

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 174, 2024, 143–167

doi: 10.4467/20833113PG.24.006.20679

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

WPŁYW ZACHMURZENIA I ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA NATĘŻENIE CAŁKOWITEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO (STUDIUM PRZYPADKÓW NA PRZYKŁADZIE KRAKOWA)

Barbara Pędracka, Dorota Matuszko

The impact of cloudiness and air pollution on the intensity of total solar radiation (Krakow as a case studies)

Abstract: The study characterises the variability of total solar radiation intensity in Krakow from 2012 to 2021. The aim of the study was to demonstrate the influence of cloud cover (cloudiness and cloud genera) and air pollution on the solar energy flux reaching the Earth's surface. Data were collected from the Scientific Station of the Department of Climatology of the Institute of Geography and Spatial Management of the Jagiellonian University, utilising a unique 10-year period due to gaps in instrument operation in 2011. The analyses confirmed that astronomical factors primarily determine the cyclic variability of solar radiation throughout the year and day. The impact of the cloud structure in weakening and enhancing the magnitude of the energy flux was demonstrated. It was found that under cloudless weather conditions, total irradiance is reduced (by up to 20%) when the air is polluted by $PM_{2.5}$ and NO_2 .

Keywords: total irradiance, Krakow, cloudiness, cloud genera, air pollution.

Zarys treści: W pracy dokonano charakterystyki zmienności natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w Krakowie w latach 2012–2021. Celem badań było wykazanie wpływu zachmurzenia (wielkości i rodzajów chmur) i zanieczyszczeń powietrza na strumień energii

słonecznej dopływającej do powierzchni ziemi. Posłużono się danymi ze Stacji Naukowej Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, wykorzystując nietypowe 10-lecie, ze względu na przerwy w działaniu przyrządu pomiarowego w 2011 roku. W wyniku przeprowadzonych analiz potwierdzono, że czynniki astronomiczne determinują cykliczną zmienność natężenia promieniowania słonecznego w ciągu roku i dnia. Wykazano wpływ struktury zachmurzenia na osłabianie i podwyższanie wielkości strumienia energii. Stwierdzono, że w warunkach pogody bezchmurnej następuje obniżenie wartości natężenia promieniowania całkowitego (nawet o 20%), gdy powietrze jest zanieczyszczone przez $PM_{2.5}$ i NO_2 .

Słowa kluczowe: natężenie promieniowania całkowitego, Kraków, zachmurzenie, rodzaje chmur, zanieczyszczenia powietrza.

Wprowadzenie

Promieniowanie słoneczne jest podstawowym źródłem energii dla Ziemi i otaczającej ją atmosfery. Stanowi główną przyczynę cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej, obiegu wody w przyrodzie oraz wielu procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Wielkość energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi jest mniejsza od gęstości strumienia energii promienistej na górnej granicy atmosfery ze względu na pochłanianie i rozpraszanie promieniowania przez cząstki gazów, chmury i aerozole atmosferyczne (Matuszko 2009). Dużą rolę w modyfikowaniu natężenia całkowitego promieniowania słonecznego odgrywają czynniki meteorologiczne: zachmurzenie, jego stopień i struktura oraz przezroczystość powietrza związana z zawartością w nim pary wodnej i zanieczyszczeń.

Tematyka warunków solarnych w miastach była podejmowana już na początku XIX w., kiedy to ukazała się publikacja Howarda (1818) „The Climate of London”. W Polsce pierwsze publikacje dotyczące dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi były związane z pomiarami całkowitego promieniowania słonecznego, zainicjowanymi przez Gorczyńskiego w Warszawie (Podstawczyńska 2007). Rozwój badań aktynometrycznych w Polsce nastąpił po II wojnie światowej (Uaska-Kowalkowska 2019). Regularna sieć pomiarów promieniowania słonecznego zorganizowana przez Państwowy Instytut Hydrometeorologiczny (PIHM) rozpoczęła działanie w latach 1952–1957 (Bogdańska i in. 2002). Została ona znacznie rozwinięta w ramach Międzynarodowego Roku Geofizycznego 1957/1958 i dostarczyła danych pomiarowych, które umożliwiły podjęcie badań nad czasową i przestrzenną zmiennością promieniowania całkowitego w Polsce (Bogdańska, Podogrocki 2000). Podsumowaniem dotychczasowych badań na temat promieniowania słonecznego w Polsce jest rozdział „Solar radiation change” w monografii „Climate change in Poland: past, present, future” (Falarz et al. 2021). W Krakowie pomiary rozpoczęto pod koniec lat 60. XX wieku, kiedy to z inicjatywy prof. M. Hessa założono stację aktynometryczną na tarasie ówczesnego budynku Instytutu

Geografii UJ, przeniesioną w 1976 roku do Ogrodu Botanicznego UJ. Wyniki tych pomiarów były wykorzystane w badaniach Oleckiego (1973, 1975) dotyczących wpływu miasta na niektóre elementy bilansu radiacyjnego, oddziaływania dużego ośrodka miejsko-przemysłowego na dopływ promieniowania słonecznego, a także do badań przezroczystości atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej (Olecki 1992). Tematem wspólnej publikacji Hessa i Oleckiego (1990) był wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie. Według wymienionych uczonych na terenach zurbanizowanych rola pary wodnej w zmniejszaniu przezroczystości atmosfery maleje, znacznie rośnie natomiast wpływ zanieczyszczeń powietrza emitowanych w wyniku procesów produkcyjnych, transportu, gospodarki komunalnej i innych.

Bogaty dorobek naukowy z zakresu związków między zachmurzeniem i promieniowaniem słonecznym na podstawie serii krakowskiej należy do Matuszko (2009, 2012a, 2012b, 2014). Autorka w swoich publikacjach uporządkowała i wyjaśniła wiele mechanizmów wiążących zachmurzenie, osłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne (Matuszko 2009, 2012a, 2012b). W szczególności w sposób ilościowy, w postaci równań regresji, przedstawiła wpływ stopnia zachmurzenia i poszczególnych rodzajów chmur na natężenie promieniowania słonecznego (Matuszko 2009, 2012b). Ponadto zrekonstruowała codzienne wartości całkowitego promieniowania słonecznego w Krakowie od 1884 do 2010 roku (Matuszko 2014).

Matuszko i Soroka (2009) w publikacji dotyczącej wpływu zachmurzenia na maksymalne wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego wykazali, że chmury mogą zarówno zmniejszyć ilość docierającego do powierzchni gruntu promieniowania słonecznego, jak i spowodować jego wzrost. Potwierdzeniem wyników tych badań była publikacja Nguyen Huu (2018), w której autorka przedstawiła wpływ zachmurzenia na natężenie promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B, w Krakowie.

Problem wpływu zachmurzenia i aerozoli na modyfikację wielkości strumienia promieniowania słonecznego jest złożony (np. IPCC 2007, Bony i in. 2015, Schneider i in. 2019), słabo rozpoznany i wymaga zarówno skomplikowanych badań eksperymentalnych i modelowych z zakresu fizyki chmur, jak i rozważań o charakterze klimatologiczno-statystycznym na podstawie danych pomiarowych i obserwacyjnych (Matuszko i in. 2022). Z tego powodu analiza wzajemnych relacji między zachmurzeniem i zanieczyszczeniami powietrza a promieniowaniem słonecznym nabiera szczególnego znaczenia.

Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu zachmurzenia i zanieczyszczeń powietrza na natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na podstawie danych pomiarowych i obserwacyjnych z Krakowa.

Materiały źródłowe i metody

W pracy wykorzystano dane aktywności i nefologiczne pochodzące z pomiarów i obserwacji wykonywanych na Stacji Naukowej Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie w latach 2012–2021. Stacja Zakładu Klimatologii znajduje się przy ul. Kopernika 27 (w budynku Collegium Śniadeckiego) na terenie Ogrodu Botanicznego ($\phi = 50^{\circ}04'N$, $\lambda = 19^{\circ}58'E$), na wysokości 206 m n.p.m. Obserwacje zachmurzenia wykonywane są z tarasu i dachu Collegium Śniadeckiego, na którym umieszczony jest również czujnik Kipp&Zonen CM5 do pomiaru natężenia promieniowania całkowitego. Dach budynku wznosi się około 18 m nad poziomem gruntu. Czujnik CM5 rejestruje natężenie promieniowania jako wartości średnie 10-minutowe w W/m^2 , dane są zapisywane w czasie zimowym tj. UTC+1.

Obserwacje zachmurzenia na tej stacji są wykonywane przez obserwatora w godzinach 6:00, 9:00, 12:00, 15:00 i 18:00 czasu UTC, podczas których jest określana wielkość zachmurzenia ogólnego, wielkość zachmurzenia w piętrze niskim, średnim i wysokim, rodzaje, gatunki oraz odmiany chmur zgodnie z Międzynarodową Klasyfikacją Chmur.

Wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczenia powietrza PM_{10} , $PM_{2,5}$ i NO_2 pochodzą ze stacji monitoringu powietrza (ul. Bujaka i ul. Bulwarowa) udostępnianych przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/station/search>).

W pierwszym etapie pracy sporządzano bazę danych pomiarowych i obserwacyjnych, a pojedyncze braki w bazie danych natężenia promieniowania spowodowane przerwami w działaniu czujnika uzupełniono średnią arytmetyczną z dwóch sąsiadujących wartości. Braki w danych 10-minutowych stanowiły około 2% wszystkich wartości. Z powodu dużych przerw w działaniu czujnika w 2011 roku zdecydowano się na analizę danych z 10-lecia 2012–2021.

W celu wykazania wpływu poszczególnych rodzajów chmur na natężenie promieniowania całkowitego w Krakowie w latach 2012–2021 porównano dzienny przebieg natężenia promieniowania w dniach z określonym rodzajem chmur z dniami bezchmurnymi. Za dzień bezchmurny uznano taki, w którym niebo jest bez chmur podczas trzech obserwacji klimatologicznych lub w którym wielkość zachmurzenia wyniosła nie więcej niż 1/8 w jednym terminie obserwacyjnym. Do porównań wybrano dni z różnych lat w taki sposób, aby różnica pomiędzy datami nie przekraczała 15 dni, w celu zachowania porównywalnych warunków astronomicznych – podobnej długości dnia i wysokości Słońca nad horyzontem w prawdziwie południe słoneczne. Na tej podstawie wyselekcjonowano 14 par dni.

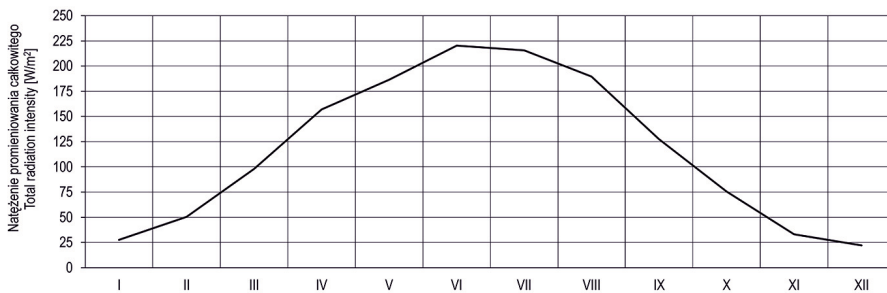
W warunkach pogody bezchmurnej przebieg dzienny promieniowania całkowitego może być traktowany jako pewien wzorzec – punkt odniesienia zależny od danych astro-

onomicznych i szerokości geograficznej, a niezależny od wielkości zachmurzenia i jego składu rodzajowego (Matuszko 2009). Takie założenie jest powszechnie przyjmowane w badaniach klimatologicznych dotyczących stosunków radiacyjnych (np. Hess, Olecki 1990, Olecki 1975, 1992, Robinson 1977, Estupiñán, Raman 1996, Kuchinke, Nunez 1999, Podstawczyńska 2007, Matuszko 2009). Tak więc wpływ zanieczyszczeń atmosfery na natężenie promieniowania całkowitego w Krakowie w latach 2012–2021 wykazano, porównując jego przebieg dzienny w wybranych dniach bezchmurnych o różnym stężeniu $PM_{2,5}$ oraz NO_2 w powietrzu. W analizie porównawczej pary dni dobrano w taki sposób, aby pochodziły z jednakowego miesiąca i charakteryzowały się porównywalnymi warunkami synoptycznymi oraz różniły się stężeniem wymienionych zanieczyszczeń. Na tej podstawie przeanalizowano 7 par dni.

Przebieg roczny i dzienny natężenia całkowitego promieniowania słonecznego

W Krakowie w latach 2012–2021 średnie 10-minutowe natężenie promieniowania całkowitego wynosiło $117,2 \text{ W/m}^2$ i zmieniało się w ciągu roku od $220,3 \text{ W/m}^2$ w czerwcu do $22,1 \text{ W/m}^2$ w grudniu (ryc. 1). Od kwietnia do września średnie natężenie przekraczało $100,0 \text{ W/m}^2$, natomiast jedynie w dwóch miesiącach – w czerwcu i lipcu było większe od $200,0 \text{ W/m}^2$.

W Krakowie średnia godzina górowania Słońca przypada na 11:40 czasu UTC+1, jednak czas wystąpienia dobowego maksimum natężenia całkowitego



Ryc. 1. Przebieg roczny średnich 10-minutowych wartości natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie (2012–2021)

Fig. 1. The annual course of average 10-minute values of total radiation intensity (W/m^2) in Krakow (2012–2021)

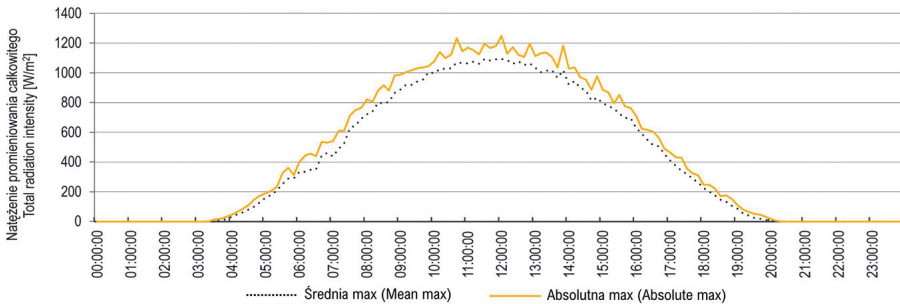
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

promieniowania słonecznego nie zawsze pokrywa się z prawdziwym południem słonecznym (moment górowania Słońca na danym południku). Jak wynika z danych przedstawionych na ryc. 2, średnia maksymalna wartość natężenia promieniowania całkowitego notowana jest o godzinie 12:00 (1093,2 W/m²). Najwyższe absolutne wartości 10-minutowe występują o 11:40 (1231 W/m²) i 12:00 (1249 W/m²).

Zimą w ciągu dnia średnie maksymalne natężenie promieniowania całkowitego od godziny 9:10 do 14:30 przekracza 200,0 W/m², natomiast od 10:10 do 13:20 – 300 W/m² (ryc. 3). Jesienią wartość 300 W/m² zostaje przekroczona w godzinach 8:10–15:00, a 500 W/m² 9:50–13:20 (ryc. 3). Wiosną wartości omawianej charakterystyki są większe od 800,0 W/m² w godz. 10:20–13:20, natomiast latem w godzinach 9:00–14:30. W południe największe średnie natężenie wynosi latem 1019,7 W/m², na wiosnę 889,4 W/m², jesienią 607,7 W/m², a zimą 372,0 W/m².

Na podstawie przebiegu miesięcznych maksymalnych wartości promieniowania całkowitego stwierdzono, że w Krakowie w latach 2012–2021 najwyższą absolutną 10-minutową wartość omawianej charakterystyki odnotowano w czerwcu (ryc. 4). Wyniosła ona 1249,0 W/m², co stanowi aż 91% stałej słonecznej. Grudniowe 10-minutowe maksimum wynoszące 364,0 W/m² stanowiło 29% wartości czerwcowej i 27% stałej słonecznej. Od kwietnia do sierpnia miesięczne wartości maksymalne są większe od 1000,0 W/m² (>73% stałej słonecznej) natomiast przez ponad pół roku – od marca do września – przekraczają 900,0 W/m².

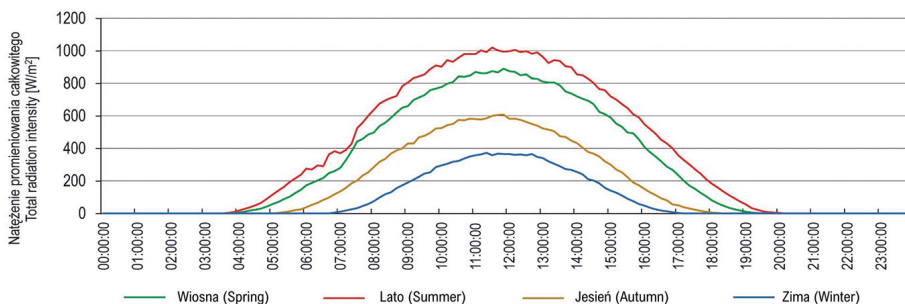


Ryc. 2. Przebieg dobowy średnich maksymalnych 10-minutowych wartości natężenia promieniowania całkowitego (W/m²) i wartości absolutnych w Krakowie (2012–2021)

Fig. 2. The daily mean of 10-minute maximum values of total radiation intensity (W/m²) and absolute values in Krakow (2012–2021)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

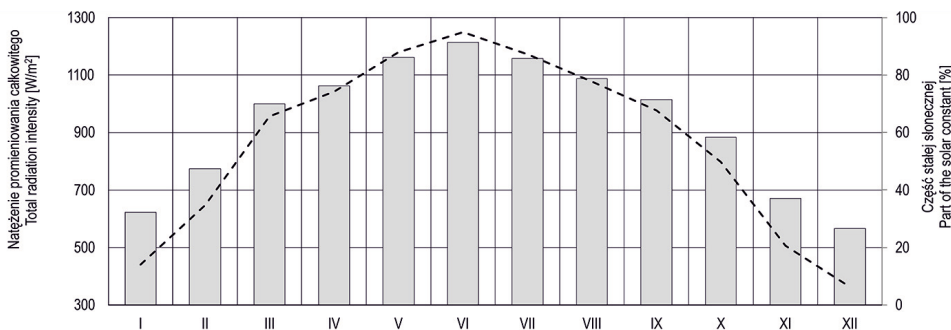
Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.



Ryc. 3. Przebieg dobowy średnich maksymalnych wartości 10-minutowych natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie (2012–2021) w poszczególnych porach roku Fig. 3. The daily mean of 10-minute values of maximum total radiation intensity (W/m^2) in Krakow (2012–2021) by seasons

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.



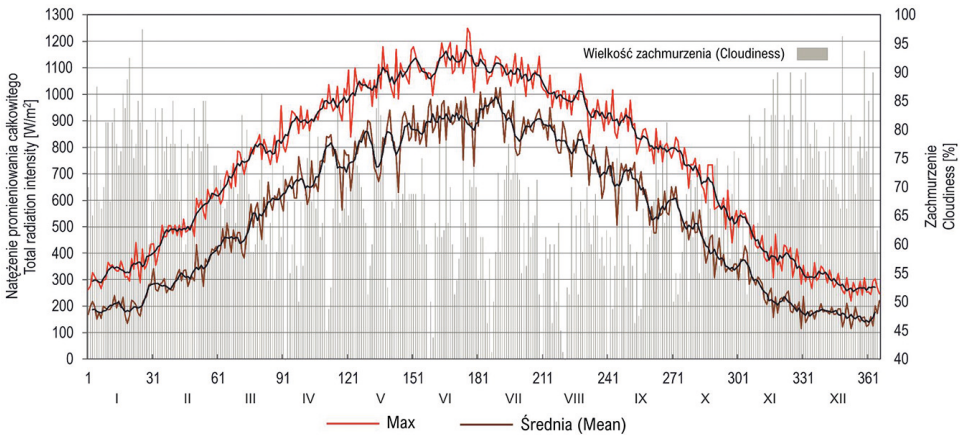
Ryc. 4. Przebieg roczny maksymalnego 10-min natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie w latach 2012–2021 (wykres liniowy) i udział wartości w stałej słonecznej ($1367 \text{ W}/\text{m}^2$) w % (wykres słupkowy)

Fig. 4. The annual course of maximum total irradiance (W/m^2) in Krakow from 2012 to 2021 (line graph) and share of values in solar constant ($1367 \text{ W}/\text{m}^2$) in % (bar graph)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

Kształt krzywej przebiegu rocznego natężenia promieniowania całkowitego (ryc. 5), mimo dużej zmienności z dnia na dzień, nawiązuje do rocznego przebiegu kulminacji Słońca nad horyzontem i długości dnia w Krakowie. Fakt ten świadczy o decydującej roli czynników astronomicznych w kształtowaniu wielkości dopływu promieniowania słonecznego. Jako przyczynę meteorologiczną uwarunkowaną cyrkulacją atmosferyczną można uznać kilkudniowe spadki lub wzrosty wartości natężenia promieniowania całkowitego związane ze zmianą wielkości zachmurzenia w poszczególnych dniach (Matuszko 2009). Przebieg roczny maksymalnego dobowego promieniowania całkowitego wskazuje, że najwyższe 10-minutowe wartości występują nie tylko w czerwcu, ale i w maju (ryc. 5). Natomiast przebieg wartości średnich dobowych maksymalnych wykazuje inny przebieg roczny – najwyższe wartości przypadają na lipiec (ryc. 5). W ciągu całego roku uśrednione maksymalne wartości są o 35% niższe od absolutnych. Największe różnice pomiędzy omawianymi charakterystykami przypadają na sezon wiosenny, natomiast najmniejsze – na okres od listopada do stycznia oraz w lipcu i sierpniu. Najwyższa średnia wartość maksymalnego natężenia promieniowania całkowitego wynosi $1025,3 \text{ W/m}^2$ (lipiec), natomiast najniższa $115,6 \text{ W/m}^2$ (listopad).



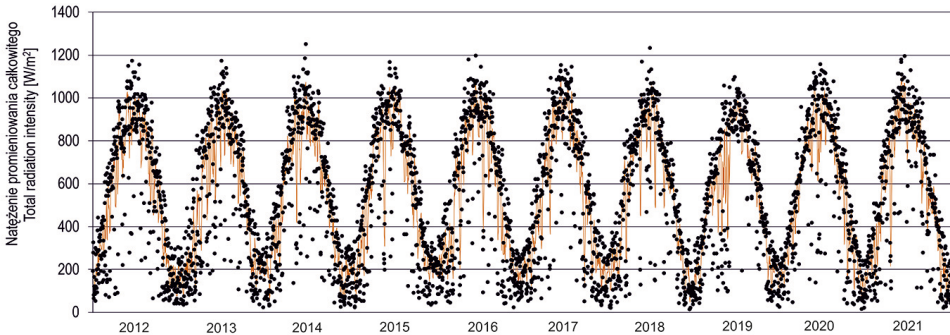
Ryc. 5. Przebieg roczny dziennego 10-minutowego maksymalnego i średniego 10-minutowego natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie w okresie 2012–2021 oraz średnia dobowa wielkość zachmurzenia

Fig. 5. The annual course of the daily 10-minute maximum and average 10-minute total irradiance (W/m^2) in Krakow in the period 2012–2021 and average daily cloud cover

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

W analizowanym 10-leciu maksymalne chwilowe (10-minutowe) natężenie promieniowania całkowitego w Krakowie $>1200,0 \text{ W/m}^2$ (tj. $>88\%$ stałej słonecznej) stwierdzono 25.06.2014 ($1249,0 \text{ W/m}^2$) i 26.06.2018 ($1231,0 \text{ W/m}^2$), a więc niemal w tym samym dniu kalendarzowym wymienionych lat (ryc. 6).



Ryc. 6. Przebieg 10-letni maksymalnego dobowego (10-minutowego) natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie (2012–2021) i średnia konsekutywna (10-dniowa)
Fig. 6. The 10-year course of maximum daily total irradiance (W/m^2) in Krakow (2012–2021) and consecutive average (10 days)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.
Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

Wpływ zachmurzenia na natężenie całkowitego promieniowania słonecznego

Do analizy wpływu zachmurzenia na maksymalne wartości 10-minutowe wykorzystano natężenie promieniowania słonecznego z godziny 12 UTC i wielkość zachmurzenia z tego terminu. Na tej podstawie stwierdzono, że w Krakowie o 12 UTC najwyższe natężenie promieniowania całkowitego występuje przy zachmurzeniu 6/8 w lecie i jesienią oraz 5/8 wiosną i zimą (tab. 1). Najwyższe wartości natężenia promieniowania całkowitego ($>1000,0 \text{ W/m}^2$) wystąpiły głównie w dniach, w których zachmurzenie wynosiło 6/8 (38% przypadków), natomiast nie stwierdzono, aby maksymalne natężenie wystąpiło w warunkach nieba bezchmurnego.

W Krakowie największe średnie godzinne natężenie promieniowania całkowitego stwierdzono przy występowaniu chmur piętra wysokiego oraz gdy Słońce znajdowało się najwyżej nad horyzontem. Szczegółowa analiza wykazała (ryc. 7a), że gdy występowały wszystkie rodzaje chmur piętra wysokiego, natężenie promieniowania

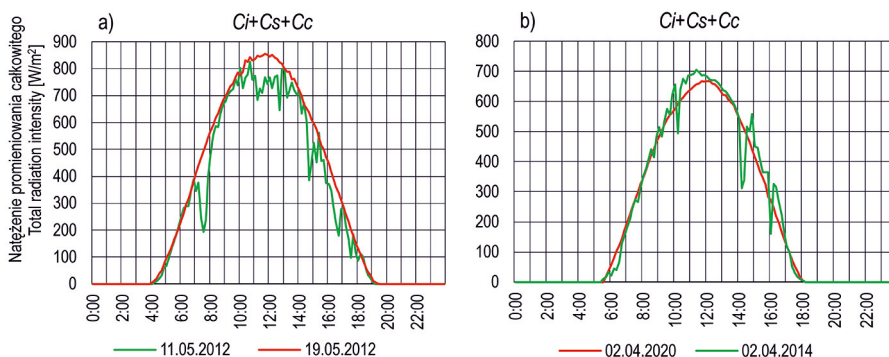
Tab. 1. Wartości maksymalnego natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) o 12 UTC w zależności od wielkości zachmurzenia w terminie południowym (12 UTC) w Krakowie (2012–2021) w poszczególnych porach roku

Table 1. Maximum values of total irradiance (W/m^2) at 12 UTC depending on cloud cover at noon (12 UTC) in Krakow (2012–2021) by seasons

Zachmurzenie w oktantach Cloud cover in oktas	Jesień Autumn	Lato Summer	Wiosna Spring	Zima Winter	Rok Year
0	693,0	852,0	842,0	429,0	852,0
1	700,0	925,0	870,0	471,0	925,0
2	693,0	1067,0	895,0	511,0	1067,0
3	690,0	972,0	940,0	556,0	972,0
4	760,0	1042,0	1047,0	501,0	1047,0
5	708,0	1024,0	1067,0	568,0	1067,0
6	852,0	1112,0	985,0	486,0	1112,0
7	693,0	1057,0	955,0	444,0	1057,0
8	444,0	496,0	720,0	302,0	720,0

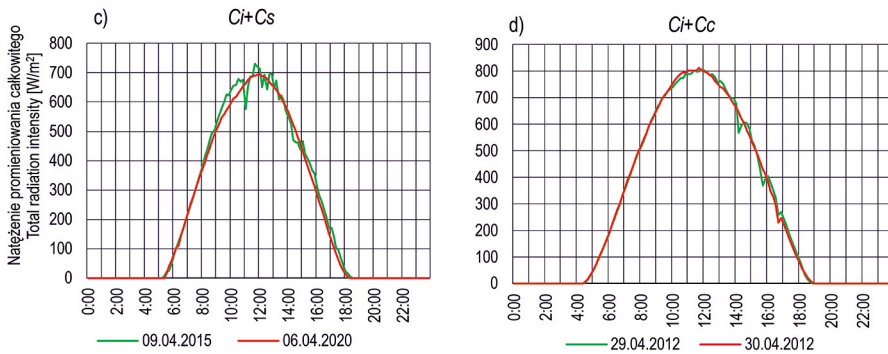
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.



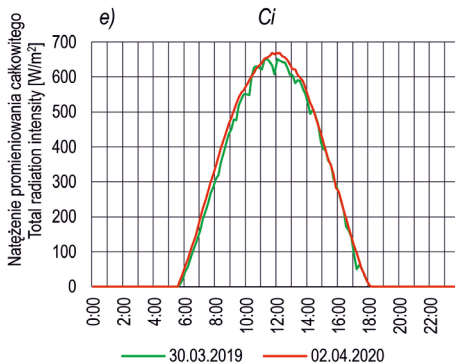
Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	11.05.2012		02.04.2014	
7	5	<i>Ci fib, Cc flo un</i>	1	<i>Ci fib</i>
10	3	<i>Cs, Cc un, Cc flo</i>	4	<i>Cs neb, Ci fib</i>
13	6	<i>Ci unc, Cs, Cc tra*</i>	1	<i>Ci fib</i>
16	6	<i>Cs, Cc, Ci fib in</i>	4	<i>Cc flo, Ci fib, Ac str la</i>
19	6	<i>Ci spi du, Cc ver tra*</i>	2	<i>Ci fib</i>

*homogenitus



Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	09.04.2015		29.04.2012	
7	0		1	<i>Ci</i>
10	3	<i>Ci fib</i>	1	<i>Ci</i>
13	6	<i>Cs fib, Ci fib</i>	2	<i>Ci, Cc</i>
16	5	<i>Cs fib, Ci fib</i>	1	<i>Ci</i>
19	4	<i>Ci fib</i>	1	<i>Ci</i>

*homogenitus



Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL
	30.03.2019	
7	0	brak
10	3	<i>Ci un, Ci fib, Ci tra*</i>
13	3	<i>Ci fib, Ci tra*</i>
16	4	<i>Ci fib in, Ci tra*</i>
19	1	<i>Ci fib</i>

*homogenitus

Ryc. 7. Natężenie promieniowania całkowitego w wybranych dniach z chmurami piętra wysokiego (zielony kolor) w porównaniu z dniami bezchmurnymi (czerwony kolor; a-e). W tabeli zamieszczono informacje o wielkości i strukturze zachmurzenia w analizowanych dniach Fig. 7. The total radiation intensity on days with high cloud cover (green colour) compared to cloudless days (red colour; a-e). The table provides information on the extend and structure of cloud cover on the analysed days

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

całkowitego w ciągu dnia było mniejsze o 11% w porównaniu z dniem bezchmurnym, natomiast dobową wartość maksymalną była mniejsza o 4%. W drugim analizowanym przypadku (ryc. 7b) wyraźnie wyróżniają się godziny, w których natężenie promieniowania całkowitego jest znacznie wyższe niż podczas dnia bezchmurnego. Sumarycznie dzień z występowaniem chmur piętra wysokiego odznacza się większym natężeniem promieniowania całkowitego o 2% i wyższą wartością maksymalną o 5%. Potwierdza to pewną właściwość chmur tego piętra, bowiem ich obecność może powodować wzrost udziału promieniowania rozproszonego, co w efekcie prowadzi do wyższego natężenia całkowitego promieniowania w porównaniu z pogodą bezchmurną (Matuszko 2009).

W dniu, w którym występowały chmury *Cirrus* (*Ci*), wartość strumienia energii była średnio niższa o 5%, natomiast wartość maksymalna o 3% w porównaniu z dniem bezchmurnym. Przebieg dzienny natężenia promieniowania w obu dniach był podobny, jednak wartości były niższe w przypadku wystąpienia *Ci*, co świadczy o osłabieniu promieniowania całkowitego przez ten rodzaj chmur. Stwierdzono, że podczas występowania chmur *Ci+Cc* (*Cirrocumulus*) zarówno średnie natężenie promieniowania, jak i maksymalna wartość 10-minutowa są niemal identyczne jak w dniu bezchmurnym. Co więcej, w ciągu dnia wystąpiły godziny, w których wielkość strumienia energii była wyższa w dniu z zachmurzeniem, co świadczy o efekcie rozpraszania promieniowania na kryształkach lodu budujących chmurę. Efekt ten jest bardziej zauważalny na przykładzie dnia z występowaniem *Ci+Cs* (*Cirrostratus*). W dniu z tymi rodzajami chmur (*Ci+Cs*), wielkość strumienia energii jest średnio większa o 3% w porównaniu z dniem bezchmurnym, a maksymalne natężenie promieniowania całkowitego wyższe o 5%. Istotny wpływ na transmisję promieniowania słonecznego ma wielkość zachmurzenia. Świadczy o tym przypadek z dnia 29.04.2012, w którym we wszystkich terminach obserwacyjnych stopień pokrycia nieba przez chmury nie przekraczał 2/8, co powodowało że przebieg natężenia promieniowania wyglądał podobnie jak w dniu bezchmurnym. Duże zachmurzenie dnia 09.04.2015 (tab. 2) wpływało zarówno na najwyższe spadki (osłabienie promieniowania), jak i zmienność (rozpraszanie promieniowania) wartości.

Chmury *Alto cumulus* (*Ac*) zaliczane do piętra średniego mogą nie tylko osłabiać natężenie promieniowania słonecznego, ale także znacznie podnosić jego chwilową wartość. W pierwszym przypadku (ryc. 8a) dzień z występowaniem chmur *Ac* wykazuje niższe średnie natężenie promieniowania całkowitego o 43% w porównaniu z dniem bezchmurnym, jednak wartość maksymalna jest wyższa o 26%. Co więcej, o godzinie 10:40 UTC+1 wzrost strumienia energii wyniósł aż 32%. Ten chwilowy wzrost stanowi efekt zwiększenia udziału promieniowania rozproszonego. W drugim przypadku (ryc. 8b) zarówno średnie natężenie jak i maksymalna chwilowa wartość była niższa w dniu, w którym stwierdzono obecność *Ac* o odpowiednio 17% i 6%. Chwilowe podwyższenie wartości zaobserwowano głównie w godzinach porannych

Tab. 2. Typy cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej w wybranych parach dni (2012–2021) według klasyfikacji Niedźwiedzia (2022)

Table 2. Atmospheric circulation types for southern Poland on selected pairs of days (2012–2021) according to the Niedźwiedź classification (2022)

Data I Date I	30.01.2012	17.02.2015	13.03.2014	22.04.2013	30.08.2017	09.09.2020	13.10.2018
Masa powietrza Air mass	PPk	PPk	PPk	PPk	PPmc	PPms	PPk
Typ cyrkulacji Circulation type	SEa	Sa	Ca	SEa	SWa	Wa	SEa
Data II Date II	30.01.2017	12.02.2012	15.03.2020	21.04.2020	26.08.2016	07.09.2013	09.10.2021
Masa powietrza Air mass	PPk	PPk	PA	PPk	PPmc	PPk	PPk
Typ cyrkulacji Circulation type	SWa	Ka	Ca	SEa	Sa	Ka	Ea

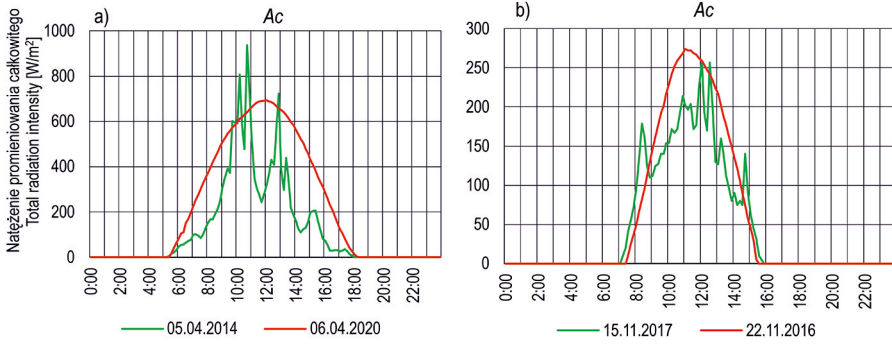
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Kalendarza typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej (Niedźwiedź 2022).

Source: own compilation based on the data from the Calendar of atmospheric circulation types for southern Poland (Niedźwiedź 2022).

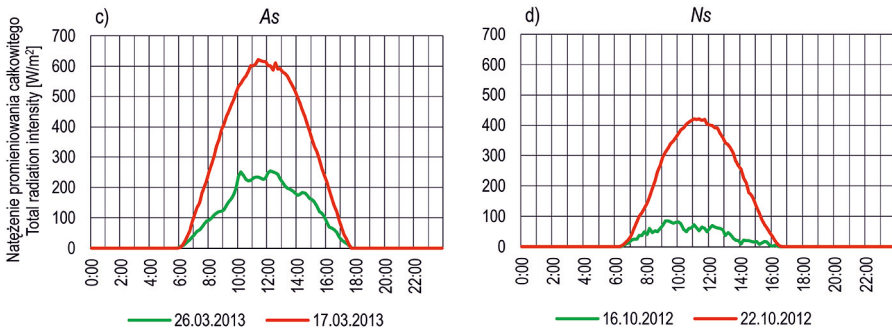
i popołudniowych. O godzinie 8:20 natężenie promieniowania całkowitego było wyższe w dniu z Ac o 54% w porównaniu z dniem bezchmurnym.

Spośród chmur piętra średniego *Altostratus* (*As*) i *Nimbostratus* (*Ns*) powodują znaczne osłabienie wielkości strumienia promieniowania słonecznego, w przypadku *As* wynosi ono 61%, natomiast *Ns* aż 83%. Chwilowe natężenie maksymalne jest niższe w dniu z chmurami *Ns* o 80%, a *As* o 59%. Należy jednak zaznaczyć, że we wszystkich przypadkach wielkość zachmurzenia w terminie południowym nie była mniejsza od 7/8.

W przypadku chmur *Stratocumulus* (*Sc*) możliwe jest zarówno znaczne osłabienie natężenia promieniowania całkowitego, jak i chwilowe zwiększenie wartości (ryc. 9). W pierwszym analizowanym przypadku (ryc. 9a) wystąpiły jedynie chmury *Sc*, a zachmurzenie we wszystkich terminach obserwacyjnych przed zachodem Słońca wyniosło 8/8. Osłabienie średniego natężenia strumienia energii wyniosło 83%, natomiast wartości maksymalnej 69%. W drugim przypadku (ryc. 9b) tylko rano było zachmurzenie całkowite, a w kolejnych terminach zmniejszało się i w godzinach około południowych wynosiło 2/8. O 12 UTC chmurom *Sc* towarzyszyły również



Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	05.04.2014		15.11.2017	
7	7	<i>Ac str op</i>	1	<i>Ac str</i>
10	7	<i>Ac str la, Ac tr, Cc flo</i>	7	<i>Ac str pe</i>
13	7	<i>Ac str op un, Ac tr</i>	7	<i>Ac str pe</i>
16	8	<i>Ac str op</i>	4	<i>Ac str, Ac flo</i>
19	8	<i>As op</i>	7	<i>Ac str</i>



Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	26.03.2013		16.10.2012	
7	8	<i>As op</i>	8	<i>Ns</i>
10	8	<i>As tr</i>	8	<i>Ns</i>
13	8	<i>As tr</i>	8	<i>Ns</i>
16	8	<i>As tr</i>	8	<i>Ns</i>
19	8	<i>As</i>	8	<i>Sc</i>

chmury *Cumulus fractus* (*Cu fra*). Osłabienie średniego natężenia promieniowania całkowitego wyniosło w tym przypadku 51%, jednak należy zaznaczyć wyraźny nagły wzrost wartości o 11:50 UTC+1. Wartość maksymalna jest więc wyższa w dniu z występowaniem chmur *Sc* o 12% w porównaniu z dniem bezchmurnym.

Najmniejszą transmisję promieniowania słonecznego kolejno po chmurach *Ns* wykazuje *Stratus* (*St*). Porównując dni 24.01.2017 i 25.01.2017 z dniem bezchmurnym, wyraźnie zaznacza się spadek natężenia w dniu z *St*, jednak wielkość osłabienia jest większa w drugim dniu, w którym stwierdzono obecność tych chmur z odmiany *opacus* (*op*). W dniu 24.01.2017 średnie natężenie jest niższe o 76% w porównaniu z dniem bezchmurnym, natomiast 25.01.2017 – aż o 86%. Maksymalna wartość strumienia energii jest niższa odpowiednio o 58% i 81% oraz przypada na podobną godzinę.

Chmury o budowie pionowej znacznie podwyższają 10-minutowe wartości natężenia promieniowania całkowitego, o czym świadczy analiza studium przypadku z występowaniem samych chmur *Cu* oraz grupy składającej się z *Cu+Cb+Ac+Sc*. W dniu 07.08.2016 w terminach 9 i 12 UTC stwierdzono obecność *Cu hum* i *Cu med*, co zbiegło się z czasem występowania najwyższych wartości natężenia promieniowania (od 10:30 do ok. 13:00 UTC+1). Wartość maksymalna była wyższa w dniu z *Cu* o 19% w porównaniu z dniem bezchmurnym, jednak średnie natężenie promieniowania całkowitego było niższe o 7%. Co więcej, najwyższa rozbieżność pomiędzy wartościami wystąpiła o 12:30, kiedy natężenie przy *Cu* było wyższe o 23%. W drugim analizowanym przypadku średnie natężenie było niższe przy *Cu+Cb+Ac+Sc* o 17% w porównaniu z dniem bezchmurnym. W przebiegu analizowanej charakterystyki w dniu 21.08.2017 wyraźnie zaznaczają się godziny, w których chwilowe wartości znacznie przekraczają natężenie z dnia bezchmurnego, szczególnie w pierwszej połowie dnia, kiedy wystąpiły rozbudowane *Cu med*, *Cu con*, a nawet *Cumulonimbus calvus* (*Cb cal*). Największa różnica pomiędzy wartościami wystąpiła o 11:40 UTC+1, kiedy natężenie w dniu z chmurami było wyższe aż o 20%. Najwyższa wartość stwierdzona przy *Cu+Cb+Ac+Sc* jest o 15% większa w porównaniu z natężeniem maksymalnym podczas dnia bezchmurnego

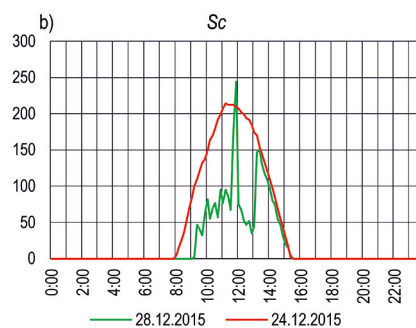
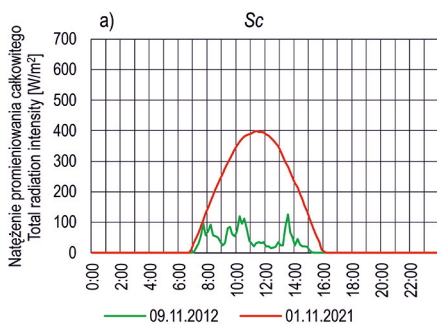


Ryc. 8. Natężenie promieniowania całkowitego w dniu z chmurami piętra średniego (zielony kolor) w porównaniu z dniami bezchmurnymi (czerwony kolor; *a-d*). W tabeli zamieszczono informacje o wielkości i strukturze zachmurzenia w analizowanych dniach

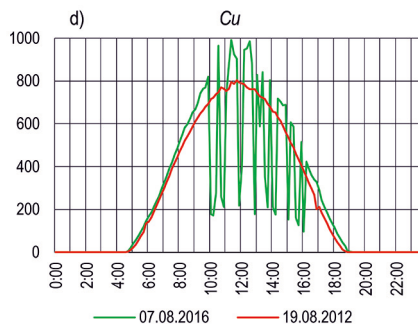
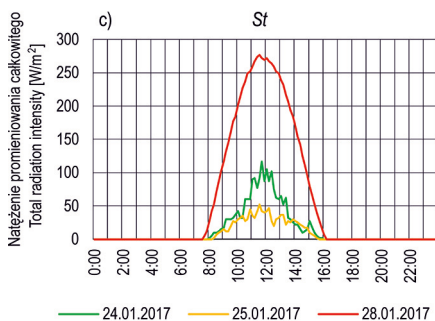
Fig. 8. The total radiation intensity on a day with medium cloud cover (green colour) compared to cloudless days (red colour; *a-d*). The table provides information on the extend and structure of cloud cover on the analysed days

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

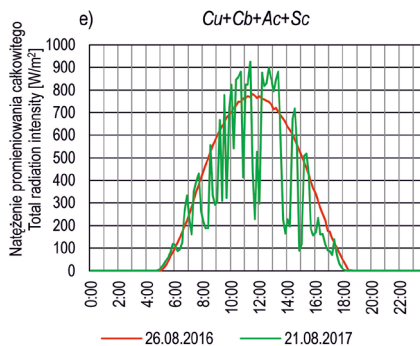


Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	09.11.2012		28.12.2015	
7	8	<i>Sc</i>	8	<i>Sc str, St fra</i>
10	8	<i>Sc</i>	5	<i>Sc str pe</i>
13	8	<i>Sc</i>	3	<i>Sc op, Cu fra</i>
16	8	<i>Sc</i>	3	<i>Sc str</i>
19	3	<i>Sc</i>	2	<i>Sc str tr</i>



Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL	N	CH, CM, CL
	24.01.2017		25.01.2017		07.08.2016	
7	8	<i>St neb</i>	8	<i>St neb</i>	1	<i>Cu fra</i>
10	8	<i>St neb</i>	8	<i>St neb op</i>	4	<i>Cu fra, hum, med</i>
13	8	<i>St neb</i>	8	<i>St neb op</i>	4	<i>Cu fra, hum, med</i>
16	8	<i>St neb</i>	8	<i>St neb op</i>	2	<i>Cu fra, hum</i>
19	8	<i>St neb</i>	8	<i>St neb</i>	0	brak

Godzina Hour UTC+1	N	CH, CM, CL
		26.08.2016
7	5	Sc str, Ac flo, Ac str
10	2	Cu med
13	4	Cu con, Cu med, Cb cal
16	5	Cu con, Sc cugen, Ac pe
19	7	Sc str, Cb



Ryc. 9. Natężenie promieniowania całkowitego w dniu z chmurami piętra niskiego (zielony kolor) w porównaniu z dniami bezchmurnymi (czerwony kolor; a-e). W tabeli zamieszczono informacje o wielkości i strukturze zachmurzenia w analizowanych dniach

Fig. 9. The total radiation intensity on a day with low cloud cover (green colour) compared to cloudless days (red colour; a-e). The table provides information on the amount and structure of cloud cover on the days analysed

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station.

Wpływ zanieczyszczeń powietrza na natężenie promieniowania całkowitego w warunkach pogody bezchmurnej

Wpływ zanieczyszczeń atmosfery na dopływ promieniowania słonecznego w Krakowie w latach 2012–2021 wykazano, porównując rozkład dobowy średniego 10-minutowego natężenia promieniowania całkowitego w wybranych dniach bezchmurnych z przebiegiem średniego 1-godzinnego stężenia $PM_{2.5}$ oraz NO_2 .

Dni bezchmurne w latach 2012–2021 występowały najczęściej na przełomie zimy i wiosny oraz jesienią. W tym okresie występuje w Krakowie okres grzewczy, co stwarza korzystne warunki do badań wpływu zanieczyszczeń na osłabienie natężenia promieniowania słonecznego. W analizowanym 10-leciu największe stężenie PM_{10} występuje w sytuacji antycyklonalnej, podczas zalegania powietrza PPK. Do analizy wpływu zanieczyszczeń wybrano dni z miesięcy od stycznia do kwietnia oraz od sierpnia do października, to w nich bowiem wystąpiły przypadki z porównywalnymi warunkami synoptycznymi (tab. 2). Należy zaznaczyć, że wartości stężeń poszczególnych zanieczyszczeń analizowano w odniesieniu do dnia, traktowanego jako czas od wschodu do zachodu Słońca.

W ciągu roku wpływ pyłów zawieszonych na osłabienie natężenia promieniowania słonecznego zaznacza się najbardziej w miesiącach zimowych. W styczniu, 30.01.2012 roku, średnie stężenie PM_{10} wynosiło $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 30.01.2017 roku blisko 4 razy więcej ($333 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Na podstawie przebiegu natężenia promieniowania całkowitego stwierdzono znaczne różnice w wartościach, zwłaszcza w drugiej połowie dnia (ryc. 10). Średnie natężenie promieniowania całkowitego od godziny 10:00 aż do zachodu słońca jest niższe w dniu 30.01.2017 o 20% (o średnio $48 \text{ W}/\text{m}^2$) w porównaniu z 30.01.2012. Znacznie wyższe stężenie $PM_{2,5}$ i stale rosnące NO_2 w drugiej połowie dnia w 2017 roku jest zbieżne z okresem największych różnic w wielkości strumienia energii pomiędzy omawianymi dniami.

W lutym do analizy wykorzystano dane z dni 17.02.2015 i 12.02.2012 roku. Średnia dobowo wartość stężenia PM_{10} wyniosła w 2015 roku $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast w 2012 r. blisko 6 razy więcej ($345 \mu\text{g}/\text{m}^3$). W dniu 12.02.2012 osłabienie promieniowania słonecznego przez zanieczyszczenia powietrza jest zauważalne niemal przez cały dzień, wielkość strumienia energii jest bowiem niższa o średnio $51 \text{ W}/\text{m}^2$. W przebiegu natężenia promieniowania całkowitego stwierdzono wahania wartości, które przypadają na godziny najwyższych stężeń $PM_{2,5}$ i NO_2 .

W miesiącach wiosennych ze względu na zakończenie sezonu grzewczego spada stężenie zanieczyszczeń w powietrzu, a w szczególności pyłów zawieszonych. Rośnie natomiast stężenie NO_2 . Na podstawie analizy wybranych dni z marca i kwietnia stwierdzono, że wpływ zanieczyszczeń powietrza na przebieg natężenia promieniowania całkowitego w tych miesiącach jest znacznie mniejszy niż w sezonie zimowym. W marcu i kwietniu największe rozbieżności w przebiegu natężenia promieniowania całkowitego (spowodowane różnym stężeniem zanieczyszczeń) występują głównie w pierwszej połowie dnia.

W marcu, 13.03.2014 roku, średnie dobowe stężenie PM_{10} wyniosło $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 15.03.2020 o niemal $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mniej ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Od 6:10 do 13:30 różnica w wartościach natężenia promieniowania całkowitego wynosi średnio $30 \text{ W}/\text{m}^2$. Jest to zbieżne z występowaniem największych różnic w stężeniu zanieczyszczeń w ciągu dnia pomiędzy terminami. W dniu 15.03.2020 maksymalne natężenie promieniowania całkowitego wystąpiło o 12:00 ($608 \text{ W}/\text{m}^2$), natomiast w drugim dniu o tej samej godzinie wartość strumienia energii była o $37 \text{ W}/\text{m}^2$ mniejsza. Wyrównanie przebiegów natężenia promieniowania całkowitego zaobserwowane około godz. 10:00 mogło być spowodowane wysoką wartością $PM_{2,5}$ przy jednocześnie malejącym stężeniu NO_2 , natomiast po godz. 14:00 – najniższymi wartościami NO_2 i postępującym spadkiem zawartości $PM_{2,5}$.

W kwietniu zawartość zanieczyszczeń w powietrzu staje się coraz niższa, co determinuje mniejsze różnice zarówno w przebiegu koncentracji zanieczyszczeń powietrza, jak i natężenia promieniowania całkowitego, co widać na przykładzie 22.04.2013 i 21.04.2020. W pierwszym wymienionym dniu średnia dobowo zawar-

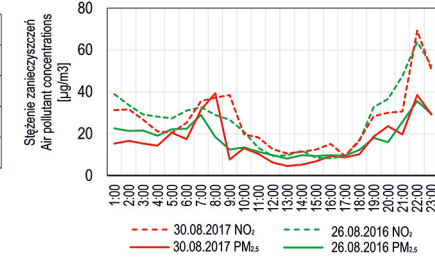
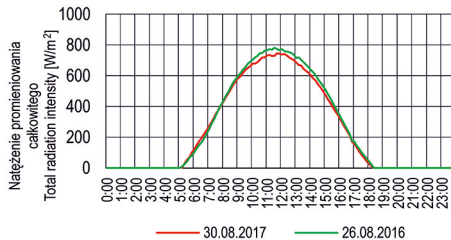
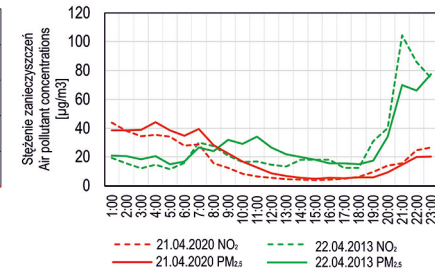
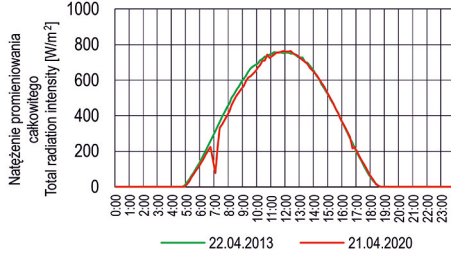
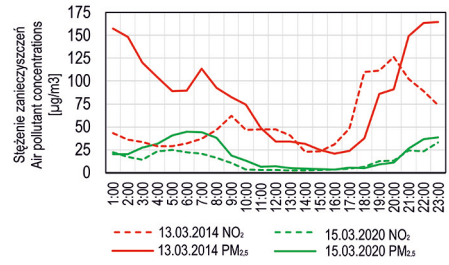
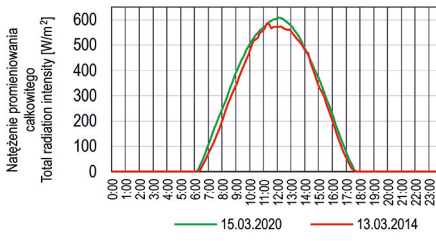
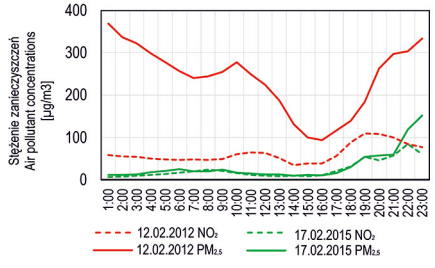
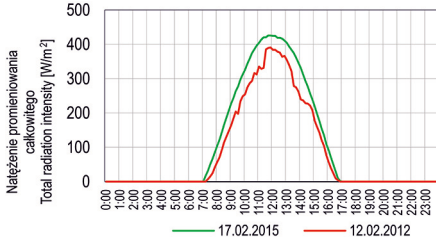
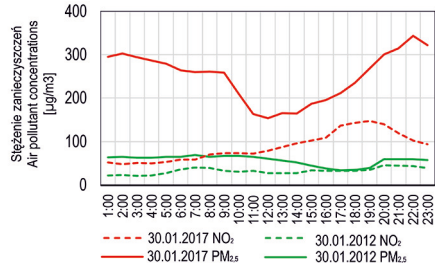
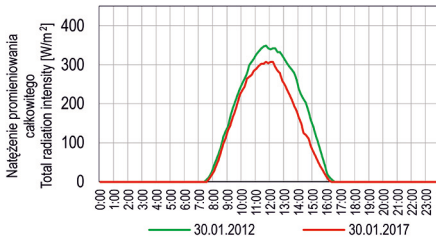
tość PM_{10} wyniosła $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast w drugim – o $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mniej ($32 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Od godziny 6:50 do ok. 9:50 wystąpiły największe różnice w natężeniu promieniowania (średnio $58 \text{ W}/\text{m}^2$). Należy zaznaczyć, że w odróżnieniu od poprzednich analizowanych przypadków w dniu z wyższym średnim dobowym stężeniem zanieczyszczeń (22.04.2013) stwierdzono wyższe wartości natężenia promieniowania słonecznego, szczególnie od wschodu Słońca do 11:10 (o średnio $36 \text{ W}/\text{m}^2$). Może być to spowodowane zwiększeniem udziału promieniowania rozproszonego w całkowitym, w wyniku jego rozpraszania na cząstkach pyłu. Należy zaznaczyć, że najwyższe stężenie $PM_{2,5}$ w dniu 22.04.2013 wystąpiło o godz. 11:00 ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

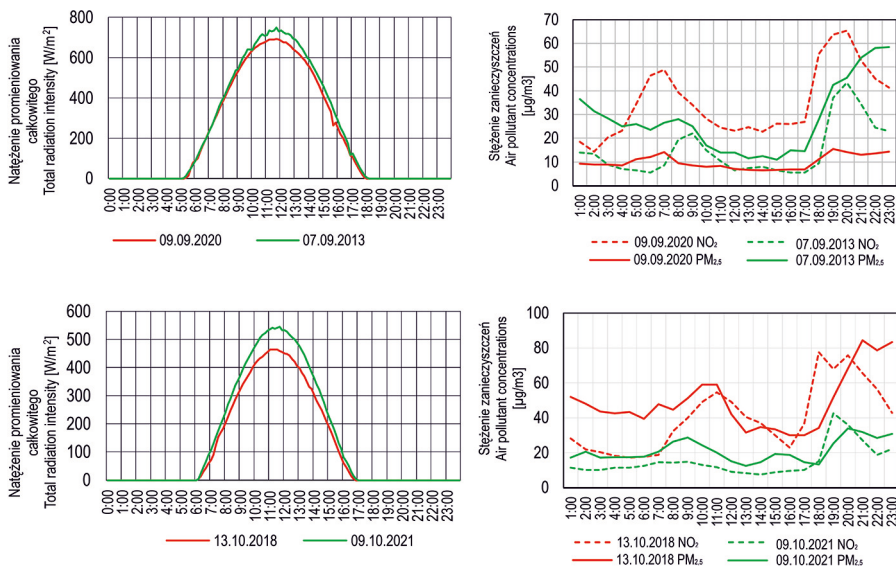
W wybranych dniach sezonu letniego i jesiennego, wpływ zanieczyszczeń na promieniowanie całkowite zaznacza się najbardziej w godzinach okołopołudniowych. Szczególnie w przypadkach wysokich stężeń NO_2 , które mają większe znaczenie w modyfikacji strumienia energii w sezonie letnim niż pyły zawieszone.

W sierpniu, w dniu 30.08.2017, średnie dobowe stężenie PM_{10} wyniosło $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 26.08.2016 – $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wartości są niemal identyczne, jednak większe stężenie NO_2 w godzinach popołudniowych może mieć wpływ na osłabienie promieniowania całkowitego. W godzinach 10:00–15:00 wielkość strumienia energii w 2016 roku była większa niż w 2017 roku o średnio $36 \text{ W}/\text{m}^2$. Wartość maksymalna natężenia promieniowania różni się o $38 \text{ W}/\text{m}^2$ przy nieznacznych różnicach w stężeniu zanieczyszczeń, jednak przy znacznej insolacji wynikającej z wysokości Słońca nad horyzontem.

We wrześniu, w dniu 09.09.2020, średnie dobowe stężenie PM_{10} wyniosło $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 07.09.2013 niemal dwa razy więcej – $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Większe znaczenie ma jednak NO_2 , którego stężenie w ciągu dnia było znacznie wyższe w 2013 roku, co może powodować osłabienie dopływu promieniowania całkowitego – zwłaszcza w południe przy znacznej insolacji. Przebieg wielkości strumienia energii wykazuje największe różnice w godzinach 11:10–13:30 (o średnio $48 \text{ W}/\text{m}^2$). W obu dniach najwyższa wartość przypada na 11:40 i wynosi $748 \text{ W}/\text{m}^2$ w 2013 roku i o $55 \text{ W}/\text{m}^2$ mniej w 2020 roku.

W październiku w dniu 13.10.2018 średnie dobowe stężenie PM_{10} wyniosło $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast 09.10.2021 było o połowę mniejsze ($33 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Największe różnice w przebiegu natężenia promieniowania słonecznego pojawiły się od 10:20 do 13:40 (średnio $77 \text{ W}/\text{m}^2$) i przypadały na czas największych rozbieżności w wartościach zanieczyszczeń pomiędzy analizowanymi dniami. Natężenie maksymalne w dniu 09.10.2021 wystąpiło o 11:40 ($546 \text{ W}/\text{m}^2$), natomiast 13.10.2018 w godzinach 11:00–11:30 ($464 \text{ W}/\text{m}^2$). Różnica wynosi więc $87 \text{ W}/\text{m}^2$ – najwięcej w ciągu całego dnia.





Ryc. 10. Przebieg średnich 10-minutowych wartości natężenia promieniowania całkowitego (W/m^2) w Krakowie w wybranych dniach oraz przebiegi średnich 1-godzinnych wartości stężenia NO_2 (przerywana linia) i $PM_{2.5}$ (ciągła linia).

Fig. 10. The course of the 10-minute average values of the total radiation intensity (W/m^2) in Kraków on selected days and the course of the 1-hour average values of NO_2 (dashed line) and $PM_{2.5}$ (solid line) concentration.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych ze stacji Ogród Botaniczny UJ.

Source: own elaboration based on the data obtained from the JU Botanical Garden station

Dyskusja wyników

Problem modyfikacji wielkości strumienia promieniowania słonecznego przez chmury i zanieczyszczenia, mimo fundamentalnego znaczenia dla badań klimatu, do tej pory nie znalazł dostatecznego wyjaśnienia w literaturze klimatologicznej (np. IPCC 2007, Bony i in. 2015).

Wiedza na ten temat jest ciągle niewystarczająca, między innymi z powodu zmienności i nieprzewidywalności zachmurzenia, a także dlatego, że brakuje wiarygodnych, jednorodnych wieloletnich danych klimatologicznych (Wibig 2008). Niewielu klimatologów zajmuje się problemem rocznego przebiegu zachmurzenia na podstawie danych dobowych (Fortuniak i in. 1998). Powodem jest m.in. to, że interpretacja przyczyn występowania wahań w przebiegu zachmurzenia nie jest prosta

(Kozuchowski 2000). Większość publikacji związanych z zachmurzeniem dotyczy tylko wielkości zachmurzenia, a zdaniem Warakomskiego (1962) zachmurzenie rozpatrywane wyłącznie jako stopień pokrycia nieba przez chmury, w oderwaniu od ich rodzajów, nie daje jeszcze właściwego pojęcia o stosunkach nefologicznych.

Potwierdzeniem wyników dotyczących wpływu zanieczyszczeń na stosunki radiacyjne są badania prowadzone m.in. w Chinach. Jak podają Luo i in. (2019), $PM_{2.5}$ może skuteczniej rozpraszać promieniowanie słoneczne w porównaniu z PM_{10} . Znaczącą rolę w absorpcji odgrywa zaś NO_2 (Solomon i in. 1999), którego głównym źródłem na obszarach o dużym natężeniu ruchu są emisje zanieczyszczeń komunikacyjnych.

W obszernej literaturze klimatologicznej na temat promieniowania słonecznego stosunki radiacyjne badane są zwykle w atmosferze bezchmurnej (Olecki 1973, 1975, 1992, Hess i in. 1980, Hess, Olecki 1990), a wpływ zachmurzenia na natężenie promieniowania słonecznego analizuje się przez porównanie przebiegu dziennego natężenia promieniowania w dniu bezchmurnym i z zachmurzeniem (Robinson 1977; Estupiñán, Raman 1996; Kuchinke, Nunez 1999; Podstawczyńska 2007; Matuszko 2009; Nguyen Huu 2018). Wymienione publikacje oparte są na danych pochodzących z kilkudniowych serii pomiarowych z konkretnych miejsc ze względu na niską dostępność danych pomiarowych.

Z powyższych powodów w niniejszym artykule przedstawiono analizę studium przypadków przebiegu natężenia całkowitego promieniowania słonecznego z wybranych dni z 10-lecia 2012–2021. Uwzględniono zarówno wpływ wielkości zachmurzenia, jak i rodzajów chmur, a także stężenie zanieczyszczeń na natężenie promieniowania słonecznego. Otrzymane wyniki potwierdzają rezultaty badań prowadzonych przez innych klimatologów, co świadczy o istnieniu wykrytych relacji pomiędzy badanymi zmiennymi. Chociaż przedstawione badania oparte były na danych z krótkiej serii pomiarowej i tylko z jednej stacji, to są unikatowe i stanowią ważny wkład do badań klimatologicznych,

Wnioski

Analiza wyników pomiarów natężenia całkowitego promieniowania słonecznego, stężenia $PM_{2.5}$ i NO_2 oraz obserwacji zachmurzenia z lat 2012–2021 w Krakowie pozwala sformułować kilka wniosków dotyczących wpływu zachmurzenia i zanieczyszczeń powietrza na natężenie promieniowania słonecznego:

1. Chwilowe wartości natężenia promieniowania całkowitego zależą nie tylko od wielkości zachmurzenia, ale także od rodzajów, gatunków i odmian chmur.
2. Chmury piętra wysokiego mają najmniejszy wpływ na wartość natężenia promieniowania całkowitego, jednak obecność $Ci+C_s$ wiąże się zarówno z największą ekstynkcją, jak i rozpraszaniem promieniowania słonecznego, czyli chmury

te mogą zarówno podwyższać, jak i osłabiać natężenie promieniowania całkowitego w porównaniu z dniem bezchmurnym.

3. Największe osłabienie wielkości strumienia energii stwierdzono przy chmurach *St* i *Ns*. Obniżenie natężenia promieniowania wystąpiło także w obecności pozostałych rodzajów chmur.
4. Chmury *Cu*, *Cb*, *Ac* i *Sc* mogą powodować chwilowy wzrost natężenia promieniowania w stosunku do warunków bezchmurnych na skutek efektu lustrzanego.
5. Zanieczyszczenia powietrza w środowisku miejskim doprowadzają do obniżenia wielkości strumienia energii słonecznej. Należy jednak zaznaczyć, że w niektórych przypadkach pyły zawieszane mogą powodować rozpraszanie promieniowania słonecznego i chwilowe podwyższenie wartości, co zauważono szczególnie w ciepłej połowie roku.

Literatura

- Bogdańska B., Podogrocki J., 2000, *Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995*, Materiały Badawcze, Meteorologia, 30, IMGW, Warszawa.
- Bogdańska B., Podogrocki J., Zóltowska K., 2002, *Sieć pomiarów promieniowania słonecznego w Polsce i baza danych aktywnościowych*, [w:] G. Wójcik, K. Marciniak (red.), *Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*, Sympozjum Klimatologiczne na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, 16–17.09.1993, Toruń, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 55–70.
- Bony S., Stevens B., Frierson D.M.W., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T.G., Sherwood S.C., Siebesma A.P., Sobel A.H., Watanabe M., Webb M.J., 2015, *Clouds, circulation and climate sensitivity*, *Nature Geoscience*, 8, 261–268.
- Estupiñán J.G., Raman S., 1996, *Effects of clouds and haze on UV-B radiation*, *Journal of Geophysical Research*, D11, 16807–16816.
- Falarz M., Małarzewski Ł., Uscka-Kowalkowska J., Matuszko D., Budzik T., 2021, *Solar radiation change*, [w:] M. Falarz (red.), *Climate change in Poland: Past, present, future*, Springer Nature Switzerland, Cham, 177–188, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8_8.
- Fortuniak K., Kożuchowski K., Papiernik Ż., 1998, *Roczny rytm klimatu Polski i jego sezonowe osobliwości*, *Przegląd Geograficzny*, 70, 3–4, 283–304.
- Hess M., Leśniak B., Olecki Z., Rauczyńska-Olecka, 1980, *Wpływ krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej na promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 51, 7–73.
- Hess M., Olecki Z., 1990, *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 77, 29–43.
- Howard L., 1818, *The Climate of London*, tom 1, W. Phillips, Londyn.

- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge–New York.
- Kożuchowski K. (red.), 2000, *Pory roku w Polsce – sezonowe zmiany w środowisku a wieloletnie tendencje klimatyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kuchinke C., Nunez M., 1999, *Cloud transmission estimates of UV-B erythema irradiance*, Theoretical and Applied Climatology, 63, 149–161.
- Luo H., Han Y., Lu C., Wu Y., 2019, *Characteristics of surface solar radiation under different air pollution conditions over Nanjing, China: observation and simulation*, Advances in Atmospheric Sciences, 36, 1047–1059.
- Matuszko D., 2009, *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Matuszko D., 2012a, *Influence of cloudiness on sunshine duration*, International Journal of Climatology, 32, 1527–1536.
- Matuszko D., 2012b, *Influence of the extent and genera of cloud cover on solar radiation intensity*, International Journal of Climatology, 32, 2403–2414.
- Matuszko D., 2014, *Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration*, International Journal of Climatology, 34, 228–234.
- Matuszko D., Soroka J., 2009, *Spostrzeżenia dotyczące wpływu zachmurzenia na maksymalne wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego*, Prace Geograficzne, 122, 39–48.
- Matuszko D., Bartoszek K., Soroka J., 2022, *Long-term variability of cloud cover in Poland (1971–2020)*, Atmospheric Research, 268, 1–13.
- Nguyen Huu Ż., 2018, *Próba określenia wpływu zachmurzenia na natężenie promieniowania całkowitego, UV-A i UV-B w Krakowie [w:] Współczesne problemy i kierunki badawcze w geografii*, 6, IGIGP UJ, Kraków, 145–168.
- Niedźwiedz T., 2022, *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór udostępniony przez autora*, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Olecki Z., 1973, *Wpływ miasta na niektóre elementy bilansu radiacyjnego na przykładzie Krakowa*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 32, 105–118.
- Olecki Z., 1975, *Oddziaływanie dużego ośrodka miejsko-przemysłowego na dopływ promieniowania słonecznego (na przykładzie Krakowa)*, Prace Geograficzne, 41, 37–86.
- Olecki Z., 1992, *Przeźroczystość atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej*, Prace Geograficzne, 90, 25–32.
- Podstawczyńska A., 2007, *Cechy solarne klimatu Łodzi*, Acta Geographica Lodziensia, Folia Geographica Physica, 7, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Robinson P. J., 1977, *Measurements of downwards scattered solar radiation from isolated Cumulus clouds*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 16, 620–625.
- Schneider T., Kaul C.M., Pressel K.G., 2019, *Possible climate transitions from breakup of strato-cumulus decks under greenhouse warming*, Nature Geoscience, 12, 163–167.

- Solomon S., Portmann R.W., Sanders R.W., Daniel J.S., Madsen W., Bartram B., 1999, *On the role of nitrogen dioxide in the absorption of solar radiation*, Journal of Geophysical Research, 104, 12047–12058.
- Uscka-Kowalkowska J., 2019, *Bezpośrednie promieniowanie słoneczne w Polsce w latach 1966–2010*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.
- Warakomski W., 1962, *O częstości występowania poszczególnych rodzajów chmur w Polsce*, Przegląd Geofizyczny, 7(15), 3, 185–192.
- Wibig J., 2008, *Cloudiness variations in Łódź in the second half of the 20th century*, International Journal of Climatology, 28, 4, 479–491.

Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
d.matuszko@uj.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1909-6519

