

Měření celkového ozonu v Reykjavíku na Islandu pomocí Brewerova spektrofotometru

Total ozone observations in Reykjavík, Iceland, using a Brewer spectrophotometer

Klára Čížková

Český hydrometeorologický ústav
Solární a ozonová observatoř
Zámeček 456, 500 08 Hradec Králové;
Masarykova univerzita
Přírodovědecká fakulta
Geografický ústav
Kotlářská 267/2, 611 37 Brno
✉ klara.cizkova@chmi.cz

Ladislav Metelka

Český hydrometeorologický ústav
Solární a ozonová observatoř
Zámeček 456, 500 08 Hradec Králové

Kamil Láška

Masarykova univerzita
Přírodovědecká fakulta
Geografický ústav
Kotlářská 267/2, 611 37 Brno

Martin Staněk

Český hydrometeorologický ústav
Solární a ozonová observatoř
Zámeček 456, 500 08 Hradec Králové

Sibylle von Löwis

Islandský meteorologický ústav
oddělení infrastruktury
Bústaðavegur 7-9, 105 Reykjavík

Árni Sigurðsson

Islandský meteorologický ústav
oddělení infrastruktury
Bústaðavegur 7-9, 105 Reykjavík

The monitoring of total ozone and solar ultraviolet (UV) radiation in Reykjavík, Iceland, has been performed using an automated Brewer spectrophotometer (B199) since August 2021. A manual Dobson spectrophotometer (D050) has been in operation since the 1950s. The aim of the study was to compare the measurements of the two instruments and to assess the variability of total column ozone (TOC) in 2021–2024. The mean absolute and relative difference in the TOC measurements, defined as $TOC_{DOB} - TOC_{BRE}$, was -1.1 Dobson Units (DU, -0.35 %). After applying a correction for the effective

temperature of the ozone layer, the difference decreased to -0.8 DU (-0.26 %). The differences exhibited an annual cycle: in autumn and spring, the Dobson spectrophotometer underestimated total ozone, while in February and in summer, a slight overestimation was observed. February discrepancies were likely related to a frequent use of the Global Irradiance (GI) measurement mode in the Brewer spectrophotometer, which was associated with the largest positive differences between the two instruments. A statistically significant correlation was also found between relative differences, sulphur dioxide concentrations and atmospheric optical mass. During the study period, total ozone followed a standard annual course with maxima in spring and minima in autumn.

KLÍČOVÁ SLOVA: Arktida – spektrofotometr Brewerův – spektrofotometr Dobsonův – Island – ozon – oxid siřičitý – optická hmota atmosféry

KEYWORDS: Arctic – Brewer spectrophotometer – Dobson spectrophotometer – Iceland – ozone – sulphur dioxide – optical air mass

1. Úvod

Ochrana ozonové vrstvy, která absorbuje značnou část UV záření dopadajícího na zemský povrch, představuje jeden z prvních případů globální environmentální spolupráce založené na vědeckém konsenzu. Již v 80. letech minulého století byl v oblasti Antarktidy zaznamenán výrazný úbytek stratosférického ozonu v jarních měsících, který byl záhy spojen s působením antropogenních látek s obsahem chloru a bromu, známých jako freony a halony (Chubachi 1985; Farman et al. 1985; Solomon et al. 1986). Na základě těchto zjištění bylo používání látek poškozujících ozonovou vrstvu zakázáno či výrazně omezeno Montrealským protokolem z roku 1987 a jeho četnými dodatky. I přes jisté počáteční známky obnovy (např. Solomon et al. 2016) se však ozonová anomálie nad Antarktidou každoročně vyskytuje i v současnosti.

I když úbytek ozonu v jarním období způsobený aktivací látek poškozujících ozonovou vrstvu na částicích polárních stratosférických oblaků není v Arktidě tak výrazný jako v Antarktidě, v posledních desetiletích několikrát došlo

k výraznému ztenčení ozonové vrstvy, například v letech 1997, 2011 a 2020. V těchto letech byl v Arktidě pozorován pokles množství ozonu i o více než 40 % vůči dlouhodobému průměru, rekordní březnové minimum 221 DU bylo zaznamenáno v roce 2020 (Dameris et al. 2021). Úbytek byl způsoben pravděpodobně kombinací chemických a dynamických příčin, kdy vlivem velmi silného stratosférického polárního víru došlo k zablokování transportu ozonu z nižších zeměpisných šířek (např. Petkov et al. 2023). Je možné, že probíhající klimatické změny mohou zvýšit pravděpodobnost výskytu podobných událostí v budoucnosti (Chipperfield a Jones 1999).

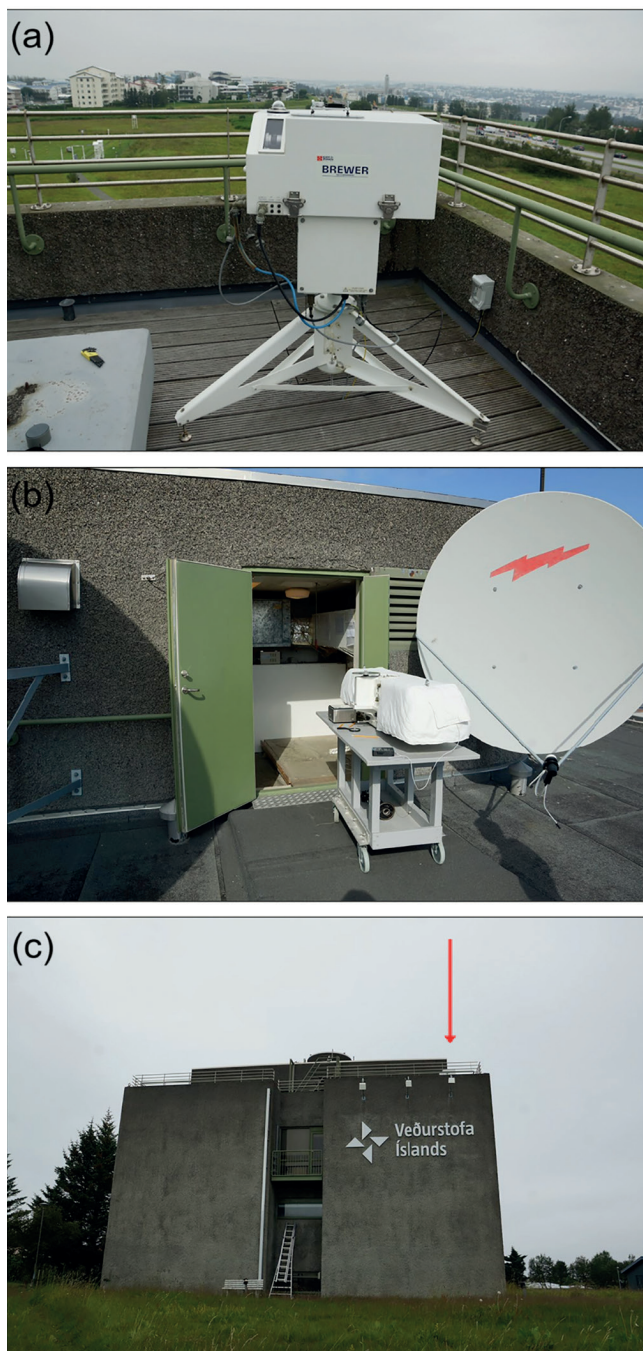
Sledování množství ozonu v severních polárních a subpolárních oblastech je z tohoto důvodu stále velmi důležité, a to jak s použitím pozemních, tak i satelitních přístrojů. Od roku 2021 k tomuto úkolu ČHMÚ přispívá měřením celkového ozonu a UV slunečního záření v islandském Reykjavíku pomocí Brewerova spektrofotometru, který je v současnosti považován za nejpřesnější přístroj pro monitorování těchto parametrů. Cílem této studie je porovnání měření Brewerova a Dobsonova spektrofotometru v Reykjavíku za období 2021–2024 včetně provedení opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy a zhodnocení vývoje celkového ozonu ve studovaném období na základě měření Brewerova spektrofotometru.

2. Data a metodika

2.1 Brewerův spektrofotometr č. 199

Brewerův spektrofotometr je v současnosti nejpřesnější, plně automatický přístroj pro měření ozonu a UV záření. Měření celkového sloupce ozonu (TOC) probíhá na základě spektrofotometrického principu založeného na Lambert-Beerově zákoně, který využívá různé absorpce UV slunečního záření na čtyřech odlišných vlnových délkách (více viz např. Vaníček et al. 2011). Tato pozorování jsou možná zejména v režimech Direct Sun (DS, použití přímého slunečního záření), Zenith Sky (ZS, rozptýlené záření ze směru od zenitu), a Global Irradiance (GI, globální záření). V režimu Focused Moon (FM) lze využít i měsíčního svitu, pokud je fáze měsíce blízka úplňku. Za nejlepší je považována metoda DS, která může dosáhnout přesnosti $\pm 1\%$, tu lze ale využít jen v případě viditelného slunečního disku. V případě ZS měření přesnost podle Kerra (2010) klesá na přibližně $\pm 2\%$. Více informací včetně podrobného popisu metody GI je obsaženo například v práci od Bernetové et al. (2023). Intenzita UV slunečního záření se měří jako množství záření dané vlnové délky dopadajícího na horizontální teflonový difúzor. Měření celého spektra trvá přibližně 3–7 minut v závislosti na použitých vlnových délkách a jeho přesnost dosahuje přibližně $\pm 3\%$ (Kerr 2010). Přístroj je dále schopný zaznamenat množství oxidu siřičitého (SO_2) s přesností přibližně 1–2 DU, lze odvodit i optickou hmotu aerosolů na 320 nm (AOD_{320}).

Český hydrometeorologický ústav vlastní tři Brewerovy spektrofotometry, a to č. 184 a č. 098, které jsou umístěny na střeše Solární a ozonové observatoře v Hradci Králové, a Brewerův spektrofotometr č. 199 (dále B199) vyčleněný pro měření ozonu a UV záření v polárních oblastech. B199 měří v oblasti vlnových délek 286,5–363,0 nm s krokem 0,5 nm. Je to přístroj verze Mark III, je tedy vybaven dvojím monochromátorem, který minimalizuje množství rozptýleného světla uvnitř přístroje.



Obr. 1 Přístroje pro měření celkového ozonu: (a) Brewerův spektrofotometr č. 199 a (b) Dobsonův spektrofotometr č. 050. Měření probíhají na střeše budovy Islandského meteorologického ústavu (c). Červená šipka znázorňuje umístění přístroje B199. Foto: Martin Staněk, ČHMÚ.

Fig. 1. Instruments for total column ozone observations: (a) the B199 Brewer spectrophotometer and (b) the D050 Dobson spectrophotometer. Measurements are taken on the roof of the Icelandic Meteorological Office building (c). The red arrow points to the location of the B199. Photo: Martin Staněk, Czech Hydrometeorological Institute.

Měření v UV oblasti spektra jsou z tohoto důvodu mnohem kvalitnější než ta, která jsou prováděna přístroji s pouze jedním monochromátorem (Kerr 2010).

V období od února 2010 do ledna 2020 byl B199 instalován na stanici Marambio v Antarktidě, kde byla vykonávána měření TOC, ozonových profilů a spektrálního UV slunečního záření (např. Čížková et al. 2023). Po stažení z Antarktidy do ČR prošel přístroj důkladnou údržbou, načež byl v srpnu roku 2021 převezen na Island, kde je v současnosti umístěn v jižní části střechy budovy Islandského meteorologického ústavu (IMO) v Reykjavíku (obr. 1a, c). Island byl vybrán z důvodu nedostatečného pokrytí regionu sítí Brewerových spektrofotometrů a kvůli své poloze na okraji severního polárního víru. Do instalace B199 na Islandu nebyl v oblasti severního Atlantiku mezi Grónskem a Skandinávií v provozu žádný jiný Brewerův spektrofotometr.

B199 je v souladu s platnými směrnici kalibrován každé dva roky pomocí cestovního standardu B017, poslední kalibrace proběhla v Reykjavíku v červnu 2025. Dále je každoročně prováděna kalibrace měření intenzity spektrálního UV záření za použití tří až pěti 50 W cestovních lamp. V současnosti přístroj poskytuje měření TOC, spektrálního UV slunečního záření, SO_2 a AOD_{320} v období přibližně od poloviny února do konce října. Příliš vysoký zenitový úhel Slunce (SZA) v zimních měsících (období od 5. 11. do 4. 2.) neumožňuje využití spektrofotometru s výjimkou režimu FM.

2.2 Dobsonův spektrofotometr č. 050

Dobsonův spektrofotometr je přístroj pro manuální měření ozonu založený na spektrofotometrickém principu (Dobson 1968). První přístroje tohoto typu byly zkonstruovány již ve 20. letech 20. století a poskytují tak nejdelší dostupné kontinuální řady pozorování TOC na světě. Intenzita dopadajícího UV slunečního záření se měří na několika dvojicích vlnových délek, přičemž vždy na jedné vlnové délce z každého páru je sluneční záření absorbováno ozonem silně, na druhé slabě. Pomocí vzorce prezentovaného například v práci od Stübiho et al. (2021) je následně dopočítán TOC. Přístroj funguje v režimech Direct Sun (DS – využití přímého slunečního záření), Zenith Blue (ZB – využití rozptýleného záření z bezoblačné oblohy ve směru od zenitu), a Zenith Cloud (ZC – stejně jako ZB, ale za přítomnosti oblačnosti v zenitu). Na rozdíl od Brewerova spektrofotometru, zejména verzí s dvojím monochromátorem, trpí měření TOC pomocí Dobsonova spektrofotometru přítomností rozptýleného světla uvnitř přístroje a závislostí na efektivní teplotě ozonové vrstvy, proto se jeho přesnost pohybuje kolem $\pm 2\text{--}4\%$ a bývají pozorovány její sezónní změny (např. Vaníček 2006; Voglmeier et al. 2024). Ještě výraznější odchylky jsou zaznamenány při SZA nad 75° (Komhyr et al. 1989).

Dobsonův spektrofotometr č. 050 (dále D050) funguje na Islandu od roku 1957. Tento přístroj je podobně jako B199 umístěn na střeše budovy IMO (obr. 1b) a pozorování TOC jsou vykonávána zaměstnanci této organizace. V současnosti je přibližně v poledních hodinách prováděno jedno měření TOC denně, a to i v zimním období. Údržba přístroje je prováděna pracovníky IMO dle platných směrnic (Bjarnason et al. 1993).

2.3 Oprava na efektivní teplotu ozonové vrstvy

Přesnost měření TOC Dobsonovým spektrofotometrem je závislá na efektivní teplotě ozonové vrstvy (T_{eff}), která je definována jako integrál vertikálního profilu teploty vzduchu vážený vertikálním profilem koncentrace ozonu a jejíž referenční hodnota pro využití při měření Dobsonova spektrofotometru je

$-46,3^\circ\text{C}$ (Vaníček et al. 2011). T_{eff} se ale ve skutečnosti může od referenční hodnoty poměrně výrazně lišit, například na Islandu se v období 2021–2024 pohybovala od přibližně -38°C v letním období po -73°C v lednu 2023. Závislost měření TOC z Dobsonova spektrofotometru na T_{eff} byla při použití statických absorpčních koeficientů ozonu (Bass a Paur 1985) stanovena na $0,133\%$ na 1°C T_{eff} (Redondas et al. 2014), korekce na skutečnou T_{eff} proto vypadá následujícím způsobem:

$$\text{Korekce (\%)} = 0,133 (T_{\text{eff}} - 46,3). \quad [1]$$

Pro opravu měření TOC z Dobsonova spektrofotometru jsou často využívány dlouhodobé klimatologické průměry T_{eff} pro stanice ve vysokých zeměpisných šířkách je ale vzhledem ke značné meziroční variabilitě efektivních teplot vhodnější využití časových řad založených na pozorovaných či reanalizovaných hodnotách. Podobně jako v článku od Vogelmeiera et al. (2024) byla pro opravu na efektivní teplotu v této práci využita časová řada služby TEMIS (z angl. Tropospheric Emission Monitoring Internet Service), která je založena na datech z Evropského centra pro střednědobé předpovědi počasí ECMWF (Van der A et al. 2010).

2.4 Přiřazení měření celkového ozonu z Brewerova a Dobsonova spektrofotometru

Za účelem porovnání měření TOC v islandském Reykjavíku v období 2021–2024 bylo ke každému měření D050 přiřazeno nejbližší měření B199. Aby nedošlo k ovlivnění proměnlivostí TOC na stanici, časový interval mezi měřeními nesměl přesáhnout ± 60 minut a SZA u žádného z měření nesměl být vyšší než 80° . U vyšších SZA totiž dochází z důvodu rozptýleného světla a větší optické hmoty atmosféry u měření Dobsonovým spektrofotometrem k nepřesnostem přesahujícím $\pm 2\%$ (Bernhard et al. 2005). V případě Brewerova spektrofotometru byla preferována měření v režimu DS, pokud nebyla pro daný časový interval k dispozici, bylo přiřazeno měření v režimu ZS nebo GI. FM měření nebyla brána v potaz.

Pro každou z takto získaných dvojic měření byly s využitím původních měření D055 i hodnot opravených na efektivní teplotu ozonové vrstvy vypočítány rozdíly, a to absolutní ($\text{D050} - \text{B199}$) i relativní $(\text{D050} - \text{B199}) / \text{B199}$. Všech 18 dvojic měření, jejichž rozdíl přesahoval i po opravě na efektivní teplotu ± 50 DU, bylo odstraněno ze studovaného souboru, protože na základě porovnání s družicovými daty byla předpokládána chyba měření jednoho z přístrojů. Tímto způsobem bylo pro období 2021–2024 získáno 826 párů měření TOC přístroji B199 a D050.

Dále byly pro původní i opravená měření z D050 vypočteny základní statistické charakteristiky (např. průměr, kvantily, směrodatná odchylka) a chybové statistiky, jako například absolutní a relativní střední kvadratická chyba (RMSE) a Pearsonův korelační koeficient (r). Statistická významnost byla vždy posuzována na hladině $\alpha = 0,05$. Hodnocen byl vliv opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy, sezónní změny rozdílů mezi přístroji, ale i vliv režimu měření a proměnných jako SZA, optická hmota atmosféry, či množství SO_2 .

3. Výsledky a diskuse

3.1 Vliv opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy

Průměrný absolutní rozdíl mezi TOC naměřeným B199 a D050 činil před opravou na efektivní teplotu ozonové vrstvy $-1,10 \pm 12,16$ DU, což představuje relativní rozdíl $-0,35 \pm 3,58$ %. Po zmíněné opravě tento rozdíl klesl na $-0,82 \pm 11,61$ DU, resp. $-0,26 \pm 3,37$ %. Oba uvedené rozdíly jsou statisticky významné (tab. 1) U přístroji D050 tedy dochází k mírnému podhodnocení TOC naměřeného B199, které se po aplikaci opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy zmírňuje, ale zcela nemizí. Po provedení opravy je možné sledovat mírné zlepšení i v případě většiny ostatních statistických charakteristik uvedených v tab. 1. Aplikaci opravy došlo rovněž ke snížení korelačního koeficientu mezi relativním rozdílem TOC a efektivní teplotou ozonové vrstvy, a to přibližně o polovinu (obr. 2).

Tab. 1 Základní statistické charakteristiky pro absolutní a relativní rozdíly mezi TOC naměřeným přístroji B199 a D050, v případě D050 před i po provedení opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy. Minimum a maximum nebyly z důvodu ovlivnění definicí odlehklých hodnot zahrnuty.

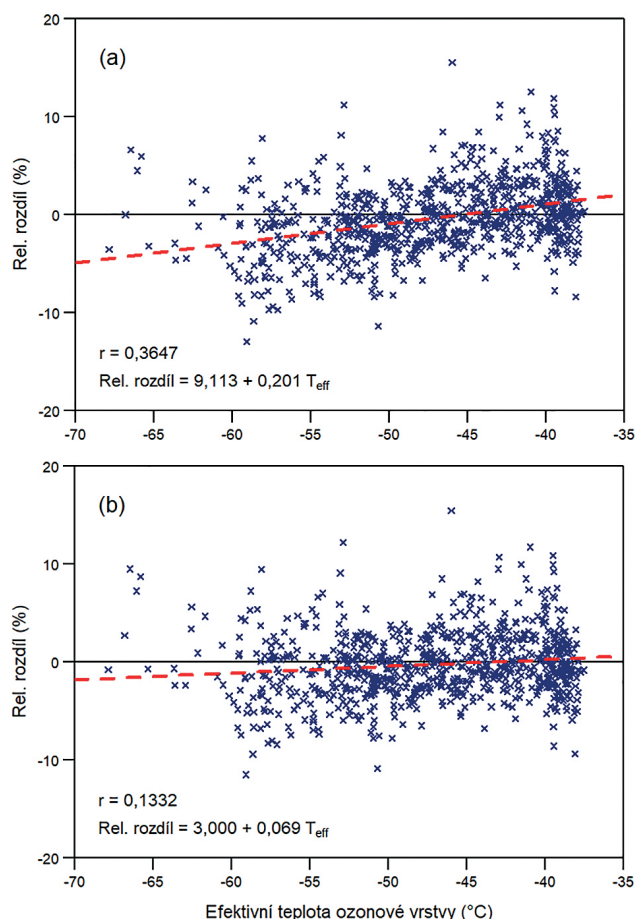
Table 1. Basic statistical characteristics of the absolute and relative differences between TOC measured by B199 and D050, in the case of D050 both before and after the application of the effective ozone layer temperature. Due to the removal of outliers, minimum and maximum were not included in this table.

Charakteristika	Absolutní (DU)		Relativní (%)	
	Neopravené	Opravené	Neopravené	Opravené
Průměr	-1,10	-0,82	-0,35	-0,26
Q10	-15,60	-14,16	-4,47	-4,10
Q25	-9,10	-8,35	-2,60	-2,46
Q75	6,78	6,04	1,92	1,78
Q90	13,05	13,19	3,73	3,78
Sm. odch.	12,16	11,61	3,58	3,37
RMSE	12,20	11,63	3,46	3,29
r	0,974	0,976	–	–
t-test (p)	0,009	0,042	–	–

K podobným výsledkům došli i další studie, které se zabývají porovnáním TOC z Brewerových a Dobsonových spektrofotometrů již od dob implementace Brewerových spektrofotometrů v 80. letech 20. století (například Čížková et al 2019; Kerr et al. 1988; Scarnato et al. 2010; Vaníček 2006). Rozdíly mezi TOC naměřeným Brewerovými a Dobsonovými spektrofotometry se lišily v závislosti na konkrétních použitých přístrojích, místních podmínkách a provedených opravách, v případě správně udržovaného Dobsonova spektrofotometru činily ale nejvýše ± 4 %. Korekce na efektivní teplotu ozonové vrstvy ale může zlepšit přesnost měření Dobsonových spektrofotometrů až o dva procentní body (Voglmeier et al. 2024).

3.2 Rozdíl mezi celkovým ozonem naměřeným Brewerovým a Dobsonovým spektrofotometrem

Po aplikaci opravy na T_{eff} činí průměrná odchylka mezi TOC naměřeným B199 a D050 přibližně $-0,3$ %. Rozdíly mezi TOC naměřeným přístroji B199 a D050 ale vykazují roční

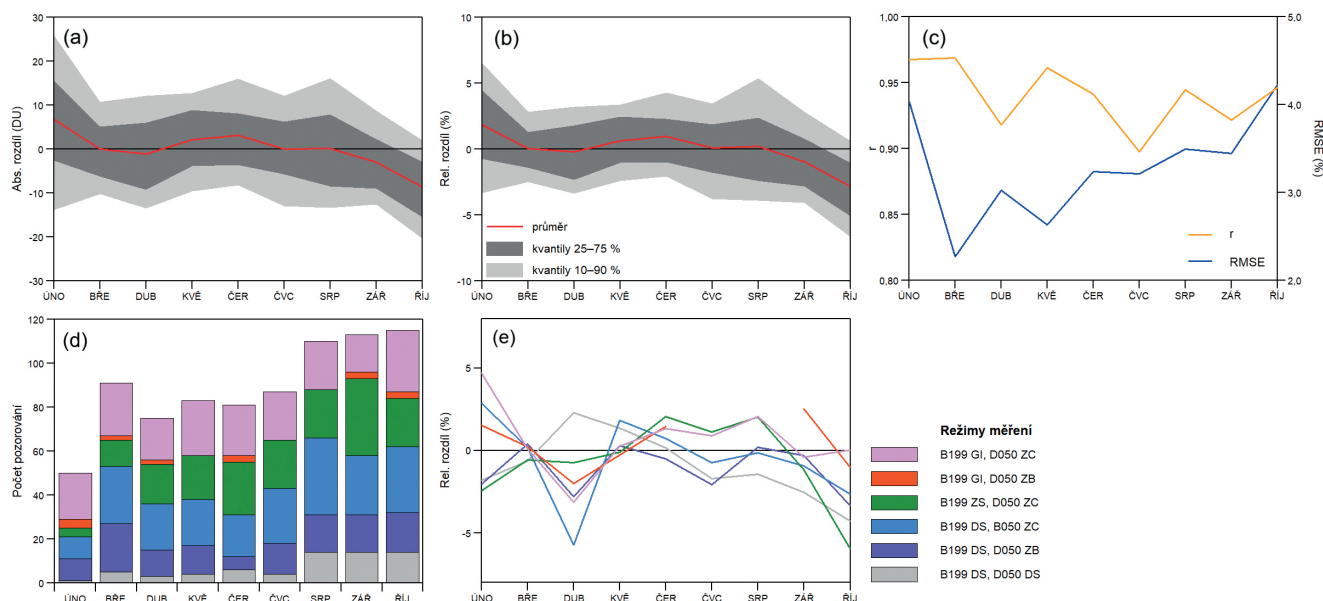


Obr. 2 Závislost relativních rozdílů mezi TOC naměřeným přístroji B199 a D050 na efektivní teplotě ozonové vrstvy (a) před použitím korekce na efektivní teplotu a (b) po aplikaci opravy, doplněný o korelační koeficient (r) a lineární proložení (červeně) včetně rovnice.

Fig. 2. The relationship between the TOC measured by B199 and D050 and the effective ozone layer temperature (a) before the application of the effective temperature correction, and (b) after the correction, supplemented by the correlation coefficients (r) and the regression line (red, dashed) including the formula.

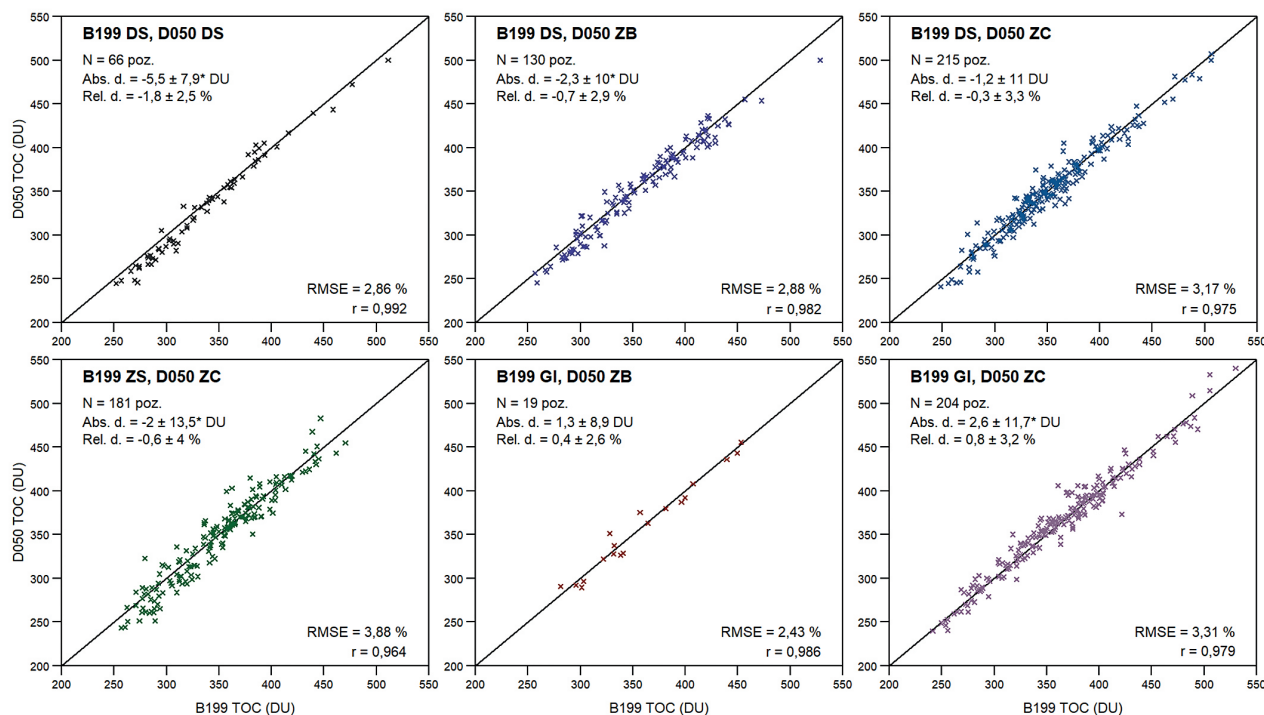
chod (obr. 3a, b), kdy k nejvýraznějšímu podhodnocení dochází v podzimních měsících (například v říjnu v průměru o $-8,6$ DU, tedy o $-2,9$ %), naopak v letních měsících a v únoru je TOC měřený D050 vzhledem k B199 nadhodnocen (například v únoru o průměrných $6,7$ DU, tedy o $1,8$ %). Korelační koeficient v každém z měsíců s výjimkou listopadu přesahuje hodnotu $0,89$, přičemž nejvyšší je březnu ($0,97$). RMSE je nejnižší v březnu ($2,27$ %) a nejvyšší v listopadu ($4,72$ %).

Sezónní rozdíly mezi měřeními Brewerova a Dobsonova spektrofotometru jsou běžně pozorovaným jevem (např. Čížková et al. 2019; Staehelin et al. 1998; Svendby a Dahlback 2002; Vaníček 2006). Ve většině případů byly zaznamenány výraznější rozdíly v zimním období, časté je i podhodnocení měření Dobsonova spektrofotometru v zimě a nadhodnocení v létě. Jak vysvětlují například Bernhard et al. (2005) či Moeini et al. (2019), nejvýznamnější příčinou výraznějších odchylek měření Dobsonova spektrofotometru v zimních měsících je vysoký SZA, a tedy větší podíl rozptýleného záření v atmosféře při její větší optické hmotě. Rozptýlené záření je průchodem přes ozonovou vrstvu ovlivněno méně než



Obr. 3 Roční chod průměrných (a) absolutních a (b) relativních rozdílů mezi TOC naměřeným přístroji B199 a D050 doplněný o hodnoty vybraných kvantilů, (c) roční chod korelačního koeficientu (r) a střední kvadratické chyby (RMSE) pro tato měření, (d) rozdělení počtu měření dle režimu pozorování, a (e) roční chod průměrných relativních diferencí podle režimu pozorování na stanici Reykjavík v období 2021–2024. Zobrazeny jsou pouze měsíce s více než 50 páry měření. Režimy měření: DS – Direct Sun, ZB – Zenith Blue, ZC – Zenith Cloud, ZS – Zenith Sky, GI – Global Irradiance.

Fig. 3. The annual variability of the mean (a) absolute and (b) relative differences of TOC measured by B199 and D050 supplemented by selected quantile values, (c) annual variability of the corresponding correlation coefficients (r) and root mean square errors (RMSE), (d) the distribution of TOC measurements by the measurement type, and (e) the annual variability of mean differences based on the type of measurement in Reykjavik, Iceland, in the period 2021–2024. Only the months with more than 50 pairs of TOC measurements are plotted. Measurement types: DS – Direct Sun, ZB – Zenith Blue, ZC – Zenith Cloud, ZS – Zenith Sky, GI – Global Irradiance.



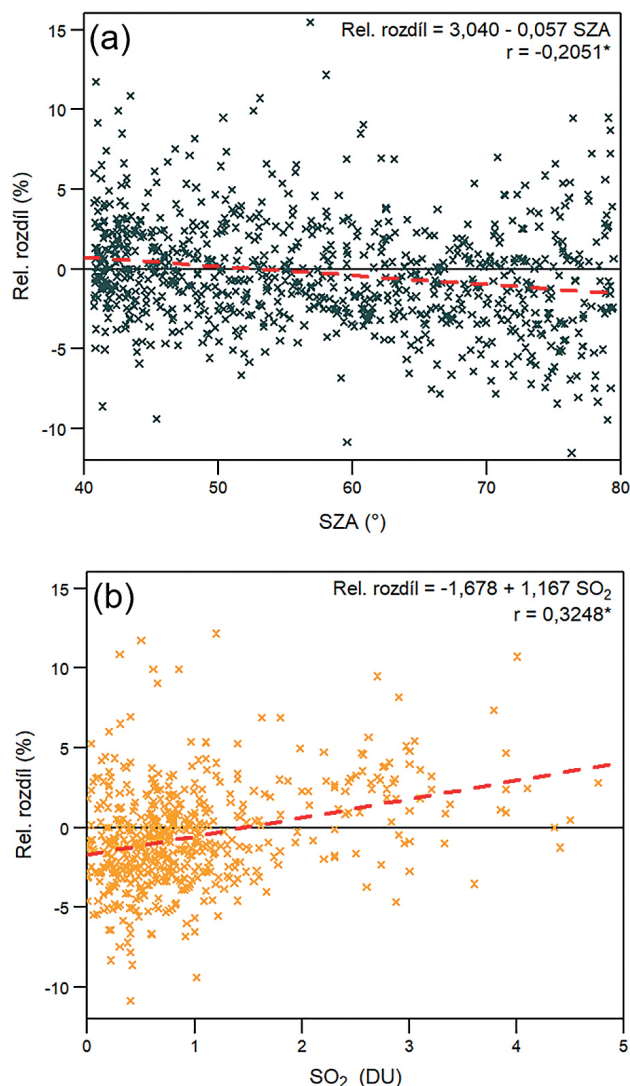
Obr. 4 Vztah mezi TOC naměřených přístroji B199 a D050 v Reykjavíku v období 2021–2024 podle režimu měření obou přístrojů doplněný o základní statistické údaje (průměrný rozdíl $\pm$ směrodatná odchylka, RMSE, r), diagonální linie značí ideální vztah $x = y$, hvězdičky u absolutních diferencí pak statistickou významnost rozdílů ($\alpha = 0.05$). Režimy měření: DS – Direct Sun, ZB – Zenith Blue, ZC – Zenith Cloud, ZS – Zenith Sky, GI – Global Irradiance.

Fig. 4. The relationship of TOC measured by B199 and D050 in Reykjavik in 2021–2024 by the type of measurements supplemented by basic statistical characteristics (mean difference $\pm$ standard deviation, RMSE, r), the diagonal line signifies the ideal relationship $x = y$, the asterisks by the absolute differences stand for the statistical significance of differences ($\alpha = 0.05$). Measurement types: DS – Direct Sun, ZB – Zenith Blue, ZC – Zenith Cloud, ZS – Zenith Sky, GI – Global Irradiance.

přímé UV záření, což vede k podhodnocení TOC. Druhým důvodem je zvýšená přítomnost rozptýleného záření v přístroji samotném. Vliv může mít také roční chod vertikálního zvrstvení ozonu v atmosféře.

Přesnost měření TOC pomocí Brewerových i Dobsonových spektrofotometrů se liší v závislosti na použitých režimech měření (viz sekce 2, také například Vaníček 2006). V případě, že D050 i B199 jsou nastaveny v režimu DS, rozptyl odchylek měření je velmi nízký, jak značí korelační koeficient $r = 0,99$. Zejména při nízkých hodnotách TOC ale dochází u D050 k podhodnocování TOC naměřeného pomocí B199 (obr. 4). V případě jiných režimů měření je rozptyl odchylek větší, a to zejména při použití kombinace B199 = ZS a D050 = ZC. Tyto režimy měření se používají při zatažené obloze a jsou obecně považovány za méně přesné (např. Evans et al. 2017). Průměr TOC z přístroje D050 je statisticky významně nižší než z B199 při nastavení B199 = DS a D050 = DS, B199 = DS a D050 = ZB, a B199 = ZS a D050 = ZC. Naopak statisticky významně vyšší průměrný TOC naměřený D050 byl zaznamenán při použití kombinace B199 = GI a D050 = ZC. Poslední zmíněná kombinace je relativně nejčastější v únoru, kdy bylo tímto způsobem získáno 21 z celkových 52 měření (přibližně 40 %), v ostatních měsících činí podíl kombinace GI a ZC měření od 15 % v září do 30 % v květnu. Rozdíly v relativních četnostech využití různých kombinací režimů měření mohly ovlivnit roční chod diferencí znázorněný na obr. 3, protože například při použití kombinace GI a ZC bylo nadhodnocení nejvýraznější právě v únoru (4,7 %), zatímco v ostatních sledovaných měsících nepřesáhlo 2,1 %.

Odchyly v TOC naměřeném Brewerovým a Dobsonovým spektrofotometrem mohou být kromě efektivní teploty ozonové vrstvy ovlivněny parametry jako SZA (obr. 5a), který určuje optickou hmotu atmosféry, nebo množství SO_2 (obr. 5b). Mezi SZA a relativními rozdíly TOC naměřeného přístroji B199 a D050 byl zjištěn statisticky významný negativní korelační vztah, který ale vysvětluje pouze přibližně 4 % celkové variance relativních rozdílů. Přesto je patrné, že při vyšších SZA dochází u přístroje D050 k výraznějšímu podhodnocení TOC, což pozorovali například Bernhard et al. (2005) nebo Vaníček (2006). Statisticky významný je i vztah relativních diferencí a SO_2 (obr. 5b). Vzhledem k vulkanické činnosti na Islandu může být v Reykjavíku naměřeno i 50 DU SO_2 (Čížková et al. 2024). Nejvyšší průměrná denní hodnota SO_2 ve studovaném období, 26,4 DU, byla naměřena při erupci sopky Fagradalsfjall 24. července 2023. Tyto extrémní případy nebyly do výpočtu na obr. 5b zahrnuty, ale nadhodnocení TOC přístrojem D050 se při SO_2 nad 10 DU pohybovalo kolem 6,5 %. Taktéž Svendby a Dahlback (2002) zaznamenali nadhodnocený TOC měřený Dobsonovým spektrofotometrem při vyšším množství atmosférického SO_2 . Důvodem je, že SO_2 absorbuje UV sluneční záření na podobných vlnových délkách jako ozon a při měření Dobsonovým spektrofotometrem se jeho vliv k účinkům ozonu přičítá, podrobněji například viz Komhyr a Evans (1980). Celkové množství ozonu nemělo na rozdíly mezi TOC naměřeným pomocí D050 a B199 statisticky významný vliv.

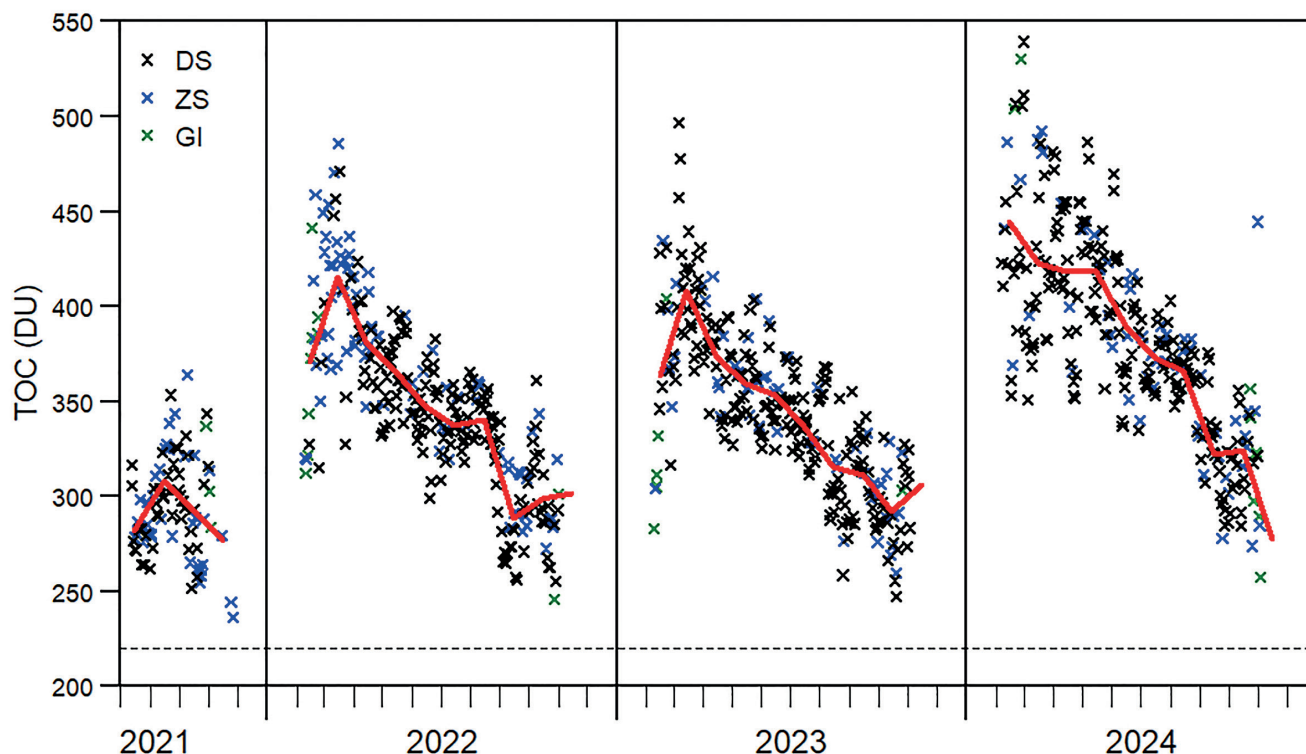


Obr. 5 Závislost relativních rozdílů mezi TOC měřeným pomocí B199 a D050 na (a) SZA, a (b) celkovém sloupci SO_2 v Reykjavíku v období 2021–2024, hvězdičky značí statistickou významnost korelačních koeficientů ($\alpha = 0,05$).

Fig. 5. The relationship of the relative differences of TOC measured by B199 and D050 and (a) SZA, and (b) total column SO_2 in Reykjavik in 2021–2024, the asterisks signify the statistical significance of correlation coefficients ($\alpha = 0.05$).

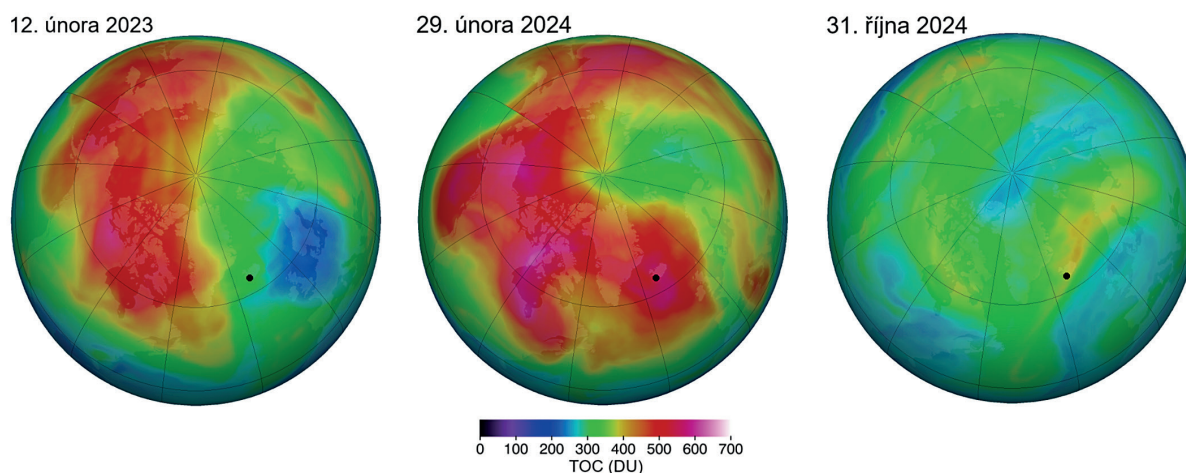
3.3 Variabilita celkového ozonu na Islandu v letech 2021–2024 na základě měření Brewerova spektrofotometru

Od srpna 2021 do prosince 2024 bylo přístrojem B199 v Reykjavíku provedeno celkem 31 110 měření TOC, z toho 5 539 v režimu DS, 11 510 v režimu ZS, 13 958 v režimu GI a 103 v režimu FM. Z těchto měření byly vypočítány denní reprezentativní hodnoty, které se stanovují jako průměrný TOC ze všech DS měření v daném dni. Nejsou-li k dispozici DS měření, počítají se denní reprezentativní hodnoty z měření v režimu ZS, případně GI. Měření v režimu FM nejsou brána v potaz. Denní reprezentativní hodnoty budou dále označovány jako denní průměry TOC.



Obr. 6 Denní průměry TOC z B199 podle režimu měření doplněné o průměrné měsíční hodnoty TOC (červeně) v Reykjavíku v období srpen 2021 – prosinec 2024.

Fig. 6. Daily mean values of TOC measured by B199 by the type of measurement, supplemented by the mean monthly TOC values (red line) in Reykjavik in August 2021 – December 2024.



Obr. 7 TOC v oblasti Arktidy ve dnech 12. února 2023, 29. února 2024, a 31. října 2024 podle NASA Arctic Ozone Watch (ozonewatch.gsfc.nasa.gov) s využitím dat ze satelitního přístroje OMPS; přibližná poloha Reykjavíku je označena černým bodem.

Fig. 7. Arctic total ozone on 12 February 2023, 29 February 2024, and 31 October 2024, according to NASA Arctic Ozone Watch (ozonewatch.gsfc.nasa.gov) using the OMPS satellite data; the approximate location of Reykjavik is marked by a black point.

Průměrný TOC v letech 2022–2024 v Reykjavíku činil 359,1 DU, přičemž v roce 2022 to bylo 348,5 DU, 344,9 DU v roce 2023, a 383,8 DU v roce 2024. Maximální denní hodnota, 539,4 DU, byla naměřena 29. února 2024, minimum, které činilo 236,4 DU, bylo zaznamenáno 26. listopadu 2021. Ani v jednom případě nebyl denní průměr TOC nižší než 220 DU, což je arbitrárně stanovená hodnota používaná pro vymezení situací s výrazně sníženým množstvím ozonu oproti dlouhodobému průměru (tzv. ozonová díra). Ve všech letech byl zaznamenán

typický roční chod TOC s maximy na konci zimy a minimy na podzim (obr. 6, popis a vysvětlení např. Bjarnason et al. 1993).

Ke snížení TOC v jarních měsících došlo ve studovaném období výrazněji pouze v roce 2023, kdy se v oblasti severní a střední Evropy 12.–16. února 2023 vytvořila oblast s nízkým množstvím ozonu. Podle Vargina et al. (2024) byl hlavní příčinou úbytku ozonu v tomto období nárůst výšky tropopauzy zapříčiněný výraznou anticyklónou při rozpadu polárního víru v důsledku náhlého oteplení stratosféry v polovině února. Zároveň

podél západního okraje této anticyklóny došlo k transportu subtropického vzduchu, který je přirozeně chudší na ozon, do vyšších zeměpisných šířek. Island se však nacházel mimo oblast s nejvýraznějším úbytkem ozonu (situace z 12. února 2023 je znázorněna na obr. 7), proto se hodnoty zaznamenané v Reykjavíku v první polovině února 2023 pohybovaly kolem 300 DU.

Naopak na jaře a v létě roku 2024 bylo v celé Arktidě zaznamenáno množství ozonu výrazně překračující dlouhodobý průměr, dle Newmana et al. (2024) byl v tomto roce průměrný březnový TOC v této oblasti nejvyšší od začátku satelitních měření v roce 1979. Důvodem byl nárůst množství ozonu ve spodní stratosféře zapříčiněný výraznou aktivitou planetárních vln a následným zeslabením polárního víru, což podporuje advekci na ozon bohatých vzduchových hmot směrem k pólu. Situace z 29. února 2024, kdy byl v Reykjavíku naměřen vůbec nejvyšší průměrný denní TOC ve studovaném období, je znázorněna na obr. 7.

K poměrně zajímavé situaci došlo rovněž 31. října 2024, kdy se průměrný denní TOC zvýšil v porovnání s předchozím dnem o 123,2 DU na 444,7 DU, přičemž 1. listopadu 2024 následoval pokles na 284,9 DU. Hodnota z 31. října by se mohla na první pohled jevit jako chybné měření, ale satelitní data (obr. 7) potvrzují přechod úzkého pásu vzduchové hmoty bohaté na ozon přes území Islandu. Jak plyne z obr. 7, rozdíly v TOC mezi vzduchovou hmotou, která ovlivňovala Island 31. října 2024, a jejím okolím mohly snadno přesáhnout 100 DU.

4. Shrnutí a závěr

Měření celkového ozonu v islandském Reykjavíku probíhá od roku 2021 současně pomocí Dobsonova a Brewerova spektrofotometru, což umožňuje nezávislé srovnání obou přístrojů v lokalitě nacházející se na okraji arktického polárního víru. Shoda měření byla zejména po aplikaci opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy velmi dobrá, Dobsonův spektrofotometr podhodnocoval měření Brewerova spektrofotometru v průměru pouze o $-0,26\%$. Roční chod rozdílů byl zapříčiněn kombinací vlivu zenitového úhlu Slunce a relativní četnosti využití různých režimů měření v jednotlivých měsících. Zjištěna byla i korelace mezi diferencemi celkového ozonu a množstvím oxidu siřičitého. Pro budoucí využití časové řady celkového ozonu z Dobsonova spektrofotometru by tedy bylo vhodné uplatnit kromě opravy na efektivní teplotu ozonové vrstvy i korekce na množství oxidu siřičitého a na optickou hmotu atmosféry. Taktéž je nutné zkontrolovat dlouhodobou stabilitu přístroje v čase pomocí satelitních či reanalyzovaných dat.

Ve studovaném období byl na Islandu zaznamenán typický roční chod celkového ozonu s maximy na jaře a minimy na podzim, do variability ozonu se ale promítla i specifická atmosférická cirkulace v jednotlivých letech. Například v únoru 2023 byl zjištěn pokles množství ozonu z důvodu rozpadu polárního víru nad Skandinávií, zatímco v první polovině roku 2024 bylo pozorováno nezvykle vysoké množství ozonu v důsledku zvýšené aktivity planetárních vln. Vzhledem ke značně dynamickým procesům v arktické stratosféře a ke vzájemnému ovlivňování globální klimatické změny a ozonové vrstvy je důležité pokračovat v monitorování ozonu a UV slunečního záření v této oblasti satelitními i pozemními přístroji. Ukazuje se také, že volba Reykjavíku pro umístění Brewerova spektrofo-

tometru č. 199 byla velice dobrá, přístroj může v dynamické severní subpolární oblasti poskytnout i informace, které pomocí samotného Dobsonova spektrofotometru není možné zjistit. To se projevuje i značným zájmem zahraničních odborníků, kteří chtějí využívat výsledky měření Brewerova spektrofotometru.

Poděkování:

Měření ozonu a UV záření v oblasti Islandu probíhá v rámci projektu DKRVO (Dlouhodobá koncepce rozvoje výzkumné organizace), oblast výzkumu 11: Měření a hodnocení vlastností ozonové vrstvy a UV záření v severních subpolárních oblastech. Tato studie byla rovněž realizována s podporou Českého antarktického výzkumného programu 2025–2027 (VAN 2025).

Autoři by rádi poděkovali Islandskému meteorologickému ústavu za možnost instalace Brewerova spektrofotometru v Reykjavíku i za sdílení dat z Dobsonova spektrofotometru. Taktéž děkují službě TEMIS za zpracování časové řady efektivní teploty ozonové vrstvy na základě dat ECMWF, která je volně k dispozici online (<https://www.temis.nl/climate/efftemp/overpass.php>).

Poděkování náleží i dvěma recenzentům za jejich konstruktivní návrhy a připomínky, které výrazně napomohly zvýšit kvalitu manuskriptu.

Literatura:

- BASS, A. M., PAUR, R. J., 1985. The ultraviolet cross-sections of ozone. I. The measurements, II – Results and temperature dependence. In: *Atmospheric ozone; Proceedings of the Quadrennial*, sv. 1, s. 606–616.
- BERNET, L., SVENDBY, T., HANSEN, G., ORSOLINI, Y., DAHLBACK, A. et al., 2023. Total ozone trends at three northern high-latitude stations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. 23, s. 4165–4184. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-23-4165-2023>.
- BERNHARD, G., EVANS, R. D., LABOW, G. J., OLTMANS, S. J., 2005. Bias in Dobson total ozone measurements at high latitudes due to approximations in calculation of ozone absorption coefficients and air mass. *Journal of Geophysical Research*, roč. 110, s. 1–10. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2004JD005559>.
- BJARNASON, G. G., RÖGNVALDSSON, Ö. R., SIGFÚSSON, T. I., JAKOBSSON, T., THORKESSON, B., 1993. Total Ozone Variations at Reykjavík Since 1957. *Journal of Geophysical Research*, roč. 98, s. 23059–23077. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/93JD01912>.
- CHIPPERFIELD, M. P., JONES, R. L., 1999. Relative influences of atmospheric chemistry and transport on Arctic ozone trends. *Nature*, roč. 400, s. 551–554. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/22999>.
- CHUBACHI, S., 1985. A Special Ozone Observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In: Zerefos, C. S., Ghazi, A. (eds.): *Atmos. Ozone*. Dordrecht: Springer, s. 285–289. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-94-009-5313-0_58.
- ČÍŽKOVÁ, K., LÁSKA, K., METELKA, L., STANĚK, M., 2019. Intercomparison of Ground- and Satellite-Based Total Ozone Data Products at Marambio Base, Antarctic Peninsula Region. *Atmosphere-Basel*, roč. 10, s. 1–26. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos10110721>.
- ČÍŽKOVÁ, K., LÁSKA, K., METELKA, L., STANĚK, M., 2023. Assessment of spectral UV radiation at Marambio Base, Antarctic Peninsula. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. 23,

- s. 4617–4636. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-23-4617-2023>.
- ČÍŽKOVÁ, K., LÁSKA, K., TICHOPÁD, D., METELKA, L., STANĚK, M., SIGURDSSON, Á., 2024. Effect of volcanic sulfur dioxide during the 2023 Fagradalsfjall eruption in Reykjavík, Iceland. *Meteorologische Zeitschrift*, roč. **33**, s. 1–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1127/metz/2024/1224>.
- DAMERIS, M., LOYOLA, D. G., NÜTZEL, M., COLDEWEY-EGBERS, M., LEROT, C. et al., 2021. Record low ozone values over the Arctic in boreal spring 2020. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **21**, s. 617–633. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-21-617-2021>.
- DOBSON, G. M. B., 1968. Forty Years' Research on Atmospheric Ozone at Oxford: a History. *Applied Optics*, roč. **7**, s. 387–405.
- EVANS, R. D., PETROPAVLOVSKIKH, I., MCCLURE-BEGLEY, A., MCCONVILLE, G., QUINCY, D., MIYAGAWA, K., 2017. Technical note: The US Dobson station network data record prior to 2015, re-evaluation of NDACC and WUDC archived records with Win-Dobson processing software. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **17**, s. 12051–12070. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-17-12051-2017>.
- FARMAN, J. C., GARDINER, B. G., SHANKLIN, J. D., 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, roč. **315**, s. 207–210. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/315207a0>.
- KERR, J. B., ASBRIDGE, I. A., EVANS, W. F. J., 1988. Intercomparison of Total Ozone Measured by the Brewer and Dobson Spectrophotometers at Toronto. *Journal of Geophysical Research*, roč. **93**, s. 11129–11140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p11129>.
- KERR, J. B., 2010. The Brewer Spectrophotometer. In: W. Gao, J. R. Slusser, D. L. Schmoldt (eds.): *UV radiation in Global Climate Change*. Berlin, Heidelberg: Springer, s. 161–190. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03313-1_6.
- KOMHYR, W. D., EVANS, R. D., 1980. Dobson spectrophotometer total ozone measurement errors caused by interfering absorbing species such as SO_2 , NO_2 , and photochemically produced O_3 , in polluted air. *Geophysical Research Letters*, roč. **7**, s. 157–160. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/GL007i002p00157>.
- KOMHYR, W. D., GRASS, R. D., LEONARD, R. K., 1989. Dobson Spectrophotometer 83: A Standard for Total Ozone Measurements, 1962–1987. *Journal of Geophysical Research*, roč. **94**, s. 9847–9861. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/JD094iD07p09847>.
- MOEINI, O., ZANJANI, Z. V., MCELROY, C. T., TARASICK, D. W., EVANS, R. D. et al., 2019. The effect of instrumental stray light on Brewer and Dobson total ozone measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, roč. **12**, s. 327–343. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-12-327-2019>.
- NEWMAN, P. A., LAIT, L. R., KRAMAROVA, N. A., COY, L., FRITH, S. M. et al., 2024. Record High March 2024 Arctic Total Column Ozone. *Geophysical Research Letters*, roč. **51**, s. 1–8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2024GL110924>.
- PETKOV, B. H., VITALE, V., DI CARLO, P., DROFA, O., MASTRANGELO, D. et al., 2023. An Unprecedented Arctic Ozone Depletion Event during Spring 2020 and Its Impacts Across Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, roč. **128**, s. 1–18. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2022JD037581>.
- REDONDAS, A., EVANS, R., STÜBI, R., KÖHLER, U., WEBER, M., 2014. Evaluation of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **14**, s. 1635–1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-14-1635-2014>.
- SCARNATO, B., STAEHELIN, J., STÜBI, R., SCHILL, H., 2010. Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988–2007). *Journal of Geophysical Research*, roč. **115**, s. 1–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2009JD011908>.
- SOLOMON, S., GARCIA, R. R., ROWLAND, F. S., WUEBBLES, D. J., 1986. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, roč. **321**, s. 755–758. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/321755a0>.
- SOLOMON, S., IVY, D. J., KINNISON, D., MILLS, M. J., NEELY, R. R., SCHMIDT, A., 2016. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, roč. **353**, s. 269–274. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.aae0061>.
- STAEHELIN, J., RENAUD, A., BADER, J., MCPETERS, R., VIATTE, P. et al., 1998. Total ozone series at Arosa (Switzerland): Homogenization and data comparison. *Journal of Geophysical Research*, roč. **103**, s. 5827–5841. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/97JD02402>.
- STÜBI, R., SCHILL, H., BARRAS, E. M., KLAUSEN, J., HAEFELE, A., 2021. Quality assessment of Dobson spectrophotometers for ozone column measurements before and after automation at Arosa and Davos. *Atmospheric Measurement Techniques*, roč. **14**, s. 4203–4217. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-14-4203-2021>.
- SVENDBY, T., DAHLBACK, A., 2002. Twenty years of revised Dobson total ozone measurements in Oslo, Norway. *Journal of Geophysical Research*, roč. **107**, s. 1–17. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2002JD002260>.
- VAN DER A, R. J., ALLAART, M. A. F., ESKES, H. J., 2010. Multi sensor reanalysis of total ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **10**, s. 11277–11294. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-10-11277-2010>.
- VANÍČEK, K., 2006. Differences between ground Dobson, Brewer and satellite TOMS-8, GOME-WFDOAS total ozone observations at Hradec Králové, Czech. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **6**, s. 5163–5171. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-6-5163-2006>.
- VANÍČEK, K., STANĚK, M., METELKA, L., SKŘIVÁNKOVÁ, P., 2011. Asimilace řad celkového ozonu z Hradce Králové, 1961–2010. *Meteorologické zprávy*, roč. **64**, s. 70–78. ISSN 0026-1173.
- VARGIN, P. N., KOVAL, A. V., GURYANOV, V. V., KIRUSHOV, B. M., 2024. Large-scale dynamic processes during the minor and major stratospheric warming events in January–February 2023. *Atmospheric Research*, roč. **308**, s. 1–18. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107545>.
- VOGLMEIER, K., VELAZCO, V. A., EGLI, L., GRÖBNER, J., REDONDAS, A., STEINBRECHT, W., 2024. The transition to new ozone absorption cross sections from Dobson and Brewer total ozone measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, roč. **17**, s. 2277–2294. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2277-2024>.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Pavla Skřivánková, RNDr. Peter Križan, Ph.D.