

Optické vlastnosti atmosférických aerosólov v oblasti Poprad–Gánovce

Mgr. Peter Hrabčák

**Slovenský hydrometeorologický ústav,
Aerologické a radiačné centrum Poprad-Gánovce**

Anotácia

Predkladaná práca je zameraná na optické vlastnosti atmosférických aerosólov, najmä na ich optickú hrúbku. Tá bola určená pre vlnové dĺžky 306,3nm, 310,1 nm, 313,5 nm, 316,8 nm a 320,1 nm pomocou meraní Brewerovho ozónového spektrofotometra v Poprade-Gánovciach od roku 2003. Satelitné merania optickej hrúbky a albeda jednoduchého rozptylu pre rovnaké miesto sú k dispozícii pre vlnové dĺžky 342,5 nm a 388 nm od roku 2004.

Kľúčové slová: atmosférické aerosóly, optická hrúbka, albedo jednoduchého rozptylu

Annotation

Submitted work is focused on the optical properties of atmospheric aerosols, mainly for their optical depth. It was determined for wavelengths 306,3nm, 310,1 nm, 313,5 nm, 316,8 nm and 320,1 nm by using Brewer ozone spectrophotometer measurements at Poprad - Gánovce since 2003. Satellite measurements of optical depth and single scattering albedo are available for the same area and for wavelengths 342,5 nm and 388 nm since 2004.

Key words: atmospheric aerosols, optical depth, single scattering albedo

Abstract

Atmospheric aerosols have a significant impact on the physical and chemical processes in the atmosphere. Aerosols effect on the chemical composition of the troposphere, but in certain cases the stratosphere, particularly as regards a large volcanic eruptions, or flights of aircraft in the stratosphere. Aerosols are able to reduce visibility and in many cases significantly impact on human health. The presence of aerosols in the atmosphere has also an impact on the energy balance of the Earth. Content of aerosols in the atmosphere is determined mainly by proximity their source and by atmospheric circulation. For these reasons, global and regional distribution of particles is very variable with time and is also non-homogeneous in the space.

This paper presents results of research of selected properties of atmospheric aerosols in Poprad - Gánovce (Slovakia). The site is located at an altitude of 706 meters near the High Tatras. The main local sources of aerosols are agricultural activities, heating houses by solid fuel in the nearby villages and industrial activities connected with the city Poprad. Ground measurements of direct sunlight for wavelengths 306,3nm, 310,1 nm, 313,5 nm, 316,8 nm and 320,1 nm are provided mainly manually operated Brewer ozone spectrophotometer. Measurements for this research are available since 2003. Satellite data come from the Ozone Monitoring Instrument device (satellite AURA) and are for the wavelengths of 342,5 nm and 388 nm. Data are available since 2004 with a resolution of 0,25 °.

All raw data have passed through cloud screening, which was mainly secured by the manual operation of the device in the case of surface measurements. The most interesting findings from the ground measurements are: long-term average of aerosol optical depth (AOD) for wavelength 320,1 nm is 0,32 and for the wavelength of 306,3 nm is 0,27. We observe a proportional dependence of AOD on the wavelength. An important and as yet unexplained finding is an evident decline in the average annual AOD in the period of observations. We also see a decrease in AOD difference between the longest and the shortest wavelength. Annual course of AOD showed significantly higher values in the warm half of the year, peaking in July and minimum in December. When we compare the effects of ozone and aerosols, that we see the ozone dominance for shorter wavelengths, while in the case of a pair longest occurs weak dominance of influence of aerosols.

The number of days with quality satellite data is only 19 in the annual average. As we compare it with the land data which one are 211, we can say that, it is really very small and almost insufficient amount for good characterization of the territory. The annual averages for satellite data were compiled. They show significant variability in the period of observations. AOD for wavelength 342.5 nm exceeds AOD for wavelength 388 nm in annual averages. We observe very weak correlation between satellite and terrestrial measurements in comparison days. The correlation coefficient is only 0.42. The satellite was also a source of data of single scattering albedo. In the long-term average it achieves value of about 0.97 for the both observed wavelengths.

1. Úvod

Svetová meteorologická organizácia (WMO) pojem aerosóly definuje ako suspenziu pevných častíc, kvapalných častíc, alebo pevných a kvapalných častíc v plynnom médiu.^[1] Jednou zo základných charakteristík či už kvapalných alebo tuhých aerosólov je ich veľkosť. Polomer takýchto častíc sa pohybuje od niekoľko nm do stoviek μm . Sú väčšie než typické atmosférické ióny, ktorých priemer je zvyčajne okolo 0,5 nm. Môžu ale byť rovnako veľké ako kvapky tvoriace oblaky. V princípe je možné tvrdiť, že rôzne zdroje produkujú aj rôzne veľkosti častíc, ktoré k nim prislúchajú. Experimentálny limit pre zber aerosólov najmenších rozmerov je ich veľkosť, ktorej spodnú hranicu charakterizuje polomer 1,5 nm. Táto hranica tiež oddeľuje veľké molekuly na jednej strane a malé aerosóly na strane druhej. Všetky častice pod 0,5 μm pre ich polomer bývajú niekedy označené ako jemné častice (fine mode particles) a všetky častice väčšie ako 0,5 μm ako hrubozrnné častice (coarse mode particles).^[9]

Ďalšou významnou charakteristikou je zloženie aerosólov podľa jeho pôvodu. Rozlišujeme tu niekoľko tried, a to: morská soľ, minerálny prach, sulfáty, nitráty, organický uhlík, sadze, no vo väčšine prípadov sa stretávame so zmiešanými aerosólmi. Je tiež dôležité či ide o prirodzený alebo antropogénny zdroj. Obsah aerosólov v atmosfére je determinovaný najmä blízkosťou zdroja a atmosférickou cirkuláciou. Z týchto dôvodov je globálna a regionálna distribúcia častíc veľmi variabilná s časom a je tiež nehomogénna v priestore.

Niet pochyb o tom, že aerosóly majú významný vplyv na fyzikálne a chemické procesy prebiehajúce v atmosfére. Ovpływujú najmä chemické zloženie troposféry (v určitých prípadoch aj stratosféry, najmä pokiaľ ide o veľké sopečné erupcie, prípadne lety lietadiel v stratosfére), sú schopné znižovať viditeľnosť a v mnohých prípadoch významne vplývajú aj na ľudské zdravie. Prítomnosť aerosólov v atmosfére má tiež dopad na energetickú bilanciu Zeme, a to priamym, polopriamym a nepriamym spôsobom. Pod priamym spôsobom je myslený rozptyl a absorpcia krátkovlnného a dlhovlnného žiarenia. Absorpcia žiarenia následne vedie k otepľovaniu tých častí atmosféry, kde sa aerosóly nachádzajú (najmä hraničnej vrstvy atmosféry), pričom vyššia teplota následne vedie k vyparovaniu oblačných vrstiev.

Poslednou vetou bol v stručnosti popísaný polopriamy spôsob, ktorého následkom je väčšie množstvo slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Vyššia teplota môže tiež viesť k zmene teplotného zvrstvenia atmosféry, čo následne ovplyvňuje vertikálne a horizontálne pohyby vzduchu v atmosfére. Nepriamy efekt sa týka schopnosti aerosólov pôsobiť ako kondenzačné jadrá alebo ako ľadové jadrá, čo ovplyvňuje mikrofyzikálne a optické vlastnosti oblakov. Ide pri tom o zmenu ich radiačných vlastností, ďalej zmenu vlastností atmosférických zrážok, a tiež sa mení aj doba života oblakov.^[5] Platí, že zvýšenie počtu oblačných kondenzačných jadier vedie k rastu početnosti oblačných kvapiek a k zmenšeniu ich veľkosti pri daných podmienkach obsahu vody v atmosfére, čo spôsobuje rast albeda a doby života oblaku.^[6]

2. Metodika

2.1. Použité prístroje

2.1.1. Brewerov ozónový spektrofotometer

Brewerov ozónový spektrofotometer (model MKIV) je vedecký prístroj, ktorý pracuje v ultrafialovej a viditeľnej oblasti slnečného spektra. Merania priameho slnečného žiarenia v UV oblasti vykonáva na tak vybraných vlnových dĺžkach, aby na základe rozličnej absorpcie žiarenia po prechode atmosférou bolo možné odvodiť celkové množstvo ozónu a celkové množstvo oxidu siričitého. Tento princíp merania pomocou pasívnej atmosférickej diferenciálnej spektroskopie je známy ako tzv. DOAS metóda (Differential optical absorption spectroscopy). Prístroj pomocou svojho optického systému rozkladá slnečné žiarenie dopadajúce na zemský povrch a z ultrafialovej časti jeho spektra vyberá vopred stanovené vlnové dĺžky so silnou a slabšou absorpciou O₃ a SO₂. Následnou porovnávacou analýzou v matematickom modeli, ktorý popisuje prenos žiarenia v atmosfére, je možné určiť celkové množstvo O₃ a SO₂ vo vertikálnom stĺpci atmosféry medzi jej hornou hranicou a zemským povrchom. Merania priameho slnečného žiarenia dokážu byť využité aj na určenie optickej hrúbky aerosólov (aerosols optical depth – AOD) v UV oblasti slnečného spektra pre vlnové dĺžky 306,3nm, 310,1 nm, 313,5 nm, 316,8 nm a 320,1 nm. Hodnoty celkového množstva O₃ a SO₂ je potrebné (SO₂ sa ale často zanedbáva) poznať pre následný výpočet AOD.^{[3][4]}

Presnosť prístroja je $0,006 \pm 0,002$ nm. Po technickej stránke je plynulý chod prístroja zabezpečený pravidelnými testami, kontrolami a servisnou profylaktikou počas kalibrácií. Prístroj je kalibrovaný voči svetovej referenčnej skupine (Brewer Triad), udržiavanej v Environment Canada, prostredníctvom cestovného referenčného prístroja č. 017. Od začiatku meraní (18.8.1993) náš prístroj č. 097 prechádza pravidelnými 2-ročnými recalibráciami a dennými lampovými testami, takže z technického hľadiska možno považovať rad meraní za homogénny.

2.1.2. OMI – satelit AURA

Ozone Monitoring Instrument (OMI) je súčasťou satelitu AURA, ktorý je prevádzkovaný spoločnosťou NASA. Na obežnú dráhu Zeme bol vypustený 15.7.2004. Tento satelit je synchronný so Slnkom, takže nad rovníkom sa nachádza stále v rovnakom miestnom slnečnom čase. Jeho vzdialenosť od zemského povrchu je 708 km až 710 km a jeden oblet Zeme mu trvá približne 99 minút. Celú Zem zosníma za jeden deň, a preto nad určitým miestom na povrchu sa za ten čas nachádza iba raz. Prístroj OMI slúži na diaľkové meranie týchto plynov: O₃, NO₂, SO₂, BrO, OCIO, ale deteguje aj atmosférické aerosóly. Keďže je táto práca zameraná na UV oblasť, budú použité satelitné merania pre dve vlnové dĺžky v tejto oblasti, a to 342,5 nm a 388 nm. Údaje sú k dispozícii s priestorovým rozlíšením 0,25° (to zodpovedá štvorcu s rozmermi cca 28x28 km).^{[10][11]}

2.2. Opis lokality merania

Prístroj Brewerov ozónový spektrofotometer je umiestnený na streche budovy Aerologického a radiačného centra SHMÚ v Gánovciach pri Poprade. Jeho súradnice sú $49,03^\circ$ s. z. š a $20,32^\circ$ v. z. d. a nadmorská výška je 706 m. n. m. Merania poskytujú informácie o atmosférických aerosóloch "bodovo" nad daným miestom. V prípade údajov zo satelitu už nie je možné hovoriť o bodovej informácii, keďže celková plocha, z ktorej pochádza, má takmer 800 km^2 . Tu preto pôjde skôr o mikro-regionálny pohľad, pri ktorom už môže dochádzať k strate niektorých lokálnych špecifik.

Obsah aerosólov v ovzduší či už celkové množstvo alebo aj druhové zloženie determinujú na jednej strane lokálne zdroje a na strane druhej atmosférické prúdenie, ktoré dokáže určitú vzduchovú hmotu spolu s aerosólmi premiestniť aj o niekoľko tisíc kilometrov.

Vo veľmi ojedinelých prípadoch tu môže ísť napríklad aj o transport saharského prachu alebo sopečného popola z Islandu. Medzi významnejšie lokálne zdroje v oblasti Gánovce patria produkty spaľovania dreva a uhlia v okolitých obciach (najmä v chladnom polroku), ďalším významným zdrojom je aj poľnohospodárstvo, keďže v tesnej blízkosti stanice sú rozsiahle, poľnohospodársky obrábané plochy. Presnejšie, ide najmä o odvievanie holej suchej pôdy alebo aj rastlinných produktov vetrom, keďže lokalita je pomerne veterná. Aj blízkosť mesta Poprad (cca 1,5 km) s asi 53 000 obyvateľmi a rôznymi priemyselnými aktivitami zohráva svoju úlohu.

2.3. Kontrola kvality údajov

Kľúčovou záležitosťou pri určovaní optických vlastností atmosférických aerosólov je z nameraných údajov odstrániť tie, ktoré sú „kontaminované“ oblačnosťou. V anglickom jazyku je pre túto činnosť zaužívané slovné spojenie „cloud screening“. Brewerov ozónový spektrofotometer je počas prevádzky väčšinou v manuálnom režime a takmer všetky merania priameho slnečného žiarenia zadáva operátor. Je stanovené zadávať ich každú polhodinu. Pokiaľ to ale podmienky nedovoľujú, snahou je vystihnúť vhodný okamih, keď je priame slnečné žiarenie nezaclonené alebo čím menej ovplyvnené oblačnosťou. Občas sa takéto merania uskutočnia aj cez tenkú homogénnu oblačnosť, pretože princíp stanovenia množstva celkového ozónu to umožňuje a prístroj je primárne určený pre túto činnosť. Z tohto dôvodu je potrebné veľké množstvo nameraných údajov za použitia „cloud screeningu“ odstrániť. Tento proces bol vykonaný postupnosťou jednotlivých krokov nasledovne:

a) Meranie priameho slnečného žiarenia (DS – príkaz zadávaný operátorom) sa vykonáva iba pri faktore optickej hmoty menšom ako 4 a trvá približne 2,5 minúty. Za tento čas sa intenzita slnečného žiarenia pre každú z piatich vlnových dĺžok zmeria tiež päťkrát. Ak došlo v priebehu merania k výraznejšej zmene intenzity slnečného žiarenia v dôsledku oblačnosti, meranie nie je

akceptované na základe týchto dvoch kritérií: po prvé: sú odstránené všetky DS merania, ktoré vykazujú zvýšenú variabilitu intenzity slnečného žiarenia, čo sa následne prejaví pri výpočte celkového množstva ozónu. Odstránené sú tie DS merania, u ktorých štandardná odchýlka pre celkový ozón je rovná alebo presahuje 2,5 DU.

Po druhé: sú odstránené všetky merania, u ktorých štandardná odchýlka AOD pre aspoň jednu vlnovú dĺžku je rovná alebo presahuje 0,025. Ako už bolo vyššie spomenuté, posledné dve kritériá je možné vykonať vďaka tomu, že jedno DS merania pozostáva v skutočnosti z piatich meraní priameho slnečného žiarenia. Preto máme k dispozícii pre každú vlnovú dĺžku 5 hodnôt optickej hrúbky, pričom výsledná hodnota je daná ich priemerom, pokiaľ sú splnené obidve kritériá.

b) Všetky hodnoty, ktoré prešli výberom a) sú v tejto časti ďalej overované. Od začiatku prevádzky prístroja má jeho operátor za úlohu komentovať (väčšinou zaužívaný číselný kód) aktuálny stav na oblohe. Pri každej zmene stavu zadá nový komentár. Pomocou tohto komentáru boli odstránené tie DS merania, ktoré nespĺňujú kritérium „čistého Slnka“ („čisté Slnko“ - slnečný kotúč nie je zaclonený oblačnosťou) a neboli vzaté do úvahy aj merania s dymnom.

c) Aj po aplikácii kritérií v častiach a) a b) sa našli hodnoty optickej hrúbky, ktoré boli podozrivo vysoké. Z tohto dôvodu bolo potrebné stanoviť limitnú hodnotu optickej hrúbky aerosólov, ktorá ešte môže byť akceptovaná. Napríklad v práci (De Bock et al., 2010) ^[5] sú vzaté do úvahy iba hodnoty AOD, ktoré sú menšie ako 2. V našej práci sme sa rozhodli použiť ešte prísnejšie kritérium. Maximálna hodnota pre individuálne DS meranie nesmela dosiahnuť a prekročiť 1,5. Toto kritérium bolo aplikované aj pre satelitné údaje.

Iba tá optická hrúbka aerosólov z individuálnych DS meraní, ktorá prešla vyššie popísaným sitom bola následne využitá pri výslednej analýze údajov.

2.4. Výpočet vybraných optických vlastností

Všetky charakteristiky získané z Brewerovho ozónového spektrofotometra sú vypočítané pre obdobie od 14.6.2003 do 31.8.2015. Dôvod, prečo sme nepoužili aj staršie merania, počnúc od roku 1993, je nasledovný: pre výpočet optickej hrúbky aerosólov je nevyhnutné poznať tzv. extraterestriálne konštanty pre každú vlnovú dĺžku zvlášť. Dané konštanty sú prístrojovo závislé a určujú sa pri kalibrácii prístroja raz za dva roky, ale až od roku 2003. Samotný výpočet optickej hrúbky bol vykonaný pomocou softvéru Brewer Spectrophotometer Aerosol Optical Depth Calculator - O3Baod v. 5.0 by Martin Stanek. Teoretický základ pre tento softvér tvorí práca (Marenco et al., 2002) ^[6]. Satelitné údaje sú k dispozícii od 1.10.2004 do 31.8.2015 s denným rozlíšením.

2.4.1. Výpočet optickej hrúbky aerosólov (AOD)

Pri pozemných meraniach (pri satelitných je to podobné, ale zložitejšie) je potrebné aplikovať Beerov-Bouguerov-Lambertovho zákon. Pre náš prípad môžeme písať:

$$S_{\lambda} = S_{0,\lambda} e^{-\tau_{\lambda} m_r} = S_{0,\lambda} e^{-\tau_{\lambda,O_3} \mu_{O_3} - \tau_{\lambda,r} \mu_r - \tau_{\lambda,a} \mu_a - \tau_{\lambda,SO_2} \mu_{SO_2}}$$

$$S_{\lambda} = S_{0,\lambda} e^{-\mu_{O_3} \alpha(\lambda,T) \Omega_{O_3} - \frac{\mu_r \beta(\lambda) P}{P_{std}} - \tau_{\lambda,a} \mu_a - \mu_{SO_2} \gamma(\lambda,T) \Omega_{SO_2}}$$

- S_{λ} , $S_{0,\lambda}$ je intenzita slnečného žiarenia pre vybranú vlnovú dĺžku vyjadrená počtom fotónov za jednotku času na zemskom povrchu, resp. nad atmosférou (extraterestriálna konštanta)
- τ_{λ,O_3} , $\tau_{\lambda,r}$, $\tau_{\lambda,a}$, τ_{λ,SO_2} je optická hrúbka O_3 , resp. Rayleightovho rozptylu, aerosólov a SO_2
- μ_{O_3} je relatívna optická hmota ozónovej vrstvy vo výške 22 km na zemskom povrchu
- $\alpha(\lambda,T)$ je absorpčný koeficient pre ozón pre vlnovú dĺžku λ a teplotu T
- Ω_{O_3} je hrúbka celkového ozónu v Dobsonových jednotkách
- μ_r je relatívna optická hmota atmosféry pre Rayleightov rozptyl (tenkej vrstvy vo výške 5 km)
- $\beta(\lambda)$ je normalizovaná (pre štandardný tlak vzduchu a vertikálny stĺpec) optická hrúbka pre Rayleightov rozptyl
- P je tlak v mieste pozorovania (používa sa väčšinou jeho dlhodobý priemer)
- P_{std} je štandardný atmosférický tlak (101 325 Pa)
- μ_a je relatívna optická hmota aerosólov vzhľadom na zemský povrch
- μ_{SO_2} je relatívna optická hmota pre SO_2 , (niekedy totožná s hodnotou pre ozón)
- $\gamma(\lambda,T)$ je spektrálny absorpčný koeficient pre SO_2
- Ω_{SO_2} je hrúbka celkového SO_2 v Dobsonových jednotkách

Príspevok SO_2 sa v mnohých prípadoch zanedbáva a vtedy sa rovná nule. Použitý softvér ho tiež neberie do úvahy. Okrem zjednodušenia v podobe zanedbania príspevku SO_2 je zjednodušené aj používanie relatívnej optickej hmoty atmosféry pre jednotlivé príspevky, a to tak, že sa používa jednotná hodnota $\mu = 1/\cos \vartheta$, kde ϑ je zdanlivý zenitový uhol Slnka na oblohe. Naopak, zanedbáva sa fakt, že extraterestriálna konštanta sa v priebehu roka okolo svojej strednej hodnoty mení vzhľadom na vzdialenosť Zeme od Slnka. Hľadanú hodnotu AOD získame z vyššie uvedenej rovnice iba za predpokladu poznania všetkých spomenutých (zanedbaných) členov. Vypočítané hodnoty AOD sú v práci porovnané aj s hodnotami optickej hrúbky ozónu. Výpočet je zrejmy z predchádzajúcich rovníc. Absorpčný koeficient pre ozón $\alpha(\lambda,T)$ bol získaný na základe meraní „University of Bremen“. [12]

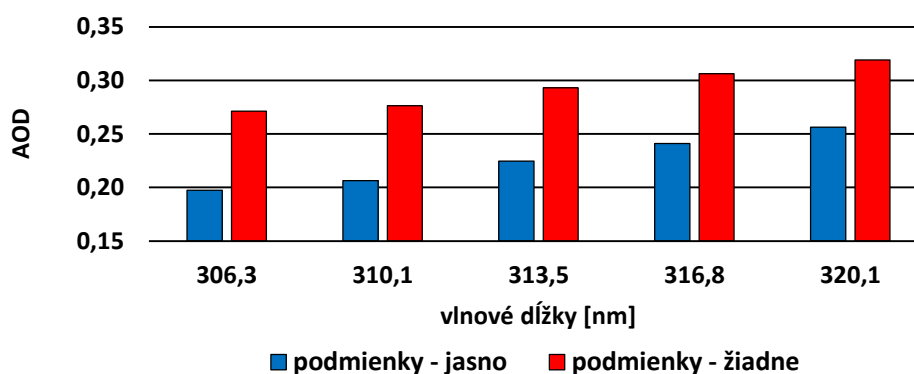
Pri výpočte jednotlivých charakteristík sme postupovali nasledovne: denné priemery AOD sú vypočítané ako aritmetický priemer všetkých hodnôt daného dňa (z minimálne jednej hodnoty). Mesačné priemery sú počítané ako aritmetický priemer tých dní v danom mesiaci, pre ktoré je k dispozícii hodnota AOD. Ročné priemery sú počítané ako vážený aritmetický priemer z jednotlivých mesačných hodnôt. V prípade jasnej oblohy a satelitných meraní je ročný priemer vypočítaný ako priemer všetkých dní v roku, pretože v niektorých mesiacoch bol nulový počet meraní. Horný extrém priemernej variability je daný ako súčet priemeru z mesačných priemerov daného mesiaca v celom rade pozorovaní a priemernej smerodajnej odchýlky, dolný extrém ako rozdiel.

2.4.2. Albedo jednoduchého rozptylu

Táto optická vlastnosť atmosférických aerosólov je definovaná ako pomer rozptýlenej energie k celkovému útlmu energie priameho slnečného žiarenia danej vlnovej dĺžky. Celkový útlm je sumou rozptýlenej a pohltenej energie aerosólmi.

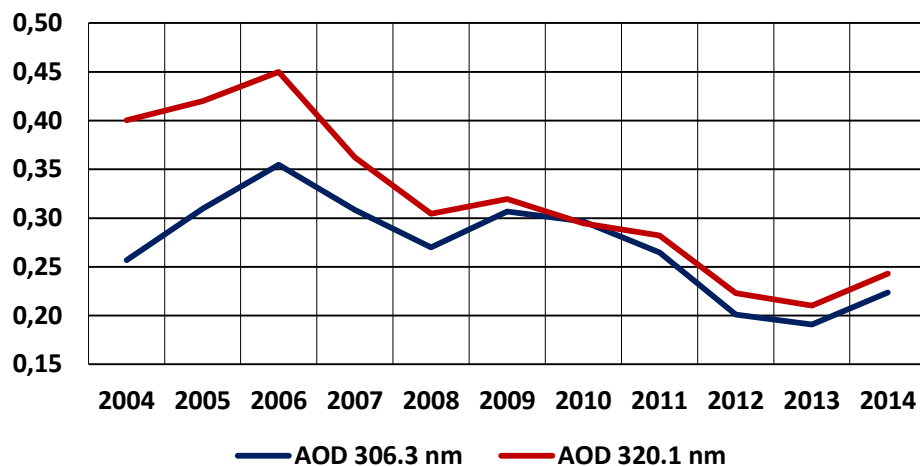
3. Výsledky a diskusia

Prvý obrázok nám znázorňuje porovnanie AOD pre všetkých päť vlnových dĺžok vo všeobecnom prípade a v prípade jasnej oblohy. Vyčlenenie podmienok jasnej oblohy bolo možné vďaka manuálnej obsluhu prístroja a komentovaniu stavu oblohy. Graf znázorňuje viacročné priemery. Je možné si všimnúť priamo úmernú závislosť AOD od vlnovej dĺžky. Rovnakú závislosť prezentuje aj práca (Abel et al., 2004) ^[7] na základe meraní v Brazílii. V minulosti pre stanicu Poprad-Gánovce spracovala AOD (Pribullová., 2002) ^[8] pre obdobie 1993-2001. V jej práci podobnú závislosť nenájdeme. Maximum AOD uvádza pre vlnovú dĺžku 310,1 nm, minimum je zhodné s našimi výsledkami a prislúcha pre 306,3 nm. V porovnávanej práci bola ale použitá odlišná metodika výpočtu a tiež nebol zarátaný vplyv ND filtrov.



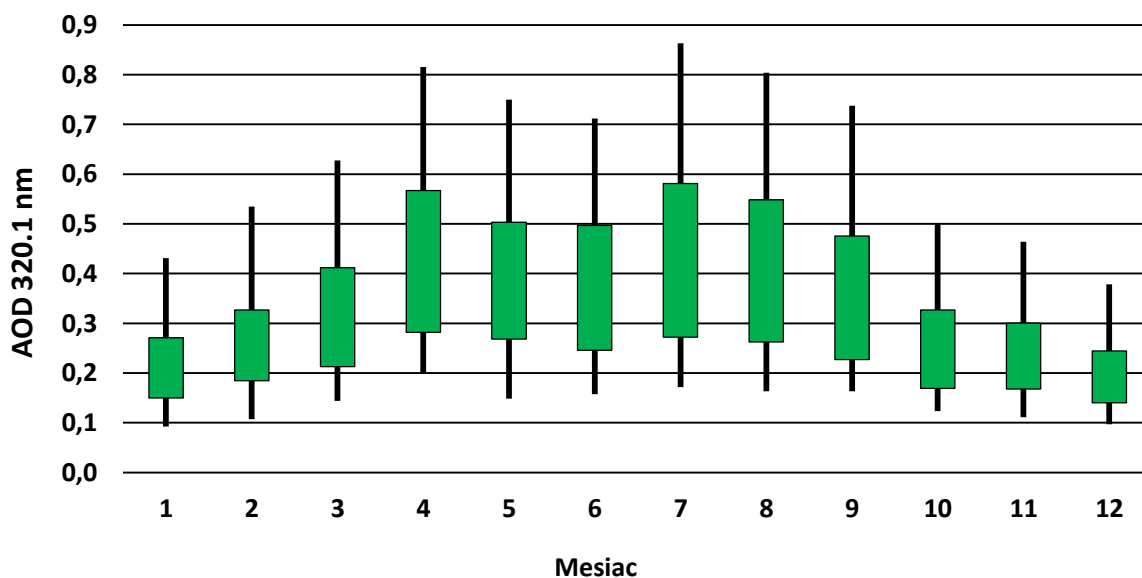
Obr. 1. Priemerné AOD pre päťicu vlnových dĺžok za podmienok jasnej oblohy a bez špecifikácie podmienok v období 2004 - 2014

Nasledujúci graf znázorňuje vývoj priemerných ročných hodnôt AOD pre dvojicu vlnových dĺžok. Evidentne došlo k poklesu AOD a poklesol aj rozdiel medzi vybranou dvojicou vlnových dĺžok. Príčiny týchto javov sú zatiaľ neznáme.



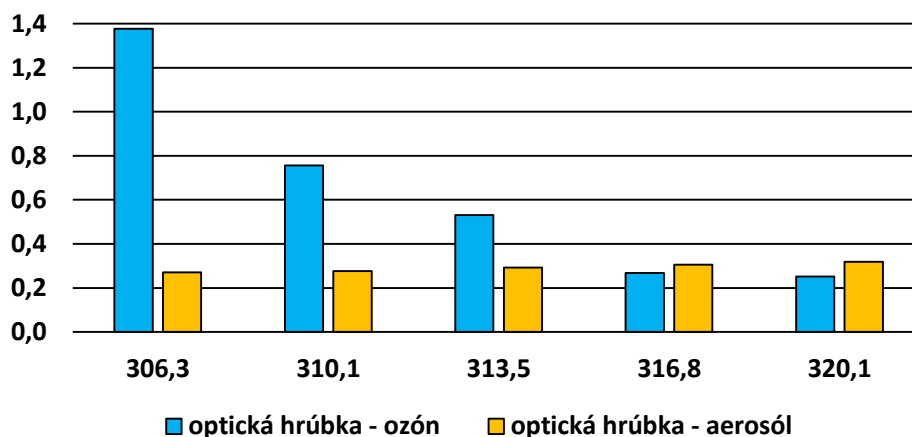
Obr. 2. Priemerné ročné AOD v období 2004 – 2014

Obr. 3. ilustruje ročný chod vybraných charakteristík pre vlnovú dĺžku 320,1 nm. Naše výsledky sú blízke zisteniam v práci (Pribullová., 2002). Vidíme zhodu vo výskyte ročného minima v chladnom polroku, tiež pozorujeme dvojrýcholový ročný chod, ale v našom prípade je druhý vrchol – absolútne maximum v mesiaci júl, v porovnávanej práci je to v mesiaci august. Aj v prípade hodnôt mesačných priemerov vidíme relatívne blízku podobnosť. Pozorujeme aj zhodu výskytu ročného maxima variability pre mesiac júl.



Obr. 3. Priemerné mesačné maximum a minimum (čiary), priemerná variabilita (obdĺžniky) a priemer (stred obdĺžnika) pre vlnovú dĺžku 320.1nm v období júl 2003 - august 2015

Z nasledujúceho grafu vyplýva dominancia útlmu ozónom pre kratšie vlnové dĺžky, pričom v prípade dvojice najdlhších dochádza naopak, k slabej dominancii aerosólov.



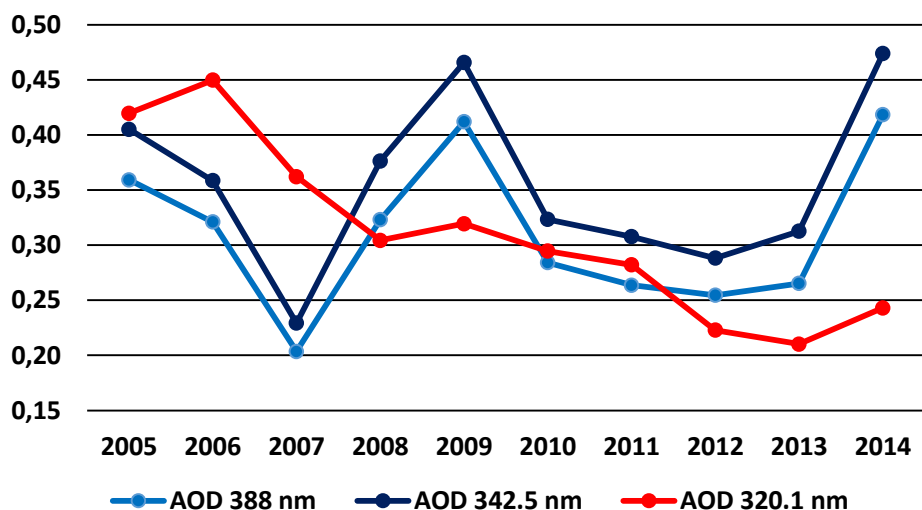
Obr. 4. Porovnanie dlhodobých ročných priemerov optickej hrúbky pre ozón a aerosóly v období 2004 – 2014

V nasledujúcej tabuľke je zosumarizovaný priemerný počet dní s údajmi po aplikácii „cloud screeningu“. V prípade ročného chodu je evidentný úbytok meraní v zimných mesiacoch, čo je spôsobené hlavne krátkym trvaním dňa a častými inverziami spojenými s nízkou oblačnosťou. Z tabuľky je ďalej evidentný nízky počet dostupných dní pre satelitné merania. V porovnaní s pozemnými je ich v ročnom priemere až 11-krát menej. Nízky počet satelitných údajov je v dôsledku, jednak polohy miesta v miernych šírkach a v blízkosti hôr, no svoju úlohu zohráva aj to, že satelit má každý deň iba jednu príležitosť na meranie.

Tab. 1. Priemerný počet dní s určenou AOD pre rok a mesiace po aplikácii „cloud screeningu“

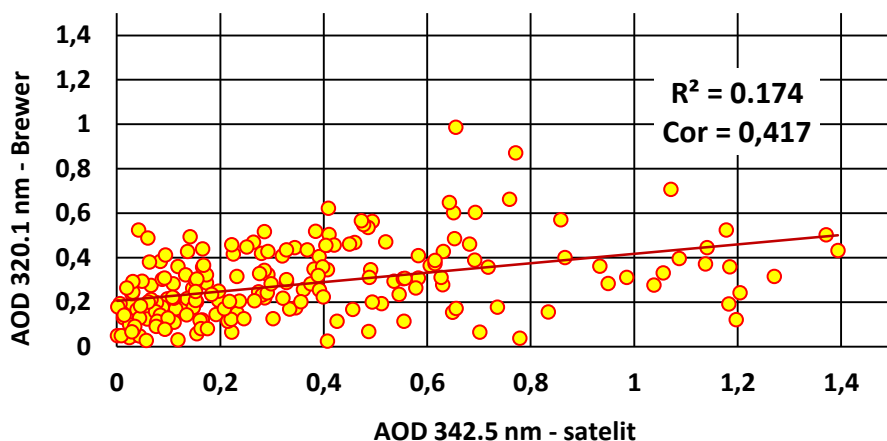
	Rok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Brewer	210.5	13.3	12.8	17.9	19.9	17.5	20.1	23.1	22.6	20.1	17.9	14.6	12.1
Brewer - jasno	16.1	1.7	1.4	3.1	2.3	0.3	0.4	1.2	1.2	1.7	2.0	0.9	0.5
Satelit	18.5	0.2	0.2	1.3	1.9	1.5	1.0	1.6	2.3	4.1	3.9	0.7	0.4

Piaty obrázok znázorňuje porovnanie satelitných a pozemných meraní. V prvom prípade je evidentná výrazná medziročná variabilita s dvoma minimami. V druhom prípade je pozorovaný významný pokles. Za zmienku určite stojí aj fakt, že pre dvojicu vlnových dĺžok získaných zo satelitu platí nepriama úmera veľkosti vlnovej dĺžky a AOD. Ako sme mohli vidieť vyššie v prípade pozemných meraní je to presne naopak a pozorujeme priamu úmeru.



Obr. 5. Priemerné ročné AOD pre 388 nm a 342.5 nm zo satelitu a pre 320.1 nm z Brewerovho spektrofotometra v období 2005 – 2014

Vzájomná korelácia pre satelitné a pozemné merania je ilustrovaná na poslednom obrázku č. 6. Za celé sledované obdobie bolo možné porovnať 201 dní. Z porovnaní vyplýva slabá vzájomná korelácia. Pravdepodobne je to spôsobené širokým satelitným záberom a aj tým, že denný priemer v prípade satelitných meraní je tvorený stále iba jednou hodnotou, ktorá nemusí vždy správne reprezentovať podmienky určitého dňa.



Obr. 6. Porovnanie denných priemerov AOD pre 342.5 nm zo satelitu a pre 320.1 nm z Brewerovho spektrofotometra v období október 2004 – august 2015

Posledná tabuľka nám znázorňuje vybrané charakteristiky albeda jednoduchého rozptylu pre dvojicu vlnových dĺžok (satelitné merania). Rozdiel je minimálny a môžeme konštatovať, že aerosóly v našej oblasti v dlhodobom priemere pohlcujú približne iba 3 % energie priameho slnečného žiarenia pre danú dvojicu vlnových dĺžok.

Tab. 2. Charakteristiky albeda jednoduchého rozptylu zo satelitu: október 2004 – august 2015

Vlnová dĺžka	Absolútne maximum	Dlhodobý ročný priemer	Absolútne minimum
342.5 nm	0.971	0.969	0.963
388 nm	0.971	0.968	0.960

4. Záver

Výsledky predloženej práce vo viacerých prípadoch priniesli otázky na ktoré zatiaľ nepoznáme jasnú odpoveď. Týka sa to najmä výrazného poklesu AOD za sledované obdobie 2004 – 2014. Rovnako nevysvetliteľný je zatiaľ aj pokles rozdielu AOD medzi najkratšou a najdlhšou vlnovou dĺžkou. Použitá metodika výpočtu vyžadovala znalosť množstva parametrov, či už prístrojových alebo aj prírodných, preto je možné, že mohla nastať chyba pri určení niektorého z nich. Vďaka novým prístrojom, ktoré boli koncom roka 2014 nainštalované na pracovisku Poprad-Gánovce bude možné priamo porovnať merania dvoch Brewerových spektrofotometrov, z čoho pramení potenciál ďalšieho vylepšovania meraní, metodiky výpočtu a nakoniec aj výsledkov. Použitá metodika je jedna z kľúčových vecí, ktoré vplývajú na presnosť výsledku. Preto máme v pláne porovnať viaceré z nich a nájsť optimálnu. Rovnako sa plánujú pomocou tzv. „langley plot“ metódy dopočítať neznáme extraterestriálne konštanty pred rokom 2003 a celý rad výrazne obohatiť o staršie merania od roku 1993.

Literatúra

- [1] World Meteorological Organization, 2008, updated in 2010. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8. Geneva, Switzerland. 716 pp. ISBN 978-92-63-10008-5
- [2] Marengo, F., A. di Sarra, and J. De Luisi (2002), Methodology for determining aerosol optical depth from Brewer 300– 320 nm ozone measurements, *Appl. Opt.*, 41, 1805– 1814.
- [3] Brewer MKIV Spectrophotometer Operator’s Manual, 1999. Sci-Tec Saskatoon, Canada
- [4] Mišaga, O. 2012. Spektroskopická metóda merania stratosférického ozónu (Meteorológia a klimatológia vo vyučovaní III. Slnko a vzduch Zborník prednášok zo seminára pre učiteľov základných a stredných škôl, ktorý sa konal 13. - 16. júna 2012 v kongresovom centre SAV ACADEMIA). Bratislava: Geofyzikálny ústav SAV 2012. 134 s. ISBN 978- 80 -85754-25-4
- [5] De Bock, V., De Backer, H., Mangold, A., and Delcloo, A.: Aerosol Optical Depth measurements at 340 nm with a Brewer spectrophotometer and comparison with Cimel sunphotometer observations at Uccle, Belgium, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1577-1588, doi:10.5194/amt-3-1577-2010, 2010.
- [6] Marengo, F., A. di Sarra, and J. De Luisi (2002), Methodology for determining aerosol optical depth from Brewer 300– 320 nm ozone measurements, *Appl. Opt.*, 41, 1805– 1814.
- [7] Abel A. Silva and Volker W. J. H. Kirchhoff, "Aerosol optical thickness from Brewer spectrophotometers and an investigation into the stray-light effect," *Appl. Opt.* 43, 2484-2489 (2004)
- [8] Pribullová A., "Spectral UV aerosol optical thickness determined from the Poprad-Gánovce Brewer spectrophotometer observations," *Contributions to Geophysics and Geodesy*, Vol. 32/3, (2002)
- [9] http://www.iac.ethz.ch/edu/courses/bachelor/vertiefung/atmospheric_physics/Script-2014/Script-aerosols-revised.pdf
- [10] <http://aura.gsfc.nasa.gov/scinst/omi.html>

[11] <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

[12] <http://www.iup.physik.uni-bremen.de/gruppen/molspec/databases/index.html>