

Grzegorz KARASIŃSKI

# SPEKTROFOTOMERIA SŁOŃCA I NIEBA W BADANIACH ATMOSFERY NA PRZYKŁADZIE INSTRUMENTU CE-318

**STRESZCZENIE** *W pracy przedstawiono ogólną budowę i zasadę działania spektrofotometru CE-318, jednego z najbardziej rozpowszechnionych przyrządów optycznych wykorzystywanych w baniach atmosfery. Zaprezentowano ideę pomiarów optycznych własności atmosfery i sposób ich realizacji urządzeniem CE-318. Prezentacja zalet, wad oraz oczekiwań związanych z najnowszą wersją spektrofotometru ma na celu inspirację rodzimych producentów do konstrukcji podobnych urządzeń.*

**Słowa kluczowe:** *spektrofotometr słoneczny (sunfotometr), aerozolowa grubość optyczna*

## 1. WSTĘP

---

Atmosfera Ziemi ze względu na swoją złożoność i zmienność czasową jest trudnym obiektem badań. Jednocześnie stan atmosfery, czyli aktualna pogoda, ma duże znaczenie dla codziennego życia ludzi. Precyzyjne przewidywanie pogody oraz wpływ działalności człowieka na zmiany klimatyczne jest głównym tematem badań nad naszą planetą.

---

**Grzegorz KARASIŃSKI**  
grzegorz.karasinski@imgw.pl

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej  
Ośrodek Aerologii w Legionowie

Obecnie metody optyczne wiodą prym w pomiarach atmosferycznych. W badaniach naziemnych jednym z podstawowych pomiarów optycznych jest ocena spektralnej przezroczystości powietrza. Z tej informacji można uzyskać wiedzę o koncentracji gazów cieplarnianych takich jak: O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> oraz pary wodnej, jak również o aerozolu – w szczególności rozkładzie wielkości cząstek aerozolu. W artykule zostaną omówione cele i metody ich osiągnięcia w spektrofotometrii Słońca i nieba.

## 2. BUDOWA I DZIAŁANIE SPEKTROFOTOMETRU CE-318

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych przyrządów optycznych wykorzystywanych w badaniach atmosfery jest spektrofotometr CE-318. Jest to automatyczny przyrząd przystosowany do pracy w zmiennych i trudnych dla urządzeń optycznych warunkach atmosferycznych. Z tego względu stał się standardowym urządzeniem pomiarowym ogólnoswiatowej sieci AERONET (AErozol RObotnic NETwork), w skład której wchodzi przeszło 100 spektrofotometrów rozmieszczonych na całym świecie. Ponieważ spektrofotometr CE-318 jest wykorzystywany do pomiarów natężenia światła słonecznego, nazywany jest powszechnie sunfotometrem.

Głowica pomiarowa przyrządu wyposażona jest w dwa detektory światła. Są to fotodiody firmy Hamamatsu: krzemowa (model S1336) dla pomiarów w zakresie widzialnym, bliskiego ultrafioletu i bliskiej podczerwieni oraz InGaAs (model G8421) dla kanału 1640 nm.

**TABELA 1**

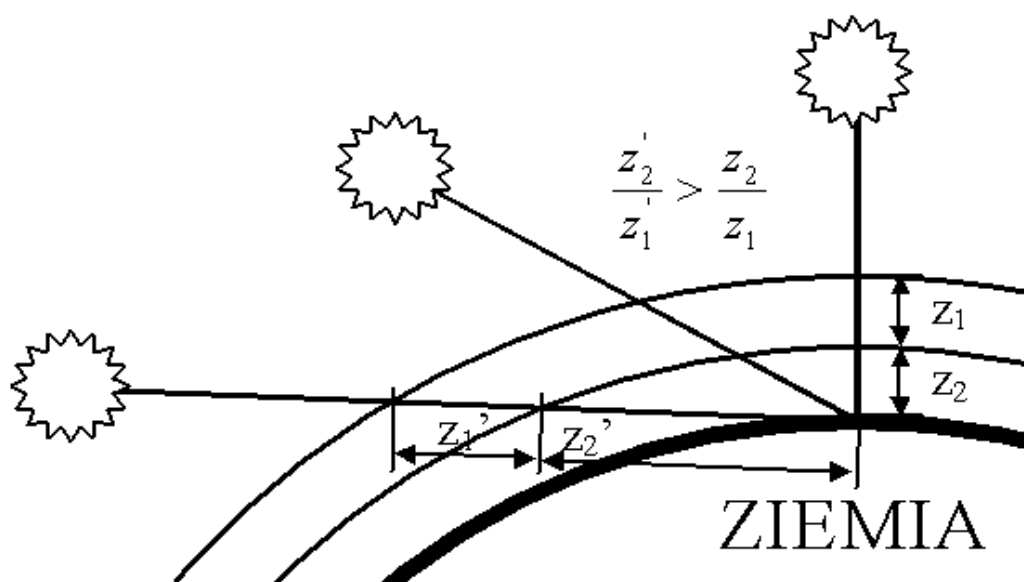
Filtry interferencyjne sunfotometru CE-318 ośrodka aerologii

Kanał spektralny [nm]	Centralna dł. fali [nm]	FWHM <sup>*)</sup> [nm]
1640	1641.6	23.9
1020	1021.9	8.9
940	937.4	10.1
870	869.0	10.3
670	674.3	9.2
500	501.0	11.4
440	439.7	11.6
380	379.0	2.4
340	340.3	2.2

<sup>\*)</sup> FWHM – Full Width at Half Maximum.

Pomiarów spektralnych dokonuje się poprzez zmianę pozycji 9 filtrów interferencyjnych umieszczonych w obrotowym kole względem nieruchomych detektorów. Drugie podobne koło zawiera trzy polaryzatory oraz puste miejsce dla pomiarów bez polaryzacji. Osie polaryzacji polaryzatorów są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$ , co pozwala na określenie stopnia polaryzacji mierzonego promieniowania oraz wyznaczenie kierunku wyróżnionej osi polaryzacji padającego światła. Promieniowanie jest wprowadzane do układu przez dwa identyczne kolimatory o długości 25 cm ograniczające kąt widzenia spektrofotometru do  $1^\circ$ . W głowicy zamontowano czujnik temperatury umożliwiający kompensację temperaturową wskazań detektorów.

Głowica pomiarowa jest zamontowana na osi silnika krokowego pozwalającego na obrót w pełnym kącie zenitalnym. Całość umieszczona jest na osi drugiego silnika krokowego, prostopadłej względem osi pierwszego silnika, co pozwala na obrót w pełnym kącie azymutalnym. Dzięki takiemu układowi mechaniczemu głowica pomiarowa może zostać skierowana w każdym kierunku półsfery nieba, a w pozycji spoczynkowej pionowo w dół ku powierzchni Ziemi. Chroni to urządzenie przed zabrudzeniem okienek optycznych przez wodę z opadów atmosferycznych, kiedy pomiary nie są prowadzone. Do detekcji opadów służy prosty czujnik zawilgocenia.



**Rys. 1. Idea wyznaczania grubości warstwy granicznej atmosfery.** Dla różnych kątów zenitalnych Słońca zmienia się iloraz dróg optycznych w każdej z warstw.  $z_1$  i  $z_2$  drogi promieni słonecznych przy padaniu prostopadłym,  $z_1'$  i  $z_2'$  długości dróg dla kąta zenitalnego bliskiego  $90^\circ$

Dla zobrazowania ogólnej zasady działania sunfotometrów, niech posłuży prosty wyidealizowany przykład [6]. Na rysunku 1 założono występowanie w atmosferze dwóch horyzontalnie jednorodnych warstw o identycznej grubości, lecz o innej koncentracji aerozoli – różna przezroczystość powietrza. Widać, że im większy kąt padania promieni słonecznych, tym większa część całkowitej drogi światła znajduje się w niższej warstwie. Przy padaniu światła w kierunku prostopadłym do powierzchni Ziemi, droga promieniowania przez każdą z warstw jest jednakowa. Do wyznaczenia grubości każdej z warstw wystarczą dwa pomiary, przy dwóch kątach padania światła. Jest to dość typowa sytuacja, gdyż gros zanieczyszczeń i dużych cząstek aerozoli, znajduje się w przyziemnej, około dwukilometrowej warstwie atmosfery – warstwie granicznej. W zaprezentowany sposób można wyznaczyć jej aktualną grubość, co ma znaczenie np. w przewidywaniu zasięgu i prędkości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń.

### 3. GRUBOŚĆ OPTYCZNA ATMOSFERY

Spektrofotometr w badaniach atmosfery służy między innymi do wyznaczania grubości optycznej atmosfery. Jest to wielkość bezwymiarowa określająca ilościowo stopień spektralnej przezroczystości atmosfery. Wielkość ta opisuje stopień osłabienia światła słonecznego po przejściu przez całą atmosferę Ziemi, zgodnie ze wzorem Lamberta-Beera-Bouguera [5]

$$I(\lambda) = C(\lambda)I_0(\lambda) \exp[-\tau_r(\lambda)], \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali,  $C(\lambda)$  – stała aparaturowa,  $I_0$  – promieniowanie na szczycie atmosfery,  $I$  – promieniowanie mierzone,  $\tau_r$  – rzeczywista grubość optyczna.

W praktyce wykorzystuje się całkowitą unormowaną spektralną grubość optyczną  $\tau$ . Jest to unormowana grubość optyczna, gdyż odnosi się ona do kierunku prostopadłego do powierzchni Ziemi. Jest ona związana z rzeczywistą grubością optyczną  $\tau_r$  przez współczynnik  $m$  nazywany masą optyczną atmosfery.

$$\tau_r = m\tau \quad (2)$$

$$m \approx \frac{1}{\cos\theta} \quad (3)$$

gdzie  $\theta$  jest kątem zenitalnym Słońca [4]. W ten sposób pomiary z różnych pór dnia (różny kąt zenitalny Słońca) można ze sobą łatwo porównywać.

Całkowita unormowana spektralna grubość optyczna to wielkość bezwymiarowa. Mówi ona o całkowitym osłabieniu światła po przejściu najkrótszą drogą od szczytu atmosfery do powierzchni Ziemi. Uwzględnia ona straty na rozpraszanie na gazach atmosferycznych i aerozolu oraz absorpcję gazową (np. ozonu) i aerozoli.

Dane surowe sunfotometru zawierają liczbę całkowitą  $DC_n$ , proporcjonalną do natężenia światła padającego na powierzchnię światłoczułą detektora. Jej wartość jest związana z całkowitą grubością optyczną następująco:

$$DC_n = \frac{1}{d^2} DC_0 \exp[-m \tau] \quad (4)$$

gdzie:  $d$  jest odległością Słońce – Ziemia w chwili pomiaru wyrażoną w jednostkach astronomicznych,  $DC_0$  jest wartością, jaką zmierzyłby spektrofotometr na szczycie atmosfery, gdy dystans między Słońcem a Ziemią wynosi dokładnie 1 a.u. Współczynnik  $DC_0$  jest stałą kalibracyjną przyrządu. Przekształcając wzór (4) na całkowitą grubość optyczną atmosfery otrzymamy:

$$\tau = -\frac{1}{m} \ln \left[ d^2 \frac{DC_n}{DC_0} \right] \quad (5)$$

gdzie:  $d$  jest odległością Słońce-Ziemia w chwili pomiaru wyrażoną w jednostkach astronomicznych.

## 4. KALIBRACJA METODĄ LANGLEYA-BOUGUERA

---

Znajomość prawidłowej wartości stałej kalibracyjnej spektrofotometru jest konieczna do poprawnego obliczenia grubości optycznej atmosfery. W trakcie wieloletniego użytkowania spektrofotometrów CE-318 przez AERONET w zmiennych warunkach pogodowych, zaobserwowano postępującą degradację filtrów interferencyjnych urządzenia, objawiającą się zmiennością ich charakterystyk spektralnych [3].

Wypracowane procedury walidacyjne są przeprowadzane minimum raz na półrocze i w przypadku stwierdzenia istotnych zmian dokonuje się wymiany filtrów i kalibracji przyrządu lub tylko ponownej kalibracji. Jeden zestaw filtrów pracuje średnio kilka lat.

Sama kalibracja odbywa się w laboratorium poprzez pomiary natężenia światła z wykalibrowanego źródła lub współczynniki kalibracyjne wyznacza się metodą Langleya-Bouguera [7].

Kalibracja tą metodą jest możliwa w szczególnych warunkach pogodowych, przy których atmosfera podczas dnia jest w długich przedziałach czasu horyzontalnie jednorodna. Wówczas słuszne jest założenie, że grubość optyczna  $\tau$  w tym czasie nie ulega zmianie, a obserwowane zmiany sygnału wynikają z faktu, że promienie słoneczne przechodzą przez atmosferę pod różnym kątem. Wówczas można przyjąć, że badamy atmosferę w tych samych warunkach tylko przy zmianie geometrii transmisji promieniowania. Odpowiada to zmianie masy optycznej w równaniu (3). Logarytmując równanie (4) otrzymujemy:

$$\ln(DC_n) = \ln\left(\frac{1}{d^2} DC_0\right) - m\tau \quad (6)$$

co pozwala na wyznaczenie  $DC_0$  z regresji liniowej przy zmiennej  $m$ .

Dużym ograniczeniem na zaprezentowany powyżej sposób kalibracji są warunki atmosferyczne. Wymagana stabilność, przez około 2 godziny, horyzontalnej jednorodności atmosfery zdarza się rzadko na terenach nizinnych. Znacznie częściej jest to spotykane wysoko w górach ponad warstwą graniczną, gdzie koncentracja aerozoli jest zwykle bardzo mała.

## 5. POMIARY W KIERUNKU SŁOŃCA

Wykalibrowany sunfotometr pozwala mierzyć bezwzględne osłabienie światła słonecznego po przejściu przez atmosferę. Taki pomiar dostarcza informacji o optycznych własnościach atmosfery w wielu kanałach spektralnych. Całkowita grubość optyczna jest sumą strat związanych z absorpcją  $\tau_{ABS}(\lambda)$  i rozpraszaniem  $\tau_{SCAT}(\lambda)$  światła:

$$\tau(\lambda) = \tau_{ABS}(\lambda) + \tau_{SCAT}(\lambda), \quad (7)$$

Z kolei rozpraszanie światła można rozłożyć na rozpraszanie zachodzące na molekułach powietrza (rozpraszanie Rayleigha)  $\tau_{Ray}(\lambda)$  i cząstkach aerozolu  $\tau_{AER}(\lambda)$ .

$$\tau_{SCAT}(\lambda) = \tau_{AER}(\lambda) + \tau_{Ray}(\lambda), \quad (8)$$

Aerolową grubość optyczną atmosfery można wyznaczyć wykonując pomiary w obszarach widmowych wolnych od absorpcji i zmierzone osłabienie promieniowania przypisać stratom związanym z rozpraszaniem. Wielkość rozpraszania Rayleigha można wyliczyć ze wzoru [1]

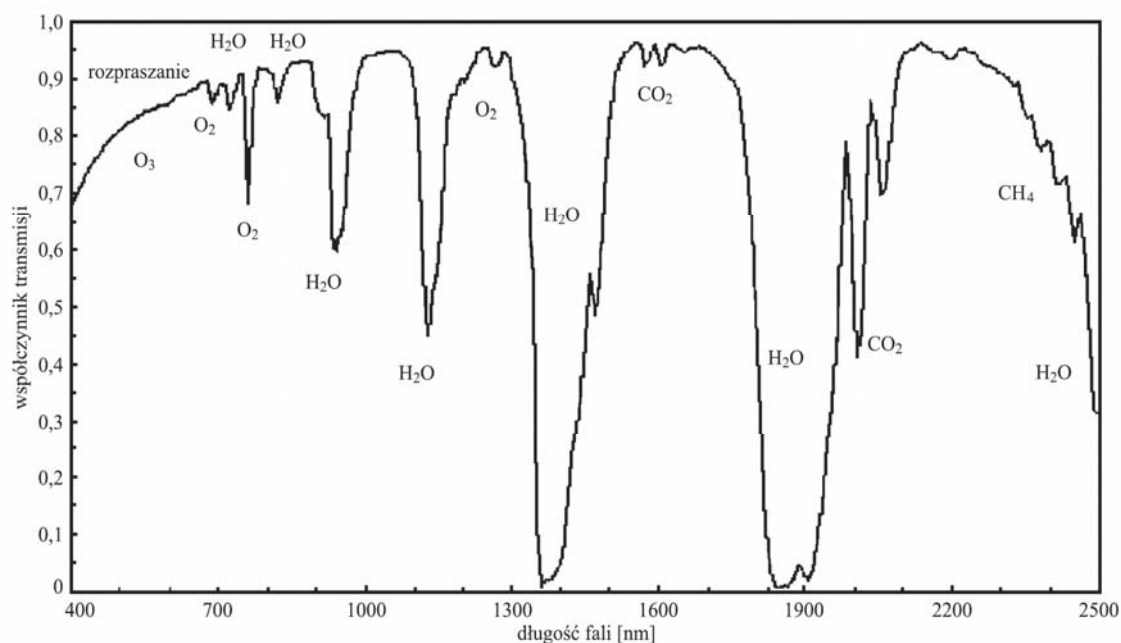
$$\tau_{Ray}(\lambda) = \frac{P}{p_0} A \cdot \lambda^{-4} (1 + B \cdot \lambda^{-2} + C \cdot \lambda^{-4}) \quad (9)$$

gdzie:  $A = 0,008569$ ;  $B = 0,0113$ ;  $C = 0,00013$ ;  $p$  – ciśnienie przy powierzchni Ziemi,  $p_0 = 1013,25$  hPa – ciśnienie odniesienia,  $\lambda$  – długość fali w  $\mu\text{m}$ .

Wielkość rozpraszania na cząstkach aerolu można opisać wzorem Ångströma

$$\tau_{AER}(\lambda) = \eta \cdot \lambda^{-\zeta} \quad (10)$$

gdzie:  $\zeta$  jest wykładnikiem Ångströma odnoszącym się do rozkładu wielkości cząstek aerolu – bliskim jedności i, gdy w udziale rozpraszania dominują cząstki dużo większe od długości fali światła, np. krople chmurowe,  $\eta$  jest współczynnikiem przezroczystości Ångströma, odpowiadającym aerolowej grubości optycznej dla długości fali  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ .



Rys. 2. Typowe widmo transmisji atmosfery

Wyznaczenie współczynników  $\eta$  i  $\zeta$  ze spektralnych pomiarów grubości optycznej, pozwala obliczyć aerolową grubość optyczną w szerokim zakresie spektralnym. W szczególności w kanałach ze znaczną absorpcją światła przez

ważne składniki atmosfery np. parę wodną i ozon. Znając wielkość przekroju czynnego na absorpcję, można wtedy określić całkowitą koncentrację wybranych substancji. Do wyznaczania zawartości pary wodnej w atmosferze, w sunfotometrze CE-318 służy kanał 940nm.

Podobnie kanały 340 i 380nm, które leżą w zakresie absorpcji ozonu. W tym przypadku pomiar koncentracji miał być dokładniejszy wykorzystując znaczną różnicę w przekroju czynnym między tymi kanałami. Niestety jest to możliwe tylko teoretycznie, gdyż kanały te leżą już na skraju pasma absorpcji ozonu i wkład  $\tau_{ABS}$  do całkowitej grubości optycznej jest mały w stosunku do strat związanych z silnym rozpraszaniem światła z tego zakresu spektralnego. Powoduje to zbyt duże błędy w obliczeniach koncentracji ozonu, która z kolei posiada swój niezaniebdywalny wkład do całkowitej grubości optycznej. Sieć AERONET koncentrację ozonu uzyskuje z badań satelitarnych przyrządem TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) [8].

## 6. POMIARY W KIERUNKU NIEBA

---

Osobnym typem pomiarów wykonywanych przez spektrofotometr CE-318 są pomiary irradacji [ $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$ ] nieba wraz ze stopniem polaryzacji. Są to pomiary kierunkowe realizowane w tylko 3 scenariuszach. Niestety w sunfotometrze CE-318 zestaw scenariuszy jest niemożliwy do rozbudowania o własne projekty użytkownika, co drastycznie ogranicza jego duże potencjalne możliwości. Dostępne scenariusze pomiarowe to:

Almucantar – w scenariuszu tym pomiary wykonuje się w płaszczyźnie horyzontalnej dla 76 kątów azymutalnych w odniesieniu do kąta azymutalnego Słońca, przy stałym kącie zenitalnym równym kątowi zenitalnemu Słońca w chwili pomiaru.

Principal Plane – pomiary wykonywane są w płaszczyźnie głównej, czyli płaszczyźnie prostopadłej do horyzontu przechodzącej przez pozycję Słońca w chwili pomiaru, dla 40 kątów w odniesieniu do kąta zenitalnego Słońca.

Polarized Principal Plane – pomiary również wykonywane w płaszczyźnie głównej, dla trzech osi polaryzacji dla stałych wartości kątów od  $+95^\circ$  do  $+265^\circ$  ze skokiem  $5^\circ$ , gdzie kąt  $180^\circ$  to zenit, a kąty zmniejszają się w stronę ku Słońcu.

W ten sposób jako uzupełnienie do aerozolowej grubości optycznej otrzymuje się funkcję fazową rozpraszania światła. Celem tego typu pomiarów jest zebranie informacji potrzebnych do wyznaczenia średniego rozkładu wielkości cząstek aerozolu w pionowej kolumnie powietrza.



Dysponując wynikami pomiarów całkowitej ekstynkcji w szerokim zakresie spektralnym można wyznaczyć rozkład wielkości cząstek aerozolu w pionowej kolumnie powietrza [2]. Jest to jednak średnia dla całej grubości atmosfery dla stożka, z którego zbiera światło sunfotometr

$$\tau_{AER}(\lambda) = \int_0^{z_{TOA}} \pi \int_0^R r^2 N(r, x, \lambda) Q^{Ext}(r, \lambda, \varphi) dr dx = z_{TOA} \pi \int_0^R r^2 \bar{N}(r, \lambda) Q^{Ext}(r, \lambda, \varphi) dr \quad (11)$$

gdzie:  $r$  jest promieniem cząstki,  $N(r, x, \lambda)$  – rozkładem wielkości cząstek aerozolu w funkcji odległości  $x$ ,  $z_{TOA}$  – grubość atmosfery, a wielkość  $Q^{Ext}(\lambda, r)$  określa efektywność ekstynkcji (sumy strat na absorpcję i rozpraszanie) światła o długości fali  $\lambda$  przez cząstkę o promieniu  $r$  w kierunku  $\varphi$  (w tym przypadku do przodu  $\varphi = 0$ ). Wzór jest słuszny tylko w tzw. przybliżeniu pojedynczego rozpraszania, czyli założeniu że światło ulega rozproszeniu co najwyżej jeden raz.

Wraz ze zbiorem danych rozproszenia światła zebranych dla wielu fragmentów nieba, dokonuje się symulacji transferu promieniowania przez atmosferę za pomocą modelu numerycznego dla różnych średnich rozkładów wielkości cząstek aerozolu. Celem jest znalezienie rozkładu wielkości cząstek aerozolu najlepiej pasującego do danych pomiarowych [2].

## 7. PODSUMOWANIE

---

Prezentowany fotometr słoneczny CE-318 posiada znaczny potencjał pomiarowy. Jego wszechstronność i duża liczba działających urządzeń zapewnia mu wiodącą pozycję wśród pasywnych przyrządów optycznych. Niemniej urządzenie to nie jest pozbawione wad. Oprócz już wymienionych są to:

- mała pojemność pamięci nieobejmująca danych jednego dnia pomiarowego;
- wolny transfer danych;
- wstrzymywanie transmisji danych w czasie opadów atmosferycznych;
- ograniczone możliwości wykorzystania istniejących scenariuszy pomiarowych;
- zablokowanie, w stosunku do starszych wersji, możliwości tworzenia własnych scenariuszy pomiarowych.

Listę tę można by jeszcze rozszerzyć, jednak w większości są to drobne niedociągnięcia możliwe do pokonania przez użytkownika. Zdecydowana przewaga zalet przy dużej niezawodności urządzenia pozwala na systematyczne i kompleksowe badanie atmosfery.

## LITERATURA

1. Bodhaine B. A., at al: On Rayleigh Optical Depth Calculations, J. Atmos. And Ocean. Tech., 16, str. 1854–1861, 1999.
2. Dubovik O., King M. D.: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, J. Geophys. Res., 105, str. 20673–20696, 2000.
3. Holben B.N., at al: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. Rem. Sens. Environ., 66, str. 1–16, 1998.
4. Shaw G., Sun Photometry, Bulletin of American Meteorological Society, 64, str. 4–10, 1983.
5. Kasten F., at al: A new table and approximation formula for the relative optical air mass. Theoretical and Applied Climatology, 14, str. 206–223, 1965.
6. Praca zbiorowa: Badania aerozolu miejskiego, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 2007.
7. [www.aeronet.gsfc.nasa.gov](http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov)

*Rękopis dostarczono dnia 04.04.2008 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. Jacek Sosnowski**

## THE SPECTROPHOTOMETRY OF THE SUN AND SKY IN THE ATMOSPHERE RESEARCH IN MEANS OF CE-318 DEVICE

Grzegorz KARASIŃSKI

### **ABSTRACT**

*In the paper there is presented general construction and how the spectrophotometer CE-318 works. It is one of the most common of optical devices used in the atmosphere research. The general way of optical measurement is presented in means of CE-318 device. Presentation of advantages, disadvantages and expectations from the newest version of the spectrophotometer has got for the purpose inspiration of home manufacturers for building similar devices.*