

ZRÓŻNICOWANIE DOPŁYWU PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DO POŁUDNIOWEJ CZĘŚCI WYŻYNY KRAKOWSKO-CZĘSTOCHOWSKIEJ W LATACH 2008–2014

Zbigniew Caputa

Differences in incoming solar radiation to the southern part of the Kraków-Częstochowa Upland in 2008–2014

Abstract: The object of this study was the actual inflow of short-wave solar radiation (K_{\downarrow}) to the plateau and the bottom of a canyon in the southern part of the Kraków-Częstochowa Upland. Its diurnal and annual variability was expressed in hourly, daily, monthly, seasonal and annual K_{\downarrow} totals from the years 2008–2014. The K_{\downarrow} flux was measured using CM3 (305–2800 nm) sensors. Great diversity of the terrain, varied landforms, expositions and slopes, big denivelations, and also the diversity of land cover and land use makes this small area very diversified as far as radiation conditions are concerned. On the basis of the actinometrical study the differences in radiation were assessed on two different landforms: plateau and the bottom of a canyon. The mean daily value of the total K_{\downarrow} in the analysed period amounted to $10.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ on the plateau and $9.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ at the bottom of the canyon. The mean annual total K_{\downarrow} , in the studied multi-year period amounted to $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and $3312 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively.

Keywords: global radiation, topoclimate, renewable energy sources, Kraków-Częstochowa Upland

Zarys treści: W artykule przedstawiono zróżnicowanie dopływu całkowitego promieniowania słonecznego (K_{\downarrow}) do południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej w latach 2008–2014. Strumień K_{\downarrow} był mierzony przy pomocy pyranometrów CM3 (305–2800 nm) Kipp & Zonen na dwóch odmiennych formach: nieosłonięte miejsce na wierzchownie w Lepiance Czajowskiej oraz na dnie głęboko wciętej doliny Prądnika o charakterze kanionu.

Stwierdzono silne zróżnicowanie warunków insolacyjnych ze względu na urozmaiconą krasową rzeźbę terenu i wynikające z tego zasłonięcie horyzontu. Do dna doliny Prądnika dopływało średnio o 16% mniej całkowitego promieniowania niż do otwartej przestrzeni na wierzchowinie. Różnicę w dostawie promieniowania $K\downarrow$ przedstawiono w godzinnych, dziennych, miesięcznych, sezonowych i rocznych sumach. Średnia dzienna suma $K\downarrow$ wyniosła $10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na wierzchowinie i $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dnie doliny w analizowanym okresie. Analogicznie do wymienionych form terenowych średnia roczna suma $K\downarrow$ wyniosła $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $3312 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

Słowa kluczowe: promieniowanie całkowite, topoklimat, odnawialne źródła energii, Wyżyna Krakowsko-Częstochowska

Wstęp

O natężeniu krótkofalowego promieniowania słonecznego – całkowitego ($K\downarrow$), mierzonego na powierzchni Ziemi decydują czynniki astronomiczne. 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 eliptycznym kształtem orbity ziemskiej Słońca, oraz szerokość geograficzna. Promieniowanie $K\downarrow$, przechodząc przez atmosferę, ulega odbiciu, załamaniu oraz osłabieniu przez obecność 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).

W nielicznych badaniach uwzględnia się zróżnicowanie dopływu promieniowania słonecznego czy bilans promieniowania powierzchni czynnej w krasowych formach terenu (Whiteman i in. 1989; Whiteman i in. 1996; Sun i in. 2003; Clements i in. 2003; Lian i in. 2014). Znajomość gęstości strumienia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi jest bardzo istotna w opracowaniach regionalnych (Paszyński, Niedźwiedź 1991; Bailey i in. 1999), topoklimatycznych (Paszyński 2004; Hoch, Whiteman 2010) i mikroklimatycznych (Steinacker i in. 2007; Litschmann i in. 2012; Bokwa i in. 2008), w modelowaniu promieniowania (Wojkowski, Caputa 2009) i bilansu energetycznego (Gądek, Caputa 2003) oraz konstruowaniu map topoklimatycznych (Bartuś 2014). Promieniowanie jest ważnym elementem, który wpływa na procesy wietrzenia (Hall i in. 2005), inwersji temperatury powietrza (Whiteman i in. 2004), innych procesów i zjawisk w głębokich obniżeniach terenu (Whiteman i in. 2007). Zróżnicowanie warunków insolacyjnych znajduje odzwierciedlenie w rozmieszczeniu roślinności (Bárányi-Kevei 2011) i bioróżnorodności (Wołowski i in. 2004) w obszarach krasowych.

Energia słoneczna znajduje również coraz szersze zastosowanie praktyczne i nabiera znaczenia ekonomicznego jako energia zasilająca ogniwa elektryczne czy panele ogrzewające wodę do celów przemysłowych (Caputa i in. 2012).

Przedmiotem tego opracowania jest rzeczywisty dopływ promieniowania krótkofalowego słonecznego do charakterystycznych powierzchni: wierzchowiny i dna kanionu w południowej części Wyżyny Krakowskiej. Celem jest natomiast określenie zmienności dziennej i rocznej wyrażonej w godzinnych, dziennych, miesięcznych, sezonowych i rocznych sumach K_{\downarrow} oraz wykazanie zróżnicowania w dopływie strumienia K_{\downarrow} do urozmaiconej rzeźby krasowej.

Metoda i materiał badawczy

Stacja meteorologiczna Lepianka Czajowska (LCz – o współrzędnych geograficznych $50^{\circ}12'23''\text{N}$, $19^{\circ}47'04''\text{E}$, wysokości 483 m n.p.m.) Wydziału Nauk o Ziemi (WNoZ), Uniwersytetu Śląskiego została zainstalowana na Wyżynie Krakowskiej w 2007 r. w ramach realizowanego projektu MNiSW (Caputa, Partyka 2009). 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). W tym samym czasie stacja Park Zamkowy (PZ – o współrzędnych geograficznych $50^{\circ}12'35''\text{N}$, $19^{\circ}49'44''\text{E}$, wysokości 322 m n.p.m.) została doposażona o czujniki aktywności. Stacja ta jest zlokalizowana na dnie wąskiej (50–150 m), głębokiej (ponad 100m) doliny Prądnika, która ma przebieg z północy na południe. Zasłonięcie horyzontu jest duże ($10\text{--}35^{\circ}$) ze względu na strome zbocza o ekspozycji wschodniej i zachodniej oraz drzewa (ryc. 1). Taka lokalizacja stacji oddaje specyfikę głębokich dolin Wyżyny Krakowskiej o charakterze kanionów i dobrze reprezentuje warunki klimatyczne wklęsłych form terenu (Partyka, Caputa 2009).

Obie stacje obok podstawowych elementów meteorologicznych wykonują pomiary elementów bilansu promieniowania za pomocą CNR1 (Kipp & Zonen) na wysokości 1,5 m nad gruntem. Pomiary wykonywano z krokiem 10 s i zapisywano za pomocą CR1000 (Campbell) jako średnie 10 min. Strumień K_{\downarrow} mierzono za pomocą pyranometru CM3 (305–2800 nm) o błędzie pomiaru do 6% ($-10\div 40^{\circ}\text{C}$) i $\pm 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ przy $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Czujnik CNR1 (składający się z dwóch CM3 i CG3) był okresowo kalibrowany przez porównanie do CNR1 i CNR4 (nowy certyfikowany przez Kipp & Zonen) pracujących na stacji WNoZ w Sosnowcu.

Do badań wykorzystano serię wartości średnich strumienia K_{\downarrow} z lat 2008–2014. Brakujące dane na stacji LCz uzupełniono na podstawie pomiarów ze stacji PZ (metodą równań regresji uwzględniając porę dnia i roku). Uporządkowano i następnie usunięto wartości zerowe K_{\downarrow} z godzin nocnych. Wartości sum godzinnych K_{\downarrow}

podano w czasie UTC (czas urzędowy letni = UTC + 2 godz.). Tak przygotowane 32939 wartości godzinnych sum $K\downarrow$ oraz 2557 dziennych sum $K\downarrow$ poddano analizie w programie Statistica (2003). Rozkład zmiennych był różny od rozkładu normalnego. Strumień $K\downarrow$ był silnie zróżnicowany zarówno w ciągu dnia, jak i roku ze względu na położenie Słońca.

Z uwagi na rozkład zmiennych sum $K\downarrow$ uwzględniono różne przedziały czasowe (godzinne, dzienne, miesięczne, sezonowe i roczne), określono wielkość dopływu promieniowania do wierzchowinowych partii (LCz) oraz dna doliny (PZ) Wyżyny Krakowskiej. Dodatkowo zwrócono uwagę na okresy, gdy suma $K\downarrow$ przekraczała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ ($1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh}$), co uzasadnia ekonomiczne wykorzystanie energii słonecznej.

Wyniki

Godzinne sumy całkowitego promieniowania słonecznego

Podejmując analizę godzinnych sum $K\downarrow$, obliczono częstość w przedziałach co $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w celu rozpoznania rozkładu zarejestrowanych wartości w latach 2008–2014. Zdecydowanie najwięcej przypadków godzinnych sum $K\downarrow$ obejmowały wartości z przedziału $0\text{--}0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ (46,2%) i tylko 6,2% sum $K\downarrow$ powyżej $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ na otwartej przestrzeni wierzchowiny. Wartości wyższe o 5,2% stwierdzono dla pierwszego przedziału na dnie doliny, i niższe o 0,7% dla sum $K\downarrow$ powyżej $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ (tab. 1). Było to związane z ograniczeniem dopływu promieniowania do dna doliny ze względu na zacinienie przez zbocza oraz występującą roślinność. Podobne relacje stwierdzono dla przedziału $0\text{--}1$ oraz powyżej

Tab. 1. Częstość [%] godzinnych sum $K\downarrow$ o różnej wielkości na stacjach LCz i PZ w latach 2008–2014

Table 1. Frequency of hourly $K\downarrow$ totals of different values at the LCz and the PZ stations in 2008–2014

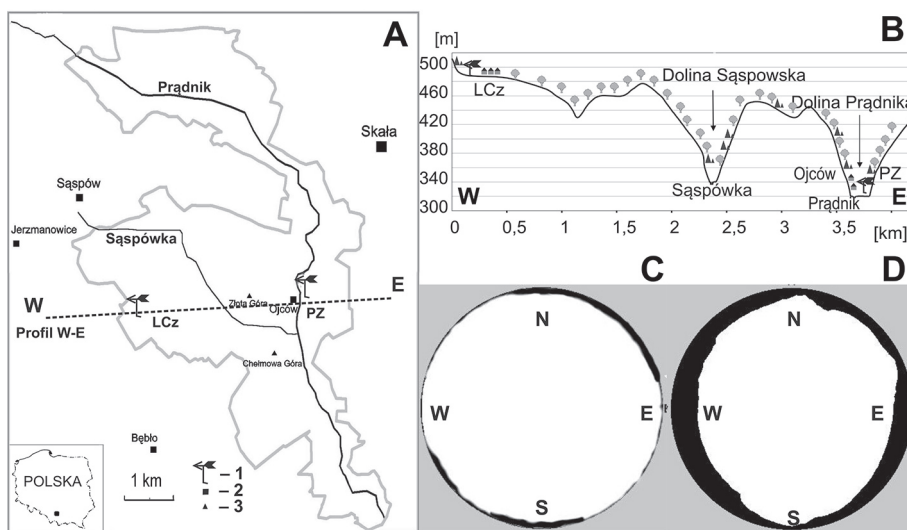
	$K\downarrow$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$]					
	[0-0,5]	(0,5-1]	(1-1,5]	(1,5-2]	(2-2,5]	>2,5
LCz Wierzchowina/ Plateau	46,2%	18,6%	12,0%	9,3%	7,7%	6,2%
	64,8%		35,2%			
PZ Dno doliny/ Bottom of canyon	51,4%	16,3%	10,0%	9,5%	7,3%	5,5%
	67,7%		32,3%			

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.

$1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{godz}^{-1}$. Wskazuje to na duży udział małych sum K_{\downarrow} na stacji PZ, a także na mniejszy ich udział w przedziałach powyżej $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{godz}^{-1}$.

Najwyższą średnią sumę K_{\downarrow} , wynoszącą $1,4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{godz}^{-1}$, ustalono dla przedziału 10:10–11:00 na stacji LCz w analizowanym wieloleciu. Analogiczna suma K_{\downarrow} była mniejsza o $0,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ na dnie doliny. W tym samym przedziale czasowym wystąpiło maksimum K_{\downarrow} , wynoszące $3,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{godz}^{-1}$ w LCz w dniu 2 czerwca 2013 r. Związane to było z górowaniem Słońca (10:39 UTC), brakiem zachmurzenia oraz dużą przejrzystością powietrza. Rozkład średnich godzinnych sum K_{\downarrow} ilustruje wpływ zasłonięcia horyzontu (ryc. 1, 2). Obserwowano też asymetrię rozkładu promieniowania ze względu na zachmurzenie. Dużo większe ograniczenie promieniowania K_{\downarrow} wynikało jednak z ukształtowania głęboko wciętej doliny i tym samym z zasłonięcia horyzontu przez zbocza (szczególnie z kierunków E i W). Dlatego obserwowano skrócenie czasu operacji Słońca w dolinie i mniejsze sumy K_{\downarrow} w godzinach porannych i wieczornych.

Przeanalizowano również godzinne sumy K_{\downarrow} w poszczególnych miesiącach roku (ryc. 2, 3). Dużymi średnimi sumami K_{\downarrow} , przekraczającymi $1,0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{godz}^{-1}$,

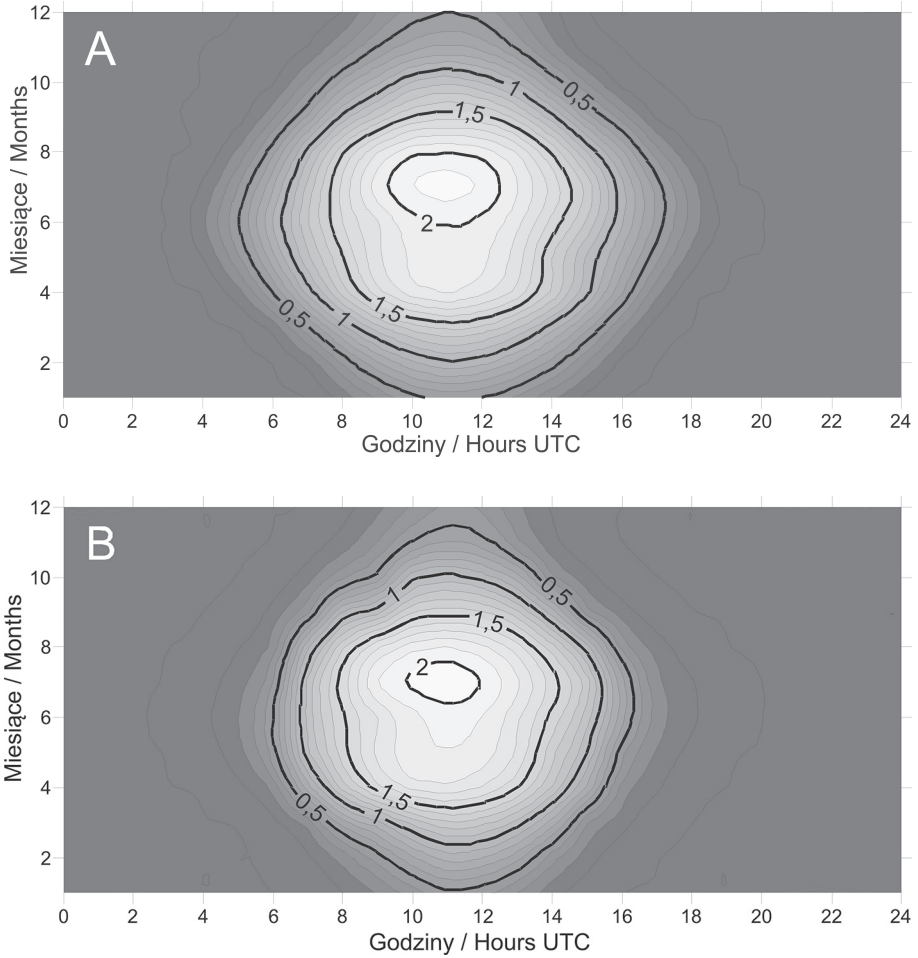


Ryc. 1. Lokalizacja stacji meteorologicznych (A) na profilu wysokościowym (B) oraz zasłonięcie horyzontu na wierzchołku w Lepiance Czajowskiej (C) i na dnie doliny w Ojcowie (D). 1 – stacje meteorologiczne; 2 – miejscowości; 3 – szczyty

Fig. 1. Location of the meteorological stations (A) in the profile of the study area (B) and horizon obstruction on the plateau at Lepianka Czajowska (C) and at the bottom of the canyon at Ojców (D). 1 – meteorological stations; 2 – villages; 3 – tops

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.

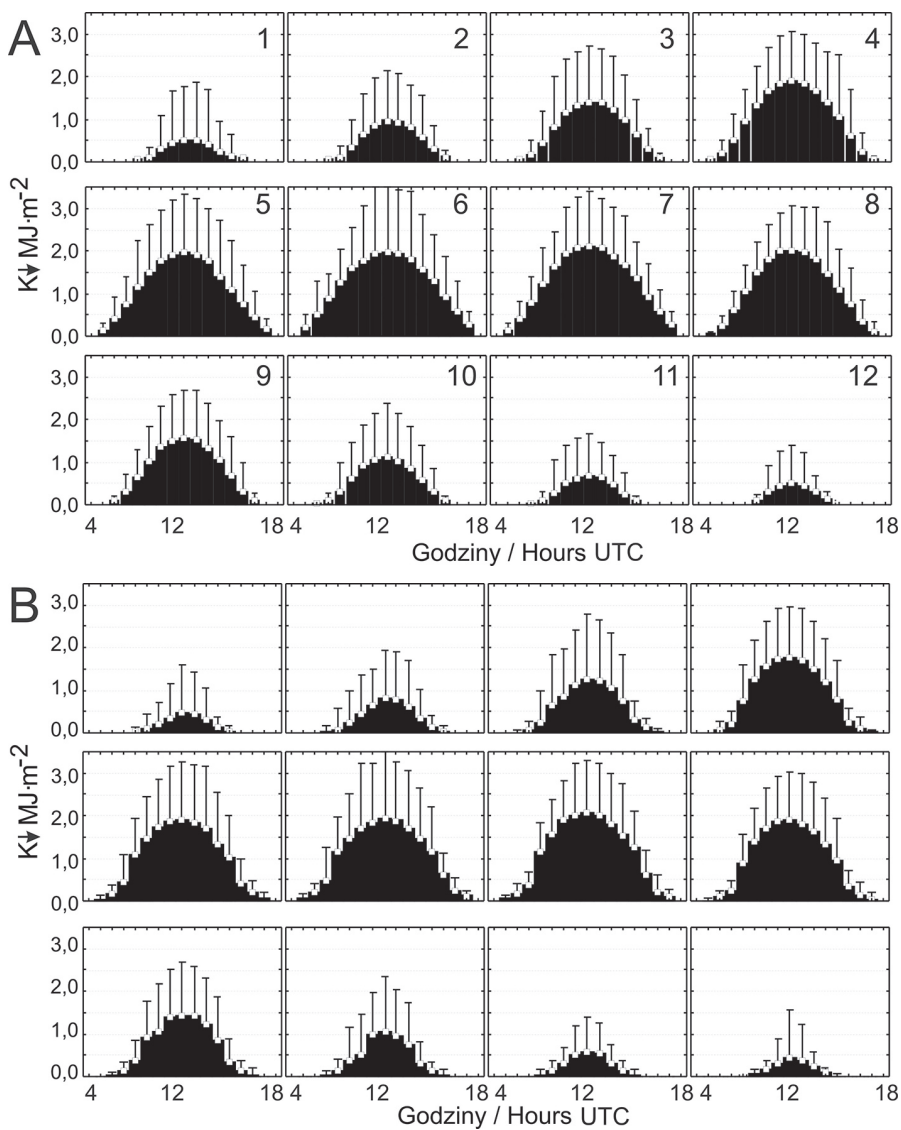
charakteryzowały się miesiące od kwietnia do sierpnia na stacji LCz, natomiast tylko od maja do lipca w PZ. Od sierpnia systematycznie zmniejszał się strumień $K\downarrow$ aż do wartości najniższej w grudniu. Również to zestawienie przebiegu promieniowania $K\downarrow$ ilustruje ograniczenie dostawy insolacji do dna doliny.



Ryc. 2. Średnie godzinne sumy $K\downarrow$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na stacjach meteorologicznych LCz – wierzchołowa (A) i PZ – dno doliny (B) w 2008–2014

Fig. 2. Mean hourly totals of $K\downarrow$ [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] at the meteorological stations LCz – plateau (A) and PZ – bottom of the canyon (B) in 2008–2014

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.



Ryc. 3. Średnie godzinne sumy $K\downarrow$ skategoryzowane według miesięcy na stacjach LCz (A) i PZ (B) w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią dla poszczególnych godzin UTC, wąsy maksimum

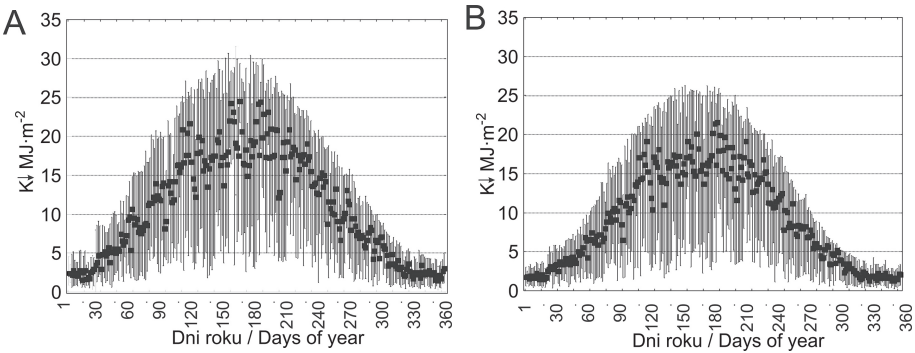
Fig. 3. Mean hourly totals of $K\downarrow$ categorized by months at the LCz (A) and PZ (B) stations in 2008–2014. The squares indicate the average value, the dashed lines mark the maximum

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.

Dzienne sumy całkowitego promieniowania słonecznego

Na otwartej powierzchni na wierzchowinie zdecydowana większość przypadków (66%) dziennych sum $K\downarrow$ osiągała wartości powyżej $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, 32% przypadków – powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, i tylko 7% powyżej $25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. W analogicznych przedziałach na dnie głęboko wciętej doliny o charakterze kanionu punkty procentowe dziennych sum $K\downarrow$ osiągnęły odpowiednio: 60%, 24% i 1%. Obserwowano średnie dzienne sumy $K\downarrow$ przekraczające $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w miesiącach od kwietnia do sierpnia na stacji LCz, a tylko od maja do lipca na stacji PZ. Wartości dziennej sumy $K\downarrow$ powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ pojawiały się od 5 marca do 4 października i występowały od 100 do 124 dni w ciągu roku (średnio w okresie 105–235 dni w roku) na stacji LCz. Dużo krótszy okres, od 23 marca do 13 września, charakteryzował się analogicznymi wartościami sum $K\downarrow$ i występował od 75 do 100 dni w ciągu roku na stacji PZ (ryc. 4). Wyróżniał się okres od 100. do 220. dnia (LCz) i od 125. do 200. dnia roku (PZ) z wartościami średnimi dziennych sum $K\downarrow$ powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, co uzasadnia ekonomiczne wykorzystanie energii słonecznej. Najwyższą dobową sumę $K\downarrow$ $31,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ zanotowano 13 czerwca 2013 r., a najniższą ($0,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) w dniu 26 grudnia 2013 r. na wierzchowinie, i analogiczne skrajne wartości sum $K\downarrow$ na dnie doliny $26,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ zanotowano 27 czerwca 2010 r. oraz $0,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ w dniu 26 grudnia 2013 r.

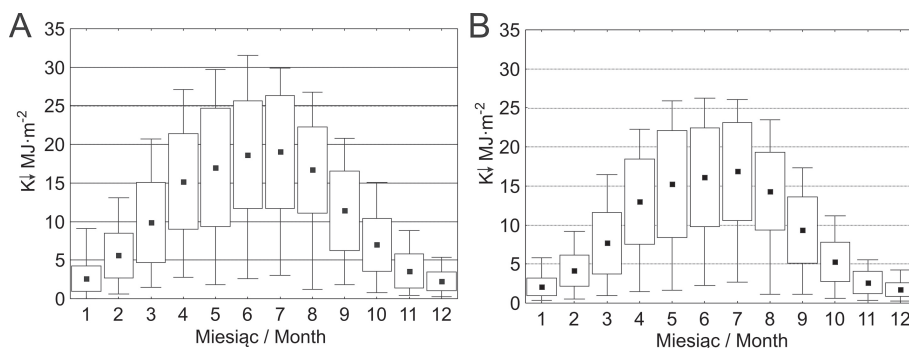
W rozkładzie średnich miesięcznym dziennych sum $K\downarrow$ wyróżniały się miesiące od maja do sierpnia w LCz, i tylko czerwiec i lipiec w PZ, przekraczając $16,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (ryc. 5). Najwyższą średnią analizowaną sumę $K\downarrow$ obliczono dla lipca ($19,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), a najniższą dla grudnia ($2,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) na nieosłoniętej



Ryc. 4. Średnie dzienne sumy $K\downarrow$ na stacjach LCz (A) i PZ (B) w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią, wąsy wartości skrajne

Fig. 4. Mean daily totals of $K\downarrow$ at the LCz (A) and PZ (B) stations in 2008–2014. The squares indicate the average value, the dashed lines mark the extreme

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.



Ryc. 5. Średnie dzienne sumy $K\downarrow$ w podziale na miesiące na stacjach LCz (A) i PZ (B) 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 by months at the LCz (A) and PZ (B) stations in 2008–2014. The squares indicate the average value, frames stand for the standard deviation from the average value while the dashed lines mark the extreme

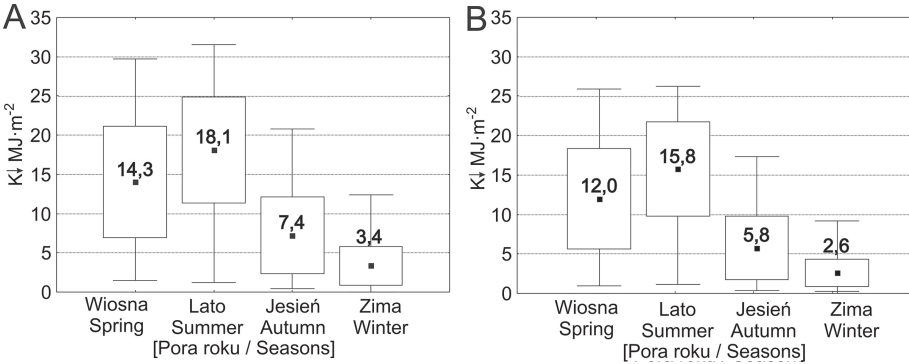
Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.

powierzchni LCz. Ze względu na rzeźbę doliny Prądnika dużo niższe wartości były na dnie doliny w lipcu ($16,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) oraz w grudniu ($1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), kiedy dodatkowo promieniowanie ograniczały mgły i zamglenia. W podziale na sezony wyróżniały się wyższe wartości średnich dziennych sum $K\downarrow$ wiosną i w lecie, wynosząc odpowiednio $14,2$ i $18,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ na stacji LCz oraz $12,0$ i $15,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ na stacji PZ (ryc. 6). Dużo niższe 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. Dodatkowym, ważnym czynnikiem ograniczającym dopływ promieniowania do wklęsłych form terenu było zasłonięcie horyzontu przez zbocza i roślinność porastającą zbocza i dno doliny. Średnia roczna dzienna suma $K\downarrow$ wyniosła $10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ na wierzchowinie w rozpatrywanym 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 roku. Średnia wartość dziennej sumy $K\downarrow$ na dnie doliny wyniosła $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w analizowanym wieloleciu, najwyższa ($9,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) w 2011 i najniższa ($8,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) w 2010 r. Były to wartości średnio niższe o $16,2\%$ niż pomierzone na wierzchowinie.

Miesięczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego

Zestawienie miesięcznych sum $K\downarrow$ pozwoliło na bardziej ogólną ocenę warunków insolacyjnych w przebiegu rocznym dla lat 2008–2014 (ryc. 7). Na obu stacjach

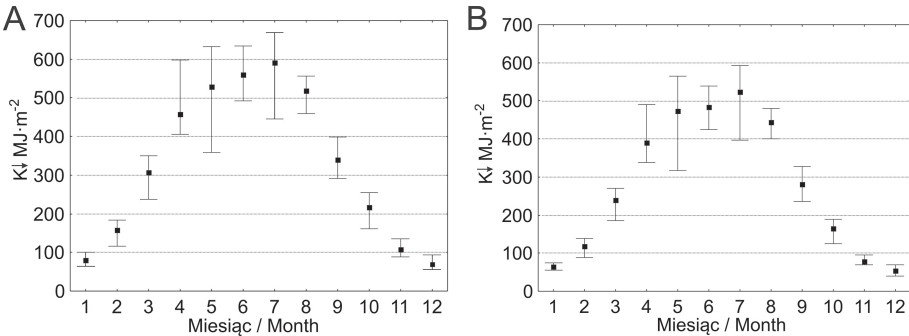
niskie średnie miesięczne sumy $K\downarrow$ wystąpiły w styczniu i grudniu, najwyższe w lipcu. Jest to ściśle związane z wysokością Słońca nad horyzontem i długością dnia. Na stacji LCz w przebiegu sum $K\downarrow$ obserwowano znaczący dopływ promieniowania do powierzchni czynnej w miesiącach wiosennych, np. suma $K\downarrow$ w kwietniu 2009 r. (598) przekraczała sumę $K\downarrow$ w czerwcu (492) i sierpniu (551). Należy w tym miejscu zaznaczyć, że czerwiec 2009 r. był wyjątkowo pochmurny i deszczowy, co spowo-



Ryc. 6. Średnie dzienne sumy $K\downarrow$ w podziale na sezony na stacjach LCz (A) i PZ (B) w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią, ramki odchylenie standardowe od średniej, a wąsy wartości skrajne

Fig. 6. Mean daily totals of $K\downarrow$ categorized by seasons at the LCz (A) and PZ (B) stations in 2008–2014. The squares indicate the average value, frames stand for the standard deviation from the average value while the dashed lines mark the extreme

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.



Ryc. 7. Średnie miesięczne sumy $K\downarrow$ na stacjach LCz (A) i PZ (B) w latach 2008–2014. Kwadraty oznaczają wartość średnią a wąsy wartości skrajne

Fig. 7. Mean monthly totals of $K\downarrow$ at the LCz (A) and PZ (B) stations in 2008–2014. The squares indicate the average value and the dashed lines mark the extreme

Źródło/Source: opracowanie własne/authors' own study.

dowało znacznie niższe wartości niż średnia suma K_{\downarrow} na stacji LCz w wysokości 558 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹ za okres 2008–2014. Obliczona średnia miesięczna suma K_{\downarrow} dla maja miała wysoką wartość 548 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹. Maj charakteryzował się jednak dużą zmiennością warunków insolacyjnych w przytoczonej sumie K_{\downarrow} od minimum (359) w 2010 do maksimum (602) w 2009 r. na stacji LCz. Nieznaczne wahania i amplitudy miesięcznych sum K_{\downarrow} stwierdzono w listopadzie i miesiącach zimowych. Najwyższą sumę K_{\downarrow} , o wartości 669 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹, zanotowano w lipcu 2013 r., a najniższą (56 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹) w grudniu 2009 r. na wierzchownie. 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.

W przebiegu miesięcznych sum K_{\downarrow} obserwowano znaczący dopływ promieniowania do powierzchni czynnej doliny w miesiącach wiosennych, np. średnia miesięczna suma K_{\downarrow} miała wysoką wartość dla maja (474 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹). Najwyższą miesięczną sumę K_{\downarrow} , o wartości 592 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹, zanotowano w lipcu 2013 r., a najniższą (41 MJ·m⁻²·miesiąc⁻¹) w grudniu 2009 r. na stacji PZ. Nieznaczne wahania miesięcznych sum K_{\downarrow} stwierdzono w listopadzie i miesiącach zimowych. Najniższe wartości obserwowano w grudniu.

Roczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego

Na stacji wierzchowinowej minimalna roczna suma K_{\downarrow} osiągnęła wartość 3774 MJ·m⁻²·rok⁻¹ w 2010 r., a najwyższa (4080 MJ·m⁻²·rok⁻¹) w 2011 r. Wartość średnia rocznej sumy K_{\downarrow} wyniosła 3955 MJ·m⁻²·rok⁻¹ w badanym wieloleciu.

Najniższa roczna suma K_{\downarrow} na stacji PZ wyniosła 3171 MJ·m⁻²·rok⁻¹ w roku 2010, a najwyższa (3462 MJ·m⁻²·rok⁻¹) w 2012 r. Średnia roczna suma K_{\downarrow} osiągnęła 3312 MJ·m⁻²·rok⁻¹; wartość ta jest niższa o 16% od średniej rocznej sumy K_{\downarrow} pomierzonej na wierzchownie Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej.

Dyskusja wyników

Zestawienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w postaci sum godzinnych, dziennych, miesięcznych, sezonowych i rocznych pozwoliło określić zmienność warunków radiacyjnych na powierzchniach otwartych, wierzchowinowych i głęboko wciętej doliny w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Wysokie wartości rozpatrywanych sum K_{\downarrow} pomierzone na wierzchownie są efektem nieograniczonego przez przeszkody terenowe (drzewa, budynki itp.) dopływu strumienia promieniowania, a także struktury bilansu promieniowania (Caputa, Wojkowski 2009). Wyższe wartości występują w miesiącach letnich

i wiosennych ze względu na wysokość Słońca nad horyzontem i długość operacji promieni słonecznych, mniejsze zaś sumy $K\downarrow$ odnotowuje się jesienią i zimą. Ponadto wypukłe formy terenu Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej charakteryzują się mniejszą wilgotnością oraz mgłami i zamgleniami w stosunku do wklęsłych form terenu (Caputa 2009). Również większe prędkości wiatru na wierzchowinie (Brzeźniak, Partyka 2008) przyczyniają się do zwiększenia przezroczystości powietrza i tym samym zwiększają dopływ promieniowania. Maksymalne wartości sum godzinnych i dziennych pomierzono właśnie w pogodne, bezchmurne dni.

Średnie wartości dziennej sumy $K\downarrow$ były wyższe niż pomierzone w przeszłości i podawane dla Wyżyny Krakowskiej w wysokości $10,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ dla wielolecia 1956–1975 (Grzybowski i in. 1994). Średnia miesięczna suma $K\downarrow$ znacznie natomiast różniła się od wartości podanej przez Paszyńskiego i Miareę (1994), gdzie suma $K\downarrow$ w lipcu wyniosła $543 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Udziały średniej miesięcznej sumy $K\downarrow$ (lipca, od maja do sierpnia i od listopada do lutego) w rocznej sumie $K\downarrow$ były podobne do zestawienia z wielolecia 1961–1990 (Kozłowska-Szczęсна, Podogrocki 1995). Można zatem przyjąć, że okres 2008–2014 dobrze oddawał stosunki radiacyjne jako reprezentatywne dla dłuższego okresu.

Wartości promieniowania pomierzone przez Kleina (1992) w wąskiej dolinie Sąspowskiej o przebiegu E–W były niższe niż w dolinie Prądnika o przebiegu S–N. Promieniowanie $K\downarrow$ osiągnęło – w sumie miesięcznej – największą wartość w czerwcu 1987 r. ($388 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) oraz w lipcu 1988 r. ($379 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Średnia roczna suma $K\downarrow$ osiągnęła $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na wierzchowinie i była wyższa od średniej z wielolecia, którą obliczono dla Wyżyny Krakowskiej – $3700 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Lorenc 2005). Również niższe wartości sumy $K\downarrow$ w całym roku ($3650 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) podali Paszyński i Miara (1994). Niższe natomiast wartości były pomierzone w Krakowie i okolicy ze względu na zanieczyszczenia powietrza (Hess, Olecki 1990). Sumy roczne $K\downarrow$ w latach 1987 i 1988 wyniosły zaś odpowiednio $2444 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $2481 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w dolinie Sąspowskiej prostopadłej do doliny Prądnika (Klein 1992). Były to wartości niższe o 26% niż pomierzone w dolinie Prądnika. Wynikało to z przebiegu doliny oraz jej formy o charakterze kanionu (głęboko wcięta o stromych zboczach i ścianach skalnych) ograniczających dopływ promieniowania słonecznego.

Pomierzone na wierzchowinie wyższe wartości strumienia $K\downarrow$ można przypisać zjawisku opisywanemu w literaturze jako *global brightening* (Wild 2009; Tang i in. 2011; Fei i in. 2014). W niektórych pracach wskazuje się na silną tendencję wzrostową pomierzonego promieniowania słonecznego nawet $0,87 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w latach 1982–2008 (Wang i in. 2012). Jeszcze wyższe wartości stwierdzono przy stosowaniu metody sumowania promieniowania bezpośredniego i rozproszonego (Wang i in. 2013).

Zróżnicowanie w dopływie promieniowania słonecznego do południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Caputa, Wojkowski 2015) było związane

z urozmaiconą rzeźbą terenu, co istotnie zmieniło strukturę bilansu promieniowania. Obszar ten jest silnie urzeźbiony, charakteryzuje się urozmaiceniem form, ekspozycji i spadków, dużymi deniwelacjami i odkrytymi formami skalnymi (Gradziński i in. 2008). Dlatego obserwowano silniejsze ograniczenie w dopływie promieniowania słonecznego do dna doliny (16%) i charakterystyczne przebiegi dobowe z mniejszymi wartościami rano i wieczorem niż pomierzone na wierzchowinie (Caputa 2001). Wpływa to na kształtowanie się temperatury powierzchni czynnej (Caputa, Wojkowski 2013), skał wapiennych (Brzeźniak 2001), występowanie śniegu (Wojkowski 2009), inwersję temperatury powietrza (Niedźwiedz 2009) itp. Stąd odnotowano występowanie kontrastów mikroklimatycznych (Caputa 2009), mezoklimatycznych (Bokwa i in. 2006), kształtowanie się różnorodnych topoklimatów (Klein 1992; Bokwa i in. 2008; Bartuś 2014).

Różnice insolacyjne są ważnym czynnikiem różnicującym warunki siedliskowe, które są związane z występującą roślinnością (Michalik 2003), ponieważ na rozmieszczenie roślinności w urozmaiconej rzeźbie terenu wpływa m.in. nasłonecznienie. Najsilniejszą zależność między stopniem nasłonecznienia a występowaniem gatunków zaobserwowano w przypadku grup gatunków górskich oraz kserotermicznych (Sołtys-Lelek 2009).

Pomierzone wartości promieniowania pozwoliły walidować modele zmienności przestrzennej natężenia promieniowania i konstruować mapy rzeczywistego rozkładu przestrzennego całkowitego promieniowania (Wojkowski, Caputa 2009). Ponadto ilościowe zestawienie sum K_{\downarrow} dało podstawy na dalsze, szczegółowe analizy warunków klimatycznych, mikroklimatycznych, biologicznych, ekologicznych środowiska przyrodniczego tej części wyżyny. Dodatkowo pomiary aktywnometryczne pozwoliły oszacować rzeczywistą energię słoneczną i zaplanować jej wykorzystanie jako odnawialne źródło energii (Caputa 2015a, b).

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie pomiarów natężenia strumienia K_{\downarrow} w 7-leciu 2008–2014 na stacji Lepianka Czajowska oraz Park Zamkowy w Ojcowie stwierdzono:

- najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} o wartości $1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ między 10:10 a 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 czerwca 2013 r. na wierzchowinie;
- najwyższą dobową sumę K_{\downarrow} wynoszącą $31,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ – 13 czerwca 2013 r. na wierzchowinie, i odpowiednio niższą (o 23%) w tym dniu na dnie doliny;
- wysoką średnią dobową sumę K_{\downarrow} od kwietnia do sierpnia, z najwyższą w lipcu, wynoszącą $19,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, a najniższą w grudniu, tj. $2,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, na wierzchowinie, i odpowiednio $16,9$ i $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w tych miesiącach na dnie doliny;

- średnią wartość dobowej sumy $K\downarrow$, $10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, na nieosłoniętej stacji LCz, i $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ w głębokiej dolinie;
- najwyższą miesięczną sumę $K\downarrow$ $669 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ zanotowano w lipcu 2013 r., a najniższą ($56 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$) w grudniu 2009 r. na wierzchowinie, i odpowiednio 592 i $41 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ w tych miesiącach w dolinie;
- średnią roczną sumę $K\downarrow$ $3955 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ na stacji LCz, i $3312 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ na stacji PZ.

Do dna głęboko wciętej doliny Prądnika dopływa średnio w roku o 16% mniej całkowitego promieniowania niż do otwartej przestrzeni na wierzchowinie. Z tego względu obszary położone w dnie doliny mają niekorzystne warunki insolacyjne (szczególnie w okresie od października do marca), co utrudnia ekonomiczne wykorzystanie promieniowania jako energii odnawialnej.

Literatura

- Bartuś T., 2014, *Model zmienności topoklimatycznej rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 24, 25–46.
- Bailey W.G., Oke T.R., Rouse W.R. (red.), 1999, *The Surface Climates of Canada*, McGill-Queen University Press, Montreal–Kingston.
- Bárány-Kevei I., 2011, *Changes in the vegetation of doline in Aggtelek and Bükk mountains*, Acta Climatologica et Chorologica, 44/45, 25–30.
- Bokwa A., Caputa Z., Durło G., Maciejowski W., Wojkowski J., 2006, *Zróżnicowanie warunków aktywności termicznych w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B. Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 61, 92–99.
- 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, 11, 3.
- Brzeźniak E., 2001, *Zróżnicowanie pola termicznego powierzchni skałek wapiennych*, [w:] J. Partyka (red.), *Badania naukowe w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*, Ojcowski Park Narodowy, Ojców, 24–26.
- Brzeźniak E., Partyka J., 2008, *Warunki klimatyczne Ojcowskiego Parku Narodowego*, [w:] A. Klasa, J. Partyka (red.), *Monografia Ojcowskiego Parku Narodowego*, Ojcowski Park Narodowy, Ojców, 121–136.
- Caputa Z., 2001, *Pomiary bilansu promieniowania różnych powierzchni czynnych przy wykorzystaniu automatycznych stacji pomiarowych*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, 55/56 (11), 95–103.
- Caputa Z., 2009, *Kontrasty mezo- i mikroklimatyczne w Ojcowskim Parku Narodowym*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 195–218.

- Caputa Z., 2015a, *Dopływ promieniowania słonecznego do południowej części Wyżyny Krakowskiej w latach 2008–2014*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 25, 129–138.
- Caputa Z., 2015b, *Dopływ promieniowania słonecznego do wklęsłych form terenu południowej części Wyżyny Krakowskiej w latach 2008–2014*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 25, 139–148.
- Caputa Z., Czyłok A., Wojkowski J., 2012, *Ocena metod szacowania potencjału odnawialnych źródeł energii na przykładzie promieniowania słonecznego i wiatru*, [w:] J. Kozioł (red.), *Przegląd metod oceny warunków wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budownictwie*. Monografia, Instytut Techniki Ciepłej, Gliwice, 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 Muzeum Szafera, 19, 332.
- Caputa Z., Wojkowski J., 2013, *Wpływ promieniowania słonecznego na temperaturę powietrza i gleby na Wyżynie Krakowskiej*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 23, 65–74.
- Caputa Z., Wojkowski J., 2015, *Structure of radiation balance in diverse types of relief*, Annals of Warsaw University of Life Sciences, 47, 4, 343–354.
- Clements G., Whiteman C., Horel J., 2003, *Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin, Peter Sinks, Utah*, Journal of Applied Meteorology, 42, 752–768.
- Fei Y., Xia X., Ch, H., 2014, *Dust aerosol drives upward trend of surface solar radiation during 1980–2009 in the Taklimakan Desert*, Atmospheric Science Letters, 15, 282–287.
- Gądek B., Caputa Z., 2003, *Struktura bilansu ciepłego Lodowczyka Mięgoszowieckiego (Tatry) latem w okresie dużego zachmurzenia i opadów*, Przegląd Geograficzny, 75, 2, 287–298.
- Gradziński M., Gradziński R., Jach R., 2008, *Geologia, rzeźba i zjawiska krasowe okolic Ojcowa*, [w:] A. Klasa, J. Partyka (red.), *Monografia Ojcowskiego Parku Narodowego. Przyroda*, Ojcowski Park Narodowy, Ojców, 31–95.
- Grzybowski J., Miara K., Paszyński J., 1994, *Bilans promieniowania. Atlas walorów, zasobów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski*, PAN IGiPZ, Warszawa, arkusz II (1 mapa).
- Hall K., Lindgren B.J., Jackson P., 2005, *Rock albedo and monitoring of thermal conditions in respect of weathering, some expected and some unexpected results*, Earth Surface Processes and Landforms, 30, 801–811.
- Hess M., Olecki Z., 1990, *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 77, 29–43.
- Hoch S.W., Whiteman C.D., 2010, *Topographic effects on the surface radiation balance in and around Arizona's Meteor Crater*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49, 1114–1128.
- Klein J., 1992, *Radiacyjne czynniki klimatu i parowanie w Ojcowskim Parku Narodowym (na przykładzie Doliny Sąsposkiej)*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 5, 29–34.

- Litschmann T., Rožnovský J., Středa T., Středová H., Hebelka J., 2012, *Temperature and humidity conditions of Macocha Abyss*, Contribution to Geophysics and Geodesy, 42, 3, 227–242.
- Kozłowska-Szczęśna T., Podogrocki J., 1995, *Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie*, [w:] K. Kłysik (red.), *Klimat i Bioklimat Miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 87–97.
- Michalik S., 2003, *Charakterystyka fitosocjologiczna stałych powierzchni badawczych*, „Chełmowa Góra”, „Czyżówki” i „Grodzisko” w Ojcowskim Parku Narodowym, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 14, 1–64.
- Niedźwiedz T., 2009, *Wpływ cyrkulacji atmosfery na klimat lokalny Ojcowskiego Parku Narodowego*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 181–194.
- 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*, Environmental Earth Sciences, 1–8.
- Oke T.R., 1999, *Surface climate processes*, [w:] W.G. Bailey, T.R. Oke, W.R. Rouse (red.), *The surface climates of Canada*, McGill-Queen University Press, Montreal-Kingston, 21–43.
- Partyka J., Caputa Z., 2009, *Charakterystyka klimatu lokalnego Ojcowskiego Parku Narodowego na podstawie danych archiwalnych oraz badań wykonanych w latach 2008–2009*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 19–40.
- Paszyński J., Miara K. (red.), 1994, *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*, Główny Geodeta Kraju, Warszawa, arkusz 31.2 (10 map).
- Paszyński J., Niedźwiedz T., 1991, *Klimat*, [w:] L. Starkel (red.), *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 296–355.
- Paszyński J., 2004, *Wymiana energii na powierzchni czynnej jako podstawa klasyfikacji topoklimatyczne*, Acta Agrophysica, 3, 2, 351–358.
- Sołtys-Lelek A., 2009, *Struktura i zmiany zbiorowisk roślinnych na powierzchniach badawczych „Grodzisko” i w dolinie Sąsławskiej (Ojcowski Park Narodowy)*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 265–320.
- STATISTICA (data analysis software system), 2003, version 6. StatSoft, Inc. www.statsoft.com.
- Steinacker R., Whiteman C.D., Dorninger M., Pospichal B., Eisenbach S., Holzer A.M., Weiss P., Mursch-Radlgruber E., Baumann K., 2007, *A sinkhole field experiment in the Eastern Alps*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, 701–716.
- 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, 42, 1649–1666.
- Tang W.J., Yang K., Qin J., Cheng C.C.K., He J., 2011, *Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data*, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 393–406.
- Wang K.C., Dickinson R.E., Wild M., Liang S., 2012, *Atmospheric impacts on climatic variability of surface incident solar radiation*. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(20), 9581–9592.

- Wang K.C., Dickinson K.E., Ma Q., Augustine J.A., Wild M., 2013, *Measurement methods affect the observed global dimming and brightening*, Journal of Climate, 26, 12, 4112–4120.
- Whiteman C.D., Allwine K.J., Orgill M.M., Fritschen L.J., Simpson J., 1989, *Deep valley radiation and surface energy budget microclimates. Part II. Energy budget*, Journal of Applied Meteorology, 28, 427–437.
- 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, 35, 2145–2161.
- Whiteman C.D., Haiden T., Pospichal B., Eisenbach S., Steinacker R., 2004, *Minimum temperatures, diurnal temperature ranges and temperature inversions in limestone sinkholes of different size and shape*, Journal of Applied Meteorology, 43, 1224–1236.
- Whiteman C.D., Wekker S.F.J., Haiden B., 2007, *Effect of Dewfall and Frostfall on Nighttime Cooling in a Small, Closed Basin*, American Meteorological Society, 46, 3–13.
- Wild M., 2009, *Global dimming and brightening: A review*, Journal of Geophysical Research, 114, 1–31.
- Wojkowski J., 2009, *Zróźnicowanie przestrzenne pokrywy śnieżnej na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 89–108.
- Wojkowski J., Caputa Z., 2009, *Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego*, Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 141–152.
- Wołowski K., Cabała J., Zeeb B.A., 2004, *Chrysophyceans tomatocysts from a karstic sink-hole in the vicinity of Staszów on the Małopolska Upland, Poland*, Canadian Journal of Botany, 9, 1330–1337.

Zbigniew Caputa
Uniwersytet Śląski
Wydział Nauk o Ziemi
Katedra Klimatologii
ul. Będzińska 60, 21-200 Sosnowiec
e-mail: caputazbigniew@gmail.com

