

Prądnik. Prace Muz. Szafera	19	169–180	2009
-----------------------------	----	---------	------

JAKUB WOJKOWSKI¹, ZBIGNIEW CAPUTA²

¹Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza
Al. Mickiewicza 24/28, 30–059 Kraków

²Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Klimatologii
ul. Będzińska 60, 41–200 Sosnowiec

**PRZESTRZENNE I CZASOWE
ZRÓŻNICOWANIE PROMIENIOWANIA POCHŁONIĘTEGO
NA OBSZARZE OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO**

**Spatial and temporal variation in absorbed radiation
in the Ojców National Park**

ABSTRACT. The classification of the surface of the ONP and the calculations of total and reflected radiation and albedo concerning selected surfaces were made using GIS tools. The analysis allowed working out maps of spatial distribution of the above components in the ONP. The results were compared with measurements made on the grass-covered surface using CNR1 Kipp&Zonen, which were taken in the ONP at two points, in the open terrain of the plateau and at the floor of the karstic ravine.

KEY WORDS: total radiation, reflected radiation, absorbed solar radiation, albedo, topoclimate, GIS, ONP

WSTĘP

Promieniowanie słoneczne pochłonięte przez powierzchnię Ziemi (K^*), czyli saldo promieniowania krótkofalowego, jest różnicą między całkowitym promieniowaniem słonecznym ($K\downarrow$), a promieniowaniem odbitym ($K\uparrow$). Odgrywa ono zasadniczą rolę w kształtowaniu warunków klimatycznych danego obszaru, gdyż wpływa na bilans energetyczny, a przez to na stosunki termiczne i wilgotnościowe przypowierzchniowych warstw atmosfery i jej podłoża (Paszyński i in. 1999). Z tych względów bardzo ważne w badaniach klimatycznych było poznanie składników bilansu promieniowania powierzchni czynnej oraz jego struktury.

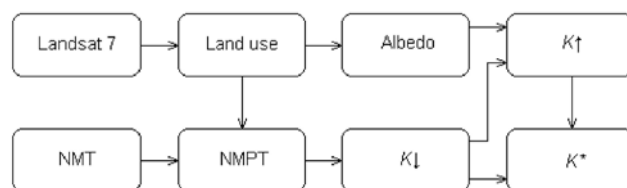
Badania składników bilansu promieniowania w Ojcowskim Parku Narodowym (OPN) zapoczątkował J. Klein. Pierwsze pomiary aktynometryczne dotyczyły jedynie rejestracji usłonecznienia i przeprowadzone zostały na dachu budynku „Pod Berłem” w Ojcowie w 1966 r. (Klein 1974), a następnie w latach 1987–1988 na dnie Doliny Sąpowskiej (Klein 1992). Kilkudniowe pomiary promieniowania w pełnym zakresie widma wykonane zostały w 1999 roku na wierzchołku w Lepiance Czajowskiej oraz na dnie Doliny Prądnika w Parku Zamkowym. Celem tych badań było poznanie struktury bilansu promieniowania i jego zmian dla różnej

wysokości, podłoża i ukształtowania terenu (Caputa 2001; Caputa, Leśniok 2001, 2002a, b). Pierwszą analizą przestrzennego zróżnicowania składników bilansu promieniowania w OPN były badania przeprowadzone w oparciu o numeryczny model terenu i zdjęcia satelitarne. Na ich podstawie sporządzono dla OPN mapy przedstawiające przestrzenny rozkład promieniowania K_{\downarrow} (Wojkowski 2006), salda K^* i L^* oraz bilansu promieniowania w pełnym zakresie widma (Wojkowski 2007).

Celem niniejszych badań było poznanie wielkości promieniowania K^* w przebiegu rocznym oraz sporządzenie mapy jego rozkładu przestrzennego na obszarze OPN.

METODA BADAŃ

Do przeprowadzenia analizy przestrzennego zróżnicowania K^* na obszarze OPN posłużono się numerycznym modelem terenu – NMT (WODGiK) oraz wysokorozdzielczymi wielospektralnymi zdjęciami satelitarnymi Landsat 7. Schemat czynności zmierzających do obliczenia promieniowania pochłoniętego przedstawiono na rycinie 1.



Ryc. 1. Algorytm obliczania promieniowania pochłoniętego K^*

Fig. 1. Algorithm of absorbed solar radiation K^* calculating

Pierwszy etap prac polegał na sporządzeniu dla obszaru OPN mapy pokrycia i użytkowania terenu (*Land use*). W tym celu skorzystano ze zdjęć satelitarnych Landsat 7, które poddano klasyfikacji nadzorowanej. Klasyfikacja to proces przypisywania pikseli do klas pokrycia terenu, na podstawie ich wartości w poszczególnych kanałach spektralnych. Przekształca ona zdjęcie satelitarne w mapę tematyczną. W klasyfikacji nadzorowanej (wzorcowej), najpierw wyznaczono wzorce spektralne, które opisują sposób, w jaki obiekty danej klasy pokrycia terenu odbijają promieniowanie w poszczególnych kanałach zdjęcia. Wzorec taki opisano przez statystykę odpowiedzi spektralnych (np. średnie wartości odbicia, odchylenie standardowe itp.). Wzorce wyliczane były przez program na podstawie pól treningowych, rysowanych z kolei przez użytkownika w miejscach o znanym pokryciu terenu – najlepiej na podstawie danych z badań terenowych. Podczas procesu klasyfikacji każdy piksel zdjęcia porównywany był do wyznaczonych wzorców w oparciu o zadaną regułę decyzyjną (algorytm), a następnie przypisywany do tej klasy, do której sygnatury był najbardziej podobny (ERDAS Field Guide 1998). Sporządzając w powyższy sposób mapę pokrycia i użytkowania wydzielono na obszarze badań 7 klas: zabudowę, użytki zielone, pola uprawne, las liściasty, las iglasty, las mieszany i wody (ryc. 2). Procentowy udział powierzchni poszczególnych klas pokrycia i użytkowania w całkowitej powierzchni badanego obszaru przedstawiono w tabeli 1.

Następnie, dokonano oceny zdolności odbijania promieniowania słonecznego od powierzchni czynnej. W tym celu również posłużono się zdjęciami satelitarnymi Landsat 7. Do obliczenia wartości albedo wykorzystano promieniowanie zarejestrowane przez

Tabela 1. Udział powierzchni poszczególnych klas pokrycia w całkowitej powierzchni badanego obszaru
 Table 1. The percentage of land use and land cover surface classes in the whole study area

Klasy pokrycia i użytkowania Land cover and land use class	% pokrycia
Zwarta zabudowa – Compact settlement	6,15
Użytki zielone – Grassland	16,13
Pola uprawne – Cultivated fields	45,02
Las liściasty – Broadleaved forest	13,71
Las iglasty – Coniferous forest	4,12
Las mieszany – Mixed forest	14,55
Zbiorniki wodne – Water bodies	0,32
Suma – Total	100,00

skaner ETM+ w kanale panchromatycznym z rozdzielczością przestrzenną 15 m·piksel⁻¹ i obejmującym część zakresu widzialnego i podczerwieni w przedziale długości fal od 0,52 do 0,90 μm (Irish 2000).

Przeanalizowano 35 zdjęć satelitarnych z okresu od 09.08.1999 do 21.09.2009 na podstawie których wyznaczono w przebiegu rocznym wartości miesięczne albedo dla poszczególnych klas pokrycia i użytkowania obszaru OPN. Dla miesięcy zimowych wartość α uzależniono od czasu zalegania pokrywy śnieżnej (tab. 2) i obliczano ją zgodnie z poniższym równaniem:

$$\alpha_m = \alpha_{ps} \frac{LD_{ps}}{LD_m} + \alpha_{bs} \frac{LD_{bs}}{LD_m}$$

gdzie:

α_m – średnia miesięczna wartość α dla danego miesiąca

α_{ps} – wartość α w danym miesiącu odczytana ze zdjęć satelitarnych na których zarejestrowana została pokrywa śnieżna

α_{bs} – wartość α w danym miesiącu odczytana ze zdjęć satelitarnych na których nie występowała pokrywa śnieżna

LD_{ps} – średnia liczba dni z pokrywą śnieżną w danym miesiącu

LD_{bs} – średnia liczba dni bez pokrywy śnieżnej w danym miesiącu

LD_m – liczba dni w danym miesiącu.

Tabela 2. Średnia liczba dni zalegania pokrywy śnieżnej LD_{ps} na stacji PZ w Ojcowie (1991–2006)

Tabela 2. Mean number of days with snow cover LD_{ps} in PZ station in Ojców (1991–2006)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
20	18	12	2	0	0	0	0	0	0	5	15	73

Wyznaczone α dla różnych klas powierzchni w poszczególnych miesiącach było podstawą do obliczenia średniej ważonej wartości α w przebiegu rocznym dla całego badanego obszaru (średnia obszarowa) (tab. 3).

$$\alpha_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

gdzie:

α_{sr} – średnia obszarowa wartość α dla OPN

α_i – wartość α dla danej klasy pokrycia i użytkowania OPN

P_i – powierzchnia danej klasy pokrycia i użytkowania OPN.

Wyniki analiz spektralnych zdjęć satelitarnych oraz powyższych obliczeń przedstawione zostały w tabeli 3.

Tabela 3. Średnie miesięczne wartości α w poszczególnych klasach pokrycia i użytkowania powierzchni OPN na podstawie zdjęć satelitarnych

Table 3. Mean monthly values of albedo (α) of particular land use and land cover surface classes in the ONP based on satellite images

Klasy pokrycia i użytkowania Land cover and land use class	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Zwarta zabudowa Compact settlement	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13
Użytki zielone Grassland	0,31	0,30	0,24	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	0,18	0,16	0,17	0,26	0,21
Pola uprawne Cultivated fields	0,31	0,31	0,24	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,19	0,17	0,18	0,26	0,22
Las liściasty Broadleaved forest	0,10	0,10	0,09	0,12	0,14	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,12	0,09	0,13
Las iglasty Coniferous forest	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,11
Las mieszany Mixed forest	0,11	0,11	0,10	0,12	0,13	0,15	0,15	0,15	0,14	0,12	0,10	0,10	0,12
Zbiorniki wodne Water bodies	0,19	0,19	0,15	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,16	0,11
α_{sr}	0,23	0,23	0,19	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,17	0,15	0,15	0,20	0,18

Średnie miesięczne wartości α przypisane zostały wydzielonym klasom mapy pokrycia i użytkowania (ryc. 2). Uzyskano w ten sposób przestrzenny rozkład α na obszarze OPN w poszczególnych miesiącach oraz w skali całego roku z rozdzielczością przestrzenną 15 m·piksel⁻¹ (ryc. 3).

Następnym etapem pracy było przekształcenie NMT do numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) przedstawiającego rzeźbę terenu wraz ze znajdującymi się na nim geometrycznymi obiektami naturalnymi i sztucznymi takimi jak lasy czy zabudowa. W tym celu wykorzystano sporządzoną wcześniej mapę pokrycia i użytkowania (ryc. 2) przyjmując dla zwartych obszarów leśnych, uśrednioną wysokość górnej powierzchni koron drzew, a dla terenów zabudowanych średnią wysokość zabudowy. Uzyskany w ten sposób NMPT można uznać za powierzchnię czynną, do której dociera całkowite promieniowanie słoneczne K_{\downarrow} .

Kolejnym etapem pracy było wymodelowanie rozkładu przestrzennego dopływu całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze OPN. W obliczeniach strumienia K_{\downarrow} posłużono się algorytmem zaproponowanym przez P. Rich'a (1994). Algorytm ten

oparty jest na prawie Bouguera opisującym ekstynkcję promieniowania w atmosferze i wykorzystuje NMPT, z którego obliczane są elementy topografii takie jak zasłonięcie horyzontu, ekspozycje, spadki i wysokości względne. Modelowanie dopływu promieniowania wykonano dla poszczególnych miesięcy roku. Na ich podstawie obliczono roczną sumę K_{\downarrow} z rozdzielczością przestrzenną $20 \text{ m} \cdot \text{piksel}^{-1}$ (zob. ryc. 1 z art. o modelowaniu dopływu promieniowania słonecznego w tym tomie).

Na podstawie wyznaczonego α (ryc. 3) oraz wymodelowanego strumienia K_{\downarrow} , policzona została wartość promieniowania słonecznego odbitego od powierzchni czynnej K_{\uparrow} zgodnie z poniższym równaniem:

$$K_{\uparrow} = \alpha \cdot K_{\downarrow}$$

Wszystkie analizy przestrzenne i spektralne oraz obliczenie rozkładu K_{\downarrow} , α , K_{\uparrow} i K^* wykonano przy użyciu narzędzi GIS. Badaniami objęto obszar OPN wraz z otuliną o rozciągłości południkowej pomiędzy $50^{\circ}09'06''\text{N}$ i $50^{\circ}15'27''\text{N}$ oraz rozciągłości równoleżnikowej pomiędzy $19^{\circ}44'45''\text{E}$ i $19^{\circ}53'26''\text{E}$.

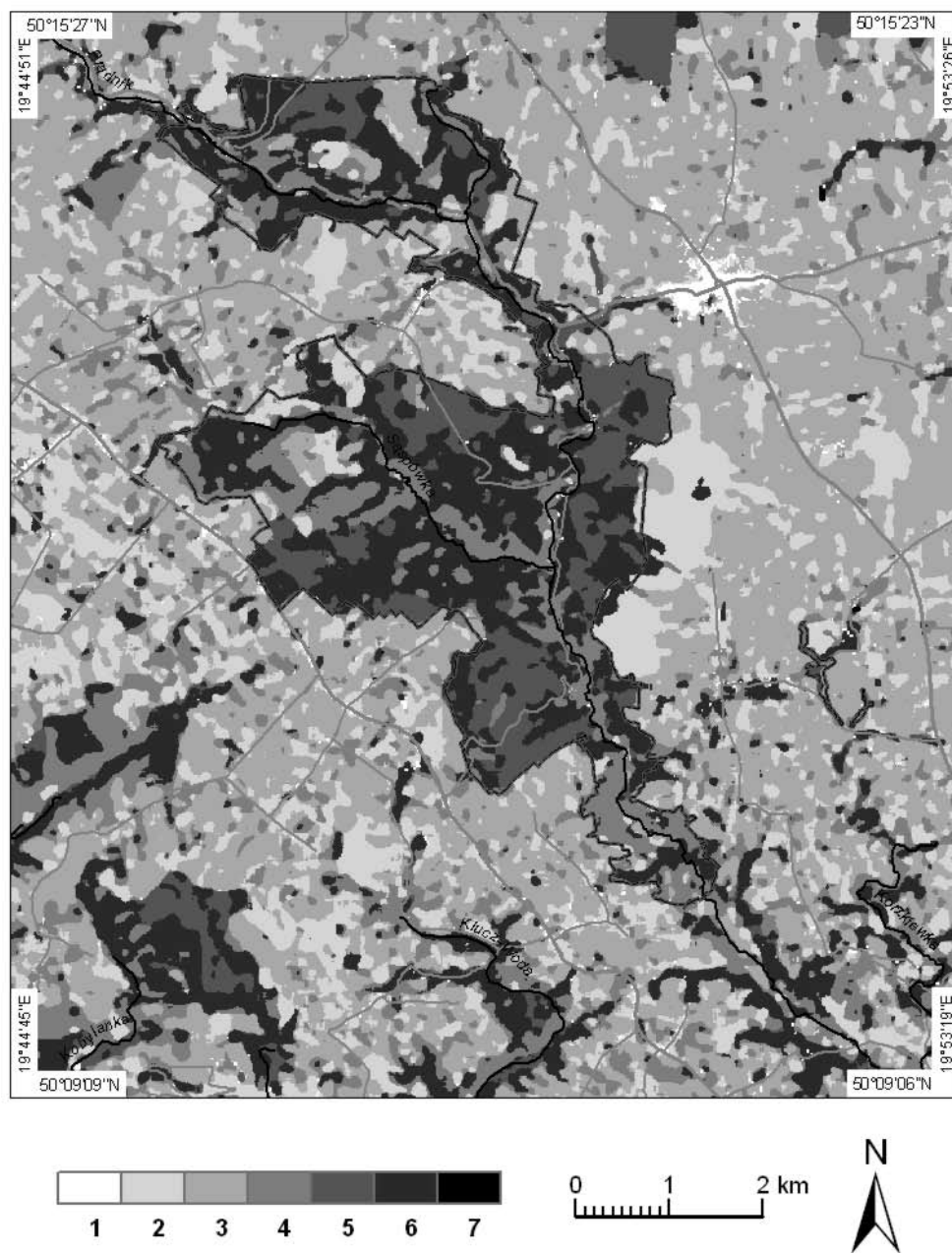
WYNIKI BADAŃ

Warunki klimatyczne OPN kształtowane są przede wszystkim ilością energii dochodzącej do podłoża oraz sposobem jej wykorzystania w różnego rodzaju procesach fizycznych. Promieniowanie pochłonięte, stanowi zasadniczą pozycję dochodową w równaniu bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Energia ta głównie zostaje zamieniona na ciepło, które następnie jest zużyte na różne procesy zachodzące stale w atmosferze i w jej podłożu. Wielkość K^* zależy od tych samych czynników, które wpływają na promieniowanie całkowite i odbite (Paszynski i in. 1999). Urozmaicona rzeźba terenu i różnorodność pokrycia OPN powodują bardzo duże zróżnicowanie przestrzenne ilości energii słonecznej pochłoniętej przez powierzchnię Ziemi. Świadczą o tym wymodelowane rozkłady przestrzenne K_{\downarrow} , α , K_{\uparrow} i K^* (ryc. 3, 4 i 5).

Wyniki obliczonych składników salda K^* w przebiegu rocznym przedstawiono w tabeli 4. Dla porównania zestawiono zmierzone wartości natężenia K_{\downarrow} , K_{\uparrow} i K^* na stacji Lepianka Czajowska na wierzchowinie i Park Zamkowy na dnie wąwozu krasowego (tab. 5).

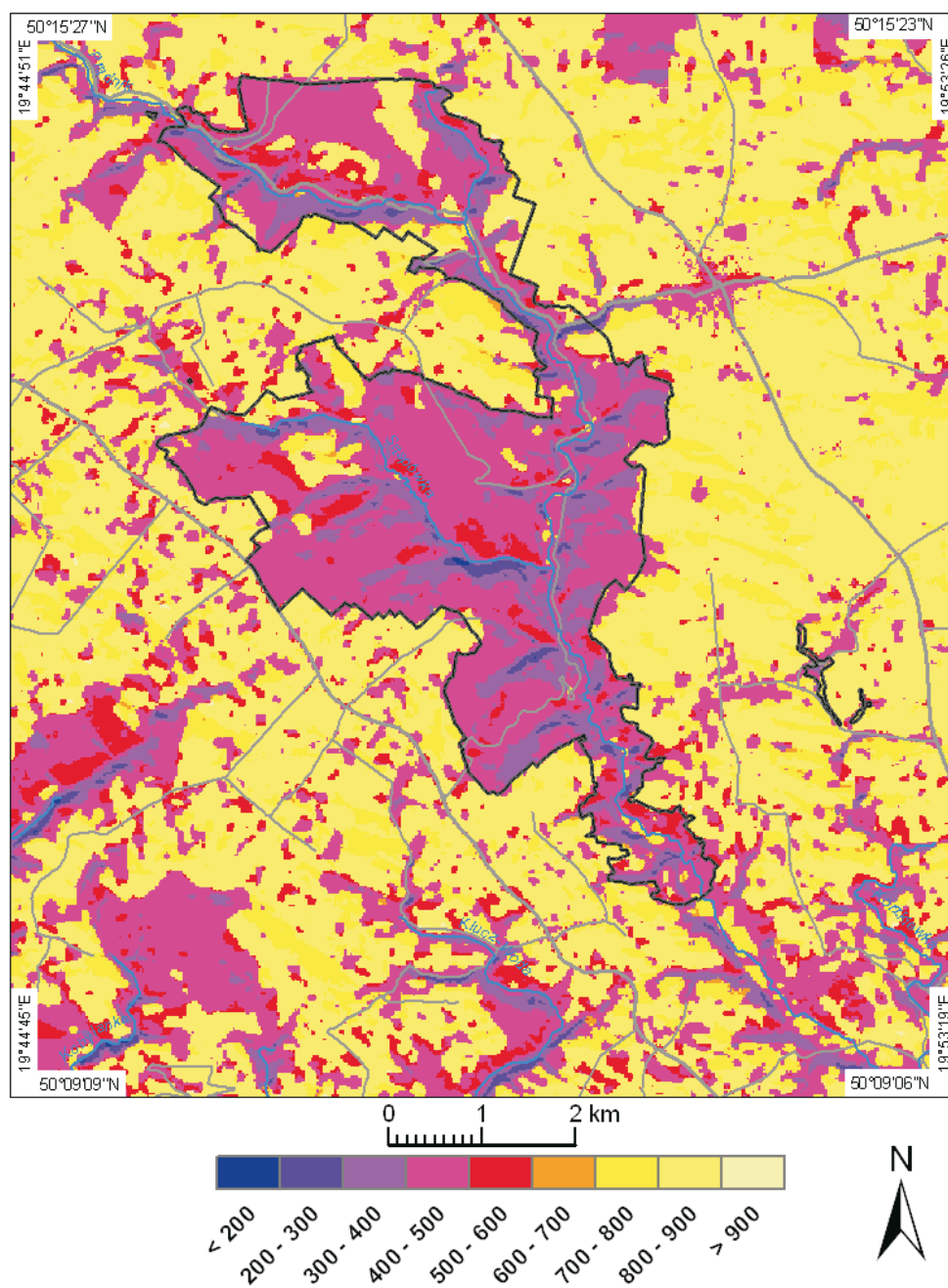
Z wyliczonych wartości wynika, że w ciągu roku obszar OPN otrzymuje średnio $3721 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ energii w postaci promieniowania K_{\downarrow} , K_{\uparrow} i K^* z czego $677 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ odbija, a $3055 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ jest przez niego pochłaniana (tab. 4). Najniższe sumy miesięczne składników salda K^* występują w listopadzie, grudniu i styczniu, później rosną do miesięcy letnich, a następnie stopniowo maleją aż do grudnia. Średnia suma miesięczna K^* w grudniu wynosiła $28 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, co stanowi zaledwie 1% sumy rocznej. Najwyższą średnią miesięczną sumę K^* obliczono w czerwcu i wynosiła $506 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (17% sumy rocznej). Miesiące letnie charakteryzują się największą zmiennością przestrzenną sum K^* . Udział średniej miesięcznej sumy K^* w czerwcu i lipcu w sumie rocznej wynosiła 33%. Na okres od maja do sierpnia przypada blisko 62% sumy rocznej K^* , podczas gdy od listopada do lutego tylko niecałe 7% tej sumy.

Nieosłonięta murawa na wierzchowinie (LCz) otrzymywała w sumie rocznej $3937 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ promieniowania K_{\downarrow} , z czego $735 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ odbijała, a $3201 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ było przez nią pochłaniane (tab. 5). Mniejsze wartości natężenia promieniowania zmierzono dla wąskiego kanionu krasowego (PZ). Średnia suma miesięczna K^* w grudniu wynosiła $39 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ na stacji LCz i $25 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ dla PZ co stanowiło odpowiednio 1,2% i 1% sumy



Ryc. 2. Mapa pokrycia i użytkowania obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego: 1 – zabudowa; 2 – użytki zielone; 3 – pola uprawne; 4 – las liściasty; 5 – las iglasty; 6 – las mieszany; 7 – wody

Fig. 2. Map of land cover and land use in the Ojców National Park: 1 – built-up area; 2 – grassland; 3 – cultivated fields; 4 – broadleaved forest; 5 – coniferous forest; 6 – mixed forest; 7 – waters



Ryc. 4. Roczna suma promieniowania słonecznego odbitego K_{\uparrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego

Fig. 4. Annual total reflected solar radiation K_{\uparrow} [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$] in the Ojców National Park

Tabela 4. Obliczone sumy miesięczne promieniowania K_{\downarrow} , K_{\uparrow} i K^* w $[MJ \cdot m^{-2}]$ dla OPNTable 4. Annual total solar radiation K_{\downarrow} , reflected K_{\uparrow} and absorbed K^* solar radiation in $[MJ \cdot m^{-2}]$ in ONP

Składniki salda Balance components		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
K_{\downarrow}	min	11	24	60	113	206	242	223	139	67	33	11	6	1177
	max	104	175	365	500	632	659	647	553	406	234	107	68	4348
	średnia	60	107	271	429	584	620	604	488	312	152	59	35	3721
K_{\uparrow}	min	1	3	6	14	27	36	33	21	8	4	1	1	141
	max	32	52	88	93	119	132	135	115	73	37	18	18	942
	średnia	14	25	51	69	97	112	113	91	53	23	9	7	677
K^*	min	9	20	54	99	179	206	189	118	58	29	10	5	1016
	max	88	151	326	440	547	580	567	472	343	197	89	57	3750
	średnia – mean	45	82	221	360	487	506	491	397	259	129	50	28	3055

Tabela 5. Sumy miesięczne promieniowania K_{\downarrow} , K_{\uparrow} i K^* w $[MJ \cdot m^{-2}]$ dla stacji Lepianka Czajowska (LCz) i Park Zamkowy (PZ) w OPN w latach 2008–2009Table 5. Calculated monthly value of global K_{\downarrow} , reflected K_{\uparrow} and absorbed K^* solar radiation in $[MJ \cdot m^{-2}]$ Lepianka Czajowska (LCz) and Park Zamkowy (PZ) in ONP in 2008–2009

Składniki bilansu Balance components		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
K_{\downarrow}	LCz	75	135	248	497	580	563	616	534	338	185	112	54	3937
	PZ	63	105	211	415	494	481	532	458	269	138	80	38	3284
	średnia – mean	69	120	230	456	537	522	574	496	304	162	96	46	3611
K_{\uparrow}	LCz	48	53	70	76	105	97	88	80	49	34	22	15	735
	PZ	37	49	51	82	106	95	119	103	55	27	19	13	756
	średnia – mean	43	51	61	79	106	96	104	92	52	31	21	14	746
K^*	LCz	26	82	179	420	475	467	528	454	288	152	91	39	3201
	PZ	26	56	159	333	388	386	413	354	215	111	61	25	2527
	średnia – mean	26	69	169	377	432	427	471	404	252	132	76	32	2864

rocznej. Najwyższą średnią miesięczną sumę K^* notowano w lipcu $528 MJ \cdot m^{-2}$ (16,5% sumy rocznej) na wierzchowinie i $413 MJ \cdot m^{-2}$ (16,3% sumy rocznej) na dnie wąwozu krasowego. Miesiące od IV do VIII charakteryzowały się podobnymi wartościami natężenia K^* . Udział średniej miesięcznej sumy K^* w czerwcu i lipcu w sumie rocznej wynosił 31,3%. Na okres od maja do sierpnia przypadało blisko 60,5% sumy rocznej K^* , podczas gdy od listopada do lutego tylko niecałe 7,1% tej sumy.

Na obszarze OPN najniższe wartości salda K^* występowały w głęboko wciętych dnach dolin, wąwozów i jarów oraz nisko położonych, zasłoniętych horyzontem zboczach o ekspozycjach północnych. Do miejsc tych, dla których roczna suma K^* nie przekraczała $2500 MJ \cdot m^{-2}$ zaliczono: północne zbocza Wąwozu Babie Doły, północne zbocza Doliny Prądnika w Pieskowej Skale, północne zbocza Doliny Prądnika na odcinku od Wąwozu Węgielny Dół do Doliny Zachwytu, północno-zachodnie zbocza Wąwozu Sokolec, północno-zachodnie zbocza Doliny Zachwytu, północno-wschodnie zbocza Doliny Prądnika pomiędzy młynami Tarnówki i Katarzyńskich, północna ściana skał Pochylec i Łamańce przy drodze nr 773, północne zbocza Wąwozu Węgielnik, północne zbocza Doliny Paduch, północna ściana skał Prałatki, północne nisko położone stoki Złotej Góry przy drodze

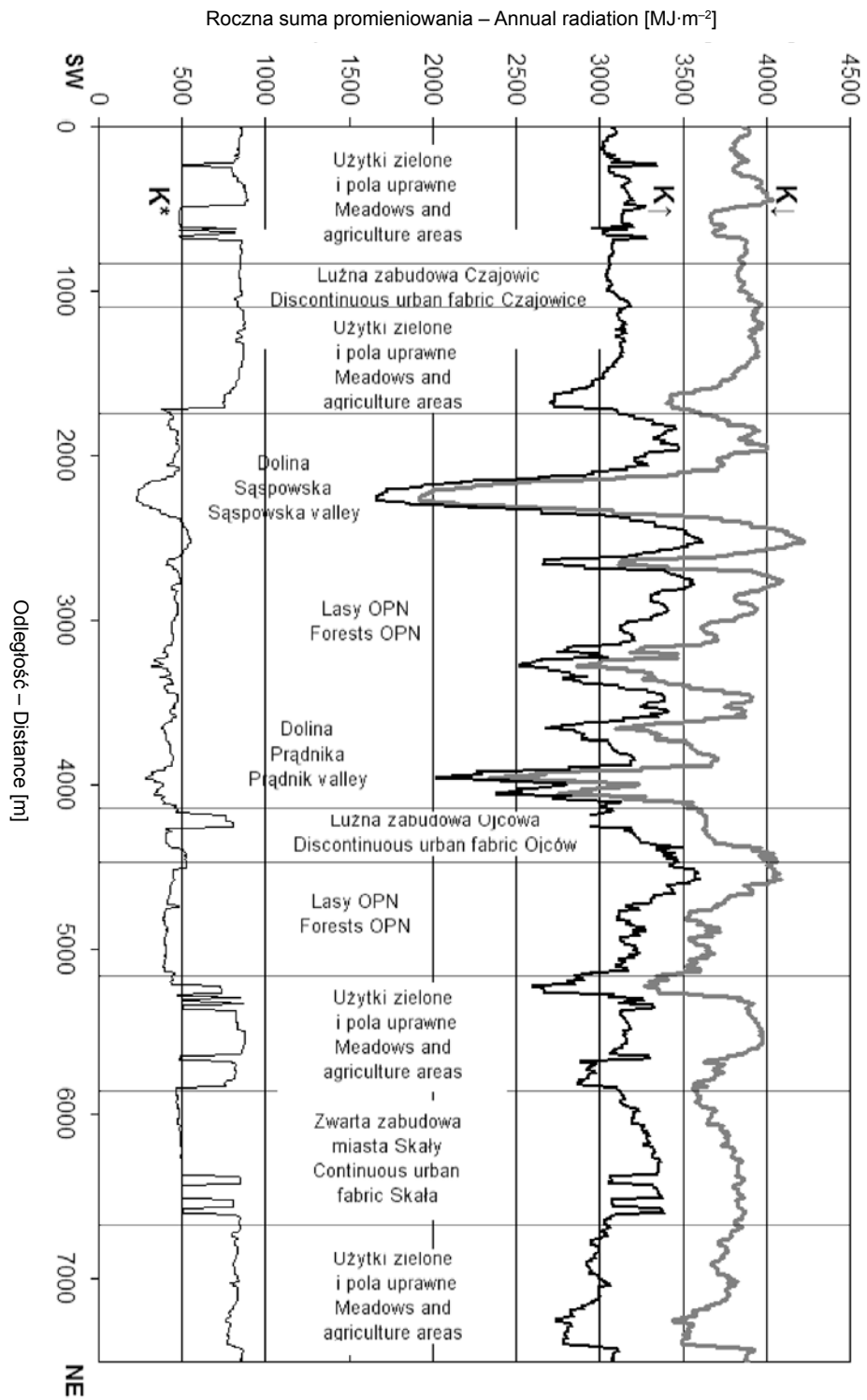
Ojców – Złota Góra, północne ściany Góry Zamkowej w Ojcowie, północna ściana skał Dygasińskiego w Ojcowie, wschodnia ściana skały Krzyżowej w Ojcowie, północne ściany skały Czyżówki od strony Wąwozu Wilczy Dół, północno-zachodnie zbocza Wąwozu Skałbana, północno-zachodnie zbocza Korytania, zasłonięte fragmenty Skały Okopy oraz Skały Puchacza w Wąwozie Smardzowickim, północno-wschodnie zbocza Doliny Prądnika w pobliżu Skały Wójtowej w Prądniku Ojcowskim, północne zbocza Wąwozu Stodoliska, północno-wschodnie zbocza Doliny Prądnika w pobliżu Skały Golanka w Prądniku Korzkiewskim, nisko położone północne stoki Chełmowej Góry w Dolinie Sąpowskiej, Wąwóz Jamki, północne zbocza Doliny Sąpowskiej pomiędzy skałami Gęsia Szyja i Skała Młynna. Wyżej wymienione lokalizacje w przeważającej większości porośnięte były lasem.

Miejscem o najniższej rocznej sumie K^* wynoszącej zaledwie $1016 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ stwierdzono porośnięte lasem bukowym strome zbocze o nachyleniu 56° i ekspozycji północno-wschodniej położone na wysokości 376 m n.p.m. przy wlocie Wąwozu Jamki do Doliny Sąpowskiej ($19^\circ 48' 53,76'' \text{E}$, $50^\circ 12' 13,79'' \text{N}$). W tym samym miejscu zanotowano również najniższą dla obszaru OPN roczną sumę K_{\downarrow} wynoszącą $1117 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Środkowy i dolny odcinek Doliny Sąpowskiej był silnie zacieniony przez strome zbocza krasowego kanionu, natomiast wyżej położone obszary OPN w rejonie Lepianki Czajowskiej były bardziej nasłonecznione (ryc. 5).

Najwyższe wartości salda K^* występowały na wierzchowinach, a więc w miejscach charakteryzujących się małym zasłonięciem horyzontu oraz na wysoko położonych nad dnami dolin zboczach o ekspozycjach południowych. Do miejsc charakteryzujących się najwyższymi wartościami K^* , dla których roczna suma przekraczała $3500 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, zaliczono: południowe zbocza Doliny Prądnika i wierzchowiny w Sułoszowej, wyższe partie południowych zboczy Doliny Prądnika na odcinku od Pieskowej Skały do Młynnika, południowo-wschodnie zbocza Wąwozu Pilny Dół, wyższe partie południowych zboczy Doliny Prądnika w Grodzisku, wyższe partie południowych zboczy Doliny Paduch, południowe i południowo-wschodnie zalesione stoki Złotej Góry w Dolinie Sąpowskiej, wyższe partie południowych i południowo-zachodnich zalesionych stoków Chełmowej Góry, wierzchowinę oraz wyższe partie południowych zboczy Góry Koronnej, południowe ściany Skały Okopy w Prądniku Ojcowskim, partie wierzchowinowe Skały Wielkiej, wyższe partie południowych i południowo-zachodnich zboczy Doliny Sąpowskiej w pobliżu Zabugaje. Wyżej wymienione lokalizacje były bardziej zróżnicowane pod względem pokrycia i użytkowania terenu, niż miejsca o najniższych wartościach salda K^* .

Najwyższą wartość salda K^* dla obszaru OPN stwierdzono w miejscu najbardziej nasłonecznionym, dla którego roczna suma K^* wynosiła $3750 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a K_{\downarrow} $4348 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Był to fragment zalesionego stoki Góry Chełmowej położonego na wysokości 461 m n.p.m. i nachylonego na południe pod kątem 30° ($19^\circ 49' 22,73'' \text{E}$, $50^\circ 11' 56,74'' \text{N}$).

Omówione powyżej różnice w rozkładzie przestrzennym promieniowania słonecznego pochłoniętego zilustrowano bardzo wyraźnie na profilu SW-NE (ryc. 6). Profil poprowadzono w taki sposób, aby przechodził przez różne typy użytkowania i pokrycia terenu oraz przecinał charakterystyczne miejsca obszaru badań. Poprowadzono go od południo-zachodu w kierunku północno-wschodu. Na profilu zobrazowano zmiany wartości strumieni K_{\downarrow} , K_{\uparrow} i K^* związane ze zróżnicowanymi warunkami insolacyjnymi oraz różnym sposobem użytkowania i pokrycia terenu. Największe różnice rocznej sumy K^* dochodziły do $1950 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w miejscach przecięcia Doliny Sąpowskiej i Doliny Prądnika. Wynikało



Ryc. 6. Roczna suma promieniowania K_1 , K i K^* w profilu SW-NE

Fig. 6. Annual total radiation K_1 , reflected K , and absorbed K^* solar radiation in the profile SW-NE

to przede wszystkim z bardzo dużych różnic w dopływie strumienia $K\downarrow$ pomiędzy dnami dolin, a zboczami i otaczającymi je wierzchowinami. Najmniejsze zmiany salda K^* w profilu SW-NE występują na polach uprawnych i użytkach zielonych w okolicy miejscowości Czajowice. Są to tereny względnie płaskie, o małym zasłonięciu horyzontu, jednorodnej strukturze pokrycia i stosunkowo wysokim α .

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania rozkładu przestrzennego salda promieniowania słonecznego wykazały dużą jego zmienność przestrzenną na obszarze OPN. Silne urzeźbienie terenu, urozmaicenie form, ekspozycji i spadków, znaczne deniwelacje, a także różnorodność pokrycia i użytkowania sprawiały, że na stosunkowo małej przestrzeni występowało duże zróżnicowanie warunków radiacyjnych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że roczne sumy K^* kształtowały się w przedziale od $1016 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ do $3750 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Wartości te stanowiły mniej więcej 82% sumy rocznej promieniowania $K\downarrow$.

Wartości roczne sumy K^* zmierzone na stacji Lepianka Czajowska (wierzchowina) i Park Zamkowy (wąwóz krasowy) wynosiły odpowiednio $3201 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $2527 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w latach 2008–2009. Wartości te stanowiły odpowiednio 81,3% i 76,9% sumy rocznej promieniowania $K\downarrow$.

Zróżnicowanie przestrzenne wartości K^* zależało przede wszystkim od czynników, które kształtują warunki radiacyjne. Należy do nich geometria powierzchni czynnej tj. wysokość nad poziom morza, ekspozycja i nachylenie stoków oraz zasłonięcie horyzontu. W przypadku obszaru OPN silne urzeźbienie terenu było głównym czynnikiem kształtującym wartości K^* .

Promieniowanie pochłonięte zależało również od zdolności odbijania promieniowania słonecznego od powierzchni czynnej. Pomimo znacznego zróżnicowania pokrycia i użytkowania obszaru OPN, wpływ albedo na wartość K^* był zdecydowanie mniejszy niż urzeźbienia.

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

Caputa Z. 2001. *Pomiary bilansu promieniowania różnych powierzchni czynnych przy wykorzystaniu automatycznych stacji pomiarowych*. „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska”, LV/LVI (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. *Radiation balance in the area of Ojców National Park*. [w:] V.N. Andrejchuk, V.P. Korzhyk (red.), *Regional aspects of land use*. Kharskiwski Politekhniczny Uniwersytet, Uniwersytet Śląski. Chernivtsy-Sosnowiec, s. 24–34.

Caputa Z., Leśniok M. 2002b. *Zróżnicowanie mikroklimatyczne w świetle bilansu promieniowania słonecznego na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Prądnik. Prace Muz. Szafera”, 13: 7–31.

ERDAS Field Guide – Przewodnik Geoinformatyczny. Geosystems Polska, Warszawa 1998.

Irish R.R. 2000. *Landsat 7 science data user's handbook*, Report 430-15-01-003-0, National Aeronautics and Space Administration.

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

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

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

Rich P.M. 1994. *Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology*. American Society for Photogrammetry and Remote. Sensing Technical Papers.

WODGiK, *Numeryczny model terenu OPN o rozdzielczości przestrzennej 20 m·piksel⁻¹*, Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Krakowie.

Wojkowski J. 2006. *Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego przy użyciu GIS na przykładzie obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego*. „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska”, Sectio B, **61**: 468–477.

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

SUMMARY

The classification of the surface of the ONP and the calculations of total radiation, reflected radiation and albedo of selected surfaces were made using GIS tools. These studies allowed the analysis of spatial variations of absorbed solar radiation (K^*) in the ONP and working out the map of K^* radiation balance (using the numerical terrain model – NMT [WODGiK], and Landsat 7 satellite images). The calculated values indicate that during the year the ONP received on average $3721 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ of energy, from which it reflected $677 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and absorbed $3055 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 4). The results were compared with measurements made on the grass-covered surface using CNR1 Kipp&Zonen. The measurements were taken at two points in the ONP, at the stations Lepianka Czajowska and Park Zamkowy (Castle Park). The unshadowed grass-covered surface in the plateau (LCz) received $3937 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ of energy, from which it reflected $735 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and absorbed $3201 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (Tab. 5). The measurements showed lower values of radiation intensity in the narrow karstic canyon (PZ).

It was found that spatial variation in K^* values depends mainly on factors determining insolation conditions. In the case of the ONP, its highly diverse relief seems to be the main factor controlling the values of K^* . The balance of K^* is also dependent on the solar radiation reflection ability of the active surface. Despite a considerable diversity of land cover and land use in the ONP, the impact of albedo on the K^* value is decidedly less significant than the relief.