

BILANS RADIACYJNY W REJONIE KAFFIØYRY (NW SPITSBERGEN) W SEZONIE LETNIM 2010 ROKU

RADIATION BALANCE IN THE KAFFIØYRA REGION (NW SPITSBERGEN) IN THE SUMMER SEASON 2010

Marek Kejna, Rajmund Przybylak, Andrzej Arażny

Zakład Klimatologii, Instytut Geografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Gagarina 9, 87-100 Toruń
e-mail: marek.kejna@umk.pl

Zarys treści. W artykule przedstawiono wyniki rejestracji składowych bilansu promieniowania na 3 stanowiskach: Kaffiøyra-Heggodden (KH), Lodowiec Waldemara-czoło (LW1) i Lodowiec Waldemara-pole firmowe (NW Spitsbergen) w okresie od 16.07 do 31.08.2010 r. Pomiar prowadzono przy pomocy Radiometru CNR4 firmy Kipp&Zonen. Co minutę rejestrowano natężenie promieniowania słonecznego K_{\downarrow} , promieniowania odbitego (K_{\uparrow}), promieniowania ziemi (L_{\downarrow}) i promieniowania zwrotnego atmosfery (L_{\uparrow}). Na tej podstawie obliczono bilans radiacyjny (Q^*), składający się z bilansu krótkofalowego (K^*) i długofalowego (L^*). Stwierdzono niewielkie różnice pomiędzy stanowiskami KH i LW2 założonymi na podłożu morenowym. Najmniej korzystny Q^* wystąpił na LW2 nad powierzchnią śnieżno-lodowcową charakteryzującą się wysokim albedo. W artykule zbadano zróżnicowanie przestrzenne składowych bilansu radiacyjnego z dnia na dzień oraz w cyklu dobowym.

Słowa kluczowe: Bilans radiacyjny, promieniowanie słoneczne, promieniowanie atmosfery, promieniowanie ziemi, Spitsbergen, Kaffiøyra.

1. Wstęp

Bilans radiacyjny składa się z salda promieniowania krótkofalowego (K^*) i z salda promieniowania długofalowego (L^*), w pełnym zakresie widma opisują go równania (Oke 1996):

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

gdzie:

Q^* – bilans promieniowania,

K^* – saldo promieniowania krótkofalowego,

L^* – saldo promieniowania długofalowego,

K_{\downarrow} – promieniowanie słoneczne całkowite (bezpośrednie i rozproszone),

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

L_{\downarrow} – promieniowanie długofalowe atmosfery skierowane do powierzchni Ziemi,

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

Na zróżnicowanie Q^* zwłaszcza w skali topoklimatycznej wpływają właściwości podłoża poprzez jego albedo. Ponadto istotna jest przezroczystość atmosfery uzależniona od wysokości nad poziom morza oraz zawartości pary wodnej i aerozoli. Zróżnicowane strumienie energii wchodzące w skład bilansu radiacyjnego wpływają na przebieg poszczególnych elementów meteorologicznych (np. temperatury podłoża i powietrza, wilgotności itp.) oraz na intensywność procesów chemicznych i fizycznych zachodzących na danym obszarze.

Stosunki radiacyjne w regionach polarnych były przedmiotem badań wielu autorów. Przegląd badań bilansu promieniowania w tundrze arktycznej zawiera artykuł Ohmury (1982). Na Spitsbergenie pomiary aktynometryczne prowadzono w czasie licznych ekspedycji letnich oraz w cyklu całorocznym. Badania dotyczyły zarówno poszczególnych składowych, w tym albedo, jak i całego bilansu radiacyjnego. Najpełniejsza seria danych pochodzi z NyÅlesundu. Wyniki badań z lat 1981-1997 zawiera praca Winther i in. (2002). Wartości te zostały porównane z danymi satelitarnymi (Ørbaek i in. 1999). W kolejnych latach zbadano wpływ zachmurzenia i rodzaju chmur na bilans radiacyjny w tej stacji (Nordino i Georgiadis 2003). Natomiast Winther i in. (1999) badali spektralne odbicie topniejącego śniegu na Svalbardzie. W 2004 r. Budzik opracował dane z NyÅlesundu z lat 1989-2003. Natomiast Kupfer i in. (2003) przeanalizowali składowe bilansu radiacyjnego od 1992 r. do 2001 z AWIPEV – francusko-niemieckiej stacji w NyÅlesund działającej w ramach Baseline Surface Radiation Network WMO. Stopniowo rozszerzano te badania na okoliczne lodowce, np. Arnold i Rees (2009) zmierzili wielkość promieniowania całkowitego na Lodowcu Midre Love'n przy użyciu lidaru.

W rejonie Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie badania bilansu cieplnego warstwy czynnej w latach 1980/1981 realizował Głowicki (1985). Natomiast w sezonie letnim 1985 r. prowadzono badania aktynometryczne w rejonie Lodowca Werenskiølda (Brázdil i in. 1988). W pracy z 1993 r. T. Niedźwiedz opublikował wyniki pomiarów albedo w tym rejonie, a A. Styszyńska (1997) zestawiła wszelkie dostępne dane, a następnie obliczyła wielkość promieniowania całkowitego na podstawie miesięcznych sum usłonecznienia i zachmurzenia. Dane te zostały przedłużone do 2006 r. (Marsz i Styszyńska 2007). W 2009 r. Budzik i in. przedstawili wyniki badań składowych bilansu radiacyjnego w Hornsundzie.

W innych rejonach Spitsbergenu latem 1988 i 1990 w rejonie Barentsburga i Reindalen badania aktynometryczne prowadzili Prošek i Brázdil (1994). W 2001 r. Gluza i Siwek (2005) badali zróżnicowanie albedo w rejonie Calypsostrandy. Natomiast przestrzenne zróżnicowanie promieniowania całkowitego na Wedel Jarlsberg Land opracowali na podstawie modelu Kryza i in. (2010).

W rejonie Kaffiøyry (Oscar II Land) pomiary aktynometryczne (zwłaszcza promieniowania bezpośredniego) zapoczątkował w 1977 r. G. Wójcik, w czasie kolejnych wypraw badania te były kontynuowane (Wójcik 1989, Wójcik, Marciniak 1993, 2002). W 1999 r. badania wielkości albedo na Lodowcu Waldemara prowadził Kejna (2000), a na Lodowcu Aavatsmarka w sezonie wiosennym prowadzili je pracownicy Uniwersytetu Śląskiego (Caputa i in. 2002, Budzik 2003).

Z reguły dotychczasowe pomiary były prowadzone w jednym punkcie, natomiast brakowało danych o zróżnicowaniu przestrzennym bilansu radiacyjnego. Celem artykułu jest porównanie składowych bilansu radiacyjnego typowych dla Spitsbergenu rodzajów podłoża: morenowego i lodowcowego.

2. Metodyka badań

Pomiary aktynometryczne prowadzono przy pomocy Net Radiometer CNR4 firmy Kipp&Zonen, który składał się z dwóch pyranometrów i dwóch pyrgeometrów skierowanych ku górze i ku dołowi.

Zestaw ten mierzy bilans energii pomiędzy dochodzącym promieniowaniem: krótko- i długofalowym od atmosfery oraz odbitym promieniowaniem krótkofalowym i uchodzącym promieniowaniem długofalowym powierzchni ziemi. Każdy z przyrządów był indywidualnie skalibrowany. Szczegóły dotyczące użytych przyrządów podano w tabeli 1. CNR4 jest ponadto wyposażony w czujnik temperatury Pt-100 wykorzystywany przy korekcji promieniowania długofalowego. Przyrządy nie były wentylowane.

Tabela 1 – Table 1

Specyfikacja Net Radiometer CNR4 (Kipp&Zonen)
Specification of Net Radiometer CNR4 (Kipp&Zonen)

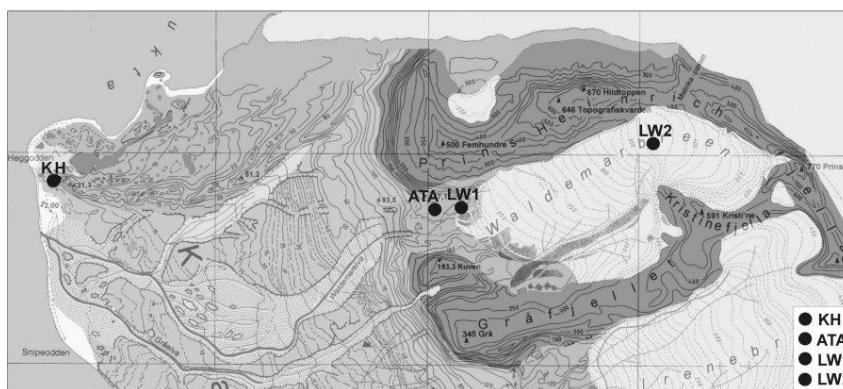
Specyfikacja – Specification	Pyranometr – Pyranometer	Pyrgeometr – Pyrgeometer
Zakres spektralny – Spectral range	300-2800 nm	4500-42000 nm
Czułość – Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Zależność czułości od temperatury (-10°C do +40°C) – Temperature dependence of sensitivity (-10°C to +40°C)	<4%	<4%
Czas reakcji – Response time	<18 s	< 18 s
Nielinearność – Non-linearity	<1%	< 1%
Zakres temperatury – Operating temperature	-40 - 80 °C	-40 to 80°C
Standard WMO – International standards (WMO)	Good Quality WMO	Good Quality WMO

Badania prowadzono na 3 stanowiskach (ryc. 1) różniących się rodzajem podłoża oraz wysokością nad poziomem morza:

KH – Kaffiøyra-Heggodden – morena czołowo-boczna Lodowca Aavatsmarka, z rzadka porośnięta roślinnością tundrową, 11,5 m n.p.m.

LW1 – czoło Lodowca Waldemara – na świeżej morenie dennej w odległości 10 m od czoła lodowca, 130 m n.p.m.

LW2 – pole firnowe Lodowca Waldemara – topniejący śnieg, 375 m n.p.m.



Ryc. 1. Położenie punktów pomiarowych w rejonie Kaffiøyry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Fig. 1. Localization of measurements points in the period 16 VII – 31 VIII 2010

Na wszystkich stanowiskach czujniki zainstalowano na wysokości 2 m nad podłożem, na LW2 obniżano przyrząd wraz z topniejącą pokrywą śnieżną, zachowując stałą odległość od podłoża.

Rejestrację prowadzono w okresie od 16 lipca do 31 sierpnia 2010 r., a wartości poszczególnych strumieni promieniowania były zapisywane na loggerze LOGBOX SD z częstotliwością co 1 minutę. Na stanowiskach KH i LW2 dane były kompletne, natomiast na LW1 wystąpiła przerwa w rejestracji w dniach 20-24 lipca, brakujące dane uzupełniono na podstawie stanowiska KH wykorzystując dużą zależność liniową pomiędzy danymi z tych stanowisk. Na podstawie uzyskanych strumieni promieniowania obliczono wielkość energii docierającej i traconej przez podłoże w okresach 1 minutowych, godzinnych i dobowych. Obliczono wielkość albedo oraz bilans promieniowania krótko- i długofalowego oraz bilans radiacyjny. Równolegle na ww. stanowiskach prowadzono automatyczne pomiary podstawowych elementów meteorologicznych.

3. Wyniki

3.1. Promieniowanie krótkofalowe

Saldo promieniowania powierzchni czynnej w zakresie krótkofalowym K^* jest różnicą strumienia promieniowania słonecznego całkowitego K_{\downarrow} oraz promieniowania słonecznego odbitego od podłoża K_{\uparrow} . W analizowanym okresie maksymalne natężenie całkowitego promieniowania słonecznego sięgało $709.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na wybrzeżu (KH), $882.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ u czoła lodowca (LW1) i $836.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na jego polu firmowym (LW2). Maksymalne natężenie promieniowania słonecznego najmniejsze było na wybrzeżu ze względu na wzrost masy optycznej atmosfery oraz większą wilgotność powietrza. Natomiast średnie sumy dobowe K_{\downarrow} w analizowanym okresie wyniosły: na KH $11.04 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, na LW1 $10.46 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i na LW2 $10.60 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (tab. 2).

Tabela 2 – Table 2

Strumienie K_{\downarrow} i K_{\uparrow} oraz albedo (A) w rejonie Kaffiøyry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

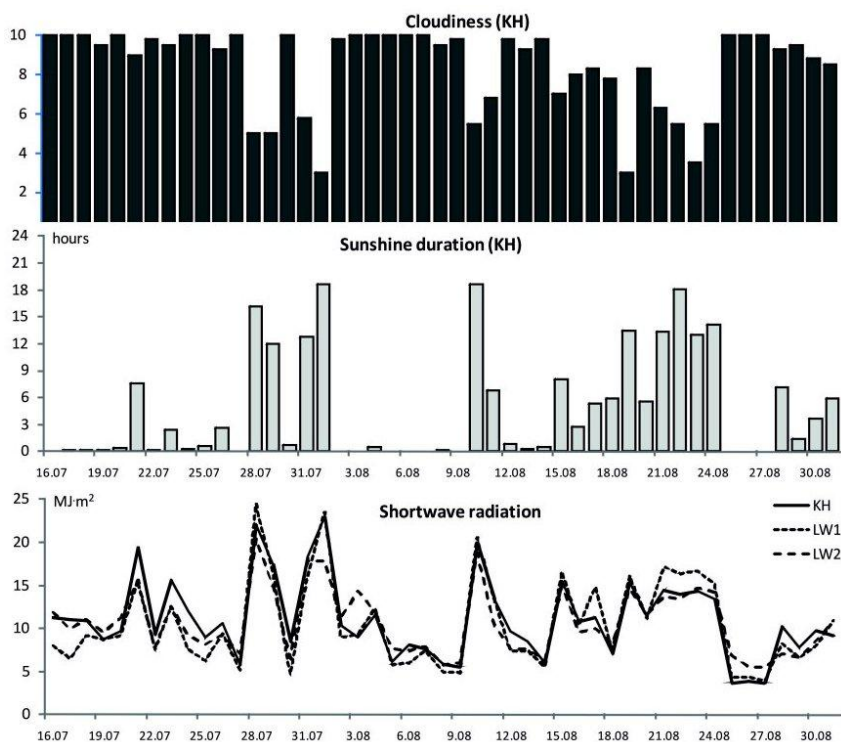
Fluxes K_{\downarrow} and K_{\uparrow} and albedo (A) in the Kaffiøyra region in the period 16 VII – 31 VIII 2010

Okres Period	$K_{\downarrow\text{max}} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$			$K_{\downarrow} [\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}]$			$K_{\uparrow} [\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}]$			A [%]		
	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2
16-20 VII	709.0	299.0	364.1	10.31	8.30	10.67	1.24	0.82	6.63	13.0	10.6	62.6
21-31 VII	709.4	882.1	836.2	13.43	11.39	11.72	1.85	1.41	7.54	14.2	12.5	67.3
01-10 VIII	521.4	828.9	744.1	10.66	10.34	10.86	1.46	1.28	4.93	14.5	12.6	46.1
11-20 VIII	608.7	838.1	762.7	10.87	10.99	10.07	1.57	1.60	7.11	15.6	15.2	69.4
21-31 VIII	474.9	551.5	603.0	9.47	10.13	9.68	1.38	1.47	5.37	15.3	13.7	60.4
16.07-31 VIII 2010	709.4	882.1	836.2	11.04	10.46	10.60	1.53	1.37	6.29	14.7	13.2	61.1

W analizowanym okresie zaznacza się zmniejszenie ilości docierającej energii słonecznej związanej z malejącą wysokością Słońca nad horyzontem (ryc. 2). Wyróżnić można dni z niewielkim zachmurzeniem i dużym usłonecznieniem oraz dużym dopływem promieniowania słonecznego, np. 1 sierpnia 2010 r. sumy dobowe promieniowania sięgnęły na KH – 22.9 , LW1 – 23.5 i LW2 – $17.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a 28 lipca 2010 r. odpowiednio 14.7 , 24.4 i $20.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. W czasie dni pochmurnych dobowe sumy K_{\downarrow} były mniejsze od $10 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

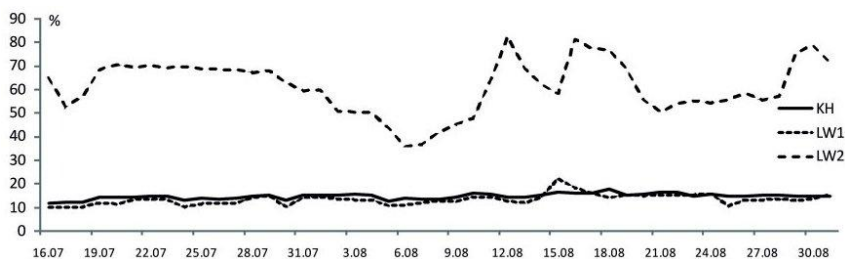
Część promieniowania słonecznego ulega odbiciu od podłoża. Stosunek promieniowania odbitego do padającego określa się jako albedo. Jest ono zdecydowanie najwyższe dla powierzchni śnieżno-lodowcowej pola firmowego (LW2 średnio 61%). Powierzchnie morenowe charakteryzują się znacznie

mniejszym średnim albedo: KH 15% i LW1 13% – tab. 2. Największe zmiany albedo występują na LW2, wahało się ono od około 40% w okresie odsłonięcia topniejącego lodu lodowcowego do 80% po opadach śniegu (ryc. 3). Podobne rezultaty pomiarów albedo uzyskał Kejna (2000), w 1999 roku na polu firmowym Lodowca Waldemara zmieniało się ono od 40 do 75% w zależności od opadów śniegu i stopnia "zabrudzenia" pyłem powierzchni lodowca z okolicznych wzniesień.



Ryc. 2. Przebieg zachmurzenia (0-10) i usłonecznienia (godz.) na stanowisku KH oraz sum dobowych promieniowania krótkofalowego ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) na stanowiskach KH, LW1 i LW2 w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Fig. 2. Course of cloudiness (0-10) and sunshine duration (hours) at the KH stand and daily sums of short solar radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) at the stands: KH, LW1 i LW2 in the period 16 VII – 31 VIII 2010



Ryc. 3. Przebieg albedo w rejonie Kaffiøyry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Fig. 3. Course of albedo in the Kaffiøyra region in the period 16 VII – 31 VIII 2010

3.2. Promieniowanie długofalowe

Powierzchnia ziemi emituje w kierunku atmosfery promieniowanie długofalowe ($L\uparrow$), znaczna część tego promieniowania jest pochłaniana przez atmosferę, a zwłaszcza przez parę wodną, dwutlenek węgla i inne gazy cieplarniane, a następnie emitowana w kierunku ziemi jako promieniowanie zwrotne atmosfery ($L\downarrow$). Istotną rolę w kształtowaniu tego strumienia odgrywa zachmurzenie. Średnia suma dobową $L\uparrow$ wyniosła na KH: 30.31 MJ·m⁻², LW1: 29.88 MJ·m⁻² i LW2: 30.10 MJ·m⁻². W przebiegu $L\uparrow$ wystąpił pomiędzy 19 a 26 sierpnia trudny do interpretacji znaczny wzrost tego strumienia, z najwyższymi wartościami na LW2 (do prawie 34 MJ·m⁻²). Był to okres o niewielkim zachmurzeniu, dużym usłonecznieniu i najwyższą w sezonie temperaturą powietrza. Natomiast strumień $L\downarrow$ pochodzący od atmosfery nie wykazuje większych zmian w analizowanym okresie, a pomiędzy stanowiskami występują niewielkie różnice KH: 27.26 MJ·m⁻², LW1: 27.47 MJ·m⁻² i LW2: 27.37 MJ·m⁻² (tab. 3).

Tabela 3 – Table 3

Średnie dobowe wartości strumieni $L\downarrow$ i $L\uparrow$ w rejonie Kaffiøry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Daily values of fluxes $L\downarrow$ i $L\uparrow$ in the Kaffiøra region in the period 16 VII – 31 VIII 2010

Okres Period	$L\downarrow$ [MJ·m ⁻²]			$L\uparrow$ [MJ·m ⁻²]		
	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2
16-20 VII	29.30	29.27	29.09	30.85	30.05	30.47
21-31 VII	27.82	28.20	28.11	30.87	30.24	30.28
1-10 VIII	28.28	28.37	28.24	30.70	30.21	30.14
11-20 VIII	25.83	26.23	26.32	29.55	29.26	29.80
21-31 VIII	26.13	26.22	26.02	29.84	29.72	29.97
16 VII – 31 VIII 2010	27.26	27.47	27.37	30.31	29.88	30.10

3.3. Bilans promieniowania

Na bilans promieniowania powierzchni czynnej (Q^*) składa się bilans krótkofalowy (K^*) oraz bilans długofalowy (L^*). Saldo promieniowania krótkofalowego K^* stanowi różnicę między promieniowaniem słonecznym docierającym do powierzchni ziemi $K\downarrow$ a promieniowaniem odbitym $K\uparrow$. W rejonie Kaffiøry pomiędzy stanowiskami morenowymi (KH, LW1) a Lodowcem Waldemara (LW2) występują znaczne różnice. W analizowanym okresie średnio na dobę docierało na KH +9.50 MJ·m⁻² i na LW1 +9.09 MJ·m⁻², a na LW2 +4.31 MJ·m⁻² (tab. 4). Związane jest to nie tylko z różnicami w dopływie promieniowania słonecznego wynikającymi z większego zachmurzenia w górnych partiach lodowca, ale przede wszystkim z albedo sięgającym na LW2 61%.

Saldo promieniowania długofalowego L^* stanowi różnicę między strumieniem $L\downarrow$ (promieniowaniem zwrotnym atmosfery) a strumieniem $L\uparrow$ (wypromieniowaniem ziemi). Średnie wartości L^* są ujemne, największe straty promieniowania występują na wybrzeżu (KH -3.05 MJ·m⁻²) i maleją na LW1 (-2.42 MJ·m⁻²) oraz ponownie wzrastają na LW2 (-2.73 MJ·m⁻²). Szczególnie niskie wartości L^* występują w czasie dni pogodnych, kiedy zdecydowanie przeważa wypromieniowanie z ogrzanej powierzchni ziemi w stosunku do promieniowania zwrotnego czystego, bezchmurnego nieba.

Bilans powierzchni ziemi (Q^*) uwzględniający wszystkie strumienie energii w całym zakresie widma jest najkorzystniejszy na podłożu morenowym u czoła Lodowca Waldemara (LW1 +6.67 MJ·m⁻²) oraz na wybrzeżu (KH +6.45 MJ·m⁻²). Najmniej korzystny zaś na pokrytym śniegiem polu firmowym tego lodowca (LW2 +1.58 MJ·m⁻²). W analizowanym okresie wystąpiły znaczne zmiany Q^* związane

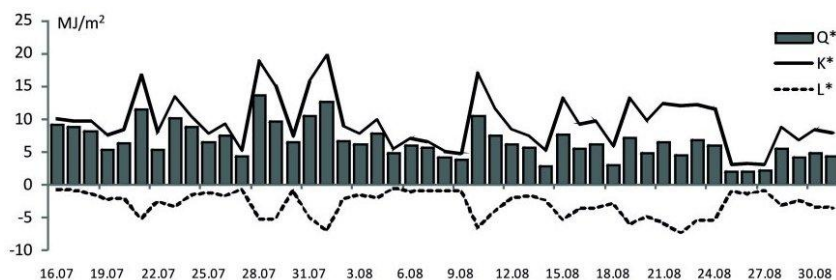
Tabela 4 – Table 4

Wartości bilansu promieniowania krótkofalowego (K^*), długofalowego (L^*) oraz bilansu powierzchni czynnej (Q^*) w rejonie Kaffiøyry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Values of net shortwave radiation (K^*), net longwave radiation (L^*) and surface radiation balance (Q^*) in the Kaffiøyra region in the period 16 VII – 31 VIII 2010

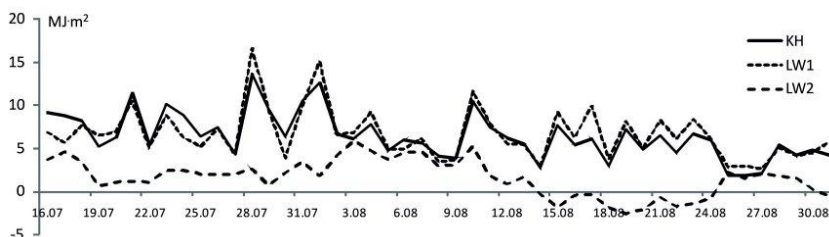
Okres Period	K^* [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]			L^* [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]			Q^* [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$]		
	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2	KH	LW1	LW2
16-20 VII	9.06	7.49	4.04	-1.55	-0.78	-1.38	7.51	6.70	2.66
21-31 VII	11.58	9.98	4.18	-3.05	-2.04	-2.18	8.53	7.94	2.00
1-10 VIII	9.20	9.06	5.93	-2.42	-1.84	-1.90	6.78	7.22	4.03
11-20 VIII	9.30	9.40	2.96	-3.72	-3.03	-3.48	5.58	6.37	-0.52
21-31 VIII	8.09	8.66	4.31	-3.71	-3.50	-3.95	4.38	5.17	0.37
16 VII – 31 VIII 2010	9.50	9.09	4.31	-3.05	-2.42	-2.73	6.45	6.67	1.58

z zachmurzeniem. W dniach słonecznych Q^* dla powierzchni morenowej przekracza 10-15 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, np. w dniu 28 lipca 2010 r. Q^* osiągnęło na KH 13.6 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (K^* 18.9 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, L^* -5.3 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), na LW1 16.5 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (K^* 21.2 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, L^* -4.7 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) – ryc. 4 i 5. W tym samym dniu na powierzchni śnieżno-lodowcowej (LW2) Q^* osiągnęło zaledwie 2.5 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (K^* wyniosło 7.6 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a L^* -5.1 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Wyższe Q^* na LW2 wystąpiło 3 sierpnia (6.0 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) przy pełnym zachmurzeniu.



Rys. 4. Przebieg bilansu radiacyjnego (Q^*), krótkofalowego (K^*) i długofalowego (L^*) na stanowisku KH w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Fig. 4. Course of surface radiation balance (Q^*), net short wave radiation (K^*) and net long wave radiation (L^*) at KH stand in the period 16 VII – 31 VIII 2010



Rys. 5. Przebieg bilansu radiacyjnego (Q^*) na stanowiskach: KH, LW1 i LW2 w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

Fig. 5. Course of surface radiation balance (Q^*) at the stands: KH, LW1 and LW2 in the period 16 VII – 31 VIII 2010

Pomiędzy stanowiskami występuje więc niezgodność w przebiegu Q^* (ryc. 5). Dla stanowisk o powierzchni morenowej (KH, LW1) najwyższe wartości Q^* występują w czasie dni słonecznych, a najważniejsze znaczenie ma duży dopływ promieniowania słonecznego. Natomiast dla powierzchni śnieżno-lodowcowych duży wpływ na Q^* wywiera bilans długofalowy (L^*) przyjmujący najwyższe wartości w czasie dni pochmurnych.

Na wszystkich stanowiskach zaznacza się stopniowe zmniejszanie Q^* aż do wystąpienia wartości ujemnych na LW2, co jest związane z malejącym dopływem promieniowania słonecznego i końcem dnia polarnego. Kończy się więc okres dodatniego Q^* , który wg Budzika (2003 r.) rozpoczyna się na sąsiednim Lodowcu Aavatsmarka na przełomie kwietnia i maja.

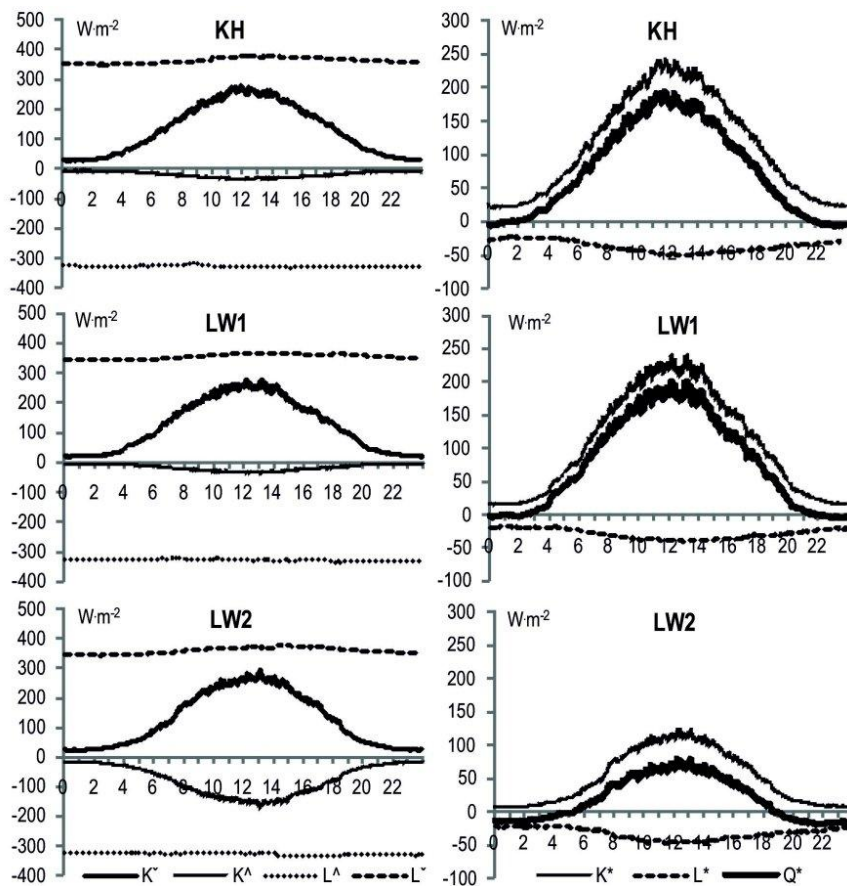
3.4. Zmiany struktury bilansu promieniowania w cyklu dobowym

Pomimo dnia polarnego na Spitsbergenie zaznacza się nierównomierny dopływ promieniowania w ciągu doby związany ze zmianą wysokości Słońca nad horyzontem. W przeprowadzonych badaniach zastosowano czas strefowy 15°E . Ponieważ Kaffiøyra jest położona na $11^\circ 50'\text{E}$ górowanie i dołowanie Słońca występuje o około 13 minut później w stosunku do czasu strefowego. Uzyskane przebiegi wszystkich strumieni są symetryczne względem tak wyznaczonego południa słonecznego. Strumień K_\downarrow osiąga najwyższe średnie wartości w godzinach południowych KH: $278.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, LW1: $275.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, LW2: $295.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (ryc. 6). Około północy wartości te obniżają się do odpowiednio: 27.2, 19.2 i $23.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Albedo w cyklu dobowym zmienia się w zależności od wysokości Słońca, najmniejsze jest gdy Słońce góruje (KH: 12.5%, LW1: 12.2% i LW2: 55.2%), przy najniższych wysokościach Słońca wzrasta odpowiednio do 21.8, 20.8 i 69.4%. Strumienie promieniowania długofalowego L_\uparrow i L_\downarrow w cyklu dobowym wzrastają wraz z temperaturą podłoża i atmosfery.

Uśredniony bilans K^* osiąga najwyższe wartości w południe (KH: 243.5, LW1: 240.2, LW2: $124.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (rys. 6). W czasie dołowania Słońca K^* zmierza do zera i wynosi na KH: 21.3, LW1: 5.4 i LW2: $7.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Bilans promieniowania długofalowego (L^*) jest ujemny i osiąga największe wartości w godzinach okołopołudniowych (KH: -50.0 , LW1: -40.1 i LW2: $-47.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Sumaryczny bilans powierzchni czynnej (Q^*) jest najwyższy w godzinach południowych, kiedy to jest o około 2.5 razy wyższy dla powierzchni morenowej (KH: 194.8 i LW1: $201.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) niż śnieżno-lodowcowej (LW2: $79.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Przy niskich położeniach Słońca Q^* staje się ujemny i wynosi na KH: -6.8 , LW1: -5.4 i LW2: $-19.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Na LW2 w analizowanym okresie ujemny Q^* występuje już od godz. 19 do godz. 5, a na KH i LW1 od godz. 22 do godz. 2.

W poszczególnych dniach na przebieg składowych bilansu wpływa nie tylko wysokość Słońca, ale i stan atmosfery, a zwłaszcza obecność chmur. Na przykład w dniach 27 i 28 lipca 2010 r. wystąpiły różne typy pogody (ryc. 7). W pierwszym dniu zachmurzenie było całkowite (chmury St i Sc) i nie zarejestrowano usłonecznienia. W kolejnym dniu się rozpogodziło i zachmurzenie było umiarkowane (Cu, Ac, Ci), a suma usłonecznienia sięgnęła 16.2 godz. (tab. 5) W dniu 27 lipca wystąpił niewielki dopływ promieniowania słonecznego (średnie natężenie $68.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, suma dobową $5.92 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), bilans krótkofalowy (K^*) wyniósł $5.14 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a długofalowy (L^*) był niewielki ($-0.84 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), ze względu na pełne zachmurzenie, które sprzyjało znacznemu promieniowaniu zwrotnemu atmosfery (L_\downarrow $339.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Natomiast w dniu 28 lipca w godzinach przedpołudniowych maksymalne natężenie promieniowania słonecznego K_\downarrow wyniosło $668.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. W ciągu doby do powierzchni dotarło $22.04 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a K^* sięgnął $18.90 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Bilans długofalowy był ujemny ($-5.26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), ze względu na znaczne

wypromieniowanie z gruntu ($L\uparrow$ 352.0 $W\cdot m^{-2}$) i niewielkie promieniowanie zwrotne atmosfery ($L\downarrow$ 291.1 $W\cdot m^{-2}$). Jednak ogólny bilans radiacyjny był 3-krotnie wyższy niż 27 lipca i wyniósł 13.65 $MJ\cdot m^{-2}$.



Ryc. 6. Uśrednione przebieg dobowe składowych bilansu radiacyjnego oraz bilans krótkofalowy (K^*), długofalowy (L^*) i ogólny (Q^*) w rejonie Kaffiøryry w okresie 16 VII – 31 VIII 2010 r.

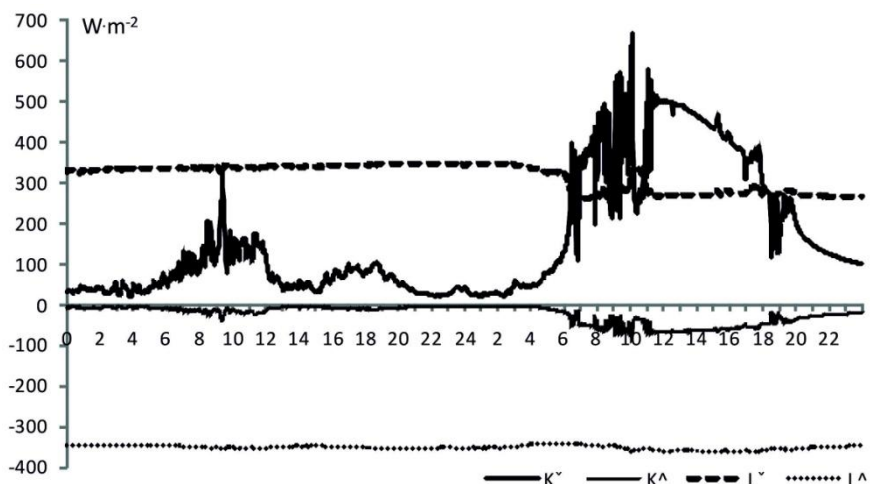
Fig. 6. Average course of balance radiation fluxes and surface radiation balance (Q^*), net short wave radiation (K^*) and net long wave radiation (L^*) in the Kaffiøryra region in the period 16 VII – 31 VIII 2010

Tabela 5 – Table 5

Średnie dobowe wartości zachmurzenia (Z), usłonecznienia (U) oraz składowe bilansu promieniowania na stanowisku KH w dniach 27 i 28 lipca 2010 r.

Daily mean values of cloudiness (Z), sunshine duration (U) and balance radiation fluxes on the KH stand in 27th and 28th July 2010

Dzień Day	Z. [0-10]	U [godz.- hours]	$K\downarrow$ $W\cdot m^{-2}$	$K\uparrow$ $W\cdot m^{-2}$	$L\downarrow$ $W\cdot m^{-2}$	$L\uparrow$ $W\cdot m^{-2}$	K^* $MJ\cdot m^{-2}$	L^* $MJ\cdot m^{-2}$	Q^* $MJ\cdot m^{-2}$
27 VII	10.0	.	68.6	9.0	339.3	349.0	5.14	-0.84	4.30
28 VII	5.0	16.2	255.1	36.3	291.1	352.0	18.90	-5.26	13.65



Ryc. 7. Przebieg składowych bilansu radiacyjnego na stanowisku KH w dniach 27 i 28 lipca 2010 r.

Fig. 7. Course of balance radiation fluxes at KH stand during the days 27 and 28 July 2010

4. Dyskusja wyników

Wyniki pomiarów składowych bilansu promieniowania prowadzonych w sezonie letnim 2010 roku w rejonie Kaffiøyry porównano z podobnymi badaniami na Spitsbergenie. Ponieważ w cytowanych poniżej opracowaniach najczęściej podawane są średnie wartości miesięczne, przy porównaniu skupiono się na danych z miesiąca sierpnia.

Na Spitsbergenie w sierpniu, w poszczególnych latach i według różnych autorów, sumy miesięczne K_{\downarrow} wahały się od $234.67 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na przedpolu Lodowca Werenskiölda do $361.46 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ na polu firmowym tego lodowca (tab. 6). Również na Lodowcu Hansa występuje wzrost K_{\downarrow} w porównaniu z wybrzeżem (Hornsund), a odpowiednie wartości w sierpniu 2008 roku wyniosły 275.6 i $363 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. W rejonie Kaffiøyry nie wystąpiły podobne relacje, w sierpniu 2010 roku na wybrzeżu (KH) suma K_{\downarrow} wyniosła $319.46 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a na polu firmowym Lodowca Waldemara $315.79 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Na niewielkim Lodowcu Waldemara występują zbliżone warunki pogodowe, jak na pobliskim wybrzeżu, w odróżnieniu od wnętrza Spitsbergenu. Maksymalne wartości K_{\downarrow} są uzależnione od aktualnych warunków pogodowych, zachmurzenia i zjawisk zmniejszających przezroczystość atmosfery i zawierały się od $626.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w Hornsundzie do $928 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w NyÅlesund. W rejonie Kaffiøyry w sierpniu 2010 r. sięgnęły $608.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na wybrzeżu (KH) i $838.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ u czoła Lodowca Waldemara (LW1).

Wielkość K_{\uparrow} zależy od wielkości K_{\downarrow} oraz albedo podłoża. Największe jego wartości występują na podłożu lodowcowym: na Lodowcu Hansa w 2008 r. ($209 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) i na polu firmowym Lodowca Waldemara ($179.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Powierzchnie te charakteryzują się średnim albedo ok. 60%. Na wybrzeżu nad podłożem morenowym lub tundrowym albedo sięga 14-21%, a wielkość K_{\uparrow} wynosi od 40 do $50 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Bilans promieniowania krótkofalowego (K^*) najmniej korzystny jest na powierzchniach lodowcowych: pole firmowe Lodowca Waldemara ($136.39 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) i na Lodowcu Hansa ($154 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Więcej energii słonecznej pochłaniają powierzchnie morenowe (np. w sierpniu 2010 roku $279.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ u czoła Lodowca Waldemara) oraz tundrowe (np. $231.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w Hornsundzie, $224.65 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ w NyÅlesund).

Tabela 6 - Table 6

Wartości składowych bilansu radiacyjnego w sierpniu w różnych latach na Spitsbergenie
(według różnych autorów)

Values of balance radiation fluxes in August in different years on Spitsbergen (according to different authors)

Obszar Area	Lata Years	Składowe bilansu radiacyjnego – Balance radiation fluxes								
		K↓max W·m ⁻²	K↓ MJ·m ⁻²	K↑ MJ·m ⁻²	A %	L↓ MJ·m ⁻²	L↑ MJ·m ⁻²	K* MJ·m ⁻²	L* MJ·m ⁻²	Q* MJ·m ⁻²
Rejon Kaffiøyry	KH (2010)	608.7	319.46	45.48	15.2	828.54	930.75	273.99	-102.29	171.78
	LW1 (2010)	838.1	324.84	44.93	13.9	834.39	921.55	279.90	-102.21	192.74
	LW2 (2010)	762.7	315.79	179.46	58.7	831.86	929.12	136.39	-87.16	39.13
Hornsund	1978-2006 ²	300.30								
	2008 ¹	626.6	275.60	43.70	16.0	810.80	911.60	231.90	-100.90	131.00
Werenskiöld- breen	przedpole – foreland (1970-1973) ²	234.67								
	lodowiec – glacier (1957-1960) ²	361.46								
Hansbreen	2008 ³	363.00	209.00	58.0	800.00	856.00	154.00	-56.00	98.00	
	2009 ³	353.00	96.00	27.0	811.00	856.00	257.00	-44.00	213.00	
Calypso	2006-2008 ⁴	272.61		8.5- 21.2 ⁵						
Ny-Ålesund	1989-2003 ⁶	267.56				224.65		-104.25		120.40
	1993-2001 ⁷	928.0		16.3						
	2008 ¹	269.70	41.20	15.0	810.60	909.60	228.50	-99.00	129.50	

¹ – Budzik i in. 2009, ² – Marsz i Styszyńska 2007, ³ – Budzik 2010 (informacja ustna), ⁴ – Gluza 2010 (informacja ustna), ⁵ – Gluza, Siwek 2005, ⁶ – Budzik 2004, ⁷ – Kupfer i in. 2003

Miesięczna suma promieniowania L↑ w sierpniu na Spitsbergenie waha się od 856 MJ·m⁻² (Lodowiec Hansa) do 930.75 MJ·m⁻² na Kaffiøyrze. Natomiast promieniowania L↓ od 800 MJ·m⁻² (Lodowiec Hansa) do 834.39 MJ·m⁻² u czoła Lodowca Waldemara. Bilans długofalowy (L*) był najmniejszy na powierzchniach lodowcowych: na Lodowcu Hansa -44 MJ·m⁻² (2008 r.) i -56 MJ·m⁻² (2009 r.) i na Lodowcu Waldemara (LW2 -87.16 MJ·m⁻²). Natomiast podłoże tundrowe i morenowe traci więcej energii długofalowej, bo około -100 MJ·m⁻² w ciągu miesiąca.

Bilans radiacyjny (Q*) jest najmniej korzystny na lodowcach: w sierpniu na polu firmowym Lodowca Waldemara wyniósł on 39.13 MJ·m⁻² w 2010 r. i 98 MJ·m⁻² na Lodowcu Hansa w 2008 r. Na tle Hornsundu (131 MJ·m⁻²) i Ny Ålesundu (120.4 MJ·m⁻²) w sierpniu 2010 r. na Kaffiøyrze i u czoła Lodowca Waldemara wartości Q* były wyższe (odpowiednio 171.78 i 192.74 MJ·m⁻²), co należy wiązać ze słonecznym latem i dużym dopływem K↓.

Stosunki aktynometryczne wpływają na przebieg pozostałych elementów meteorologicznych oraz na stan środowiska. Szczególnie wrażliwy na wszelkie zaburzenia jest arktyczny ekosystem funkcjonujący w rejonie Spitsbergenu (Aguilera i in. 1999, Svendsen i in. 2002).

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach polsko-norweskiego projektu badawczego PNRF-22-AI-1/07 pt. *Klimat Arktyki i środowisko mórz Nordyckich oraz rejonu Spitsbergen-Grenlandia (AWAKE)*.

Literatura

- Aguilera J., Karsten U., Lippert H., Vogele B., Philipp E., Hanelt D., Wiencke C., 1999. Effects of solar radiation on growth, photosynthesis and respiration of marine macroalgae from the Arctic. *Marine Ecology Progress Series*, 191: 109–119.
- Arnold N., Rees G., 2009. Effects of digital elevation model spatial resolution on distributed calculations of solar radiation loading on a High Arctic glacier. *Journal of Glaciology*, Vol. 55, No. 194.
- Brázdil R., Chmal H., Kidawa J., Klementowski J., Konečný M., Pereyma J., Piasecki J., Prošek P., Sobik M., Szczepankiewicz-Szmyrka A., 1988. Results of investigation of the geographical research expedition Spitsbregen 1985. Univerzita J.E. Purkyně, Brno: 337 s.
- Budzik T., 2003. Struktura bilansu promieniowania słonecznego na obszarze lodowca Aavatsmarka w dniach 13.IV - 04.V.2002. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 13: 151–160.
- Budzik T., 2004. Struktura bilansu promieniowania słonecznego w Ny-Alesund (NW Spitsbergen) w latach 1989-2003. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 14: 189–197.
- Budzik T., Sikora S., Arażny A., 2009. Przebieg roczny salda promieniowania powierzchni czynnej w Hornsundzie (V 2008 – IV 2009). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 19: 233–246.
- Caputa Z., Grabiec M., Lulek A., 2002. Struktura salda promieniowania na Lodowcu Aavatsmarka w dniach 11 – 30.04.2001 r. [w:] A. Kostrzewski, G. Rachlewicz (red.), *Funkcjonowanie i monitoring geosystemów obszarów polarnych*. Poznań: 96–103.
- Gluz A., Siwek K., 2005. Zróżnicowanie albedo Calypsostrandy (Zachodni Spitsbergen) w sezonie letnim 2001. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 15: 113–117.
- Głowicki B., 1985. Radiation conditions in the Hornsund area (Spitsbergen). *Polish Polar Research* 6 (3): 301–318.
- Kejna M., 2000. Albedo of the Waldemar glacier surface (Spitsbergen) in summer season 1999. *Polish Polar Studies, 27th International Polar Symposium, Toruń*: 181–190.
- Kupfer H., Herber A., König-Langlo G., 2003. Radiation Measurements and Synoptic Observations at Ny-Ålesund, Report is a continuing work basing of the diploma thesis „Variation der Strahlungsgrößen und meteorologischen Parameter an der BSRN-Station Ny-Ålesund/ Spitzbergen 1993 - 2002“ by Heike Kupfer, Friedrich-Schiller-University in Jena: 115 s.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., 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.
- Marsz A., Styszyńska A., 2007. *Klimat Rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia: 376 s.
- Niedźwiedz T., 1993. The main factors forming the climate of the Hornsund (Spitsbergen). *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, MXCVIII*, 94: 49–63.
- Nordino M., Georgiadis T., 2003. Cloud type and cloud cover effects on the surface radiative balance at several polar sites. *Theoretical and Applied Climatology*, 74 (3–4), 203–215.
- Ohmura A., 1982. A historical review of studies on the energy balance of Arctic tundra. *Journal of Climatology*, 2 (2): 65–84.
- Oke T.R., 1996. *Boundary layer climates*. Routledge, London New York: 464 s.
- Ørbaek J.B., Hisdal V., Svaasand L.E., 1999. Radiation climate variability in Svalbard: surface and satellite observations. *Polar Research*, 18 (2): 127–134.
- Prošek P., Brázdil R., 1994. Energy balance of the tundra at the Spitsbergen Island (Svalbard) in the summer seasons of 1988 and 1990. *Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Masarykianae Brunensis*, 24 (Geography): 43–60.
- Styszyńska A., 1997. Valuation of the monthly sum of the total sun radiation in Hornsund (SW Spitsbergen). [w:] J. Repelewska-Pękałowa, K. Pękała (red.), *Spitsbergen Geographical Expeditions of M. Curie-Skłodowska University, UMCS.Lublin*: 163–172.

- Svendsen H., Beszczynska-Møller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Ørbæk, J.B., Bischof K., Papucci C., Zajaczkowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J-G., Dallmann W., 2002. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Research*, 21 (1): 133–166.
- Winther J-G., Gerland S., Ørbaek J.B., Ivanov B., Blanco A., Boike J., 1999. Spectral reflectance of melting snow in a high Arctic watershed on Svalbard: some implications for optical satellite remote sensing studies. *Hydrological Processes*, 13: 2033–2049.
- Winther J-G., Godtliebsen F., Gerland S., Isachsen P.E., 2002. Surface albedo in Ny-Alesund, Svalbard: variability and trends during 1981-1997. *Global and Planetary Change*, 32: 127–139.
- Wójcik G., 1989. Przezroczystość atmosfery i natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego w Arktyce i Antarktydzie. XVI Sympozjum Polarne, Toruń, 19-20 września 1989 r.: 149–151.
- Wójcik G., Marciniak K., 1993. Dzienny przebieg bezpośredniego promieniowania słonecznego w lecie na Spitsbergenie. [w:] *Działalność naukowa Profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja, Sympozjum w Uniwersytecie M. Kopernika, Toruń 16-17 września 1993 r., Streszczenia referatów*: 121–123.
- Wójcik G., Marciniak K., 2002. Przezroczystość atmosfery i natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego na Równinie Kaffiøyra (NW Spitsbergen) w lecie 1979 roku. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 8: 105–110.

Wpłynęło: 5 lipca 2011; poprawiono: 23 września 2011

Summary

Measurements of radiation balance (Q^*) were carried out in the Kaffiøyra region (NW Spitsbergen) between 16 July and 31 August 2010 at three stations with different surfaces: KH on the glacial moraine of the Aavatsmark (11.5 m a.s.l.), LW1 – on the terminal moraine of the Waldemar Glacier (130 m a.s.l.), and LW2 – on the firm field of the Waldemar Glacier (375 m a.s.l.) - Fig. 1. A Kipp&Zonen CNR 4 Net Radiometer was used to register – minute by minute – the short wave radiation balance (K^*), which is the difference between incoming solar radiation K_{\downarrow} and reflected solar radiation (K_{\uparrow}), and the long wave radiation balance (L^*), which is the difference between downward long wave atmospheric radiation (L_{\downarrow}) and upward long wave radiation (L_{\uparrow}) – Table 1.

In the studied period the maximum intensity of K_{\downarrow} reached 709.4 $W \cdot m^{-2}$ at KH, 882.1 $W \cdot m^{-2}$ at LW1 and 836.2 $W \cdot m^{-2}$ at LW2. The mean diurnal sums of K_{\downarrow} ranged from 11.04 $MJ \cdot m^{-2}$ at KH to 10.46 $MJ \cdot m^{-2}$ at LW1 and 10.60 $MJ \cdot m^{-2}$ at LW2 (Table 2, Fig. 2). The surface albedo varied, reaching between 13% (LW1) and 15% (KH) on the moraines, and up to 61% (LW2) on the firm field (Table 2, Fig. 3). Thus the lowest value of K^* , +4.31 $MJ \cdot m^{-2}$, was registered at LW2, whereas it was doubled on the moraines: KH +9.50 $MJ \cdot m^{-2}$ and LW1 +9.09 $MJ \cdot m^{-2}$ (Table 4, Fig. 4). The flux of L_{\downarrow} coming from the atmosphere does not reveal any significant differences between individual stations: KH: 27.26 $MJ \cdot m^{-2}$, LW1: 27.47 $MJ \cdot m^{-2}$ and LW2 –27.37 $MJ \cdot m^{-2}$ in 24h (Table 3). The Earth's surface (L_{\uparrow}) was losing, on average: 30.31 $MJ \cdot m^{-2}$, 29.88 $MJ \cdot m^{-2}$ and 30.10 $MJ \cdot m^{-2}$, respectively, and the mean daily values of L^* were negative: KH -3.05 $MJ \cdot m^{-2}$, LW1 -2.42 $MJ \cdot m^{-2}$ and LW2 -2.73 $MJ \cdot m^{-2}$. The surface radiation balance (Q^*) was the most favourable on moraine bases: LW1 +6.67 $MJ \cdot m^{-2}$, KH +6.45 $MJ \cdot m^{-2}$, whereas the snow-covered firm field received the smallest amount of energy: LW2 +1.58 $MJ \cdot m^{-2}$ (Table 4, Fig. 5).

In spite of the polar day, the diurnal cycle of the radiation balance components appears symmetrical with regard to the solar noon, related to the elevation of the sun over the horizon and the temperature of the surface and of the atmosphere. The flux of K_{\downarrow} reached its peaks during midday hours with the following mean values: KH: $278.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, LW1: $275.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, and LW2: $295.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Fig. 6). At the time of lower culmination of the sun the values of K^* were falling to zero. The balance of long wave radiation (L^*) was negative and reached its highest values around midday hours (KH $-50.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, LW1 $-40.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and LW2 $-47.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Q^* was the highest in midday hours, when it was 2.5 times higher for moraine bases (KH $+194.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and LW1 $+201.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) than for snow and glacial surfaces (LW2 $+79.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). At low elevation of the sun Q^* became negative: KH $-6.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, LW1 $-5.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and LW2 $-19.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$.

On individual days the diurnal cycle of the components of Q^* was affected not only by the elevation of the sun, but also by the atmospheric state and the presence of clouds, in particular. For example, on 27 and 28 July 2010 a different weather types occurred (Table 5, Fig. 7). On the first day the sky was completely overcast with St and Sc clouds and no sunshine was observed. On the following day it cleared up with partial cloudiness (Cu, Ac, Ci), and the sunshine duration reached 16.2 h. On 27 July a slight influx of K_{\downarrow} was registered (mean intensity $68.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, diurnal sum $5.92 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), K^* was $5.14 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and L^* $-0.84 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ due to the total cloudiness, which supported substantial downward atmospheric radiation (L_{\downarrow} $339.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). On the other hand, on 28 July, when the amount of cloudiness was moderate, the maximum intensity of K_{\downarrow} was $668.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. In 24 hours the total radiation that reached the surface amounted to $22.04 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and K^* increased to $18.90 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. L^* was negative ($-5.26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) due to substantial radial emittance of the ground (L_{\uparrow} $352.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) and some downward atmospheric radiation (L_{\downarrow} $291.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). However, the overall radiation balance was three times higher than on 27 July and amounted to $13.65 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. In the studied period, the individual components of Q^* were decreasing in value, as a result of the lower and lower elevation of the sun over the horizon and the ending of the polar day.

Key words: radiation balance, solar radiation, atmospheric radiation, long wave radiation, Spitsbergen, Kaffiøyra.