2012. Dlouhodobé změny ozonové vrstvy nad územím České republiky. *Sborník prací ČHMÚ*, sv. 58, Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-07-3, ISSN 0232-0401.

VANÍČEK, K., DUBROVSKÁ, I., METELKA, L., POKORNÝ, J., 2015. Měření složek radiační bilance a dlouhodobé změny globálního záření v České republice. *Sborník prací ČHMÚ*, sv. 61, Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-51-6, ISSN 0232-0401.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Stanislava Kliegrová, Ph.D., Mgr. David Tichopád