



---

Małgorzata FALARZ, Zbigniew CAPUTA  
Wydział Nauk o Ziemi UŚ – Sosnowiec  
Józef PARTYKA  
Ojcowski Park Narodowy

**REKONSTRUKCJA CZASU ZALEGANIA POKRYWY ŚNIEŻNEJ  
NA PODSTAWIE WARTOŚCI ALBEDO  
(NA PRZYKŁADZIE POMIARÓW W POŁUDNIOWEJ CZĘŚCI  
WYŻYNY KRAKOWSKO-CZĘSTOCHOWSKIEJ)**

RECONSTRUCTION OF SNOW COVER DURATION USING SOLAR  
RADIATION VALUES (ON THE EXAMPLE OF MEASUREMENTS  
IN SOUTHERN KRAKÓW-CZĘSTOCHOWA UPLAND)

**Cel pracy, dotychczasowy stan badań**

Stan pokrywy śnieżnej jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania bezpośredniego lub pośredniego wielu czynników atmosferycznych i elementów meteorologicznych, takich jak cyrkulacja atmosferyczna, promieniowanie słoneczne, temperatura powietrza, opady atmosferyczne i ich rodzaj, usłonecznienie itd. Z tego powodu wieloletnie zmiany pokrywy śnieżnej stanowią dobry, kompleksowy wskaźnik zmian i zmienności klimatu w okresie zimowym. Duże znaczenie w kształtowaniu stanu i zmian wieloletnich pokrywy śnieżnej w środkowej Europie ma cyrkulacja atmosfery (Bednorz, 2011). Obecność lub brak pokrywy śnieżnej wywiera wpływ na niektóre dziedziny działalności człowieka, zwłaszcza takie jak rolnictwo, komunikacja oraz rekreacja i sporty zimowe. Ma również duże znaczenie w bilansie hydrologicznym, a dzięki wysokim wartościom albedo wpływa znacząco na saldo promieniowania, stanowiąc aktywny czynnik ochładzający (Lockwood, 1984).

Wydaje się zatem, że poznanie warunków niwalnych i ich zróżnicowania w terenie o bardzo urozmaiconej rzeźbie jest istotne. Jako główny cel opracowania wybrano zagadnienia metodyczne – wypracowanie metody rekonstrukcji czasu zalegania pokrywy śnieżnej na podstawie wyników rejestracji promieniowania słonecznego w sytuacji, gdy brak jest pomiarów pokrywy śnieżnej. Za cel poznawczy natomiast przyjęto porównanie czasu zalegania pokrywy śnieżnej w różnych formach terenu (dno doliny i wierzchowina) i na różnych wysokościach nad poziomem morza. Badania zostały przeprowadzone na przykładzie warunków niwalnych południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej – w dolinie Prądnika w Ojcowskim Parku Narodowym (OPN).

Warunki śnieżne doliny Prądnika zostały opisane już w latach 1970. przez J. Kleina (1974) na podstawie pomiarów prowadzonych w latach 1964-1967. Znacznie dłuższą serię pomiarową przeanalizowali E. Brzeźniak i J. Partyka (2008) oraz J. Wojkowski i J. Partyka (2009), opierając się na wynikach codziennych pomiarów pokrywy śnieżnej w dnie doliny Prądnika (Park Zamkowy) rozpoczętych w roku 1990. J. Wojkowski i J. Partyka (2009) dokonali również wstępnych porównań warunków niwalnych na stacji w dnie doliny Prądnika i stacji w pobliżu willi „Pod Berłem”, zlokalizowanej na północno-wschodnim zboczu doliny, ok. 40 m ponad jej dnem (pomiarzy w latach 1989-1992). Przestrzenne zróżnicowanie czasu zalegania pokrywy śnieżnej w OPN przedstawił J. Wojkowski (2009), wykorzystując, oprócz pomiarów w dnie doliny, metody GIS oparte na wcześniej opublikowanych równaniach zależności temperatury powietrza od wysokości nad poziomem morza i zależności pokrywy śnieżnej od temperatury powietrza w różnych formach terenu. Rezultaty tych badań pokazują, że średnia w sezonie zimowym liczba dni z pokrywą śnieżną zmienia się w granicach OPN od 48 do 116. Największe różnice w czasie zalegania pokrywy śnieżnej obserwuje się między stokami o ekspozycji południowej a wklęsłymi formami terenowymi (dna dolin, wąwozy, jary), gdzie pokrywa śnieżna zalega najdłużej (Wojkowski, 2009).

Suchy i czysty śnieg odbija 80-95% promieniowania słonecznego. Na początku okresu topnienia albedo śniegu wynosi 60-70%, a pod koniec tego okresu 30-45% (Chodakow, 1971). Pomiarzy aktynometryczne, dające możliwość obliczenia wartości albedo, wydają się być dobrą podstawą do zrekonstruowania czasu zalegania pokrywy śnieżnej. Rekonstrukcji pokrywy śnieżnej dokonywano dotąd m.in. na podstawie wartości temperatury powietrza i opadów śniegu, stosując przy tym różne metody (Brown, Goodison, 1996; Falarz, 2000, 2000/2001, 2002). Podejmowano również próby rekonstrukcji warunków niwalnych (w tym równoważnika wodnego śniegu oraz zdarzeń lawinowych) z wykorzystaniem metod teledetekcji satelitarnej (Durand i in., 2008; Gafurov i in., 2015) oraz pomiarów dendrochronologicznych (Timilsena, Piechota, 2008; Laxton, Smith, 2009).

Badania dopływu promieniowania słonecznego są na terenie OPN prowadzone od roku 2008 za pomocą dwóch automatycznych stacji aktynometrycznych,

zlokalizowanych w dnie doliny (Park Zamkowy w Ojcowie) i na wierzcholinie (Lepianka Czajowska). Wyniki tych badań wskazują na dużą zmienność przestrzenną wartości strumieni promieniowania i bilansu promieniowania w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, związanej z silnym urzeźbieniem terenu, urozmaiceniem form, ekspozycji i spadków oraz znacznymi deniwelacjami na względnie niewielkim obszarze (Caputa, Leśniok, 2002; Wojkowski, Caputa, 2009, 2016; Caputa, 2015; Caputa, Wojkowski, 2015). Zmienne warunki insolacyjne wpływają natomiast na temperaturę powietrza i gleby (Caputa, Wojkowski, 2013).

Znaczenie promieniowania w ablacji pokrywy śnieżnej określili m.in. *Leathers* i współautorzy (2004) na podstawie badań w Appalachach. Badano również wpływ topnienia pokrywy śnieżnej na bilans radiacyjny powierzchni Ziemi (Stone i in., 2002).

Pomiary pokrywy śnieżnej w OPN poza dnem doliny były wykonywane w bardzo krótkich, 3-4 letnich okresach. Po roku 1967 jednoczesne całosezonowe pomiary niwalne w różnych formach terenu obejmują zaledwie 2 lata. Wynikają stąd trudności w porównaniu warunków śnieżnych w urozmaiconym wysokościowo i geomorfologicznie terenie. Rekonstrukcja czasu zalegania pokrywy śnieżnej na podstawie pomiarów aktynometrycznych na wierzcholinie OPN pozwoli na takie porównanie, umożliwi także zestawienie otrzymanych wyników z czasem zalegania pokrywy śnieżnej w OPN przedstawionym przez J. Wojkowskiego (2009) na podstawie modelowania GIS.

## Dane i metoda pracy

W opracowaniu wykorzystano dzienne i terminowe dane wartości albedo ( $\alpha$ ), wyliczonego jako wyrażony w procentach iloraz krótkofalowego promieniowania słonecznego odbitego  $K\uparrow$  i promieniowania całkowitego  $K\downarrow$  za okres 2008-2014. Pomiary aktynometryczne były prowadzone w ramach projektu badawczego MNiSW nr N306 044 32/3178 realizowanego w latach 2007–2010 i kontynuowane po jego zakończeniu (Caputa, Partyka, 2009). Za pomocą pyranometru CM3 rejestrowano strumienie promieniowania słonecznego na dwóch stacjach meteorologicznych: 1) stacji Park Zamkowy (PZ), położonej w dnie wąskiej i głębokiej doliny Prądnika o przebiegu południkowym ( $\varphi = 50^{\circ}12'35''N$ ,  $\lambda = 19^{\circ}49'44''E$ , 322 m n.p.m.) i 2) stacji Lepianka Czajowska (LCZ), położonej na wierzcholinie Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, w odległości ok. 3,5 km w linii prostej od stacji PZ i 160 m wyżej ( $\varphi = 50^{\circ}12'23''N$ ,  $\lambda = 19^{\circ}47'04''E$ , 483 m n.p.m.). Z przyczyn technicznych (awaria stacji) nie zarejestrowano strumienia  $K\downarrow$  na stacji LCZ w okresach: 1 I – 31 III 2008; 18 IX – 15 XII 2010; 28 V – 18 VI 2011 oraz 14 IV – 14 X 2012, wobec czego albedo na tej stacji w tym czasie nie mogło zostać wyliczone. Wzięto również pod uwagę dobowe wartości grubości pokrywy

śnieżnej mierzone na stacji PZ w latach 2008-2014. Pomiaru pokrywy śnieżnej na stacji LCZ były w badanym okresie prowadzone jedynie fragmentarycznie, a ich jakość w niektórych okresach budzi wątpliwości. Wzięto je pod uwagę, w miarę możliwości, jedynie w wymienionych okresach, w których brak było pomiarów aktynometrycznych na tej stacji. W pozostałym okresie dane dotyczące istnienia lub braku pokrywy śnieżnej na stacji LCZ zrekonstruowano.

Rekonstrukcję czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji LCZ oparto na wiedzy na temat gwałtownego wzrostu wartości albedo po utworzeniu się pokrywy śnieżnej na gruncie i gwałtownego spadku tych wartości po zaniku pokrywy śnieżnej (Kożuchowski, 2011). Wartości albedo uśrednione za cały okres badań są bardzo podobne na obu stacjach: 30% w PZ i 29% w LCZ. Upoważnia to do zastosowania granicznych wartości albedo otrzymanych na podstawie danych ze stacji PZ do warunków położonej w bardzo niewielkiej odległości stacji w LCZ. Zasadniczym etapem pracy było ustalenie wartości progowej albedo, która służyłaby rozgraniczeniu przypadków obecności pokrywy śnieżnej na gruncie i jej braku. Rekonstrukcję liczby dni z pokrywą śnieżną w LCZ wykonano w trzech etapach:

1) zbadano częstość występowania wartości albedo w przedziałach osobno w dniach z pokrywą śnieżną i dniach bez pokrywy śnieżnej na stacji PZ;

2) przeprowadzono symulacje czasu zalegania pokrywy śnieżnej (liczba dni) na stacji PZ, stosując różne wartości progowe (dolna granica) albedo dziennego i albedo z godzin 6-9 UTC;

3) wartości graniczne albedo wyznaczone w poprzednim etapie badań stały się podstawą rekonstrukcji czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji LCZ; za dzień z pokrywą śnieżną przyjęto taki, w którym albedo było większe od ustalonych w drugim etapie wartości granicznych; przyjęto ponadto, że pokrywa śnieżna może wystąpić między 13 października (najwcześniejszy pierwszy opad śniegu) a 30 kwietnia (20 kwietnia zanotowano najpóźniejsze wystąpienie pokrywy śnieżnej w Dolinie Prądnika, a 26 kwietnia najpóźniejszy opad śniegu; Wojkowski, Partyka, 2009).

Po dokonaniu rekonstrukcji warunków niwalnych w LCZ porównano miesięczną i sezonową liczbę dni z pokrywą śnieżną na stacji w dolinie Prądnika (PZ) i na wierzchowinie (LCZ).

### **Rekonstrukcja czasu zalegania pokrywy śnieżnej na wierzchowinie**

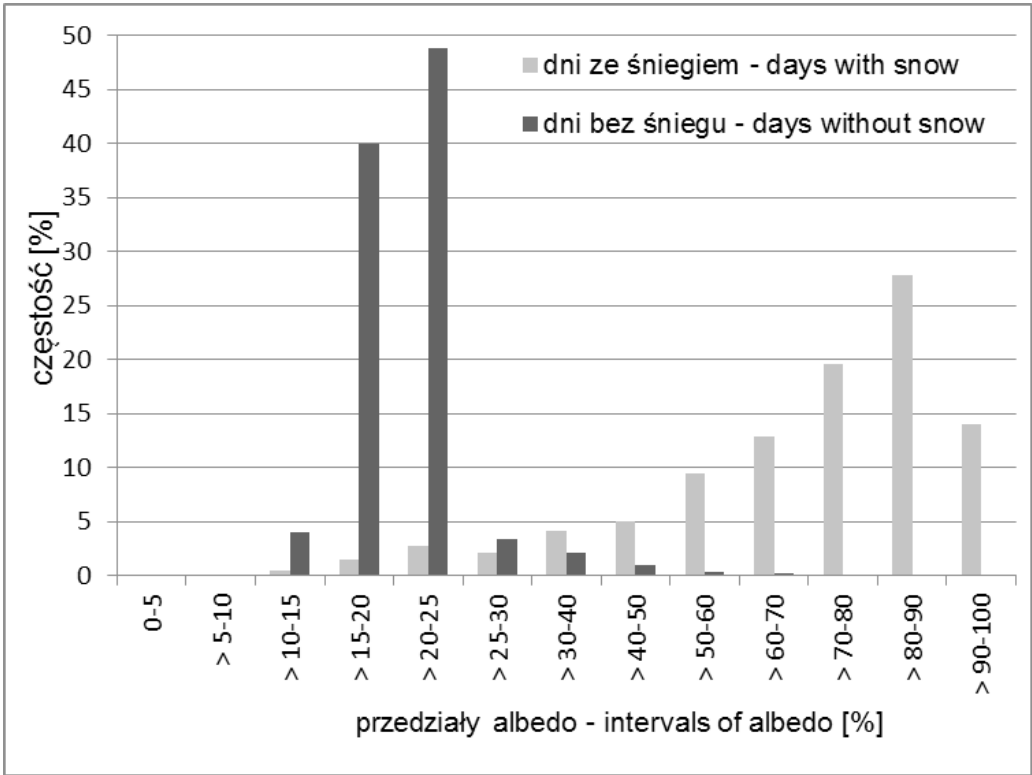
W pierwszym etapie rekonstrukcji liczby dni z pokrywą śnieżną okazało się, że wartości albedo obliczone dla całego dnia są niewystarczające do tego typu badań z uwagi na względnie dużą częstość małych wartości albedo, typowych dla gruntu niepokrytego śniegiem, w dniach, gdy rzeczywiście pokrywa śnieżna na stacji PZ była notowana (3,4% dni z pokrywą śnieżną z albedo  $\leq 20\%$  i 6,8%

dni z pokrywą śnieżną z albedo  $\leq 25\%$ ; tab. 1, rys. 1). Jest to zapewne wynikiem zaniku lub pojawienia się pokrywy śnieżnej w ciągu dnia lub nocy, podczas gdy w terminie pomiaru pokrywy śnieżnej (6 UTC) warstwa śniegu jeszcze pokrywała grunt lub jeszcze się nie utworzyła. Dzienna wartość albedo jest wówczas wypadkową wysokich wartości z jednej części dnia i niskich – z innej. Uwzględniono zatem wartości albedo z różnych przedziałów czasowych w ciągu dnia: 8-9, 6-9, 9-10, 6-10, 11-13 i 14-19 UTC. Uwzględnienie albedo z godzin porannych dało lepsze rezultaty w porównaniu z wartościami dotyczącymi całego dnia. W przypadku albedo z godzin 6-9 UTC wartości  $\leq 20\%$  stanowią tylko 2% wszystkich dni z pokrywą śnieżną (4,7% dni z albedo  $\leq 25\%$ ).

Tabela 1. Częstość (%) wartości albedo ( $\alpha$ ; w %) dziennego i w wybranych przedziałach czasowych dnia (godziny UTC) w dniach z pokrywą śnieżną i bez pokrywy śnieżnej na stacji PZ

Table 1. Frequency (%) of albedo values ( $\alpha$ ; in %) for a day and for selected periods of the day (hours in UTC) for days with and without snow cover in PZ station

$\alpha$ [%]	W dniach z pokrywą śnieżną For days with snow cover					W dniach bez pokrywy śnieżnej For days without snow cover				
	$\alpha$ dzien. daily $\alpha$	$\alpha$ 6-9 UTC	$\alpha$ 9-10 UTC	$\alpha$ 11-13 UTC	$\alpha$ 14-19 UTC	$\alpha$ dzien. daily $\alpha$	$\alpha$ 6-9 UTC	$\alpha$ 9-10 UTC	$\alpha$ 11-13 UTC	$\alpha$ 14-19 UTC
0-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
> 5-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,2	1,3
> 10-15	0,4	0,5	0,7	1,6	2,9	3,4	4,0	4,7	4,6	8,5
> 15-20	3,0	1,5	3,2	3,4	3,7	41,6	39,9	45,3	43,7	48,1
> 20-25	3,4	2,7	3,4	3,4	4,3	52,0	48,8	45,8	49,6	41,1
> 25-30	3,2	2,2	2,0	3,9	3,5	2,3	3,4	2,8	1,8	0,7
> 30-40	5,9	4,2	5,2	4,6	4,3	0,6	2,1	0,6	0,1	0,1
> 40-50	6,1	5,1	4,8	6,8	5,4	0,1	1,1	0,5	0,0	0,0
> 50-60	9,6	9,5	11,3	8,9	8,1	0,0	0,3	0,2	0,1	0,0
> 60-70	15,2	12,9	14,7	16,9	12,4	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0
> 70-80	23,5	19,6	22,9	22,8	19,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
> 80-90	21,7	27,8	20,1	19,8	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 90-100	8,0	14,0	11,6	7,8	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
suma total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
śr. $\alpha$ average $\alpha$	66	70	67	65	66	20	21	20	20	19
min. $\alpha$ minimum $\alpha$	13	14	12	11	11	7	7	9	7	4
max. $\alpha$ maximum $\alpha$	97	96	97	98	98	63	76	69	60	72



Rys. 1. Częstość wartości albedo (%) w dniach ze śniegiem i bez śniegu w godzinach 6-9 UTC na stacji PZ

Fig. 1. Frequency of albedo values (%) for days with and without snow cover in 6-9 UTC in PZ station

W dniach z pokrywą śnieżną średnia wartość albedo wynosi w różnych przedziałach czasowych doby od 65 do 70%, a maksimum notowane w przypadkach śniegu świeżo spadłego 96-98% (tab. 1). W godzinach 6-9 UTC w dniach z pokrywą śnieżną największą częstością występowania (28%) cechuje się albedo o wartościach 80-90% (rys. 1). W dniach bez pokrywy śnieżnej największą częstością, wynoszącą nieco poniżej 50%, cechuje się albedo w zakresie 20-25%, a albedo w przedziale 15-25% obejmuje prawie 90% dni bez śniegu. Najmniejsze albedo w dniach bez śniegu wynosiło 4-9%, a największe 63-76% (tab. 1). Duże wartości albedo w dniach bez pokrywy śnieżnej mogą wynikać z pokrycia gruntu płatami śniegu, niezaliczanymi do pokrywy śnieżnej.

W drugim etapie rekonstrukcji wyniki symulacji czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji PZ dla różnych wartości granicznych albedo dziennego i albedo z godzin porannych (6-9 UTC) porównano z rzeczywistą liczbą dni z pokrywą śnieżną na tej stacji (tab. 2). Do następnego etapu badań wybrano graniczne wartości albedo, dla których symulacja dała średnią roczną liczbę dni z pokrywą

Tabela 2. Symulacje czasu zalegania pokrywy śnieżnej (liczba dni; PSN) na stacji PZ dla różnych wartości granicznych albedo dobowego i albedo z godzin 6-9 UTC. Wyniki porównano z rzeczywistą liczbą dni z pokrywą śnieżną na stacji PZ ( $r$  – różnica między symulowaną i rzeczywistą liczbą dni z pokrywą śnieżną w danym roku). Pogrubiono kolumny z wartościami  $\alpha$  wybranymi do dalszych etapów rekonstrukcji

Table 2. Simulations of snow cover duration (number of days; PSN) in PZ station for different limit values of daily albedo and albedo for 6-9 UTC. The results were compared with a real number of days with snow cover in PZ station ( $r$  – a difference between simulated and real a number of days with snow cover in a year). Columns with  $\alpha$  values selected for further stages of the reconstruction are bolded

Rok Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Suma Total	Średnia Average
PSN rzeczywista real PSN	50	95	118	74	89	105	30	561	80
PSN dla $\alpha$ dob $\geq 25\%$ PSN for daily $\alpha \geq 25\%$	49	93	124	73	91	112	37	579	83
$r$	-1	-2	6	-1	2	7	7	18	3
<b>PSN dla <math>\alpha</math> dob <math>\geq 26\%</math></b> <b>PSN for daily <math>\alpha \geq 26\%</math></b>	<b>48</b>	<b>90</b>	<b>119</b>	<b>68</b>	<b>88</b>	<b>111</b>	<b>33</b>	<b>557</b>	<b>80</b>
$r$	<b>-2</b>	<b>-5</b>	<b>1</b>	<b>-6</b>	<b>-1</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>-4</b>	<b>0</b>
PSN dla $\alpha$ dob $\geq 27\%$ PSN for daily $\alpha \geq 27\%$	47	90	116	68	86	109	30	546	78
$r$	-3	-5	-2	-6	-3	4	0	-15	-2
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 25\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 25\%$	59	104	126	93	97	127	54	660	95
$r$	9	9	8	19	8	22	24	99	15
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 26\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 26\%$	58	101	124	89	96	122	52	642	92
$r$	8	6	6	15	7	17	22	81	12
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 30\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 30\%$	55	97	122	78	89	117	42	600	86
$r$	5	2	4	4	0	12	12	39	6
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 31\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 31\%$	52	96	122	75	89	115	40	589	84
$r$	2	1	4	1	0	10	10	28	4
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 33\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 33\%$	51	95	121	70	88	112	35	572	82
$r$	1	0	3	-4	-1	7	5	11	2
<b>PSN dla <math>\alpha</math> 6-9 UTC <math>\geq 34\%</math></b> <b>PSN for <math>\alpha</math> in 6-9 UTC <math>\geq 34\%</math></b>	<b>51</b>	<b>93</b>	<b>121</b>	<b>69</b>	<b>88</b>	<b>110</b>	<b>32</b>	<b>564</b>	<b>81</b>
$r$	<b>1</b>	<b>-2</b>	<b>3</b>	<b>-5</b>	<b>-1</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
PSN dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq 35\%$ PSN for $\alpha$ in 6-9 UTC $\geq 35\%$	50	92	121	65	88	109	31	556	79
$r$	0	-3	3	-9	-1	4	1	-5	-1



śnieżną najbardziej zbliżoną do rzeczywistej; były to wartości  $\geq 26\%$  w przypadku albedo dziennego i  $\geq 34\%$  w przypadku albedo z godzin 6-9 UTC. W poszczególnych latach różnica między rzeczywistą liczbą dni z pokrywą śnieżną na stacji PZ a liczbą dni wynikającą z rekonstrukcji waha się w granicach  $\pm 6$  dni w roku w przypadku wymienionej wartości granicznej albedo dziennego i  $\pm 5$  wartości granicznej albedo z godzin 6-9 UTC.

Wyniki rekonstrukcji pokrywy śnieżnej na stacji LCZ wraz z zestawieniem rzeczywistego czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji PZ podano w tab. 3 (wyłącznie z okresu, w którym nie było braków w pomiarach aktynometrycznych). Wstępne porównanie dotyczące dwóch uwzględnionych stacji prowadzi do wniosku, że w PZ pokrywa śnieżna zalega o kilka do kilkunastu dni dłużej w sezonie zimowym niż w LCZ. Różnice między wartościami rekonstruowanej rocznej liczby dni z pokrywą śnieżną na stacji LCZ otrzymane na podstawie albedo dziennego i albedo z godzin 6-9 są niewielkie i wynoszą maksymalnie 4 dni (w 2010 r.). Do następnego etapu badań wzięto pod uwagę rekonstruowane wartości dotyczące czasu zalegania pokrywy śnieżnej uzyskane na podstawie wartości albedo z godzin bliskich terminowi obserwacji (6-9 UTC).

Tabela 3. Roczna liczba dni z pokrywą śnieżną (PSN) rekonstruowana dla stacji LCZ na podstawie albedo dziennego i albedo z godzin 6-9 UTC oraz jej porównanie z rzeczywistą ich liczbą na stacji PZ (uwzględniono tylko okres bez braków pomiarów promieniowania na stacji LCZ)

Table 3. Annual number of days with snow cover (PSN) reconstructed for the LCZ station on the basis of daily albedo and albedo for 6-9 UTC and a comparison of it with a real yearly number of days in PZ (only the period of no lacking radiation measurements in LCZ station was taken into account)

Rok Year	PSN w LCZ rekonstruowana dla $\alpha$ 6-9 UTC $\geq$ 34%	PSN w LCZ rekon- struowana dla $\alpha$ dziennego $\geq$ 26%	Rzeczywista PSN w PZ w okresie bez braków pomiarów promieniowania w LCZ	Różnica LCZ- -PZ dla $\alpha$ 6-9 UTC	Różnica LCZ-PZ dla $\alpha$ dziennego
	PSN in LCZ reconstructed for $\alpha$ 6-9 UTC $\geq$ 34%	PSN w LCZ recon- structed for daily $\alpha$ $\geq$ 26%	Real PSN in PZ for the period of no lacking radiation measurements in LCZ	Difference LCZ-PZ for $\alpha$ 6-9 UTC	Difference: LCZ-PZ for daily $\alpha$
2008	17	19	16	1	3
2009	93	93	96	-3	-3
2010	89	93	97	-8	-4
2011	59	61	74	-15	-13
2012	79	81	89	-10	-8
2013	103	101	105	-2	-4
2014	24	24	30	-6	-6



## Czas zalegania pokrywy śnieżnej w dnie doliny i na wierzchowinie

Średnia roczna liczba dni z pokrywą śnieżną w latach 2008-2014 wynosiła 80 dni w PZ (dane obserwacyjne) i 75 dni w LCZ (dane rekonstruowane i obserwacyjne; tab. 4). Pokrywa śnieżna była na obu stacjach obserwowana od października (średnio 1 dzień) do kwietnia (średnio 2 dni); najdłużej zalegała w styczniu: średnio 25 dni w PZ i 24 dni w LCZ. W listopadzie, gdy pokrywa śnieżna się tworzy, więcej dni ze śniegiem na gruncie obserwuje się na wierzchowinie (w LCZ średnio 3), natomiast od grudnia do marca pokrywa śnieżna zalega dłużej w dnie doliny (PZ). Różnica w czasie zalegania pokrywy śnieżnej między dnem doliny Prądnika a wierzchowiną południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej w poszczególnych miesiącach zwiększa się w miarę posuwania się ku końcowi sezonu zimowego, wynosi mianowicie 1 dzień w styczniu, 2 dni w lutym i 3 dni w marcu.

Tabela 4. Średnia miesięczna i roczna (2008-2014) liczba dni z pokrywą śnieżną na stacjach PZ (dane obserwacyjne) i LCZ (dane rekonstruowane i obserwacyjne)

Table 4. Monthly and annual average (2008-2014) number of days with snow cover in PZ (observation data) and LCZ (reconstructed and observation data) stations

Stacja/miesiąc Station/month	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	Rok Year
PZ	0	0	1	2	14	25	22	14	2	0	0	0	80
LCZ	0	0	1	3	13	24	20	11	2	0	0	0	75

## Dyskusja wyników i wnioski końcowe

W pracy posłużono się wartościami albedo do rekonstrukcji liczby dni z pokrywą śnieżną na wierzchowinie Wyżyny Krakowskiej. Wyznaczone w tym celu wartości graniczne albedo z okresu całego dnia (26%) i godzin 6-9 UTC (34%) różnią się o kilka punktów procentowych. Jest to wynikiem zależności wielkości albedo od wysokości Słońca: albedo zmniejsza się wraz ze wzrostem kąta padania promieni słonecznych, a różnice sięgają nawet kilkunastu procent (Kozuchowski, 2011). Dlatego wartość graniczna obliczona dla okresu całego dnia jest mniejsza od wartości z godzin porannych.

Różnice w czasie zalegania pokrywy śnieżnej między dnem doliny a wierzchowiną są wypadkową oddziaływania dwóch czynników: wysokości nad poziomem morza i formy terenu. Na wierzchowinie, położonej o 160 m wyżej niż dno doliny, opady mogą wcześniej i częściej występować w postaci śniegu, co sprzyja wcześniejszemu tworzeniu się tutaj pokrywy śnieżnej jesienią. Wyrazem tego jest

większa na wierzchowinie niż w dolinie liczba dni z pokrywą śnieżną w listopadzie. Znajduje to również potwierdzenie w wartościach salda promieniowania krótkofalowego (Caputa, 2016a). Zanikanie pokrywy śnieżnej wiosną odbywa się natomiast szybciej na otwartej powierzchni wierzchowiny, głównie ze względu na większy dopływ promieniowania niż do wklęsłych form terenu (Caputa, 2016b). W osłoniętym dnie doliny przy ujemnym bilansie promieniowania (w nocy oraz zimą) ustaje turbulencyjna wymiana ciepła jawnego, tworzą się zastoiska chłodnego powietrza, potęgowane spływającym tutaj w godzinach nocnych chłodniejszym powietrzem z wierzchowiny. Przy utrzymującym się ujemnym bilansie promieniowania i ograniczonej przez wąską formę terenu wymianie powietrza proces wyziębienia rozwija się, tworząc warunki do skrajnie niskiej temperatury powietrza na dnie zbiorników chłodu i do sytuacji inwersyjnych (Niedźwiedz, 2009; Hoch, Whiteman, 2010; Kożuchowski, 2012). Podobne procesy obserwuje się w innych dużych wklęsłych formach terenu (Litschmann i in., 2012). Sprzyja to spowolnieniu procesu topnienia pokrywy śnieżnej i długiemu jej zaleganiu na wiosnę w dnie doliny Prądnika. Wyrazem tego jest przewaga czasu zalegania pokrywy śnieżnej w PZ nad LCZ od grudnia do marca, pomimo położenia PZ na mniejszej wysokości nad poziomem morza. Można zatem powiedzieć, że wysokość nad poziom morza odgrywa większą rolę w tworzeniu się pokrywy śnieżnej, forma terenu ma natomiast większe znaczenie w procesie zanikania śniegu wiosną. Ma to wpływ na występowanie kontrastów mikroklimatycznych i kształtowanie się różnorodnych topoklimatów (Klein, 1992; Bokwa i in., 2008; Bartuś, 2014).

Średni czas zalegania pokrywy śnieżnej w sezonie zimowym na stacji PZ był w latach 2008-2014 krótszy o ponad 10 dni niż wyliczony przez J. Wojkowskiego i J. Partykę (2009) w okresie 1990-2009. Odczytana z mapy skonstruowanej przez J. Wojkowskiego (2009) liczba dni z pokrywą śnieżną wynosi 85-90 dni w LCZ i 90-95 dni w PZ. Są to wartości większe o co najmniej 10 od wyliczonych w niniejszym artykule. Obydwa zestawienia świadczą o szczególnie łagodnych warunkach klimatycznych w badanym okresie.

Materiały wpłynęły do redakcji 23 VIII 2016.

#### Literatura

- Bartuś T., 2014, *Model zmienności topoklimatycznej rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 24, 25–46.
- Bednorz E., 2011, *Synoptic conditions of snow cover occurrence in central European lowlands*. *Int. Journal of Climatology*, 31 (8), 1108–1118; DOI: 10.1002/joc.2130.
- Bokwa A., Caputa Z., Durło G., Maciejowski W., Wojkowski J., 2008, *Meso- and microclimatic conditions in the southern part of the Cracow-Częstochowa Upland*. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 11(3), #03.

- Brown R.D., Goodison B.E., 1996, *Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915–1992*. J. Climate, 9, 1299–1318.
- Brzeźniak E., Partyka J., 2008. *Warunki klimatyczne Ojcowskiego Parku Narodowego*, [w:] A. Klasa, J. Partyka (red.) *Monografia Ojcowskiego Parku Narodowego. Przyroda*. Wyd. OPN, Ojców, 121–136.
- Caputa Z., 2015, *Dopływ promieniowania słonecznego do wklęsłych form terenu południowej części Wyżyny Krakowskiej w latach 2008–2014*. Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 19, 195–218.
- Caputa Z., 2016a, *Net solar radiation in the southern part of the Kraków-Częstochowa Upland in the period of 2008–2014*, Acta Agrophysica, 23 (2), 147–161.
- Caputa Z., 2016b, *Zróżnicowanie dopływu promieniowania słonecznego do południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej w latach 2008–2014*. Prace i Studia Geograficzne, 147 (4).
- Caputa Z., Leśniok M., 2002, *Radiation balance in the area of Ojców National Park*, [w:] V.N. Andrejchuk, V.P. Korzhyk (red.) *Regional aspects of land use*. Kharkivski Politekhnichny Uniwersytet, Uniwersytet Śląski, Chernivtsy-Sosnowiec, 24–34.
- Caputa Z., Partyka J. (red.), 2009, *Współczesne zmiany środowiska przyrodniczego w różnych warunkach topoklimatycznych Wyżyny Krakowskiej na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 19: 332.
- Caputa Z., Wojkowski J., 2013: *Wpływ promieniowania słonecznego na temperaturę powietrza i gleby na Wyżynie Krakowskiej*. Prądnik. Prace Muzeum Szafera, 23, 65–74.
- Caputa Z., Wojkowski J., 2015. *Structure of radiation balance in diverse types of relief*. Annals of Warsaw University of Life Sciences, 47, 4, 343–354.
- Chodakow W.G., 1971, *Śniegi i lody Ziemi*. PWN, Wrocław, 206.
- Durand M., Molotch N.P., Margulis S.A., 2008, *Merging complementary remote sensing datasets in the context of snow water equivalent reconstruction*. Remote Sensing of Environment, 112, 1212–1225.
- Falarz M., 2000, *An attempt of reconstruction of nival conditions on the turn of the 19<sup>th</sup> century in Cracow and Zakopane*, [in:] B. Obrębska-Starkel (red.) *Reconstructions of Climate and its Modelling*, Prace Geogr. IGUJ, 107, 213–221.
- Falarz M., 2000/2001, *Metody rekonstrukcji pokrywy śnieżnej w okresie przed rozpoczęciem regularnych obserwacji niwalnych (na przykładzie Krakowa)*, [w:] *Problematyka pomiarów i opracowań elementów meteorologicznych*, Annales UMCS sec. B, LV/LVI, 133–144.
- Falarz M., 2002, *Long-term variability in reconstructed and observed snow cover over the last 100 winter seasons in Cracow and Zakopane (southern Poland)*. Climate Research, 19, 3, 247–256.
- Gafurov A., Vorogushyn S., Farinotti D., Duethmann D., Merkushkin A., Merz B., 2015, *Snow-cover reconstruction methodology for mountainous regions based on historic in situ observations and recent remote sensing data*, The Cryosphere, 9, 451–463.
- Hoch S.W., Whiteman C.D., 2010, *Topographic effects on the surface radiation balance in and around Arizona's Meteor Crater*. J. Appl. Meteor. Climatol., 49, 1114–1128.
- 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 Sąspowskiej)*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 5, 29–34.
- Kożuchowski K., 2011, *Albedo*, [w:] *Klimat Polski. Nowe spojrzenie*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 88–93.
- Kożuchowski K., 2012, *Lokalne czynniki klimatu*, [w:] K. Kożuchowski (red.) *Meteorologia i klimatologia*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, 232–245.
- Laxton S.C., Smith D.J., 2009, *Dendrochronological reconstruction of snow avalanche activity in the Lahul Himalaya, Northern India*. Natural Hazards, 9, 3, 459–467; DOI: 10.1007/s11069-008-9288-5.
- Leathers D. J., Graybeal D., Mote T., Grundstein A., Robinson D., 2004, *The Role of Airmass Types and Surface Energy Fluxes in Snow Cover Ablation in the Central Appalachians*. Journal of Appl. Met., 43, 1887–1898.
- Litschmann T., Rožnovský J., Středa T., Středová H., Hebelka J., 2012, *Temperature and humidity conditions of Macocha Abyss*. Contribution to Geophysics and Geodesy, 42(3), 227–242.
- Lockwood J.G., 1984, *Procesy klimatotwórcze*. PWN, Warszawa.

- Niedźwiedz T., 2009, *Wpływ cyrkulacji atmosfery na klimat lokalny Ojcowskiego Parku Narodowego*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 19, 181-194.
- Stone R.S., Ellsworth G., Dutton E.G., Joyce M. Harris J.M., Longenecker D., 2002, *Earlier spring snowmelt in northern Alaska as an indicator of climate change*. Journal of Geoph. Res., 107 (D10), 4089, 10.1029/2000JD000286, 1-13.
- Timilsena J., Piechota T., 2008, *Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin*. Journal of Hydrology, 352, 94-106.
- Wojkowski J., 2009, *Zróźnicowanie przestrzenne pokrywy śnieżnej na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 19, 89-108.
- Wojkowski J., Caputa Z., 2009, *Przestrzenne i czasowe zróźnicowanie albedo na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 19, 153-168.
- Wojkowski J., Caputa Z., 2016, *The impact of karst relief on the diversity of insolation conditions and mesoclimate variation, Case study of the Ojców National Park, Poland*. Int. Journal of Geoheritage, 4(1), 1-11.
- Wojkowski J., Partyka J., 2009, *Warunki śnieżne w Ojcowie*. Prądnik, Prace Muzeum Szafera, 19, 75-88.

### Streszczenie

Główny cel opracowania to cel metodyczny – wypracowanie metody rekonstrukcji czasu zalegania pokrywy śnieżnej na podstawie pomiarów promieniowania słonecznego. Celem dodatkowym jest cel poznawczy – porównanie czasu zalegania pokrywy śnieżnej w różnych formach terenu (dno doliny i wierzchowina) i na różnych wysokościach n.p.m. Badania zostały przeprowadzone na przykładzie warunków niwalnych południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, w dolinie Prądnika w Ojcowskim Parku Narodowym. W opracowaniu użyto danych z okresu 2008-2014 dotyczących pokrywy śnieżnej na stacji Park Zamkowy (PZ; 322 m n.p.m.), położonej w dnie doliny Prądnika, oraz wartości promieniowania słonecznego na stacji PZ i w Lepiancie Czajowskiej (LCZ; 483 m n.p.m.), położonej na wierzchowinie. Na podstawie danych aktynometrycznych wyliczono wartości albedo. Rekonstrukcję liczby dni z pokrywą śnieżną przeprowadzono w LCZ w trzech etapach: 1) zbadano częstość występowania wartości albedo w przedziałach osobno w dniach z pokrywą śnieżną i w dniach bez pokrywy śnieżnej na stacji PZ; 2) przeprowadzono symulacje czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji PZ, stosując różne wartości progowe albedo dziennego i albedo z godzin 6-9 UTC; 3) wartości graniczne albedo wyznaczone w poprzednim etapie badań stały się podstawą rekonstrukcji czasu zalegania pokrywy śnieżnej na stacji LCZ; za dzień z pokrywą śnieżną przyjęto taki, w którym albedo było większe od ustalonych wartości progowych. Wyznaczone wartości graniczne albedo wynoszą 26% dla okresu całego dnia i 34% dla godzin 6-9 UTC. Różnica między nimi jest wynikiem zależności wartości albedo od wysokości Słońca. Średnia roczna liczba dni z pokrywą śnieżną wyniosła 80 dni w PZ i 75 dni w LCZ. Różnica w czasie zalegania pokrywy śnieżnej między dnem doliny Prądnika a wierzchowiną południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej jest wypadkową oddziaływania dwóch czynników: wysokości nad poziomem morza i formy terenu. Wysokość nad poziomem morza odgrywa większą rolę w tworzeniu się pokrywy śnieżnej, forma terenu natomiast w procesie zanikania śniegu wiosną.

Słowa kluczowe: pokrywa śnieżna, promieniowanie słoneczne, albedo, rekonstrukcja, Ojcowski Park Narodowy, Wyżyna Krakowsko-Częstochowska

---

### Summary

The main objective of the study is methodical one: development of a method to reconstruct the snow cover duration on the basis of measurements of solar radiation. The additional objective is cognitive: comparison of seasonal snow cover duration in various geomorphological forms: concave (the bottom of the valley) and convex (plateau) and at different heights above sea level. Studies were carried out on the example of the nival conditions in southern Kraków-Częstochowa Upland: in Prądnik valley in Ojców National Park. There were used daily and timely data of total and reflected shortwave solar radiation for the period 2008-2014, on the basis of which albedo values ( $\alpha$ ; %) were calculated. Actinometric measurements were performed on the Park Zamkowy station (PZ; 322 m a.s.l.) located in the bottom of the valley of Prądnik and in Lepianka Czajowska station (LCZ; 483 m a.s.l.) located on the plateau of southern Kraków-Częstochowa Upland. There were also used daily data describing the thickness of the snow cover in the PZ for the same period. Reconstruction of the number of days with snow cover in the LCZ was performed in three stages: 1. frequency of albedo values were examined in intervals for days with snow cover and days without snow cover in the PZ; 2. simulations of snow cover duration (number of days) were conducted in the PZ using different threshold values (bottom limit) of daily albedo and albedo for 6-9 UTC; 3. limits of albedo designated in the preceding stage research were the basis of reconstruction the number of snow cover in the LCZ; a day with snow cover was the day when the albedo was higher than the established limit values. Designated the boundary values of the albedo is 26% for the entire day and 34% for 6-9 UTC. The difference between these values is the result of albedo dependency on the Sun height.

The average annual number of days with snow cover in the investigated period (2008-2014) is 80 in the PZ (observation data) and 75 in LCZ (reconstructed and observation data). In November, when snow cover is created, more days with snow on the ground is observed on the plateau (LCZ: 3 days in average), while from December to March, snow cover occurred longer in the bottom of the valley (PZ). The difference in the snow cover duration between the bottom of the Prądnik valley and the plateau of southern Kraków-Częstochowa Upland increases in particular months towards the end of the winter season: it is namely 1 day in January, 2 days in February and 3 days in March.

The differences in snow cover duration between the bottom of the valley and the plateau are the resultant of two factors: altitude and topography. The altitude above sea level, plays a more important role in the formation of snow cover, while the morphology of the terrain is of greater importance in the process of melting the snow in the spring.

**Key words:** snow cover, solar radiation, albedo, reconstruction, Ojców National Park, Kraków-Częstochowa Upland

Małgorzata Falarz

malgorzata.falarz@us.edu.pl

Uniwersytet Śląski Wydział Nauk o Ziemi

Zbigniew Caputa

caputazbigniew@gmail.com

Józef Partyka

jozef\_partyka@poczta.onet.pl

Ojcowski Park Narodowy