

Prądnik. Prace Muz. Szafera	19	141–152	2009
-----------------------------	----	---------	------

JAKUB WOJKOWSKI<sup>1</sup>, ZBIGNIEW CAPUTA<sup>2</sup>

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

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

## MODELOWANIE DOPŁYWU PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA OBSZARZE OJCOWSKIEGO PARKU NARODOWEGO

### Modelling in solar radiation influx in the Ojców National Park

**ABSTRACT.** Solar radiation influx was calculated using the algorithm based on Bouguer's law describing solar extinction in the atmosphere, and the numerical terrain model was used to determine such elements of topography as horizon obstruction, aspects, gradients and relative heights. Summing up the results of modelling of direct and diffused radiation the total solar radiation was calculated, and based on this the maps of its distribution in the ONP were made. While calculating the sunshine duration not only the geographical location (latitude) was considered, but the horizon obstruction was also taken into account because of its significant effects on insolation conditions in a given place. Modelling was made for the period of the year and for the days marked by their duration, that is the winter solstice (22 December) and the summer solstice (22 June). Annual total radiation sums were within the value range from 1177 to 4348 MJ·m<sup>-2</sup>, and the annual mean for the analysed area was 3721 MJ·m<sup>-2</sup>. The annual total of possible sunshine duration was in similarly broad value ranges and was from 1181 to 4377 hours and 4045 hours on average.

**KEY WORDS:** total radiation, solar radiation, possible sunshine duration, topoclimate, modeling, GIS, ONP

### WSTĘP

Badania stosunków radiacyjnych oraz pierwsze pomiary promieniowania słonecznego w Ojcowskim Parku Narodowym (OPN) rozpoczęto na początku lat 60. ubiegłego stulecia. W 1964 r. na dachu willi „Pod Berłem” położonej na północno-wschodnim zboczu Doliny Prądnika w Ojcowie umieszczony został heliograf Campbella-Stokesa. Badania te prowadzone były w latach 1964–1967 i dotyczyły m.in. pomiarów usłonecznienia oraz obserwacji zachmurzenia (Klein 1974). Kontynuacją tych badań były przeprowadzone w Dolinie Sąpowskiej w latach 1987–1988 pomiary całkowitego promieniowania słonecznego i usłonecznienia (Klein 1992). W 1999 r. przeprowadzono kilkudniowe pomiary promieniowania w pełnym zakresie widma porównując strukturę bilansu promieniowania i wartości salda promieniowania na wierzchołku w Lepiance Czajowskiej oraz na dnie Doliny Prądnika w Parku Zamkowym (Caputa 2001; Caputa, Leśniok 2001, 2002a, b).

Pierwszą analizą przestrzennego zróżnicowania stosunków radiacyjnych OPN była mapa nasłonecznienia względnego sporządzona metodą Strużki (Klein 1974). Dzięki dynamicznemu rozwojowi w ostatnich latach informatycznych narzędzi Geograficznych Systemów Informacyjnych (GIS) oraz teledetekcji satelitarnej, możliwym stało się przeprowadzenie bardziej szczegółowych badań nad zróżnicowaniem przestrzennym składników bilansu promieniowania. W ten sposób sporządzono dla OPN mapy przedstawiające przestrzenne zróżnicowanie całkowitego promieniowania słonecznego (Wojkowski 2006) oraz bilansu promieniowania w pełnym zakresie widma (Wojkowski 2007).

## METODA BADAŃ

Do przeprowadzenia analizy przestrzennego zróżnicowania warunków radiacyjnych OPN posłużono się numerycznym modelem terenu – NMT (WODGiK). NMT przekształcono do numerycznego modelu pokrycia terenu NMPT przedstawiającego rzeźbę terenu wraz ze znajdującymi się na nim obiektami naturalnymi i sztucznymi takimi jak lasy czy zabudowa. NMPT jest więc powierzchnią czynną, do której dociera całkowite promieniowanie słoneczne.

Na podstawie NMPT, wymodelowano z rozdzielczością przestrzenną 20 m m-piksel<sup>-1</sup> dopływ całkowitego promieniowania słonecznego oraz usłonecznienie możliwe. W modelowaniu dopływu całkowitego promieniowania słonecznego posłużono się algorytmem zaproponowanym przez P. Rich'a (1994). Algorytm ten oparty był na prawie Bouguera opisującym ekstynkcję promieniowania w atmosferze i wykorzystywał NMPT, z którego obliczono elementy topografii takie jak zasłonięcie horyzontu, ekspozycje, spadki i wysokości względne. Sumując wynik modelowania dopływu promieniowania bezpośredniego oraz rozproszonego obliczono całkowite promieniowanie słoneczne i sporządzono na tej podstawie mapy jego rozkładu na obszarze OPN.

Usłonecznienie możliwe (długość dnia od wschodu do zachodu Słońca) obliczane było dla każdego dnia na podstawie pozornego ruchu Słońca nad danym elementarnym polem rastrowym numerycznego modelu terenu, a następnie zostało zsumowane do wartości rocznej. Otrzymano zatem wyniki teoretycznego czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego w ciągu roku. Podczas obliczeń usłonecznienia uwzględniane było nie tylko położenie geograficzne (szerokość geograficzna), ale również zasłonięcie horyzontu, które w bardzo istotny sposób wpływało na kształtowanie się warunków radiacyjnych danego miejsca.

Modelowanie wykonano dla okresu roku oraz dla dni charakterystycznych pod względem czasu trwania tj. przesilenia zimowego (22 grudnia) i przesilenia letniego (22 czerwca). Badaniami objęto obszar OPN wraz z otuliną o rozciągłości południkowej pomiędzy 50°09'06"N i 50°15'27"N oraz rozciągłości równoleżnikowej pomiędzy 19°44'45"E i 19°53'26"E.

## WYNIKI BADAŃ

Ilość promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi zależy od odległości Ziemi od Słońca, szerokości geograficznej, wysokości Słońca nad horyzontem, właściwości optycznych atmosfery oraz zachmurzenia i zanieczyszczenia powietrza. Strumień

promieniowania słonecznego przechodząc przez atmosferę ulega osłabieniu wskutek rozpraszania, odbijania oraz pochłaniania. Ekstynkcja, czyli osłabienie bezpośredniego promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską sprawia, że do powierzchni Ziemi dochodzi ono w postaci promieniowania bezpośredniego od tarczy słonecznej oraz promieniowania rozproszonego od całej półkuli nieba.

Poza uwarunkowaniami astronomicznymi, pogodowymi i antropogenicznymi, na wartość promieniowania słonecznego otrzymywanego przez powierzchnię Ziemi wpływają również elementy topografii miejsca obserwacji takie jak wysokość nad poziom morza, ekspozycja i nachylenie stoków oraz zasłonięcie horyzontu. Urozmaicona rzeźba OPN powoduje bardzo duże zróżnicowanie strumienia energii słonecznej docierającej do jej powierzchni. Świadczą o tym wymodelowane rozkłady przestrzenne całkowitego promieniowania słonecznego oraz usłonecznienia możliwego (ryc. 1 i 2). Roczne sumy promieniowania słonecznego kształtowało się w przedziale wartości od 1177 do 4348  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a wartość średnia roczna dla analizowanego obszaru wyniosła 3721  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . W podobnie dużych przedziałach wartości kształtowała się roczna suma usłonecznienia możliwego, która wynosiła od 1181 do 4377 godzin. Średnie roczne usłonecznienie możliwe dla obszaru OPN wyniosło 4045 godzin.

Dla uzyskania informacji ilościowej o warunkach radiacyjnych obszaru OPN w zależności od wysokości nad poziom morza, nachylenia oraz usytuowania powierzchni w stosunku do stron świata wydzielono trzy klasy wysokości (poniżej 300, 300–400 i powyżej 400 m n.p.m.), a następnie w każdej z nich po cztery klasy nachylenia (poniżej  $3^\circ$ ,  $3^\circ$ – $10^\circ$ ,  $10^\circ$ – $20^\circ$  i powyżej  $20^\circ$ ) oraz po osiem klas ekspozycji terenu (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). Dla tak przygotowanych klas wyznaczono wartości całkowitego promieniowania słonecznego i usłonecznienia możliwego oraz obliczono dla nich wartości średnie i skrajne (tab. 1, 2, 3, 4, 5 i 6). Najmniej energii otrzymały miejsca położone poniżej 300 m n.p.m. o ekspozycji północnej, północno-zachodniej i północno-wschodniej. W ciągu roku mniej energii docierało do stoków północnych niż do południowych – średnio o 18%. Różnice w rocznej sumie promieniowania pomiędzy stokami północnymi i południowymi wynosiły średnio  $733 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a w rocznej sumie usłonecznienia możliwego średnio 335 godzin (tab. 1 i 4). Różnica w dopływie promieniowania pomiędzy stokami północnymi i południowymi zmieniała się w ciągu roku gdyż zależało to od kąta padania promieni słonecznych. Największe różnice były w zimie przy niskim położeniu Słońca i dochodziły do 50% (tab. 2). Różnice sum dobowych promieniowania pomiędzy stokami północnymi i południowymi wynosiły wtedy średnio  $0,51 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a usłonecznienia możliwego średnio 1,2 godziny (tab. 2 i 5).

Bardzo duży wpływ na ilość energii docierającej do powierzchni Ziemi miało również nachylenie terenu. Dla stoków północnych, im ich nachylenie było większe, tym mniej promieniowania słonecznego dopływało do powierzchni Ziemi. Zaobserwowano to szczególnie w półroczu zimowym przy małym kącie padania promieni słonecznych (tab. 2).

Na obszarze OPN najniższe wartości rocznej sumy promieniowania całkowitego oraz usłonecznienia występowały w głęboko wciętych dnach dolin, wąwozów i jarów oraz nisko położonych, zasłoniętych horyzontem zboczach o ekspozycji północnej, północno-wschodniej i północno-zachodniej. Należy podkreślić, że w każdym przypadku, kiedy analizowano warunki radiacyjne danego miejsca, pod uwagę brano powierzchnię

Tabela 1. Obliczone sumy promieniowania całkowitego [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku NarodowymTable 1. Calculated annual global solar radiation [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $<3^\circ$ )
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Rok – Year	200–300	3°–10°	3353	3410	3538	3708	3776	3691	3536	3353	
		10°–20°	2987	3112	3368	3827	4001	3809	3454	3044	
		> 20°	2441	2648	3057	3804	4086	3812	3272	2609	
		min	1809	2123	2696	3313	3451	3294	2525	2169	3138
		max	3519	3581	3683	4034	4229	4090	3701	3518	3728
		średnia mean	2899	3122	3433	3758	3919	3768	3451	3011	3590
	300–400	3°–10°	3525	3577	3690	3843	3917	3852	3674	3540	
		10°–20°	3101	3223	3510	3878	4035	3893	3531	3192	
		> 20°	2475	2702	3129	3875	4130	3824	3191	2591	
		min	1184	1177	1929	2969	3367	3046	2197	1573	3047
		max	3716	3759	3890	4180	4280	4211	3891	3774	3966
		średnia mean	3278	3430	3587	3853	3961	3857	3492	3217	3754
	400–500	3°–10°	3596	3646	3749	3890	3946	3891	3752	3627	
		10°–20°	3187	3334	3605	3952	4088	3940	3624	3299	
		> 20°	2619	2793	3385	3952	4198	3921	3380	2789	
		min	1320	1334	2697	3620	3655	3407	2429	1755	3458
		max	3770	3821	3929	4195	4348	4260	3908	3812	3971
		średnia mean	3472	3594	3719	3899	3968	3901	3693	3486	3821

czynną, do której dopływa całkowite promieniowanie słoneczne. W przypadku zbiorowisk leśnych była to górna zewnętrzna korona drzew, a w przypadku zabudowy powierzchnia dachów.

Do miejsc najmniej nasłonecznionych, dla których roczna suma promieniowania nie przekraczała  $2500 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a usłonecznienie możliwe trwało poniżej 2700 godzin należą: północne zbocza Wąwozu Babie Doły, północne zbocza Doliny Prądnika w Pieskowej Skale, północne zbocza Doliny Prądnika pomiędzy młynami Krzemienia i Krzystanka, 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, 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 Skałbania, północno-zachodnie zbocza Wąwozu Korytania, zasłonięte fragmenty skały Okopy i Skały Puchacza, północno-wschodnie zbocza Doliny Prądnika w pobliżu Skały Wójtowej w Prądniku Ojcowskim, północno-wschodnie zbocza Doliny Prądnika w pobliżu Skały

Tabela 2. Obliczone sumy promieniowania całkowitego [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] podczas przesilenia zimowego (22 grudnia) w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku Narodowym

Table 2. Calculated global solar radiation [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] for winter solstice (22 December) according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $< 3^\circ$ )
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Zimowe przesilenie – Winter solstice	200–300	3°–10°	0,51	0,56	0,69	0,81	0,88	0,86	0,75	0,47	
		10°–20°	0,35	0,42	0,65	0,94	1,12	1,00	0,73	0,39	
		> 20°	0,32	0,31	0,55	1,07	1,29	1,13	0,75	0,31	
		min	0,26	0,22	0,28	0,32	0,31	0,59	0,20	0,25	0,31
		max	0,68	0,74	0,86	1,34	1,54	1,41	0,94	0,69	0,84
		średnia	0,39	0,45	0,67	0,88	1,04	0,98	0,74	0,39	0,71
	300–400	3°–10°	0,62	0,67	0,78	0,89	0,95	0,91	0,77	0,65	
		10°–20°	0,40	0,49	0,73	0,99	1,10	1,02	0,75	0,46	
		> 20°	0,33	0,34	0,62	1,14	1,32	1,16	0,68	0,32	
		min	0,24	0,19	0,15	0,25	0,28	0,25	0,17	0,20	0,29
		max	0,72	0,78	1,14	1,56	1,69	1,62	1,17	0,77	0,97
		średnia	0,53	0,60	0,75	0,93	1,01	0,98	0,74	0,52	0,79
	400–500	3°–10°	0,66	0,70	0,80	0,91	0,96	0,92	0,81	0,70	
		10°–20°	0,43	0,54	0,77	1,04	1,15	1,04	0,79	0,52	
		> 20°	0,34	0,36	0,72	1,17	1,39	1,18	0,74	0,36	
		min	0,27	0,24	0,27	0,33	0,34	0,69	0,25	0,23	0,34
		max	0,73	0,78	0,96	1,39	1,71	1,51	0,99	0,78	0,97
		średnia/mean	0,60	0,68	0,79	0,93	0,99	0,95	0,80	0,63	0,82

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. Jak widać są to miejsca o bardzo dużym zasłonięciu horyzontu i poza nielicznymi wyjątkami w przeważającej części porośnięte lasem. Miejscem najmniej nasłonecznionym w OPN (ryc. 1) wymodelowano strome zbocze o nachyleniu  $56^\circ$  i ekspozycji północno-wschodniej położone na wysokości 376 m n.p.m. przy wlocie Wąwozu Jamki do Doliny Sąpowskiej ( $19^\circ48'53,76''\text{E}$ ,  $50^\circ12'13,79''\text{N}$ ). W miejscu tym roczna suma promieniowania wyniosła zaledwie  $1177 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a usłonecznienie możliwe 1181 godzin.

Najwięcej energii słonecznej docierało do miejsc charakteryzujących się małym zasłonięciem horyzontu. Jak wynikało z przeprowadzonych obliczeń należały do nich wierzchowiny oraz stoki położone powyżej 400 m n.p.m. o ekspozycji południowej, południowo-wschodniej oraz południowo-zachodniej (tab. 1, 2, 3, 4, 5 i 6). Ponadto im bardziej zbocza te były nachylone, tym więcej dopływało do nich promieniowania słonecznego. W okresie lata zbocza południowe otrzymały średnio o 5% więcej energii słonecznej niż tereny płaskie (tab. 3). Przy niskim położeniu Słońca, co ma miejsce w zimie, różnice te sięgały już ponad 30% (tab. 2).

Tabela 3. Obliczone sumy promieniowania całkowitego [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] podczas przesilenia letniego (22 czerwca) w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku Narodowym

Table 3. Calculated global solar radiation [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ] for summer solstice (22 June) according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $< 3^\circ$ )
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Letnie przesilenie – Summer solstice	200–300	3°–10°	18,98	19,12	19,64	19,95	20,00	19,96	19,64	18,92	
		10°–20°	17,82	18,02	18,68	19,94	20,53	19,90	18,86	17,83	
		> 20°	15,43	15,91	17,16	19,52	20,07	19,34	17,53	15,76	
		min	13,79	13,95	16,20	18,33	19,94	17,22	15,42	13,93	18,24
		max	19,99	20,21	20,44	20,97	21,13	20,94	20,45	20,05	20,53
		średnia mean	17,83	18,50	19,49	20,45	20,83	20,29	19,37	18,16	19,93
	300–400	3°–10°	19,49	19,66	19,95	20,08	20,55	20,17	19,92	19,57	
		10°–20°	18,16	18,45	19,17	20,17	20,91	20,26	19,23	18,37	
		> 20°	15,64	16,16	17,21	19,46	20,22	19,17	17,34	15,66	
		min	8,33	8,03	12,30	16,49	17,98	15,16	13,06	10,62	18,83
		max	20,36	20,52	20,78	21,29	21,40	21,26	20,81	20,53	21,59
		średnia mean	19,10	19,55	19,94	20,72	21,03	20,60	19,45	18,79	19,98
	400–500	3°–10°	19,78	19,89	19,99	20,45	20,94	20,54	19,99	19,85	
		10°–20°	18,43	18,77	19,49	20,53	20,99	20,48	19,55	18,69	
		> 20°	16,15	16,44	18,13	19,82	20,65	19,70	18,06	16,53	
		min	9,11	8,79	15,31	18,42	19,02	17,57	14,07	11,52	20,22
		max	20,57	20,72	20,97	21,48	21,63	21,42	20,97	20,73	21,78
		średnia mean	19,75	20,12	20,47	20,98	21,16	20,95	20,33	19,78	20,05

Do najbardziej nasłonecznionych obszarów OPN dla których roczna suma promieniowania przekraczała  $4100 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  zaliczono: południowe zbocza Doliny Prądnika i wierzchowiny w Sułozowej, 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 zbocza Złotej Góry w Dolinie Sąpsowskiej, wyższe partie południowych i południowo-zachodnich zalesionych stoków Chełmowej Góry, wierzchowina 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 Sąpsowskiej w pobliżu przysiółka Zabugaje.

Na podstawie modelowania dopływu promieniowania słonecznego (ryc. 1 i 2) stwierdzono, iż najbardziej nasłonecznionym miejscem na obszarze OPN był położony na wysokości 461 m n.p.m. i nachylony na południe pod kątem  $30^\circ$  fragment zalesionego stoku Góry Chełmowej ( $19^\circ 49' 22,73'' \text{E}$ ,  $50^\circ 11' 56,74'' \text{N}$ ). W miejscu tym roczna suma promieniowania wyniosła  $4348 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , a usłonecznienie możliwe 4216 godzin. Dużym nasłonecznieniem wyróżniała się również bezimienna skała położona na wysokości 419 m n.p.m. i nachylona na południe pod kątem  $27^\circ$  przy drodze Ojców – Murownia

Tabela 4. Obliczone sumy usłonecznienia możliwego [godz.] w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku Narodowym

Table 4. Calculated annual sum of possible sunshine duration [h] according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $< 3^\circ$ )
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Rok – Year	200–300	3°–10°	3453	3437	3513	3604	3721	3583	3387	3047	
		10°–20°	3203	3247	3319	3552	3863	3604	3315	3065	
		> 20°	2835	2836	2954	3251	3770	3511	3119	2656	
		min	1528	2098	2227	2520	2578	2624	2171	1931	2474
		max	3927	3949	3992	3994	4377	4010	4377	3979	4006
		średnia mean	3145	3225	3392	3551	3800	3575	3305	2946	3629
	300–400	3°–10°	4094	4055	4001	4057	4124	4059	3929	3971	
		10°–20°	3615	3599	3554	3733	3941	3789	3561	3524	
		> 20°	2879	2991	3131	3505	3715	3485	3145	2851	
		min	1298	1181	1613	1995	2413	2392	1954	1565	1912
		max	4377	4377	4312	4332	4338	4326	4377	4332	4348
		średnia mean	3811	3871	3803	3946	4051	3882	3594	3580	4135
	400–500	3°–10°	4172	4149	4094	4152	4189	4147	4086	4115	
		10°–20°	3819	3790	3740	3918	4034	3912	3767	3780	
		> 20°	3149	3178	3423	3725	3912	3707	3439	3199	
		min	1891	1761	2583	3164	3202	2868	2640	2100	3098
		max	4368	4366	4367	4368	4377	4377	4368	4366	4368
		średnia mean	4054	4090	4026	4117	4165	4086	3960	3966	4263

(19°49'5,86"E, 50°11'10,89"N). W miejscu tym roczna suma promieniowania wyniosła 4301 MJ·m<sup>-2</sup>, a usłonecznienie możliwe 4173 godzin. Równie silnie nasłonecznionym miejscem, ale już poza granicami OPN, był południowy stok skał o nazwie Grodzisko położony na wysokości 490 m n.p.m. i nachyleniu 28° znajdujący się w pobliżu wsi Zawyjrzał (19°46'13,04"E, 50°12'0,02"N). W miejscu tym roczna suma promieniowania wyniosła 4342 MJ·m<sup>-2</sup>, a usłonecznienie możliwe 4172 godzin.

Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego wykonano również dla charakterystycznych dni w roku pod względem czasu ich trwania tj. przesilenia zimowego (22 grudnia) oraz przesilenia letniego (22 czerwca). Podczas przesilenia zimowego deklinacja Słońca osiąga największe południowe oddalenie od równika niebieskiego i wynosi  $-23,5^\circ$ . Słońce znajduje się wówczas w swoim najniższym położeniu na niebie, a czas od wschodu do zachodu Słońca jest najkrótszy w roku. Mały kąt padania promieni słonecznych ( $\leq 16,3^\circ$ ) oraz silne urzeźbienie terenu sprawiły, że na obszarze OPN zróżnicowanie sum dobowych promieniowania było bardzo duże. Dobowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego podczas zimowego przesilenia kształtowały się w przedziale wartości od 0,15 do 1,71 MJ·m<sup>-2</sup>, a średnia wartość na obszarze OPN wyniosła 0,80 MJ·m<sup>-2</sup>. Usłonecznienie możliwe podczas przesilenia zimowego kształtowało się od 0 do 7 godzin, a wartość średnia dla obszaru OPN wyniosła 6,2 godziny.

Tabela 5. Obliczone sumy usłonecznienia możliwego [godz.] podczas przesilenia zimowego (22 grudnia) w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku Narodowym

Table 5. Calculated sum of possible sunshine duration [h] for winter solstice (22 December) according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $< 3^\circ$ )	
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
Zimowe przesilenie – Winter solstice	200–300	3°–10°	2,7	3,6	4,6	4,7	5,3	5,3	4,6	1,9		
		10°–20°	0,7	0,7	4,4	4,9	6,2	5,5	4,4	1,9		
		> 20°	0,0	0,8	3,7	4,6	6,2	5,8	4,3	0,8		
		min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0		0,0
		max	6,1	6,3	7,0	7,1	7,2	7,1	7,0	6,2		6,1
		średnia mean	1,1	2,5	4,5	1,6	1,2	5,6	4,5	1,6		4,7
	300–400	3°–10°	5,8	6,1	6,3	6,5	6,7	6,6	6,0	5,7		
		10°–20°	2,6	4,1	5,2	5,6	6,2	6,1	5,1	3,5		
		> 20°	0,1	1,4	4,1	5,3	5,6	5,5	4,2	1,0		
		min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
		max	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3	7,2	7,2		7,0
		średnia mean	4,3	5,3	5,8	6,2	6,5	6,3	5,2	3,9		6,5
	400–500	3°–10°	6,2	6,4	6,6	6,8	6,9	6,9	6,6	6,2		
		10°–20°	3,3	4,9	5,6	6,2	6,6	6,5	5,7	4,5		
		> 20°	1,2	1,7	4,9	5,9	6,5	6,3	5,0	1,6		
		min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0		0,0
		max	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,4	7,3	7,2		7,1
		średnia mean	5,4	6,2	6,4	6,7	6,8	6,8	6,3	5,5		6,9

Podczas przesilenia letniego deklinacja wynosi  $+23,5^\circ$ , a Słońce osiąga wtedy najwyższe położenie nad horyzontem. Tego dnia łuk dziennej drogi Słońca na niebie jest najwyższy i najdłuższy w roku. Długi czas dopływu promieniowania słonecznego oraz duży kąt padania promieni słonecznych ( $\leq 63,3^\circ$ ) sprawiały, że dobowe sumy promieniowania w tym dniu były wysokie, a ich zróżnicowanie przestrzenne było znacznie mniejsze niż podczas przesilenia zimowego. Dobowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego podczas letniego przesilenia kształtowały się w przedziale wartości od 8,04 do 21,63 MJ·m<sup>-2</sup>, a średnia wartość na obszarze OPN wyniosła 20,45 MJ·m<sup>-2</sup>. Usłonecznienie możliwe podczas przesilenia letniego kształtowało się od 7 do 16 godzin, a wartość średnia dla obszaru OPN wyniosła 14,7 godziny.

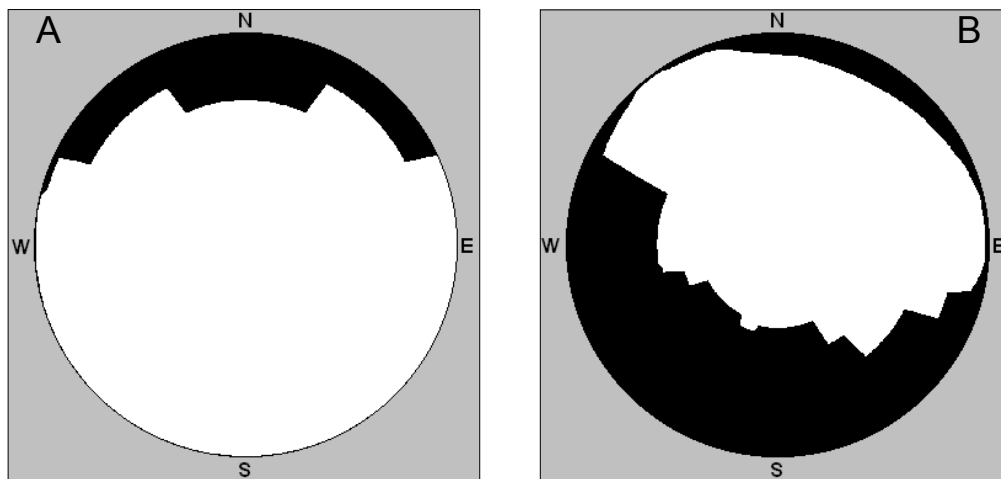
Fizyczne zasłonięcie horyzontu ma bardzo duży wpływ na kształtowanie się warunków radiacyjnych. Przy niskim położeniu Słońca w zimie (szczególnie rano i wieczorem) zasłonięcie horyzontu fizycznego jest bardzo istotnym czynnikiem ograniczającym dopływ promieniowania słonecznego. Efektem tego jest skrócenie dnia poprzez opóźnienie świtu i wcześniejsze zapadanie zmroku. Na poniższych rycinach przedstawiono zasłonięcie horyzontu dla wcześniej opisanych dwóch skrajnych pod względem radiacyjnym lokalizacji tj. nasłonecznionego stoku Góry Chełmowej (ryc. 3) i zacienionego wlotu Wąwozu Jamki do Doliny Sąpsowskiej (ryc. 4).



Tabela 6. Obliczone sumy usłonecznienia możliwego [godz.] podczas przesilenia letniego (22 czerwca) w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji w Ojcowskim Parku Narodowym

Table 6. Calculated sum of possible sunshine duration [h] for summer solstice (22 June) according to elevation, slope and aspect in the Ojców National Park

Okres Period	Wysokość Altitude	Nachylenie Slope	Ekspozycja – Aspect								Teren płaski Flat area ( $< 3^\circ$ )
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Letnie przesilenie – Summer solstice	200–300	3°–10°	14,0	13,4	13,1	13,4	13,5	13,0	12,7	13,0	
		10°–20°	14,3	13,3	12,3	13,0	13,4	12,9	12,3	13,1	
		> 20°	14,6	12,6	11,1	12,0	13,0	12,4	11,7	11,8	
		min	11,0	10,5	9,6	10,0	11,1	9,4	8,1	9,7	
		max	15,1	15,2	15,3	15,4	16,0	15,5	15,5	15,2	
		średnia mean	14,3	13,2	12,6	13,1	13,4	12,8	12,4	12,7	
	300–400	3°–10°	15,1	14,9	14,5	14,5	14,6	14,4	14,4	14,7	
		10°–20°	14,6	13,9	13,1	13,4	13,7	13,5	13,2	14,0	
		> 20°	14,2	12,7	11,7	12,5	12,7	12,4	11,8	12,6	
		min	9,3	8,9	7,7	7,8	9,5	8,2	8,5	8,5	
		max	16,3	16,2	16,4	16,4	16,5	16,4	16,1	16,0	
		średnia mean	14,9	14,5	13,9	14,1	14,2	13,8	13,3	14,0	
	400–500	3°–10°	15,5	15,2	14,8	14,8	14,8	14,8	14,9	15,2	
		10°–20°	15,1	14,4	13,7	13,9	13,9	13,9	13,8	14,7	
		> 20°	15,0	13,5	12,6	13,1	13,2	13,1	12,7	13,6	
		min	11,0	10,8	10,7	10,8	11,4	10,7	11,0	11,1	
		max	16,1	16,0	16,0	16,2	16,2	16,1	16,0	16,0	
		średnia mean	15,4	15,1	14,6	14,7	14,7	14,6	14,4	14,9	



Ryc. 3. Zasłonięcie horyzontu nasłonecznionego stoku Góry Chelmowej (A) i zacienionego wlotu Wąwozu Jamki do Doliny Saspowskiej (B)

Fig. 3. Horizon obstruction of the sun-lit slope of Chelmowa Góra (A) and of the shaded Wąwóz Jamki inlet to the Saspowska Valley (B)



Ryc. 4. Dolina Sąspowska poniżej wylotu Wąwozu Jamki

Fig. 4. Sąspowska Valley near the inlet Wąwóz Jamki

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania dopływu promieniowania słonecznego na obszarze OPN wykazały dużą zmienność przestrzenną jego rozkładu. Silne urzeźbienie terenu, urozmaicenie form, ekspozycji i spadków, a także znaczne deniwelacje sprawiały, że na stosunkowo małej przestrzeni występowało duże zróżnicowanie warunków insolacyjnych. Różnice w dopływie promieniowania słonecznego powodowało kształtowanie się różnorodnych topoklimatów, co w krajobrazie parku zaznacza się dużą mozaiką zespołów roślinnych, o często zupełnie odmiennych wymogach siedliskowych.

Z przeprowadzonych analiz wynikało, że najwięcej promieniowania słonecznego, (średnio o 13% więcej niż wynosi średnia obszarowa) docierało do miejsc charakteryzujących się małym zasłonięciem horyzontu, a więc wierzchołków i wysoko położonych stoków i zboczy o ekspozycji południowej, południowo-wschodniej oraz południowo-zachodniej Wyżyny Krakowskiej. Najmniej energii (średnio o 73% mniej niż wynosi średnia obszarowa) otrzymują natomiast obszary nisko położone, cechujące się bardzo dużym zasłonięciem horyzontu oraz miejsca o ekspozycji północnej, północno-zachodniej i północno-wschodniej.

Z porównania dwóch charakterystycznych dni roku pod względem czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego stwierdzono, że podczas przesilenia zimowego obszar OPN otrzymuje średnio 25 razy mniej energii niż podczas przesilenia letniego, co stanowi 4% wartości sumy dobowej podczas przesilenia letniego.

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”, **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. *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.

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

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.

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

WODGiK, *Numeryczny model terenu OPN o rozdzielczości przestrzennej 20 m·piksel<sup>-1</sup>*, 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 zobrażeń teledetekcyjnych*. „Pamiętnik Puławski”, **144**: 155–167.

## SUMMARY

The first analysis of spatial variations in the radiation conditions of the ONP was a map of relative insolation made using Strużka's method (Klein 1974). Thanks to the recent years' rapid development of the Geographic Information Systems (GIS) computer tools and satellite remote sensing it was possible to conduct more detailed investigations into spatial variations in the components of the radiation balance. The maps produced in this way for the ONP show spatial variations in the total solar radiation ( $K\downarrow$ ) (Wojkowski 2006) and the radiation balance in full spectral range.

The analysis of spatial variations in insolation conditions in the ONP was made using the numerical terrain model – NMT (WODGiK). Based on the NMPT, modelling with a spatial resolution of 20 m·piksel<sup>-1</sup> of the  $K\downarrow$  influx and possible sunshine duration was made. Modelling of the  $K\downarrow$  influx was made using the algorithm proposed by Rich (1994). The possible sunshine duration was calculated for each day on the basis of the apparent

movement of the Sun over a given elementary raster field of the numerical terrain model, and then it was added up to obtain the annual value. Modelling was made for the period of the year and for the days marked by their duration, that is the winter solstice (22 December) and the summer solstice (22 June).

The diversified relief of the ONP causes a big differentiation in the solar energy flux reaching the Earth's surface. The established models of the  $K_{\downarrow}$  spatial distribution and possible sunshine duration provide a proof of this variations (Fig. 1 and 2). Annual  $K_{\downarrow}$  totals were within the value range from 1177 to 4348  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , and the mean annual value for the discussed area was 3721  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . The annual total of possible sunshine duration was in similarly broad value ranges and was from 1181 to 4377 hours and 4045 hours on average.

Based on calculations it was determined that the least amount of energy is received by the places situated below 300 m above sea level with a north, north-west and north-east aspect. During the year, north-facing slopes receive, on average, 18% less energy than south-facing slopes. Mean differences in the annual  $K_{\downarrow}$  total between north-facing and south-facing slopes are 733  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , and as concerns the possible sunshine duration annual total they reach 335 hours.

During summer south-facing slopes receive, on average, 5% more  $K_{\downarrow}$  than flat terrains. When the Sun's position is low, as it is in winter, these differences reach even above 30%.

In order to obtain quantitative information on insolation conditions of the ONP in relation to altitude, slope and the geographical location of the area, three altitude classes were established (below 300 m, 300–400 m, and over 400 m above sea level), and then each of the three classes was divided into four slope classes (below 3°, 3°–10°, 10°–20°, and above 20°), and into eight classes of the area's aspect (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

The performed analyses show that most  $K_{\downarrow}$  (on average 13% more than the area's mean) reaches places marked by a small horizon obstruction, that is hilltops and high-lying hillsides and slopes with a south, south-east and south-west aspect. The least amount of energy (on average 73% less than the area's mean) is received by low-lying areas with a very big horizon obstruction, and places with a north, north-west and north-east aspect.

The comparison of two days of the year distinguished by the duration of direct solar radiation suggest that during the winter solstice the ONP receives, on average, twenty-five times less energy than during the summer solstice, which makes 4% of the summer solstice diurnal total.