

## WPŁYW RZEŻBY TERENU NA USŁONECZNIENIE MOŻLIWE W REJONIE HORNSUNDU (SW SPITSBERGEN)

### THE IMPACT OF RELIEF ON THE DIVERSITY OF POSSIBLE SUNSHINE DURATION AT HORNSUND REGION (SW SPITSBERGEN)

Jakub Wojkowski<sup>1</sup>, Zbigniew Caputa<sup>2</sup>, Jan Leszkiewicz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Katedra Ekologii, Klimatologii i Ochrony Powietrza, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie,  
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; rmwojkow@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Katedra Klimatologii, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec,  
zbigniew.caputa@us.edu.pl

<sup>3</sup> Katedra Geomorfologii, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec,  
jan.leszkiewicz@us.edu.pl

**Zarys treści.** Artykuł prezentuje wyniki badań zmienności przestrzennej usłonecznienia możliwego w rejonie Hornsundu (SW Spitsbergen). Obszar ten charakteryzuje się złożoną rzeźbą terenu, która ze względu na niskie położenie Słońca nad horyzontem, jest jednym z głównych czynników kształtujących warunki insolacyjne obszarów polarnych. Celem pracy była analiza przestrzennego zróżnicowania usłonecznienia możliwego oraz ocena wpływu rzeźby terenu na jego rozkład. Do analizy zmienności przestrzennej warunków insolacyjnych posłużono się numerycznym modelowaniem przy użyciu GIS. Na podstawie numerycznego modelu terenu Aster GDEM o rozdzielczości 30 m wymodelowano rozkłady przestrzenne rocznej sumy usłonecznienia możliwego oraz sumy dobowe dla przesilenia letniego oraz zrównań wiosennego i jesiennego. Badania wykazały, że silne urzeźbienie terenu, urozmaicenie form, ekspozycji i nachyleń stoków oraz znaczne deniwelacje sprawiają, że w rejonie Hornsundu może występować dość duże zróżnicowanie warunków insolacyjnych.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie słoneczne, warunki insolacyjne, usłonecznienie możliwe, SAGA GIS, Arktyka, Spitsbergen.

## 1. Wprowadzenie

Promieniowanie słoneczne odgrywa bardzo ważną rolę w kształtowaniu warunków klimatycznych obszarów polarnych (Francis i Hunter 2007). Od jego ilości oraz sposobu wykorzystania w różnego rodzaju procesach fizycznych zależy bowiem cykl dobowy i roczny temperatury powietrza, rozkład wilgotności, lokalne różnice ciśnienia i wynikające z nich ruchy mas powietrza. Wskutek zmieniającego się dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi obserwuje się od początku 20 wieku ocieplenie obszaru svalbardzkiego (Przybylak i in. 2010a i b), postępującą deglacjację (Jania i in. 2006; Błaszczuk i in. 2013), zmniejszanie grubości pokrywy lodowej (Cavalieri i Parkinson 2012) i jej zasięgu (Kruszewski 2013), zmiany w warstwie aktywnej (Oleszkiewicz i Caputa 2004) i głębokości zmarzliny (Dolnicki i in. 2013), a także inne skutki ekologiczne w kontekście zmian klimatycznych (IPCC 2013). Zmiany te są silnie powiązane z bilansem radiacyjnym tego obszaru (Laska i in. 2012,

Maturilli i in. 2014). Z tych też względów bardzo ważne w badaniach klimatycznych jest poznanie warunków insolacyjnych obszarów polarnych.

Pomiary aktynometryczne w rejonie Polskiej Stacji Polarnej były w przeszłości prowadzone niemal wyłącznie w okresach letnich (Baranowski 1977, Pereyma 1983, Angiel 1996). Roczne serie pomiarowe wykonano w sezonach 1957/1958 (Baranowski 1977), 1980/1981 (Niewiadomski 1982, Głowicki 1985b), 1989/1990 (Niedźwiedź 1993), 1991/92 (Caputa i Głowacki 2002) i 2008/09 (Budzik i in. 2009). Stałe całoroczne pomiary promieniowania na Polskiej Stacji Polarnej mają miejsce dopiero od marca 2004 roku na maszcie aktynometrycznym (Sobolewski i Krzyścin 2006) zmodernizowanym w 2008 roku (Budzik i in. 2009). W literaturze sporo jest prac zawierających informacje na temat pomiarów usłonecznienia rzeczywistego w rejonie Spitsbergenu oraz wpływu różnych czynników na kształtowanie się jego wielkości (Pettersen i in. 1956, Gavrilova 1963, Spinnangr 1968, Baranowski 1977, Vinje 1976-1980, Pereyma 1983, Atlas Arktyki 1985, Głowicki 1985a, Niedźwiedź i Ustrnul 1988, Brázdil i in. 1988, Niedźwiedź 1993, Głowacki i Niedźwiedź 1997, Styszyńska 1997, Przybylak i Szczebleska 2002, Przybylak 2003, Budzik 2005). Wyniki wieloletnich pomiarów aktynometrycznych na Polskiej Stacji Polarnej oraz policzone na ich podstawie statystyki przedstawione zostały w monografii „Climate and Climate change in Hornsund” (Marsz i Styszyńska 2013).

Większość z wyżej wymienionych prac powstała na podstawie pomiarów aktynometrycznych wykonywanych w jednej lokalizacji. Ograniczało to możliwość wyciągania wniosków na temat przestrzennego zróżnicowania warunków insolacyjnych, szczególnie na obszarze o urozmaiconej rzeźbie terenu. W ostatnich latach dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii informatycznych i narzędzi GIS pojawiły się możliwości oszacowania dopływu energii słonecznej do powierzchni Ziemi na podstawie numerycznego modelowania. Wyniki modelowania promieniowania są niezwykle ważne i wykorzystywane w innych badaniach środowiska polarnego (Hock i Holmgren 2005). Mogą też stanowić niezbędne dane wejściowe do różnych modeli (Pohl i in. 2006). Dla analizowanego obszaru przykładem obliczeń dopływu całkowitego promieniowania słonecznego są prace Styszyńskiej (1995), Szymanowskiego i in. (2008) oraz Kryzy i in. (2010, 2011). Modelowanie przestrzennego i czasowego zróżnicowania promieniowania słonecznego na obszarach arktycznych jest trudne z powodu niskich wysokości Słońca powodujących powstawanie dużego zacielenia terenu. Jest to szczególnie kłopotliwe podczas wykonywania analiz spektralnych zdjęć satelitarnych, często uniemożliwiające ich poprawną interpretację. Ponadto zachmurzenie i właściwości aerozoli atmosferycznych wykazują w Arktyce dużą zmienność w przebiegu doby czy roku (Zygmuntowska i in. 2012) i mają duży wpływ na ekstynkcję promieniowania słonecznego w atmosferze (Yamanouchi i in. 2005, Krzyścin i Sobolewski 2001).

Usłonecznienie możliwe jest ważnym wskaźnikiem warunków insolacyjnych. W rejonie Hornsundu nie było ono jednak dotychczas przedmiotem szczegółowych analiz. Skłoniło to Autorów niniejszej pracy do zbadania tego elementu na podstawie numerycznego modelowania. Głównym celem badań była analiza przestrzennego zróżnicowania usłonecznienia możliwego oraz określenie wpływu rzeźby terenu na jego rozkład.

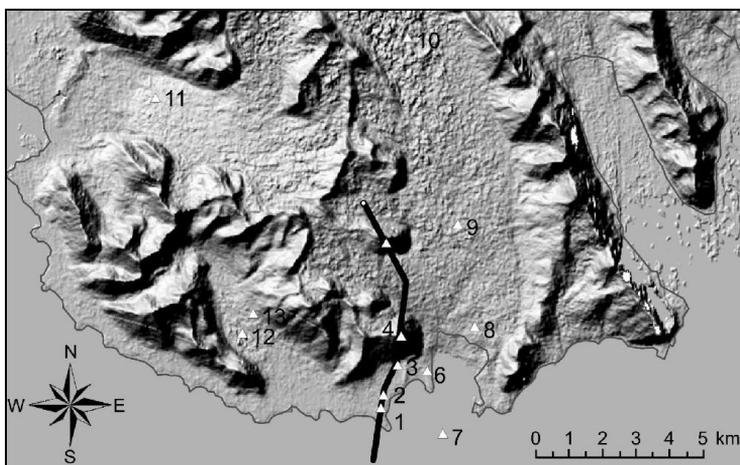
## **2. Materiały, metody i obszar badań**

Do przeprowadzenia analizy przestrzennego zróżnicowania warunków insolacyjnych, posłużono się rastrowym modelem terenu Aster Global Digital Elevation Model (Aster GDEM) o rozdzielczości

przestrzennej 30 m. Model ten powstał w ramach współpracy amerykańskiej agencji kosmicznej NASA (National Aeronautics and Space Administration) i japońskiego Ministerstwem Ekonomii, Handlu i Przemysłu METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Został on opracowany na podstawie setek tysięcy zdjęć stereoskopowych pozyskanych z detektora ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) zainstalowanego na satelicie środowiskowym Terra. Przed przystąpieniem do modelowania dane wysokościowe Aster GDEM poddano weryfikacji na podstawie mapy topograficznej w skali 1:25000 opracowanej przez Uniwersytet Śląski, Norsk Polar-instituttt Norge i Université du Québec w Kanadzie.

Usłonecznienie możliwe, rozumiane jako 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 sumowano je do wartości miesięcznych i rocznej. Przedstawione w niniejszej pracy wartości usłonecznienia są zatem teoretycznym czasem trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego. Modelowanie wykonano dla okresu roku oraz dla dni charakterystycznych pod względem czasu trwania tj. zrównania wiosennego (21 marca) i jesiennego (23 września) oraz przesilenia letniego (22 czerwca). Podczas obliczeń usłonecznienia uwzględniane było nie tylko położenie geograficzne i wysokość bezwzględna, ale również topografia terenu powodująca zasłonięcie horyzontu, które silnie wpływa na kształtowanie się warunków insolacyjnych w wysokich szerokościach geograficznych. Analizę nachyleń stoków, ekspozycji, zasłonięcia horyzontu oraz modelowanie rozkładu usłonecznienia wykonano przy użyciu oprogramowania SAGA GIS.

Badaniami objęto obszar o rozciągłości południkowej pomiędzy  $76^{\circ}59'03''\text{N}$  i  $77^{\circ}06'25''\text{N}$  oraz rozciągłości równoleżnikowej pomiędzy  $15^{\circ}05'55''\text{E}$  i  $15^{\circ}58'58''\text{E}$  (ryc. 1). Analizowany obszar zawiera fragment południowej części Ziemi Wedel Jalsberga z masywami paleozoicznej formacji Hecla Hoek. Rzeźba terenu jest urozmaicona, tworząc łańcuchy górskie ze stromymi stokami. Największe doliny górskie, zajęte są przez wycofujące się w szybkim tempie duże lodowce zakończone w morzu (lodowce Hansa i Paierla). W mniejszych dolinach znajdują się lodowce zakończone na lądzie (np. Lodowiec Werenskiolda), ewentualnie są to doliny niezlodowaczone, lub w nieznacznym stopniu zlodowaczone



Ryc. 1. Obszar badań z zaznaczonymi punktami i profilem pomiarowym

Fig. 1. The study area with location of measurement points and profile.

(Dolina Rev). Masywy górskie wystają ponad powierzchnię lodowców, tworząc nunataki o wysokościach powyżej 600 m n.p.m. (Nordre Slynfjellet 790,5 m n.p.m.). Najwyższy szczyt Wienertinden (924 m n.p.m.) znajduje się w masywie Sofiekammen. Nisko, u podnóża masywów górskich wzdłuż wybrzeża położone są płaskie wyniesione terasy morskie, porośnięte często roślinnością tundrową.

### 3. Wyniki

W literaturze klimatologicznej usłonecznienie możliwe nie jest jednoznacznie zdefiniowane (Matuszko 2009) i w konsekwencji jest obliczane różnymi metodami (np. Chomicz i Kuczmarska 1971). W niniejszej pracy przez pojęcie usłonecznienia możliwego rozumie się odstęp czasu między rzeczywistym wschodem i zachodem Słońca w danym punkcie, z uwzględnieniem topografii terenu powodującej zasłonięcie horyzontu. Wielkość zdefiniowanego w ten sposób usłonecznienia możliwego w danym punkcie zależeć będzie od ścieżki pozornego ruchu Słońca nad horyzontem, wysokości bezwzględnej, ekspozycji danego miejsca oraz jego zasłonięcia horyzontu.

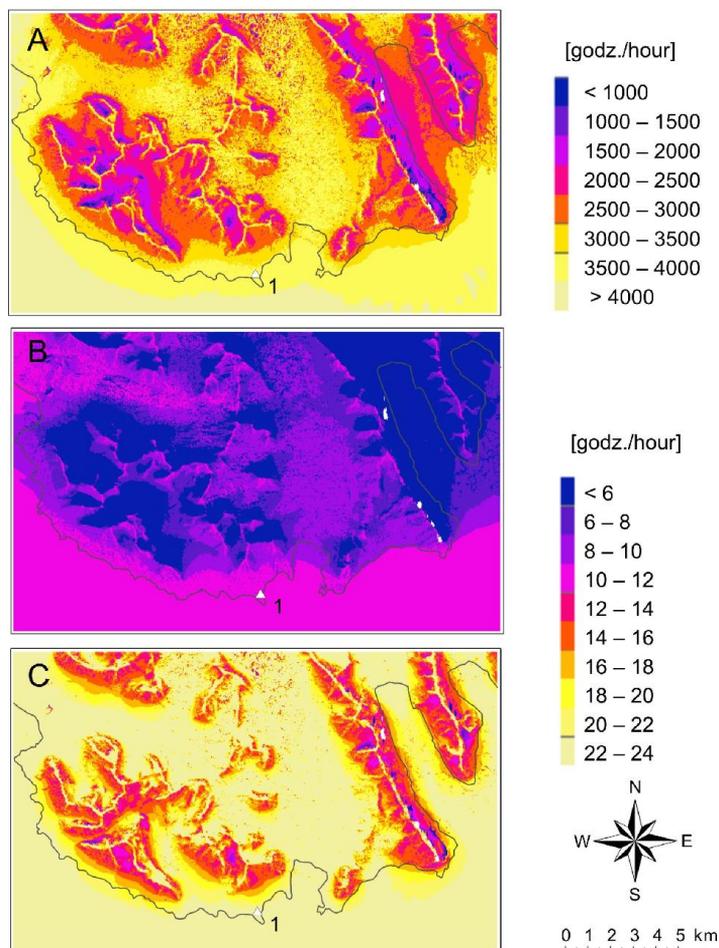
Urozmaicona rzeźba w rejonie Hornsundu może powodować bardzo duże zróżnicowanie ilości energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi. Świadczą o tym wymodelowane rozkłady przestrzenne usłonecznienia możliwego przedstawione na rycinie 2. Roczne sumy usłonecznienia możliwego kształtowały się w przedziale wartości od 0 do 4350 godzin, a średnia wartość obszarowa wyniosła 3114 godzin (ryc. 2A). Modelowanie dopływu promieniowania pozwoliło zidentyfikować na badanym obszarze miejsca, do których praktycznie nigdy nie dociera bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Znajdują się one w obrębie wschodnich i północno-wschodnich stoków Sofiekammen i Luciakammen. Miejsca te położone są stosunkowo nisko nad poziomem morza i cechuje je bardzo duże zasłonięcie horyzontu gdzie widoczność nieba nie przekracza 20%.

Do miejsc najmniej nasłonecznionych, dla których usłonecznienie możliwe kształtuje się poniżej 1000 godzin w ciągu roku, należą północne stoki Angellfjellet (wraz z przylegającym fragmentem Lodowca Werenskiolda), północne stoki Brattegga (wraz z południową częścią Lodowca Angellisen), jezioro Myrktjorn wraz z górną częścią Doliny Brattegga, Lodowiec Brattegga, Lodowiec Gangpass, północne stoki Trulsenfjellet, północny fragment pola śniegowego i pobliskie zbocza Doliny Rev w okolicy Rotjesfjellet, pole śniegowe oraz górna część Lodowca Tuv w rejonie Skoddefjellet, pole śniegowe w pobliżu Bergnova, Lodowiec Olenellus oraz jak już wspomniano wcześniej liczne obszary w obrębie wschodnich stoków Sofiekammen i Luciakammen.

Najwięcej energii słonecznej dociera do miejsc najwyżej położonych, które charakteryzują się bardzo małym zasłonięciem horyzontu. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, należą do nich nunataki. Modelowanie wykazało, że najbardziej nasłonecznionym miejscem analizowanego obszaru Hornsundu jest wierzchołek Torbjørnsenfjellet położony na wysokości 688 m n.p.m. ( $15^{\circ}17'48''E$ ,  $77^{\circ}01'44''N$ ). W miejscu tym usłonecznienie możliwe osiąga w sumie rocznej wartość 4350 godzin, a procent widoczności nieba wynosi 99%. Dużym nasłonecznieniem, przekraczającym 4000 godzin w ciągu roku wyróżnia się również grzbiety Rduldovskikammen, Staszekammen, od szczytu Glacjogerknausen do Slynfjellet, Sofiekammen, Luciakammen, Deilegga, Gulliksenfjellet, Eimfjellet, Trulsenfjellet, Rotjesfjellet, Fugleberget i Ariekammen, Skoddefjellet oraz szczyty Wernerknatten (639 m n.p.m.) i Tuva (527 m n.p.m.).

Modelowanie usłonecznienia wykonano również dla charakterystycznych dni w roku pod względem czasu jego trwania tj. zrównań (wiosennego 21 marca i jesiennego 23 września; ryc. 2B) oraz

przesilenia letniego (22 czerwca; ryc. 2C). Wykazało ono podobnie jak dla roku duże kontrasty rozkładu usłonecznienia. Podczas zrównań deklinacja Słońca wynosi  $0^\circ$ , a promienie słoneczne padają na obszar Hornsundu pod kątem  $\leq 13,2^\circ$ . W tych dniach Słońce wschodzi dokładnie na wschodzie, a zachodzi na zachodzie. Podczas zrównań dobowe sumy usłonecznienia możliwego kształtowały się od 0 do 11,9 godzin, a wartość średnia dla analizowanego obszaru wyniosła 7,8 godziny. 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 ( $\leq 36,4^\circ$ ) sprawiają, że dobowe sumy usłonecznienia w tym dniu są najwyższe, a ich zróżnicowanie przestrzenne jest znacznie mniejsze niż podczas zrównań. Dobowe sumy usłonecznienia możliwego podczas letniego przesilenia kształtowały się od 0 do 24 godzin, a średnia obszarowa wyniosła 20,6 godziny.



Ryc. 2. Rozkład przestrzenny rocznej sumy usłonecznienia możliwego [godz.] (A) oraz sum dobowych podczas zrównania (wiosennego 21 marca i jesiennego 23 września) (B) oraz przesilenia letniego 22 czerwca (C)

Fig. 2. Spatial distribution of annual (A) and daily possible sunshine duration [hours] for equinox (spring 21 March and autumn 23 September) (B) and summer solstice 22 June (C).

W celu określenia wpływu rzeźby terenu na warunki insolacyjne rejonu Hornsundu wykonano analizy hipsometryczne, nachyleń oraz usytuowania powierzchni w stosunku do stron świata. Wydzielono cztery klasy wysokości (0,0-200,0, 200,1-400, 400,1-600 i powyżej 600 m n.p.m.), a następnie w każdej z nich po pięć klas nachyleń (0,0-10,0, 10,1-20, 20,1-30, 30,1-40° i powyżej 40°) oraz po osiem klas ekspozycji terenu (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). Analizy przestrzenne wykonane na podstawie numerycznego modelu terenu Aster GDEM za pomocą oprogramowania SAGA GIS wykazały, że średnia wysokość obszaru badań wynosi 232 m n.p.m. Wysokości rozciągają się od poziomu morza do 924 m n.p.m. (Wienertinden). Większość analizowanego obszaru położona jest pomiędzy poziomem morza a wysokością 400 m n.p.m. (tab. 1). Średnie nachylenie obszaru badań wynosi 15,1°. Największe wartości nachyleń dotyczą miejsc w obrębie wschodnich stoków Sofiekamen i Luciakamen i dochodzą one do 85,6°. Na większości analizowanego obszaru nachylenia stoków nie przekraczają 10° (tab. 2). W przypadku ekspozycji, przeważają stoki nachylone w kierunku: SW, W i S, a najmniejszy jest udział stoków o ekspozycji N (tab. 3).

Tab. 1. Procentowy udział klas wysokości w całej powierzchni badanego obszaru

Table 1. Percentage share of class of altitude of the total study area.

Wysokość [m n.p.m.] / Altitude [m a.s.l.]	0,0-200,0	200,1-400,0	400,1-600,0	>600,0
Powierzchnia [%] / Area [%]	45	35	17	3

Tab. 2. Procentowy udział klas nachyleń stoków w całej powierzchni badanego obszaru

Table 2. Percentage share of class of slope of the total study area.

Nachylenie [°] / Slope [°]	0,0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	>40,0
Powierzchnia [%] / Area [%]	51	20	12	10	7

Tab. 3. Procentowy udział stoków o danej ekspozycji w całej powierzchni badanego obszaru

Table 3. Percentage share of hillsides aspect of the total study area.

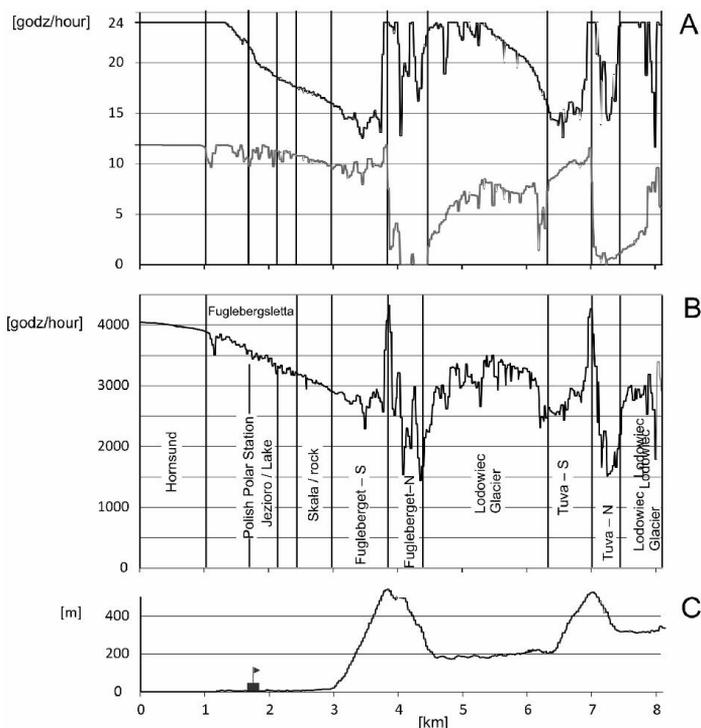
Ekspozycja / Aspect	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Powierzchnia [%] / Area [%]	7	11	13	11	14	20	15	9

Dla przyjętych klas wysokości, nachyleń stoków oraz ekspozycji wyznaczono średnie wartości rocznej sumy usłonecznienia możliwego (tab. 4). Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, na obszarach polarnych rola ekspozycji w kształtowaniu warunków insolacyjnych jest znacznie mniejsza niż w niższych szerokościach geograficznych. Przykładowo w szerokościach umiarkowanych zdecydowanie najbardziej nasłonecznione są zbocza S, SW i SE (Wojkowski 2007, 2015; Wojkowski i Caputa 2009). Na obszarach polarnych, z uwagi na bliskość bieguna znaczenie uprzywilejowanej dla promieniowania słonecznego ekspozycji południowej maleje. Jak wynika z tabeli 4, najwyższe sumy usłonecznienia możliwego dotyczą w wielu przypadkach również ekspozycji N i NW. Co zaś się tyczy związku usłonecznienia z nachyleniem stoków, to dla wszystkich ekspozycji stwierdzono, że usłonecznienie możliwe rośnie wraz ze zmniejszającym się nachyleniem terenu. Najmniejsze wartości rocznej sumy usłonecznienia możliwego 1356 godz. stwierdzono dla północnej ekspozycji w klasie wysokości poniżej 200 m n.p.m. i najwyższego nachylenia (powyżej 40°). Natomiast najwyższą sumę 4015 godz. odnotowano dla ekspozycji NW, powyżej 600 m n.p.m. i nachylenia poniżej 10°. Największe różnice usłonecznienia

obserwuje się w klasie wysokości powyżej 600 m n.p.m., gdzie różnice te dochodzą nawet do 1976 godz. pomiędzy najmniejszym i największym nachyleniem dla północnych ekspozycji (N i NW).

Duże zróżnicowanie usłonecznienia możliwego można również zaobserwować na profilu który poprowadzono przez obszar badań z południa na północ: Hornsund – Fugleberget – Tuva (ryc. 3). Najwyższe wartości usłonecznienia możliwego kształtują się na szczytach Fugleberget i Tuva, nieznacznie niższe na otwartej powierzchni wodnej fiordu Hornsund. Na obszarze równiny Fuglebregen zarówno podczas przesilenia letniego (ryc. 3A) jak i w sumach rocznych (ryc. 3 B) wyraźnie zaznacza się spadek usłonecznienia od wybrzeża aż do partii szczytowej Fugleberget. Przyczyną tego faktu, mimo południowej ekspozycji równiny Fuglebregen, jest zwiększające się w kierunku północy zasłonięcie horyzontu przez grzbiet górski. Nie obserwuje się tego spadku wartości usłonecznienia w czasie zrównania wiosennego i jesiennego ze względu na nisko położone Słońce po stronie południowej. Najniższe wartości sum rocznych na profilu dotyczą północnych stromych stoków Tuva, do których podczas zrównań nie dociera bezpośrednio promieniowanie słoneczne.

W obrębie badanego obszaru wyznaczono również charakterystyczne miejsca w celu porównania ich warunków insolacyjnych z warunkami kształtującymi się na Polskiej Stacji Polarnej. Lokalizację tych punktów przedstawiono na rycinie 1. Założono, że wartości usłonecznienia na Polskiej Stacji Polarnej stanowiącej punkt odniesienia wynoszą 100% (tab. 5).



Ryc. 3. Zmienność usłonecznienia możliwego w profilu Hornsund – Fugleberget – Tuva: A – sumy dobowe podczas przesilenia letniego i zrównań [godz.], B – suma roczna [godz.], C – profil wysokościowy [m n.p.m.]

Fig. 3. Diversity of possible sunshine duration [hours] at the profile Hornsund – Fugleberget – Tuva: A – daily possible sunshine duration [hours] for summer solstice and equinox, B – annual sum [hours], C – profile of altitude [m a.s.l.].

Tab. 4. Roczne sumy usłonecznienia możliwego [godz.] w zależności od wysokości, nachylenia i ekspozycji  
Table 4. Annual possible sunshine duration [hours] according to elevation, slope and aspect.

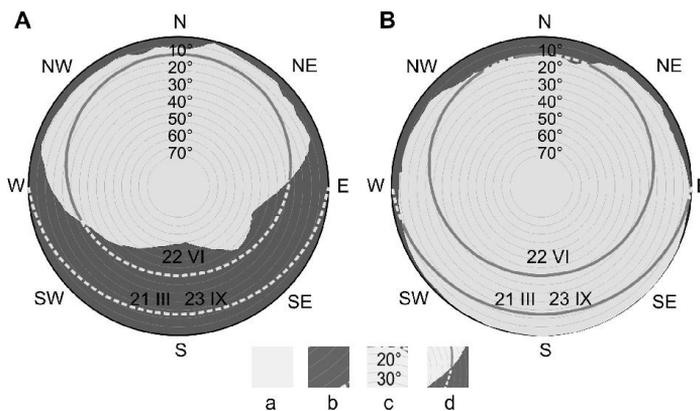
Wysokość [m n.p.m.] Altitude [m a.s.l.]	Nachylenie Slope	Ekspozycja / Aspect							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0,0-200,0	0,0-10,0°	3108	3035	3056	3142	3147	3143	3151	3170
	10,1-20,0°	2522	2242	2427	2643	2730	2673	2701	2781
	20,1-30,0°	2128	1961	2154	2410	2664	2562	2425	2289
	30,1-40,0°	1830	1805	2076	2452	2638	2562	2296	1947
	>40,0°	1356	1594	1806	2150	2444	2327	1885	1566
	średnia / mean	2928	2685	2777	3030	3019	2943	2959	3076
200,1-400,0	0,0-10,0°	3150	3140	3169	3180	3147	3130	3149	3186
	10,1-20,0°	2690	2791	2831	2769	2758	2774	2769	2626
	20,1-30,0°	2124	2278	2328	2509	2599	2517	2405	2087
	30,1-40,0°	1867	2021	2186	2407	2611	2536	2328	1865
	>40,0°	1593	1807	1975	2230	2467	2384	2188	1550
	średnia / mean	2672	2675	2730	2918	2868	2798	2795	2730
400,1-600,0	0,0-10,0°	3233	3217	3198	3199	3198	3152	3183	3223
	10,1-20,0°	3105	3003	3001	2988	2940	2956	3036	3096
	20,1-30,0°	2756	2674	2748	2810	2767	2767	2655	2643
	30,1-40,0°	2246	2346	2437	2632	2694	2640	2407	2167
	>40,0°	1850	1949	2209	2473	2585	2479	2249	1815
	średnia / mean	2671	2573	2694	2918	2871	2804	2740	2674
>600,0	0,0-10,0°	3992	3881	3879	3688	3724	3692	3731	4015
	10,1-20,0°	3818	3753	3590	3336	3269	3391	3692	3731
	20,1-30,0°	3339	3268	3151	2999	3055	3122	3119	3078
	30,1-40,0°	2879	2622	2692	2829	2842	2810	2686	2514
	>40,0°	2016	2277	2412	2701	2725	2568	2413	2041
	średnia / mean	3026	2749	2840	3090	3003	2934	2911	2777

Tab. 5. Usłonecznienie możliwe charakterystycznych miejsc badanego obszaru  
Table 5. Possible sunshine duration at characteristic locations of the study area.

Lokalizacja (numeracja jak na rycinie 1) Location (numbering as in Figure 1)	Zrównanie Equinox		Przesilenie letnie Summer solstice		Suma roczna Annual sum	
	godz. hours	%	godz. hours	%	godz. hours	%
<b>1. Polska Stacja Polarna</b>	<b>11,3</b>	<b>100</b>	<b>22,6</b>	<b>100</b>	<b>3647</b>	<b>100</b>
2. Fugle laboratorium środowiskowe	9,7	86	18,7	83	3197	88
3. Fugle stożek usypiskowy	9,5	84	16,0	71	2871	79
4. Fugle szczyt	11,9	105	24,0	106	4325	119
5. Tuva (nunatak)	11,6	102	24,0	106	4265	117
6. Hansbreen – morena czołowo-boczna	8,8	78	21,6	96	3361	92
7. Hornsund	11,9	105	24,0	106	4026	110
8. Hansbreen – część szczelinowa	8,1	72	24,0	106	3608	99
9. Hansbreen – część ablacyjna	9,1	80	24,0	106	3628	99
10. Hansbreen – część akumulacyjna	7,9	70	24,0	70	3800	106
11. Hansbreen – morena środkowa	6,8	60	21,7	96	3028	83
12. Jezioro Rev	3,3	29	18,4	82	2066	57
13. Revdalen	6,4	56	17,8	79	2449	67

W czasie zrównań dla większości lokalizacji wartości usłonecznienia są niższe niż na Polskiej Stacji Polarnej, a różnice dochodzą do 71% (Jezioro Rev). Przyczyną jest położenie tych miejsc we

wklęsłych formach i wynikające z tego większe zacinienie niż na Polskiej Stacji Polarnej. Wyjątek stanowią szczyty Fugleberget i Tuva oraz fiord charakteryzujący się małym zasłonięciem horyzontu gdzie wartości usłonecznienia są o kilka procent wyższe. Podczas przesilenia letniego, gdy Słońce jest wysoko nad horyzontem, miejsca położone na Lodowcu Hans oraz na szczytach Fugleberget i Tuva charakteryzują się wartościami wyższymi o 6% w stosunku do Polskiej Stacji Polarnej. W skali roku do miejsc bardziej nasłonecznionych od Polskiej Stacji Polarnej należą Fugle, Tuva i Zatoka Hornsund.



Ryc. 4. Zasłonięcie horyzontu u podnóża północnych zboczy Tuva (A) oraz na Polskiej Stacji Polarnej (B) (a – widoczna część nieba, b – zasłonięta część nieba, c – wysokość Słońca nad horyzontem [°], d – ścieżka pozornego ruchu Słońca na niebie)

Fig. 4. Horizon obstruction at north hillside of Tuva (A) and at the Polish Polar Station (B) (a – unobstructed hemisphere, b – obstructed hemisphere, c – solar elevation above the horizon [°], d – the path of the Sun across the sky).

Jak już wielokrotnie wspomniano, zasłonięcie horyzontu ma bardzo duży wpływ na kształtowanie się warunków insolacyjnych. Do zaciennionych miejsc dociera wyłącznie promieniowanie słoneczne rozproszone lub odbite od sąsiadujących stoków. Miejsca te charakteryzują się stosunkowo niższymi temperaturami, dłuższym okresem zalegania pokrywy śnieżnej i mniej intensywnym procesem parowania. Szczególnie przy niskim położeniu Słońca, zasłonięcie horyzontu jest bardzo istotnym czynnikiem ograniczającym dopływ promieniowania słonecznego na obszarach polarnych. Efektem tego jest skrócenie dnia poprzez opóźnienie świtu i wcześniejsze zapadanie zmroku. Na rycinie 4 przedstawiono przykładowe zasłonięcia horyzontu wraz z pozornymi ścieżkami ruchu Słońca dla dwóch skrajnych pod względem insolacyjnym lokalizacji: podnóża północnych zboczy góry Tuva (ryc. 4A) oraz Polskiej Stacji Polarnej (ryc. 4B). Współczynnik widocznej części nieba (Sky View Factor) u podnóża góry Tuva wynosi 0,736, a roczna suma usłonecznienia możliwego niespełna 950 godz. Dla Polskiej Stacji Polarnej współczynnik Sky View Factor jest znacznie wyższy (0,993) dzięki czemu roczna suma usłonecznienia możliwego osiąga wartość 3647 godz.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Badania usłonecznienia możliwego w warunkach urozmaiconej rzeźby obszaru polarnego wykazały dużą jego zmienność przestrzenną. Różnorodność ekspozycji i nachyleń stoków, znaczne

deniwelację, a także zmienność zasłonięcia horyzontu sprawiają, że w rejonie Hornsundu występuje duże zróżnicowanie warunków insolacyjnych. Jak wykazano w pracy, usłonecznienie możliwe na obszarze polarnym zależy przede wszystkim od topografii i geometrii terenu kształtującej zasłonięcie horyzontu.

Wklęsłe formy terenu, szczególnie te nisko położone, w porównaniu do partii szczytowych charakteryzują się wyraźnie niższymi wartościami usłonecznienia możliwego. Dodatkowo kontrasty warunków insolacyjnych zmieniają się w zależności od wysokości Słońca. Zwiększają się one wyraźnie wraz ze zmniejszaniem kąta padania promieni słonecznych. Najmniejszą zmiennością usłonecznienia charakteryzują się formy wypukłe, szczególnie te wysoko położone.

Z porównania dwóch charakterystycznych dni roku pod względem czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego wynika, że podczas zrównania (wiosennego i jesiennego) analizowany obszar oświetlany jest przez Słońce średnio o 12,8 godziny krócej niż podczas przesilenia letniego. Różnica ta stanowi 62% wartości sumy dobowej usłonecznienia możliwego podczas przesilenia letniego.

Usłonecznienie możliwe rośnie wraz ze zmniejszającym się nachyleniem terenu. Rola ekspozycji w kształtowaniu warunków insolacyjnych obszarów polarnych jest znacznie mniejsza niż w niższych szerokościach geograficznych. Większą rolę odgrywa za to zasłonięcie horyzontu szczególnie w okresie niskiego położenia Słońca nad horyzontem.

## Literatura

- Angiel M., 1996. Promieniowanie pochłonięte na obszarze kamienistej tundry arktycznej w okresie wiosenno-letnim przy odmiennych typach pogody (Hornsund, SW Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 6: 83-97.
- Atlas Arktiki, 1985. Glavnoje Upravlenie Gieodezii i Kartografii pri Sovietie Ministrov, Moskwa: 204 s.
- Baranowski S., 1977. Subpolarne lodowce Spitsbergenu na tle klimatu tego regionu. *Studia Geograficzne* 31, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 393: 94 s.
- Błaszczki M., Jania J.A., Kolondra L., 2013. Fluctuations of tidewater glaciers in Hornsund Fjord (Southern Svalbard) since the beginning of the 20th century. *Polish Polar Research*, 34 (4): 325-350.
- Brázdil R., Chmal H., Kida J., Klementowski J., Konečný, M., Pereyma J., Piasecki J., Prošek P., Sobik M., Szczepankiewicz-Szmyrka A. (eds.), 1988. Results of investigations of the Geographical Research Expedition, Spitsbergen 1985. Univerzita Purkyně, Brno: 337 s.
- Budzik T., 2005. Usłonecznienie w Ny-Ålesund (NW Spitsbergen) w okresie 1993-2004. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 15: 103-111.
- Budzik T., Sikora S., Araźny A., 2009. Przebieg roczny salda promieniowania powierzchni czynnej w Hornsundzie (V 2008 – IV 2009). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 19: 233-244.
- Caputa Z., Głowacki P., 2002. Pomiarzy termiki gruntu oraz promieniowania słonecznego w latach 1989-1995, Hornsund, SW Spitsbergen. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 8: 111-123.
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L., 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, 6: 881-889. doi:10.5194/tc-6-881-2012.
- Chomicz K., Kuczmańska L., 1971. Zachmurzenie i usłonecznienie w Polsce. *Przegląd Geofizyczny*, 1/2: 69-89.
- Dolnicki P., Grabiec M., Puczek D., Gawor Ł., Budzik T., Klementowski J., 2013. Variability of temperature and thickness of permafrost active layer at coastal sites of Svalbard. *Polish Polar Research*, 34(4): 353-374.
- Francis J.A., Hunter E., 2007. Changes in the fabrics of the Arctic's greenhouse blanket. *Environmental Research Letters*, 2: 045011. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045011.
- Gavrilova M.K., 1963. Radiation Climate of the Arctic, *Gidrometeoizdat*, Leningrad: 178 s.

- Głowicki B., 1985. Radiation conditions in the Hornsund Area (Spitsbergen). *Polish Polar Research*, 6(3): 301-318.
- Głowacki P., Niedźwiedz T., 1997. Climatological conditions in Hornsund (Spitsbergen) during succeeding Polish Polar Expeditions, XXIV Polar Symposium. *Polish Polar Studies*, Warszawa: 81-94.
- Hock R., Holmgren B., 2005. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology*, 51 (172): 25-36.
- IPCC 2013. *Climate Change. The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jania J., Macheret Yu.Ya., Navarro F.J., Glazovsky A.F., Va-Silenko E.V., Laparazan J., Głowacki P., Migala K., Balut A., Piwowar B.A., 2006. Temporal changes of radiophysical properties of a polythermal glacier in Spitsbergen. *Annals of Glaciology*, 42: 125-134.
- Kruszewski G., 2013. Zlodzenie Hornsundu i wód przyległych (Spitsbergen) w sezonie zimowym 2011-2012. *Problemy Klimatologii Polarne*, 23: 169-180.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., Pietras M., 2010. Spatial information on total solar radiation: application and evaluation of the r.sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard. *Polish Polar Research*, 31(1): 17-32.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., 2011. Zastosowanie modelu r.sun do określenia dobowych sum promieniowania rzeczywistego na lodowcu Werenskjolda (SW Spitsbergen). *Prace i Studia Geograficzne*, 47: 435-442.
- Krzyściń J.W., Sobolewski P.S., 2001. The surface UV-B irradiation in the Arctic: observations at the Polish polar station, Hornsund (77N, 15E), 1996-1997. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63: 321-329.
- Láska K., Witoszová D., Prošek P., 2012. Weather patterns of the coastal zone of Petuniabukta, central Spitsbergen in the period 2008–2010. *Polish Polar Research*, 33(4): 297-318.
- Leszkiewicz J., Caputa Z., 2004. The thermal condition of the active layer in the permafrost at Hornsund, Spitsbergen *Polish Polar Research*, 25 (3-4): 223-239.
- Maturilli M., Herber A., König-Langlo G., 2014. Surface radiation climatology for Ny-Alesund, Svalbard (78.9° N), basic observations for trend detection. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-014-1173-4.
- Matuszko D., 2009. Wątpliwości terminologiczne dotyczące promieniowania słonecznego. *Prace Geograficzne*, 122: 55-61.
- Niedźwiedz T., 1993. The main factors forming the climate of the Hornsund (Spitsbergen). *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego MXCVIII*, 94: 49-63.
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 1988. Wpływ sytuacji synoptycznych na zachmurzenie i usłonecznienie w Hornsundzie (Spitsbergen). *IMGW, Oddział w Krakowie*: 20 s.
- Niewiadomski J., 1982. Report of the activities of the research expedition of Polish Academy of Sciences to Spitsbergen 1980/1981. *Polish Polar Research*, 3 (1-2): 123-127.
- Marsz A., Styszyńska A. (red.), 2013. *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University: 402 s.
- Pereyma J., 1983. Climatological problems of the Hornsund Area, Spitsbergen, Results of Investigations of the Polish Scientific Spitsbergen Expeditions 5, (*Acta Universitatis Wratislaviensis* 714): 134 s.
- Pettersen S., Jacobs W.C., Hayness B.C., 1956. *Meteorology of the Arctic. Naval operations for polar projects*. Washington D.C.: 280 s.
- Pohl S., Marsh P., Pletroniro A., 2006. Spatial-temporal variability in solar radiation during spring snowmelt. *Nordic Hydrology*, 37(1): 1-19.
- Przybylak R., Szczepłowska E., 2002. Warunki meteorologiczne na Kaffiøyrze (NW Spitsbergen) w czasie trwania Toruńskich Wypraw Polarnych, 1975-2000. *Polish Polar Studies, Funkcjonowanie i monitoring geosystemów obszarów polarnych*, Poznań: 217-237.
- Przybylak R., 2003. *The Climate of Arctic*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 270 s.

- Przybylak R., Araźny A., Kejna M., 2010a. Zróżnicowanie przestrzenne i wieloletnia zmienność temperatury gruntu w rejonie Stacji Polamej UMK (NW Spitsbergen) w okresie letnim (1975-2009). *Problemy Klimatologii Polamej*, 20: 103-120.
- Przybylak R., Vizi Z., Wyszyński P., 2010b. Air temperature changes in the Arctic from 1801 to 1920. *International Journal of Climatology*, 30: 791-812, doi: 10.1002/joc.1918.
- Sobolewski P.S., Krzyściń J.W., 2006. UV Measurements at the Polish Polar Station, Hornsund. Calibration and Data for the Period. *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science*, D-67 (382): 126 s.
- Spinnangr G., 1968. Global radiation and duration of sunshine in Northern Norway and Spitsbergen. *Meteorologiske Annaler* 5(3): 301–318.
- Styszyńska A., 1995. Dopyływ promieniowania całkowitego Słońca do powierzchni o dowolnym nachyleniu i ekspozycji. *Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni*: 160 s.
- Styszyńska A., 1997. Valuation of the monthly sum of the total sun radiation in Hornsund (SW Spitsbergen). [w:] Repelewska-Pękałowa J., Pękała K. (red.), *Spitsbergen Geographical Expeditions of M. Curie-Skłodowska University, UMCS*. Lublin: 163-172.
- Szymanowski M., Kryza M., Mięgała K., Sobolewski P., Kolondra L., 2008. Modelling and validation of the potential solar radiation for the Hornsund region – application of the r.sun model. *Annals of Geomatics*, 6(2): 107-112.
- Wojkowski J., 2007. Promieniowanie słoneczne w Krakowie. [w:] Matuszko D. (red.) *Klimat Krakowa w XX wieku*. IGiGP UJ, Kraków: 55-74,.
- Wojkowski J., Caputa Z., 2009. Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego. *Prądnik*. *Prace Muzeum Szafera* 19: 141-152.
- Wojkowski J., 2015. Promieniowanie słoneczne. [w:] *Atlas Tatr – przyroda nieożywiona*. Tatrzański Park Narodowy.
- Vinje T., 1976–1980. Radiation conditions in Spitsbergen in 1974-79. *Norsk Polarinstitut Årbok*, Oslo.
- Yamanouchi T., Treffeisen R., Herber A., Shiobara M., Yamagata S., Hara K., Sato K., Yabuki M., Tomikawa Y., Rinke A., Neuber R., Schumacher R., Kriews M., Stroem J., Schrems O., Gernandt H., 2005. Arctic study of tropospheric aerosol and radiation (ASTAR). *Arctic haze case study*. *Tellus*, 57B: 141-152.
- Zygmuntowska M., Mauritsen T., Quaas J., Kaleschke L., 2012. Arctic Clouds and Surface Radiation – a critical comparison of satellite retrievals and the ERA-Interim reanalysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12: 6667-6677.

Wpłynęło: 3 września 2015 r., poprawiono: 23 listopada 2015 r., zaakceptowano: 18 grudnia 2015 r.

## Summary

The article presents the results of the research on the spatial diversity of possible sunshine duration in Hornsund (SW Spitsbergen) area. This region is characterised by a complex relief. As the elevation of the Sun is low over the horizon, it is one of the main factors shaping insolation conditions of the Polar regions. The aim of the research was analysis of the spatial diversity of the possible sunshine duration and examining the impact of the relief over its distribution. Numeric modelling was used to analyse the spatial changeability of the insolation conditions. On the basis of the digital elevation model Aster GDEM with the resolution 30 m, spatial distribution of annual sums and daily sums of possible sunshine duration were prepared for the summer solstice and the equinox. The research proved that relief, diversity of forms, exposition and slopes as well as denivelations make the region of Hornsund rich in diversity of insolation conditions.

**Key words:** solar radiation, insolation conditions, possible sunshine duration, SAGA GIS, Arctic, Spitsbergen.