

Prądnik. Prace Muz. Szafera	25	129–138	2015
-----------------------------	----	---------	------

ZBIGNIEW CAPUTA

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Klimatologii
ul. Będzińska 60, 41–200 Sosnowiec
e-mail: zbigniew.caputa@us.edu.pl

DOPIŁYW PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DO POŁUDNIOWEJ CZEŚCI WYŻYNY KRAKOWSKIEJ W LATACH 2008–2014

Incoming solar radiation in the Southern Part of the Cracow Upland in 2008–2014

Abstract. The influx of short-wave radiation (K_{\downarrow}) to the open plateau of the southern part of the Cracow Upland was measured. Subsequently, the daily and annual variability expressed in hourly, daily, monthly, seasonal and annual totals of K_{\downarrow} in the years 2008–2014 was examined. The distribution of the monthly mean of daily totals of K_{\downarrow} in the months from May to August exceeded $16.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. The mean daily value of the total K_{\downarrow} amounted to $10.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ in the analysed period. The mean annual total of K_{\downarrow} amounted to $3955 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ for the tested multi-year period.

Key words: global radiation, topoclimate, renewable energy sources, Cracow Upland

WSTEP

O natężeniu promieniowania krótkofalowego słonecznego – całkowitego (K_{\downarrow}) mierzonego na powierzchni Ziemi decydują czynniki astronomiczne. Od nich zależy natężenie i cykliczność docierającego strumienia K_{\downarrow} do różnych miejsc Ziemi. Najistotniejsze z tych czynników to zmieniająca się w ciągu roku deklinacja Słońca, spowodowana nachyleniem osi ziemskiej w stosunku do ekliptyki, zmienna odległość Ziemi od Słońca, spowodowana eliptrycznym kształtem orbity ziemskiej Słońca oraz szerokość geograficzna. Promieniowanie K_{\downarrow} przechodząc przez atmosferę ulega odbiciu, załamaniu oraz osłabieniu w skutek aerozoli i zanieczyszczeń. Konsekwencją tego faktu jest zróżnicowanie strumienia K_{\downarrow} w zależności od warunków atmosferycznych (zachmurzenie, opad) oraz aerosanitarnych (niska emisja, smog). Dodatkowo natężenie K_{\downarrow} docierające do powierzchni Ziemi może być ograniczone przez zasłonięcie horyzontu przez pasma górskie, roślinność oraz zabudowę (Oke 1999).

Nieliczne badania uwzględniają promieniowanie słoneczne czy bilans promieniowania powierzchni czynnej (Whiteman i in. 1996; Sun i in. 2003; Clements i in. 2003; Lian i in. 2014; Miara i in. 1987). Znajomość gęstości strumienia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi jest bardzo istotna w opracowaniach regionalnych (Paszyński, Niedźwiedz 1991; Bailey 1999), topoklimatycznych i mikroklimatycznych (Paszyński 2004; Bokwa i in. 2008), modelowaniu promieniowania (Wojkowski, Caputa

2009) i bilansu energetycznego (Gądek, Caputa 2003) oraz konstruowaniu map topoklimatycznych (Bartuś 2014). Energia słoneczna znajduje również coraz szersze zastosowanie praktyczne i nabiera znaczenia ekonomicznego jako energia zasilająca ogniwa elektryczne czy panele grzewcze wodę do celów przemysłowych (Caputa i in. 2012).

Przedmiotem tego opracowania był rzeczywisty dopływ promieniowania krótkofalowego słonecznego do powierzchni południowej części Wyżyny Krakowskiej. Natomiast celem, określenie jego zmienności dobowej i rocznej wyrażonej w godzinnych, dobowych, miesięcznych, sezonowych i rocznych sumach K_{\downarrow} .

METODA I MATERIAŁ BADAWCZY

W ramach projektu MNiSW (Caputa, Partyka, red. 2009) w 2007 r. została zainstalowana stacja meteorologiczna Wydziału Nauk o Ziemi, Uniwersytetu Śląskiego na Wyżynie Krakowskiej w Lepiance Czajowskiej (LCz – o współrzędnych geograficznych $50^{\circ}12'23''N$, $19^{\circ}47'04''E$, na wysokości 483 m n.p.m.). Stacja ta leży na terenie płaskim, o małym zasłonięciu horyzontu (2% głównie w kierunku zachodnim) i dobrze reprezentuje warunki klimatyczne najwyższej części Wyżyny Krakowskiej (Caputa, Leśniok 2009). Obok podstawowych elementów meteorologicznych wykonywane były pomiary elementów bilansu promieniowania przy pomocy CNR1 (Kipp, Zonen) na wysokości 1,5 m nad gruntem. Pomiary wykonywano z krokiem 10s i zapisywano przy pomocy CR1000 (Campbell) jako średnie 10 min od 09.2007. Strumień K_{\downarrow} mierzono za pomocą pyranometru CM3 (305–2800 nm) o błędzie pomiaru do 6% ($-10^{\circ}C \div 40^{\circ}C$) i $\pm 25 W \cdot m^{-2}$ przy $1000 W \cdot m^{-2}$. Czujnik CNR1 (składający się z dwóch CM3 i CG3) był okresowo kalibrowany przez porównanie do CNR1 i CNR4 pracujących na stacji WNoZ w Sosnowcu.

Do analizy wykorzystano serię wartości średnich strumienia K_{\downarrow} z lat 2008–2014. Z przyczyn technicznych nie zarejestrowano strumienia K_{\downarrow} w okresie: 1.01–31.03.2008; 18.09–15.12.2010; 28.05–18.06.2011; 14.04–14.10.2012. Uporządkowano i następnie usunięto wartości zerowe K_{\downarrow} z godzin nocnych. Wartości sum godzinnych K_{\downarrow} liczono od pierwszej średniej 10-min. w danej godzinie i zapisywano jako pełna godzina, która kończyła sumowanie w czasie UTC (czas urzędowy letni = UTC+2 godz.). Tak przygotowane 23953 wartości godzinnych sum K_{\downarrow} oraz 2174 dobowych sum K_{\downarrow} poddano analizie w programie Statistica. Rozkład zmiennych był różny od rozkładu normalnego. Strumień K_{\downarrow} był silnie zróżnicowany w ciągu doby jak i roku ze względu na położenie Słońca.

W opracowaniu posługując się standardowymi metodami statystycznymi określono średnie sumy K_{\downarrow} . Ze względu na rozkład zmiennych uwzględniono różne przedziały czasowe (godzinne, dobowe, miesięczne, sezonowe i roczne) określono wielkość dopływu promieniowania do wierzchowinowych partii Wyżyny Krakowskiej. Dodatkowo zwrócono uwagę na okresy gdy suma K_{\downarrow} przekraczała $1 MJ \cdot m^{-2}$ ($1 MJ = 0,278 kWh$), co uzasadnia ekonomiczne wykorzystanie energii słonecznej.

WYNIKI

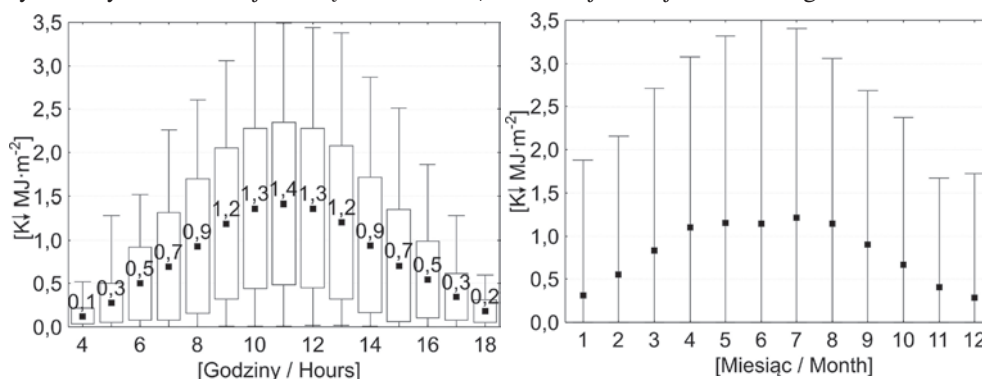
Godzinne sumy promieniowania całkowitego

Podjmując analizę godzinnych sum K_{\downarrow} obliczono częstość w przedziałach co $0,5 MJ \cdot m^{-2} \cdot godz^{-1}$ w celu rozpoznania rozkładu zarejestrowanych wartości na stacji LCz w latach 2008–2014. Zdecydowanie najwięcej przypadków godzinnych sum K_{\downarrow} obejmo-

wały wartości z przedziału $0\text{--}0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ (46%) i tylko 6% sum K_{\downarrow} powyżej $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$. Jeżeli za wartość graniczną przyjęto $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ to częstość mniejszych sum K_{\downarrow} wyniosła 65% a większych od wartości granicznej 32%.

Najwyższą średnią sumę K_{\downarrow} wynoszącą $1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ zmierzono w przedziale 10:10–11:00 w analizowanym wieloleciu (ryc. 1). W tym samym przedziale czasowym wystąpiło maksimum K_{\downarrow} , wynoszące $3,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w dniu 2.06.2013. Związane było to z górowaniem Słońca (10:39 UTC), brakiem zachmurzenia oraz dużą przejrzystością powietrza. Średnia godzinna suma K_{\downarrow} przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ od 9:00 do 13:00. Niskie sumy K_{\downarrow} poniżej $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ pomierzono od wschodu Słońca do 5:00 oraz wieczorem od 17:00 godz.

Przeanalizowano również godzinne sumy K_{\downarrow} w poszczególnych miesiącach roku (ryc. 1). Miesiące od kwietnia do sierpnia charakteryzowały się dużymi sumami K_{\downarrow} przekraczającymi $1,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$. Natomiast wrzesień i październik były miesiącami gdzie systematycznie zmniejszał się strumień K_{\downarrow} aż do najniższej wartości w grudniu.

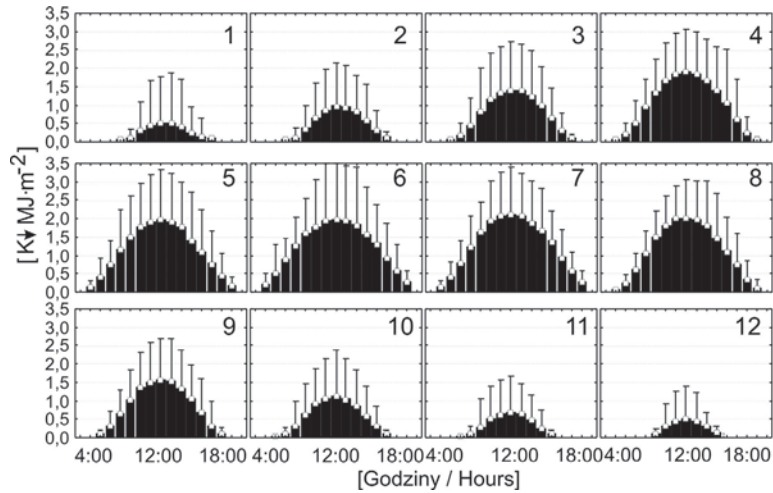


Ryc. 1. Średnie godzinne sumy K_{\downarrow} w podziale na godziny UTC (po lewej) i miesiące (po prawej) na stacji meteorologicznej LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią, wąsy maksimum, a ramki odchylenie standardowe od średniej

Fig. 1. Mean hourly totals of K_{\downarrow} categorized according to UTC (left) and to months (right) at the LCz meteorological station in 2008–2014. Squares indicate the average value, frames stand for the standard deviation from the average value while the dashed lines mark the maximum

Średnie godzinne sumy K_{\downarrow} dla zakresu 8:00–14:00 przekraczały $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w miesiącach od kwietnia do września (ryc. 2). Następnym przedziałem czasowym 9:00–13:00 charakteryzował się wyższymi wartościami przekraczającymi $1,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w tych samych miesiącach (wyjątek stanowił wrzesień $1,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$). Średnia godzinna suma K_{\downarrow} przekraczała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ tylko w godzinach okołopołudniowych w marcu (9:00–13:00) i październiku (10:00–12:00). Z powyższych rozważań wynika, że część energii słonecznej w postaci promieniowania K_{\downarrow} docierała do powierzchni w godzinach 8:00–14:00 co stanowiło 63% rocznej sumy analizowanego promieniowania w tym 31% sum K_{\downarrow} powyżej $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$.

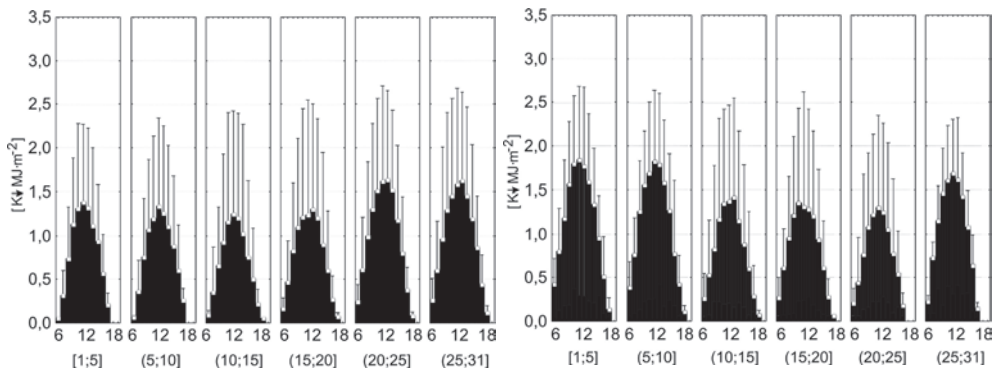
Aby wskazać początek dni z dobowymi sumami K_{\downarrow} powyżej $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w badanym wieloleciu przeprowadzono analizę wybranych miesięcy wiosennych (marzec i kwiecień) gdy promieniowanie K_{\downarrow} było coraz większe zgodnie z coraz wyższym położeniem Słońca odpowiednio 32° i 44° pierwszego dnia wybranych miesięcy. Średnia godzinna suma K_{\downarrow}



Ryc. 2. Średnie godzinne sumy K_{\downarrow} skategoryzowane według miesięcy na stacji LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią dla poszczególnych godzin UTC, wąsy maksimum

Fig. 2. Mean hourly totals of K_{\downarrow} categorized according to months at the LCz station in 2008–2014. Squares indicate the average value, the dashed lines mark the maximum

przekracza wartość $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w godzinach 10:00–12:00 w dniach 10–15 marca. Natomiast w dużo dłuższym przedziale godzinowych po 20 marca (ryc. 3). Analizowana średnia suma K_{\downarrow} przekraczała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w kwietniu od 8:00 do 14:00.



Ryc. 3. Średnie godzinne sumy K_{\downarrow} w marcu (po lewej) i we wrześniu (po prawej) skategoryzowane co pięć dni na stacji LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią dla poszczególnych godzin 6:00–18:00 UTC, wąsy maksimum

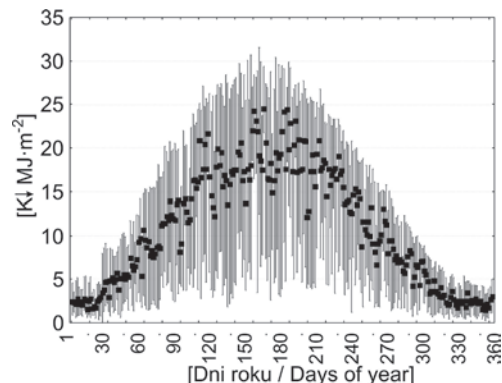
Fig. 3. Mean hourly totals of K_{\downarrow} in Marc (left) and September (right) categorized every five days at the LCz station in 2008–2014. Squares indicate the average value for 6:00–18:00 UTC, the dashed lines mark the maximum

Podobnie badano koniec wystąpienia dni z wysokimi sumami K_{\downarrow} jesienią. Średnia godzinna suma K_{\downarrow} przekraczała wartość $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w godzinach 8:00–14:00 do 10 września, natomiast wyjątek stanowiły ostatnie dni tego miesiąca (po 25 dniu), gdy pomierzono sumy K_{\downarrow} powyżej $1,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ od godziny 10:00 do 12:00 (ryc. 3).

Tylko pierwsza dekada października miała średnie godzinne sumy K_{\downarrow} $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w okresie 9:00–12:00. Pozwala to przypuszczać, że natężenie K_{\downarrow} w tych dniach można wykorzystywać ekonomicznie.

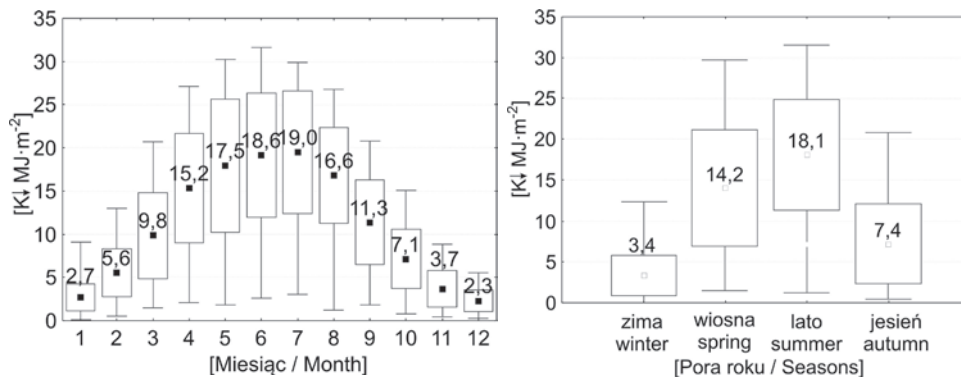
Dobowe sumy promieniowania całkowitego

Zdecydowana większość przypadków (66%) dobowych sum K_{\downarrow} były wartościami powyżej $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 32% przypadków powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ i tylko 7% powyżej $25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Obserwowano średnie dobowe sumy K_{\downarrow} przekraczające $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w miesiącach od kwietnia do sierpnia. Wartości dobowej sumy K_{\downarrow} powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ pojawiały się od 5 marca do 4 października i występowały od 100 do 124 dni w ciągu roku (średnio w okresie 105–235 dnia roku). Wyróżniał się okres od 100. do 220. dnia roku z wartościami średnimi dobowych sum K_{\downarrow} powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Najwyższą dobową sumę K_{\downarrow} $31,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ zanotowano 13.06.2013 roku, a najniższą $0,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 26.12.2013 roku (ryc. 4).



Ryc. 4. Średnie dobowe sumy K_{\downarrow} na stacji LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią, wąsy wartości skrajne

Fig. 4. Mean daily totals of K_{\downarrow} at the LCz station in 2008–2014. Squares indicate the average value, the dashed lines mark the maximum



Ryc. 5. Średnie dobowe sumy K_{\downarrow} w podziale na miesiące (po lewej) i sezony (po prawej) na stacji LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią, ramki odchylenie standardowe od średniej, a wąsy wartości skrajne

Fig. 5. Mean daily totals of K_{\downarrow} categorized according to months (left) and seasons (right) at the LCz station in 2008–2014. Squares indicate the average value, frames stand for the standard deviation from the average value while the dashed lines mark the extreme

W rozkładzie średnich miesięcznych dobowych sum K_{\downarrow} wyróżniały się miesiące od maja do sierpnia przekraczając $16,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Najwyższą średnią pomierzono dla lipca $19,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a najniższą dla grudnia $2,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a więc wartości K_{\downarrow} zmieniają się w ciągu roku o około $16,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Wskazuje to na znaczną rolę czynnika astronomicznego na

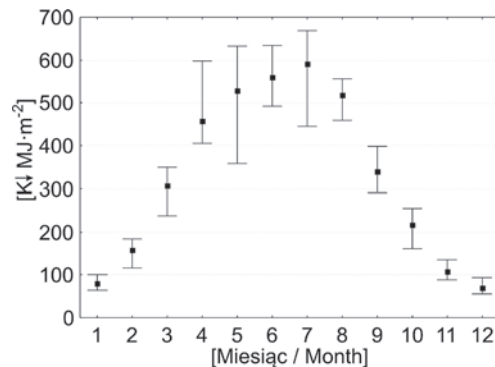
zmiany promieniowania w poszczególnych miesiącach. W podziale na sezony, wyróżniały się wyższe wartości średnich dobowych sum K_{\downarrow} dla wiosny i lata wynosząc odpowiednio 14,2 i 18,1 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Dużo niższe analizowane sumy K_{\downarrow} wystąpiły w okresie jesiennym i zimowym ze względu na niskie położenie Słońca nad horyzontem, krótsze dni oraz większe zachmurzenie i zamglenia w stosunku do wiosny i lata (ryc. 5).

Średnia wartość dobowej sumy K_{\downarrow} wyniosła 10,8 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w analizowanym wieloleciu, najwyższa 11,3 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w 2011 r. i najniższa 10,3 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w 2010 r. Były to wyższe wartości niż pomierzone w przeszłości i podawane dla Wyżyny Krakowskiej jako średnia dobową sumę K_{\downarrow} w wysokości 10,0 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ dla wielolecia 1956–1975 (Grzybowski i in. 1994). Dla tego samego wielolecia średnia roczna wartość strumienia promieniowania całkowitego dla Polski, obliczona na podstawie średnich rocznych wartości K_{\downarrow} wyniosła 9,98 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, odchylenie standardowe było równe 0,19 (Miara i in. 1987).

Miesięczne sumy promieniowania całkowitego

Zestawienie miesięcznych sum K_{\downarrow} pozwoliło na bardziej ogólną ocenę stosunków radiacyjnych w przebiegu rocznym dla lat 2008–2014 (ryc. 6). Niskie średnie miesięczne sumy K_{\downarrow} wystąpiły w styczniu 79 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$, później rosły do miesięcy letnich (w lipcu 596 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$) i następnie stopniowo malały aż do grudnia 70 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$. W przebiegu analizowanych sum K_{\downarrow} obserwowano znaczący dopływ promieniowania do powierzchni czynnej w miesiącach wiosennych, np. suma K_{\downarrow} dla kwietnia 2009 r. (598) przekraczała sumę K_{\downarrow} czerwca (492) i sierpnia (551). Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż czerwiec 2009 r. był wyjątkowo pochmurny i deszczowy co spowodowało znacznie niższe wartości od średniej sumy K_{\downarrow} pomierzonych na stacji LCz 558 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ za okres 2008–2014.

Pomierzona średnia miesięczna suma K_{\downarrow} miała wysoką wartość dla maja 548 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$. Jednak miesiąc maj charakteryzował się dużą zmiennością warunków insolacyjnych w przytoczonej sumie K_{\downarrow} od minimum (359) w 2010 do maksimum (602) w 2009. Nieznaczące wahania i amplitudy miesięcznych sum K_{\downarrow} stwierdzono dla listopada i miesięcy zimowych. Najwyższą analizowaną sumę K_{\downarrow} o wartości 669 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ zanotowano w lipcu 2013 r., a najniższą 56 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ w grudniu 2009 r. Znacznie różnią się od wartości podanych w J. Paszyńskiego, K. Miare (1994), gdzie suma K_{\downarrow} dla lipca wynosiła 543 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Udział średniej miesięcznej sumy K_{\downarrow} lipca w rocznej sumie K_{\downarrow} wyniósł 15%. W okresie od maja do sierpnia skupiało się 56% sumy rocznej promieniowania całkowitego, podczas gdy od listopada do lutego wystąpiło tylko 10% tej sumy. Powyższe pomiary były podobne do zestawienia z wielolecia 1961–1990 (Kozłowska-Szczęśna, Podogrocki 1995). Można zatem przyjąć, że okres 2008–2014 dobrze oddawał stosunki radiacyjne jako reprezentatywne dla dłuższego przedziału czasu.



Ryc. 6. Średnie miesięczne sumy K_{\downarrow} na stacji LCz w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią a wąsy wartości skrajne

Fig. 6. Mean monthly totals of K_{\downarrow} at the LCz station in 2008–2014. Squares indicate the average value and the dashed lines mark the extreme

Sumy roczne promieniowania całkowitego

Minimalna roczna suma K_{\downarrow} na stacji LCz miała wartość $3774 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ w 2010 r. a najwyższa $4080 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ w 2011. Wartość średnia rocznej sumy K_{\downarrow} wyniosła $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ dla badanego wielolecia 2008–2014. Była to wartość wyższa od średniej z wielolecia, którą dla Wyżyny Krakowskiej obliczono $3700 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Lorenc 2005). Również niższe wartości sumy K_{\downarrow} dla całego roku $3650 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ podali J. Paszyński, K. Miara (1994). Również niższe wartości były pomierzone dla terenów zurbanizowanych (Hess, Olecki 1990).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zestawienie natężenia promieniowania krótkofalowego słonecznego w postaci sum godzinnych, dobowych, miesięcznych, sezonowych i rocznych pozwoliło określić zmienność warunków radiacyjnych otwartych wierzchowinowych południowej części partii Wyżyny Krakowskiej. Ponadto ilościowe zestawienie sum K_{\downarrow} dało podstawy na dalsze, szczegółowe analizy warunków klimatycznych, mikroklimatycznych, biologicznych, ekologicznych środowiska przyrodniczego tej części Wyżyny. Dodatkowo pomiary aktynometryczne pozwoliły oszacować rzeczywistą energię słoneczną i zaplanować jej wykorzystanie jako odnawialne źródło energii.

Na podstawie pomiarów natężenia strumienia K_{\downarrow} na stacji Lepianka Czajowska dla wielolecia 2008–2014 stwierdzono:

- najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} o wartości $1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ dla przedziału 10:10–11:00 UTC. W tym samym przedziale czasowym wystąpiło maksimum K_{\downarrow} wynoszące $3,49 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w dniu 2.06.2013,

- średnia miesięczna obliczona z godzinnych sum K_{\downarrow} przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w miesiącach od kwietnia do września. Najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} o wartości $1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ stwierdzono dla lipca,

- duże wartości godzinnych sum K_{\downarrow} powyżej $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ notowano w godzinach dziennych (9:00–13:00) co stanowiło 6% przypadków,

- najwyższą dobową sumę K_{\downarrow} wynoszącą $31,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ pomierzono 13.06.2013 roku, najniższą $0,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w dniu 28.01.2009,

- wyróżniały się miesiące od kwietnia do sierpnia z wysoką średnią dobową sumą K_{\downarrow} , najwyższą w lipcu wynoszącą $19,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a najniższą w grudniu $2,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,

- średnia wartość dobowej sumy K_{\downarrow} wyniosła $10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w analizowanym wieloleciu, najwyższa $11,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w 2011 r. i najniższa $10,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w 2010 r.,

- najwyższą miesięczną sumę K_{\downarrow} $669 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ zanotowano w lipcu 2013 a najniższą $56 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ w grudniu 2009,

- minimalna roczna suma K_{\downarrow} na stacji LCz miała wartość $3774 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ w 2010 a najwyższa $4080 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ w 2011.

Ze względu na ekonomiczne wykorzystanie energii słonecznej wskazano dni i zakres godzin, gdy średnia godzinna suma K_{\downarrow} przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$:

- w godzinach okołopołudniowych do 20 marca, a po tej dacie w szerszym zakresie godzin 8:00–14:00 UTC,

- w godzinach 8:00–14:00 do 10 września i z końcem września (25–30.09) oraz na początku października (9:00–12:00).

Średnia dobową sumą K_{\downarrow} przekraczała $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ i występowała od 100 do 124 dni w ciągu roku (początek okresu 5 marca i koniec 4 października) co uzasadnia ekonomiczne wykorzystanie energii słonecznej.

Podziękowanie

Część materiałów pomiarowych została zebrana w latach 2007–2010 w ramach projektu badawczego MNiSW nr N306 044 32/3178.

PIŚMIENNICTWO

- Bartuś T. 2014. *Model zmienności topoklimatycznej rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, **24**: 25–46.
- Bailey W. G., Oke T. R., Rouse W. R. (red.) 1999. *The Surface Climates of Canada*. McGill-Queen University Press, 396 ss.
- Bokwa A., Caputa Z., Durło G., Maciejowski W., Wojkowski J. 2008. *Meso- and microclimatic conditions in the southern part of the Cracow-Częstochowa Upland*. “Electronic Journal of Polish Agricultural Universities”, Vol. **11**, issue 3.
- Caputa Z., Czyłok A., Wojkowski J. 2012. *Ocena metod szacowania potencjału odnawialnych źródeł energii na przykładzie promieniowania słonecznego i wiatru*, [w:] J. Koziół (red.), *Przegląd metod oceny warunków wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budownictwie. Monografia*. Instytut Techniki Ciepłej. Gliwice, s. 269–292.
- Caputa Z., Leśniok M. 2009. *Struktura bilansu promieniowania na obszarach miejskich i wiejskich – system pomiarowy i wybrane wyniki pomiarów na wyżynie śląsko-krakowskiej*. „Prace Geograficzne”, **122**: 23–38.
- Caputa Z., Partyka J. (red.) 2009. *Współczesne zmiany środowiska przyrodniczego w różnych warunkach topoklimatycznych Wyżyny Krakowskiej na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, **19**: 1–332.
- Clements G., Whiteman C., Horel J. 2003. *Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah*. “Journal of Applied Meteorology and Climatology”, **42**: 752–768.
- Gądek B., Caputa Z. 2003. *Struktura bilansu cieplnego Lodowczyka Mieguszowieckiego (Tatry) latem w okresie dużego zachmurzenia i opadów*. „Przegląd Geograficzny”, **75**, 2: 287–298.
- Grzybowski J., Miara K., Paszyński J. 1994. *Bilans promieniowania. Atlas walerów, zasobów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski*. PAN IGiPZ. Warszawa: II-1 map.
- Hess M., Olecki Z., 1990. *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie*. „Zeszyty naukowe UJ, Prace Instytutu Geograficznego”, **77**: 29–43.
- Kozłowska-Szczęsna T., Podogrocki, J. 1995. *Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie*, [w:] *Klimat i Bioklimat Miast*, red. K. Kłysik, Wydawnictwo UŁ. Łódź, s. 87–97.
- Lian Y., You G. J.-Y., Lin K., Jiang Z., Zhang Ch., Qin X. 2014. *Characteristics of climate change in southwest China karst region and their potential environmental impacts*. *Environ. Earth Sciences*, s. 1–8.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J. 1987. *Zróźnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski*. „Przegląd Geograficzny”, **59**, 4: 487–509.
- Oke T.R. 1999. *Surface climate processes*, [w:] *The surface climates of Canada*, red. W. G. Bailey, T. R. Oke, W. R. Rouse. McGill-Queen University Press, s. 21–43.

Paszyński J. 2004. *Wymiana energii na powierzchni czynnej jako podstawa klasyfikacji topoklimatyczne*. „Acta Agrophysica”, **3**, 2: 351–358.

Paszyński J., Miara K. (red.) 1994. *Atlas Rzeczpospolitej Polskiej*. Główny Geodeta Kraju. Warszawa, s. 31.2 map.

Paszyński J., Niedźwiedz T. 1991. *Klimat*, [w:] *Geografia Polski, Środowisko przyrodnicze*, red. L. Starkel, Wyd. Naukowe PWN. Warszawa, s. 296–355.

Sun J., Burns S. P., Delany A. C., Oncley S. P., Horst T. W., Lenschow D. H. 2003. *Heat balance in the nocturnal boundary layer during CASES-99*. “Journal of Applied Meteorology and Climatology”, **42**: 1649–1666.

Whiteman C. D., McKee T. B., Doran J.C. 1996. *Boundary layer evolution within a canyonland basin. Part I: Mass, heat, and moisture budgets from observations*. “Journal of Applied Meteorology and Climatology”, **35**: 2145–2161.

Wojkowski J., Caputa Z. 2009. *Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, **19**: 141–152.

SUMMARY

The growing demand for electricity, heating and climate targets in recent years focused attention on the use of solar energy as a renewable energy source. The object of this study was the actual inflow of short-wave solar radiation (K_{\downarrow}) to the plateau of the southern part of the Cracow Upland. By contrast, the determination of its diurnal and annual variability expressed in hourly, daily, monthly, seasonal and annual totals of K_{\downarrow} was made. The weather station was installed at Lepianka Czajowska (LCz – geographical coordinates 50°12'23"N, 19°47'04"E, altitude 483 m above sea level) in 09.2007. The station is localized in the flat area, with a small covering over the horizon (2%, mainly to the west) and well represents the highest part of the climatic conditions of the Cracow Upland. The flux K_{\downarrow} values were measured using CM3 (305–2800 nm).

The highest mean total of K_{\downarrow} amounting to 1.4 MJ·m⁻²hour⁻¹ was measured between 10:10–11:00 in the analysed multi-year period. In the same period the maximum K_{\downarrow} amounting to 3.5 MJ·m⁻²hour⁻¹ occurred on 2.06.2013. This was related to the ascendancy of the Sun (10:39 UTC), the cloudless weather and the high transparency of air. The months from April to August were characterized by a large total of K_{\downarrow} excess of 1.5 MJ·m⁻²hour⁻¹. The highest mean total of K_{\downarrow} with a value of 1.4 MJ·m⁻²hour⁻¹ was found in July.

The distribution of the monthly mean of daily totals of K_{\downarrow} in the months from May to August exceeded 16.0 MJ·m⁻²d⁻¹. The highest mean of 19.0 MJ·m⁻²d⁻¹ was observed in July, and the lowest of 2.3 MJ·m⁻²d⁻¹ was found in December. In terms of seasons, distinguished by higher mean daily total K_{\downarrow} values in spring and summer amounted to respectively 14.2 and 18.1 MJ·m⁻²d⁻¹. Much lower values of the analysed total K_{\downarrow} occurred during autumn and winter, because of the low position of the sun above the horizon, shorter days and more rain and haze compared to spring and summer.

The mean daily total K_{\downarrow} amounted to 10.8 MJ·m⁻²d⁻¹ in the analysed multi-year period, the highest value of 11.3 MJ·m⁻²d⁻¹ was observed in 2011 and the lowest of 10.3 MJ·m⁻²d⁻¹ in 2010. They were higher than those measured in the past and served as the Cracow Upland mean daily total K_{\downarrow} in the amount of 10.0 MJ·m⁻²d⁻¹ for the years 1956–1975 (Grzybowski et al. 1994).

The evaluation of monthly totals of K_{\downarrow} led to a more general assessment of radiation in the course of relations for the years 2008–2014. The low average monthly total of K_{\downarrow} that occurred in January $79 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$ later increased in summer months (July $596 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$) and was then gradually decreasing until December $70 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$. The highest monthly total of K_{\downarrow} $669 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$ was recorded in July 2013, while the lowest $56 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$ was observed in December 2009.

The annual total of global radiation at the station LCz had values from $3774 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ in 2010 to $4080 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ in 2011. The mean annual total of K_{\downarrow} amounted to $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ for the examined 2008–2014 multi-year period. It was the higher value of the multi-year mean calculated for the Cracow Upland as $3700 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (Lorenc 2005).

Indicated for the economic use of solar energy days and scope hours when the mean hourly total of K_{\downarrow} exceeds $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{hour}^{-1}$ are as follows: In the hours around noon until 20 March and thereafter a wider range of hours 8:00–14:00 UTC; the hours 8:00–14:00 until 10 September and the end of September (25–30.09), and the beginning of October (9:00–12:00)

Average daily totals of K_{\downarrow} exceed $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ and can be observed from 100 to 124 days per year (within the period beginning on 5 March and ending on October 4) which justifies the economical use of solar energy.