

# WPŁYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA ILOŚĆ CAŁKOWITEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DOCIERAJĄCEGO DO POWIERZCHNI ZIEMI W BELSKU (1971–2014)

KINGA NELKEN

Zakład Klimatologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

**Abstract:** This paper analyses the amount of global solar radiation reaching the ground in Belsk, depending on the atmospheric circulation type. The study used daily sums of global solar radiation from 1971–2014 as well as the calendar of circulation types as developed by Lityński. The largest differences in the amount of solar radiation among the particular circulation types occur in the summer. The largest sums of solar radiation are observed during inflows of air masses from S and SW, and the smallest during the inflow from N, NE, and NW. On sunny days, the reduction of the incoming solar radiation is associated with the S and SW directions.

**Keywords:** atmospheric circulation, circulation calendar, solar radiation, Belsk

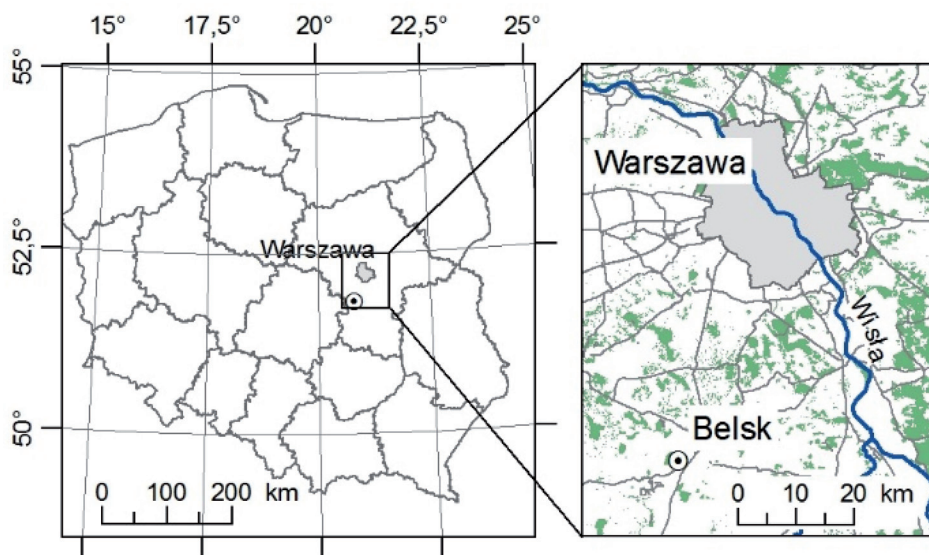
## WSTĘP

Promieniowanie słoneczne jest kluczowym elementem systemu klimatycznego na ziemi i jedną z najważniejszych zmiennych w bilansie energetycznym powierzchni czynnej. Rozkład promieniowania słonecznego na kuli ziemskiej wpływa na kształtowanie cyrkulacji atmosferycznej, a cyrkulacja atmosfery modyfikuje ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi (przez wielkość zachmurzenia lub przezroczystość mas powietrza). Te dwa komponenty wzajemnie na siebie oddziałują, a wpływ ten nie jest do końca poznany. Dlatego istotne wydaje się badanie wzajemnych zależności między ilością promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi a cyrkulacją atmosferyczną. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na inne elementy klimatu, m.in. pole temperatury i opadów, jest już stosunkowo dobrze poznany i opisany w literaturze, natomiast do tej pory mało miejsca poświęcono wpływowi cyrkulacji atmosferycznej na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi. Problemem tym w kontekście przezroczystości poszczególnych rodzajów mas powietrza zajmowali się m.in. Niedziałek (1981, 1983a, 1983b), Więclaw (2011), a wpływem cyrkulacji atmosferycznej na poszczególne elementy klimatu, w tym na promieniowanie słoneczne, m.in. Dubicka

(1994), Chiacchio i Vitolo (2012), Panziera i in. (2015). Ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi zależy też od innych czynników, takich jak naturalne czy antropogeniczne zmętnienie atmosfery (Olecki 1992; Uscka-Kowalkowska 2008, 2009) oraz zachmurzenie (Matuszko 2009). W niniejszym opracowaniu przeanalizowano ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi w Belsku w zależności od typu cyrkulacji atmosferycznej. Celem opracowania jest próba wskazania, które typy cyrkulacji atmosferycznej (bądź kierunki adwekcji mas powietrza) wiążą się z występowaniem zwiększonych dobowych sum promieniowania całkowitego, które natomiast sprzyjają występowaniu zmniejszonych dobowych sum promieniowania.

## MATERIAŁY I METODY BADAŃ

W opracowaniu wykorzystane zostały sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego pochodzące ze stacji Polskiej Akademii Nauk w Belsku z lat 1971–2014 (44 lata). Stacja ta jest położona w znacznej odległości od dużych ośrodków miejskich i przemysłowych (ryc. 1). Dzięki temu zmętnienie atmosfery wywołane przez czynniki antropogeniczne jest stosunkowo niewielkie, a to pozwala na badanie zależności ilości promieniowania docierającego do powierzchni ziemi od cyrkulacji atmosfery. W analizie wykorzystano także kalendarz typów cyrkulacji Lityńskiego (1969) w jego nowej wersji



Ryc. 1. Położenie stacji pomiarowej w Belsku

Fig. 1. Location of the Belsk station

(Pianko-Kluczyńska 2007). W swojej pierwotnej wersji Lityński przedstawił system klasyfikacyjny uwzględniający trzy parametry: wskaźnik cyrkulacji strefowej, wskaźnik cyrkulacji południkowej i wartość ciśnienia atmosferycznego w Warszawie. Każdy z tych trzech wskaźników podzielił na trzy równoprawdopodobne klasy, z czego wynika, że klasyfikacja ta liczy 27 typów cyrkulacji. Wskaźniki cyrkulacji strefowej i południkowej obejmują odpowiednio obszar 40–60° N i 0–35° E. W nowej wersji kalendarza typ cyrkulacji w danym dniu jest wyznaczany na podstawie danych z reanaliz NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research) z godziny 12:00. Dane NCEP/NCAR (Kalnay i in. 1996) są wyliczane w siatce o oczku  $2,5 \times 2,5$ . Wskaźnik strefowy  $W_s$  i południkowy  $W_p$ , na podstawie których określany jest kierunek napływu mas powietrza, są obliczane z krokiem 5° odpowiednio szerokości i długości geograficznej. Wartość wskaźnika  $C_p$ , określająca, czy mamy do czynienia z typem antycyklonalnym, cyklonalnym czy „zerowym”, jest ustalana na podstawie węzła siatki najbliższego Warszawie, czyli 52,5° N, 20° E. Ponieważ zarówno Warszawa, dla której prowadzony jest kalendarz typów cyrkulacji, jak i Belsk leżą w podobnej, niewielkiej odległości od punktu węzłowego 52,5° N, 20° E, dlatego należy przyjąć, że typ cyrkulacji wyznaczony dla Warszawy odpowiada typowi cyrkulacji w Belsku (tab. 1).

Tabela 1. Lokalizacja stacji pomiarowych oraz najbliższego im punktu węzłowego siatki NCEP/NCAR

Table 1. Location of the measuring stations and the nearest node of the NCEP/NCAR network

Stacja/Station	$\varphi$ N	$\lambda$ E	Odległość od punktu węzłowego w linii prostej/ <i>Distance to the node in a straight line</i> [km]
Warszawa-Okęcie	52°09'46"	20°57'39"	74,8
Belsk	51°50'10"	20°47'34"	92,3
Punkt węzłowy/Node	52°30'00"	20°00'00"	

Ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi jest zależna w znacznej mierze od wielkości zachmurzenia. Aby wyeliminować wpływ zachmurzenia, a więc przedstawić różnice między typami cyrkulacji wynikające z przejrzystości napływającej masy powietrza, wzięto pod uwagę tylko dni z typem pogody insolacyjnej (dni pogodne), tj. z usłonecznieniem względnym powyżej 80%. Usłonecznienie względne nigdy nie osiąga wartości 100%, natomiast za dni „bardzo słoneczne” uznaje się już dni, w których usłonecznienie względne przekracza 75% (Podstawczyńska 2007). Z kolei za dni pochmurne uznano te, w których usłonecznienie względne wyniosło 0% (a więc dni bez dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego). W pracy

przedstawiono średnią dobową sumę promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi podczas panowania poszczególnych typów cyrkulacji. Obliczone zostały odchylenia wartości sum dobowych promieniowania w czasie adwekcji mas powietrza z poszczególnych kierunków od średnich wartości tych sum w kolejnych miesiącach. Szczegółowo przeanalizowano zależność między sumą promieniowania we wszystkich dniach a sumą promieniowania w dniach pogodnych w czasie panowania poszczególnych typów cyrkulacji, a także podobną zależność między sumą promieniowania w dniach pogodnych i sumą promieniowania w dniach pochmurnych.

## WYNIKI

W ciągu roku różnice w ilości promieniowania docierającego do powierzchni ziemi w zależności od typu cyrkulacji przekraczają  $6,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ . Latem różnice te sięgają nawet  $10 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (tab. 2). Największe dobowe sumy promieniowania występują podczas panowania typów cyrkulacji antycyklonalnej, niezależnie od kierunku napływu mas powietrza. Latem pogoda wyżowa zazwyczaj związana jest z bardzo niewielkim zachmurzeniem, w związku z tym sumy promieniowania są wtedy największe. Uwzględniając jedynie kierunek napływu mas powietrza, największe zróżnicowanie można zaobserwować w ciepłej porze roku, tj. od maja do sierpnia (ryc. 2). W celu sprawdzenia jak adwekcja mas powietrza z poszczególnych kierunków modyfikuje ilość dopływającej energii promienistej, obliczono średnie miesięczne sumy dobowe, a następnie policzono odchylenia średniej miesięcznej sumy dobowej podczas adwekcji mas powietrza z określonego kierunku od wartości średniej ze wszystkich kierunków. Największymi dodatnimi odchyleniami charakteryzują się kierunki południowy oraz południowo-zachodni. Niezależnie od pory roku średnia suma dobowa promieniowania całkowitego podczas napływu mas powietrza z tych kierunków jest większa od średniej wartości ze wszystkich kierunków. Największe odchylenia od średniej występują latem i przekraczają  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (ryc. 3). Najmniejsze sumy promieniowania całkowitego występują podczas dni z napływem powietrza z kierunków: północnego, północno-wschodniego i północno-zachodniego (ryc. 3). Szczególnie duże odchylenia ujemne widoczne są w ciepłej połowie roku. W lipcu średnia dobowa suma promieniowania całkowitego jest nawet o  $3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  (przy kierunku północno-zachodnim) oraz o  $2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  (przy kierunku północnym) mniejsza niż średnia wartość ze wszystkich kierunków.

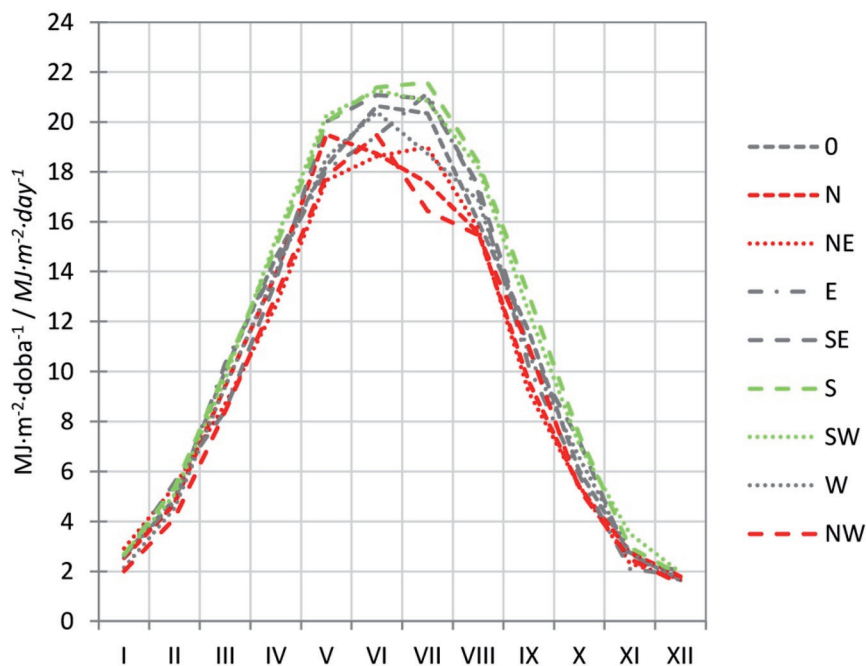
W następnym kroku, w celu wyeliminowania wpływu zachmurzenia na ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi, wzięto pod uwagę tylko dni z typem pogody insolacyjnej – dni pogodne. Zróżnicowanie ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w tych

Tabela 2. Średnia dobową sumą promieniowania całkowitego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] podczas panowania poszczególnych typów cyrkulacji oraz średnia częstość [%] występowania poszczególnych typów w styczniu, maju, lipcu, październiku i w roku na stacji Belsk w latach 1971–2014

Table 2. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during particular circulation types and mean frequency [%] of particular circulation types in January, May, July, October and in the whole year in Belsk in 1971–2014

Typ cyrkulacji/ <i>Circulation type</i>		00	0A	0C	N0	NA	NC	NE0	NEA	NEC
I	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	2,52	3,01	2,13	2,50	2,80	2,32	2,56	3,89	2,43
	częstość/frequency [%]	1,83	3,67	2,13	3,15	4,40	4,70	2,71	2,13	2,27
V	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	18,21	20,17	16,15	18,51	22,32	15,27	17,39	18,42	15,88
	częstość/frequency [%]	2,27	3,37	3,08	2,35	5,94	3,45	2,42	7,77	2,93
VII	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	19,87	22,08	16,69	15,29	21,24	13,65	18,20	21,86	13,78
	częstość/frequency [%]	2,42	6,39	2,72	3,08	6,83	4,70	3,16	8,08	3,96
X	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	5,38	7,62	3,90	4,93	6,59	3,77	5,09	6,34	3,53
	częstość/frequency [%]	2,05	4,40	2,64	2,86	5,87	3,52	1,61	3,96	1,61
Rok/ year	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	10,80	12,95	9,33	9,55	13,21	8,15	10,82	14,10	9,06
	częstość/frequency [%]	2,19	4,44	2,76	3,01	5,20	4,13	2,58	5,01	2,62
Typ cyrkulacji/ <i>Circulation type</i>		E0	E0	EA	EC	SE0	SEA	SEC	S0	SA
I	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	2,32	2,94	2,20	2,13	3,10	1,86	2,89	2,85	2,34
	częstość/frequency [%]	2,27	4,11	1,61	3,37	5,65	1,91	4,11	4,40	4,92
V	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	17,60	20,28	14,92	20,81	21,84	16,93	19,59	22,35	17,89
	częstość/frequency [%]	2,64	5,72	3,52	1,76	4,77	3,30	3,15	4,33	4,25
VII	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	17,61	22,88	17,90	20,74	22,96	16,84	21,79	23,17	19,07
	częstość/frequency [%]	1,62	7,05	1,98	1,40	2,64	1,25	2,28	4,77	3,23
X	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	5,77	6,87	3,81	6,42	7,82	6,62	8,71	8,10	6,07
	częstość/frequency [%]	1,83	3,89	1,91	1,91	5,57	2,86	2,86	5,43	4,99
Rok/ year	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	10,07	13,19	8,82	9,23	10,98	9,24	10,69	13,25	9,41
	częstość/frequency [%]	2,31	5,22	2,38	2,39	4,53	2,40	3,21	4,08	3,96
Typ cyrkulacji/ <i>Circulation type</i>		SW0	SW0	SWA	SWC	W0	WA	WC	NW0	NWA
I	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	2,81	2,87	2,47	1,92	2,46	2,06	1,81	2,40	1,85
	częstość/frequency [%]	4,40	3,96	6,16	3,82	3,96	3,23	4,11	4,62	6,38
V	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	19,82	22,92	18,39	18,59	19,60	16,99	17,16	20,80	15,26
	częstość/frequency [%]	3,30	4,40	5,50	2,35	3,89	2,57	3,52	3,89	3,59
VII	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	21,52	22,38	18,94	18,89	20,26	16,99	15,76	19,51	14,75
	częstość/frequency [%]	2,42	3,74	3,89	2,50	3,74	3,52	3,74	3,67	5,21
X	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	7,99	7,79	6,14	7,12	6,98	5,46	5,39	5,87	4,81
	częstość/frequency [%]	3,08	4,99	6,89	3,01	5,06	3,52	3,30	4,33	6,09
Rok/ Year	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1} / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	10,73	12,27	9,05	9,76	11,84	8,29	9,01	11,05	7,52
	Częstość/Frequency [%]	3,77	4,35	5,43	3,06	4,14	3,46	3,64	4,48	5,26

Wartości maksymalne zostały pogrubione, a wartości minimalne podkreślone.  
Maximum values are written in bold, minimum values are underlined.

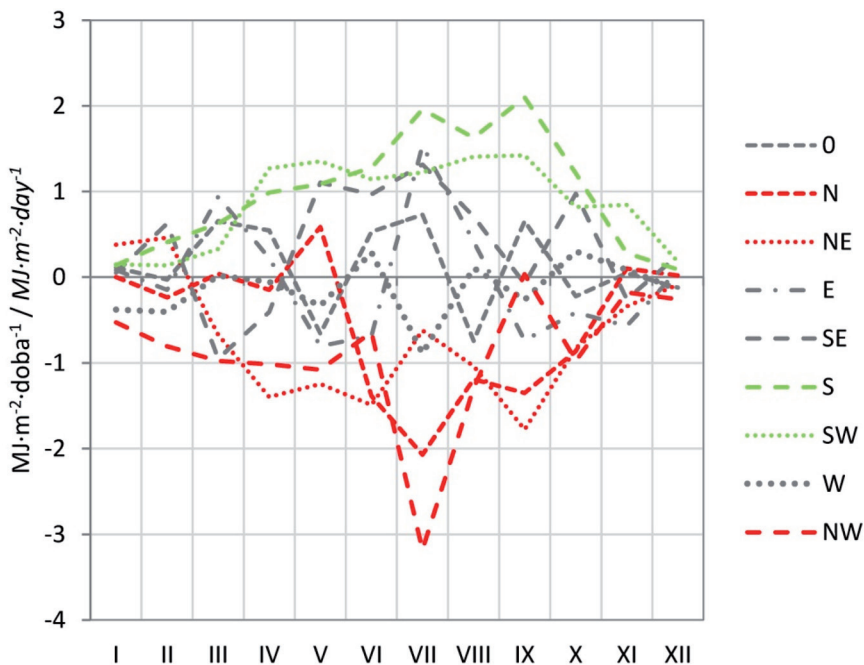


Ryc. 2. Średnia dobowa suma całkowitego promieniowania słonecznego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] podczas adwekcji mas powietrza z określonego kierunku w poszczególnych miesiącach na stacji Belsk w latach 1971–2014

Fig. 2. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during the inflow of air masses from the specified direction, in particular months in Belsk in 1971–2014

dniach w zależności od kierunku napływu mas powietrza jest niewielkie i tylko w nielicznych przypadkach przekracza  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (tab. 3). Dodatnie odchylenie dobowej sumy promieniowania przekraczające  $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  występuje jedynie w styczniu przy napływie powietrza z kierunku wschodniego. Co ciekawe, podobnie zwiększone ilości promieniowania nie występują przy napływie powietrza ani z kierunku północno-wschodniego, ani południowo-wschodniego. Z kolei największe odchylenia ujemne w miesiącach zimowych odnotowano przy napływie powietrza z południa i południowego zachodu (odpowiednio  $-1,39 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  i  $-1,25 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ), kiedy masy powietrza docierające nad obszar Polski przez długi czas przemieszczały się nad kontynentem europejskim i przynoszą silnie zanieczyszczone powietrze.

Z dotychczasowych rozważań wynika, że stosunkowo dużemu zróżnicowaniu ilości promieniowania we wszystkich dniach, w zależności od kierunku napływu mas powietrza, odpowiadają stosunkowo niewielkie różnice w dniach z typem pogody insolacyjnej. Poglądowe zestawienie średniej dobowej sumy promieniowania we wszystkich dniach i dniach pogodnych podczas panowania każdego z typów cyrkulacji (dla każdego z miesięcy) przedstawiono na



Ryc. 3. Odchylenia [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] średniej miesięcznej sumy dobowej całkowitego promieniowania słonecznego podczas adwekcji powietrza z określonego kierunku od wartości średniej miesięcznej sumy dobowej ze wszystkich kierunków napływu na stacji Belsk w latach 1971–2014

Fig. 3. Deviations [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] of monthly mean value of daily sums of global solar radiation during the inflow of air masses from the specified direction from monthly mean value of daily sum for all directions in Belsk in 1971–2014

rycinie 4. W cieplej połowie roku dużej rozpiętości w średnich wartościach sum dobowych ze wszystkich dni odpowiada niewielki rozstęp średnich wartości sum dobowych z dni pogodnych. Stąd na wykresach od maja do sierpnia jest widoczne charakterystyczne „rozciągnięcie” poszczególnych typów cyrkulacji w poziomie. Przykładowo, w czerwcu rozstęp wartości we wszystkich dniach wynosi  $2,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $21,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie S i  $18,6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NE), a rozstęp wartości w dniach pogodnych  $1,6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $29,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie N i  $27,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SE). Zdecydowanie słabiej jest zaznaczone odwrotne, pionowe rozłożenie poszczególnych typów cyrkulacji atmosfery w miesiącach jesienno-zimowych (październik, listopad, styczeń, luty). W listopadzie rozpiętość średnich sum dobowych promieniowania całkowitego we wszystkich dniach wynosi  $1,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $3,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SW,  $2,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie E), natomiast rozpiętość wartości w dniach pogodnych wynosi  $1,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $7,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie S,  $5,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NW).

Tabela 3. Odchylenia [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] średniej miesięcznej sumy dobowej całkowitego promieniowania słonecznego przy napływie powietrza z poszczególnych kierunków od wartości średniej miesięcznej sumy dobowej ze wszystkich kierunków napływu w dniach z pogodą insolacyjną na stacji Belsk w latach 1971–2014

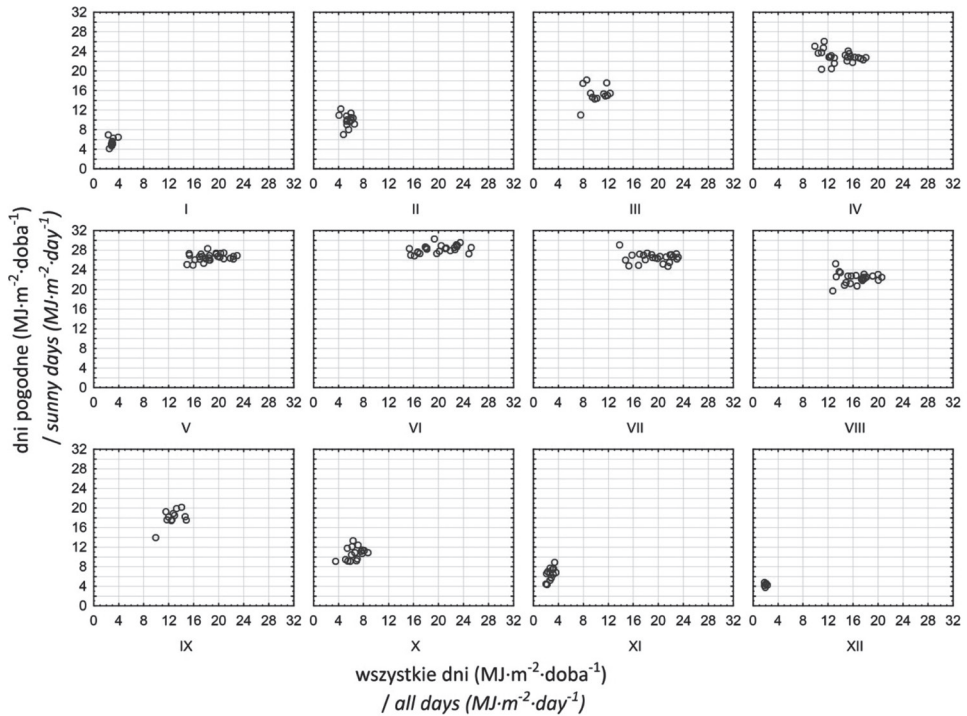
Table 3. Deviations [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] of monthly mean values of daily sums of global solar radiation during the inflow of air masses from the specified direction from monthly mean values of daily sums for all directions on sunny days in Belsk in 1971–2014

Miesiąc	0	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
I	-0,20	-0,50	0,49	1,13	-0,09	-0,49	-1,25	-	0,91
II	0,39	0,70	0,18	0,41	-0,56	-1,39	0,69	-0,36	0,27
III	-0,03	-	0,45	-0,96	0,29	0,46	0,06	-0,59	0,84
IV	-0,39	-0,08	0,29	0,80	-0,02	0,21	0,06	-0,90	-0,41
V	0,01	-0,33	0,19	-0,24	0,04	0,19	0,07	0,73	-0,31
VI	-0,40	0,74	-0,28	0,08	-0,84	-0,01	0,16	0,29	0,21
VII	0,12	-0,33	0,38	0,39	-0,25	-0,41	0,07	-0,33	-1,10
VIII	0,05	-0,28	-0,20	0,57	0,34	-0,02	-0,07	-0,25	-0,60
IX	0,51	-0,81	-0,82	0,83	-0,02	0,54	-0,94	-	0,01
X	0,46	0,22	-1,44	0,65	0,15	0,42	-0,88	-0,47	0,72
XI	0,81	-0,03	-0,55	-0,87	0,12	0,79	-0,25	-0,07	-0,96
XII	-	0,16	-	0,51	-0,04	0,30	-0,48	-0,13	-

Pomimo dużej zmienności cyrkulacji atmosferycznej z roku na rok nad Polską w ciągu roku można wyznaczyć kilka sezonów cyrkulacyjnych różniących się od siebie ze względu na charakter cyrkulacji atmosfery. Nowosad (2004) na podstawie kalendarza typów cyrkulacji Lityńskiego z lat 1951–1990 zaproponował podział roku na osiem sezonów cyrkulacyjnych, z których dwa najdłuższe trwają od 17 kwietnia do 23 czerwca (68 dni) oraz od 26 lipca do 20 listopada (118 dni). Szczegółowej analizie poddano zatem wartości promieniowania z jednego miesiąca z każdego z tych dwóch sezonów – maja i października. W pierwszym sezonie wystąpiły roczne maksima częstości typów reprezentujących adwekcję z kierunku północno-wschodniego. W drugim sezonie dominował z kolei napływ z kierunku południowo-zachodniego (Nowosad 2004).

W maju w dniach z typem pogody insolacyjnej widoczne są niewielkie różnice w wielkości promieniowania w zależności od panującego typu cyrkulacji (ryc. 5a). Różnice między najbardziej skrajnymi wartościami przekraczają  $3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (między typem NEC i 00), podczas gdy różnice w ilości promieniowania we wszystkich dniach dochodzą do  $8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (między typem NWC i SWA). Antycyklonalne typy cyrkulacji grupują się po prawej stronie wykresu, co oznacza, że typy te charakteryzują się nieco większą sumą promieniowania we wszystkich dniach, natomiast porównywalną z innymi typami





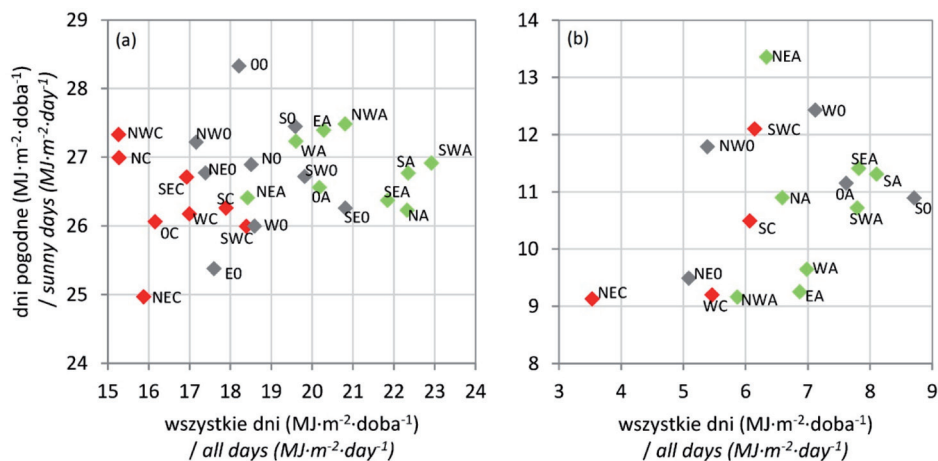
Ryc. 4. Średnia dobowa suma promieniowania całkowitego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] w dniach pogodnych i we wszystkich dniach w zależności od typu cyrkulacji (w podziale na miesiące) na stacji Belsk w latach 1971–2014

Fig. 4. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during sunny days and all days, depending on the circulation type in Belsk in 1971–2014 (in particular months)

w dniach pogodnych. Mniejsze sumy promieniowania we wszystkich dniach występują podczas typów „zerowych”, a najmniejsze w grupujących się przy najniższych na skali wartościach typach cyklonalnych.

W październiku uwagę zwraca przede wszystkim większa rozciągłość wartości sum promieniowania w dniach pogodnych, dochodząca do  $4,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  (ryc. 5b). Co ciekawe, największa dobowa suma promieniowania w dniach pogodnych występuje podczas typu NEA ( $13,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ), a najmniejsza podczas napływu powietrza z tego samego kierunku, ale w typie cyklonalnym – NEC ( $9,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ). Z kolei najwyższe dobowe sumy w zbiorze wszystkich dni występują podczas napływu powietrza z kierunku południowego oraz pozostałych kierunków sektora południowego (typy SEA, SA, S0, SWA).

Zestawienie średniej dobowej sumy promieniowania w dniach pogodnych i dniach pochmurnych podczas panowania każdego z typów cyrkulacji przedstawiono na rycinie 6. Jeszcze wyraźniejsze stają się prawidłowości zaobserwowane wcześniej – w porze letniej poszczególne typy cyrkulacji różnią się między sobą



Ryc. 5. Średnia dobowa suma promieniowania całkowitego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] w dniach pogodnych i w wszystkich dniach w zależności od typu cyrkulacji w maju (a) i październiku (b) na stacji Belsk w latach 1971–2014

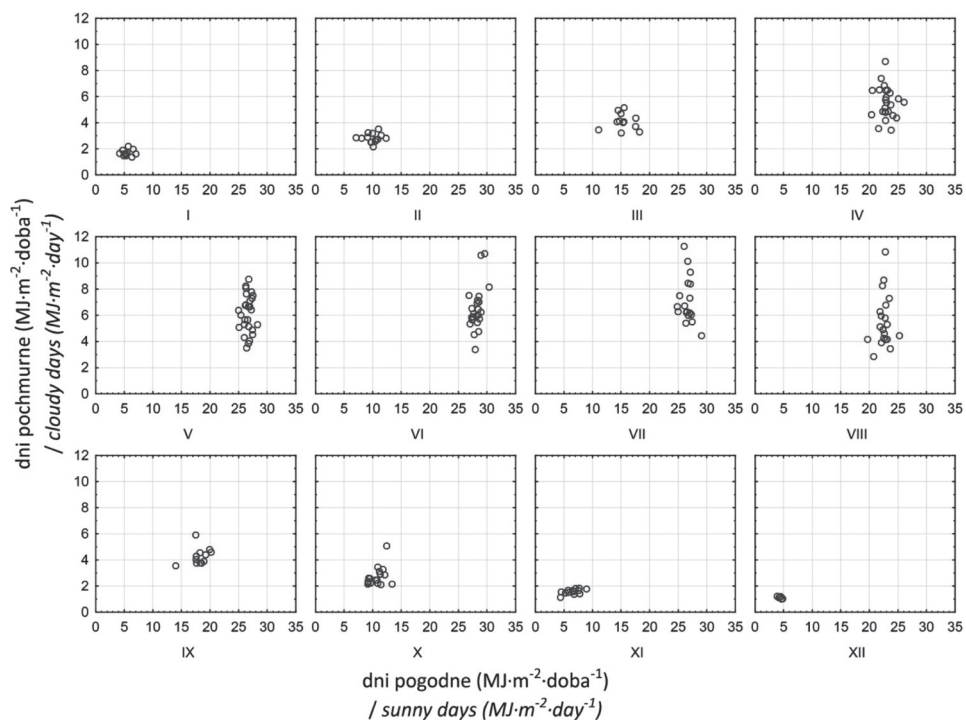
Kolorem czerwonym zaznaczono typy cyklonalne, zielonym – typy antycyklonalne, szarym – typy „zerowe”.

Fig. 5. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during sunny days and all days, depending on the circulation type in May (a) and October (b) in Belsk in 1971–2014

Cyclonic circulation types are marked in red, anticyclonic – in green, and “zero” types – in grey.

nieznacznie na skali promieniowania w dniach pogodnych, natomiast ich rozpiętość na skali promieniowania w dniach pochmurnych jest zdecydowanie większa. Przykładowo, w czerwcu rozpiętości te wynoszą odpowiednio  $3,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $30,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SEC i  $26,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie N0) i  $7,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $10,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NA i  $3,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SW0). W sezonie jesienno-zimowym, kiedy promieniowanie potencjalne jest dużo mniejsze, sytuacja ulega odwróceniu. Szczególnie dobrze widać to w listopadzie – rozpiętość średnich sum dobowych promieniowania całkowitego w dniach pogodnych wynosi ponad  $4,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $8,9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NA,  $4,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NC), podczas gdy rozpiętość tych sum w dniach pochmurnych wynosi zaledwie  $0,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  ( $1,9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NWA,  $1,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SEC).

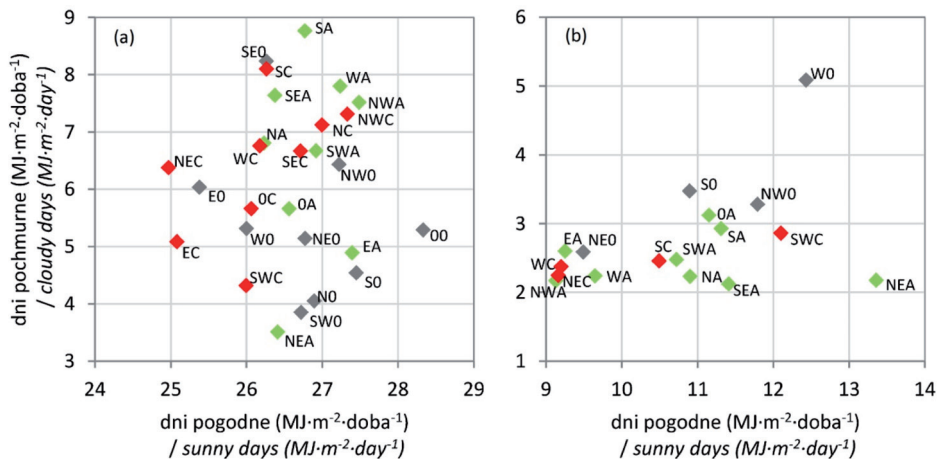
W maju (ryc. 7a), podobnie jak w innych miesiącach wiosenno-letnich, rozpiętość średnich sum dobowych promieniowania całkowitego w dniach pochmurnych jest dużo większa niż w dniach pogodnych i wynosi ponad  $5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $8,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie SA,  $3,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$  w typie NEA). W dniach całkowicie zachmurzonych najczęściej promieniowania dociera do powierzchni ziemi podczas panowania typów cyrkulacji o składowej południkowej, głównie w czasie adwekcji powietrza z kierunku południowego i południowo-wschodniego (typy: SA, SE0, SC, SEA), a także zachodniego (WA) (ryc. 7a).



Ryc. 6. Średnia dobowa suma promieniowania całkowitego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] w dniach pochmurnych i w dniach pogodnych w zależności od typu cyrkulacji (w podziale na miesiące) na stacji Belsk w latach 1971–2014

Fig. 6. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during cloudy days and sunny days depending on the circulation type in Belsk in 1971–2014 (in particular months)

W październiku (ryc. 7b) w dniach pochmurnych różnice między poszczególnymi typami cyrkulacji na skali promieniowania są znacznie mniejsze niż w maju i, poza jednym typem W0, nie przekraczają  $2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ . Na rycinie 7b można także wskazać dwa główne skupiska typów cyrkulacji. Stosunkowo niskie sumy promieniowania zarówno w dniach pogodnych, jak i pochmurnych występują podczas przewagi strefowej składowej cyrkulacji nad południkową (typy: EA, NE0, NEC, NWA, WA, WC). Średnia dobowa suma promieniowania w tej grupie w dniach pogodnych wynosi  $9,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ , a w dniach pochmurnych  $2,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ . Większe sumy promieniowania w dniach pogodnych i nieco większe w dniach pochmurnych występują z kolei podczas napływu mas powietrza z północy bądź z południa, czyli przy przewadze południkowej składowej cyrkulacji (typy: SC, SA, S0, SWA, SWC, SEA, NA, NW0, 0A). W tej grupie średnia dobowa suma promieniowania w dniach pogodnych jest prawie  $2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  większa i wynosi  $11,2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ . Natomiast średnia suma w dniach pochmurnych wynosi  $2,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ .



Ryc. 7. Średnia dobowa suma promieniowania całkowitego [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ] w dniach pochmurnych i w dniach pogodnych w zależności od typu cyrkulacji w maju (a) i październiku (b) na stacji Belsk w latach 1971–2014

Kolorem czerwonym zaznaczono typy cyklonalne, zielonym – typy antycyklonalne, szarym – typy „zerowe”.

Fig. 7. Mean daily sum of global solar radiation [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ] during cloudy days and sunny days, depending on the circulation type in May (a) and October (b) in Belsk in 1971–2014

Cyclonic circulation types are marked in red, anticyclonic – in green, and “zero” types – in grey.

## PODSUMOWANIE

Cyrkulacja atmosferyczna modyfikuje ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi w Belsku, a różnice te najbardziej widoczne są w lecie. Napływ powietrza z kierunku północnego, a także północno-wschodniego i północno-zachodniego wiąże się ze zmniejszeniem ilości promieniowania docierającego do powierzchni ziemi w ciągu doby. Z kolei największe sumy całkowitego promieniowania słonecznego, niezależnie od pory roku, występują w czasie adwekcji mas powietrza z kierunków południowego i południowo-zachodniego. Jednocześnie napływające z tych kierunków masy przynoszą powietrze o zmniejszonej przezroczystości, dlatego w zimie przy bezchmurnej pogodzie sumy promieniowania mogą być zmniejszone.

W sezonie wiosenno-letnim w dniach całkowicie zachmurzonych zaobserwowano duże różnice w ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w zależności od panującego typu cyrkulacji. W dniach całkowicie bezchmurnych różnice między poszczególnymi typami cyrkulacji były dużo mniejsze. Jesienią i zimą, kiedy promieniowanie potencjalne jest dużo mniejsze, sytuacja ulega odwróceniu. Poszczególne typy cyrkulacji różnią się

między sobą nieznacznie na skali promieniowania w dniach pochmurnych, natomiast ich rozpiętość na skali promieniowania w dniach pogodnych jest zdecydowanie większa.

W badanym okresie (44 lata) największa średnia dobową sumą promieniowania całkowitego związana jest z występowaniem typu cyrkulacji NEA (północno-wschodni antycyklonalny). Stosunkowo duże średnie sumy dobowe przypadają również na typy NA (północny antycyklonalny), EA (wschodni antycyklonalny) i SA (południowy antycyklonalny). Najmniejsze średnie dobowe sumy promieniowania towarzyszyły typom NWC (północno-wschodni cyklonalny), WC (zachodni cyklonalny) i NC (północny cyklonalny). Z kolei inni badacze wskazują, że strumień promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi jest nieco zmniejszony podczas napływu mas powietrza z kierunków: południowego, południowo-wschodniego, południowo-zachodniego i zachodniego. Natomiast zwiększone wartości sum dobowych występują przy napływie powietrza z kierunków: północnego, północno-wschodniego i północno-zachodniego (Panziera i in. 2015). Wyników tych nie można jednak bezpośrednio odnosić do tych zaprezentowanych w niniejszej pracy, ponieważ pochodzą one ze stacji położonej we włoskich Alpach, gdzie warunki cyrkulacyjne i lokalne mogą różnić się od tych panujących na Niżu Europejskim.

## LITERATURA

- Chiacchio M., Vitolo R., 2012: *Effect of cloud cover and atmospheric circulation patterns on the observed surface solar radiation in Europe*, J. Geophys. Res., 117, D18207.
- Dubicka M., 1994: *Wpływ cyrkulacji atmosfery na kształtowanie warunków klimatu (na przykładzie Wrocławia)*, Acta Univ. Wratisl., Studia Geogr. LX, 1581, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996: *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437–470.
- Lityński J., 1969: *Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski*, Prace PIHM, 97, 3–14.
- Matuszko D., 2009: *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*, Wyd. UJ, Kraków.
- Niedziałek H., 1981: *Całkowite promieniowanie słoneczne a masy powietrza w Puławach w latach 1966–1975*, Przegl. Geofiz., 26(1–2), 85–94.
- Niedziałek H., 1983a: *Bezpośrednie promieniowanie słoneczne w masach powietrznych w Puławach (1970–1975)*, Folia Soc. Scient. Lubl., 25, Geografia nr 1/2, 31–39.
- Niedziałek H., 1983b: *Promieniowanie rozproszone w Puławach w różnych masach powietrznych (1970–1975)*, Folia Soc. Scient. Lubl., 25, Geografia nr 1/2, 41–47.
- Nowosad M., 2004: *Sezony cyrkulacyjne nad Polską 1951–1990*, Annales Univ. M. Curie-Skłodowska Sectio B, 59(5), 83–100.
- Olecki Z., 1992: *Przezroczystość atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej*, Zesz. Nauk. UJ, nr MXLII, Pr. Geogr., z. 90, 23–34.

- Panziera L., Giovannini L., Laitia L., Zardia D., 2015: *The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part I: synoptic climatology of Trentino*, Int. J. Climatol., 35, 4655–4672. DOI: 10.1002/joc.4314.
- Pianko-Kluczyńska, K. 2007: *Nowy kalendarz typów cyrkulacji atmosfery według J. Lityńskiego*, Wiad. Meteorol. Hydrol. Gosp. Wodn., 51(1), z. 4, 65–85.
- Podstawczyńska A., 2007: *Cechy solarne klimatu Łodzi*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Uscka-Kowalkowska, J. 2008: *Bezpośrednie promieniowanie słoneczne i jego ekstynkcja w atmosferze na przykładzie Puław i Papowa Toruńskiego*, Wyd. UMK, Toruń.
- Uscka-Kowalkowska, J. 2009: *Porównanie bezpośredniego promieniowania słonecznego i jego ekstynkcji w atmosferze w Warszawie i w Mikołajkach*, Acta Agroph., 14(2), 501–514.
- Więclaw M., 2011: *Dobowy przebieg całkowitego promieniowania słonecznego i temperatury powietrza w Bydgoszczy w zależności od rodzaju masy powietrza*, Ekologia i Technika, 19(1), 43–48.