

Prądnik. Prace Muz. Szafera	19	119–140	2009
-----------------------------	----	---------	------

ZBIGNIEW CAPUTA¹, JAKUB WOJKOWSKI²

¹Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Klimatologii
ul. Będzińska 60, 41–200 Sosnowiec

²Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza,
Al. A. Mickiewicza 24/28, 30–059 Kraków

STRUKTURA PROMIENIOWANIA W PEŁNYM ZAKRESIE WIDMA NA OBSZARZE OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO

Structure of solar radiation balance in full spectral range in the Ojców National Park

ABSTRACT. Based on actinometrical measurements using the differential CNR 1 net radiometer, analysis of the structure of radiation balance in full spectral range was presented in 2007–2009. Quantitative limitation of the solar radiation influx to the narrow karstic canyon was shown. Differences in the structure of radiation balance at the grass surface were described.

KEY WORDS: solar radiation, global radiation, net radiation, structure of radiation balance, topoclimate, ONP

WSTĘP

Badania warunków klimatycznych Ojcowskiego Parku Narodowego (OPN) prowadzono już na początku XX w., natomiast dużo później podjęto analizę stosunków radiacyjnych. Prowadzone badania przez J. Kleina (1974, 1992) w latach 1964–67 i 1987–89 dotyczyły zachmurzenia i usłonecznienia oraz pomiarów promieniowania całkowitego. Znacznie później, przy pomocy narzędzi GIS, powstały mapy usłonecznienia i rozkładu przestrzennego promieniowania całkowitego (Wojkowski 2007, Bokwa i in. 2008). Krótkie serie pomiarowe precyzyjnymi instrumentami pomiarowymi w 1999 roku wskazały na duże różnice dostawy energii słonecznej, które mogły wynikać z przepływu energii: promieniowania słonecznego, promieniowania atmosfery do powierzchni Ziemi oraz wypromieniowanego ciepła z podłoża (Caputa 2001). Istotnym uzupełnieniem stosunków radiacyjnych na terenie OPN stały się szczegółowe badania terenowe przeprowadzone przez pracowników Uniwersytetu Śląskiego Katedry Klimatologii. Celem tych prac było poznanie struktury bilansu promieniowania i jego zmian dla różnej wysokości, podłoża i ukształtowania terenu (Caputa, Leśniok 2001). W okresie od 5 do 15 września 1999 na terenie OPN zostały zainstalowane dwie automatyczne stacje meteorologiczne Campbell z instrumentami aktywnymi Kipp&Zonen. Do badań wybrano obszar dna wąwozu krasowego i

wierzchowinowy jako charakterystyczne formy morfologiczne dla omawianego terenu. Warunki pogodowe pozwoliły na analizę porównawczą w czasie kilku pogodnych dni (Caputa, Leśniok 2002a). Wyznaczono różnicę w dopływie promieniowania słonecznego, strukturę bilansu promieniowania oraz niedobór promieniowania jaki wynikał z osłonięcia wąskich wąwozów krasowych w OPN (Caputa, Leśniok 2002b).

Przy wyżowym typie pogody, z pogodnym niebem i ciszą lub słabym wiatrem, obserwowano największe wartości strumieni promieniowania oraz duże zróżnicowanie przestrzenne salda promieniowania (Oke, 1987, 1999). Dlatego do porównań i analizy wybrano pogodne dni lata i zimy, zestawiono przebiegi promieniowania oraz strukturę bilansu promieniowania dla wierzchowiny i dna wąwozu krasowego. Wyznaczono saldo promieniowania, gdyż w dużej mierze wpływa ono na bilans energetyczny powierzchni i bilans wodny, silnie regulując termiczny i wilgotnościowy mikroklimat powierzchni, a dodatkowo wpływa na wyższe warstwy powietrza i warstwę gruntu (Paszyński i in. 1999). W artykule podjęto analizę struktury promieniowania słonecznego dla charakterystycznych form terenu. Przestrzenny rozkład promieniowania słonecznego został omówiony przez autorów w osobnych artykułach w tym tomie.

METODA BADAŃ

Badaniami zostały objęte najważniejsze elementy klimatu: składniki bilansu promieniowania, temperatura i wilgotność powietrza oraz temperatura powierzchni gleby, ciśnienie atmosfery, opad, prędkość i kierunek wiatru. W pracach terenowych zostały użyte dwie automatyczne stacje meteorologiczne firmy Campbell wyposażone w dwa zestawy czujników: bilansomierz CNR1 firmy Kipp&Zonen, Holandia (ryc. 1), multisensor WXT510 firmy Vaisala, Norwegia, termometry Pt100.

Czujnik CNR1 składał się: z dwóch pyranometrów CM3 przykrytych kopolimerną szklaną przezroczystą dla promieniowania krótkofalowego (305–2 800 nm), oraz dwóch pyrgeometrów CG3 przykrytych kopolimerną silikonową przezroczystą dla promieniowania długofalowego (5 000–50 000 nm). Został on ustawiony na maszcie na wysokości 1,5 m i dokładnie wypoziomowany (ryc. 1). Pomiar i rejestrację średnich 10-min. wartości wykonywał rejestrator CR1000 firmy Campbell.

Dobowy przebieg promieniowania przedstawiono w postaci średnich 10 minutowych wartości strumieni promieniowania w $W \cdot m^{-2}$. Dodatkowo obliczono sumy dobowe składników promieniowania wyrażonych w $MJ \cdot m^{-2}$. Bilans promieniowania w pełnym zakresie widma obliczono według poniższego równania:

$$Q^* = K^* + L^* \quad K^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow}; L^* = L_{\downarrow} - L_{\uparrow}$$

gdzie:

K^* – promieniowanie pochłonięte (saldo promieniowania krótkofalowego),

L^* – promieniowanie efektywne (saldo promieniowania długofalowego),

K_{\downarrow} – całkowite promieniowanie słoneczne,

K_{\uparrow} – promieniowanie słoneczne odbite od podłoża (powierzchni czynnej),

L_{\downarrow} – promieniowanie długofalowe atmosfery skierowane ku powierzchni Ziemi (promieniowanie zwrotne atmosfery),

L_{\uparrow} – promieniowanie długofalowe uchodzące od powierzchni czynnej ku górze.

Ryc. 1. Radiometr różnicowy – bilansomierz CNR1 ustawiony na stacji Park Zamkowy (PZ) w Dolinie Prądnika

Fig. 1. Differential CNR 1 net radiometer set up at the station Park Zamkowy (PZ) in the Prądnik Valley

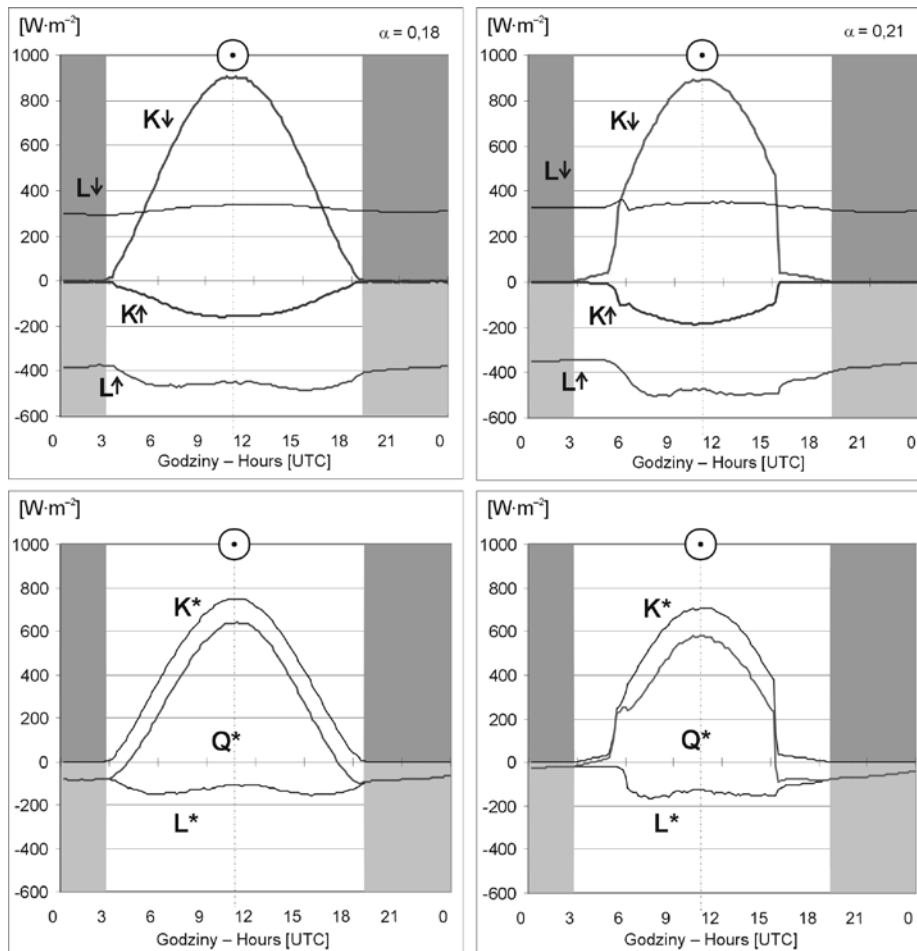


Stacjonarne pomiary aktywności promieniowania były prowadzone na stacji Lepianka Czajowska (LCz) na Wyżynie Krakowskiej od 14.09.2007 r. oraz Park Zamkowy (PZ) na dnie Doliny Prądnika (322 m n.p.m.). Obydwie lokalizacje zostały przedstawione wraz z zasłonięciem horyzontu w artykułach: „Charakterystyka klimatu lokalnego...” oraz „Kontrasty mezo- i mikroklimatyczne...” zamieszczone w tym tomie.

WYNIKI BADAŃ

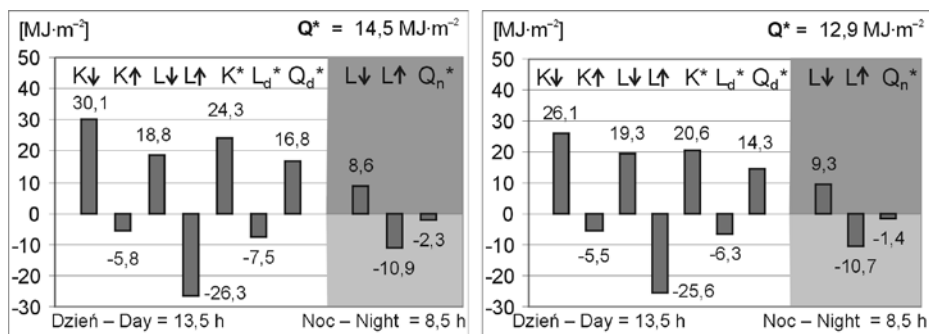
Przebieg całkowitego promieniowania słonecznego

Promieniowanie krótkofalowe całkowite było mierzone przez CNR1 jako suma promieniowania słonecznego bezpośredniego i promieniowania rozproszonego atmosfery. Przebieg dzienny strumienia K_{\downarrow} na wierzchołku (LCz) nawiązywał do zmian wysokości Słońca w ciągu pogodnego dnia. Był on zakłócany przez poranne mgły i zamglenia, szczególnie częste zimą. W godzinach okołopołudniowych przezroczystość powietrza ulegała poprawie jednak w dnie doliny ciągle utrzymywało się zamglenie (ryc. 1). Strumień K_{\downarrow} w Dolinie Prądnika (PZ) był ograniczony przez stoki i dodatkowo przez dużą wilgotność i skondensowaną parę wodną. W czasie pogodnego dnia latem (2.06.2008) obserwowano szybki wzrost K_{\downarrow} po wschodzie Słońca do wartości 600–700 $W \cdot m^{-2}$ (ryc. 2). Strumień K_{\downarrow} na stacji PZ miał zakłócony przebieg spowodowany zasłonięciem horyzontu przez strome wzniesienia Góry Smardzewskiej i Żłotej Góry, jak również przez rozłożyste konary drzew pokryte liśćmi. Na wykresie przebiegu dziennego strumienia K_{\downarrow} wyraźnie zaznaczał się wzrost wartości prawie 2 godziny po wschodzie Słońca, następnie przebiegał zgodnie ze strumieniem K_{\downarrow} wierzchołku do trzeciej godziny przed zachodem Słońca, gdzie gwałtownie spadał do wartości 40 $W \cdot m^{-2}$ i bardzo wolno zmierzał do zera przez 2 godz. i 50 min. Maksymalne wartości K_{\downarrow} były rejestrowane między godziną 9.50 a 11.20 UTC co było zbliżone do górowania Słońca w ciągu roku. Suma dobowo K_{\downarrow} była o 4 $MJ \cdot m^{-2}$ mniejsza w Dolinie Prądnika niż zmierzona dla wierzchołku w pogodnym dniu 2.06.2008 r. (ryc. 3).



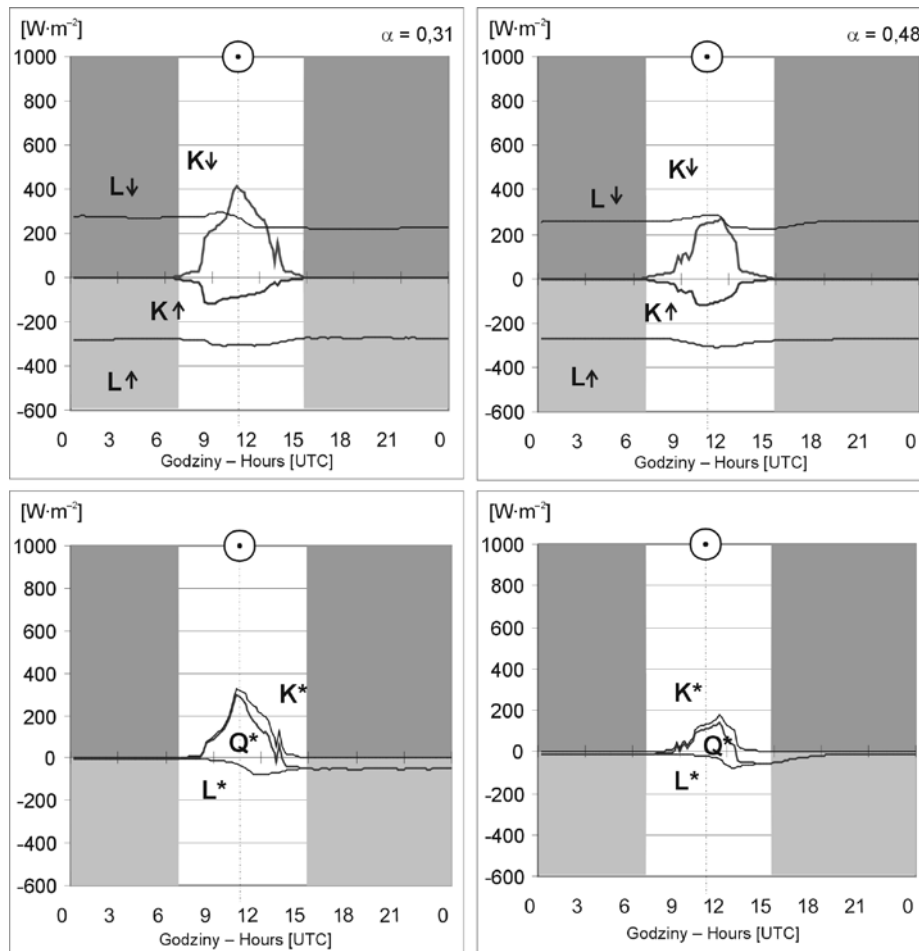
Ryc. 2. Przebieg dobowy natężenia promieniowania – Lepianka Czajowska na wierzchowinie (po lewej) oraz Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (po prawej) w dniu 2.06.2008 r.

Fig. 2. Daily course of grass surface radiation intensity – Lepianka Czajowska in the plateau (at left) and in Park Zamkowy in the Prądnik Valley (at right) on 2.06.2008



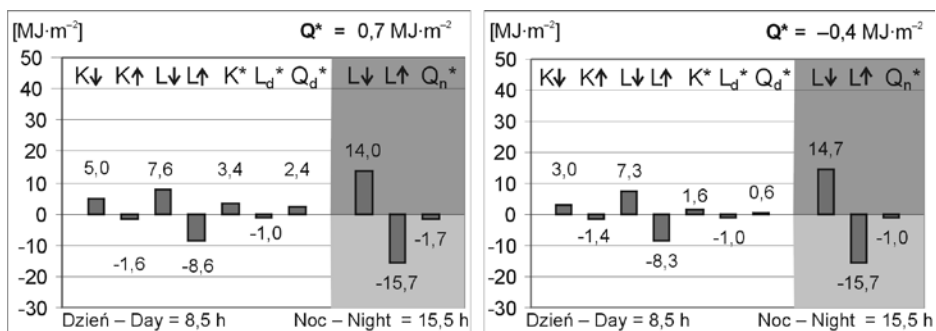
Ryc. 3. Struktura bilansu promieniowania murawy – Lepianka Czajowska na wierzchowinie (po lewej) oraz Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (po prawej) w dniu 2.06.2008 r.

Fig. 3. Structure of grass surface radiation balance – Lepianka Czajowska in the plateau (at left) and in Park Zamkowy in the Prądnik Valley (at right) on 2.06.2008



Ryc. 4. Przebieg dobowy natężenia promieniowania – Lepianka Czajowska na wierzchowinie (po lewej) oraz Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (po prawej) w dniu 30.12.2008 r.

Fig. 4. Daily course of radiation intensity – Lepianka Czajowska in the plateau (at left) and in Park Zamkowy in the Prądnik Valley (at right) on 30.12.2008



Ryc. 5. Struktura bilansu promieniowania – Lepianka Czajowska na wierzchowinie (po lewej) oraz Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (po prawej) w dniu 30.12.2008 r.

Fig. 5. Structure of radiation balance – Lepianka Czajowska in the plateau (at left) and in Park Zamkowy in the Prądnik Valley (at right) on 30.12.2008

Duże różnice w dopływie promieniowania słonecznego na obszarze OPN zmierzono zimą, gdy Słońce przemieszczało się nisko nad horyzontem i dodatkowo zamglenie ograniczało K_{\downarrow} (ryc. 4). W dniu 30.12.2008 r. zalegające mgły do godz. 8.00 (2 godz. po wschodzie Słońca) silnie ograniczały dopływ energii słonecznej do powierzchni wierzchowiny, później częściowo zamglenie modyfikowało strumień K_{\downarrow} w godzinach okołopołudniowych. Dużo większe ograniczenie obserwowano w Dolinie Prądnika gdzie suma dobową K_{\downarrow} była o $2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ mniejsza niż na wierzchowinie (ryc. 5).

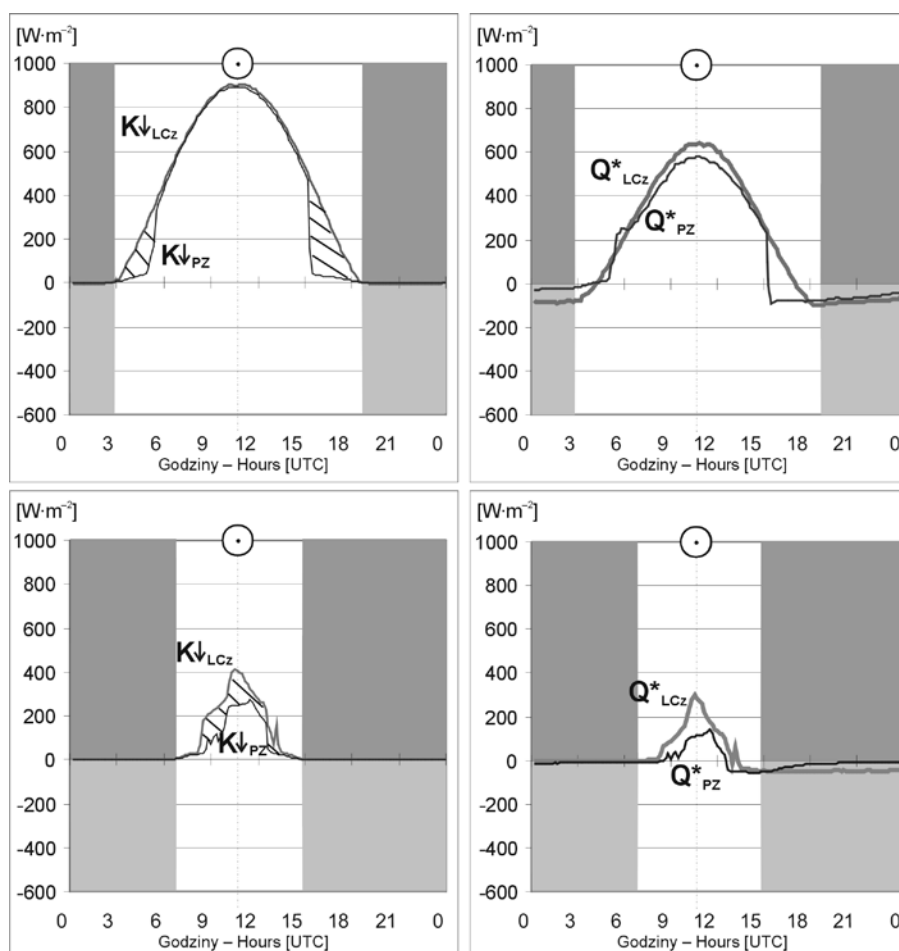
Przebieg promieniowania odbitego

Całkowite promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi było częściowo przez nią odbijane zależnie od charakteru podłoża, a przede wszystkim od jego barwy i wilgotności. Zdolność powierzchni do odbijania – albedo (α) – zmieniała się w ciągu dnia, szerzej omówione przez autorów w artykule „Przestrzenne i czasowe zróżnicowanie albedo...” zobacz w tym tomie. Dlatego α wyznaczono dla godzin 9.00–13.00 UTC. Dla powierzchni suchej pozbawionej roślinności (zaoranej) obserwowano wyższe wartości α (średnio 20%), natomiast dla powierzchni trawiastej rejestrowano średnio 18%. Wysokie wartości α notowano w zimie w czasie zalegania świeżej pokrywy śnieżnej nawet do 95%, natomiast w czasie odwilży i ze względu na zanieczyszczenia, powierzchnia śniegu przyjmowała niższe wartości nawet 30%.

Przebieg strumienia K_{\uparrow} w LCz na wierzchowinie był uzależniony od K_{\downarrow} oraz jasnej, suchej murawy, która dobrze odbijała promieniowanie słoneczne osiągając maksymalną wartość $159 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w czasie pogodnego dnia 2.02.2008 r. W tym samym czasie strumień K_{\uparrow} osiągnął tylko $187 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w Dolinie Prądnika ze względu na ciemniejszą i wilgotniejszą murawę. Ponadto w godzinach porannych i popołudniowych strumień K_{\uparrow} przyjmował małe wartości ze względu na ograniczony strumień K_{\downarrow} składający się tylko z promieniowania rozproszonego (ryc. 2). W sumie dobowej natężenie K_{\uparrow} było mniejsze o $0,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla wilgotnego dna wąwozu krasowego niż murawy na wierzchowinie (ryc. 3). W czasie zimowego dnia (30.12.2008) przebieg K_{\uparrow} był asymetryczny z maksimum ($117 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) o godz. 9.00 ze względu na zalegającą pokrywę śnieżną. W czasie tego dnia śnieg intensywnie topniał, zmieniało się albedo i K_{\uparrow} (ryc. 4). Suma dobową K_{\uparrow} osiągnęła $1,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla częściowo pokrytej śniegiem powierzchni na stacji LCz. Na stacji PZ przebieg K_{\uparrow} był również asymetryczny jednak strumień K_{\uparrow} osiągnął maksimum ($123 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) o godz. 10.20 ze względu na grubą warstwę śniegu i jasną jego barwę. Mimo małych wartości K_{\uparrow} porannych i wieczornych suma dobową osiągnęła $1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dnie wąwozu krasowego w zimowy dzień 30.12.2008 r.

Promieniowanie pochłonięte – saldo promieniowania krótkofalowego

Wielkość strumienia pochłanianego przez powierzchnię zależała od wielkości promieniowania słonecznego i albeda powierzchni czynnej. Duża część energii w postaci strumienia K_{\downarrow} była pochłaniana przez powierzchnię Ziemi i zamieniana na strumień ciepła lub parowanie. Saldo K^* osiągnęło wartość $3,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla powierzchni na stacji LCz i $1,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla stacji PZ w czasie zimowego dnia 30.12.2008 r., natomiast latem suma dzienna K^* wynosiła analogicznie $24,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $20,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla pogodnego dnia 2.06.2008 r. Ze względu na podobne albedo dla obu punktów pomiarowych różnice w saldzie K^* były związane z zasłonięciem horyzontu oraz silnym zamgleniem w czasie zimowego dnia.



Ryc. 6. Przebieg dobowy natężenia K_{\downarrow} i Q_{\uparrow} – wierzchowina (indeks 'LCz') oraz Dolina Prądnika (indeks 'PZ') w Ojcówie w dniu 2.06.2008 r. u góry i 30.12.2008 r. u dołu. Przebieg dzienny przedstawiono na jasnym tle, natomiast przebieg nocny na ciemnym tle. Przerywaną linią i punktem w kole zaznaczono moment górowania Słońca

Fig. 6. Daily course of K_{\downarrow} and Q_{\uparrow} intensity – the plateau (index 'LCz') and the Prądnik Valley (index 'PZ') in Ojców on 2.06.2008 (top) and 30.12.2008 (bottom). The diurnal course is presented on the bright background, and the nocturnal course on the dark background. The moment of the upper culmination of the Sun is marked with a broken line and a dot in a circle

Różnice dopływu promieniowania słonecznego do nieoświetlonej powierzchni wierzchowiny i do dna wąskiego kanionu krasowego zakresowano na rycinie 6. Obliczono różnicę wartości K_{\downarrow} między stacjami PZ a LCz i otrzymano ujemną wartość, którą nazwano niedoborem energii słonecznej. Obliczenia przeprowadzono dla godzin porannych od wschodu Słońca do godziny gdy K_{\downarrow} na stacji PZ było zbliżone do K_{\downarrow} zmierzonego na wierzchowinie. Niedobór promieniowania K_{\downarrow} sięgał maksymalnie $1,24 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla godzin porannych i $2,41 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla godzin popołudniowych dla jednego pogodnego dnia w czerwcu. Średnio dla całego pogodnego dnia latem dno otrzymywało o ponad $2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ mniej K_{\downarrow} niż powierzchnia wierzchowiny.



Ryc. 7. Zóżnicowanie rzeźby Ojcowskiego Parku Narodowego – fragment wierzchowiny i jaru krasowego w rejonie Grodziska. Fot. R. Cieślík

Fig. 7. Differences of the relief of the Ojców National Park – the part of upland and jurassic canon near Grodzisko. Photo by R. Cieślík

W omawianym okresie rejestrowano mniejsze saldo K^* na dnie niż na wierzchowie. Wynikało m.in. ze zóżnicowania rzeźby OPN (ryc. 7), czego graficznym wyrazem były mocno obcięte ramiona paraboli K^* (ryc. 6). Saldo K^* przyjmowało mniejsze wartości na stacji PZ niż LCz nie tylko w godzinach porannych i wieczornych ze względu na zasłonięcie horyzontu ale również w pozostałej części pogodnego dnia ze względu na wyższą wilgotność i mniejszą przezroczystość powietrza w wąwozie krasowym. Uwagę zwracało mocne powiązanie wzrostu temperatury z wartościami promieniowania krótkofalowego na dnie, temperatura wzrastała intensywnie parę godzin po wschodzie Słońca, a nie jak na wierzchowie gdzie równocześnie po wschodzie Słońca obserwowano wzrost temperatury.

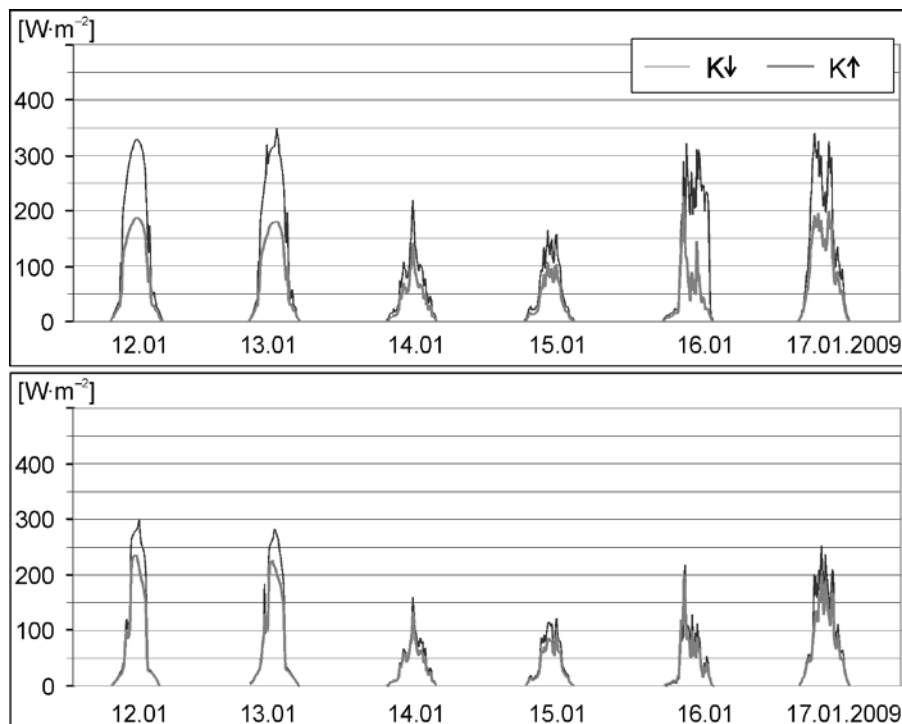
Dopływ energii słonecznej do nieosłoniętej powierzchni na wierzchowie (ryc. 7) był zmienny w dniach 12–17.01.2009 r. (ryc. 8). Niezakłócony przebieg strumieni K_{\downarrow} i K_{\uparrow} rejestrowano w pogodne dni 12 i 13 stycznia 2009 r. W te dni wartości K_{\downarrow} i K_{\uparrow} na wykresie miały ograniczone ramiona paraboli dla wąskiego kanionu krasowego. Front atmosferyczny spowodował zmianę pogody i wystąpienie dni o całkowitym zachmurzeniu 14 i 15 stycznia, zmieniło to dopływ energii słonecznej w dominujące promieniowanie rozproszone o niewielkim zóżnicowaniu dla stacji LCz i PZ. Następane dni (16–17.01.2009) o zmiennym zachmurzeniu, dużej wilgotności i występujących mgłach i zamgleniach pokazywały różnice i ograniczenia w dostawie promieniowania słonecznego.

W okresie lata, gdy Słońce wysoko znajdowało się nad horyzontem strumienie $K\downarrow$ i $K\uparrow$ przyjmowały najwyższe wartości w ciągu roku. Przebieg strumieni promieniowania krótkofalowego w dniach 25–30.06.2009 r. na stacji LCz ilustrował zróżnicowany dopływ energii słonecznej do nieosłoniętej powierzchni na wierzchowinie (ryc. 9). Zmienne zachmurzenie występowało w czasie dni 25 i 26 czerwca 2009 r. Całkowite zachmurzenie wystąpiło w dniu 27.06.2009, gdy tylko promieniowanie rozproszone docierało do powierzchni czynnej OPN. W tym dniu obserwowano mniejsze wartości strumienia $K\downarrow$ w Dolinie Prądnika niż na wierzchowinie, związane było to z wysoką wilgotnością, mgłą i opadem atmosferycznym. Przebieg $K\downarrow$ i $K\uparrow$ w czasie pogodnego dnia (30.06.2009) był zgodny z ruchem Słońca (tylko w godzinach popołudniowych wystąpiło chwilowe zachmurzenie kłębiaste). W tym dniu wyraźnie zaznaczał się wpływ zboczy kanionu krasowego na przebieg $K\downarrow$ i $K\uparrow$ w godzinach porannych i wieczornych.

Wymiana energii między atmosferą a powierzchnią czynną w zakresie długofalowym

Docierające promieniowanie długofalowe atmosfery było ściśle związane z zachmurzeniem, wilgotnością i temperaturą niskich warstw atmosfery. Obserwowano znaczne różnice w przebiegu dobowym dla wartości promieniowania długofalowego na stacjach LCz i PZ. Stabilny przebieg wartości $L\downarrow$ na wierzchowinie świadczył o nieznacznych wahaniami temperatury atmosfery tak w nocy jak i w dzień 2.06.2008 r. (ryc. 2). Największe wypromieniowanie powierzchni czynnej rejestrowano w godzinach nocnych i południowych. Obserwowano również silny wpływ prędkości wiatru na wychładzanie powierzchni murawy. Najwyższe wartości $L\downarrow$ notowano w godzinach wieczornych, gdy prędkość wiatru spadała do $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Suma nocna $L\downarrow$ była wyższa na dnie niż notowana na wierzchowinie o $0,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ tak w czasie zimowej jak i czerwcowej nocy (ryc. 3, 5). Natomiast natężenie $L\uparrow$ było takie samo na stacji LCz jak na stacji PZ w czasie zimowego dnia i o $0,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ większe czerwcowej nocy.

Na dnie Doliny Prądnika promieniowanie $L\downarrow$ było stabilne nocą w omawianych dniach (ryc. 2, 4), co mogło być związane z ciszą lub wiatrem nie przekraczającym prędkości $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a to z kolei pozwalało na kształtowanie się i zaleganie mgieł. Duży wzrost strumienia $K\downarrow$ obserwowano w momencie pojawienia się Słońca nad horyzontem, aż do wartości przekraczającej $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Natomiast strumień $L\uparrow$ wzrastał do wartości $485 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ popołudniu co było związane z nagrzewającą się powierzchnią murawy latem i małą prędkością wiatru (ryc. 7). W tym samym dniu maksimum $L\uparrow$ wystąpiło w PZ o godz. 8.00 wynosząc $505 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tylko w godzinach okołopołudniowych strumień $L\uparrow$ przyjmował wyższe wartości niż analogiczny strumień powierzchni wierzchowiny. Natomiast w czasie zimowego pogodnego dnia strumień $L\uparrow$ miał niższe wartości w wąwozie krasowym niż na wierzchowinie. Stwierdzono to również obliczając sumę dobową dla obu stacji. W analizie struktury bilansu promieniowania zwracała uwagę wyższa suma $L\downarrow$ na stacji PZ o $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ niż suma dobowa na wierzchowinie (ryc. 3). Mogło to być związane z nagrzanymi zboczami głębokiego kanionu krasowego w którym została ustawiona stacja PZ oraz wilgotnym powietrzem lub zamgleniem ograniczającym wypromieniowanie powierzchni.

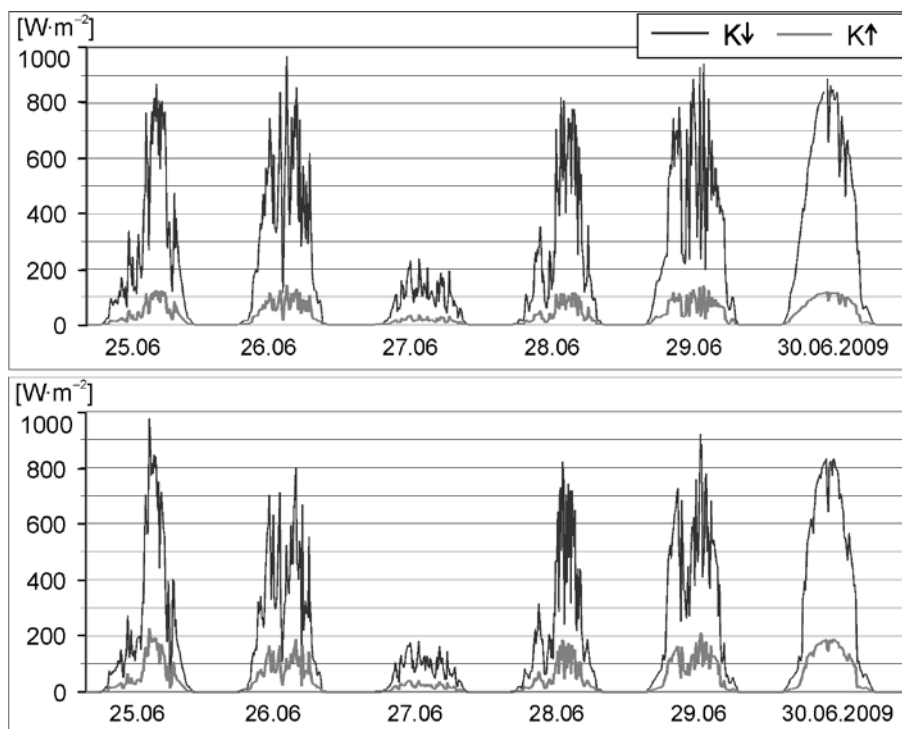


Ryc. 8. Przebieg strumieni K_{\downarrow} i K_{\uparrow} w dniach 12–17.01.2009 r. na stacji Lepianka Czajowska na wierzchowinie (w górze) i Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (w dole)

Fig. 8. Course of K_{\downarrow} and K_{\uparrow} fluxes during the days 12–17.01.2009 at the stations Lepianka Czajowska in the plateau (top) and Park Zamkowy in the Prądnik Valley (bottom)

Promieniowanie efektywne – saldo promieniowania długofalowego

Promieniowanie efektywne (L^*) było obliczane jako różnica między wypromieniowaniem Ziemi a promieniowaniem atmosfery (ryc. 3, 5). Duża wartość strumieni promieniowania długofalowego w wyniku bilansowania zmniejszała się i saldo dzienne L^*_d wynosiło $1,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla stacji LCz i PZ zimowego dnia (30.12.2008 r.) i analogicznie $-7,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $-6,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla dnia w czasie lata (02.06.2008 r.). Ujemne wartości salda L^* wskazywały na wychładzanie powierzchni Ziemi w okresie pomiarów. Obserwowano silne zróżnicowanie w przebiegu dobowym L^* dla różnych powierzchni. W przebiegu tym największe straty ciepła przypadły na godziny poranne i wieczorne na wierzchowinie. Odmienne kształtowało się saldo L^* dla powierzchni trawiastej, gdzie notowano duże amplitudy ($80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) i niskie wartości w dzień. Natężenie tego salda zależało przede wszystkim od stopnia pokrycia roślinnością, która mocno ograniczała nagrzewanie gleby. Powierzchnia czynna traciła więcej ciepła w wyniku wypromieniowania niż zyskiwała w postaci L_{\downarrow} . Przy bezchmurnej pogodzie i małych prędkościach wiatru występowały największe zróżnicowania wymiany energii między atmosferą a podłożem. W czasie zimowego dnia 30.12.2009 niskie wartości L^* notowano dla godzin wieczornych i nocnych na wierzchowinie (ryc. 4). W tym samym czasie analogiczne wartości salda L^* były o $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ mniejsze na dnie



Ryc. 9. Przebieg strumieni K_{\downarrow} i K_{\uparrow} w dniach 25–30.06.2009 r. na stacji Lepianka Czajowska na wierzcholinie (w górze) i Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (w dole)

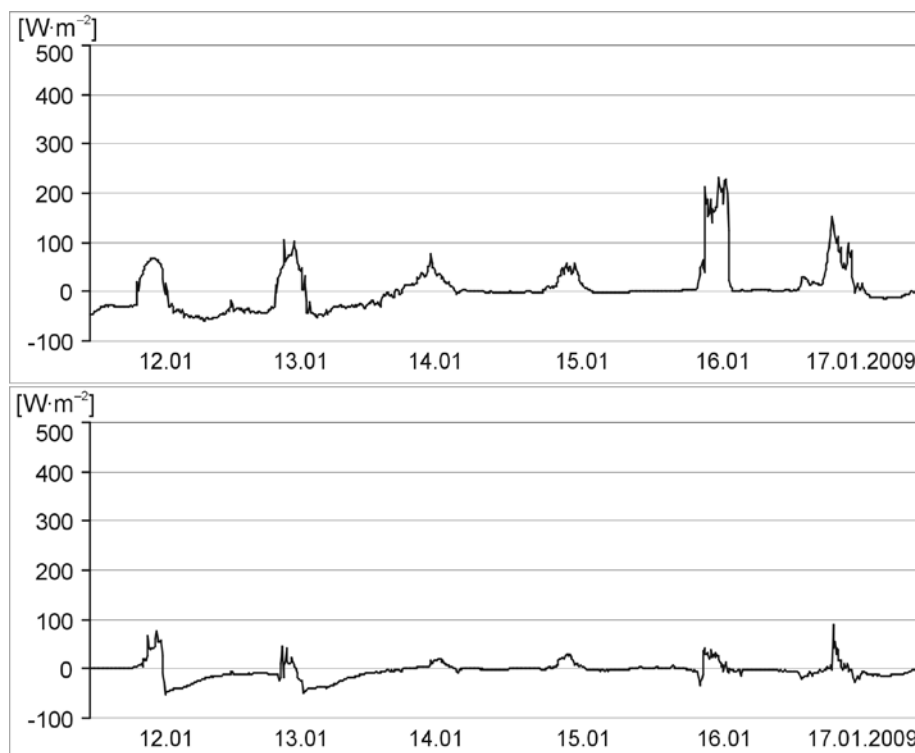
Fig. 9. Course of K_{\downarrow} and K_{\uparrow} fluxes during the days 25–30.06.2009 at the stations Lepianka Czajowska in the plateau (top) and Park Zamkowy in the Prądnik Valley (bottom)

doliny. Mogło to być związane z wyższą wilgotnością (90%), której towarzyszyły mgły i zamglenia, gdy w czasie tej pogodnej nocy notowano około 70% wilgotności względnej na wierzcholinie. Podobną sytuację obserwowano w pogodny dzień czerwca (ryc. 2), gdy w godzinach porannych duża wilgotność w Dolinie Prądnika (95%) ograniczała wypromieniowanie murawy w zakresie długofalowym.

Struktura bilansu promieniowania w pełnym zakresie widma

Dzienne saldo promieniowania w pełnym zakresie widma (Q_{d}^*) zostało obliczone jako suma K^* i L_{d}^* . Dla pogodnego dnia 2.06.2009 r. saldo Q_{d}^* było wyższe o $2,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ niż analogiczne saldo Doliny Prądnika (ryc. 3). Różnica ta była mniejsza w czasie zimowego dnia (30.12.2009 r.) i wynosiła $1,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Nocne saldo Q_{n}^* obliczane było tylko w zakresie długofalowym, gdyż nie występowało promieniowanie krótkofalowe. Obserwowano duże różnice salda pomiędzy wierzchołną a dnem w ciągu całego roku. Suma Q_{n}^* była o $0,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ większa dla stacji LCz niż PZ w czasie zimowej nocy i o $0,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ podczas czerwcowej nocy (ryc. 3, 5).

Saldo promieniowania w pełnym zakresie widma zostało obliczone jako suma K^* i L^* . Wartości salda Q^* w Dolinie Prądnika różniły się znacznie od wartości Q^* obliczonych dla wierzchołny (ryc. 2, 4). W nocy notowano ujemne wartości Q^* znacząco niższe na

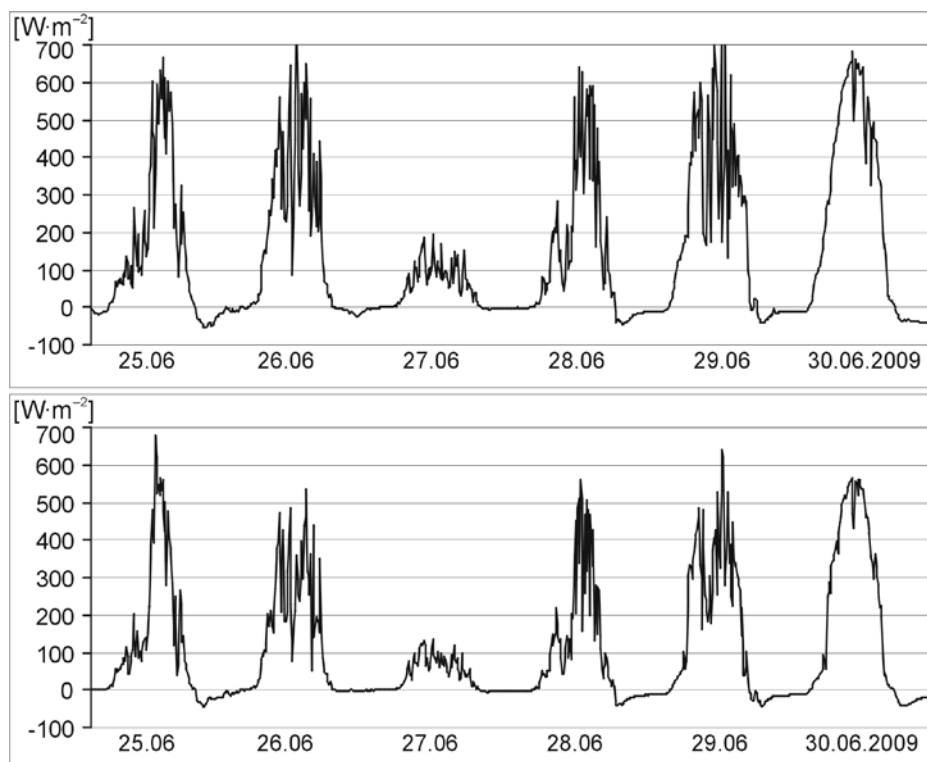


Ryc. 10. Przebieg salda promieniowania w pełnym zakresie widma na stacji Lepianka Czajowska na wierzchowinie (w górze) i Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (w dole) w okresie 12–17.01.2009 r.

Fig. 10. Course of net radiation balance in full spectral range at the stations Lepianka Czajowska in the plateau (top) and Park Zamkowy in the Prądnik Valley (bottom) in the period of 12–17.01.2009

wierzchowinie ($-100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) niż w dniu ($-30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), w dzień wyraźnie zaznaczał się wpływ ukształtowania terenu (ryc. 7). W czasie zimowego dnia różnice te były mniejsze i widoczne tylko w czasie krótkiego dnia 30.12.2008 r. Maksymalną wartość salda Q^* notowano w czasie górowania Słońca i wyniosła ona $642 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dla stacji LCz i $582 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dla stacji PZ w dniu 2.06.2009 r. Natomiast zimą wartości maksymalne Q^* notowano odpowiednio $308 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ i $143 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (maksymalna wartość wystąpiła po ustąpieniu porannych mgieł na stacji PZ).

Obliczając sumę salda Q^* dla całej doby stwierdzono wartość $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na wierzchowinie i ujemną $-0,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na dnie Doliny Prądnika w dniu 30.12.2009 r. Przyczyną silnego wychładzania dna było ograniczone natężenie K_{\downarrow} o $2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ co stanowiło 66,6% wartości notowanej na stacji PZ. Ograniczenie to spowodowane było przez strome zbocza wąwozu krasowego w stosunku do otwartych terenów OPN w czasie krótkiego zimowego dnia (8,5 godz.), jak również wysoką wilgotnością występującą na dnie wąwozu. Wysokie wartości salda Q^* (ryc. 3, 5) w dniu 2.06.2009 r. świadczą o silnym nagrzewaniu powierzchni



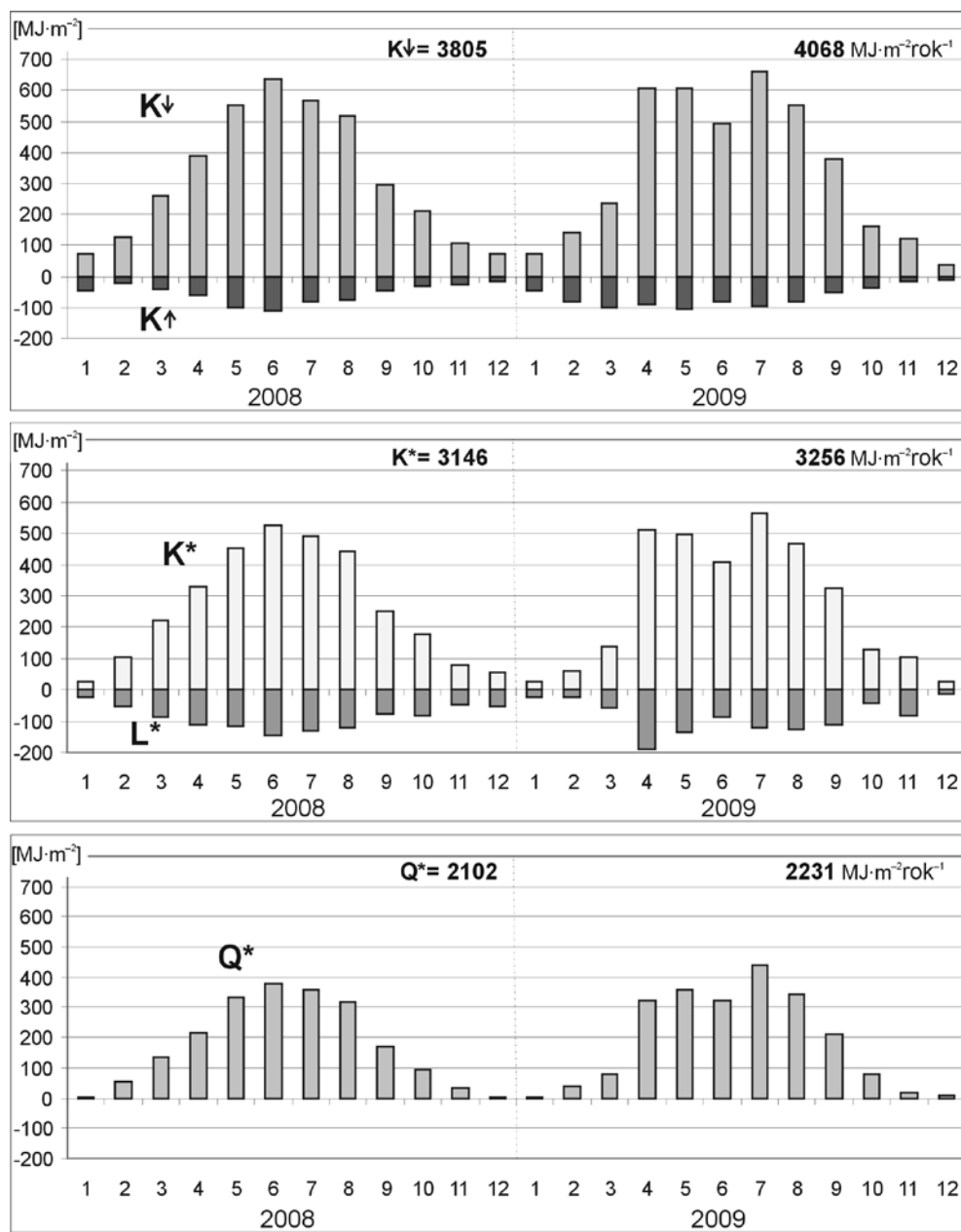
Ryc. 11. Przebieg salda promieniowania w pełnym zakresie widma na stacji Lepianka Czajowska na wierzchowinie (w górze) i Park Zamkowy w Dolinie Prądnika (w dole) w okresie 25–30.06.2009 r.

Fig. 11. Course of net radiation balance in full spectral range at the stations Lepianka Czajowska in the plateau (top) and Park Zamkowy in the Prądnik Valley (bottom) in the period of 25–30.06.2009

w ciągu długiego dnia 2.06.2009 r. (13,5 godz.). Dobowa suma salda Q^* wyniosła $14,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na terenie otwartym i była większa o $1,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ niż na dnie wąwozu krasowego dla omawianego pogodnego dnia czerwca.

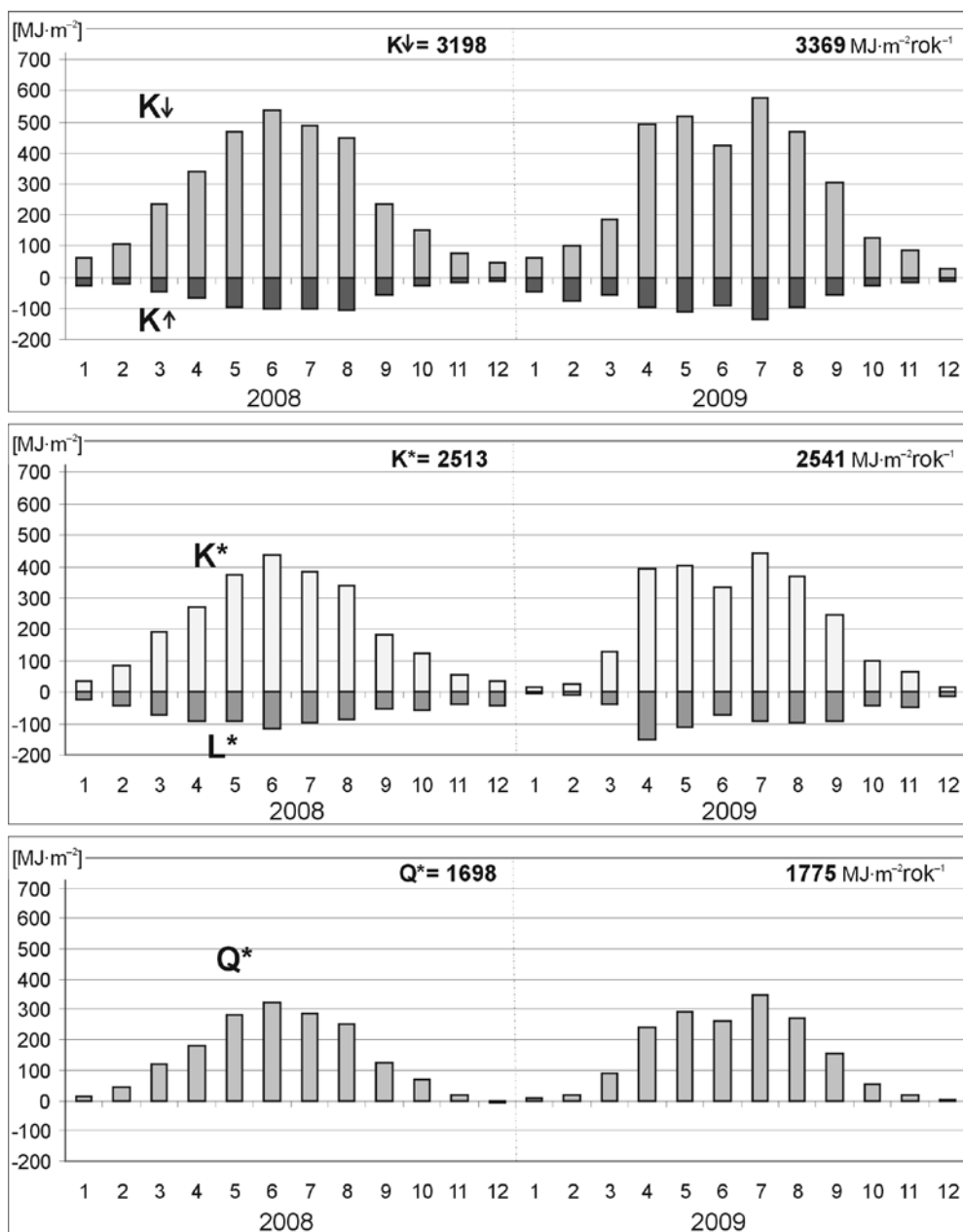
Przebieg salda w pełnym zakresie widma w dniach 12–17.01.2009 r. na stacji LCz ilustruje wymianę energii w postaci promieniowania między atmosferą a nieosłoniętą powierzchnią czynną na wierzchowinie OPN (ryc. 10). Saldo Q^* przyjmowało dodatnie wartości w pogodne dni 12 i 13.01.2009 r. oraz ujemne w czasie pogodnych nocy. W te dni wyraźnie widać ograniczone ramiona paraboli Q^* w wąskim kanionie krasowym (PZ). Dni z całkowitym zachmurzeniem 14 i 15 stycznia ilustrują przebieg Q^* o niewielkim zróżnicowaniu dla stacji LCz i PZ. Następane dni (16–17.01.2009) o zmiennym zachmurzeniu, dużej wilgotności i występujących mgłach i zamgleniach charakteryzowały się dużym zróżnicowaniem i ograniczeniami w wymianie promieniowania w pełnym zakresie widma między atmosferą a powierzchnią czynną dna wąwozu krasowego.

W okresie lata, gdy Słońce wysoko znajdowało się nad horyzontem saldo Q^* przyjmowało najwyższą wartość w ciągu roku ($755 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Przebieg Q^* w dniach 25–30.06.2009 r. na stacji LCz charakteryzował się intensywną wymianą energii między nieosłoniętą atmosferą i murawą na wierzchowinie (ryc. 11). Zmienne zachmurzenie występowało w czasie dni 25 i 26 czerwca



Ryc. 12. Sumy miesięczne K_{\downarrow} , K_{\uparrow} , K^* , L^* i Q^* na stacji Lepianka Czajowska w latach 2008–2009. U góry wykresów podano wartości sum rocznych K_{\downarrow} , K^* i Q^* dla 2008 i 2009 r.

Fig. 12. Monthly totals of K_{\downarrow} , K_{\uparrow} , K^* , L^* and Q^* at the station Lepianka Czajowska in 2008–2009. Annual totals of K_{\downarrow} , K^* and Q^* in 2008 and 2009 are on the top of graphs



Ryc. 13. Sumy miesięczne K_{\downarrow} , K_{\uparrow} , K^* , L^* i Q^* na stacji Park Zamkowy w latach 2008–2009. U góry wykresów podano wartości sum rocznych K_{\downarrow} , K_{\uparrow} , K^* i Q^* dla 2008 i 2009 r.

Fig. 13. Monthly totals of K_{\downarrow} , K_{\uparrow} , K^* , L^* and Q^* at the station Park Zamkowy in 2008–2009. Annual totals of K_{\downarrow} , K_{\uparrow} and Q^* in 2008 and 2009 are on the top of graphs

2009 r. Całkowite zachmurzenie wystąpiło w dniu 27.06.2009 r., gdy tylko promieniowanie rozproszone i zwrotne atmosfery docierało do powierzchni czynnej OPN. W tym dniu obserwowano mniejsze wartości salda Q^* średnio o $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w wąwozie niż na wierzchowinie, związane było to z wysoką wilgotnością, mgłą i opadem atmosferycznym. Przebieg Q^* w czasie pogodnego dnia (30.06.2009 r.) był zgodny z ruchem Słońca (wystąpiło tylko chwilowe zachmurzenie mające większe znaczenie na wierzchowinie). W tym dniu wyraźnie zaznaczał się wpływ zboczy kanionu krasowego na przebieg salda Q^* w godzinach porannych i wieczornych. W czasie dni pogodnych i o zmiennym zachmurzeniu obserwowano silne wychładzanie powierzchni w nocy a szczególnie intensywne w godzinach wieczornych dochodzące nawet do $-55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

W ciągu roku wyróżniały się miesiące wiosenne i w okresie lata gdy do powierzchni czynnej OPN docierało najwięcej energii słonecznej w postaci strumienia $K\downarrow$ (ryc. 12, 13). Otwarta przestrzeń wierzchowiny dostała w sumie rocznej $K\downarrow$ 3805 i 4068 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ odpowiednio w 2008 i 2009 r. W tym samym czasie głęboki kanion krasowy otrzymał część natężenia $K\downarrow$ o wartości 3198 i 3369 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, co stanowiło 84% wartości notowanych na stacji LCz. Część $K\downarrow$ odbijała się od powierzchni czynnej a część była pochłaniana co wyrażało K^* . Saldo K^* przyjmowało stosunkowo duże wartości dla wierzchowiny zmierzone na powierzchni murawy: 3146 i 3256 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ odpowiednio w 2008 i 2009 r. W tym samym czasie zmierzono analogiczne wartości 2513 i 2541 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla murawy na dnie wąwozu krasowego, co stanowiło około 79% wartości zarejestrowanej na wierzchowinie. Następnie nagrzana powierzchnia wypromieniowywała w zakresie długofalowym w kierunku atmosfery, ubytek tej energii wyrażało saldo L^* . Saldo to było zmienne w ciągu roku, duże wartości notowano latem i niskie zimą. Wyjątkowo duża suma miesięczna L^* o wartości $-191 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ została zarejestrowana na stacji LCz dla kwietnia 2009 r. Również duże natężenie L^* odnotowano na stacji PZ ($-151 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) było to związane z wyjątkowo pogodnym kwietniem w 2009 r. o średniej temperaturze $11,3^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej 55%, gdy w tym samym miesiącu analogiczne wartości wynosiły $8,3^\circ\text{C}$ i 65% dla 2008 r.

Suma salda w pełnym zakresie widma Q^* osiągnęła – w sumie miesięcznej – największą wartość w czerwcu 2008 r. ($381 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) oraz w lipcu 2009 r. ($442 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) na stacji LCz. Najniższe wartości obserwowano w styczniu i grudniu, natomiast sumy roczne dla lat 2008 i 2009 wyniosły odpowiednio $2102 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $2231 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Na stacji PZ obliczono mniejsze wartości Q^* ze względu na ograniczony dopływ energii słonecznej szczególnie w czasie pogodnych dni. Najwyższe wartości notowano podobnie jak na stacji LCz

Tabela 1. Sumy miesięczne składników bilansu promieniowania [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na stacji Lepianka Czajowska na wierzchowinie w latach 2008–2009

Table 1. Mounth total of elements of net radiation [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] at Lepianka Czajowska station in the plateau in the years 2008–2009

Składnik-Miesiąc Element-Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rok Yaer
$K\downarrow$	75	135	248	497	580	563	616	534	338	185	112	54	3937
$K\uparrow$	48	53	70	76	105	97	88	80	49	34	22	15	735
$L\downarrow$	762	709	726	765	881	916	971	952	880	870	794	623	9850
$L\uparrow$	785	749	795	915	1009	1031	1098	1075	977	933	859	657	10886
K^*	26	82	179	420	475	467	528	454	288	152	91	39	3201
L^*	-23	-38	-71	-151	-128	-115	-127	-123	-97	-63	-65	-34	-1034
Q^*	3	44	108	270	348	352	400	331	192	89	26	5	2166

Tabela 2. Sumy miesięczne składników bilansu promieniowania [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na stacji Park Zamkowy w latach 2008–2009Table 2. Mounth total of elements of net radiation [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] at Park Zamkowy station in the plateau in the years 2008–2009

Składnik·Miesiąc Element·Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rok Yaer
$K\downarrow$	63	105	211	415	494	481	532	458	269	138	80	38	3284
$K\uparrow$	37	49	51	82	106	95	119	103	55	27	19	13	756
$L\downarrow$	791	734	806	800	903	933	989	970	902	888	811	661	10196
$L\uparrow$	805	758	863	921	1005	1028	1083	1063	974	937	853	687	10987
K^*	26	56	159	333	388	386	413	354	215	111	61	25	2527
L^*	-15	-24	-57	-121	-102	-95	-95	-92	-73	-50	-42	-26	-791
Q^*	12	32	102	211	287	291	318	262	142	61	20	-2	1736
Udział procentowy (za 100% przyjęto natężenie promieniowania na stacji Lepianka Czajowska) Percentage 100% means radiation intensity at Lepianka Czajowska													
$K\downarrow$	84	78	85	83	85	85	86	86	80	74	71	71	83
$K\uparrow$	77	93	74	108	101	98	135	129	110	81	88	90	103
$L\downarrow$	104	104	111	105	102	102	102	102	102	102	102	106	104
$L\uparrow$	103	101	109	101	100	100	99	99	100	100	99	105	101
K^*	102	68	89	79	82	83	78	78	74	73	68	64	79
L^*	64	64	81	81	80	82	74	75	75	79	64	79	76
Q^*	395	71	95	78	83	83	80	79	74	69	77	-32	80

w czerwcu 2008 r. ($321 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) oraz w lipcu 2009 r. ($349 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Najniższe wartości wystąpiły w miesiącach zimowych informując o stracie energii z powierzchni czynnej w bilansie promieniowania. Sumy roczne salda Q^* dla lat 2008 i 2009 obliczono odpowiednio $1698 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $1775 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, co stanowiło około 80% wartości Q^* notowanego na stacji LCz.

Średnie miesięczne sumy składników bilansu promieniowania $K\downarrow$, $K\uparrow$, $L\downarrow$, $L\uparrow$ oraz salda promieniowania K^* , L^* , Q^* zmierzone w latach 2008–2009 przedstawiono w tabeli 1 i 2. W celu lepszego zobrazowania wpływu kanionu krasowego na wartości składników bilansu promieniowania dołączono do tabeli 2 procentowy udział wartości zmierzonej na stacji PZ (za 100% przyjęto wartości zmierzone na stacji LCz). Natężenie $K\downarrow$ było niższe podczas całego roku na dnie wąwozu niż na wierzchowinie, podobnie saldo K^* , jednakże wyższe w miesiącu styczniu. Przez cały okres pomiarowy obserwowano wyższe natężenie $L\downarrow$ i $L\uparrow$ na stacji PZ ze względu na promieniowanie długofalowe zboczy, dużą wilgotność w wąwozie i występujące mgły i zamglenia co było przyczyną wypromieniowania w zakresie długofalowym. Natomiast mniejsze wartości natężenia L^* wynikały z bilansowania wspomnianych strumieni na powierzchni czynnej dna wąwozu krasowego. Sumy sald Q^* były również niższe na stacji PZ niż zmierzone analogiczne wartości w LCz średnio o 80%. Wyjątek stanowi miesiąc styczeń, gdy w czasie pogodnych nocy więcej energii traściła powierzchnia czynna wierzchowiny (część bez pokrywy śnieżnej) co wyrażało się niższym o $3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ saldem Q^* niż powierzchnia na stacji PZ ($12 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Tabela 3. Promieniowanie K_{\downarrow} na powierzchnię poziomą 1) w Dolinie SĄspowskiej wg J. Kleina (1992), 2) średnie wymodelowane GIS dla obszaru OPN wg J. Wojkowskiego i Z. Caputy (w tym tomie) oraz zmierzone na wierzchowinie (LCz) i wąwozie krasowym (PZ)

Table 3. Total radiation K_{\downarrow} on a horizontal surface 1) in the SĄspowska Valley after J. Klein (1992), 2) GIS model mean in OPN after J. Wojkowski and Z. Caputa (in this volume) and measure at upland (LCz) and carst canyon (PZ)

Sezon – Period Lokalizacja Location	Wiosna – Spring				Lato – Summer				Jesień – Autumn				Zima – Winter			
	1)	2)	LCz	PZ	1)	2)	LCz	PZ	1)	2)	LCz	PZ	1)	2)	LCz	PZ
Suma K_{\downarrow} Total K_{\downarrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	772	1284	1324	1120	1077	1713	1713	1471	442	523	636	488	172	202	263	206
% rocznej sumy K_{\downarrow} % of total of the year	31,4	34,5	35,6	30,1	34,7	46,0	46,0	39,5	17,9	14,1	17,1	13,1	7,0	5,4	7,1	5,5

DYSKUSJA

Z badań przeprowadzonych w latach 1964–67 (Klein, 1974) i 1987–89 (Klein 1992) wynika, że zachmurzenie wyniosło około 63%. Średnie miesięczne wartości tego elementu klimatu wahały się od 37% w październiku 1988 r. do 90% w listopadzie 1987 r. Na podstawie badań J. Wojkowskiego i J. Partyki (zob. art. w tym tomie) średnie roczne zachmurzenie wyniosło 59% w okresie 1987–2009. Odwrotnie proporcjonalne do wielkości zachmurzenia było usłonecznienie, czyli liczba godzin ze słońcem. Jak wynika z danych dla lat 1987 i 1988 suma godzin ze słońcem wyniosła odpowiednio 1325 i 1363 co daje przeciętnie 3,63 i 3,72 godziny w ciągu dnia w Dolinie SĄspowskiej. Promieniowanie K_{\downarrow} osiągnęło – w sumie miesięcznej – największą wartość w czerwcu 1987 r. ($387,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) oraz w lipcu 1988 r. ($378,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Najniższe wartości obserwowano w grudniu, natomiast sumy roczne K_{\downarrow} dla lat 1987 i 1988 wyniosły odpowiednio $2444,1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $2481,3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Klein 1992). Były to wartości nieznacznie wyższe od sumy rocznej $2374,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ jaką obliczyła M. Mackiewicz (1954) dla omawianego terenu. Znacznie różnią się od wartości podanych w *Atlasie* (1994), gdzie K_{\downarrow} dla lipca w sumie miesięcznej wyniosło $543 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i dla całego roku $3650 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Natomiast saldo Q^* dla tego obszaru wyniosło odpowiednio $302 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $1278 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

Rozkład przestrzenny promieniowania na tym obszarze był bardzo urozmaicony co obserwujemy na mapie nasłonecznienia względnego sporządzonej metodą V. Strużki (Klein 1977) oraz wyznaczone metodami GIS zamieszczonymi w tym tomie przez autorów. Ilość promieniowania K_{\downarrow} dochodzącego do dna Doliny SĄspowskiej w poszczególnych sezonach przedstawiono w tabeli 3. Jak wynika z poniższego zestawienia w okresie lata (VI–VIII), płaskie dno otrzymało 34,7% rocznej sumy K_{\downarrow} . Natomiast do dna Doliny Prądnika dotarło 44,8% rocznej sumy K_{\downarrow} zmierzonej na stacji PZ a 83% analogicznej wartości dochodzącej do powierzchni wierzchowiny (LCz).

Dla obszaru na wierzchowinie, gdzie znajdowała się stacja LCz, J. Klein (1977) podaje nasłonecznienie względne (sporządzone metodą V. Strużki (1959) przy założeniu, że suma nasłonecznienia na powierzchnię poziomą wyniosła 100%) od 95 do 105% (dla dna nie podaje wartości ze względu na trudne do uchwycenia ocienienie przez zbocza). Stosując zaawansowane metody GIS autorzy obliczyli dla lokalizacji stacji LCz i PZ wartości rocznego usłonecznienia

Tabela 4. Niedobór promieniowania K_{\downarrow} dla stacji Park Zamkowy w Dolinie Prądnika dla wybranych dni pogodnych 1999 r. (Caputa, Leśniok 2001) i 2008–2009 r.Table 4. Deficiency of the total K_{\downarrow} at the Park Zamkowy in the Prądnik Valley during fine days 1999 after Caputa, Leśniok (2001) and 2008–2009

Dzień Day	Godziny – Hours		Suma K_{\downarrow} – Total K_{\downarrow}
	4.30–9.00 (2,5) K_{\downarrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	13.00–17.00 (3) K_{\downarrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]	4.30–9.00,13.00–17.00 (5,5) [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]
30.12.2009	-0,38	-0,17	-0,55
6.01.2009	-0,20	-0,10	-0,31
11.01.2009	-0,18	-0,31	-0,49
22.02.2009	-0,67	-1,08	-1,75
3.04.2008	-1,38	-1,54	-2,92
2.06.2009	-0,93	-2,13	-3,05
18.07.2009	-1,68	-0,26	-1,95
6.09.1999	-0,93	-1,50	-2,43
14.09.1999	-0,83	-1,52	-2,35

możliwego, odpowiednio 4293 godzin i 3132 godzin oraz rocznej sumy promieniowania K_{\downarrow} , odpowiednio $3804 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $3572 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Osobnego omówienia wymagają zbocza, gdzie dopływ energii głównie zależał od kąta padania promieni słonecznych. Dla przykładu południowe zbocza mogą otrzymywać trzy razy więcej energii niż zbocza północne, co również może być związane z mniejszym albedo południowych zboczy, wtedy bezpośrednie promieniowanie miało decydujący wpływ na wartość Q^* i kształtowanie się mikroklimatu zbocza (Oke, 1987).

Głębokie kaniony krasowe OPN otrzymywały mniej energii słonecznej co zostało zilustrowane przebiegami dziennymi promieniowania oraz przez zestawienie struktury dziennej i rocznej bilansu promieniowania w pełnym zakresie widma. Dodatkowo obliczono ową różnicę i wyrażono w wartościach, które nazwano niedoborem promieniowania K_{\downarrow} . Niedobór K_{\downarrow} sięgał maksymalnie $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla godzin porannych i $1,58 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ dla godzin popołudniowych dla jednego pogodnego dnia we wrześniu. Średnio dla całego dnia dno Doliny Prądnika otrzymywało o ponad $2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ mniej energii słonecznej niż wierzchożyna (Caputa 2001). Najmniejsze wartości tego wskaźnika notowano dla dni zimowych od 0,31 do $1,75 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 4). Najwyższe różnice w dostawie promieniowania słonecznego między wierzchożyną a dnem wąwozu krasowego stwierdzono dla pogodnych dni wiosny i lata o wartości nawet $3,05 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

Jak już wcześniej wspomniano zachmurzenie było ważnym czynnikiem procesów pogodowych i klimatycznych. Wpływało bezpośrednio na dopływ energii słonecznej w czasie dnia i straty w czasie nocy, jego zmienność i wielkość są podane w osobnym artykule w tym tomie. Ponadto rodzaj zachmurzenia zmieniał saldo Q^* czyli wartości salda były mniejsze o 30% w czasie dni o zmiennym zachmurzeniu w stosunku do dni pogodnych (Caputa 2001). Składniki bilansu promieniowania (K^* , L^*) przyjmowały bezwzględnie większe wartości dla powierzchni zaoranej na wierzchożynie niż trawiastej na dnie Doliny Prądnika, co świadczyło o dużej wymianie energii między atmosferą a powierzchnią czynną (Caputa, Leśniok 2001). Wyraźnie zaznaczały się dni pogodne w czasie ostatnich badań (ryc. 8, 9). Powierzchnia czynna na dnie wąwozu krasowego otrzymywała w dni bezchmurne więcej energii słonecznej niż wypromieniowywała w zakresie długofalowym, czego rezultatem było dodatnie saldo Q^* . Saldo Q^* decydowało o bilansie cieplnym i mikroklimacie przy powierzchniowej warstwy powietrza na obszarze OPN.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań w latach 2008–2009 i otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

- wielkość energii: promieniowania słonecznego krótkofalowego, promieniowania atmosfery do powierzchni Ziemi oraz wypromieniowania podłoża, warunkują takie czynniki jak: zachmurzenie, zmętnienie atmosfery, ukształtowanie terenu, struktura i pokrycie powierzchni,
- otwarta przestrzeń wierzchowiny dostała w sumie rocznej K_{\downarrow} o wartości 3805 i 4068 MJ·m⁻² odpowiednio w 2008 i 2009 roku. W tym samym czasie dno wąskiego kanionu krasowego otrzymało część strumienia K_{\downarrow} około 83% wartości zarejestrowanych na stacji LCz,
- suma roczna salda w pełnym zakresie widma osiągnęła wartości 2102 i 2231 MJ·m⁻² odpowiednio w 2008 i 2009 roku. Na stacji Park Zamkowy w Dolinie Prądnika notowano tylko 80% salda Q^* notowanego na stacji LCz na wierzchowinie,
- podstawową cechą, która w największym stopniu decydowała o strukturze bilansu promieniowania było zachmurzenie, zasłonięcie horyzontu przez zbocza oraz albedo powierzchni czynnej,
- dni pogodne charakteryzowały się dużą amplitudą wartości promieniowania słonecznego i zróżnicowaniem struktury bilansu promieniowania.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nr N306 044 32/3178.

PIŚMIENNICTWO

Atlas Rzeczypospolitej Polskiej. 1994. Mapa 31.2. Promieniowanie, temperatura powietrza. Wyd. Główny Geodeta Kraju. Warszawa.

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. Available Online: <http://www.ejpau.media.pl/volume11/issue3/art-03.html>

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., Leśniok M., 2001. *Pomiary bilansu promieniowania na terenie Ojcowskiego Parku Narodowego z wykorzystaniem automatycznych stacji meteorologicznych*, [w:] J. Partyka (red.), *Badania naukowe w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*. Ojców, s. 27–30.

Caputa Z., Leśniok M. 2002a. *Zróżnicowanie mikroklimatyczne w świetle bilansu promieniowania słonecznego na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muzeum Szafera”, **13**: 7–30.

Caputa Z., Leśniok M., 2002b. *Radiation balance in the area of Ojców National Park*, [w:] V.N. Andrejchuk, V.P. Korzhyk (red.) *Regional aspects of land use*. Kharkivski Politekhniczny Uniwersytet, Uniwersytet Śląski, Chernivtsy-Sosnowiec, s. 24–34.

Klein J. 1974. *Mezo- i mikroklimat Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Studia Naturae”, ser. A, **8**: 1–105.

Klein J. 1977. *Klimat*, [w:] K. Zabierowski (red.), *Przyroda Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Studia Naturae”, ser. B, **28**: 91–119.

Klein J. 1992. *Radiacyjne czynniki klimatu i parowanie w Ojcowskim Parku Narodowym (na przykładzie Doliny Sąpowskiej)*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, **5**: 29–34.

Mackiewicz M. 1954. *Rozkład przestrzenny insolacji w Polsce*. „Przegląd meteorologiczny i hydrologiczny”, **6**, 1–2: 5–15.

Oke T. R. 1987. *Boundary layer climates*. London – New York, s. 435.

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, s. 21–43.

Paszyński J., Miara K., Skoczek J. 1999. *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego*. „Dokumentacja Geograficzna” **14**, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN. Warszawa, ss. 127.

Wojkowski J., 2007. *Modelowanie składników bilansu promieniowania przy wykorzystaniu GIS oraz zobrazowań teledetekcyjnych*. „Pamiętnik Puławski”, **144**: 155–167.

SUMMARY

Based on actinometrical measurements using the differential CNR 1 net radiometer, analysis of the structure of radiation balance in full spectral range (Q^*) was made. Quantitative limitation of the solar radiation influx to the narrow karstic canyon for the selected clear days was presented. Differences in the structure of radiation balance at the grass surface between the open terrain of the plateau and the karstic canyon were shown. Daily course of radiation was presented as mean 10-minute values of radiation fluxes in $W\cdot m^{-2}$. Moreover, daily totals of radiation components expressed in $MJ\cdot m^{-2}$ were calculated. The radiation balance in full spectral range was described as the following equation:

$$Q^* = K^* + L^* \quad K^* = K\downarrow - K\uparrow; \quad L^* = L\downarrow - L\uparrow$$

The produced graphs of radiation course illustrate big differences in solar energy supply within the ONP, which was particularly noticeable in winter when the Sun's path over the horizon was low and, in addition, fogginess limited the total radiation (Fig. 4). On 30.12.2008, fog persisting up to 8.00 a.m. (2 hours after the sunrise) severely limited the income of energy to the surface of the plateau, and later fogginess modified partly the $K\downarrow$ flux in around midday hours. A much more serious limitation was observed in the Prądnik Valley where the daily total of $K\downarrow$ was by $2 MJ\cdot m^{-2}$ lower than in the plateau. Net radiation K^* reached the value of $3.4 MJ\cdot m^{-2}$ for the surface at the station LCz and $1.6 MJ\cdot m^{-2}$ for the Prądnik Valley (PZ) during a winter day (30.12.2008), whereas in summer daily totals of K^* were $24.3 MJ\cdot m^{-2}$ and $20.6 MJ\cdot m^{-2}$, respectively, for a clear day (2.06.2008). Because of a similar albedo for both measurement points, the differences in net radiation K^* were connected with the horizon obstruction and heavy fogginess during a winter day.

Differences in solar radiation influx between the unshadowed plateau and the valley floor are hatched in Figure 6. The calculations of $K\downarrow$ intensity difference between the valley and the plateau during given hours showed a negative value which was termed a solar energy deficit for the valley floor. The calculations were made for morning hours, from the sunrise up to the time when the valley $K\downarrow$ was close to the $K\downarrow$ of the plateau. The deficit of $K\downarrow$ radiation reached $1.24 MJ\cdot m^{-2}$ maximally for morning hours and $2.41 MJ\cdot m^{-2}$ for afternoon hours for one clear day in June. On average, during the whole clear summer day the valley received over $2 MJ\cdot m^{-2}$ less radiant energy than the plateau.

Net radiation balance in full spectral range (Q^*) was calculated as the sum of K^* and L^* fluxes, and the intensity as the net radiation sum during the whole day. The values of Q^* flux course in the valley differ considerably from the values calculated for the

plateau. The calculations of Q^* net radiation sum for the whole day made on 30.12.2009 showed the value of $0.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ at the station in the plateau, and negative values $-0.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ at the station located at the Prądnik Valley floor. Severe cooling of the valley floor resulted from the decreased by $2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ $K\downarrow$ intensity value, which makes 66.6% of the value recorded at the PZ station. This limitation was caused by the steep, compared to the open terrain of the ONP, slopes of the karstic ravine, as well as high humidity at the ravine floor during the short winter day (8.5 hours). High values of net radiation balance Q^* (Fig. 3, 5) calculated for 2.06.2009 indicate that during that long day (13.5 hours) the surface was intensively heated. On the discussed clear day of June, daily total of Q^* was by $1.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ higher in the open terrain than at the ravine floor.

The annual structure of radiation balance was calculated and presented. Based on this, it was found that the open space of the plateau received the annual totals of $3805 K\downarrow$ and $4068 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in 2008 and 2009, respectively. At the same time the narrow karstic canyon received part of the $K\downarrow$ flux, i.e. 84% of the values recorded at the LCz station. The annual totals of net radiation balance in full spectral range Q^* were 2102 and 2231 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ in 2008 and 2009, respectively. The values recorded in the narrow karstic canyon at the station Park Zamkowy reached only 80% of the net radiation balance Q^* calculated for the station in the plateau.