

Prądnik. Prace Muz. Szafera	25	139–148	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 WKŁĘSŁYCH
FORM TERENU POŁUDNIOWEJ CZĘŚCI WYŻYNY KRAKOWSKIEJ
W LATACH 2008–2014**

**Incoming solar radiation on the surface of concave landforms
in the Southern Part of the Cracow Upland in 2008–2014**

Abstract. Incoming solar radiation (K_{\downarrow}) to the concave landforms in the bottom of Prądnik valley in Cracow Upland were analysed in multi-year 2008–2014. The flux K_{\downarrow} was summarized in hourly, daily, monthly, seasonally and yearly in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ data. This has allowed to determine the variability of radiation conditions for the concave landforms. Calculated actual solar energy as a renewable energy source. Mean daily total K_{\downarrow} amounted to $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in the analysed multi-year period. The mean annual total K_{\downarrow} amounted to $3312 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

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

WSTĘP

Natężenie krótkofalowe promieniowania słonecznego – całkowite K_{\downarrow} docierające do powierzchni Ziemi jest ograniczone przez zasłonięcie horyzontu we wkłęsłych formach terenu co determinuje zjawiska i procesy warstwy granicznej (Bailey i in. 1999). Znajomość wielkości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni dolin, wąwozów, kanionów itp. jest bardzo istotna w opracowaniach topoklimatycznych (Paszyński i in. 1999; Bokwa i in. 2008), mikroklimatycznych (Whiteman i in. 2004; Steinacker i in. 2007; Hoch, Whiteman 2011) czy biologicznych (Wołowski i in. 2007; Bárányi-Kevei 2011). Określenie przestrzennego zróżnicowania strumienia K_{\downarrow} jest trudne w urozmaiconej rzeźbie terenu i wymaga modelowania promieniowania (Wojkowski, Caputa 2009) i bilansu energetycznego (Gądek, Caputa 2003). Pomiary promieniowania słonecznego we wkłęsłych kraskowych formach terenu są rzadkie (Whiteman i in. 1989; Klein 1992). Natomiast pomierzone wielkości dają możliwość walidacji wymodelowanych map promieniowania czy innych

modeli teoretycznych (Paszynski 2004; Bartuś 2014). Pozwalają na interpretacje zjawisk w głębokich formach terenu tj. rozkładu temperatury (Litschmann i in. 2012), zalegania zimnego powietrza (Clements i in. 2003; Whiteman i in. 2007), procesów wietrzenia (Hall i in. 2005) i in. Ponadto energia słoneczna znajduje coraz szersze zastosowanie praktyczne i nabiera znaczenia ekonomicznego jako energia zasilającą ogniwa elektryczne czy panele ogrzewające wodę do celów przemysłowych (Caputa i in. 2012).

Celem tego opracowania było określenie rzeczywistego dopływu promieniowania krótkofalowego słonecznego do powierzchni wklęsłej Doliny Prądnika na Wyżynie Krakowskiej.

METODA

Stacja Park Zamkowy (PZ) w Ojcowie założona przez dr J. Partykę i działająca od 1990 pod opieką Dyrekcji Ojcowskiego Parku Narodowego została w 2007 uzupełniona o czujniki aktywności w ramach projektu MNiSW (Caputa, Partyka, red. 2009). Projekt był realizowany przez Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytetu Śląskiego na Wyżynie Krakowskiej w latach 2007–2009. Stacja PZ (o współrzędnych geograficznych 50°12'35"N, 19°49'44"E, wysokości 322 m n.p.m.) jest zlokalizowana na dnie wąskiej (50–150 m), głębokiej (ponad 100 m) Doliny Prądnika o generalnym przebiegu północno-południowym. Zastąpienie horyzontu jest duże (10–35°) ze względu na strome zbocza o ekspozycji wschodniej i zachodniej oraz drzewa. Taka lokalizacja stacji oddaje specyfikę głębokich dolin Wyżyny Krakowskiej o charakterze kanionów i dobrze reprezentuje warunki klimatyczne wklęsłych form terenu (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 rejestrowano przez CR1000 (Campbell) jako średnie 10 min od 12.2007. Promieniowanie krótkofalowe całkowite (K_{\downarrow}) mierzono za pomocą pyranometru CM3 (305–2800 nm) o błędzie pomiaru do 6% ($-10^{\circ}\text{C} \div 40^{\circ}\text{C}$) i $\pm 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ przy $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Bilansomierz CNR1 był okresowo kalibrowany przez porównanie do czujników CNR1 i CNR4 pracujących na stacji Wydziału Nauk o Ziemi UŚl. w Sosnowcu.

Do analizy wykorzystano serię danych wartości średnich strumienia K_{\downarrow} z lat 2008–2014. Następnie usunięto wartości zerowe K_{\downarrow} z godzin nocnych. Wartości godzinnych sum 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 32939 wartości godzinnych sum K_{\downarrow} oraz 2557 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, zastąpienie horyzontu oraz częste mgły rano i wieczorem. Maksymalne wartości przyjmował w pogodne dni w okresie wiosennym i letnim w południe, a najniższe rano i wieczorem oraz w dni pochmurne.

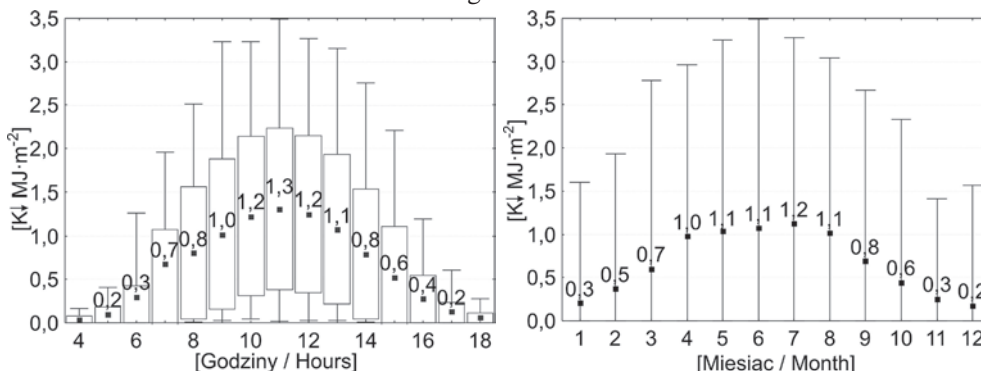
W opracowaniu posługując się standardowymi metodami statystycznymi określono średnie sumy K_{\downarrow} . Ze względu na rozkład zmiennych uwzględniono różne przedziały czasowe (godzinne, dobowe, miesięczne, sezonowe i roczne) określono wielkość dopływu promieniowania do wklęsłej partii Wyżyny Krakowskiej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

WYNIKI

Godzinne sumy promieniowania całkowitego

Rozkład częstości godzinnych sum K_{\downarrow} w przedziałach co $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ wskazywał niesymetryczność estymacji wartości na stacji PZ w latach 2008–2014. Zdecydowanie najwięcej przypadków godzinnych sum K_{\downarrow} obejmowały wartości z przedziału $0\text{--}0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ (51%) i tylko 5% 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} wynosiła 68% a większych od wartości granicznej 32%.

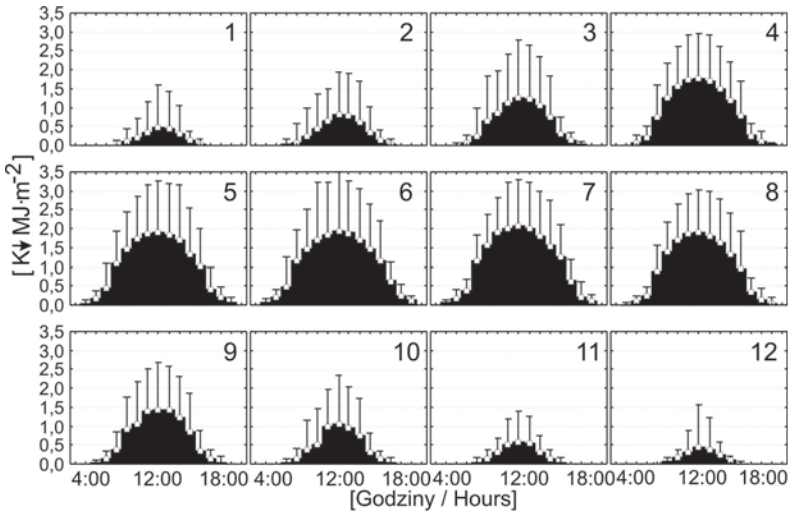
Najwyższą średnią sumę K_{\downarrow} , wynoszącą $1,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$, zmierzono w przedziale 10:10–11:00 w analizowanym wieloleciu (ryc. 1). W tym samym przedziale czasowym wystąpiło maksimum K_{\downarrow} , wynoszące $3,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w dniu 15.06.2010. Związane było to z górowaniem Słońca (10:39 UTC), brakiem zachmurzenia oraz dużą przejrzystością powietrza. Średnia godzinna suma K_{\downarrow} równała się lub przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ od 9:00 do 13:00. Niskie sumy K_{\downarrow} równe lub poniżej $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ pomierzono od wschodu Słońca do 6:00 oraz wieczorem od 16:00 godz.



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

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

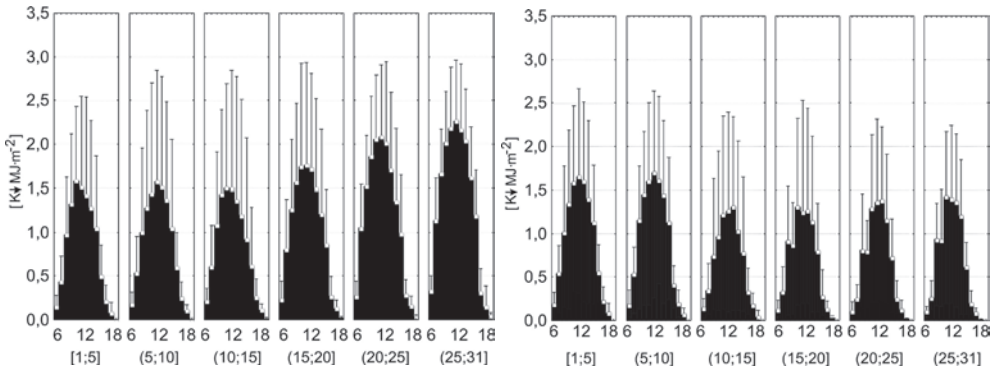
Przeanalizowano również godzinne sumy K_{\downarrow} w poszczególnych miesiącach roku (ryc. 2). Średnia miesięczna godzinna suma K_{\downarrow} przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ od kwietnia do sierpnia. Miesiące od kwietnia do sierpnia charakteryzowały się sumami K_{\downarrow} przekraczającymi $1,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w godzinach 9:00–13:00. Najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} , wynoszącą $1,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$, zmierzono w lipcu. Natomiast wrzesień i październik były miesiącami gdzie systematycznie zmniejszał się strumień K_{\downarrow} dodatkowo ograniczony zbozami. 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 sierpnia. Średnia godzinna suma K_{\downarrow} przekraczała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ tylko w godzinach okołopołudniowych w marcu i we wrześniu (10:00–13:00) i październiku tylko o 11:00). Z powyższych rozważań wynika, że część energii słonecznej w postaci promieniowania K_{\downarrow} docierała do powierzchni w godzinach 8:00–14:00 UTC co stanowiło 55% rocznej sumy analizowanego promieniowania w tym 24% sum K_{\downarrow} powyżej $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$.



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

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

Aby wskazać dni z dużymi 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} przekracza wartość $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w godzinach 10:00–13:00 w dniach 16–25 marca. Natomiast w dłuższym przedziale godzinowych po 25 marca (ryc. 3). Suma K_{\downarrow} przekraczała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w kwietniu od 9:00 do 14:00 w początkowych dnia kwietnia i w dłuższym przedziale (8:00–14:00) od 16.04.



Ryc. 3. Średnie godzinne sumy K_{\downarrow} w marcu (po lewo) i we wrześniu (po prawo) skategoryzowane co pięć dni na stacji PZ w latach 2008–2014. Punkty 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 according five days at the PZ station in 2008–2014. Points indicate the average value for 6:00–18:00 UTC, the dashed lines mark the maximum

Średnia godzinna suma K_{\downarrow} przekraczała wartość $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{godz}^{-1}$ w godzinach 8:00–14:00 do 10 września, w pozostałe dni tego miesiąca tylko od godziny 10:00 do 13:00 (ryc. 3). Pozwala to przypuszczać, że natężenie K_{\downarrow} w tych dniach można wykorzystywać ekonomicznie tylko w godzinach okołopołudniowych.

Dobowe sumy promieniowania całkowitego

Na podstawie analizy częstości stwierdzono, że zdecydowana większość przypadków (60%) dobowych sum K_{\downarrow} była wartościami powyżej $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 24% przypadków powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ i tylko 1% powyżej $25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Pomierzono średnie dobowe sumy K_{\downarrow} przekraczające $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w miesiącach od maj do pierwszej połowy sierpnia. Wartości dobowej sumy K_{\downarrow} powyżej $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ pojawiały się od 23 marca do 13 września i występowały od 75 do 100 dni w ciągu roku. Wyróżniał się okres od 125. do 200. 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} $26,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ zanotowano 27.06.2010 roku, a najniższą $0,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 26.12.2013 (ryc. 4).

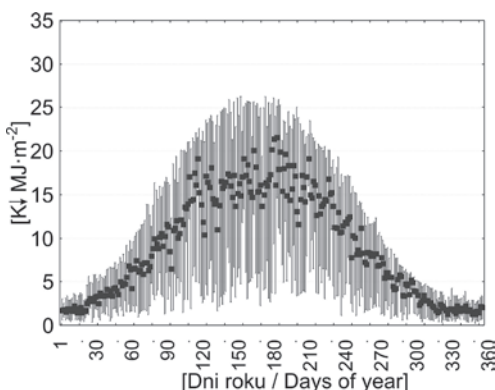
W rozkładzie średnich miesięcznym dobowych sum K_{\downarrow} wyróżniały się miesiące od maja do lipca przekraczając $15,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Najwyższą średnią obliczono dla lipca $16,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a najniższą dla grudnia $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. W podziale na sezony, wyróżniały się wyższe wartości średnich dobowych sum K_{\downarrow} dla wiosny i lata (ryc. 5) wynosząc odpowiednio $12,0$ i $15,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Dużo niższe sumy K_{\downarrow} wystąpiły w okresie jesiennym i zimowym ze względu na niskie położenie Słońca nad horyzontem, zasłonięcie przez zbocza i roślinność na dnie doliny, występujące mgły oraz krótsze dni w stosunku do wiosny i lata.

Średnia wartość dobowej 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 roku. Były to niższe wartości niż pomierzone ($10,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) w tym samym okresie dla otwartej powierzchni partii wierzchowinowej Wyżyny Krakowskiej (Caputa w tym tomie) jak również podawane dla tego obszaru w wysokości $10,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ dla wielolecia 1956–1975 (Grzybowski i in. 1994).

Miesięczne sumy promieniowania całkowitego

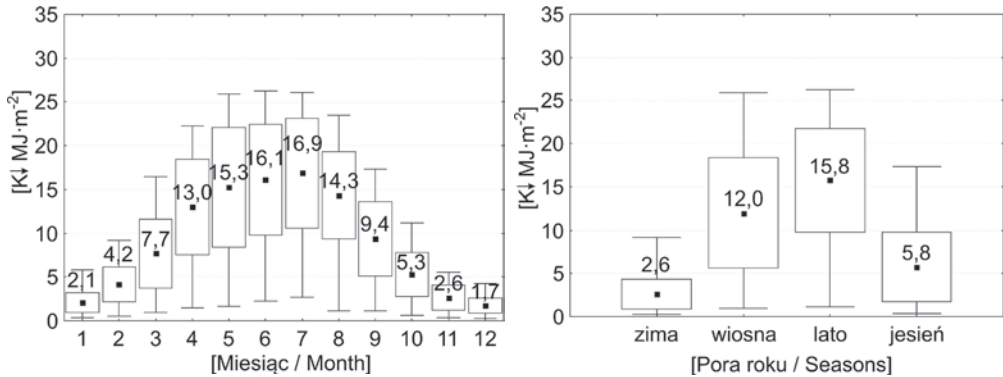
Niskie średnie miesięczne sumy K_{\downarrow} pomierzono w styczniu $64,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$, później rosły do miesięcy letnich (w lipcu $522,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$) i następnie stopniowo malały aż do grudnia $53,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$ (ryc. 6).

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 $473,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{miesiąc}^{-1}$. Jednak miesiąc maj charakteryzował się dużą zmiennością warunków insolacyjnych w miesięcznej sumie K_{\downarrow} od minimum (316,3)



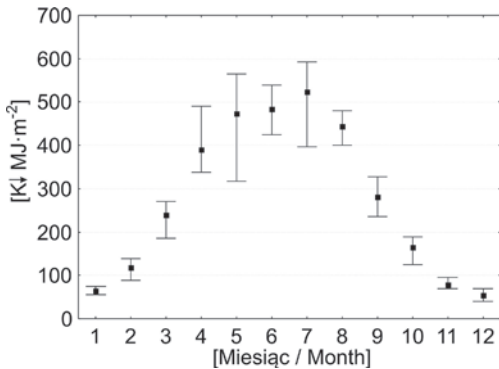
Ryc. 4. Średnie dobowe sumy K_{\downarrow} na stacji PZ w latach 2008–2014. Punkty oznaczają wartość średnią, wąsy wartości skrajne

Fig. 4. Mean daily totals of K_{\downarrow} at the PZ station in 2008–2014. Points 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 PZ w latach 2008–2014. Punkty oznaczają wartość średnią, ramki odchylenie standardowe od średniej, a wąsy wartości skrajne

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



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

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

w 2010 r. do maksimum (564,2) w 2011 r. Mniejszą dynamiką charakteryzowały się kwiecień i sierpień. Nieznaczne wahania i amplitudy miesięcznych sum K_{\downarrow} stwierdzono dla listopada i miesięcy zimowych. Najwyższą miesięczną sumę K_{\downarrow} o wartości 592,2 MJ·m⁻²miesiąc⁻¹ zanotowano w lipcu 2013 r. a najniższą 40,5 MJ·m⁻²miesiąc⁻¹ w grudniu 2009 r. Niższe wartości zostały pomierzone przez J. Kleina (1992) w wąskiej dolinie Sąpsowskiej o przebiegu E–W. Promieniowanie K_{\downarrow} osiągnęło – w sumie miesięcznej – największą wartość w czerwcu 1987 (387,6 MJ·m⁻²) oraz w lipcu 1988 (378,5 MJ·m⁻²). Najniższe wartości obserwowano w grudniu.

Średnie miesięczne sumy K_{\downarrow} pomierzone na dnie doliny były niższe niż analogiczne sumy w poszczególnych miesiącach na wierzchowinie (tab. 1). Największe różnice obserwowano w miesiącach wiosennych i letnich dochodzące do –75,6 MJ·m⁻² w lipcu. Dużo mniejsze różnice w dopływie promieniowania słonecznego zanotowano w styczniu i grudniu, odpowiednio – 18,2 i – 17,9 MJ·m⁻².

Roczne sumy promieniowania całkowitego

Najniższa roczna suma K_{\downarrow} na stacji PZ wyniosła 3171 MJ·m⁻²rok⁻¹ w roku 2010 a najwyższa 3462 MJ·m⁻²rok⁻¹ w 2012. Wartość średnia rocznej sumy K_{\downarrow} osiągnęła 3312 MJ·m⁻²rok⁻¹ dla badanego wielolecia 2008–2014. Była to wartość niższa o 19% od średniej rocznej sumy K_{\downarrow} dla tego samego wielolecia pomierzonej na wierzchowinie Wyżyny Krakowskiej (Ca-

Tabela 1. Średnie miesięczne i roczne sumy K_{\downarrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na wierzchowinie (LCz) i dnie doliny (PZ) oraz różnice pomiędzy PZ–LCz w latach 2008–2014Table 1. Mean monthly and annual totals of K_{\downarrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] at the plateau (LCz) and the bottom of canyon (PZ) and the differences between PZ–LCz in 2008–2014

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rok/Year [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]
	[$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]												
LCz	83,1	157,4	304,5	458,3	542,6	558,7	593,4	513,7	340,4	221,0	110,1	71,3	3954,5
PZ	64,9	118,0	238,9	389,7	473,7	483,1	522,9	443,6	280,7	164,7	78,5	53,4	3312,1
PZ– LCz	-18,2	-39,4	-65,6	-68,6	-68,9	-75,6	-70,5	-70,1	-59,7	-56,3	-31,6	-17,9	-642,4

puta w tym tomie). Natomiast sumy roczne K_{\downarrow} dla lat 1987 i 1988 wyniosły odpowiednio $2444 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $2481 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w dolinie Sądrowskiej prostopadłej do doliny Prądnika (Klein 1992). Były to wartości o 26% niższe niż pomierzone dla doliny Prądnika. Wynikało to z przebiegu doliny oraz jej formy o charakterze kanionu (głęboko wcięta o stromych zboczach i ścianach skalnych) ograniczających dopływ promieniowania słonecznego.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zestawienie natężenia promieniowania krótkofalowego słonecznego w postaci sum godzinnych, dobowych, miesięcznych, sezonowych i rocznych pozwoliła określić zmienność warunków radiacyjnych dla wklęsłej formy terenu południowej części Wyżyny Krakowskiej. Ponadto ilościowe zestawienie sum K_{\downarrow} odzwierciedlało warunki klimatyczne a w szczególności aktywność dna dolin o charakterze kanionów.

Na podstawie danych sum K_{\downarrow} na stacji Park Zamkowy dla wielolecia 2008–2014 stwierdzono:

- najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} o wartości $1,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ stwierdzono dla przedziału 10:10–11:00 UTC. W tym samym przedziale czasowym wystąpiło maksimum K_{\downarrow} wynoszące $3,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w dniu 15.06.2010,
- średnia miesięczna obliczona z godzinnych sum K_{\downarrow} przewyższała $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ w miesiącach od maja do sierpnia. Najwyższą średnią godzinną sumę K_{\downarrow} o wartości $1,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ pomierzono dla lipca,
- duże wartości godzinnych sum K_{\downarrow} powyżej $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{godz}^{-1}$ notowano w przedziale 9:00–13:00 od maja do sierpnia co stanowiło 5% przypadków,
- najwyższą dobową sumę K_{\downarrow} wynoszącą $26,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ notowano 27.06.2010 roku, a najniższą $0,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 26.12.2013,
- wyróżniały się miesiące od maja do lipca z wysoką średnią dobową sumą K_{\downarrow} , najwyższą w lipcu wynoszącą $16,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ a najniższą w grudniu $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$,
- średnia wartość dobowej sumy K_{\downarrow} wyniosła $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ w analizowanym wieloleciu, najwyższa $9,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ w 2011 i najniższa $8,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ w 2010,
- najwyższą miesięczną sumę K_{\downarrow} $592 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{miesiąc}^{-1}$ zanotowano w lipcu 2013 a najniższą $41 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{miesiąc}^{-1}$ w grudniu 2009,
- najniższa roczna suma K_{\downarrow} na stacji PZ wyniosła $3171 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{rok}^{-1}$ w roku 2010 a najwyższa $3462 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{rok}^{-1}$ w 2012.

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

– w godzinach okołopołudniowych w marcu i do 15 kwietnia a po tej dacie w szerszym zakresie godzin 8:00–14:00 UTC,

– w godzinach 8:00–14:00 do 10 września a po tej dacie w godzinach okołopołudniowych.

Średnia dobową sumą K_d przekraczała $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ i występowała od 75 do 100 dni w ciągu roku (początek okresu 23 marca i koniec 13 września). Analiza ta pozwoliła oszacować rzeczywistą energię słoneczną i zaplanować jej wykorzystanie jako odnawialne źródło energii.

Podziękowanie

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

PIŚMIENNICTWO

Bailey W. G., Oke T. R., Rouse W. R. (red.). 1999. *The Surface Climates of Canada*. McGill-Queen University Press, Montreal-Kingston, ss. 396.

Bárány-Kevei, I. 2011. *Changes in the vegetation of doline in Aggtelek and Bükk mountains*. Acta Climatologica et Chorologica, 44/45: 25–30.

Bartuś T. 2014. *Model zmienności topoklimatycznej rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, 24: 25–46.

Bokwa A., Caputa Z., Durło G., Maciejowski W., Wojkowski J. 2008. *Meso- and microclimatic conditions in the southern part of the Cracow-Częstochowa Upland*, EJPAU 11(3), #03.

Caputa Z. 2015. *Dopływ promieniowania słonecznego do południowej części Wyżyny Krakowskiej w latach 2008–2014*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, 25: 129–138.

Caputa Z., Czyłok A., Wojkowski J. 2012. *Ocena metod szacowania potencjału odnawialnych źródeł energii na przykładzie promieniowania słonecznego i wiatru*, [w:] *Przegląd metod oceny warunków wykorzystania odnawialnych źródeł energii w budownictwie. Monografia*, red. Joachim Kozioł. 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 Miękusowieckiego (Tatry) latem w okresie dużego zachmurzenia i opadów*. „Przegląd Geograficzny”, 75, 2: 287–298.

Grzybowski J., Miara K., Paszyński J. 1994. *Bilans promieniowania. Atlas walorów, zasobów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski*. PAN IGiPZ. Warszawa, II-1 map.

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.

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 Sąpowskiej)*. „Prądnik. Prace Muz. 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 Geodety”, **42**(3): 227–242.

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

Paszyński J., Miara K., Skoczek J. 1999. *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego*. „Dokumentacja Geograficzna”, **14**: 122.

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*. "Bulletin of the American Meteorological Society", **88**: 701–716.

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 and Climatology", **28**: 427–437.

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 and Climatology", **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.

Wołowski K., Cabała J., Zeeb B. A. 2004. *Chrysophycean stomatocysts from a karstic sink-hole in the vicinity of Staszów on the Małopolska Upland, Poland*. "Canadian Journal of Botany", **9**: 1330–1337.

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

SUMMARY

The aim of this study was to determine the actual flow of the solar short-wave radiation (K_{\downarrow}) to the surface of the concave Prądnik valley in the Cracow Upland. For the analysis, the data series mean values measured flux K_{\downarrow} Park Zamkowy station (PZ) in the Fathers. PZ Station (geographical coordinates 50°12'35"N, 19°49'44"E, altitude 322 m above sea level) is located at the bottom of a narrow (50–150m), deep (more than 100m) Prądnik valley of the general run north-south. Blocking the horizon is high (10–35°) due to the steep slopes of the eastern and western exposure and slow-growing tree. This location gives specifics station Cracow Upland deep valleys of a canyon and well represents the climatic conditions concave landforms. The measurements were performed with a step 10s and written by CR1000 (Campbell) as an average 10 minutes of 12.2007. The flux K_{\downarrow} was measured using the pyrgeometer CM3 (305–2800 nm).

Incoming solar radiation to the concave landforms in the bottom of Prądnik valley in Cracow Upland were analysed in multi-year 2008–2014. The flux K_{\downarrow} was summarized in hourly, daily, monthly, seasonally and yearly in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ data. This has allowed to determine the variability of radiation conditions for the concave landforms. The highest mean hourly total K_{\downarrow} with a value $1,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{hour}^{-1}$ were found for the interval 10:10–11:00 UTC. In the same time period occurred K_{\downarrow} a maximum $3,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2} \text{ hour}^{-1}$. This was related to the ascendancy of the Sun (10:39 UTC), the cloudless and high transparency of air. Stand out months from May to July with a high mean daily total K_{\downarrow} , the highest in July $16,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. The lowest mean daily total K_{\downarrow} were measured for December $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Mean daily total K_{\downarrow} amounted to $9,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ in the analysed multi-year period. The highest monthly total K_{\downarrow} amounted to $592 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$ was recorded in July 2013, and the lowest $41 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{month}^{-1}$ in December 2009. The mean annual total K_{\downarrow} amounted to $3312 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{year}^{-1}$.

Due to the economic use of solar energy indicated days and scope hours, when the average hourly total K_{\downarrow} exceed $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{hour}^{-1}$:

– In the hours around noon in March and April 15 and thereafter a wider range of hours 8:00–14:00 UTC,

– The hours of period 8:00–14:00 until September 10 and after that date the hours around noon.

Mean daily total K_{\downarrow} exceed $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ and performed from 75 to 100 days per year (beginning of period 23 March and 13 September). The analysis allowed to estimate the actual solar and plan its use as a renewable energy source.