



## Uwarunkowania cyrkulacyjne ilości całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Polsce w latach 1986–2015

### *Atmospheric circulation determinants of the amount of global solar radiation reaching the land surface in Poland in the years 1986–2015*

Kinga Kulesza 

Uniwersytet Warszawski

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

[kingakulesza@uw.edu.pl](mailto:kingakulesza@uw.edu.pl)

**Zarys treści.** Promieniowanie słoneczne jest jedną z najważniejszych zmiennych w bilansie energetycznym powierzchni czynnej. Czynnikiem, który modyfikuje dopływ energii promienistej do powierzchni ziemi jest ruch (cyrkulacja) atmosfery i związane z nim zmiany ilości zawartych w atmosferze aerozoli, pary wodnej oraz zmiany zachmurzenia. Celem pracy było określenie wpływu cyrkulacji atmosferycznej na ilość całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Polsce. Typy cyrkulacji atmosferycznej zostały wyznaczone za pomocą zmodyfikowanej klasyfikacji Lityńskiego, a całkowite promieniowanie słoneczne analizowano na podstawie danych z produktów satelitarnych CM SAF. Przedstawiono średnie dobowe sumy promieniowania podczas poszczególnych typów cyrkulacji, a także sumy dobowe podczas makrotypów A, O, C oraz w dniach z adwekcją z poszczególnych kierunków. Zaprezentowano przestrzenny rozkład promieniowania nad obszarem Polski podczas poszczególnych typów cyrkulacji. Największe dobowe sumy promieniowania słonecznego są związane z antycyklonalnymi typami cyrkulacji, najmniejsze zaś z cyklonalnymi. Największa średnia dobowa suma promieniowania słonecznego występuje podczas cyrkulacji antycyklonalnej południowo-zachodniej, co jest związane z silnie rozbudowanym Wyżem Azorskim. W pracy wykazano także, że panujący układ baryczny ma większy wpływ na kształtowanie sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego nad Polską niż kierunek adwekcji mas powietrza.

**Słowa kluczowe:** cyrkulacja atmosferyczna, promieniowanie słoneczne, Polska, typy cyrkulacji, Lityński.

**Keywords:** *atmospheric circulation, solar radiation, Poland, circulation types, Lityński classification.*

## Wstęp

Promieniowanie słoneczne jest kluczowym elementem systemu klimatycznego na Ziemi i jedną z najważniejszych zmiennych w bilansie energetycznym powierzchni czynnej. Dlatego niezwykle istotne są badania czasowego i przestrzennego rozkładu dopływu promieniowania słonecznego na kuli ziemskiej. Ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi w danym miejscu zależy przede wszystkim od uwarunkowań astronomicznych, związanych z położeniem na określonej szerokości geograficznej i wynikających z tego długością

dnia i wysokością Słońca nad horyzontem. Jednak promieniowanie słoneczne przechodząc przez atmosferę ziemską ulega osłabieniu – odbiciu, rozproszeniu bądź pochłonięciu przez cząsteczki znajdujące się w powietrzu. Dlatego głównym czynnikiem, który modyfikuje dopływ energii promienistej do powierzchni ziemi na danej szerokości geograficznej jest cyrkulacja (ruch) atmosfery i związane z nią zmiany ilości zawartych w atmosferze aerozoli (zarówno pochodzenia naturalnego jak i antropogenicznego) zmniejszających dopływ promieniowania, a także związane z nią zmiany wielkości i rodzaju zachmurzenia. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na inne elementy klimatu jest już stosunkowo dobrze poznany – udokumentowano m.in. istotny wpływ cyrkulacji nad Europą na pole temperatury i opady atmosferyczne (Wibig, 2001; Kożuchowski i Żmudzka, 2002), natomiast do tej pory stosunkowo mało miejsca poświęcono wpływowi cyrkulacji atmosferycznej na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi. W literaturze można znaleźć prace opisujące związek wielkości zachmurzenia z cyrkulacją atmosferyczną (Niedźwiedź, 1981; Baranowski, 1996; Tamulewicz, 2000; Matuszko, 2002; Żmudzka, 2007; Szyga-Pluta, 2015), a jak wiadomo zachmurzenie jest istotnym, ale nie jedynym czynnikiem wpływającym na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi. Powstało także wiele prac poświęconych związkowi przezroczystości powietrza z cyrkulacją atmosfery (Niedziałek, 1981; Uscka, 2003; Uscka-Kowalkowska, 2007, 2008; Więclaw, 2011). Pewne przybliżenie zależności promieniowania słonecznego od cyrkulacji atmosfery można znaleźć także w opracowaniach poświęconych związkowi osłonecznienia z cyrkulacją atmosferyczną. Badania w tym zakresie prowadzili m.in. Niedźwiedź (1981), Degirmendžić (2004), Uscka-Kowalkowska i inni (2015). Naukowcy wskazują głównie na wzrost osłonecznienia przy antycyklonalnym typie cyrkulacji, a zmniejszenie podczas typów cyklonalnych. Jednocześnie wskazują, że duże osłonecznienie występuje podczas napływu mas powietrza z kierunków S i SW, natomiast stosunkowo małe – podczas napływu z kierunków N i NE. Badania dotyczące wpływu cyrkulacji atmosferycznej na promieniowanie słoneczne prowadzone były do tej pory jedynie w odniesieniu do pojedynczych stacji, np. w Belsku (Nelken, 2016) oraz w Koniczynie (Kejna i Uscka-Kowalkowska, 2018). Natomiast brak jest opracowania kompleksowo opisującego wpływ cyrkulacji atmosferycznej na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Polsce.

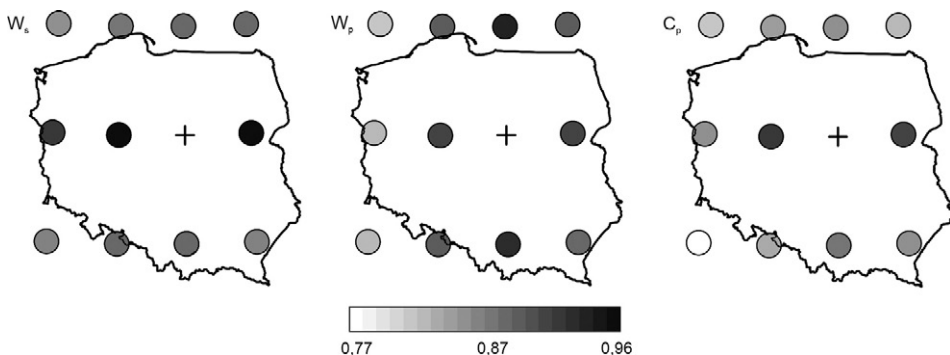
Celem niniejszego opracowania jest określenie zależności ilości docierającego do powierzchni ziemi promieniowania słonecznego od typu cyrkulacji atmosferycznej w Polsce, na podstawie zmodyfikowanej klasyfikacji typów cyrkulacji Lityńskiego. W pracy przedstawiono średnie dobowe sumy promieniowania w dniach z poszczególnymi typami cyrkulacji, a także podczas makrotypów A, O, C oraz w dniach z adwekcją z poszczególnych kierunków. Przedstawiono także rozkład przestrzenny promieniowania słonecznego nad obszarem Polski podczas dni z poszczególnymi typami cyrkulacji. Podjęto także próbę odpowiedzi na pytanie czy większy wpływ na kształtowanie się dobowych sum promieniowania słonecznego nad Polską ma układ ciśnienia czy kierunek adwekcji mas powietrza.

## Dane źródłowe i metody badań

W celu określenia sum całkowitego promieniowania słonecznego nad Polską wykorzystano produkt *Surface Incoming Shortwave Radiation* (SIS), pochodzący z bazy *Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat, Edition 2* (SARAH-2) (wui.cmsaf.eu). Jest to najnowsza, ciąg-

gła seria danych opublikowana przez *Satellite Application Facility for Climate Monitoring* (CM SAF), obejmująca okres 1983–2015 r. (33 lata). SARA-2 dostarcza danych otrzymywanych na podstawie pomiarów satelitarnych w całym widmie promieniowania słonecznego (0,2–4  $\mu\text{m}$ ), dokonywanych przez instrumenty MVIRI i SEVIRI znajdujące się na pokładzie satelitów geostacjonarnych Meteosat. Wysoką jakość danych SARA-2 w stosunku do naziemnych danych pomiarowych potwierdził Pfeifroth i inni (2017). W Polsce średni błąd, czyli różnica średniego miesięcznego natężenia całkowitego promieniowania słonecznego obliczonego na podstawie danych SIS i danych naziemnych z 17 stacji pomiarowych, jest niewielki i wynosi 0,26  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jego wartości różnicują się przestrzennie – na ogół im wyżej jest położona stacja, tym bardziej jest urozmaicona rzeźba terenu w jej otoczeniu, co wpływa na zmniejszenie dokładności danych satelitarnych (Kulesza, 2019a). W pracy wykorzystano produkt SIS z okresu trzydziestoletniego 1986–2015, o rozdzielczości przestrzennej 0,05°x0,05°. Wykorzystano dane o rozdzielczości dobowej (średnie dobowe natężenie promieniowania), które następnie przeliczono na sumy dobowe ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Średnie sumy całkowitego promieniowania słonecznego z obszaru Polski zostały policzone jako średnie obszarowe ze wszystkich węzłów siatki 0,05° x 0,05°, znajdujących się w granicach administracyjnych Polski.

Do opisu cyrkulacji atmosferycznej nad Polską wykorzystano zmodyfikowaną klasyfikację typów cyrkulacji Lityńskiego, która została dokładnie opisana w innych pracach autorki (Kulesza, 2017, 2019b). Na obszarze Polski typy cyrkulacji mogą być wyznaczone w 12 węzłach reanalizy NCEP/NCAR (Kalnay i inni, 1996), osobno dla każdego regionu kraju. Wyznaczone w danym dniu typy nie zawsze muszą być jednakowe. Aby opisać związki promieniowania z typami cyrkulacji należy w danym dniu przyjąć jeden typ cyrkulacji odpowiedni dla całej Polski. Podstawą przeprowadzonych analiz były typy cyrkulacji wyznaczone w odniesieniu do węzła siatki reanalizy NCEP/NCAR najbliższego Warszawie, tj. 52,5°N, 20°E. Sprawdzono, w jakim stopniu wyznaczone w ten sposób typy cyrkulacji pokrywają się z typami, które można wyznaczyć w innych regionach Polski. Współczynniki korelacji opisujące związek wartości poszczególnych wskaźników cyrkulacji (strefowej  $W_s$ , południkowej  $W_p$  i rodzaju cyrkulacji  $C_p$ ) w punkcie 52,5°N, 20°E z ich wartościami w 11 węzłach reanalizy



**Ryc. 1.** Współczynniki korelacji wartości poszczególnych wskaźników cyrkulacji ( $W_p$ ,  $W_s$  i  $C_p$ ) w punkcie 52,5°N, 20°E z ich wartościami w 11 węzłach reanalizy NCEP/NCAR znajdujących się nad obszarem Polski w okresie 1986–2015

*Correlation coefficients for individual circulation indicators' values ( $W_p$ ,  $W_s$  and  $C_p$ ) at node 52.5°N, 20°E and their values in 11 nodes of NCEP/NCAR reanalysis which are located over Poland, in the period 1986–2015*

NCEP/NCAR znajdujących się nad obszarem Polski są duże (ryc. 1) i wynoszą średnio 0,89 odnośnie do wskaźnika cyrkulacji strefowej  $W_s$ , 0,88 odnośnie do wskaźnika cyrkulacji południkowej  $W_p$  i 0,85 odnośnie do rodzaju cyrkulacji  $C_p$ . Można stwierdzić, że typy cyrkulacji wyznaczone dla węzła 52,5°N, 20°E dobrze oddają charakter cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem całej Polski, co wynika m.in. z założeń klasyfikacji Lityńskiego, tj. zastosowania bardzo dużego obszaru odniesienia, z którego obliczane są wartości wskaźników cyrkulacji.

Analizę ilości całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Polsce w zależności od panującego typu cyrkulacji atmosferycznej przeprowadzono w ujęciu rocznym oraz sezonowym i podzielono na trzy etapy: najpierw przedstawiono zależność ilości promieniowania od charakteru cyrkulacji (C, O, A), następnie od kierunku napływu mas powietrza, a na koniec od typów cyrkulacji. W każdym przypadku przedstawiono częstość występowania poszczególnych sytuacji (rodzajów cyrkulacji, kierunków napływu bądź typów cyrkulacji) oraz średnią dobową sumę promieniowania słonecznego podczas ich występowania. Za pomocą testu Kołmogorowa-Smirnowa wskazano również te sumy, które istotnie różnią się od średniej sumy dobowej z wielolecia 1986–2015 ( $\alpha = 0,05$ ). Określono także prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia dni o skrajnie dużych sumach promieniowania słonecznego (powyżej percentyla 0,95) w poszczególnych typach cyrkulacji. Prawdopodobieństwo warunkowe określono na podstawie formuły:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

gdzie  $P(A \cap B)$  to stosunek liczby dni o skrajnie dużych sumach promieniowania słonecznego w danym typie cyrkulacji do liczby wszystkich dni w wieloleciu, a  $P(B)$  to stosunek liczby dni z danym typem cyrkulacji do liczby wszystkich dni w wieloleciu.

Przedstawiono rozkłady przestrzenne dobowych sum promieniowania słonecznego podczas określonych typów cyrkulacji w ujęciu rocznym oraz sezonowym. Na końcu przeprowadzono regresję wielokrotną, gdzie jako jakościowe zmienne niezależne wykorzystano rodzaj cyrkulacji oraz kierunek napływu, natomiast jako zmienną zależną – dobową sumę całkowitego promieniowania słonecznego. Przeprowadzanie regresji wielokrotnej na zmiennych jakościowych (a takimi zmiennymi są zarówno kierunek adwekcji jak i typ cyrkulacji) jest możliwe dzięki kwantyfikacji czynników jakościowych za pomocą tzw. zmiennych zero-jedynkowych. Liczba zmiennych zero-jedynkowych w ramach danej zmiennej jakościowej powinna odpowiadać liczbie możliwych wariantów danej zmiennej pomniejszonej o jeden (aby uniknąć współliniowości regresorów). Zatem w odniesieniu do obu zmiennych usunięto z modelu regresji wariant 0 (typ bezgradientowy w przypadku rodzaju cyrkulacji oraz typ bezadwekcyjny w przypadku kierunku napływu), a uzyskane współczynniki regresji odnoszą się właśnie do owego usuniętego „poziomu bazowego”. Łączną istotność statystyczną obu zmiennych wyjaśniających policzono stosując analizę wariancji (ANOVA).

## Wyniki

Dzięki wykorzystaniu zmodyfikowanej klasyfikacji typów cyrkulacji, częstość poszczególnych rodzajów cyrkulacji jest podobna, a różnice w żadnej z pór roku nie przekraczają 5 punktów procentowych (tab. 1). Średnie dobowe sumy promieniowania słonecznego

w Polsce są największe podczas utrzymywania się cyrkulacji antycyklonalnej, a najniższe przy cyrkulacji cyklonalnej (tab. 2). Różnica między średnią dobową sumą promieniowania słonecznego podczas panowania cyrkulacji C i A wynosi prawie  $6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  latem, zimą natomiast jedynie nieco ponad  $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ . Podczas cyrkulacji „zerowej” (bezgradientowej) średnia dobowa suma promieniowania w większości przypadków nie różni się istotnie od średniej z danego okresu (pory roku bądź roku). Wyjątkiem jest lato, kiedy wszystkie trzy rodzaje cyrkulacji (C, O, A) generują średnie sumy istotnie różniące się od wartości średniej.

Częstość poszczególnych kierunków adwekcji mas powietrza nie jest jednakowa, ponieważ jest kombinacją częstości dwóch wskaźników – cyrkulacji strefowej  $W_s$  i południkowej  $W_p$ . Mimo to różnica częstości poszczególnych kierunków napływu nie jest duża i wynosi 2,7 punktu procentowego w ujęciu rocznym. Największa różnica częstości przypada na lato i wynosi 4,4 punktu procentowego (tab. 3). Wiosną dominowały kierunki E, N oraz NW, z częstością odpowiednio 12,3%, 12,1% i 12,0%. Najrzadziej występował kierunek SE, którego częstość wynosiła 8,4%. Latem również najczęściej pojawiał się kierunek E (13,2%), natomiast najrzadziej – NW (8,8%) i SE (9,1%). Kierunek E występował najczęściej również jesienią (13,3%). Najrzadziej występującymi kierunkami w tej porze roku były N, NW i W – odpowiednio 10,1%, 10,4% i 10,1%. Zimą obraz nieco się zmienia. Najczęściej występującym kierunkiem był SW (13,2%), a najrzadziej SE (9,6%). W ujęciu rocznym

**Tabela 1.** Częstość (%) rodzajów cyrkulacji atmosferycznej w węźle  $52,5^\circ\text{N}$ ,  $20^\circ\text{E}$  w okresie 1986–2015  
*Frequency of occurrence (%) of atmospheric circulation macrotypes in the node  $52.5^\circ\text{N}$ ,  $20^\circ\text{E}$  in the period 1986–2015*

Pora roku/rok	Rodzaj cyrkulacji		
	C	O	A
III–V	32,0	33,6	34,3
VI–VIII	33,9	35,5	30,6
IX–XI	32,7	34,0	33,3
XII–II	33,0	34,7	32,4
I–XII	32,9	34,4	32,7

**Tabela 2.** Średnia dobową sumą całkowitego promieniowania słonecznego ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ) nad Polską w dniach z określonym rodzajem cyrkulacji. Wyróżniono wartości istotnie statystycznie różne od sezonowej i rocznej średniej sumy dobowej z wielolecia 1986–2015 ( $\alpha = 0,05$ )  
*Mean daily sum of global solar radiation ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) over Poland on days with a specific circulation macrotype. The values that are statistically different ( $\alpha = 0.05$ ) from the seasonal and annual mean daily sum for the multi-year period 1986–2015 are written in bold*

Pora roku/rok	Rodzaj cyrkulacji		
	C	O	A
III–V	<b>11,39</b>	14,35	<b>16,25</b>
VI–VIII	<b>15,66</b>	<b>18,89</b>	<b>21,56</b>
IX–XI	<b>5,84</b>	7,06	<b>8,14</b>
XII–II	<b>2,61</b>	2,79	<b>3,18</b>
I–XII	<b>8,95</b>	10,86	<b>12,24</b>

widać, że najczęściej występował kierunek E (12,6%) oraz SW (11,9%), natomiast najrzadziej SE (9,9%).

Wiosną największe średnie dobowe sumy promieniowania słonecznego, przekraczające  $14,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ , były związane z adwekcją południowo-wschodnią, południową i południowo-zachodnią (tab. 4). Dobowe sumy promieniowania były natomiast istotnie mniejsze od średniej sumy podczas adwekcji północno-wschodniej i północno-zachodniej. Podobna sytuacja miała miejsce latem oraz zimą – napływ mas powietrza z sektora SE-S-SW towarzyszył największym dobowym sumom promieniowania, natomiast z NW-N-NE najmniejszym. Jesienią jedynie adwekcja południowo-zachodnia powodowała, że dobowe sumy promieniowania słonecznego istotnie różniły się od średniej dobowej ze wszystkich dni jesiennych. W ujęciu rocznym, podobnie jak we wszystkich porach roku, największym sumom promieniowania sprzyjała cyrkulacja ze składową południową, natomiast najmniejszym – ze składową północną.

Podobnie jak w przypadku rodzaju i kierunku cyrkulacji, częstość występowania poszczególnych typów cyrkulacji w trzydziestolecie 1986–2015 jest zbliżona (tab. 5). Największe zróżnicowanie częstości typów widoczne jest zimą, kiedy wynosiło 3,8 punktu procentowego (SEC – 1,9% oraz SWC – 5,7%). Różnice w częstości poszczególnych typów cyrkulacji w pozostałych porach roku oraz w roku nie są duże. W ujęciu rocznym nieznacznie przekraczają 2 punkty procentowe.

**Tabela 3.** Częstość (%) kierunków adwekcji w węźle  $52,5^{\circ}\text{N}$ ,  $20^{\circ}\text{E}$  w okresie 1986–2015  
Frequency of occurrence (%) of directions of advection in the node  $52,5^{\circ}\text{N}$ ,  $20^{\circ}\text{E}$  in the period 1986–2015

Pora roku/rok	Kierunek adwekcji								
	O	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
III–V	11,3	12,1	9,9	12,3	8,4	11,9	11,2	10,8	12,0
VI–VIII	11,9	10,8	11,2	13,2	9,1	11,7	12,4	10,9	8,8
IX–XI	10,7	10,1	10,7	13,3	12,5	11,4	10,7	10,1	10,4
XII–II	10,2	11,9	10,2	11,8	9,6	10,6	13,2	11,2	11,4
I–XII	11,0	11,2	10,5	12,6	9,9	11,4	11,9	10,7	10,6

**Tabela 4.** Średnia dobową sumą całkowitego promieniowania słonecznego ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ) nad Polską w dniach z adwekcją mas powietrza z określonych kierunków. Wyróżniono wartości istotnie statystycznie różne od odpowiednio sezonowej i rocznej średniej sumy dobowej z wielolecia 1986–2015 ( $\alpha = 0,05$ )  
*Mean daily sum of global solar radiation ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) over Poland on days with advection of air masses from specific directions. The values that are statistically different ( $\alpha = 0,05$ ) from the seasonal and annual mean daily sum for the multi-year period 1986–2015 are written in bold*

Pora roku/rok	Kierunek adwekcji								
	O	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
III–V	14,17	13,41	<b>12,97</b>	14,16	<b>14,59</b>	<b>15,13</b>	<b>15,47</b>	14,15	<b>12,52</b>
VI–VIII	18,54	<b>16,73</b>	<b>17,46</b>	19,04	<b>20,27</b>	<b>20,19</b>	<b>19,94</b>	<b>18,04</b>	<b>16,88</b>
IX–XI	7,41	6,28	6,33	7,07	7,08	7,32	<b>8,13</b>	7,10	6,38
XII–II	2,69	2,58	<b>2,55</b>	2,84	<b>3,16</b>	<b>3,27</b>	<b>3,19</b>	2,78	<b>2,63</b>
I–XII	<b>11,10</b>	<b>9,78</b>	<b>9,99</b>	10,97	<b>10,82</b>	<b>11,78</b>	<b>11,62</b>	10,57	<b>9,32</b>

**Tabela 5.** Częstość (%) typów cyrkulacji atmosferycznej w węźle 52,5°N, 20°E w okresie 1986–2015  
*Frequency of occurrence (%) of atmospheric circulation types in the node 52.5°N, 20°E in the period 1986–2015*

Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	OC	NC	NEC	EC	SEC	SC	SWC	WC	NWC
III–V	3,7	3,8	2,4	3,1	2,4	4,2	4,4	3,4	4,4
VI–VIII	3,8	4,0	3,3	3,4	2,6	4,6	4,6	3,7	3,8
IX–XI	3,0	3,2	3,5	3,4	3,7	3,4	4,5	3,9	4,0
XII–II	3,2	4,4	2,9	2,3	1,9	4,4	5,7	3,8	4,3
I–XII	3,5	3,9	3,0	3,0	2,7	4,2	4,8	3,7	4,2
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	00	NO	NEO	E0	SEO	S0	SWO	WO	NWO
III–V	3,7	4,3	3,7	3,6	2,4	4,3	4,1	3,6	3,9
VI–VIII	3,9	3,9	3,8	4,5	3,6	3,6	4,9	4,2	2,9
IX–XI	3,7	3,6	3,5	3,9	4,1	4,0	3,7	3,4	4,0
XII–II	2,9	3,4	3,9	4,4	3,7	3,3	4,8	4,2	4,0
I–XII	3,6	3,8	3,8	4,1	3,4	3,8	4,4	3,9	3,7
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	0A	NA	NEA	EA	SEA	SA	SWA	WA	NWA
III–V	3,8	4,0	3,7	5,6	3,7	3,4	2,7	3,7	3,7
VI–VIII	4,1	2,9	4,1	5,2	2,9	3,6	2,9	2,9	2,0
IX–XI	4,0	3,3	3,7	6,0	4,7	4,0	2,5	2,8	2,4
XII–II	4,1	4,1	3,4	5,1	3,9	2,9	2,7	3,1	3,1
I–XII	4,0	3,6	3,7	5,5	3,8	3,5	2,7	3,1	2,8

Największe dobowe sumy promieniowania słonecznego są związane z antycyklonalnymi typami cyrkulacji (tab. 6). Wiosną, latem i jesienią, a także w ujęciu rocznym największa średnia dobowa suma promieniowania słonecznego występowała podczas typu SWA, co jest związane z rozbudowanym Wyżem Azorskim, który obejmuje obszar środkowej Europy, przynosząc bezchmurną pogodę (Żmudzka, 2005). Absolutne maksimum wartości dobowych sum promieniowania słonecznego w wieloleciu 1986–2015 wystąpiło właśnie w typie SWA 18 czerwca 2002 r. i wyniosło  $30,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ . Również zimą napływ z południowego zachodu kształtował dużą średnią dobową sumę promieniowania, chociaż większe sumy występowały w tym sezonie podczas typów SEA i SA. Nie są one jednak istotnie statystycznie różne od średniej dobowej sumy promieniowania zimą. Najmniejsze średnie dobowe sumy występowały podczas cyklonalnych typów cyrkulacji z napływem powietrza z północy i wschodu. Wiosną – podczas panowania typu NWC, jesienią – EC, a latem, zimą oraz średnio w ciągu roku – podczas typu NEC. Absolutne minimum wartości dobowych sum promieniowania słonecznego uśrednionych z obszaru Polski w wieloleciu 1986–2015 wystąpiło 19 grudnia 2001 r. ( $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). Był to dzień z typem NC.

Przeanalizowano także prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia dni o skrajnie dużych sumach promieniowania słonecznego (powyżej percentyla 0,95) w poszczególnych typach cyrkulacji. Tak duże sumy promieniowania słonecznego zdarzają się we wszystkich

**Tabela 6.** Średnia dobowa suma całkowitego promieniowania słonecznego ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ) nad Polską w dniach z określonymi typami cyrkulacji atmosferycznej. Wyróżniono wartości istotnie statystycznie różne od sezonowej i rocznej średniej sumy dobowej z wielolecia 1986–2015 ( $\alpha = 0,05$ )

*Mean daily sum of global solar radiation ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) over Poland on days with a specific circulation type. The values that are statistically different ( $\alpha = 0.05$ ) from the seasonal and annual mean daily sum for the multi-year period 1986–2015 are written in bold*

Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	OC	NC	NEC	EC	SEC	SC	SWC	WC	NWC
III–V	<b>11,58</b>	<b>10,20</b>	<b>10,40</b>	<b>10,34</b>	12,08	12,78	13,63	<b>11,14</b>	<b>9,74</b>
VI–VIII	<b>15,12</b>	<b>14,09</b>	<b>13,11</b>	<b>15,29</b>	<b>16,98</b>	<b>17,63</b>	<b>17,33</b>	<b>15,64</b>	<b>15,11</b>
IX–XI	<b>5,80</b>	<b>5,34</b>	<b>5,18</b>	<b>4,99</b>	6,11	5,95	7,37	<b>6,02</b>	<b>5,29</b>
XII–II	<b>2,45</b>	<b>2,43</b>	<b>2,14</b>	<b>2,57</b>	<b>2,94</b>	<b>3,03</b>	<b>2,92</b>	<b>2,47</b>	<b>2,39</b>
I–XII	<b>9,21</b>	<b>8,03</b>	<b>7,68</b>	<b>8,82</b>	<b>9,59</b>	10,19	9,92	<b>8,74</b>	<b>8,03</b>
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	00	NO	NEO	EO	SEO	SO	SWO	WO	NWO
III–V	14,16	13,37	<b>12,65</b>	15,16	14,70	<b>16,08</b>	<b>15,53</b>	14,32	13,16
VI–VIII	18,73	<b>16,89</b>	<b>17,48</b>	18,97	<b>20,88</b>	<b>20,77</b>	<b>20,46</b>	18,41	<b>16,90</b>
IX–XI	7,47	6,55	<b>5,85</b>	7,48	<b>6,59</b>	7,24	<b>8,74</b>	7,37	6,26
XII–II	<b>2,65</b>	<b>2,55</b>	<b>2,71</b>	<b>2,74</b>	<b>2,68</b>	<b>2,92</b>	<b>3,41</b>	<b>2,66</b>	<b>2,61</b>
I–XII	<b>11,40</b>	10,29	<b>9,74</b>	11,10	<b>10,72</b>	<b>12,06</b>	<b>12,21</b>	10,76	<b>9,23</b>
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	0A	NA	NEA	EA	SEA	SA	SWA	WA	NWA
III–V	<b>16,69</b>	<b>16,49</b>	14,96	<b>15,65</b>	<b>16,19</b>	<b>16,86</b>	<b>18,41</b>	<b>16,77</b>	<b>15,15</b>
VI–VIII	<b>21,55</b>	<b>20,21</b>	<b>20,91</b>	<b>21,54</b>	<b>22,48</b>	<b>22,94</b>	<b>23,25</b>	<b>20,55</b>	<b>20,21</b>
IX–XI	<b>8,59</b>	6,88	<b>7,87</b>	7,96	<b>8,29</b>	<b>8,56</b>	<b>8,62</b>	<b>8,26</b>	<b>8,45</b>
XII–II	<b>2,92</b>	<b>2,75</b>	<b>2,73</b>	3,06	3,73	4,05	<b>3,39</b>	3,31	<b>3,00</b>
I–XII	<b>12,48</b>	11,14	<b>12,10</b>	<b>12,07</b>	<b>11,79</b>	<b>13,41</b>	<b>13,70</b>	<b>12,48</b>	<b>11,33</b>

typach cyrkulacji atmosferycznej, również tych, które towarzyszą małym sumom promieniowania słonecznego (tab. 7). Skrajnie duże sumy promieniowania z największym prawdopodobieństwem pojawiają się w typach antycyklonalnych, z kierunkiem adwekcji SW-S-SE a także podczas cyrkulacji bezadwekcyjnej 0A (odpowiednio 0,13; 0,13; 0,11 i 0,10). Wiosną największe prawdopodobieństwo wystąpienia dni o skrajnie dużych sumach promieniowania jest podczas typów antycyklonalnych z napływem mas powietrza z sektora od E do SW, ale względnie często takie dni pojawiają się także podczas napływu mas powietrza z północy i północnego zachodu w czasie pogody wyżowej. Latem jest duże prawdopodobieństwo wystąpienia dni o skrajnie dużych sumach promieniowania podczas typu SWA (0,20), mniejsze podczas typów 0A (0,18) i SEA (0,13), a także NEA (0,11) i NWA (0,11). Jesienią natomiast takie dni występują najczęściej w typach SWO (0,14) i EA (0,12). Zimą są najczęściej związane z typem SA (0,22), w mniejszym stopniu z typami WA (0,10) i NWA (0,10). Jest to jedyna pora roku, w której wśród dni o skrajnie dużych sumach promieniowania pojawiają się stosunkowo często dni o cyrkulacji cyklonalnej – SEC i SC.



**Tabela 7.** Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia dni o skrajnie dużych sumach promieniowania słonecznego nad Polską w poszczególnych typach cyrkulacji w okresie 1986–2015  
 Conditional probability of occurrence of days with extremely large sums of solar radiation over Poland in specific atmospheric circulation types in the period 1986–2015

Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	OC	NC	NEC	EC	SEC	SC	SWC	WC	NWC
III–V	0,02	.	.	0,01	0,01	0,01	0,02	.	0,01
VI–VIII	0,01	0,01	.	0,01	0,01	0,01	0,03	.	0,02
IX–XI	0,01	.	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
XII–II	.	.	.	0,02	0,06	0,08	0,04	0,03	.
I–XII	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	00	NO	NEO	E0	SEO	S0	SW0	W0	NW0
III–V	0,04	0,02	0,01	0,08	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02
VI–VIII	0,04	.	0,02	0,02	0,08	0,03	0,04	0,02	0,03
IX–XI	0,02	0,01	0,01	0,07	0,06	0,06	0,14	0,03	.
XII–II	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,09	0,04	0,05
I–XII	0,04	0,02	0,02	0,05	0,06	0,05	0,07	0,03	0,02
Pora roku/rok	Typ cyrkulacji								
	0A	NA	NEA	EA	SEA	SA	SWA	WA	NWA
III–V	0,08	0,09	0,08	0,10	0,13	0,12	0,14	0,08	0,10
VI–VIII	0,18	0,05	0,11	0,08	0,13	0,10	0,20	0,10	0,11
IX–XI	0,11	0,03	0,06	0,12	0,10	0,11	0,09	0,06	0,05
XII–II	0,05	0,07	0,02	0,04	0,09	0,22	0,08	0,10	0,10
I–XII	0,10	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,13	0,08	0,09

Rozkład przestrzenny promieniowania słonecznego nad Polską w poszczególnych typach cyrkulacji jest zróżnicowany i znacząco różny od rozkładu średniego (ryc. 2). W ujęciu rocznym, podczas każdego z trzech rodzajów cyrkulacji (cyklonalnej, antycyklonalnej lub bezgradientowej) przy napływie mas powietrza z sektora północnego (północy, północnego wschodu i północnego zachodu) ilość promieniowania docierającego do powierzchni Polski jest najmniejsza i wynosi od  $5,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  do  $8,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typach cyklonalnych (NEC), natomiast od  $8,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  do  $13,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typach antycyklonalnych (NEA). Zmniejszenie ilości promieniowania w przeważającej części roku podczas napływu mas powietrza z północy stwierdzono w rejonach górskich, przy południowej granicy kraju. Jedynie jesienią, podczas adwekcji z północnego zachodu, oraz zimą są widoczne odstępstwa od tej prawidłowości – sumy promieniowania na południu kraju są nieznacznie większe niż w środkowej i północnej części Polski. Zimą rozkład promieniowania nad Polską jest względnie zróżnicowany – średnia dobową sumą promieniowania na południu Polski w niektórych typach nawet trzykrotnie przekracza średnią sumę dobową na krańcach północnych (ryc. 2E). Szczególnie duże zróżnicowanie przestrzenne promieniowania słonecznego jest związane z napływem powietrza z południa. Odpowie-

działne za to może być duże zróżnicowanie przestrzenne zachmurzenia związane z efektami fenowymi, mogącymi powstawać przy napływie powietrza z tego kierunku (Żmudzka, 2007; Woś, 2010). We wszystkich typach cyrkulacji zmniejszenie ilości promieniowania w zimie następuje z S-SW na N-NE, co sugeruje, że rozkład promieniowania jest determinowany głównie przez wysokość bezwzględną oraz czynniki astronomiczne (długość dnia) (Miara i inni, 1987), natomiast w mniejszym stopniu przez czynniki cyrkulacyjne. Dodatkowo, ze względu na niewielki kąt padania promieni słonecznych, zimą stosunkowo dobrze widoczne są różnice spowodowane nierównomiernym oświetleniem stoków w obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu.

Podczas adwekcji ze wschodu, przy cyrkulacji bezgradientowej i antycyklonalnej zmniejszenie ilości promieniowania następuje zwykle z północy na południe. Różnica średniej dobowej sumy promieniowania między północną a południową częścią kraju wynosi wtedy ok.  $2,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  podczas typu E0 oraz ok.  $3,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  podczas typu EA (w ujęciu rocznym). Zmniejszanie promieniowania z północy na południe jest zauważalne szczególnie wiosną i latem, kiedy sumy promieniowania są największe. Latem różnica w średniej dobowej sumie promieniowania słonecznego między północą a południem Polski przekracza  $8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  (podczas panowania typu EA).

Odmienne niż podczas adwekcji ze wschodu jest rozkład przestrzenny promieniowania nad Polską podczas dni z adwekcją mas powietrza z zachodu – zmniejszanie ilości promieniowania następuje wtedy z południa na północ. Podczas typów cyklonalnych, we wszystkich porach roku oraz w roku największe zmniejszenie promieniowania stwierdzono z kierunku S-SE na N-NW. W ujęciu rocznym różnica średniej dobowej sumy promieniowania między południem a północą wynosi wtedy  $3,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  (typ WC). Taki rozkład promieniowania nad Polską może być związany z ośrodkiem niżowym nad północnego Atlantyku. Przechodzące wówczas wzdłuż południowego Bałtyku fronty atmosferyczne, powodują większe zachmurzenie w północnej i północno-zachodniej części Polski, co przekłada się na zmniejszenie dobowych sum promieniowania (Woś, 2010; Kożuchowski, 2011). Podczas cyrkulacji antycyklonalnej, przy adwekcji mas powietrza z zachodu (typ WA), jest widoczne zmniejszanie ilości promieniowania z S-SW na N-NE. Różnica w ilości promieniowania słonecznego w ciągu doby między Polską Południowo-Zachodnią a Północno-Wschodnią wynosi wówczas  $3,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  (w ujęciu rocznym), a różnice te szczególnie wyraźne są w przejściowych porach roku (wiosną i jesienią).

Podobny do rozkładu promieniowania podczas adwekcji z zachodu jest rozkład promieniowania nad Polską przy typach cyrkulacji z adwekcją mas powietrza z sektora południowego (południowego wschodu, południa i południowego zachodu). Podczas cyrkulacji cyklonalnej ilość promieniowania maleje z kierunku SE na NW, co jest widoczne głównie w typie SWC (różnica między południowo-wschodnią a północno-zachodnią Polską wynosi wówczas  $4,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). Typy antycyklonalne powodują natomiast zmniejszanie promieniowania z kierunku SW na NE, najlepiej widoczne w typie SWA (różnice w zakresie  $3,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). W ciągu roku, niezależnie od układu ciśnienia nad Europą, napływ powietrza z sektora południowego powoduje największe sumy promieniowania. Największe wartości sum dobowych występują podczas typu SWA – w południowo-zachodniej Polsce średnie dobowe sumy promieniowania słonecznego zbliżają się wtedy do  $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ .

Warto wspomnieć także o sytuacjach bezadwekcyjnych. Mimo braku wyraźnego kierunku napływu mas powietrza można spostrzec, że rozkład promieniowania nad obsza-

rem Polski jest zróżnicowany przestrzennie, a dodatkowo, różni się także w zależności od charakteru cyrkulacji (C, O bądź A). Podczas cyrkulacji o charakterze cyklonalnym ilość promieniowania maleje z południowego wschodu na północny zachód, zaś przy cyrkulacji antycyklonalnej z południowego zachodu na północny wschód. Taki rozkład promieniowania nad Polską wykazuje pewne podobieństwo do rozkładów promieniowania przy adwekcji z kierunków S-SW-W. Obraz ten wynika w pewnym stopniu z właściwości przyjętej metody klasyfikacji typów cyrkulacji. Wartości dodatnie zarówno wskaźnika  $W_s$  (napływ z zachodu) jak i  $W_p$  (napływ z południa) występują nieco częściej niż wartości ujemne. Zgodnie z przyjętym podziałem rozkładu wartości wskaźników cyrkulacji na trzy równoprawdopodobne klasy oznacza to, że słabo dodatnie wartości obu tych wskaźników będą sklasyfikowane jako klasa „zerowa”, a tym samym jako brak adwekcji, chociaż słaba adwekcja z tych kierunków w rzeczywistości może mieć miejsce.

W sześciu spośród ośmiu kierunków napływu (od SE przez S, SW, W, NW do N), największe zróżnicowanie przestrzenne ilości promieniowania występuje w typach cyklonalnych. Podczas cyrkulacji o charakterze antycyklonalnym różnice przestrzenne na obszarze Polski są mniejsze. Największe zróżnicowanie ilości promieniowania występuje przy adwekcji z południowego zachodu (nawet  $4,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typie SWC w ujęciu rocznym). Rozkład promieniowania jest najmniej zróżnicowany przestrzennie przy adwekcji z północy (zaledwie  $2,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typie NA w ujęciu rocznym). Natomiast przy adwekcji z północnego wschodu oraz wschodu w typach antycyklonalnych jest większe zróżnicowanie przestrzenne ilości promieniowania nad Polską niż podczas typów cyklonalnych. Wyjątkowy pod tym względem jest typ NEA, w którym różnice w ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w ciągu doby między południową a północną Polską są największe i osiągają  $4,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ . Typem cyrkulacji, z którym jest związane względnie małe zróżnicowanie obszaru Polski pod względem ilości docierającego promieniowania słonecznego jest typ bezgradientowy bezadwekcyjny (00). Różnice średniej sumy dobowej promieniowania nad obszarem Polski przekraczają wówczas nieznacznie  $2,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ .

Podobne prawidłowości można stwierdzić wiosną i latem. Największe zróżnicowanie przestrzenne występuje w typie NEA ( $7,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  wiosną i  $10,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  latem), a także w typie SWC ( $5,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  wiosną i  $7,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  latem), najmniejsze zaś występuje wiosną przy adwekcji ze wschodu ( $2,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typie EC), a latem przy adwekcji z północy ( $5,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$  w typie N0). Wiosną największe sumy promieniowania słonecznego nad Polską są związane z cyrkulacją SWA, latem zaś również z cyrkulacją antycyklonalną i napływem mas powietrza z sektora SE-S-SW. Jesienią i zimą obraz ten ulega pewnym zmianom. Jesienią typy cyrkulacji ze składową północną dają stosunkowo mało zróżnicowany przestrzennie rozkład średnich sum promieniowania słonecznego, a największe zróżnicowanie przestrzenne jest podczas typu SWC ( $3,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ) i SWO ( $3,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). To właśnie ten ostatni typ powoduje największe sumy promieniowania, przekraczające w południowej Polsce  $10 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ . Zimą największe sumy promieniowania słonecznego, dochodzące w Karpatach do  $6,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ , są związane z napływem powietrza z południa (typ SA). Typ SA sprzyja również największemu przestrzennemu zróżnicowaniu promieniowania słonecznego nad Polską zimą ( $3,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). W pozostałych typach rozkład promieniowania jest mniej zróżnicowany.

Zarówno typ cyrkulacji jak i kierunek napływu mas powietrza mają istotny wpływ na ilość promieniowania docierającego do powierzchni ziemi (łączy poziom istotności

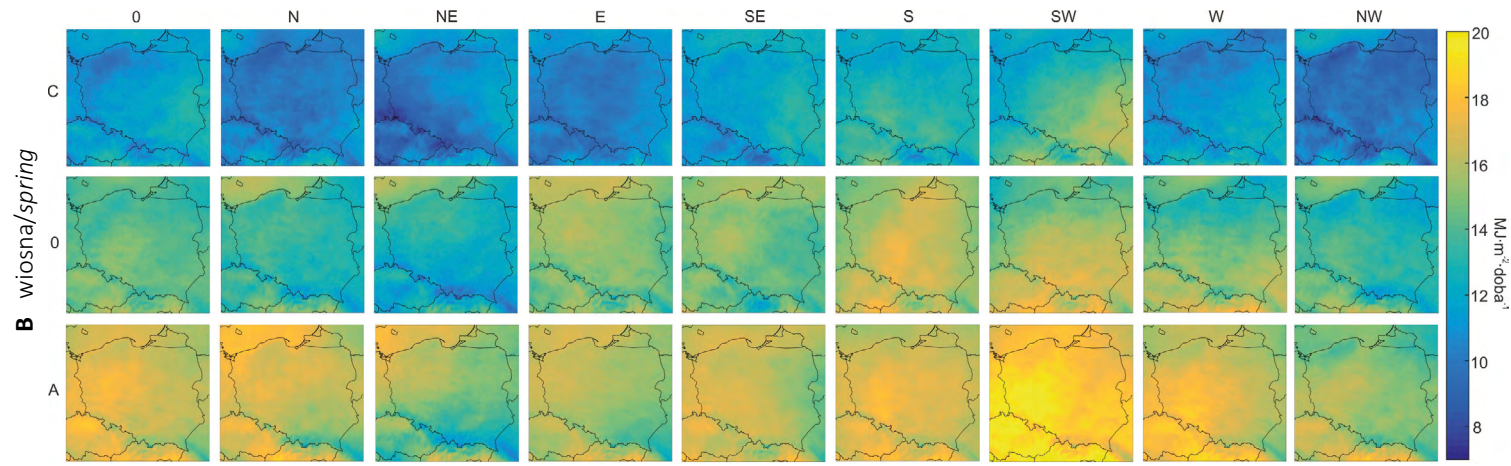
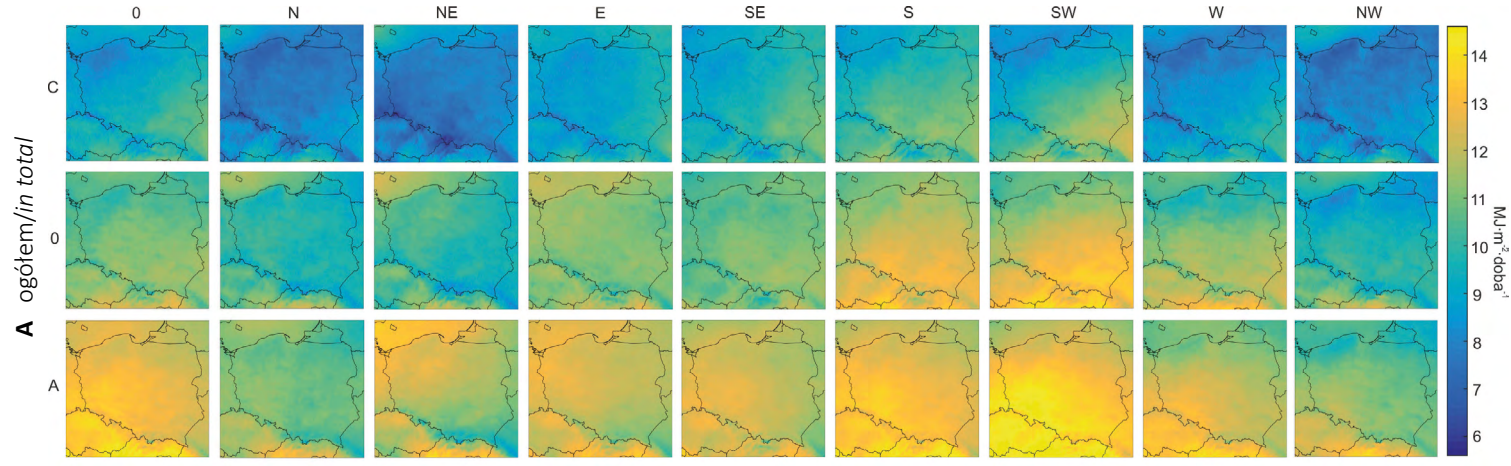
statystycznej  $p$  (ANOVA) każdej z dwóch zmiennych jest dużo niższy niż 0,05) (tab. 8). Współczynnik determinacji  $R^2$  oszacowanego modelu wynosi 0,041, co wskazuje, że zaledwie 4% zmienności promieniowania słonecznego nad Polską w ciągu roku można objaśnić zmiennością zmiennych zależnych (kierunkiem adwekcji i rodzajem cyrkulacji). Wiadomo jednak, że ilość promieniowania słonecznego zależy w pierwszej kolejności od pory roku i podyktowanej tym długości dnia, dlatego  $R^2$  modelu oszacowanego w odniesieniu do grudnia wynosi 0,126, a w odniesieniu do lipca 0,370. W prezentowanym w tab. 8 modelu, w porównaniu do typu bezgradientowego zarówno typ antycyklonalny jak i cyklonalny istotnie modyfikują ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni. W porównaniu do typu bezadwekcyjnego istotnie zmniejszone bądź zwiększone są sumy promieniowania podczas napływu mas powietrza z kierunków: N, NE, S, SW i NW. Wyznaczone współczynniki regresji  $\alpha$  przyjmują największe wartości w przypadku regresorów A, C oraz NW (odpowiednio 1,413, -1,945 i -1,498), natomiast błąd standardowy jest najmniejszy w odniesieniu do regresorów A i C (odpowiednio 0,177 i 0,176). Biorąc pod uwagę powyższe wartości, uzasadnione wydaje się stwierdzenie, że panujący układ baryczny ma większy wpływ na kształtowanie sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego nad Polską niż kierunek adwekcji mas powietrza.

**Tabela 8.** Współczynniki regresji wielokrotnej ( $\alpha$ ) poszczególnych regresorów zmiennych jakościowych ( $b$  – wyraz wolny, A, C – regresory zmiennej rodzaju cyrkulacji; N, NE, E, SE, S, SW, NW – regresory zmiennej kierunku adwekcji) z dobowymi sumami całkowitego promieniowania słonecznego. W tabeli podano także błąd standardowy SE, poziom istotności statystycznej  $p$  oraz łączny poziom istotności statystycznej danej zmiennej  $p$  (ANOVA). Wyróżniono wartości istotne statystycznie na poziomie  $\alpha = 0,05$   
*Coefficients of multiple regression ( $\alpha$ ) of individual regressors of qualitative variables ( $b$  – intercept; A, C – regressors of atmospheric circulation type variable; N, NE, E, SE, S, SW, NW – regressors of advection direction variable) and daily sums of global solar radiation. The table also shows the standard error SE, the statistical significance level  $p$  and the total statistical significance level of a given variable  $p$  (ANOVA). Statistically significant values at the level of  $\alpha = 0.05$  are written in bold*

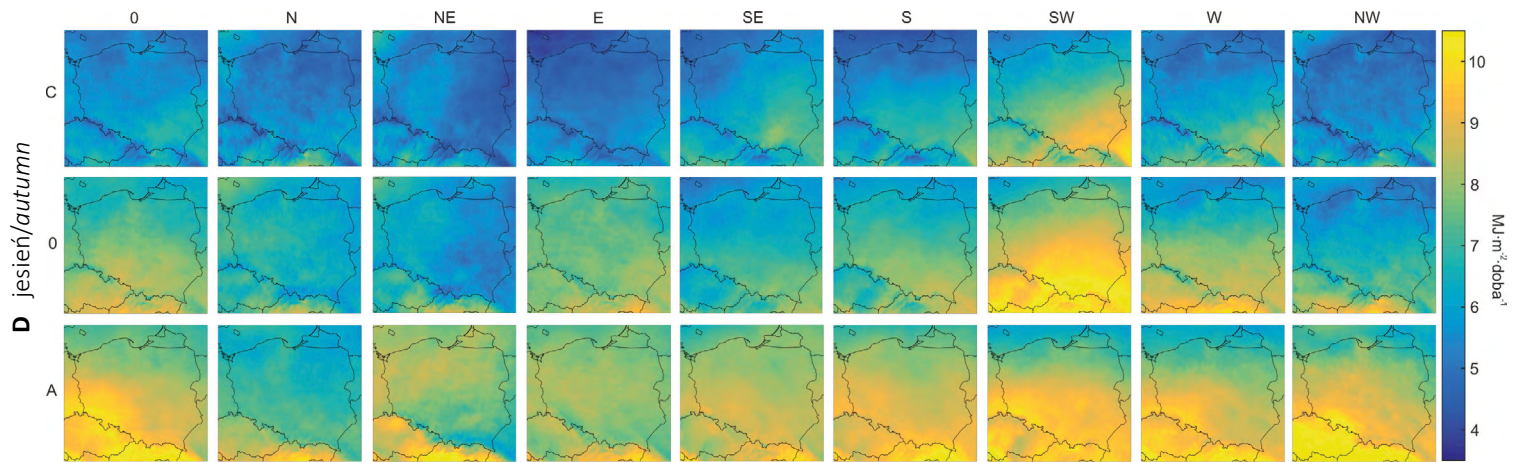
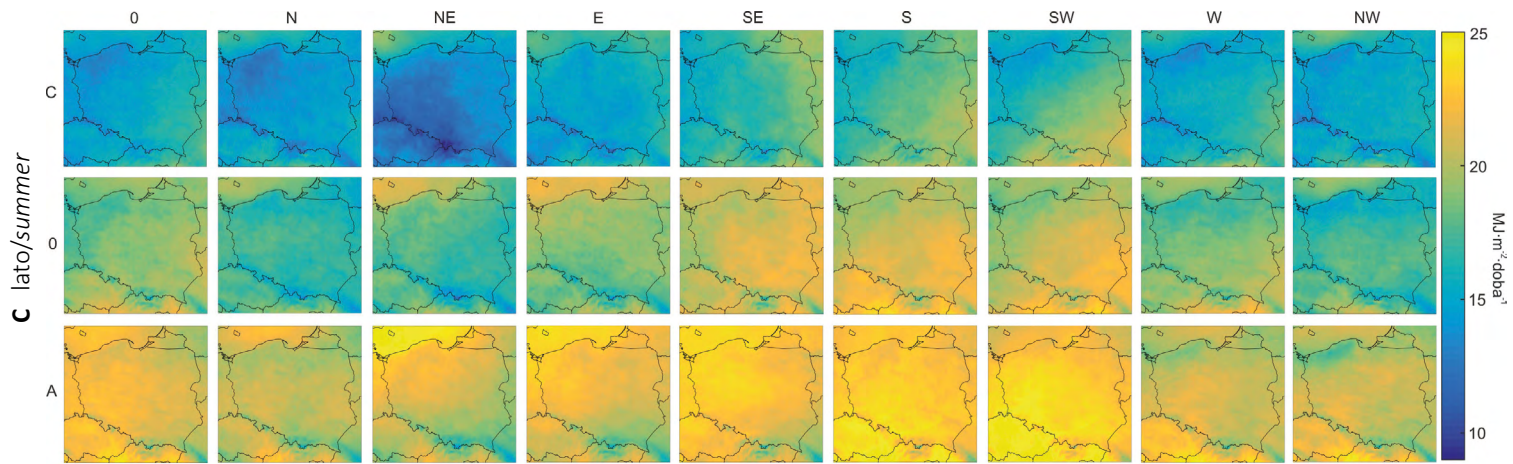
Regressor	$\alpha$	SE	$p$	$p$ (ANOVA)
$b$	11,200	0,240	<b>0,000</b>	–
A	1,413	0,177	<b><math>1,40 \times 10^{-15}</math></b>	<b><math>4,67 \times 10^{-76}</math></b>
C	-1,945	0,176	<b><math>3,00 \times 10^{-28}</math></b>	
N	-1,199	0,305	<b><math>8,62 \times 10^{-5}</math></b>	<b><math>2,96 \times 10^{-23}</math></b>
NE	-1,154	0,311	<b><math>2,02 \times 10^{-4}</math></b>	
E	-0,373	0,297	0,209	
SE	-0,391	0,315	0,215	
S	0,868	0,304	<b>0,004</b>	
SW	0,886	0,302	<b>0,003</b>	
W	-0,373	0,309	0,227	
NW	-1,498	0,310	<b><math>1,36 \times 10^{-6}</math></b>	

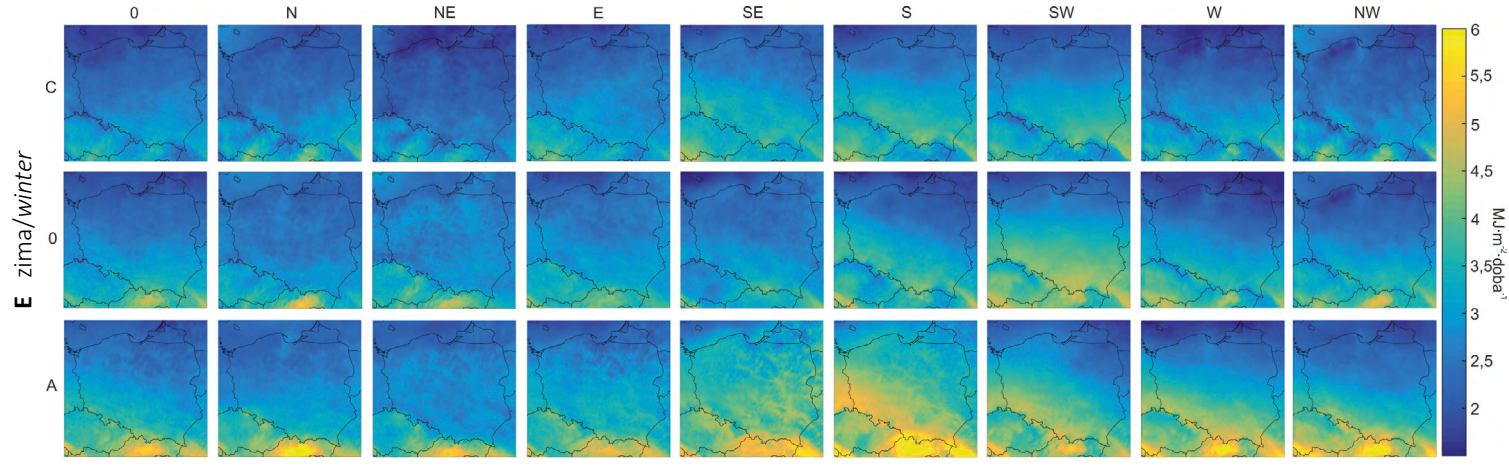
→

**Ryc. 2.** Rozkład przestrzenny średnich dobowych sum całkowitego promieniowania słonecznego ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{doba}^{-1}$ ) nad Polską w poszczególnych typach cyrkulacji w okresie 1986–2015  
*Spatial distribution of mean daily sums of global solar radiation ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ) over Poland in particular atmospheric circulation types in the period 1986–2015*









Uwarunkowania cyrkulacyjne ilości całkowitego promieniowania słonecznego...

## Podsumowanie

W okresie 1986–2015 średnie dobowe sumy promieniowania słonecznego były największe podczas utrzymywania się cyrkulacji antycyklonalnej, tj. kiedy ciśnienie nad Polską było istotnie większe niż średnia wieloletnia, najmniejsze zaś przy cyrkulacji cyklonalnej. Podobne stwierdzenia znaleźć można w pracach bazujących na innym okresie badawczym (Nelken, 2016), a także wykorzystujących inne typologie cyrkulacji (Kejna i Uscka-Kowalkowska, 2018). Wiosną, latem i jesienią, a także w ujęciu rocznym największa średnia dobową sumą promieniowania słonecznego była związana z typem SWA. Duże sumy promieniowania występowały także podczas typów SA i OA. Te same typy wskazała Żmudzka (2007), jako powodujące największe ujemne odchylenia wielkości zachmurzenia od średniej wieloletniej (1966–2000). Typ SWA jest często związany z klinem, w obrębie którego rozwija się lokalny wyż z centrum nad środkową Europą, który wpływa na kształtowanie się pogody z bardzo małym zachmurzeniem (Żmudzka, 2005; Woś, 2010). Latem taki układ baryczny przyczynia się nie tylko do powstawania dużych dobowych sum promieniowania słonecznego, ale także do występowania długotrwałych upałów (Ustrnul i inni, 2010; Tomczyk, 2014). Najmniejsza średnia dobową sumą w wieloletniu 1986–2015 występowała podczas cyklonalnych typów cyrkulacji z kierunkiem napływu powietrza z północy i wschodu (typ NEC). Również w tym przypadku typ NEC odpowiada za istotnie zwiększone zachmurzenie nad Polską (Żmudzka, 2007). Zbliżone wyniki w różnych regionach Polski otrzymali także Matuszko (2002) i Baranowski (1996). Podobieństwo uzyskanych wyników, mimo różnego okresu badań, wskazuje na bardzo silny wpływ zachmurzenia na ilość docierającego do powierzchni ziemi całkowitego promieniowania słonecznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono także, że rodzaj cyrkulacji (antycyklonalny, bezgradientowy lub cyklonalny) ma większy wpływ na kształtowanie sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego nad Polską niż kierunek adwekcji mas powietrza. Do podobnych, choć nie tak szczegółowych wniosków dochodzili badacze zajmujący się związkami zachmurzenia i usłonecznienia z cyrkulacją. Uscka-Kowalkowska i inni (2015) stwierdzili jedynie, że adwekcja mas powietrza z poszczególnych kierunków oraz rodzaj ośrodka barycznego w istotny sposób wpływają na wielkość usłonecznienia. Żmudzka (2007) wykazała, że o wielkości zachmurzenia decyduje układ ciśnienia, jednak wielkość ta jest silnie modyfikowana przez kierunek adwekcji mas powietrza.

Od typu cyrkulacji atmosfery zależy także rozkład przestrzenny dobowych sum promieniowania słonecznego nad obszarem Polski. W przeważającej części roku z typami cyrkulacji ze składową północną i wschodnią (N-NE-E) jest związane zmniejszanie ilości promieniowania słonecznego z północy na południe, podczas gdy napływ mas powietrza z kierunków S-SW-W sprzyja zmniejszeniu promieniowania z południa na północ. Największe zróżnicowanie przestrzenne ilości promieniowania słonecznego nad Polską w większości przypadków jest związane z cyrkulacją cyklonalną, szczególnie z typem SWC (w ujęciu rocznym, a także wiosną, latem i jesienią). Od wiosny do jesieni, kiedy sumy promieniowania słonecznego są największe, przestrzenny rozkład dobowych sum promieniowania słonecznego nad obszarem Polski w dużej mierze zależy od panującego typu cyrkulacji, naśladując rozkład promieniowania w ujęciu rocznym. Zimą względne różnice w ilości promieniowania nad Polską są bardzo duże (ilość promieniowania na południu kraju może być nawet trzy razy większa niż na północy). We wszystkich typach cyrkulacji ilość promieniowania maleje z kierunku S-SW na N-NE, co może sugerować, że duży wpływ na rozkład



przestrzenny promieniowania w tej porze roku ma wysokość bezwzględna oraz szerokość geograficzna (długość dnia), natomiast w mniejszym stopniu czynniki cyrkulacyjne.

Niniejszy artykuł powstał na podstawie pracy doktorskiej, napisanej pod kierunkiem dr hab. Elwiry Żmudzkiej, prof. UW, w Zakładzie Klimatologii WGiSR UW.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autora artykułu.

## Piśmiennictwo

- Baranowski J., 1996, *Wielkość zachmurzenia w Warszawie w zależności od cyrkulacji atmosferycznej*, Zeszyty IGiPZ PAN, 37, s. 43–71.
- Degirmendžić J., 2004, *Zmiany uśłonecznienia w Polsce i ich uwarunkowania cyrkulacyjne*, [w:] K. Kożuchowski (red.), *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Łódź, s. 9–23.
- 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*, Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 3, s. 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kejna M., Uscka-Kowalkowska J., 2018, *Solar radiation variability at Koniczynka near Toruń (Central Poland) in the years 2003–2016*, Bulletin of Geography-Physical Geography Series, 15, 1, s. 27–40. <http://dx.doi.org/10.2478/15614>
- Kożuchowski K., 2011, *Klimat Polski. Nowe spojrzenie*, PWN, Warszawa.
- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2002, *Cyrkulacja atmosferyczna i jej wpływ na zmienność temperatury powietrza w Polsce*, Przegląd Geograficzny, 74, 4, s. 591–604.
- Kulesza K., 2017, *Nowe spojrzenie na klasyfikację typów cyrkulacji atmosfery J. Lityńskiego*, Prace Geograficzne, 150, s. 79–94. <https://doi.org/10.4467/20833113pg.17.018.7322>
- Kulesza K., 2019a, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na ilość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Polsce*, Maszynopis pracy doktorskiej, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Kulesza K., 2019b, *Modified, threshold-based circulation type classification for Central Europe, on the basis of Lityński's classification*, Miscellanea Geographica, 23, 1, s. 53–62. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2018-0033>
- Matuszko D., 2002, *Wpływ cyrkulacji atmosfery na zachmurzenie w Krakowie*, [w:] A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej, Gdynia, s. 141–146.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J., 1987, *Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski*, Przegląd Geograficzny, 59, 4, s. 487–508.
- Nelken K., 2016, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na ilość całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi w Belsku (1971–2014)*, Badania Fizjograficzne, VII, Seria A, Geografia fizyczna, 67, s. 155–168. <https://doi.org/10.14746/bfg.2016.7.12>

- Niedziałek H., 1981, *Całkowite promieniowanie słoneczne a masy powietrza w Puławach w latach 1966–1975*, Przegląd Geofizyczny, 26, 1–2, s. 85–94.
- Niedźwiedz T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, Rozprawy Habilitacyjne UJ, Kraków.
- Pfeifroth U., Kothe S., Müller R., Trentmann J., Hollmann R., Fuchs P., Werscheck M., 2017, *Surface Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 2. Satellite Application Facility on Climate Monitoring*.
- Szyga-Pluta K., 2015, *Circulation influence on cloudiness in Poznan*, Quaestiones Geographicae, 34, 3, s. 141–149. <https://doi.org/10.1515/quageo-2015-0021>
- Tamulewicz J., 2000, *Zachmurzenie nieba w Poznaniu na tle typów cyrkulacji atmosfery*, Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, seria A, 51, s. 133–146.
- Tomczyk A.M., 2014, *Cyrkulacyjne uwarunkowania występowania fal upałów w Poznaniu*, Przegląd Geograficzny, 86, 1, s. 41–52.
- Uscka-Kowalkowska J., 2007, *Ekstynkcja bezpośredniego promieniowania słonecznego w Puławach w latach 1969–1989*, Pamiętnik Puławski, 144, s. 131–143.
- Uscka-Kowalkowska J., 2008, *Bezpośrednie promieniowanie słoneczne i jego ekstynkcja w atmosferze na przykładzie Puław i Papowa Toruńskiego*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.
- Uscka-Kowalkowska J., Kejna M., Maszewski R., 2015, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na osłoneczenie w Koniczynie k/Toruń w latach 1999–2013*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B, LXX, 2, s. 131–147.
- Uscka J., 2003, *Direct solar radiation and its attenuation by the atmosphere with different air masses in the suburban area of Toruń*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne, 75, s. 268–281.
- Ustrnul Z., Czekierda D., Wypych A., 2010, *Extreme values of air temperature in Poland according to different atmospheric circulation classifications*, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 35, 9–12, s. 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.012>
- Wibig J., 2001, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na rozkład przestrzenny anomalii temperatury i opadów w Europie*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Więclaw M., 2011, *Dobowy przebieg całkowitego promieniowania słonecznego i temperatury powietrza w Bydgoszczy w zależności od rodzaju masy powietrza*, Ekologia i Technika, 19, 1, s. 43–48.
- Woś A., 2010, *Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Żmudzka E., 2005, *Pole ciśnienia nad Europą i północnym Atlantykiem w sezonach i latach o anomalnym zachmurzeniu nad Polską*, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 5 (14), s. 393–410.
- Żmudzka E., 2007, *Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne (1951–2000)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

## Summary

Solar radiation is a key element of the Earth's climate system and one of the most important variables in the energy balance of the active surface. The inflow of radiant energy to the Earth's surface depends on the movement (circulation) of the atmosphere and on the associated changes in the amount of aerosols contained in the atmosphere as well as on cloudiness changes (which reduce the inflow of radiation to the Earth's surface

through reflection, dispersion and absorption processes). In that context, the work detailed in this paper had as its main aim a determination of the influence of atmospheric circulation on the amount of global solar radiation reaching the land surface in Poland. The research was based on source material from 1986–2015, originating from meteorological reanalyses and satellite products. Global solar radiation was analysed based on data from CM SAF satellite products, while atmospheric circulation types were designated with the use of modified version of the Lityński's classification. Mean daily sums of radiation during individual circulation types, during A, O, C macrotypes and on days with advection from particular directions were presented. Also the spatial distribution of radiation over the area of Poland during individual circulation types was shown. In the analyses special attention was paid to days with extremely large sums of solar radiation (above the 0.95 percentile). The largest daily sums of solar radiation are connected with anticyclonic circulation types, and the smallest ones – with cyclonic types. The largest mean daily sum of solar radiation occurs during south-western anticyclonic circulation, which is related to the significantly expanded Azores High. The smallest daily sums of solar radiation occur during cyclonic types, with advection of air masses from the north and east – in spring during NWC type, in autumn during EC type, in summer and winter during NEC type. The spatial distribution of solar radiation daily sums over the territory of Poland also depends on the circulation type. For most of the year, the circulation types with the northern and eastern components (N-NE-E) are associated with the reduction of the amount of solar radiation from north to south, while the inflow of air masses from the S-SW-W directions favours the reduction of radiation from south to north. Extremely large sums of solar radiation occur most probably during anticyclonic types with advection of air masses from SW, S and SE, and during the advectionless circulation OA (conditional probability 0.13, 0.13, 0.11 and 0.10 respectively). The paper also demonstrates that the circulation type (i.e. prevailing pressure system) has a greater influence on daily sums of global solar radiation over Poland than the direction of air masses advection. The research results show that atmospheric circulation plays a significant role in determining the amount of solar radiation reaching the land surface in Poland.

