

ZMIENNOŚĆ CAŁKOWITEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W WARSZAWIE W LATACH 1964–2013

Long-term total solar radiation variability in Warszawa within the period 1964–2013

MAŁGORZATA KLENIEWSKA*, BOGDAN H. CHOJNICKI**

Zarys treści. W pracy przedstawiono wyniki analiz 50-letniej (1964–2013) serii pomiarowej całkowitego promieniowania słonecznego (G) ze stacji Warszawa-Bielany. W badanym okresie zaobserwowano wzrost wartości sum całkowitego promieniowania słonecznego o $11,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ rocznie. Stwierdzono występowanie przeciwnych trendów sum rocznych G w badanym okresie: spadek do 1981 roku oraz notowany od połowy lat 80. wzrost sum promieniowania całkowitego. Zmiany takie zaobserwowano również w porach roku: latem, jesienią i zimą, natomiast wiosną zanotowano stały wzrost sum całkowitego promieniowania słonecznego. Stwierdzono również zwiększenie częstości występowania od lat 80. wysokich (powyżej $20,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) sum dziennych promieniowania całkowitego oraz zmniejszenie udziału sum dziennych G poniżej $5,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

Słowa kluczowe: klimat miasta, całkowite promieniowanie słoneczne, Warszawa, trendy promieniowania, homogenizacja

Abstract. This paper presents the results of a study that is based on 50-year series (1964–2013) of total solar radiation (G) for Warszawa-Bielany – a station that is located in the northern part of the Warszawa agglomeration. A positive trend of G ($11.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ per year) within the whole period was found and the increase rate was 3.3% of the average G value estimated for 1964–2013. The annual G sum trends are negative before and positive after 1981. Similar trend patterns were found in summer, autumn and winter, while the seasonal sum of G in spring was characterized by a positive trend throughout the whole period 1964–2013. The distribution of daily sums of G has also changed since 1980 and frequency of values above $20.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and below $5.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ were increased and decreased respectively.

Key words: total solar radiation, Warszawa, urban climate, homogenization, solar trend

Wstęp

Promieniowanie całkowite (G) to łączny strumień promieniowania w zakresie krótkofalowej części widma słonecznego ($0,17\text{--}4,0 \mu\text{m}$) przychodzący na powierzchnię poziomą w postaci promieniowania bezpośredniego oraz promieniowania rozproszonego, padający lub dochodzący z górnej hemisfery (Niedźwiedź 2003). Gęstość strumienia energii słonecznej docierającej do punktu na powierzchni Ziemi zależy od czynników astronomicznych, geograficznych, cyrkulacyjnych oraz lokalnych. Całkowite promieniowanie słoneczne wykazuje dużą zmienność w czasie, determinowaną przez czynniki meteorologiczne. Wpływ warunków meteorologicznych na kształtowanie się dopływu energii słonecznej do powierzchni podłoża najbardziej widoczny jest

w odniesieniu do sum dziennych (Bogdańska, Podogrocki 2000). Energia promienista docierająca od Słońca stanowi napęd zarówno żywej, jak i nieżywej części, dlatego badanie jej strumienia stanowi podstawę zrozumienia funkcjonowania całej biosfery (Kędziora 1999).

Od lat 50. XX wieku w wielu miejscach na świecie obserwowano osłabienie całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi, nazwane *dimming* lub *global dimming* (Wild 2009). Podawane w literaturze wielkości osłabienia są zróżnicowane w zależności od miejsca oraz analizowanego okresu i wynoszą np.: 1% na dekadę dla Turcji (Aksoy 1997), 1,5% na dekadę na obszarze Półwyspu Iberyjskiego (Sanchez-Lorenzo i in. 2013), 4% na dekadę dla obszaru Niemiec (Liepert i in. 1994) do 7% na dekadę w dawnym Związku Radzieckim (Abakumova i in. 1996). Alpert i in.

* Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Zakład Meteorologii i Klimatologii, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa; e-mail: malgorzata_kleniewska@sggw.pl

** Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań

(2005), analizując trendy G z ponad 300 stacji miejskich, zaobserwowali, że osłabienie promieniowania (w latach 1964–1989) było większe w bardziej zaludnionych miejscach (miasta powyżej 100 tys. mieszkańców) w porównaniu z mniejszymi miastami. Jednocześnie w mniej zaludnionych miastach, leżących pomiędzy równoleżnikami 15°N i 15°S , zaobserwowano wzrost G (Alpert i in. 2005).

Oslabienie promieniowania słonecznego obserwowane było do początku lat 80. i od tego czasu, zależnie od miejsca, notowana jest stabilizacja i/lub wzrost promieniowania zwana *brightening* (Wild 2009). Wyniki badań wskazują na wzrost wartości całkowitego promieniowania w Europie wynoszący 1,0% na dekadę w latach 1987–2002 (Norris, Wild 2007), 2,2% na dekadę w latach 1985–2005 (Wild i in. 2009), 4,7% na dekadę w Wielkiej Brytanii w latach 1990–2005 (Ohmura 2009), 5,5% na dekadę w Japonii w latach 1990–2002 (Norris, Wild 2009). Natomiast w Indiach, w latach 1984–2005, stwierdzono osłabienie promieniowania o 4% na dekadę (Padma Kumari i in. 2007).

Badania wskazują na różne przyczyny obserwowanych zmian sum energii promieniowania słonecznego: zmiany w stopniu zachmurzenia (Russak 1990; Liepert 2002; Stjern i in. 2009; Chiacchio i in. 2010), zmiany grubości optycznej chmur (Liepert 1997, 2002) i przezroczystości atmosfery (Uscka-Kowalkowska 2013) oraz zmiany wielkości emisji aerozoli (Stanhill, Moreshet 1992; Stanhill, Cohen 2001).

Głównym celem pracy jest analiza zmienności całkowitego promieniowania słonecznego w Warszawie w kontekście zmian obserwowanych w innych miastach na świecie. Poza podstawowymi charakterystykami statystycznymi 50-letniej serii sum promieniowania całkowitego, zbadano trendy sum rocznych G , zmiany miesięcznych sum promieniowania, także w ujęciu sezonowym, oraz rozkłady częstości sum dziennych G .

Material i metody

W badaniach wykorzystano serię sum dziennych całkowitego promieniowania słonecznego dla wielolecia 1964–2013, pobraną z bazy World Radiation Data Centre (WRDC) (<http://wrdc.mgo.rssi.ru>). Dienne sumy promieniowania wyrażone w $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ przeliczono na $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a następnie obliczono sumy miesięczne i roczne oraz dla pór roku: wiosny (III–V), lata (VI–VIII), jesieni (IX–XI) i zimy (XII–II).

Dane zawarte w bazie pochodzą ze stacji Warszawa-Bielany, położonej na terenie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, oddalonej o 7 km na północ od centrum miasta. Wstępna analiza jakości danych była przeprowadzana przez IMGW (Chwieduk, Bogdańska 2004), a dane przesyłano do bazy WRDC, gdzie podlegały kontroli i flagowaniu (oznaczanie poziomu ich jakości; <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/solar-radiation.html>). W niniejszej pracy przeprowadzono także kontrolę dziennych wartości, poszukując tzw. dużych błędów i przypadkowych wartości (Aguilar i in. 2003). Ponadto sprawdzono jednorodność miesięcznych sum promieniowania stosując test na homogeniczność SNHT (*Standard Normal Homogeneity Test*) z pojedynczym przesunięciem (Alexandersson, Moberg 1997; Sanchez-Lorenzo 2013), a obliczenia wykonano wykorzystując program AnClim (Štěpánek 2008). Przeprowadzony test oraz analiza danych dotyczących funkcjonowania stacji w badanym okresie pozwoliła na upewnienie się co do wysokiej jakości analizowanych danych, w związku z czym nie dokonano żadnych zmian w badanej serii pomiarowej.

Wyniki i dyskusja

Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego z roku na rok

Roczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego w Warszawie w okresie 1964–2013 wynosiły od $3217 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (1980 rok) do $4033 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (2011 rok), natomiast średnia z tego okresu osiągnęła wartość $3672 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Podane wyniki są wyższe w porównaniu z sumami dla okresu 1961–1995, zawartymi w opracowaniu Bogdańskiej i Podogrockiego (2000), gdzie minimum, maksimum i średnia dla Warszawy wynoszą odpowiednio $3162 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, $4014 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $3538 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Od początku lat 80. obserwowano wzrost całkowitego promieniowania słonecznego w Warszawie, a najwyższą średnią sumą całkowitego promieniowania słonecznego charakteryzowała się dekada 1991–2000 ($3859 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) (tab. 1). Dekada 1981–1990 cechowała się największą zmiennością z roku na rok wartości całkowitego promieniowania słonecznego (odchylenie standardowe $206 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). W okresie tym zaobserwowano również największe zróżnicowanie pomiędzy sumami rocznymi G – największy wzrost, wynoszący $371 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, zanotowano na przełomie 1981 i 1982 roku, a największy spadek, wynoszący $425 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, pomiędzy latami 1988 i 1989.

Tabela 1

Podstawowe statystyki średnich dekadowych sum całkowitego promieniowania słonecznego [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na stacji Warszawa-Bielany w okresie 1971–2013

The characteristics of mean decadal sum of total solar radiation at Warszawa-Bielany station within the period 1971–2013

Okres / Period	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	1964–2013
Średnia / Mean [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	3430	3577	3859	3838	3672
Minimum [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	3217	3282	3686	3547	3217
Maximum [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	3597	3940	4014	4017	4033
Odchylenie standardowe / Standard deviation [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	127	206	103	143	233

Analiza trendów sum rocznych całkowitego promieniowania słonecznego wskazuje na istotny statystycznie wzrost G na stacji Warszawa-Bielany w latach 1964–2013, wynoszący $11,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ rocznie. Podobny wzrost zaobserwowano w Warszawie w latach 1961–1995 ($11,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ rocznie, Bogdańska, Podogrocki 2000). Wyniki badań przeprowadzonych dla innych miejsc w Polsce wskazują na wzrost całkowitego promieniowania słonecznego we Wrocławiu w latach 1961–2012 (Bryś 2013) oraz spadek G w Krakowie w latach 1884–2010 (Matuszko 2014).

W analizowanej serii można wyróżnić dwa okresy z przeciwną tendencją zmian sum rocznych: spadek G o $12,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ rocznie w latach 1964–1981 i wzrost G od roku 1984 roku o $13,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ rocznie. Otrzymane wartości są porównywalne z wartościami trendów całkowitego promieniowania słonecznego uzyskanych dla Niemiec i krajów Beneluxu (Wild 2009).

Całkowite promieniowanie słoneczne w porach roku

W niniejszej pracy analizowano również sumy miesięczne G w ujęciu sezonowym. Uzyskane przebiegi całkowitego promieniowania słonecznego wygładzono za pomocą 13-letniego dolno-przepustowego filtra Gaussa (Sanchez-Lorenzo 2013).

Wyniki analizy całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych porach roku wskazują na stały wzrost G wiosną, podczas gdy w pozostałych sezonach widać tendencję charakterystyczną dla sum rocznych. Wartość całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych porach roku osiągnęła minimum zimą 1968 roku, latem 1980 roku i jesienią 1978 roku (rys. 1). Maksymalne sezonowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego latem i zimą zanotowano w połowie lat 90., natomiast jesień i wiosnę z naj-

większymi wartościami G zaobserwowano odpowiednio w 2005 roku i 2011 roku.

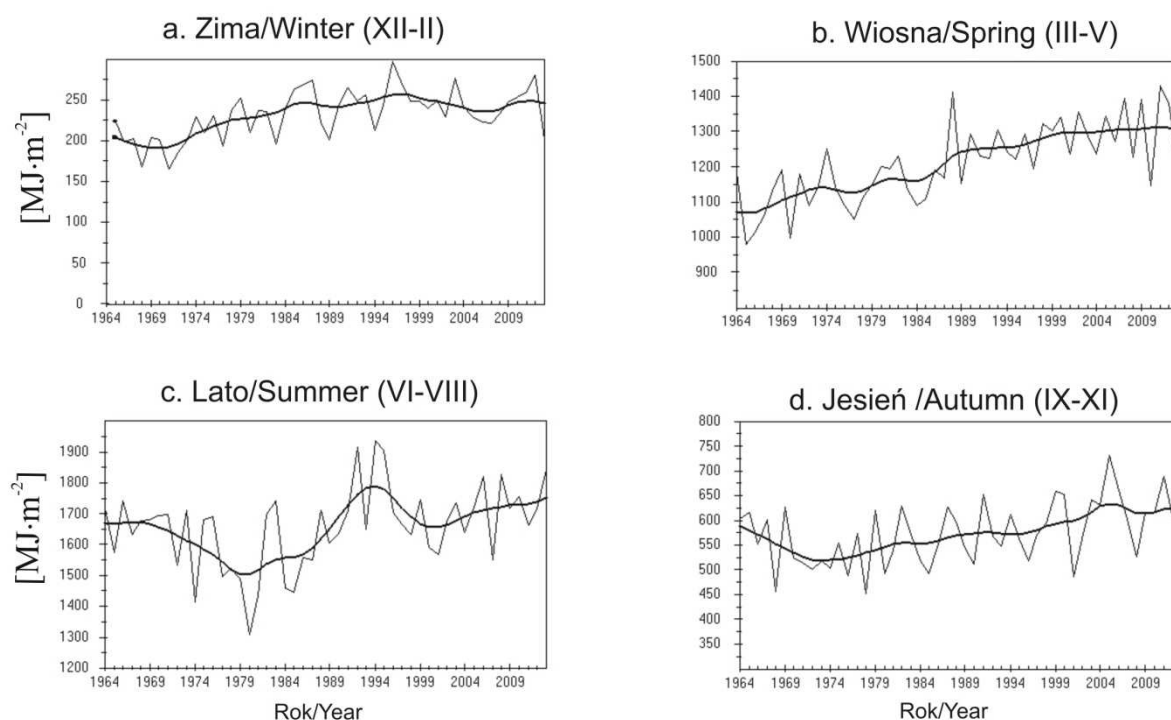
Uzyskane, istotne statystycznie trendy rocznych sum całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych porach roku wskazują na wzrost G w analizowanym okresie. Najwyższy wzrost otrzymano dla wiosny ($54,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dekadę), prawie dwukrotnie mniejszy dla lata ($29,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dekadę), jeszcze mniejszy dla jesieni ($19,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dekadę) i najniższy dla zimy ($10,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dekadę).

Przebieg roczny całkowitego promieniowania słonecznego

Wyniki analizy przebiegu rocznego całkowitego promieniowania słonecznego dla Warszawy w latach 1964–2013 zawarto w tab. 2 i na rys. 2.

Największe miesięczne sumy promieniowania całkowitego w badanej 50-letniej serii pomiarowej w Warszawie notowano w lipcu (19 przypadków), czerwcu (17 przypadków), maju (11 przypadków) i sierpniu (3 przypadki). Średnia wartość G dla okresu 1964–2013 w czerwcu i lipcu była zbliżona i wynosiła odpowiednio $580,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $579,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, natomiast w maju – $555,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a w sierpniu – $495,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (tab. 3).

Największy średni udział sum miesięcznych G w sumie rocznej wynosił $16,0\%$, zaobserwowany dla czerwca w dekadzie 1971–1980. W pozostałych dekadach największym udziałem sum miesięcznych charakteryzował się lipiec (tab. 2). Zaobserwowano również stosunkowo wysoki udział sum majowych w sumie rocznej (wyższy od udziału sum dla sierpnia), co było prawdopodobnie spowodowane częstym napływem arktycznych mas powietrza nad obszar Polski w tym miesiącu. Czyste, arktyczne masy sprzyjają wzrostowi wielkości promieniowania bezpośredniego (Bryś 2013), który jest główną składową promieniowania całkowitego.



Rys. 1. Przebieg sum całkowitego promieniowania słonecznego [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] w poszczególnych porach roku (cienka linia) wygładzony 13-letnim dolnoprzepustowym filtrem Gaussa (pogrubiona linia) na stacji Warszawa-Bielany w latach 1964–2013

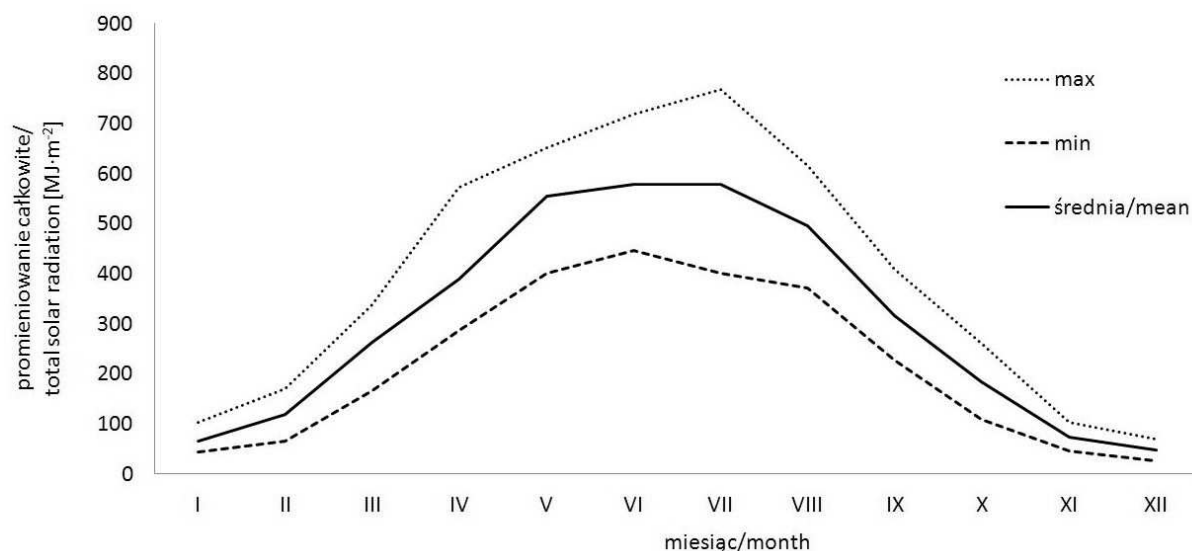
Seasonal total solar radiation runs (thin line) filtered with 13-year Gaussian low – pass filter (bold line) for 1964–2013 period at Warszawa-Bielany station

Tabela 2

Udział średnich miesięcznych sum całkowitego promieniowania słonecznego w sumie rocznej na stacji Warszawa-Bielany w latach 1971–2013 [%]

The contribution of monthly G in annual sums [%] at Warszawa-Bielany station within the period 1971–2013

Okres / Period	Miesiąc / Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1971–1980	1,8	3,2	7,5	10,5	15,2	16,0	15,6	13,7	8,7	4,6	2,0	1,3
1981–1990	1,8	3,6	7,0	10,7	15,8	14,9	15,9	13,4	8,1	5,3	2,2	1,3
1991–2000	2,0	3,2	7,0	10,4	15,4	15,6	15,9	13,7	8,3	5,0	2,1	1,4
2001–2010	1,8	3,2	7,2	11,4	15,0	15,7	15,8	12,9	8,8	5,0	2,0	1,3
1964–2013	1,8	3,3	7,2	10,6	15,1	15,8	15,8	13,5	8,6	4,5	2,0	1,3



Rys. 2. Roczny przebieg minimalnych, maksymalnych i średnich miesięcznych sum całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Warszawa-Bielany w latach 1964–2013

The annual runs of mean, maximum and minimum sum of G at Warszawa-Bielany station within the period 1964–2013

Tabela 3

Charakterystyki statystyczne sum miesięcznych całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Warszawa-Bielany w latach 1964–2013

Monthly sum of total solar radiation characteristics at Warszawa-Bielany station within the period 1964–2013

Miesiąc	Średnia / Mean [MJ·m ⁻²]	Minimum [MJ·m ⁻²]	Maximum [MJ·m ⁻²]	Odchylenie standardowe / Standard deviation [MJ·m ⁻²]	Współczynnik zmienności / Variability coefficient [%]
I	66,0	43,1	104,1	13,0	19,7
II	119,7	66,4	169,4	22,0	18,4
III	263,9	166,5	338,8	37,7	14,3
IV	390,2	285,8	573,5	58,4	15,0
V	555,9	401,7	651,9	64,4	11,6
VI	580,0	446,8	718,3	61,2	10,6
VII	579,8	401,9	768,6	79,1	13,6
VIII	495,6	372,5	615,8	56,1	11,3
IX	315,9	227,4	409,5	47,8	15,1
X	183,5	109,8	261,4	33,5	18,3
XI	74,4	46,9	102,4	12,9	17,4
XII	47,3	26,7	69,6	10,2	21,5

Najmniejszy udział sum miesięcznych G odnotowano w grudniu i wynosił on tylko 1,3% sumy rocznej (tab. 2), a miesięczne sumy całko-

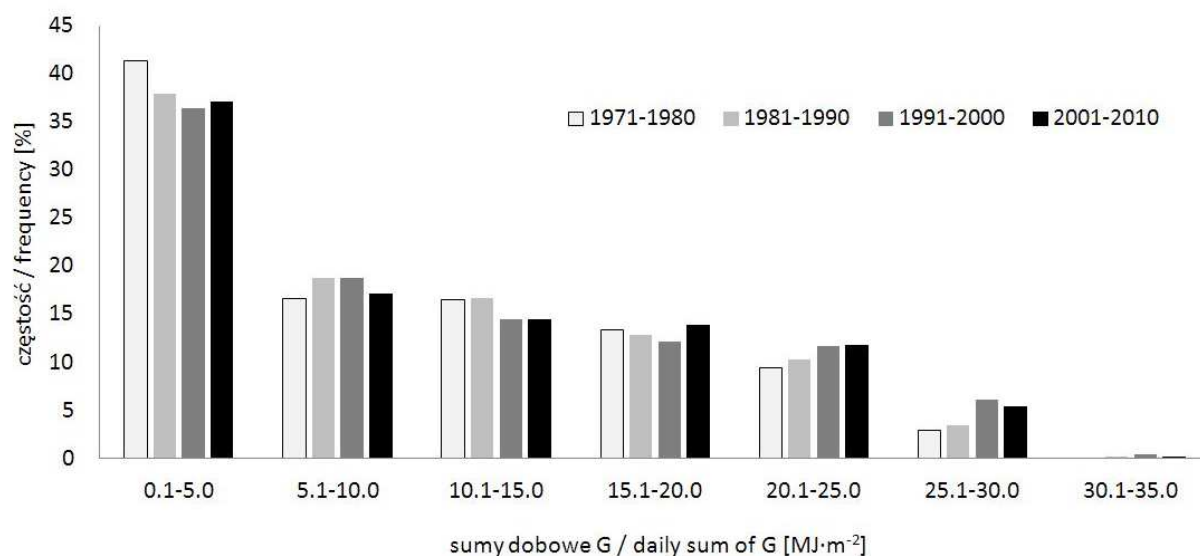
witego promieniowania słonecznego w grudniu były najniższe w 46 przypadkach w ciągu 50 analizowanych lat. Średnia miesięczna suma G w la-

tach 1964–2013 wynosiła $47,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a najniższa suma miesięczna – $26,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (1970).

Sumy dzienne całkowitego promieniowania słonecznego

Sumy dzienne G o wartości do $5,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ były najczęściej obserwowanymi w analizowanym okresie (38,2%), z największym ich udziałem w dekadzie 1971–1980 (41,3%). Udział ten był coraz mniejszy w kolejnych dekadach i osiągnął

minimum 36,4% w latach 1991–2000. W przypadku wyższych wartości sum dziennych G , w przedziałach $20,1\text{--}25,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $25,1\text{--}30,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, zaobserwowano wzrost częstości ich występowania odpowiednio od 9,4 do 11,8% i od 2,9 do 6,1% (rys. 3). Od lat 80. notowane były przypadki wysokich sum dziennych G , powyżej $30,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$: 4 przypadki w latach 1981–1990, 14 przypadków w latach 1991–2000 i 8 przypadków w latach 2001–2010.



Rys. 3. Rozkład częstości sum dziennych całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Warszawa-Bielany w latach 1964–2013

The histogram of daily G sum [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] for Warszawa-Bielany station within the period 1964–2013, binned in decades

Podsumowanie

W Warszawie, w latach 1964–2013, zaobserwowano wzrost wartości całkowitego promieniowania słonecznego, z najwyższą średnią sumą G w dekadzie 1991–2000. W analizowanym okresie wyróżniają się dwa trendy sum rocznych G : spadek do 1981 roku oraz wzrost od połowy lat 80. Zmiany takie występują również w porach roku: latem, jesienią i zimą, natomiast wiosną zanotowano stały wzrost sum całkowitego promieniowania słonecznego.

Największy udział miesięcznych sum całkowitego promieniowania w sumach rocznych zanotowano w lipcu, poza dekadą 1971–1980, kiedy to przeważały sumy czerwcowe G .

Najczęściej obserwowano najniższe sumy dzienne G o wartości do $5,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Udział ten

był coraz mniejszy w kolejnych dekadach, a minimum osiągnął w latach 1991–2000. W przypadku wyższych wartości sum dziennych G , w przedziałach $20,1\text{--}25,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $25,1\text{--}30,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, stwierdzono wzrost częstości ich występowania w analizowanym okresie. Zaobserwowano również pojawienie się od lat 80. wysokich, powyżej $30,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, sum dziennych całkowitego promieniowania słonecznego.

Literatura

Abakumova Galina M., Eva M. Feigelson, Viivi Russak, Valentina V. Stadnik. 1996. „Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the Former Soviet Union”. *Journal of Climate* 9 (6): 1319-1327.

- Aguilar Enric, Inge Auer, Manola Brunet, Thomas C. Peterson, Jon Wieringa. 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. WMO/TD No. 1186. Geneva: World Meteorological Organization.
- Aksoy Bülent. 1997. „Variations and trends in global solar radiation for Turkey”. *Theoretical Applied Climatology* 58 (1): 71-77.
- Alexandersson Hans, Anders Moberg. 1997. „Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends”. *International Journal of Climatology* 17 (1): 25-34.
- Alpert Pinhas, Pavel Kishcha, Yoram J. Kaufman, Rotem Schwarzbard. 2005. „Global dimming or local dimming? Effect of urbanization on sunlight availability”. *Geophysical Research Letters* 32 (17), L17802, doi: 10.1029/2005GL023320.
- Bogdańska Barbara, Janusz Podogrocki. 2000. „Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995”. *Materiały badawcze IMGW, seria Meteorologia* 30: 1-43.
- Bryś Krystyna. 2013. Dynamika bilansu radiacyjnego murawy oraz powierzchni nieporośniętej. Monografie CLXII. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Chiacchio Marc, Tracy Ewen, Martin Wild, Elena Arabini. 2010. „Influence of climate shifts on decadal variations of Surface solar radiation in Alaska”. *Journal of Geophysical Research* 115 (D10), doi: 10.1029/2009JD012533.
- Chwieduk Dorota, Barbara Bogdańska. 2004. „Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions”. *Renewable Energy* 29 (9): 1569-1581.
- Kędziora Andrzej. 1999. Podstawy agrometeorologii. Poznań: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Liepert Beate G. 1997. „Recent changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany”. *International Journal of Climatology* 17 (14): 1581-1593.
- Liepert Beate G. 2002. „Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961–1990”. *Geophysical Research Letters* 29 (10): 61-1–61-4.
- Liepert Beate G., Peter Fabian, Hartmut Grassl. 1994. „Solar radiation in Germany: Observed trends and assessment of their causes. Part I: Regional approach”. *Contributions To Atmospheric Physics: Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 67 (1): 15-29.
- Matuszko Dorota. 2014. „Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration”. *International Journal of Climatology* 23 (1): 228-234.
- Niedźwiedz Tadeusz (red.). 2003. Słownik meteorologiczny. Warszawa: Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Norris Joel R., Martin Wild. 2007. „Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar “dimming” and solar “brightening”. *Journal of Geophysical Research* 112 (D8): D08214, doi: 10.1029/2006JD007794.
- Norris Joel R., Martin Wild. 2009. „Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming” and “solar brightening”. *Journal of Geophysical Research* 114 (D10): D00D15, doi: 10.1029/2008JD011378.
- Ohmura Atsumu. 2009. „Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes”. *Journal of Geophysical Research* 114 (D10): D00D05, doi: 10.1029/2008JD011290.
- Padma Kumari Burrala, Anil L. Londhe, Samuel Daniel, Dattatray B. Jadhav. 2007. „Observational evidence of solar dimming: Offsetting Surface Warming over India”. *Geophysical Research Letters* 34 (21), L21810, doi: 10.1029/2007GL031133.
- Russak Viivi. 1990. „Trends of solar radiation cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia”. *Tellus B* 42 (2): 206-210.
- Sanchez-Lorenzo Arturo, Josep Calbó, Martin Wild. 2013. „Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends”. *Global and Planetary Change* 100: 343-352.
- Stanhill Gerald, Shabtai Cohen. 2001. „Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences”. *Agricultural and Forest Meteorology* 107 (4): 255-278.
- Stanhill Gerald, Samuel Moreshet. 1992. „Global radiation climate changes: the world network”. *Climatic Change* 21 (1): 57-75.
- Štěpánek Petr. 2008. AnClim – software for time series analysis. Dept. of Geography, Faculty of Natural Sciences, MU, Brno. <http://www.climahom.eu/AnClim.html>
- Stjern Camilla W., Jón E. Kristjánsson, Aksel W. Hansen. 2009. „Global dimming and global brightening – an analysis of surface radiation and cloud cover data in northern Europe”. *International Journal of Climatology* 29 (5): 643-653.
- Uscka-Kowalkowska Joanna. 2013. „An atmospheric extinction of direct solar radiation on Mt. Kasprowy Wierch, Poland”. *Atmospheric Research* 134: 175-185.

Wild Martin. 2009. „Global dimming and brightening: a review”. *Journal of Geophysical Research* 114 (D10): D00D16, doi: 10.1029/2008JD011470.

Wild Martin, Barbara Trüssel, Atsumu Ohmura, Charles N. Long, Gert König-Langlo, Elsworth G. Dutton, Anatoly Tsvetkov. 2009. „Global dimming and brightening: An update beyond 2000”. *Journal of Geophysical Research* 114 (D10): D00D13, doi: 10.1029/2008JD11382.

World Radiation Data Centre: <http://wrdc.mgo.rs.si.ru/>.

Summary

The aim of this study was to analyze the total solar radiation (G) variability in the Warszawa agglomeration at different time scales and in the context of globally observed G. The base of the research was long-term data series of daily G sum from the Warszawa-Bielany station in the period 1964–2013.

The annual sum of G in Warszawa during the period 1964–2013 ranged from 3217 MJ·m⁻² to 4033 MJ·m⁻² with the mean value of 3672 MJ·m⁻² for the entire analyzed period. There are two opposite, statistically significant trends observed in the analyzed G series and the decrease of total solar radiation (12.7 MJ·m⁻² per year) in the years 1964–1981 and an increase of G from 1984 to 2013 (13.0 MJ·m⁻² per year).

The seasonal analysis indicates a permanent increase of spring G values during the whole period, while the rest of the seasons do not show such a clear tendency. As far as the linear trends for seasons are concerned, all the series show significant increases in G during the 1964–2013 period, with the highest absolute rate in spring (54.6 MJ·m⁻² per decade), summer (29.6 MJ·m⁻² per decade), autumn (19.1 MJ·m⁻² per decade) and winter (10.1 MJ·m⁻² per decade).

The greatest mean monthly G value in Warszawa during the period 1964–2013 was recorded in July (19 cases), June (17 cases), May (11 cases) and August (3 cases), and the highest mean monthly value for the whole period was found in June (580.0 MJ·m⁻²) and in July (579.8 MJ·m⁻²). The lowest mean monthly G was observed in December (47.3 MJ·m⁻²) and it is only 1.3% of the annual sum of solar energy measured in Warszawa.

Daily G values lower than 5 MJ·m⁻² were observed most frequently but the contribution of this value class decreased from 41.3% to the level of 36.4% between the 1970s and the 2000s. Simultaneously, the contribution of G values in the ranges 20.1–25.0 MJ·m⁻² and 25.1–30.0 MJ·m⁻² increased from 9.4 to 11.8% and from 2.9 to 6.1%, respectively. The daily G values higher than 30 MJ·m⁻² were observed after the 1980s.