

## **Próba określenia wpływu zachmurzenia na natężenie promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B w Krakowie**

---

---

### **An attempt to determine the effect of cloud cover on the intensity of total radiation, UV-A and UV-B in Krakow**

*Żaneta Nguyen Huu*

Uniwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii  
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Klimatologii  
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków  
zaneta.nguyen\_huu@student.uj.edu.pl

*Zarys treści:* Zróżnicowana budowa i własności chmur powodują różne możliwości transmisji przez nie promieniowania elektromagnetycznego i energii słonecznej. W pracy przedstawiono wyniki analizy serii danych otrzymanych na podstawie obserwacji dokonanych w kilku wybranych dniach czerwca i lipca 2015 roku w Krakowie. Analiza dotyczyła zależności między wielkością, rodzajem zachmurzenia i stopniem pokrycia tarczy słonecznej chmurami a natężeniem promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B. Otrzymane wyniki sugerują, iż zachmurzenie najczęściej osłabia natężenie promieniowania, ale w pewnych przypadkach może powodować jego zwiększenie. Zachmurzenie jest przyczyną zwiększenia udziału promieniowania ultrafioletowego w promieniowaniu całkowitym.

*Słowa kluczowe:* promieniowanie całkowite, promieniowanie ultrafioletowe, chmury, zachmurzenie, Kraków

*Abstract:* Diverse structure and properties of clouds cause different possibilities of transmitting electromagnetic radiation and solar energy. The author has presented results of data analysis based on observations made during several selected days in June and July 2015 in Krakow. The analysis concerns the relation between cloudiness (its type and amount), the degree to which the Sun disc is covered by clouds, and the intensity of total solar irradiance (UV-A and UV-B). Results of the observations suggest that cloudiness generally diminishes solar radiation intensity, yet in some cases, it can also cause some increase of it. A cloud cover increases share of ultraviolet radiation in the total solar irradiance.

*Keywords:* total solar irradiance, ultraviolet radiation, clouds, cloudiness, Krakow

## Wstęp

Chmury pokrywające niebo różnią się budową, wysokością występowania oraz wodnością. Powoduje to zróżnicowanie możliwości transmisji przez nie promieniowania elektromagnetycznego i energii słonecznej. Na ogół wraz ze wzrostem grubości chmury maleją jej możliwości transmisyjne. Jednak ta zależność nie jest stała, lecz zmienna: w czasie i przestrzeni.

Interakcje pomiędzy chmurami i promieniowaniem zachodzą dwukierunkowo. Z jednej strony chmury odbijają część promieniowania słonecznego oraz promieniowania długofalowego skierowanego od Ziemi do atmosfery. Z drugiej strony, promieniowanie wpływa na aktywność chmur. Poetzsch-Heffter i in. (1995) zwrócili uwagę na trudność określenia wpływu chmur na budżet radiacyjny Ziemi wynikającą z dwóch przeciwstawnych procesów – albedo chmur (zwiększenie odbijania promieniowania słonecznego wraz ze wzrostem zachmurzenia) oraz efektu cieplarnianego (spadek ilości wyemitowanego promieniowania długofalowego wraz ze wzrostem zachmurzenia).

Wpływ chmur *Cirrus* na strumienie promieniowania zależy przede wszystkim od kształtu, wielkości i dystrybucji kryształów lodu wewnątrz chmury (Zhang i in. 1999) oraz zawartości lodu w tych chmurach (Fusina i in. 2007). Cienkie chmury *Cirrus* są niemal przezroczyste dla promieniowania krótkofalowego (Poetzsch-Heffter i in. 1995). Pomiary i obserwacje chmur *Stratus* prowadzone w Arktyce wykazują, że ich budowa i właściwości są na tyle zróżnicowane, iż próba ogólnego opisanie ich pod względem charakterystyk radiacyjnych lub mikrofizycznych wydaje się niemożliwa (Herman, Curry 1984). Z kolei znaczna grubość chmur

*Cumulonimbus* sprawia, że wywierają one dwojaki wpływ na promieniowanie. Po pierwsze powodują one osłabienie natężenia promieniowania docierającego do powierzchni. Drugi wpływ związany jest ze znacznym rozbudowaniem chmury w pionie i zwiększeniem natężenia promieniowania na powierzchni Ziemi przez rozpraszanie na pionowych powierzchniach chmury (Davies, Uboegbulam 1979). Znaczna grubość optyczna, różnica temperatury między powierzchnią Ziemi i wierzchołkiem chmury i zdolność emisyjna chmur *Cirrostratus* i *Cumulonimbus* powodują, że charakteryzują się one najwyższym albedo. Chmury *Nimbostratus* i *Stratus* o znacznej grubości optycznej również odznaczają się wysokim albedo (Poetzsch-Heffter i in. 1995).

Zwykle zakłada się, że chmury tego samego gatunku mają podobny wpływ na promieniowanie. Jednak Orving i Vowinckel (1962) zaobserwowali, iż zdolności transmisyjne poszczególnych rodzajów chmur zależą od pory roku i położenia geograficznego – różnice w zdolnościach transmisyjnych dla konkretnego gatunku chmur ułożonych nad różnymi obszarami są większe, niż różnice transmisyjne między różnymi typami chmur obserwowanych nad jedną stacją.

Dopływ promieniowania słonecznego jest kształtowany przez wiele czynników. Jednym z nich jest wielkość i rodzaj zachmurzenia. Czynniki astronomiczne mają wpływ zarówno przy niebie bezchmurnym, jak i zachmurzonym. Podobnie zanieczyszczenia i para wodna, które silnie redukują natężenie promieniowania zarówno całkowitego, jak i ultrafioletowego.

Analizując właściwości promieniowania, należy podkreślić zagadnienie wymuszania radiacyjnego i efektu aerozolowego. Raport *Climate Change* (2014) definiuje wymuszanie radiacyjne jako zmianę bilansu radiacyjnego w tropopauzie po dopuszczeniu do ponownego dostosowania się temperatury w stratosferze do równowagi radiacyjnej, przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennych wartości temperatury w troposferze i na powierzchni oraz innych zmiennych (takich jak zawartość pary wodnej czy zachmurzenie). Informuje ono o strumieniu promieniowania przy występowaniu pewnego czynnika i jego braku. W przypadku chmur oblicza się różnice strumienia promieniowania występującego przy zachmurzeniu i przy braku chmur. Średnie wymuszenie radiacyjne dla chmur to  $-15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jest to jednak wartość zmienna i zależna od rodzaju chmur oraz czynników astronomicznych (Kardaś 2013).

- Rozpatrując efekt aerozolowy, szczególną uwagę warto zwrócić na jego podział:
- bezpośredni efekt aerozolowy – rozpraszanie lub absorbowanie promieniowania przez aerozol zawarty w powietrzu skutkujące zmniejszeniem docierającej do powierzchni ziemi ilości promieniowania;
  - pośredni efekt aerozolowy – związany z wpływem aerozolu na powstawanie i właściwości chmur. Działalność człowieka powoduje zawieszenie w powietrzu liczby cząstek będących jądrami kondensacji dla kropelek chmurowych. Wzrost koncentracji jąder kondensacji przekłada się na zwiększenie albedo powstającej chmury w porównaniu z obszarem o niższych koncentracjach aerozolu (IPCC 2007). Wspomniany efekt aerozolowy ma duże znaczenie w przypadku obszarów miejskich, szczególnie tych narażonych na zwiększony udział zanieczyszczeń w powietrzu, czego doskonałym przykładem jest Kraków.

Promieniowanie ultrafioletowe o długości fali 100–400 nm pełni ważną rolę dla organizmu człowieka. Jego udział w spektrum promieniowania słonecznego jest niewielki i wynosi średnio (według różnych autorów) od zaledwie 1% (przy powierzchni Ziemi) (Błażejczyk 2004), 3,3–4,0% w Polsce (Podstawczyńska 2007) do 4,2% w Hiszpanii (Santos i in. 2010) czy 7,7% w Korei Południowej (Ogunjobi, Kim 2004). Udział sumy promieniowania UV-A i UV-B stanowi 7,915% całkowitego promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery (Podstawczyńska 2007 za Thekaekara 1971) i 4–5% przy powierzchni Ziemi (w Łodzi) (Podstawczyńska 2007). Jest to wynikiem modyfikującego wpływu stanu atmosfery i warunków astronomicznych. Promieniowanie UV-A posiada zdolność wnikania w tkanki organiczne. Wywołuje ono pigmentację skóry, ale także wpływa osłabiająco na wzrost roślin i niektóre gatunki bakterii i grzybów. Granicą pomiędzy UV-A i UV-B jest wartość 315 nm. Ta długość fali posiada nieznaczne już oddziaływanie na organizm ludzki. Promieniowanie UV-B jest zabójcze dla bakterii i grzybów oraz posiada zdolność wywoływania rumienia w ludzkiej skórze. Jest ono jednak konieczne do przekształcania 7-dehydrocholesterolu w witaminę D<sub>3</sub>. Granica pomiędzy zakresami UV-B i UV-C, równa 280 nm, jest związana z minimalną zdolnością wywoływania rumienia na skórze ludzkiej. Promieniowanie UV-C niszczy białko oraz chlorofil, przez co doprowadza do obumarcia komórek, do których dociera, a produkty powstałe po tym obumarciu są silnie toksyczne, zagrażając całemu organizmowi. Do powierzchni Ziemi dociera głównie promieniowanie UV-A i część UV-B, gdyż

ozon stratosferyczny skutecznie blokuje dopływ promieniowania UV-C (Kozuchowski 2012). Współczynnik transmisji całkowitego promieniowania słonecznego dla bezchmurnego nieba średnich szerokości geograficznych sięga 70–85%. Dla promieniowania ultrafioletowego współczynnik ten jest średnio o połowę niższy. Wynika to z większej ekstynkcji promieniowania UV niż fal dłuższych. Wartość współczynnika transmisji UV dla Łodzi (1997–2001) wyniosła 21,8% (Iqbal 1983; Podstawczyńska 2007).

Na ogół wzrost zachmurzenia powoduje spadek natężenia promieniowania ultrafioletowego. Santos i in. (2010) zauważyli, iż wpływ chmur na natężenie promieniowania UV jest nieistotny przy zachmurzeniu poniżej 3%. Ważną rolę pełni zaś wysokość Słońca – zachmurzenie ma najmniejszy wpływ przy niskim jego położeniu ( $10^\circ < h \leq 20^\circ$ ), chociaż dla pełnego zachmurzenia różnice między różnymi wysokościami Słońca są znacznie zmniejszone. Według Josefssona i Landeliusa (2000) wpływ chmur na promieniowanie UV jest mniejszy niż na promieniowanie całkowite. Potwierdzają oni również, że chmury piętra wysokiego są bardziej transparentne niż piętra średniego i niskiego, a chmury, z których powstaje opad, zatrzymują więcej promieniowania, ale według nich wysokość Słońca ma jednak mały wpływ na zależność chmury-promieniowanie UV. Wpływ chmur kłębiastych jest dwojaki: Estupian i in. (2006) stwierdzili, iż w warunkach pochmurnych mogą one osłabiać promieniowanie UV-B nawet o 99%, lecz w innych warunkach (opisanych wyżej) mogą wzmocnić je aż o 27%. Ze względu na aktywność biologiczną promieniowania ultrafioletowego kwestia docierania tego promieniowania do powierzchni Ziemi i jego wpływu na materię żywą stanowi ważne zagadnienie badawcze.

Celem autorki opracowania była próba określenia zależności między wartościami natężenia promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B a wielkością i rodzajem zachmurzenia oraz stopniem pokrycia tarczy słonecznej chmurami.

## **Materiały źródłowe**

Materiał źródłowy wykorzystany w opracowaniu stanowią wyniki obserwacji prowadzonych w dniach 30 czerwca oraz 1, 3, 4, 6, 13 i 15 lipca 2015 roku na stacji meteorologicznej Kraków „Ogród Botaniczny” (Stacja Naukowa Zakładu Klimatologii

Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego; 50°04'N, 19°58'E). Pomiary natężenia promieniowania całkowitego oraz w zakresie UV-A i UV-B wykonano za pomocą czujników Kipp&Zonen. Czujnikiem promieniowania całkowitego był Kipp&Zonen CMP6 Pyranometer, o zakresie widmowym równym 285–2800 nm. Czujnik promieniowania ultrafioletowego (Kipp&Zonen UVS-AB-T) cechował zaś zakres widmowy miernika wynosi 315–400 nm (UV-A) i 280–315 nm (UV-B). Dokładność czujnika (suma dobowa) wynosi >95%. Czujnik automatyczny rejestrował wartości średnie natężenia promieniowania z okresów 10-minutowych, wyrażone w  $W \cdot m^{-2}$ . Pomiary prowadzone na wysokości około 225 m n.p.m., na dachu budynku Collegium Śniadeckiego, w Ogrodzie Botanicznym UJ (fot. 1). Czujniki nie były przysłonięte wysokimi drzewami.

Obserwację zachmurzenia wokół tarczy słonecznej dokonywano przy użyciu filtra słonecznego (w postaci folii). Stopień zachmurzenia określano w oktantach, a stopień pokrycia tarczy słonecznej chmurami w procentach. Rodzaj i gatunek



Fot. 1. Collegium Śniadeckiego

Źródło: <http://www.muzeauczelniane.pl> (12.04.2018).

Photo 1. Collegium Śniadeckiego

Source: <http://www.muzeauczelniane.pl> (12.04.2018).

chmur zapisywano zgodnie z międzynarodową klasyfikacją (*International Cloud Atlas* 1975). Obserwacji dokonywano od godziny 07:00 UTC (09:00 CEST) do 12:00 UTC (14:00 CEST) w sposób ciągły z prowadzeniem zapisów w odstępach 10-minutowych lub krótszych. W dniach badań wysokość Słońca nad horyzontem wyniosła od  $37,42^\circ$  (07:00 UTC 15.07) do  $63,18^\circ$  (w południe słoneczne 30.06) (NOAA Solar Calculator).

## Maksymalne i minimalne natężenie promieniowania

Wstępna analiza natężenia promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B wykazuje, że wartości maksymalne i minimalne przypadają w tym samym czasie dla wszystkich rozważanych rodzajów promieniowania. Według Podstawczyńskiej (2007), sumy dzienne promieniowania całkowitego i ultrafioletowego wykazują zależność liniową o współczynniku korelacji równym 0,99, a zmienność promieniowania UV w ciągu roku można wyjaśnić w 98% zmiennością promieniowania w pełnym zakresie widma.

Analizując dni bezchmurne (3 i 4 lipca 2015), najwyższe wartości natężenia promieniowania (tab. 1) przypadły na godzinę 10:40 UTC (12:40 CEST) i były one bardzo zbliżone do siebie, osiągając wartości około  $915 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (promieniowanie całkowite), 60 i  $1,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (odpowiednio UV-A i UV-B). W przypadku dnia z całkowitym zachmurzeniem w czasie obserwacji (13 lipca 2015 r.) maksymalne natężenie promieniowania przypadło na godzinę 08:20 UTC (10:20 CEST). Tarcza słoneczna była w pełni zasłonięta chmurą *Stratocumulus stratiformis*, jednak jej miąższość była prawdopodobnie fragmentarycznie cieńsza i mniej gęsta, co wpłynęło zwiększyło możliwości transmisji promieniowania.

W pozostałe 4 dni (z częściowym zachmurzeniem) – 30.06, 01.07, 06.07, 15.07, wartości maksymalne promieniowania były wyższe niż w dni bezchmurne. W ciągu trzech spośród tych dni wartość promieniowania całkowitego przekroczyła  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Potwierdza to wcześniejsze badania, dowodzące, iż największe wartości promieniowania występują przy zachmurzeniu  $\geq 3\%$  najczęściej przy  $1\%$  (Matuszko, Soroka 2009) i w warunkach, w których tarcza słoneczna otoczona jest zachmurzeniem konwekcyjnym (Podstawczyńska 2007). Jak wynika z przeprowadzonych obserwacji zależność ta zachodzi również w przypadku, kiedy tarcza

Tab. 1. Zachmurzenie i najwyższe wartości natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) w Krakowie (w godz. 07:00–12:00 UTC)

Tab. 1. The cloudiness and the maximum value of radiation (total, UV-A and UV-B) in Krakow (07:00–12:00 UTC)

Data/ Date	Promieniowanie/ Solar irradiance			Czas/ Time UTC [CEST]	Wielkość zachmu- rzenia/ Cloud Cover	Rodzaj chmur/ Cloud type	Stan tarczy słonecznej/ Solar disc condition
	całkowite/ total	UV-A	UV-B				
	[W·m <sup>-2</sup> ]						
30.06	1027	64,2	1,4	10:20 (12:20)	6/5/4	Ci spi, Ac str, Cu fra, Cu med,	po między chmurami Cu med
01.07	1030	63,3	1,5	09:50 (11:50)	6/4/4	Ci unc, Ci fib, Ci spi, Cu fra, Cu med., Sc str	po między członami Sc str
03.07	917	62,8	1,6	10:40 (12:40)	0/0/0	–	niezasłonięta
04.07	912	57,7	1,5	10:40 (12:40)	0/0/0	–	niezasłonięta
06.07	1044	59,8	1,5	10:30 (12:30)	3/1/0	Ci spi, Ac str per	po między chmurami Ci spi i Ac str
13.07	481	37,2	0,7	08:20 (10:20)	8/8/8	Sc str	w pełni zasłonięta Sc str
15.07	970	63,8	1,4	11:00 (13:00)	6/6/6	Sc str, Cu med., Cu fra, Cu con	po między chmurami Cu med

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own work.

słoneczna znajduje się ogólnie między chmurami kłębiastymi. Wzrost natężenia promieniowania (również UV) dochodzi do 25% w porównaniu do dni bezchmurnych (Frederick, Mims 1994). Według Podstawczyńskiej (2007) wzrost natężenia promieniowania UV można wytłumaczyć dwoma procesami: zwiększonym albedo i wzrostem rozpraszania promieniowania w chmurze.

Dni, podczas których wystąpiło zachmurzenie częściowe, cechowały się wyraźnym spadkiem udziału promieniowania ultrafioletowego i wzrostem wartości promieniowania całkowitego (tab. 2).



Tab. 2. Maksymalne i minimalne wartości natężenie promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) oraz udział promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym w Krakowie (w godz. 07:00–12:00 UTC)

Tab. 2. Maximal and minimal radiation values (total, UV-A and UV-B) and share of UV radiation in total irradiance in Krakow (07:00–12:00 UTC)

Data/ Date	Czas/ Time UTC [CEST]	Promieniowanie / Solar irradiance			Stan tarczy słonecznej/ Solar disc condition
		całkowite/ total	suma UV-A i UV-B/ UV-A and UV-B in total	udział UV / UV share	
30.06	10:20 (12:20)	1027	65,6	6,39	–
30.06	07:30 (09:30)	177	21,1	11,92	w pełni zasłonięta <i>Cu fra</i>
01.07	09:50 (11:50)	1030	64,8	6,29	–
01.07	09:00 (11:00)	144	12,9	8,96	w pełni zasłonięta <i>Cu med</i>
06.07	10:30 (12:30)	1044	61,3	5,87	–
06.07	10:50 (12:50)	279	23,3	8,35	w pełni zasłonięta <i>Ac str</i>
15.07	10:20 (12:20)	970	64,7	6,67	–
15.07	11:50 (13:50)	202	17,7	8,76	w pełni zasłonięta <i>Sc str</i>

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own work.

Jak podaje Podstawczyńska (2007) za wieloma autorami (Ambach 1991; Blumthaler i in. 1985; Blumthaler i in. 1994; Bordewijk i in. 1995; Degünther, Meerkötter 2000; Elhadidy i in. 1990; Estupinan, Raman 1996; Foyo-Moreno i in. 1998; Khogali, Al-Bar 1992; Martinez-Lozano, Casanovas 1994; Martinez-Lozano i in. 1999; Słomka 1976, 1978, 1979; Spinhirne, Green 1978; Zavodska, Reichrt 1985) możliwości transmisyjne chmur dla promieniowania w zakresie ultrafioletowym (UV) są większe niż dla promieniowania w pełnym zakresie widma. Promieniowanie UV silniej podlega procesom rozpraszania w chmurach niż dłuższe fale. Wzrost udziału tego promieniowania w promieniowaniu całkowitym wiąże się również z absorpcją w chmurach promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni. W ten sposób zachmurzenie jest przyczyną zwiększenia udziału promieniowania ultrafioletowego w promieniowaniu całkowitym (tab. 2).

Udział ten przy maksymalnym natężeniu promieniowania całkowitego jest wyższy od zarejestrowanego przy najniższym natężeniu tego promieniowania od około 2 (zachmurzenie 7/8, chmury piętra wysokiego i konwekcyjne) do prawie 6 (zachmurzenie całkowite, chmury kłębiasto-warstwowe) punktów procentowych. Zakres wahań udziału promieniowania ultrafioletowego w promieniowaniu całkowitym w ciągu dnia jest wprost proporcjonalny do amplitudy natężenia promieniowania tego dnia.

Podkreślić należy, że w dniu, w którym promieniowanie całkowite osiągnęło najwyższą wartość w całym okresie badań (6 lipca 2015 roku –  $1044 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie wydał *Komunikat o przekroczeniu i ryzyku przekroczenia poziomu informowania ozonu na terenie województwa małopolskiego* (WIOŚ). Ozon troposferyczny, do którego odnosi się ten komunikat, jest bowiem wtórnym zanieczyszczeniem, które tworzy się z utleniania tlenków azotu w obecności niemetanowych lotnych związków organicznych. Powstaje on w wyniku reakcji fotochemicznych dokonujących się pod wpływem promieniowania UV, więc słoneczna pogoda sprzyja jego powstawaniu. Wysokie stężenia  $\text{O}_3$  mają bardzo szkodliwy wpływ na zdrowie ludzkie, prowadząc do reakcji zapalnych oczu czy pogłębienia chorób dróg oddechowych i układu krążenia. Przyczynia się to także do powstania uczucia senności, bólów głowy i spadku ciśnienia tętniczego krwi (Nawrot 2010; GIOŚ).

W przypadku promieniowania o natężeniu najmniejszym w rozważanym okresie (tab. 3) jego wartości miały większy zakres wahań, niż w przypadku wartości maksymalnych. Najwyższe spośród tych niskich wartości natężenia promieniowania stwierdzono w dniach bezchmurnych, w chwili rozpoczęcia obserwacji (07:00 UTC), kiedy to Słońce znajdowało się najniżej nad linią horyzontu, a chmury nie miały na nie żadnego wpływu. W pozostałych przypadkach wartości minimalne notowane były przy pełnym zasłonięciu tarczy słonecznej chmurami kłębiastymi lub kłębiasto-warstwowymi. Potwierdza to wyniki wcześniejszych badań (Kędziora 1995; Matuszko 2009; Podstawczyńska 2007).

Najmniejsze amplitudy (pomiędzy 07 a 12 UTC) natężenia promieniowania wystąpiły w dniach bezchmurnych (3 i 4 lipca – po  $331 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) oraz w dniu z zachmurzeniem całkowitym (13 lipca –  $454 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). W przypadku dni o zmiennym zachmurzeniu różnice te przekraczały  $900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Zmienne w ciągu dnia

Tab. 3. Zachmurzenie i najniższe wartości natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) w okresie badań

Tab. 3. Cloudiness and the minimal radiation values (total, UV-A, UV-B) over the research period

Data/ Date	Promieniowanie / Solar irradiance			Czas/ Time [CEST]	Wielkość zachmurzenia/ Cloud cover	Rodzaje chmur/ Cloud types	Stan tarczy słonecznej/ Solar disc condition
	całkowite/ total	UV-A	UV-B				
	[W·m <sup>-2</sup> ]						
30.06	117	20,7	0,4	07:30 (09:30)	5/4/4	Cc flo, Cu fra, Cu med	w pełni zasłonięta Cu med
01.07	144	12,6	0,3	09:00 (11:00)	6/5/5	Ci fib, Cu fra, Cu med	w pełni zasłonięta Cu med
03.07	586	38,2	0,7	07:00 (09:00)	0/0/0	-	niezasłonięta
04.07	581	27,6	0,7	07:00 (09:00)	0/0/0	-	niezasłonięta
06.07	279	22,7	0,6	10:50 (12:50)	5/4/0	Ci spi, Ac str per	w pełni zasłonięta Ac str
13.07	27	3	0,7	10:40 (12:40)	8/8/8	Sc str	w pełni zasłonięta Sc str
15.07	202	17,3	0,4	11:50 (13:50)	7/7/6	Ci fib, Ci spi, Cu fra, Cu med., Sc str	w pełni zasłonięta Sc str

Źródło: opracowanie własne.

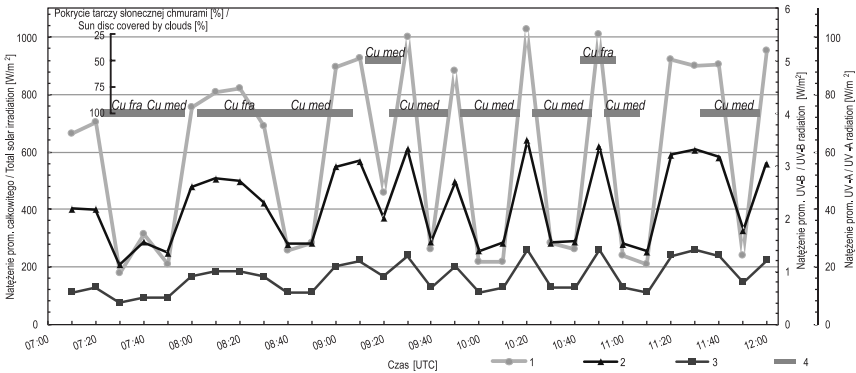
Source: author's own work.

zachmurzenie znacznie (niemal trzykrotnie) zwiększało w badanym okresie zakres wahań wartości natężenia promieniowania dochodzącego do powierzchni Ziemi.

## Analiza przebiegu natężenia promieniowania w zależności od zachmurzenia w wybranych dniach okresu badań

### 30 czerwca 2015 roku

Przebieg natężenia promieniowania całkowitego i ultrafioletowego 30 czerwca 2015 roku wykazywał duże zróżnicowanie związane ze zmieniającym się zachmurzeniem (ryc. 1).



Ryc. 1. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) i stopnia pokrycia tarczy słonecznej chmurami – 30.06.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – chmury.

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 1. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) and the degree of the sun's disc coverage with clouds – 30.06.2015

Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – clouds.

Source: author's own work.

Tabela 4. Wielkość i rodzaj zachmurzenia w Krakowie (30.06.2015, 07:00-12:00 UTC)

Table 4. Cloud amount and cloud type in Krakow (30.06.2015, 07:00 AM – 12:00 UTC)

Czas/ Time UTC [CEST]	Wielkość zachmurzenia/ Cloud Cover	Rodzaj chmur/ Cloud type
07:00 (09:00)	3/8	Cu fra, Cu med, Cu con, Cc flo
08:00 (10:00)	5/8	Cc flo, Cu fra, Cu med
09:00 (11:00)	6/8	Cc flo, Cu fra, Cu med
10:00 (12:00)	6/8	Ci spi, Ac str, Cu fra, Cu med
11:00 (13:00)	5/8	Cu fra, Cu med
12:00 (14:00)	4/8	Cu fra, Ci spi, Cu med, Cu hum

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own work.

W ciągu dnia stopień zachmurzenia zwiększał się od  $\frac{3}{8}$  do  $\frac{6}{8}$  osiągając maksimum w południe (tab. 4). Dominującą składową zachmurzenia były chmury piętra niskiego. Największe wartości natężenia promieniowania występowały przy zachmurzeniu rzędu  $\frac{3}{8}$ – $\frac{6}{8}$ .

Przedstawione na ryc. 1. zależności są potwierdzeniem tezy, iż zachmurzenie konwekcyjne w obszarze okołosłonecznym znacznie podnosi wartości natężenia promieniowania. W momencie pełnego przesłonięcia tarczy słonecznej (np. 10:10 UTC (12:10 CEST) – 100% tarczy słonecznej zasłonięte chmurą *Cumulus mediocris*) wartość natężenia

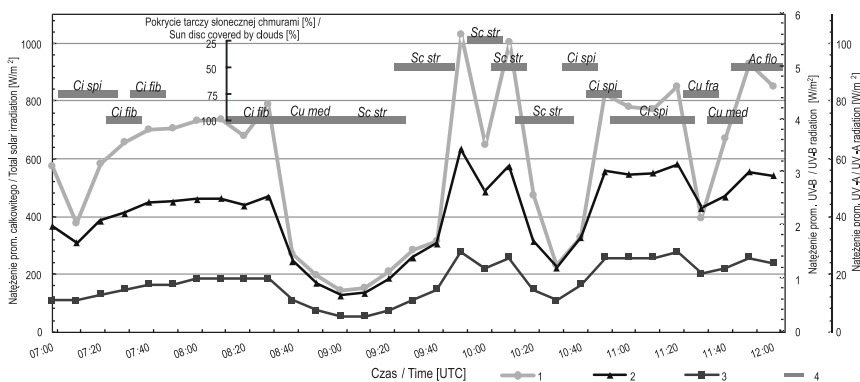
promieniowania raptownie malała, tymczasem tuż przed i po (chmura w obszarze okołosłonecznym) natężenie to gwałtownie rosło. Analizując różnicę w dopływie energii słonecznej, stwierdzono również, że znacznie silniejszy wpływ na jej osłabienie mają chmury *Cumulus mediocris* w porównaniu z chmurami *Cumulus fractus*.

Promieniowania ultrafioletowe i całkowite podlegały działaniu zachmurzenia jednokierunkowo, choć w przypadku promieniowania UV zmiany te były mniej wyraźne. Po osiągnięciu najwyższego natężenia wartość promieniowania całkowitego spadła prawie czterokrotnie (z 1027 na 289  $W \cdot m^{-2}$ ), promieniowania UV-A ponad dwukrotnie (z 64,2 na 28,4  $W \cdot m^{-2}$ ), a promieniowania UV-B dokładnie dwukrotnie (z 1,4 na 0,7  $W \cdot m^{-2}$ ). Oznacza to, że choć zmianę promieniowania ultrafioletowego można wyjaśnić zmianą promieniowania całkowitego, to spowodowany zachmurzeniem stopień wzmocnienia lub osłabienia jego natężenia, nie był jednakowy.

### 1 lipca 2015 roku

Zachmurzenie 1 lipca 2015 roku było zmienne (ryc. 2). Na początku okresu obserwacyjnego wokół tarczy słonecznej znajdowały się głównie chmury piętra wysokiego. Z danych wynika, iż *Cirrus fibratus* mają bardzo znikomy wpływ na dopływ energii słonecznej (pomimo zasłonięcia tarczy słonecznej natężenie promieniowania wzrasta jednostajnie, bardzo podobnie jak w przypadku dnia bezchmurnego). Większy, lecz nadal niewielki, wpływ miały na promieniowanie chmury *Cirrus spissatus*. Wraz z pojawieniem się chmur piętra niskiego w obszarze okołosłonecznym zanotowano wyraźne, gwałtowne spadki (10:10–10:20 UTC (12:10–12:20 CEST): promieniowanie całkowite z 1005 na 471  $W \cdot m^{-2}$ ; UV-A 57,4 na 31,6  $W \cdot m^{-2}$ , UV-B 1,4 na 0,8  $W \cdot m^{-2}$ ) i wzrosty (09:40–09:50 UTC (11:40–11:50 CEST) trzykrotny promieniowania całkowitego, dwukrotny UV-A i UV-B) natężenia promieniowania.

Warto zauważyć, iż w analizowanym dniu zanotowano wartość promieniowania całkowitego powyżej 1000  $W \cdot m^{-2}$  (UV-A 63,3  $W \cdot m^{-2}$ , UV-B 1,5  $W \cdot m^{-2}$  przy promieniowaniu całkowitym równym 1030  $W \cdot m^{-2}$ ) w chwili, kiedy tarcza słoneczna w połowie była zasłonięta przez chmurę *Stratocumulus stratiformis*. Podobna sytuacja wystąpiła dnia 30 czerwca przysłonięciu Słońca przez chmurę *Cumulus fractus*. Oznacza to, iż wyraźne podwyższenie natężenia promieniowania



Ryc. 2. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) i stopnia pokrycia tarczy słonecznej chmurami – 01.07.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – chmury.

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) and the degree of the sun's disc coverage with clouds – 01.07.2015

Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – clouds.

Source: author's own work.

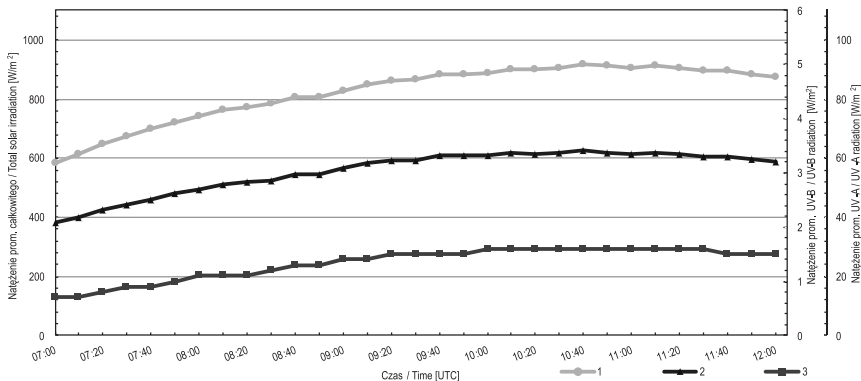
notujemy nie tylko podczas otoczenia tarczy słonecznej przez chmury, lecz także przy stopniowym przysłonięciu jej optycznie cienkimi chmurami kłębiastymi lub kłębiasto-warstwowymi.

Tego dnia wystąpiły dwa epizody przysłonięcia tarczy słonecznej chmurami *Cirrus*. W pierwszym przypadku (po 07:00 UTC) nastąpił spadek natężenia promieniowania o niemal 39% dla promieniowania całkowitego, 23% dla UV-A i 14% dla UV-B, w drugim (około 09:00 UTC) o 15% dla promieniowania całkowitego, 11% dla UV-A i 13% dla UV-B. Związane może być to z różnicą wysokości Słońca nad horyzontem. Za pierwszym razem wysokość Słońca nad horyzontem wynosiła około 40°, za drugim – 56°. Według Kondratiewa (1965) osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego dla chmur *Cirrus* (zachmurzenie całkowite) w stosunku do bezchmurnego nieba wynosi 10% dla wysokości Słońca równej 40°, a 2% dla wysokości równej 50°, co znajduje odzwierciedlenie w tym przypadku.

### 3 i 13 lipca 2015 roku

Przebieg natężenia promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B w ciągu dwóch kolejnych, bezchmurnych dni (3 i 4 lipca 2015 roku) był bardzo zbliżony. Wzrost natężenia promieniowania był stosunkowo jednostajny, niczym nie zaburzony, z maksimum przypadającym na godzinę 10:40 UTC (12:40 CEST) (ryc. 3). Amplituda wartości natężenia promieniowania w okresie obserwacyjnym dnia 3 lipca wyniosła:  $331 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  w przypadku promieniowania całkowitego (wzrost półtorakrotny),  $24,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  w zakresie promieniowania UV-A (wzrost ponad półtorakrotny) i  $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  w zakresie UV-B (wzrost ponad dwukrotny). Z przeprowadzonych badań wynika, iż o ile gwałtowne wzrosty i spadki natężenia promieniowania wywołane zachmurzeniem silniej uwidaczniają się przy natężeniu promieniowania całkowitego, to zmienność promieniowania ultrafioletowego podczas dni bezchmurnych jest większa.

Bardziej zróżnicowany przebieg, lecz o zbliżonych do poprzedniego przykładu amplitudach (kolejno:  $454, 34,2$  i  $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), miało natężenie promieniowania w dniu 13 lipca 2015 roku (ryc. 4). Wahania wartości promieniowania związane były ze wzrostem lub spadkiem gęstości chmury w obszarze okołosłonecznym, nie zaś



Ryc. 3. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) – 03.07.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B.

Źródło: opracowanie własne.

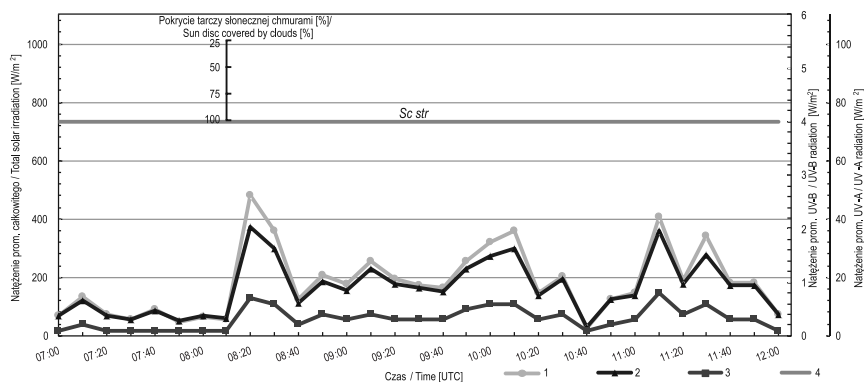
Fig. 3. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) – 03.07.2015

Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B.

Source: author's own work.

różnicą wysokości Słońca nad horyzontem. W czasie prowadzenia obserwacji tego dnia wysokość Słońca zmieniała się od 37.98° do 61.84°. Według Kondratiewa (1965) osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego dla chmur *Stratocumulus* (zachmurzenie całkowite) w stosunku do bezchmurnego nieba wynosi 71%, 72% i 73% dla odpowiednio 30°, 40° i 50° wysokości Słońca nad horyzontem, co jest różnicą niewielką, nie tłumaczącą zakresu zmian zachodzących tego dnia.

Pomimo kilkukrotnego zmniejszania się gęstości chmury *Stratocumulus strati-formis* w ciągu dnia nie zanotowano gwałtownych wzrostów wartości natężenia promieniowania. Związane było to ze stałym, całkowitym (100%) zasłonięciem tarczy słonecznej przez chmurę, bez względu na jej optyczną grubość we fragmen-cie aktualnie przesłaniającym tarczę słoneczną. Jedyny wyróżniający się moment nastąpił między godz. 08:10 a 08:20 UTC (10:10–10:20 CEST): zanotowano ponad 8-krotny wzrost natężenia promieniowania całkowitego (57 na 481  $W \cdot m^{-2}$ ), 6-krotny promieniowania UV-A (6 na 37,2  $W \cdot m^{-2}$ ) i 7-krotny promieniowania UV-B (0,1 a 0,7  $W \cdot m^{-2}$ ).



Ryc. 4. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) i stopnia pokrycia tarczy słonecznej chmurami – 13.07.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – chmury.

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 4. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) and the degree of the sun's disc coverage with clouds – 13.07.2015

Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – clouds.

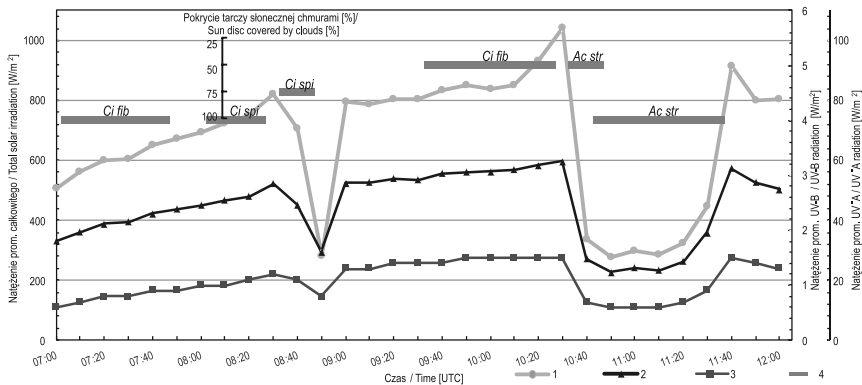
Source: author's own work.



## 6 lipca 2015 roku

Zachmurzenie tego dnia występowało głównie w piętrze wysokim i średnim. W ciągu całego okresu obserwacyjnego nie zanotowano chmur piętra niskiego ani konwekcyjnych. Wielkość zachmurzenia ogólnego wahała się między  $\frac{3}{8}$  a  $\frac{5}{8}$  (ryc. 5).

Podobnie jak w dniach poprzednich zaobserwowano, iż wpływ chmur *Cirrus fibratus* na natężenie promieniowania był niewielki. Znaczne zróżnicowanie skutków zasłonięcia tarczy słonecznej można było obserwować w przypadku chmur *Cirrus spissatus*. Około godziny 08:20 UTC (10:20 CEST) tarcza słoneczna została w pełni przesłonięta taką chmurą, jednak jej wpływ był znikomy. Niespełna pół godziny później optycznie grubszy *Cirrus spissatus* przesłonił tarczę słoneczną w 75% i w ciągu 20 minut zanotowano około trzykrotny spadek natężenia promieniowania całkowitego, prawie dwukrotny UV-A i o 1/3 UV-B). Możliwy jest wpływ innego czynnika, który osłabił dopływ promieniowania do przyrządu. Jednak potwierdzić można również, iż w obrębie jednego gatunku chmur, w zależności od ich budowy, notujemy różny wpływ na promieniowanie.



Ryc. 5. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) i stopnia pokrycia tarczy słonecznej chmurami – 06.07.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – chmury.

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 5. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) and the degree of the sun's disc coverage with clouds – 06.07.2015

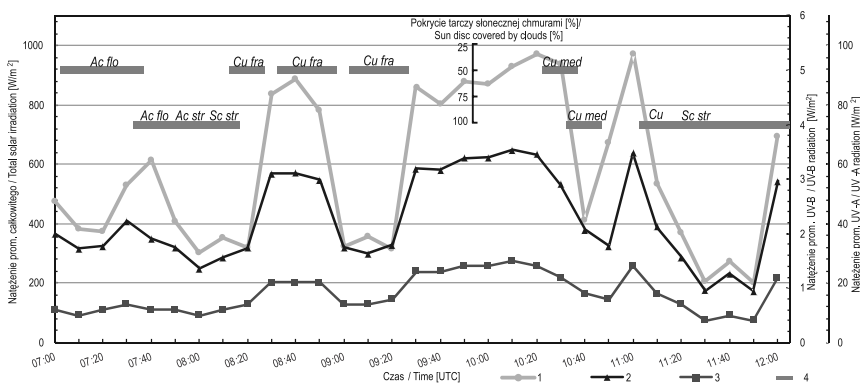
Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – clouds.

Source: author's own work.

Drugie wyraźne osłabienie dopływu promieniowania wystąpiło przy całkowitym zasłonięciu tarczy słonecznej chmurą *Alto cumulus stratiformis*. Co więcej, w momencie ustępowania chmury z obszaru okosłonecznego wystąpiło wspomniane już wcześniej zjawisko spotęgowania natężenia promieniowania słonecznego przez wzrost natężenia promieniowania rozproszonego na bokach chmury kłębiastej. Z tym samym zjawiskiem związane było maksymalne zanotowane natężenie promieniowania tego dnia (tab. 1).

### 15 lipca 2015 roku

W tym dniu zachmurzenie cechowało się dużą zmiennością, naprzemiennie rosnąc i malejąc, jednak ani razu nie spadło poniżej  $\frac{4}{8}$ , ani nie przekroczyło  $\frac{7}{8}$ . Główną składową tego zachmurzenia były chmury piętra niskiego. Tak duża zmienność powodowała znaczne zróżnicowanie wartości natężenia promieniowania w ciągu dnia (ryc. 6).



Ryc. 6. Przebieg natężenia promieniowania (całkowitego, UV-A i UV-B) i stopnia pokrycia tarczy słonecznej chmurami – 15.07.2015

Objaśnienia: 1 – promieniowanie całkowite, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – chmury.

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 6. Course of solar radiation intensity (total, UV-A and UV-B) and the degree of the sun's disc coverage with clouds – 15.07.2015

Explanations: 1 – total solar irradiance, 2 – UV-A, 3 – UV-B, 4 – clouds.

Source: author's own work.

Widocznie większy wpływ na natężenie promieniowania w obrębie jednego rodzaju chmur mają *Alto cumulus stratiformis* niż *Alto cumulus floccus*. Tego dnia różnica wpływu chmur *Cumulus mediocris* i *Cumulus fractus* nie była tak zauważalna, co związane było z różną grubością optyczną tych chmur.

Najbardziej osłabiający wpływ na natężenie promieniowania miały wtedy chmury *Strato cumulus stratiformis*, pojawiające się w obszarze okołosłonecznym i zasłaniające tarczę słoneczną. Maksymalne natężenie promieniowania zanotowano w momencie otoczenia tarczy słonecznej przez chmury *Cumulus*.

Przysłaniające tarczę słoneczną chmury *Alto cumulus* wywołały wyraźny spadek natężenia promieniowania około godziny 08:00 UTC (w porównaniu do dnia bezchmurnego o 60% dla promieniowania całkowitego, 50% dla UV-A i 55% dla UV-B). Dnia 6 lipca chmury *Alto cumulus* także przesłoniły tarczę słoneczną (przed godziną 11:00 UTC), powodując osłabienie o 70% natężenia promieniowania całkowitego, 63% – UV-A i 62% – UV-B. Wysokość Słońca nad horyzontem wyniosła odpowiednio 47° i 62°. Według Kondratiewa (1965), osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego dla chmur *Alto cumulus* (zachmurzenie całkowite) w stosunku do bezchmurnego nieba najpierw rośnie (od 33% dla 5° do 55% dla 30°), a następnie spada (do 38% dla 50°). W omawianym przypadku zaistniało mniejsze osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego dla 47° wysokości Słońca niż dla 62°.

## Dyskusja

Niniejsza praca różni się od poprzednich publikacji przede wszystkim częstotliwością prowadzonych obserwacji (co 10 minut) oraz dodatkowym przedmiotem obserwacji – zachmurzeniem w obszarze okołosłonecznym. Zdaniem autorki, wyraźniejszy wpływ na natężenie promieniowania mają chmury z obszaru okołosłonecznego, niż uwzględniane dotychczas zachmurzenie ogólne. Zauważono, iż wyraźne podwyższenie natężenia promieniowania notuje się nie tylko podczas otoczenia tarczy słonecznej przez chmury, lecz także przy stopniowym przysłonięciu jej optycznie cienkimi chmurami kłębiastymi lub kłębiasto-warstwowymi.

Potwierdzono także wyniki poprzednich badań dotyczące słabego wpływu chmur *Cirrus* na promieniowanie krótkofalowe (Poetsch-Heffter i in. 1995) oraz

zwiększenia natężenia promieniowania na powierzchni Ziemi przez rozpraszanie na pionowych powierzchniach chmur kłębiastych (Davies, Uboegbulam 1979). Ponadto, zauważono także, iż nie tylko chmury kłębiaste, lecz także chmury kłębiasto-warstwowe (*Stratocumulus stratiformis* i *Alto cumulus stratiformis*) przyczyniają się do zwiększenia intensywności promieniowania.

Według Santos i in. (2010) ważną rolę pełni wysokość Słońca, a według Josefszona i Landeliusa (2000), wysokość Słońca ma mały wpływ na zależność chmury-promieniowanie UV. Kondratiew (1965) zaproponował zależność osłabienia całkowitego promieniowania słonecznego w zależności od rodzaju chmur (zachmurzenie całkowite) i wysokości Słońca nad horyzontem w stosunku do warunków bezchmurnego nieba. Autorka potwierdziła tezę Kondratiewa odnośnie osłabiania natężenia całkowitego promieniowania słonecznego przez chmury *Alto cumulus* i *Cirrus*.

## Wnioski

Niniejsza praca jest przyczynkiem do poznania zależności natężenia promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B od zachmurzenia. Przeprowadzone kilkudniowe szczegółowe obserwacje potwierdzają wyniki wcześniejszych badań i pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- wpływ zachmurzenia na natężenie promieniowania ma dwoistą naturę: mogą bowiem obniżyć lub podnosić wartości natężenia promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B;
- zmiany te zależą od budowy chmur (rodzaju, gatunku), a także położenia względem tarczy słonecznej;
- chmury jednego rodzaju (a nawet gatunku) wykazują niekiedy różny wpływ na promieniowanie;
- najwyższe wartości natężenia promieniowania występują przy zachmurzeniu wielkości  $\frac{3}{8}$ – $\frac{6}{8}$  i położeniu chmur *Cumulus*, *Alto cumulus* lub *Stratocumulus* w obszarze okołosłonecznym;
- chmury *Cirrus* mają niewielki wpływ na natężenie promieniowania, a najmniejszy wpływ wykazują chmury *Cirrus fibratus*;

- najbardziej wyrównane przebiegi natężenia promieniowania występują podczas dni bezchmurnych lub tych o całkowitym zachmurzeniu (chmury *Stratocumulus*);
- zachmurzenie jest przyczyną zwiększenia udziału promieniowania ultrafioletowego w promieniowaniu całkowitym, gdyż promieniowanie UV silniej podlega rozpraszaniu w chmurach, niż dłuższe fale promieniowania słonecznego;
- znacznie wyraźniejszy wpływ na natężenie promieniowania mają chmury z obszaru okołosłonecznego, niż oceniane standardowo ogólne zachmurzenie.

### Podziękowanie

Za inspirację oraz pomoc przy realizacji tej pracy pragnę złożyć serdecznie podziękowania dr hab. Dorocie Matuszko.

### Literatura

- Ambach W., Blumthaler M., Wendler G., 1991, *A comparison of ultraviolet radiation measured at an Arctic and an Alpine Site*, Solar Energy, 2, 121–126.
- Blumthaler M., Ambach W., Canaval H., 1985, *Seasonal variation of solar UV-radiation at a high mountain station*, Photochem. Photobiol, 2, 147–152.
- Blumthaler M., Ambach W., Salzgeber M., 1994, *Effects of cloudiness on global and diffuse UV irradiance in a high-mountain area*, Theor. Appl. Climatol., 50, 23–30.
- Błażejczyk K., 2004, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Bordewijk J. A., Hill W. J., Reisel G. C., Tiao G. C., 1995, *Total solar radiation and the influence of clouds and aerosol on the biological effective UV*, Geophys. Res. Lett., 22, 2151–2154.
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014, IPCC, Geneva.

- Davies J. A., Uboegbulam T. C., 1979, *Parameterization of Surface incoming radiation in tropical cloudy conditions*, Atmosphere-Ocean, 17, 1, 14–23.
- Degünther M., Meerkötter R., 2000, *Effect of remote clouds on surface UV irradiance*, Ann. Geophysicae, 18, 679–686.
- Elhadidy M. A., Abdel-Nabi D. Y., Kruss P. D., 1990, *Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia*, Solar Energy, 6, 315–319.
- Estupinan J. G., Raman S., Crescenti G. H., Streicher J. J., Barnard W. F., 1996, *Effects of clouds and haze on UV-B radiation*, Journal of Geophysical Research, 101/D11, 16807–16816.
- Foyo-Moreno I., Vida J., Alados-Arboledas L., 1998, *Ground based ultraviolet (290–395 nm) and broadband solar radiation measurement in South-Eastern Spain*, Int. J. Climatol., 18, 1389–1400.
- Frederick J. E., Mims F. M., 1994, *Cumulus Clouds and UV-B*, Nature, 371, 291.
- Fusina F., Spichtinger P., Lohmann U., 2007, *Impact of ice supersaturated regions and thin cirrus on radiation in the midlatitudes*, Journal of geophysical research, 112, D24S14, 1–12.
- Herman G. F., Curry J. A., 1984, *Observational and Theoretical Studies Of Solar Radiation in Arctic Stratus Clouds*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 23/1, 5–24.
- International Cloud Atlas, Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors, Volume 1*, 1975, WMO, Geneva.
- Iqbal M., 1983, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, New York.
- Josefsson W., Landelius T., 2000, *Effect on clouds on UV irradiance: As estimated from cloud amount, cloud type, precipitation, global radiation and sunshine duration*, Journal of Geophysical Research, 105/D4, 4927–4935.
- Kardaś A.E., 2013, *Badanie optycznych i fizycznych własności aerozolu atmosferycznego i cząstek chmurowych na podstawie pomiarów teledetekcyjnych*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Kędziora A., 1995, *Podstawy agrometeorologii*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań.
- Khogali A., Al-Bar O. F., 1992, *A study of solar ultraviolet radiation at Makkah solar station*, Solar Energy, 2, 79–87.
- Kondratiew K. J., 1965, *Aktinometrija*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Kożuchowski K. (red.), 2012, *Meteorologia i klimatologia*, PWN, Warszawa.

- Martinez-Lozano J. A., Casanovas A. J., 1994, *Comparison of global ultraviolet (290-385 nm) and global irradiation measured during the warm season in Valencia, Spain*, Int. J. Climatol., 14, 93–102.
- Martinez-Lozano J. A., Tena F., Utrillas P., 1996, *Measurement and analysis of ultraviolet solar irradiation in Valencia, Spain*, Int. J. Climatol., 16, 947–955.
- Matuszko D., 2009, *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Matuszko D., Soroka J., 2009, *Spostrzeżenia dotyczące wpływu zachmurzenia na maksymalne wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego*, Prace Geograficzne, 122, 39–48.
- Nawrot A. (red), 2010, *Encyklopedia Geografia*, Greg, Kraków.
- Ogunjobi K., Kim Y., 2004, *Ultraviolet (0.280–0.400) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index*, Atmospheric Research, 71, 193–214.
- Orving S., Vowinckel E., 1962, *Relation between Solar Radiation Income and Cloud Type in Arctic*, Journal of Applied Meteorology 1, 552–559.
- Podstawczyńska A., 2007, *Cechy solarne klimatu Łodzi*, Acta Geogr. Lodziensia, Folia Geographica Physica, 7, ss. 291.
- Poetsch-Heffter C., Liu Q., Ruprecht E., Simmer C., 1995, *Effect of Cloud Types on the Earth Radiation Budget Calculated with the ISCCP CI Dataset: Metodology and Initial Results*, Journal of Climate, 8, 829–843.
- Santos J. B., Villan D. M., Castrillo A. M., 2010, *Analysis and cloudiness influence on UV total Irradiation*, International Journal of Climatology, 451–460.
- Słomka K., 1976, *Preliminary analysis of the effect of solar zenith distance, total ozone content, atmospheric turbidity and cloudiness on the solar UV radiation measured with a Robertson-Berger meter*, Pubs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-3 (106), 39–47.
- Słomka K., 1978, *UV-B global radiation in Warsaw and Belsk*, Pubs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-7 (126), 121–131.
- Słomka K., 1979, *Wpływ odległości zenitalnej Słońca, całkowitej zawartości ozonu, zmętnienia atmosfery i zachmurzenia na nadfioletowe promieniowanie słoneczne rejestrowane miernikiem Robertsona – Bergera w Belsku i Warszawie.*, Probl. Uzdr., z. 9/10, 285–289.

Spinhirne J. D., Green A.E.S, 1978, *Calculation of relative influence of cloud layers on received ultraviolet and integrated solar radiation*, Atmos. Environ., 12, 2449–2454.

Thekaekara M. P., 1971, *Solar energy outside the earth's atmosphere*, Solar Energy, 14, 109–127.

Zavodska E., Reichrt J., 1985, *Ultraviolet and total global radiation in Bratislava*, Contrib. Slovak Acad. Sci. Ser. Meteorol., 5, 21.

Zhang Y., Macke A., Albers F., 1999, *Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing*, Atmospheric Research 52, 59–75.

### **Źródła internetowe**

Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ) <http://www.gios.gov.pl> (dostęp: 02.02.2018).

NOAA Solar Calculator, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/index.html> (dostęp: 02.02.2018).

Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie (WIOŚ) <http://www.krakow.pios.gov.pl/> (dostęp: 05.11.2015).