

**ZRÓŻNICOWANIE PRZESTRZENNE I WIELOLETNIA ZMIENNOŚĆ
TEMPERATURY GRUNTU W REJONIE STACJI POLARNEJ UMK
(NW SPITSBERGEN) W OKRESIE LETNIM (1975-2009)**

DIFFERENTIATION AND LONG-TERM CHANGES IN GROUND TEMPERATURE ON THE
KAFFIØYRA PLAIN (NW SPITSBERGEN) IN THE SUMMER SEASON FROM 1975 TO 2009

Rajmund Przybylak, Andrzej Araźny, Marek Kejna

Zakład Klimatologii, Instytut Geografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika,
ul. Gagarina 9, 87-100 Toruń
rp11@umk.pl

Zarys treści. W artykule przedstawiono podsumowanie wyników badań dotyczących zmian temperatury gruntu w otoczeniu Stacji Polarnej UMK na Kaffiøyrze (NW Spitsbergen) w sezonie letnim. Do analizy wzięto dane pomiarowe z 5 głębokości (1, 5, 10, 20 i 50 cm) z 3 różnych ekotopów (plaża, morena i tundra) wykonane w trakcie 17 dotychczasowych wypraw polarnych zorganizowanych przez Instytut Geografii UMK w różnych latach okresu 1975-2009. W celu uzyskania pełnej porównywalności wyników wybrano okres 21.07-31.08, dla którego dostępne są kompletne dane dla niemal wszystkich sezonów letnich analizowanych w artykule.

Serie temperatury gruntu na wszystkich stanowiskach i poziomach są ze sobą bardzo silnie skorelowane. Wyraźnie największy wpływ na zmierzone wartości temperatury gruntu w całej badanej warstwie wywiera temperatura powietrza (współczynniki korelacji wahają się od 0,6 do 0,86). Inne elementy meteorologiczne takie jak prędkość wiatru, zachmurzenie i usłonecznienie również w sposób istotny wpływają na temperaturę gruntu, ale głównie w warstwie 0-20 cm (współczynniki korelacji wahają się od 0,15 do 0,28). Istotny statystycznie, chociaż ilościowo bardzo niewielki, wpływ na temperaturę gruntu w warstwie do 20 cm ma także opad atmosferyczny.

Słowa kluczowe: Spitsbergen, temperatura gruntu, sezon letni, zmienność wieloletnia.

1. Wstęp

Badania cech fizycznych wieloletniej zmarzliny, w tym jej warstwy aktywnej, zostały w ostatnich latach znacząco zintensyfikowane. Niewątpliwie przyczyniło się do tego dość znaczne ocieplenie obserwowane w wysokich szerokościach geograficznych (Przybylak 2007), skutkujące wzmożeniem degradacji wieloletniej zmarzliny (Romanovsky i in. 2010). Skutki gospodarcze i społeczne tychże przemian są na tyle duże, iż wyraźnie wzrosło finansowanie tego typu badań w krajach, w których permafrost występuje powszechnie. O skali prowadzonych badań i ich różnorodności można było się m. in. przekonać uczestnicząc w niedawno zakończonych (czerwiec 2010) III Europejskiej Konferencji Permafrostu w Longyearbyen, w której udział wzięło około 250 naukowców z wielu krajów świata.

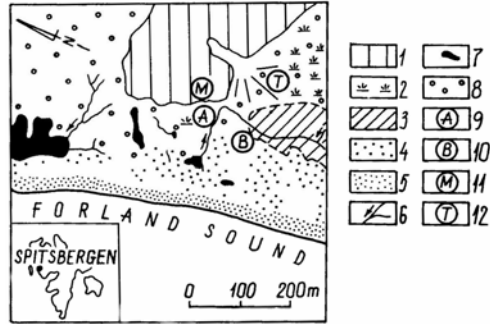
Polscy naukowcy, w związku z ograniczonymi środkami finansowymi, badali i wciąż badają głównie zmiany zachodzące w warstwie aktywnej wieloletniej zmarzliny, w tym przede wszystkim jej termikę (np. Czeppe 1960, 1961, 1966; Jahn 1961; Baranowski 1963, 1968; Wójcik, Marciniak 1987; Wójcik i in. 1988, 1990). Szczegółowy przegląd literatury na ten temat został przedstawiony m. in. w naszej publikacji z 1993 r. (Kejna i in. 1993). Takie ukierunkowanie badań było spowodowane faktem, iż pomiary termiki gruntu do głębokości 50 cm są standardowo wykonywane na wszystkich stacjach meteorologicznych, w związku z tym większość ekspedycji polarnych zakładając swoje własne stacje terenowe również je wykonywało. W ostatnich latach odnotować można jednak podjęcie obserwacji termiki gruntu na głębokościach większych od 0,5 m, w tym szczególnie na głębokości 1,0 m. Polskie badania termiki warstwy aktywnej permafrostu są prowadzone głównie na Spitsbergenie i w mniejszym stopniu w Antarktyce.

Spośród wszystkich polskich wypraw regionalnych, ośrodek toruński ma niewątpliwie największy dorobek pomiarowy i publikacyjny odnoszący się do badania termiki gruntu na Spitsbergenie. Rozpoczęto je podczas trwania I Toruńskiej Wyprawy Polarnej na Spitsbergen w 1975 roku w stacji meteorologicznej, położonej w północnej części Kaffiøyry (ryc.1), utworzonej niedaleko wybudowanego budynku stacji. Do tej pory badania temperatury gruntu w otoczeniu tejże stacji prowadzono w 18 sezonach letnich (okres wspólny: 21 lipiec - 31 sierpień) w latach: 1975, 1977-1980, 1982, 1985, 1989, 1997-2000, 2005-2010 w ramach Toruńskich Wypraw Polarnych, zorganizowanych przez Instytut Geografii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. W niniejszym artykule przedstawiamy wyniki naszych badań uzyskane do 2009 r. Literatura dotycząca temperatury gruntu w rejonie Kaffiøyry jest bardzo obszerna. Wzmianki na jej temat znaleźć można we wszystkich artykułach opisujących ogólne warunki meteorologiczne podczas trwania wspomnianych wypraw (np. z pierwszych 5 wypraw zawierają je następujące opracowania: Leszkiewicz 1977; Wójcik 1982; Marciniak, Przybylak 1983, 1991; Wójcik, Marciniak 1983). Powstały także opracowania szczegółowe tego elementu meteorologicznego: Wójcik, Marciniak 1987; Wójcik i in. 1988, 1990; Kejna 1990, 1991; Kejna i in. 1991, 1993; Marciniak i in. 1991; Araźny 2001.

Długi, chociaż nieciągły, okres obserwacji termiki gruntu w otoczeniu Stacji Polarnej UMK na Kaffiøyrze pozwala ocenić w sposób wiarygodny jej wieloletnie zmiany. Zagadnienie to jest jednym z ważniejszych celów badawczych podjętym w niniejszym artykule. Innym, niemniej istotnym celem badawczym, jest określenie wpływu różnych typów gruntu i zróżnicowanego pokrycia roślinnością na termikę gruntu.

2. Obszar i metody

W okresie wszystkich toruńskich wypraw na Spitsbergen stosowano jednolitą metodykę pomiarów temperatury gruntu. Mierzono ją przy pomocy termometrów rtęciowych kolankowych na głębokościach: 5, 10, 20 i 50 cm. Dodatkowo mierzono temperaturę na głębokości 1 cm stosując termometr zwykły. Wskazania termometrów odczytywano w głównych terminach obserwacyjnych o godz. 1, 7, 13 i 19 LMT. Dla kilkudziesięciu dób wykonano też pomiary co godzinę (w dniach bez zachmurzenia, z częściowym i całkowitym zachmurzeniem). Stanowiska pomiarowe urządzano w trzech ekotopach (terminologia wg Wójcika i Marciniaka 1987): na piaszczystej plaży, na płaskim wierzchołku moreny czołowo-bocznej Lodowca Aavatsmarka i na tundrze (ryc. 1-2):

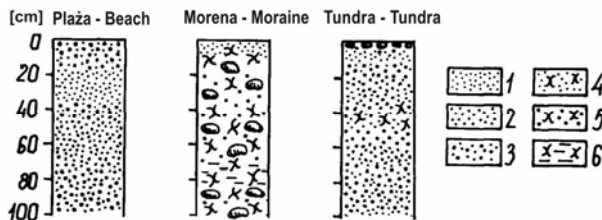


Ryc. 1. Szkic morfologiczny rejonu Stacji Naukowej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika i lokalizacja stanowisk pomiarowych: 1 – morena, 2 – tundra, 3 – obszar okresowo zalewany podczas przypliwów, 4 – wał sztormowy, 5 – obszar plaży okresowo zalewany podczas przypliwów, 6 – ciek, 7 – jeziora, 8 – sandr, 9 – Stacja Naukowa, 10, 11, 12 – stanowiska pomiaru temperatury gruntu: Plaża (B), Morena (M), Tundra (T).

Źródło: Wójcik, Marciniak (1987)

Fig. 1. A morphological sketch of the area of the Nicolaus Copernicus University Research Station and the location of the measurement sites. Key: 1 – moraine, 2 – tundra, 3 – area subject to occasional flooding during high tides, 4 – storm ridges, 5 – beach area subject to occasional flooding during high tides, 6 – currents, 7 – lake, 8 – glacial outwash (sandur), 9 – research station, 10, 11, 12 – ground temperature measurement sites: Beach (B), Moraine (M), Tundra (T). Source: Wójcik, Marciniak (1987)

- stanowisko „plaża”(B) – jest zlokalizowane na akumulacyjnej równinie brzegowej poza zasięgiem największych pływów Morza Grenlandzkiego. Równina jest zbudowana z utworów piaszczysto-żwirowych. Powierzchniowa warstwa gruntu jest sucha bez roślinności.
- stanowisko „morena” (M) – jest położone na płaskim wierzchołku moreny czołowo-bocznej Lodowca Aavatsmarka zbudowanej z gliny piaszczystej, żwirowatej i mułkowatej oraz piasku. Morena porośnięta jest w około 20% roślinami, przy czym roślinność tworzy nierównomiernie rozłożone w przestrzeni kępki o kilkucentymetrowych średnicach.
- stanowisko „tundra” (T) – jest umiejscowione na stożku sandrowym wychodzącym z łuku moren Lodowca Aavatsmarka. W stożku występują głównie utwory piaszczysto-żwirowe z dużą ilością okruchów skalnych oraz mułków. Powierzchnia porośnięta jest w 70% roślinnością tundrową mszysto-porostową. Grunt na tym stanowisku jest silnie uwilgocony.



Ryc. 2. Skład mechaniczny gruntu ekotopów (Plaża, Morena i Tundra) gdzie mierzona była temperatura gruntu: 1 – piasek, 2 – piasek średnioziarnisty, 3 – piasek gruboziarnisty, 4 – glina piaszczysta, 5 – glina żwirowata, 6 – glina mułkowata. Źródło: Wójcik i Marciniak (1987)

Fig. 2. Ground structure of the ecotopes (Beach, Moraine and Tundra) where ground temperature was measured: 1 – fine sand, 2 – medium grained sand, 3 – sand gravel, 4 – sand till, 5 – gravel till, 6 – silt till. Source: Wójcik, Marciniak (1987)

Niezwyczajnie istotnym czynnikiem wpływającym na zmierzone wartości temperatury gruntu jest głębokość do jakiej odmarza grunt w okresie letnim. Wieloletnie pomiary wykazały, iż warstwa aktywna permafrostu w końcu sezonu letniego najgrubsza (> 2 m) jest na morenie, a najpłytsza na plaży – nieco ponad 1 m (Araźny i Grześ 2000). Więcej szczegółów dotyczących cech fizyczno-chemicznych ww. powierzchni badawczych można znaleźć w publikacjach Wójcika i Marciniaka (1987) oraz Kejny i in. (1993).

Obszary polarne charakteryzują się specyficznymi warunkami oświetleniowymi i dlatego warto podać podstawowe informacje je opisujące. Dzień polarny w miejscu położenia Stacji Polarnej UMK rozpoczyna się 17 kwietnia i kończy 25 sierpnia. Maksymalna wysokość Słońca w południe w dniu 21 lipca (początek badanego okresu) wynosi 31,74°, a w dniu 31 sierpnia (koniec badanego okresu) – 19,93°. W tym ostatnim dniu jego długość wynosi 19,4 godziny.

3. Wyniki

3.1. Warunki pogodowe

W obszarach polarnych ustalenie wielkości wpływu poszczególnych czynników wpływających na kształtowanie się temperatury gruntu jest bardziej skomplikowane niż ma to miejsce w niższych szerokościach geograficznych. Związane jest to z występowaniem wieloletniej zmarzliny, a przede wszystkim głębokością jej zalegania, zależną z kolei m. in. od warunków atmosferycznych oraz składu mechanicznego i stopnia uwilgotnienia gruntu. Uwarunkowania dotyczące tego drugiego kompleksu czynników zostały przedstawione we wstępie, natomiast w tym podrozdziale zostaną pokrótce streszczone warunki meteorologiczne panujące w trakcie Toruńskich Wypraw Polarnych. Temperatura powietrza jest elementem meteorologicznym, który w sezonie letnim wpływa w największym stopniu na kształtowanie się temperatury gruntu w obszarach polarnych, w tym na Spitsbergenie (Miętus i Filipiak 2001). Oprócz niej istotny wpływ ma także zachmurzenie i usłonecznienie (wielkość dopływu promieniowania słonecznego) oraz opad atmosferyczny modyfikujący właściwości cieplne gruntu. W tabeli 1 przedstawiono średnie wartości ww. elementów meteorologicznych w okresie 21.07-31.08 (wspólny okres dla wszystkich toruńskich wypraw na Spitsbergen), jak również kilku innych, które też mogą być pomocne w procesie analizy kształtowania się temperatury gruntu.

Średnia temperatura powietrza w badanym okresie na Kaffiørze wyniosła 4,8°C, wahając się od 6,3°C w najcieplejszym 1998 r. (wg raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu ogłoszonego w 2001 r. był to także najcieplejszy rok na kuli ziemskiej w okresie obserwacji instrumentalnych) do tylko 3,3°C w najchłodniejszym 1982 r. (prawdopodobnie konsekwencja wybuchu wulkanu El Chichon). Najwyższą do tej pory temperaturę powietrza wynoszącą 18,9°C zanotowano nie we wspomnianym 1998 r., lecz 15 sierpnia 1979 r., w czasie trwania silnego fenu (Wójcik i Przybylak 1985). Najniższa temperatura (-4,2°C) wystąpiła 30 sierpnia 1982 r., czyli w lecie najchłodniejszym. Warto zwrócić uwagę, iż najcieplejsze lato na Kaffiørze było jednocześnie najbardziej zachmurzonym i wilgotnym. Oznacza to, iż było ono efektem ponad przeciętnego napływu ciepłych i wilgotnych mas powietrza z południa. Jak wykazał Przybylak (1992) zachmurzenie w Hornsundzie nie wpływa różnicująco na warunki termiczne w lecie w przypadku średnich wartości dobowych. Wpływ negatywny uwidacznia się jedynie w przypadku wartości temperatury maksymalnej.

Kolejnym elementem meteorologicznym istotnie wpływającym na kształtowanie się temperatury gruntu jest opad atmosferyczny, między innymi poprzez wpływ na zmianę właściwości cieplnych gruntu.

Teoretycznie element ten przekraczając wartości swojej normy powinien wyrazić się zmniejszeniem gradientu temperatury gruntu w profilu pionowym, pod warunkiem jednak braku anomalnego wpływu innych czynników. Zdecydowanie najwyższe opady wystąpiły w dwóch sezonach letnich: 1997 roku (122,5 mm) i 1980 roku (108 mm). Wyraźnie więcej było lat z bardzo niskim opadem, nie przekraczającym 20 mm. W kolejności od najsuchszego roku takie wartości zmierzono w latach: 2007, 2009, 1985, 1998 i 1979 (tab. 1).

Tabela 1 – Table 1

Średnie wartości wybranych elementów meteorologicznych na Równinie Kaffiøyra (Spitsbergen) z sezonu letniego (21.07-31.08), 1975-2009

Mean values of selected meteorological elements from the summer season (21.07-31.08) on the Kaffiøyra Plain (Spitsbergen), 1975-2009

V	1975	1977*	1978	1979	1980	1982	1985	1989	1997	1998	1999	2000	2005	2006	2007	2008	2009	1975-2009
1	4,3	3,2	4,6	5,0	5,5	4,2	3,2	5,0	5,4	4,0	3,8	4,6	3,8	5,0	3,7	5,4	3,1	4,3
2	8,7	8,7	8,8	7,3	9,1	8,8	7,2	8,3	8,4	9,1	8,9	7,2	9,1	8,3	8,7	8,9	7,9	8,4
3	112,9	147,6	119,9	281,9	90,9	91,3	309,5	203,0	165,0	93,5	150,1	213,3	149,4	158,0	132,0	131,7	220,0	162,9
4	11,2	15,9	12,1	29,0	9,1	9,2	32,2	20,5	16,8	9,5	15,2	21,6	15,1	23,6	22,1	23,6	22,0	18,2
5	11,5	13,5	10,0	18,9	12,5	10,4	16,0	11,5	10,8	14,0	10,3	8,8	12,1	11,9	13,9	12,4	13,0	18,9
6	6,7	7,0	6,3	6,6	5,6	4,8	6,9	5,5	5,4	7,6	6,4	5,9	7,5	7,0	7,4	6,1	7,6	6,5
7	4,9	5,0	4,7	4,5	4,1	3,3	5,4	4,0	4,2	6,3	4,9	3,9	5,8	5,2	5,5	4,5	6,1	4,8
8	3,3	3,5	3,1	2,5	2,6	1,8	4,0	2,7	2,7	5,0	3,5	2,2	4,1	3,9	4,0	2,9	4,1	3,3
9	1,4	0,6	0,7	-0,5	-0,8	-4,2	0,9	-3,6	-0,2	1,8	0,0	-3,6	1,4	1,0	-1,3	-0,8	0,9	-4,2
10	3,4	3,5	3,2	4,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,9	3,7	3,4	3,1	3,6	3,2	3,5	3,2
11	7,8	7,8	7,7	7,6	7,3	6,8	8,1	7,4	7,5	8,7	7,3	7,2	8,1	8,1	7,8	7,5	8,2	7,7
12	90	89	89	89	88	88	89	90	90	91	85	88	87	91	85	88	87	88
13	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	1,3	1,0	1,2	0,8	1,4	1,0	1,3	1,0
14	66,5	44,4	44,2	17,7	108,0	54,5	13,9	27,0	122,5	16,0	58,4	29,1	49,9	25,1	12,3	22,2	13,0	42,6

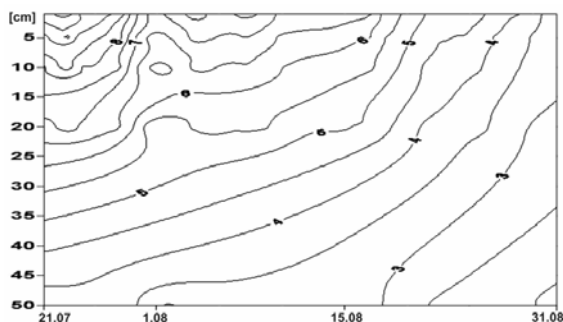
Objaśnienia: * – 21.07.-28.08., V – element: 1 – prędkość wiatru [$m \cdot s^{-1}$], 2 – zachmurzenie [0-10], 3 – usłonecznienie [h], 4 – usłonecznienie [%], 5 – absolutna temperatura maksymalna [$^{\circ}C$], 6 – średnia dobową temperaturę maksymalną [$^{\circ}C$], 7 – średnia dobową temperaturę powietrza [$^{\circ}C$], 8 – średnia dobową temperaturę minimalną [$^{\circ}C$], 9 – absolutna temperatura minimalna [$^{\circ}C$], 10 – dobową amplitudę temperatury [$^{\circ}C$], 11 – ciśnienie pary wodnej [hPa], 12 – wilgotność względna [%], 13 – niedosyt wilgotności [hPa], 14 – opad atmosferyczny [mm]

Explanations: * – 21.07.-28.08., V – variable: 1 – wind velocity [$m \cdot s^{-1}$], 2 – cloudiness [0-10], 3 – sunshine duration [h], 4 – sunshine duration [%], 5 – absolute maximum temperature [$^{\circ}C$], 6 – mean daily maximum temperature [$^{\circ}C$], 7 – mean daily air temperature [$^{\circ}C$], 8 – mean daily minimum temperature [$^{\circ}C$], 9 – absolute minimum temperature [$^{\circ}C$], 10 – daily temperature range [$^{\circ}C$], 11 – water vapour pressure [hPa], 12 – relative humidity [%], 13 – saturation deficit [hPa], 14 – atmospheric precipitation [mm]

3.2. Temperatura gruntu

Z syntetycznych opracowań termiki gruntu w otoczeniu Stacji Polarnej UMK, obejmujących co najmniej dane z kilku sezonów letnich, ukazały się tylko dwa opracowania (Wójcik i in. 1988, 1990), w których przeanalizowano sytuację pod tym względem odpowiednio do 1982 i 1989 r. W niniejszym artykule rozszerzono syntezę o dane z kolejnych 9 sezonów letnich: 1997-2000 i 2005-2009. Jest to okres bardzo ważny, gdyż obejmuje lata po 1995 roku, w których obserwuje się znaczne ocieplenie Arktyki, średnio o około $1^{\circ}C$ powyżej średniej z wielolecia 1951-1990 (Przybylak 2007).

Celem wprowadzenia do zagadnienia zmienności temperatury gruntu w warstwie aktywnej w przestrzeni, jak i w czasie, należy zapoznać się z jej przebiegiem w badanym wspólnym okresie, tj. od 21 lipca do 31 sierpnia. Najbogatszy i kompletny zbiór danych dla wielolecia 1975-2009 posiadamy tylko dla stanowiska na plaży. Dlatego też dla tego stanowiska zaprezentowano uśrednione z wszystkich 17 lat jej wartości w formie termoisoplek (ryc. 3). Najwyższe wartości temperatury gruntu w sezonie letnim występują w ostatniej dekadzie lipca, kiedy przekraczają nawet 10°C na głębokości 1 cm. W tym czasie temperatura na 50 cm nie osiąga 4°C, co oznacza iż pionowy gradient temperatury jest bardzo duży i przekracza 1°C/10 cm. Począwszy od ok. 25 lipca wartości temperatury gruntu na wszystkich głębokościach maleją stopniowo, z wyjątkiem przełomu lipca i sierpnia, w którym obserwuje się bardzo często załamanie warunków pogodowych, skutkujących także znaczącym obniżeniem temperatury gruntu. Jest ono szczególnie dobrze widoczne w warstwie płytszej do 20 cm, nieco malejąc ku głębokości 50 cm. Pod koniec sierpnia zróżnicowanie pionowe temperatury gruntu, a więc i pionowe gradienty, wyraźnie maleją, szczególnie silnie w warstwie do 10 cm (ryc. 3). Temperatura gruntu w warstwie do 20 cm nie przekracza średnio 4°C, a na głębokości 50 cm spada poniżej 2°C.



Ryc. 3. Średnie wartości termoisoplek [°C] na stanowisku „Plaża” na Równinie Kaffiøyra w okresie od 21 lipca do 31 sierpnia (1975-2009)

Fig. 3. Mean values of thermoisopleths [°C] at 'Beach' site on the Kaffiøyra Plain in the period from 21st July to 31st August (1975-2009)

Jak wcześniej wspomniano jednym z głównych celów niniejszego artykułu jest ustalenie wielkości wpływu 3 ekotopów występujących w pobliżu Stacji Polarnej UMK na wartości temperatury gruntu. Poletka pomiarowe wybrane do badań temperatury gruntu położone są w bardzo bliskiej od siebie odległości (ryc. 1). Oznacza to, iż warunki atmosferyczne na nich są takie same, podobnie rzecz się ma z ekspozycją terenu. A zatem stwierdzone różnice w termice gruntu (tab. 2-3) są warunkowane innymi czynnikami, np. różnym bilansem cieplnym powierzchni gruntu (zależnym m. in. od albedo, pokrycia roślinnością itp.), różnymi właściwościami cieplnymi gruntu (skład mechaniczny gruntu, jego wilgotność itp.) oraz także w dużym stopniu przez nie warunkowanym różnym tempem i głębokością odmarzania gruntu i z tym związaną głębokością zalegania wieloletniej zmarzliny.

Średnie dekadowe temperatury gruntu w okresie 21.07 – 31.08 na Równinie Kaffiøyra w latach 1975-2009 prezentuje tab. 2. Jak widać zawsze są one dodatnie. Tylko w latach najcieplejszych odnotowano wartości wyższe od 10°C, głównie na głębokościach najpłytszych, tj. 1 cm i 5 cm. W 2007 r., który był jednym z cieplejszych sezonów letnich, taka sytuacja wystąpiła także na głębokości 10 cm, a na stanowisku morena również na głębokości 20 cm. Warto jednak zauważyć, iż na stanowisku

Tabela 2 – Table 2

Średnie dekadowe wartości temperatury gruntu w otoczeniu Stacji Polarnej UMK
położonej na Równinie Kaffiøyra, 1975-2009

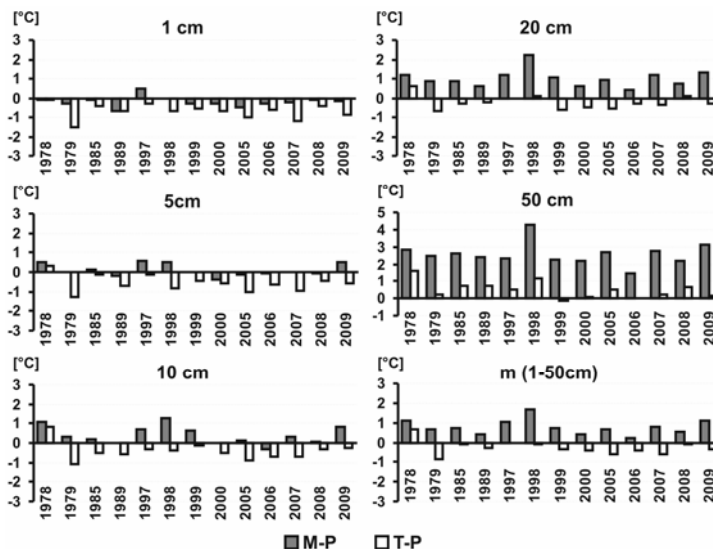
Mean 10-day values of ground temperature near the NCU Polar Station (Kaffiøyra Plain) in the period 1975-2009

Rok Year	Dekada – 10-day periods Głębokość - Depth (cm)	21- 31.07					01-10.08					11- 20.08					21-31.08				
		1	5	10	20	50	1	5	10	20	50	1	5	10	20	50	1	5	10	20	50
1975	Plaža - Beach	7,8	7,1	6,7	5,7	3,3	6,1	5,5	5,2	4,3	2,6	6,7	6,1	5,7	4,9	3,1	4,7	4,2	4,0	3,4	2,2
1977	Plaža - Beach ¹	8,5	7,8	7,4	6,1	3,0	8,8	8,1	7,5	6,4	3,4	5,0	4,5	4,3	3,7	2,3	3,8	3,5	3,4	3,0	1,9
1978	Plaža - Beach ²	8,0	7,0	5,9	5,2	2,0	5,6	5,1	4,4	4,0	1,8	4,9	4,4	3,8	3,6	1,7	5,1	4,6	4,0	3,8	1,8
	Morena - Moraine	7,7	7,7	7,4	7,1	6,0	5,4	5,3	5,2	5,1	4,6	4,4	4,4	4,3	4,2	3,7	5,0	5,0	4,9	4,7	3,9
	Tundra - Tundra ²	7,4	7,2	6,8	6,1	4,2	5,7	5,5	5,2	4,7	3,4	4,8	4,7	4,4	4,0	2,9	5,2	5,1	4,8	4,3	3,1
1979	Plaža - Beach	8,3	7,6	6,9	5,7	2,6	5,7	5,2	4,7	3,9	1,9	6,9	6,4	5,9	5,1	2,6	4,4	4,0	3,8	3,3	1,9
	Morena - Moraine	7,6	7,5	7,4	7,2	6,3	5,1	4,8	4,6	4,3	3,7	6,7	6,4	6,2	5,9	5,0	4,7	4,6	4,4	4,3	3,9
	Tundra - Tundra ³	-	-	-	-	-	4,7	4,4	4,1	3,5	2,0	6,1	5,9	5,6	4,9	3,2	3,8	3,6	3,5	3,1	2,1
1980	Plaža - Beach	7,6	6,7	6,1	4,9	2,4	5,3	4,9	4,6	4,0	2,3	5,9	5,3	5,0	4,2	2,4	3,8	3,4	3,3	2,8	1,7
	Morena - Moraine	6,9	6,7	6,6	6,3	5,4	5,1	4,9	5,0	5,0	4,5	5,6	5,4	5,3	5,0	4,2	3,7	3,5	3,5	3,5	3,1
1982	Plaža - Beach	5,8	5,3	4,6	3,9	1,6	5,9	5,3	4,7	4,0	1,8	7,4	6,6	5,9	5,1	2,6	1,9	1,8	1,6	1,5	0,9
1985	Plaža - Beach	11,2	10,3	9,8	8,5	4,5	8,5	8,0	7,5	6,6	3,8	5,9	5,6	5,4	4,8	3,0	3,3	3,1	3,2	2,9	2,1
	Morena - Moraine	10,3	10,2	10,0	9,8	8,5	8,2	7,9	7,8	7,6	6,8	6,1	5,8	5,7	5,7	5,3	3,7	3,6	3,6	3,6	3,4
	Tundra - Tundra	9,8	9,7	8,9	8,1	6,2	8,1	7,9	7,2	6,5	5,2	5,8	5,7	5,3	5,0	4,1	3,3	3,1	2,9	2,6	2,3
1989	Plaža - Beach	8,4	7,5	7,0	5,7	2,4	7,4	6,9	6,5	5,6	2,7	6,0	5,7	5,2	4,5	2,4	2,4	2,4	2,2	2,1	1,4
	Morena - Moraine	6,9	6,9	6,5	6,2	5,2	6,8	6,8	6,6	6,3	5,6	5,6	5,6	5,4	5,2	4,8	2,2	2,4	2,4	2,6	2,8
	Tundra - Tundra	6,6	6,2	5,8	5,0	3,3	6,7	6,2	5,8	5,2	3,6	5,5	5,1	4,8	4,6	3,1	2,4	2,2	2,2	2,3	1,8
1997	Plaža - Beach ³	-	4,5	4,4	3,7	2,2	-	5,0	4,8	4,0	2,3	-	4,1	3,9	3,2	1,8	-	3,6	3,4	2,8	1,6
	Morena - Moraine	6,5	6,2	6,2	6,1	5,3	5,7	5,2	5,2	4,9	4,6	4,4	4,1	4,0	3,8	3,6	3,9	3,8	3,7	3,5	3,3
	Tundra - Tundra ⁴	-	-	-	-	-	5,2	5,1	-	4,2	2,8	4,3	4,0	-	3,4	2,3	3,5	3,3	-	2,8	2,0
1998	Plaža - Beach	10,7	9,8	8,4	6,8	2,7	7,7	7,2	6,2	5,0	2,1	8,0	7,6	6,8	5,6	2,6	5,7	5,5	4,9	4,1	2,0
	Morena - Moraine	10,8	10,6	10,4	10,1	8,9	7,6	7,5	7,3	7,0	6,1	8,2	8,2	8,0	7,6	6,7	5,8	5,8	5,7	5,6	5,2
	Tundra - Tundra	9,4	8,5	7,9	6,8	4,0	7,2	6,5	5,9	5,2	3,4	7,5	6,7	6,3	5,7	3,8	5,7	5,1	4,6	4,3	3,0
1999	Plaža - Beach	8,1	8,0	7,4	6,6	4,4	8,1	7,6	6,9	5,7	3,5	6,5	6,2	5,7	5,1	3,4	4,3	4,1	3,8	3,2	2,1
	Morena - Moraine	8,0	8,0	8,2	8,0	7,5	7,6	7,4	7,4	6,7	5,7	6,3	6,4	6,5	6,1	5,7	4,1	4,2	4,2	4,0	3,6
	Tundra - Tundra	7,2	7,2	7,1	5,9	4,3	7,3	7,0	6,7	5,0	3,4	6,0	5,9	5,7	4,4	3,3	4,2	4,0	3,8	2,8	2,1
2000	Plaža - Beach	5,5	5,3	4,9	4,3	2,0	6,2	6,0	5,5	4,7	2,2	7,5	7,3	6,8	5,9	3,0	3,5	3,4	3,2	2,8	1,5
	Morena - Moraine	5,2	4,9	4,8	4,9	4,5	5,8	5,5	5,2	5,0	3,9	7,1	6,8	6,7	6,6	5,5	3,5	3,3	3,4	3,6	3,4
	Tundra - Tundra	4,7	4,7	4,3	3,8	2,1	5,5	5,4	5,0	4,2	2,1	6,4	6,4	6,1	5,1	3,0	3,0	3,1	2,8	2,5	1,4
2005	Plaža - Beach	9,3	8,6	7,9	6,7	3,5	9,5	8,9	8,4	7,3	4,2	6,8	6,3	6,0	5,2	3,3	6,4	5,8	5,5	4,7	3,0
	Morena - Moraine	8,5	8,1	7,7	7,3	6,3	8,7	8,6	8,5	8,3	7,7	6,7	6,6	6,4	6,3	5,9	6,2	6,0	5,8	5,6	5,0
	Tundra - Tundra	8,0	7,2	6,8	5,9	4,0	8,0	7,4	7,1	6,4	4,9	6,2	5,8	5,4	4,9	3,9	5,8	5,3	4,9	4,4	3,3
2006	Plaža - Beach	9,2	8,8	8,8	7,7	5,3	7,9	7,4	7,5	6,5	4,4	6,3	5,8	6,0	5,2	4,0	5,0	4,7	5,0	4,2	3,2
	Morena - Moraine	8,5	8,3	8,2	8,0	7,1	7,6	7,4	7,3	7,1	6,3	5,9	5,7	5,6	5,5	5,3	5,1	4,9	4,8	4,7	4,2
	Tundra - Tundra	8,0	7,5	7,6	7,0	5,1	7,3	6,9	6,9	6,4	4,7	5,7	5,4	5,4	5,0	4,0	4,8	4,5	4,6	4,1	3,2
2007	Plaža - Beach ⁵	11,8	11,0	10,3	8,7	5,7	11,1	10,7	10,1	8,9	6,2	5,4	5,3	5,1	4,6	3,6	3,9	3,6	3,4	2,9	2,0
	Morena - Moraine ⁵	11,5	11,0	10,7	10,3	9,0	11,0	10,8	10,6	10,5	9,7	5,1	5,1	5,2	5,3	6,2	3,8	3,7	3,7	3,6	3,4
	Tundra - Tundra ⁵	9,6	9,4	9,1	8,2	5,7	9,8	9,6	9,2	8,5	6,4	4,9	4,8	4,8	4,5	3,9	3,3	3,1	3,0	2,7	2,2
2008	Plaža - Beach	7,8	7,4	7,0	6,0	3,5	5,8	5,5	5,3	4,6	2,6	4,8	4,6	4,4	3,9	2,2	5,4	5,1	4,9	4,3	2,7
	Morena - Moraine	7,5	7,3	7,0	7,0	6,3	5,4	5,2	5,1	5,1	4,9	4,9	4,7	4,6	4,5	4,0	5,5	5,3	5,1	5,1	4,6
	Tundra - Tundra	7,2	6,7	6,5	6,0	4,2	5,1	4,8	4,7	4,5	3,2	4,7	4,4	4,3	4,0	2,8	5,2	4,9	4,8	4,6	3,4
2009	Plaža - Beach	10,6	9,4	8,7	7,6	4,1	8,8	7,9	7,4	6,7	4,0	7,0	6,4	6,0	5,4	3,4	5,1	4,6	4,4	4,0	2,7
	Morena - Moraine	10,4	9,9	9,6	9,3	7,9	8,3	8,3	8,2	8,0	7,5	6,9	6,8	6,7	6,7	6,2	5,4	5,4	5,2	5,2	5,1
	Tundra - Tundra	8,8	8,1	7,9	6,8	4,1	8,1	7,4	7,3	6,5	4,2	6,4	6,0	5,9	5,2	3,6	4,9	4,5	4,5	4,1	2,9
m	Plaža - Beach	9,2	8,5	7,8	6,7	3,6	7,9	7,4	6,9	6,0	3,4	6,3	5,9	5,6	4,9	3,0	4,6	4,3	4,0	3,5	2,2
	Morena - Moraine	8,7	8,4	8,2	8,0	7,0	7,5	7,3	7,2	7,0	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,4	4,6	4,5	4,4	4,4	4,1
	Tundra - Tundra	7,9	7,5	7,2	6,3	4,3	7,2	6,8	6,4	5,7	4,0	5,8	5,5	5,3	4,8	3,5	4,3	4,1	3,9	3,5	2,6

Objaśnienia (explanations): ¹ - 21.07 – 28.08; ² - 24.07 – 31.08; ³ - 28.07 – 31.08; ⁴ - 01.08 – 31.08;⁵ - 21.07 – 29.08; m – średnia (mean) z lat (from years) 1978, 1985, 1989, 1998-2009

tundra średnie dekadowe na żadnej głębokości nie przekroczyły 10°C. W ostatniej dekadzie lipca (najcieplejszej) stanowisko plaża jest najcieplejsze na głębokościach 1 i 5 cm, a zdecydowanie najchłodniejsze jest stanowisko tundra. Sytuacja taka utrzymuje się także w pierwszej dekadzie sierpnia, chociaż różnice wyraźnie zmalały między stanowiskami (tab. 2). Począwszy od drugiej dekady sierpnia stanowisko na plaży jest już tylko nieznacznie cieplejsze niż stanowisko na morenie na głębokości 1 cm, na pozostałych głębokościach morena jest już średnio cieplejsza. Taka sytuacja utrzymuje się także w ostatniej analizowanej dekadzie. Warto też podkreślić, iż stanowisko tundra we wszystkich dekadach jest najchłodniejsze w warstwie do 20 cm, natomiast na głębokości 50 cm najchłodniejsza jest temperatura gruntu na plaży, co należy tłumaczyć najpłytszym zaleganiem stropu wieloletniej zmarzliny.

Średnie wartości temperatury gruntu za cały okres badawczy w przekroju wieloletnim i na wszystkich stanowiskach badawczych zawiera tab. 3. Dla czytelniejszego ukazania zróżnicowania termicznego między analizowanymi stanowiskami na ryc. 4 przedstawiono dla każdej głębokości oraz średnio dla całej warstwy 1-50 cm średnie różnice temperatury w stosunku do stanowiska na plaży. Z przedstawionej dokumentacji wynika wyraźnie, iż niemal we wszystkich latach (z wyjątkiem 1997 r.) plaża była najcieplejsza na głębokości 1 cm. Jednak warto zauważyć, iż w 1997 r. rozpoczęto pomiary temperatury gruntu na stanowisku plaża dopiero 28 lipca, a na głębokości 1 cm w ogóle nie były prowadzone. Natomiast średnią wartość temperatury gruntu w tym sezonie na tej głębokości wyredukowano na podstawie jej związków z temperaturą na głębokości 5 cm. W badanym okresie średnie różnice temperatury gruntu na głębokości 1 cm między plażą a stanowiskami na morenie i na tundrze wyniosły 0,2 i 0,7°C odpowiednio (tab. 3).



Ryc. 4. Różnice między średnimi sezonowymi (21.07-31.08) wartościami temperatury gruntu na różnych głębokościach (1, 5, 10, 20 i 50 cm) oraz w warstwie 1-50 cm między badanymi ekotopami w okresie 1978-2009. M – Morena, P – Plaża i T – Tundra

Fig. 4 – Differences between mean seasonal (21st July-31st August) values of ground temperature at different depths (1, 5, 10, 20 and 50 cm) and for 1-50 cm layer between analysed ecotopes from 1978 to 2009. P – Beach, M – Moraine, T – Tundra

Tabela 3 – Table 3

Średnie temperatury gruntu na głębokościach 1, 5, 10, 20 i 50 cm w otoczeniu Stacji Polarnej UMK (Równina Kaffiøyra) za okres 21.07 – 31.08 w latach 1975-2009

Mean summer (21st July to 31st August) ground temperature at depths of 1, 5, 10, 20 and 50 cm near the NCU Polar Station (Kaffiøyra Plain), 1975-2009

Plaża – Beach																		
[cm]	1975	1977 ¹	1978 ²	1979	1980	1982	1985	1989	1997 ³	1998	1999	2000	2005	2006	2007 ⁵	2008	2009	1978-2009*
1	6,3	6,7	5,8	6,3	5,7	5,2	7,2	6,0	<i>4,6</i>	8,1	6,7	5,6	8,0	7,1	8,3	6,0	7,9	6,7
5	5,7	6,1	5,2	5,8	5,1	4,7	6,8	5,6	4,2	7,5	6,4	5,5	7,4	6,7	7,8	5,7	7,1	6,3
10	5,4	5,8	4,4	5,4	4,8	4,2	6,6	5,2	4,1	6,6	5,9	5,0	6,9	6,8	7,4	5,4	6,6	5,9
20	4,2	4,9	4,1	4,5	4,0	3,6	5,8	4,4	3,4	5,4	5,2	4,4	5,9	5,9	6,4	4,7	5,9	5,1
50	2,6	2,7	1,8	2,2	2,2	1,7	3,4	2,2	1,9	2,4	3,4	2,1	3,5	4,2	4,4	2,8	3,5	2,9
m	4,8	5,2	4,3	4,8	4,4	3,9	6,0	4,7	3,6	6,0	5,5	4,5	6,4	6,1	6,9	4,9	6,2	5,4
Morena – Moraine																		
[cm]	1975	1977	1978	1979	1980	1982	1985	1989	1997	1998	1999	2000	2005	2006	2007 ⁵	2008	2009	1978-2009*
1	-	-	5,7	6,0	5,3	-	7,1	5,3	5,1	8,1	6,5	5,3	7,5	6,8	8,1	5,9	7,8	6,5
5	-	-	5,7	5,8	5,1	-	6,9	5,4	4,8	8,0	6,5	5,1	7,3	6,6	7,8	5,6	7,6	6,4
10	-	-	5,5	5,7	5,1	-	6,8	5,2	4,8	7,9	6,6	5,0	7,1	6,5	7,7	5,4	7,4	6,3
20	-	-	5,3	5,4	4,9	-	6,7	5,0	4,6	7,6	6,2	5,0	6,9	6,3	7,6	5,4	7,3	6,1
50	-	-	4,6	4,7	4,3	-	6,0	4,6	4,2	6,7	5,6	4,3	6,2	5,7	7,2	5,0	6,7	5,5
m	-	-	5,4	5,5	4,9	-	6,7	5,1	4,7	7,7	6,3	4,9	7,0	6,4	7,7	5,5	7,3	6,2
Tundra – Tundra																		
[cm]	1975	1977	1978	1979	1980	1982	1985	1989	1997 ⁴	1998	1999	2000	2005	2006	2007	2008	2009	1978-2009*
1	-	-	5,7	4,8	-	-	6,8	5,3	4,3	7,4	6,2	4,9	7,0	6,4	7,1	5,6	7,0	6,0
5	-	-	5,5	4,5	-	-	6,7	4,9	4,1	6,7	6,0	4,9	6,4	6,1	6,9	5,2	6,5	5,7
10	-	-	5,2	4,3	-	-	6,1	4,6	<i>3,8</i>	6,2	5,8	4,5	6,0	6,1	6,7	5,1	6,4	5,5
20	-	-	4,7	3,8	-	-	5,5	4,2	3,4	5,5	4,5	3,9	5,4	5,6	6,1	4,8	5,6	4,8
50	-	-	3,4	2,4	-	-	4,1	2,9	2,4	3,6	3,3	2,2	4,0	4,3	4,6	3,4	3,7	3,4
m	-	-	4,9	4,0	-	-	5,8	4,4	3,6	5,9	5,1	4,1	5,8	5,7	6,3	4,8	5,8	5,1

Okres (period): ¹– 21.07 – 28.08; ²– 24.07 – 31.08; ³– 28.07 – 31.08; ⁴– 01.08 – 31.08; ⁵– 21.07 – 29.08;

*– bez lat (without years) 1980, 1982; m – średnia warstwy 1-50 cm (mean for layer 1-50 cm);

kursywą oznaczono wartości wyredukowane (estimated values are shown using italic fonts)

Na głębokości 5 cm nieznacznie już średnio cieplejsza od plaży (o 0,1°C) staje się morena, natomiast tundra jest wciąż wyraźnie najchłodniejsza, z wyjątkiem 1978 r. kiedy było tu cieplej niż na plaży (tab. 2, ryc. 4). Na głębokościach 10 i 20 cm zróżnicowanie termiczne na korzyść moreny wyraźnie rośnie, podczas gdy różnice między plażą i tundrą maleją, a na 20 cm już nawet w niektórych latach na tundrze jest cieplej niż na plaży, średnio jednak wciąż cieplejsza jest plaża niż tundra. Poczynając od głębokości 50 cm plaża staje się środowiskiem wyraźnie najchłodniejszym. Różnica w stosunku do moreny powiększyła się średnio do wartości 2,6°C, natomiast tundra była cieplejsza tylko o 0,5°C (tab. 3, ryc. 4). Podobnie jak Wójcik i Marciniak (1987) obliczyliśmy także różnice termiczne między średnimi arytmetycznymi wartościami dla warstwy 1-50 cm. W całej badanej warstwie średnio najcieplejszy grunt był na stanowisku morena (6,2°C), a najchłodniejszy na stanowisku tundra (5,1°C) – patrz tab. 3 i ryc. 4.

Z powyższego przeglądu dotychczas przedstawionych wyników można zauważyć, różne tempo spadku temperatury gruntu wraz z głębokością, w zależności od badanego stanowiska. W sposób

ilościowy zjawisko to jest przedstawione w tab. 4 zawierającej obliczone średnie gradienty spadku temperatury na każde 10 cm głębokości. Jej analiza wykazuje, iż największy spadek temperatury od powierzchni ku głębokości 50 cm wystąpił na stanowisku plaża (0,78°C/10 cm). Wynika to z dwóch faktów, największej – spośród wszystkich stanowisk – suchości wierzchniej warstwy oraz najpłytszego występowania stropu wieloletniej zmarzliny, wpływającej ochładzająco. Wyraźnie najmniejszy gradient spadku temperatury jest natomiast notowany na stanowisku morena (0,21°C/10 cm), gdzie najsuszej jest niemal w całym profilu, z wyjątkiem samej wierzchniej warstwy, a zmarzlina występuje najgłębiej (> 2 m).

Tabela 4 – Table 4

Średnie gradienty temperatury gruntu (°C/10 cm) w otoczeniu Stacji Polarnej UMK (Równina Kaffiøyra) za okres 21.07 – 31.08 w latach 1975-2009

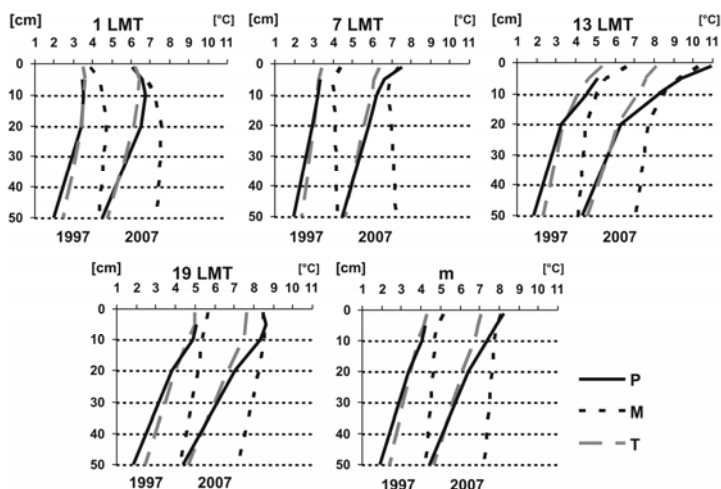
Mean lapse rates of summer (21st July to 31st August) ground temperature (°C/10 cm) near the NCU Polar Station (Kaffiøyra Plain), 1975-2009

Stanowisko / Site	1975	1977	1978	1979	1980	1982	1985	1989	1997	1998	1999	2000	2005	2006	2007	2008	2009	1978-2009*
Plaża - Beach	-0,76	-0,82	-0,82	-0,84	-0,71	-0,71	-0,78	-0,78	-0,55	-1,16	-0,69	-0,71	-0,92	-0,58	-0,78	-0,66	-0,89	-0,78
Morena - Moraine	-	-	-0,22	-0,27	-0,20	-	-0,22	-0,14	-0,18	-0,29	-0,17	-0,20	-0,27	-0,22	-0,18	-0,18	-0,22	-0,21
Tundra - Tundra	-	-	-0,47	-0,49	-	-	-0,55	-0,49	-0,39	-0,78	-0,59	-0,55	-0,62	-0,45	-0,49	-0,45	-0,68	-0,54

*- bez lat (without years) 1980, 1982

Interesującym zagadnieniem jest ocena na ile opisane wyżej relacje między temperaturą gruntu w analizowanych trzech ekotopach podlegają zmianom w cyklu dobowym. W tym celu dla każdej godziny z głównych terminów obserwacyjnych, czyli dla 1, 7, 13 i 19 LT, wykreślono jej przebiegi w profilu pionowym (ryc. 5). Do analizy wzięto dwa skrajne sezony letnie pod względem wartości temperatury gruntu, najcieplejszy (2007 rok) i najchłodniejszy (1997 rok). W najcieplejszym roku zmienność temperatury gruntu w cyklu dobowym jest wyraźnie większa na wszystkich stanowiskach w porównaniu z najchłodniejszym sezonem. Cecha ta jest szczególnie dobrze widoczna w warstwie gruntu do 20 cm. Lepiej wykształcona jest również „nocna” warstwa inwersyjna. W sezonie najcieplejszym obserwowane jest także wyraźnie większe zróżnicowanie wartości dobowej amplitudy temperatury na różnych poziomach między poszczególnymi stanowiskami. Cykl dobowy jest najwyraźniejszy na stanowisku plaża, a najmniej wykształcony jest na stanowisku tundra. W najchłodniejszym sezonie letnim zróżnicowanie między stanowiskami praktycznie niemal zanika (ryc. 5).

Zgodnie z oczekiwaniem największe różnice termiczne między badanymi stanowiskami wystąpiły o godz. 13⁰⁰, a najmniejsze o godz. 1⁰⁰. Jest to szczególnie dobrze widoczne w sezonie najcieplejszym. Warto zwrócić uwagę na zmianę różnic między stanowiskami na plaży i tundrze w zależności od charakteru lata. Im lato jest cieplejsze, tym względnie cieplejsza w stosunku do tundry jest plaża, szczególnie w warstwie do 20 cm, natomiast niżej jest ona tylko niewiele chłodniejsza. W chłodniejszych latach brak jest wyraźnych różnic między tymi stanowiskami do głębokości 20 cm, z wyjątkiem godz. 13⁰⁰, kiedy plaża jest nieco cieplejsza. Natomiast na głębokości 50 cm jest już wyraźnie cieplej na stanowisku tundra (ryc. 5).

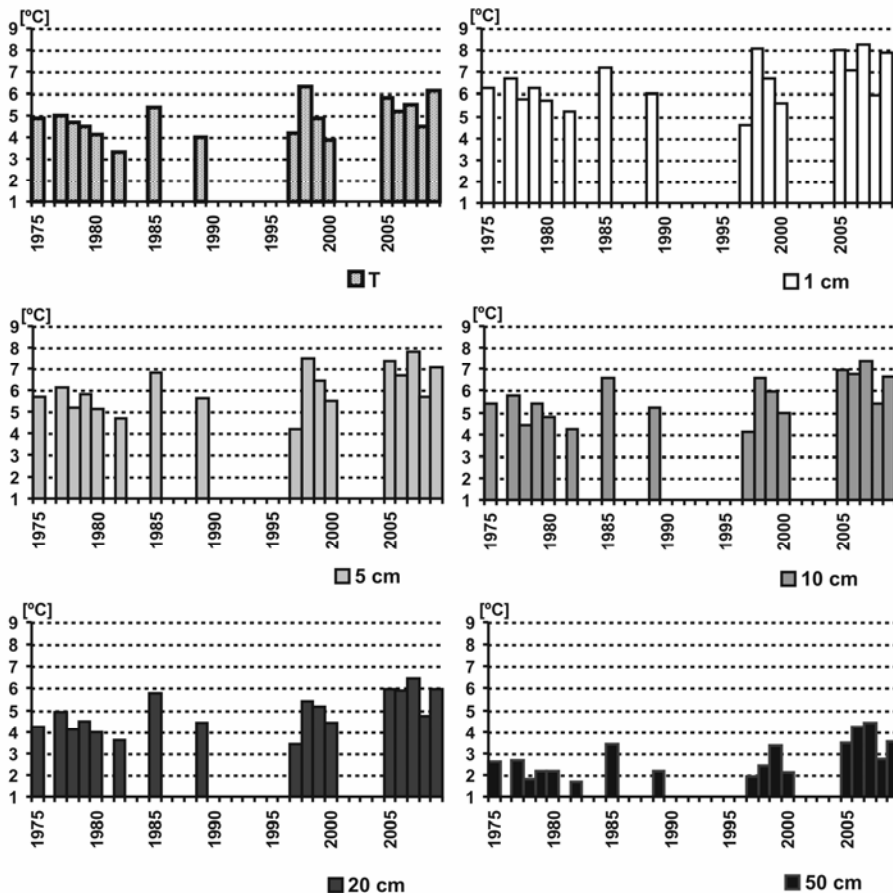


Ryc. 5. Średnie sezonowe pionowe profile temperatury gruntu w warstwie 1-50 cm w 3 analizowanych ekotopach (P – Plaża, M- Morena i T – Tundra) na Kaffiøyrze w wybranych godzinach doby (1, 7, 13 i 19 LT) oraz dla średnich dobowych (m) w najcieplejszym (2007) i najchłodniejszym (1997) sezonach letnich

Fig. 5. Mean seasonal vertical ground temperature profiles in the layer 1-50 cm in three analysed ecotypes (P – Beach, M – Moraine, and T – Tundra) on the Kaffiøyra Plain at selected hours (1, 7, 13 and 19 LT) and for the daily mean (m) in the warmest (2007) and coldest (1997) summer seasons

Kolejnym ważnym problemem badawczym jest zbadanie zmian temperatury gruntu w okresie ostatnich 35 lat, pokrywającym się w całości z tzw. drugą fazą współczesnego ocieplenia. Zmiany średnich letnich wartości temperatury gruntu na stanowisku plaża na badanych 5 głębokościach zostały ukazane na tle zmian temperatury powietrza (ryc. 6). Nie dysponujemy danymi dla wszystkich lat, stąd nie można obliczyć w sposób wiarygodny wielkości trendów zmian. Jednak posiadamy informacje dla niemal połowy lat badanego okresu. Przegląd zmian zarówno temperatury powietrza, jak i gruntu dowodzi, iż do 1997 r. zmiany prawdopodobnie były niewielkie, a nawet obserwowana była lekka tendencja spadkowa. Od 1998 r. jednak widać wyraźny wzrost wartości zarówno temperatury powietrza, jak i gruntu na wszystkich głębokościach, z wyjątkiem 50 cm, gdzie ocieplenie stało się wyraźne dopiero począwszy od 2005 r. Nie można jednak wykluczyć, iż rozpoczęło się na tej głębokości kilka lat wcześniej. Brak danych dla pierwszych lat XXI wieku nie pozwala tej tezy jednak zweryfikować.

Dla pozostałych dwóch stanowisk z różnych przyczyn dysponujemy mniejszą liczbą danych, stąd nie są one pod tym kątem analizowane. Obliczone korelacje między 15 seriami średnich dobowych wartości temperatury gruntu z wszystkich poziomów i stanowisk dla wspólnych lat obserwacji są bardzo silne (tab. 5). Zgodnie z oczekiwaniem, najsłabsze, ale wciąż bardzo wysokie korelacje pozytywne (r powyżej 0,7) stwierdzono między seriami temperatury gruntu z 1 i 5 cm a 50 cm. Dla wszelkich innych kombinacji serii danych obejmujących pozostałe poziomy i wszystkie stanowiska korelacje są wyraźnie silniejsze (współczynniki korelacji z jednym wyjątkiem są zawsze większe od 0,8, z wyraźną przewagą wartości przekraczających 0,9). Wszystkie korelacje są statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$. Tak ścisłe zależności pozwalają na konstrukcję równań regresji, które będzie można wykorzystywać do uzupełniania brakujących wartości na którymkolwiek ze stanowisk.



Ryc. 6. Przebieg wieloletni średnich sezonowych (21.07-31.08) wartości temperatury powietrza (T) i temperatury gruntu na głębokościach 1, 5, 10, 20 i 50 cm na Kaffiøyrze na stanowisku „Plaža” w okresie 1975-2009

Fig. 6. Long-term course of mean seasonal (21st July to 31st August) values of air temperature (T) and ground temperature at depths 1, 5, 10, 20 and 50 cm on the Kaffiøyra Plain at 'Beach' site from 1975 to 2009

W celu oceny, który element meteorologiczny w największym stopniu wpływa na temperaturę gruntu skorzystano z danych ze stanowiska plaža, dla którego – jak wspomniano wcześniej – dysponujemy największą liczbą danych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń współczynników korelacji między wybranymi elementami meteorologicznymi a temperaturą gruntu na wszystkich badanych głębokościach zawiera tab. 6. Wynika z niej, iż zdecydowanie najistotniejszy wpływ na kształtowanie się temperatury gruntu ma temperatura powietrza. Spośród badanych parametrów najsilniejsze związki obliczono dla średniej temperatury dobowej. Współczynniki korelacji wahają się od 0,83 do 0,86 dla serii temperatury gruntu w warstwie do 20 cm. Najniższą korelację ($r = 0,60$) stwierdzono, zgodnie z oczekiwaniem, pomiędzy temperaturą powietrza a temperaturą gruntu z głębokości 50 cm. Wszystkie korelacje są jednak statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$. Wykresy rozrzutu wartości temperatury powietrza i temperatury gruntu na różnych poziomach dodatkowo ilustrują stwierdzone wyżej ścisłe związki (ryc. 7).

Tabela 5 – Table 5

Macierz współczynników korelacji średnich wartości dobowych temperatury gruntu (między stanowiskami: Plaża, Morena i Tundra) na różnych głębokościach (1, 5, 10, 20 i 50 cm) w sezonach letnich: 1978,1979, 1985, 1989, 1997-2000, 2005-2009

Matrix of correlation coefficients for mean daily values of ground temperature (between the sites: Beach, Moraine and Tundra) at different depths (1, 5, 10, 20 and 50 cm) in the summer seasons: 1978,1979, 1985, 1989, 1997-2000, 2005-2009

Stanowisko Site		Plaża – Beach					Tundra – Tundra					Morena – Moraine				
		1cm	5cm	10cm	20cm	50cm	1cm	5cm	10cm	20cm	50cm	1cm	5cm	10cm	20cm	50cm
Plaża - Beach	1cm	0,99	0,97	0,91	0,71	0,97	0,96	0,95	0,91	0,78	0,98	0,98	0,97	0,94	0,84	
	5cm		0,99	0,93	0,77	0,97	0,97	0,97	0,94	0,81	0,98	0,98	0,98	0,96	0,87	
	10cm			0,96	0,84	0,96	0,96	0,97	0,95	0,85	0,96	0,97	0,97	0,96	0,89	
	20cm				0,86	0,91	0,93	0,94	0,94	0,87	0,90	0,92	0,93	0,94	0,90	
	50cm					0,74	0,78	0,82	0,85	0,87	0,73	0,76	0,79	0,82	0,86	
Tundra - Tundra	1cm					0,99	0,98	0,95	0,83	0,97	0,98	0,97	0,95	0,87		
	5cm						0,99	0,97	0,86	0,96	0,97	0,97	0,96	0,89		
	10cm							0,98	0,88	0,95	0,97	0,98	0,97	0,91		
	20cm								0,92	0,92	0,94	0,95	0,97	0,93		
	50cm									0,77	0,82	0,83	0,86	0,89		
Morena - Moraine	1cm									0,99	0,98	0,95	0,85			
	5cm										0,99	0,98	0,90			
	10cm											0,99	0,92			
	20cm												0,96			
	50cm													0,96		

Wszystkie wartości współczynników korelacji są istotne statystycznie na poziomie $p < 0,05$
All values of correlation coefficients are statistically significant at the level of 0.05

Tabela 6 – Table 6

Współczynniki korelacji między wartościami średnich dobowych temperatury gruntu na stanowisku Plaża (na różnych głębokościach: 1, 5, 10, 20 i 50 cm) a średnimi wartościami wybranych elementów meteorologicznych na Równinie Kaffiøyra w sezonach letnich 1975-2009

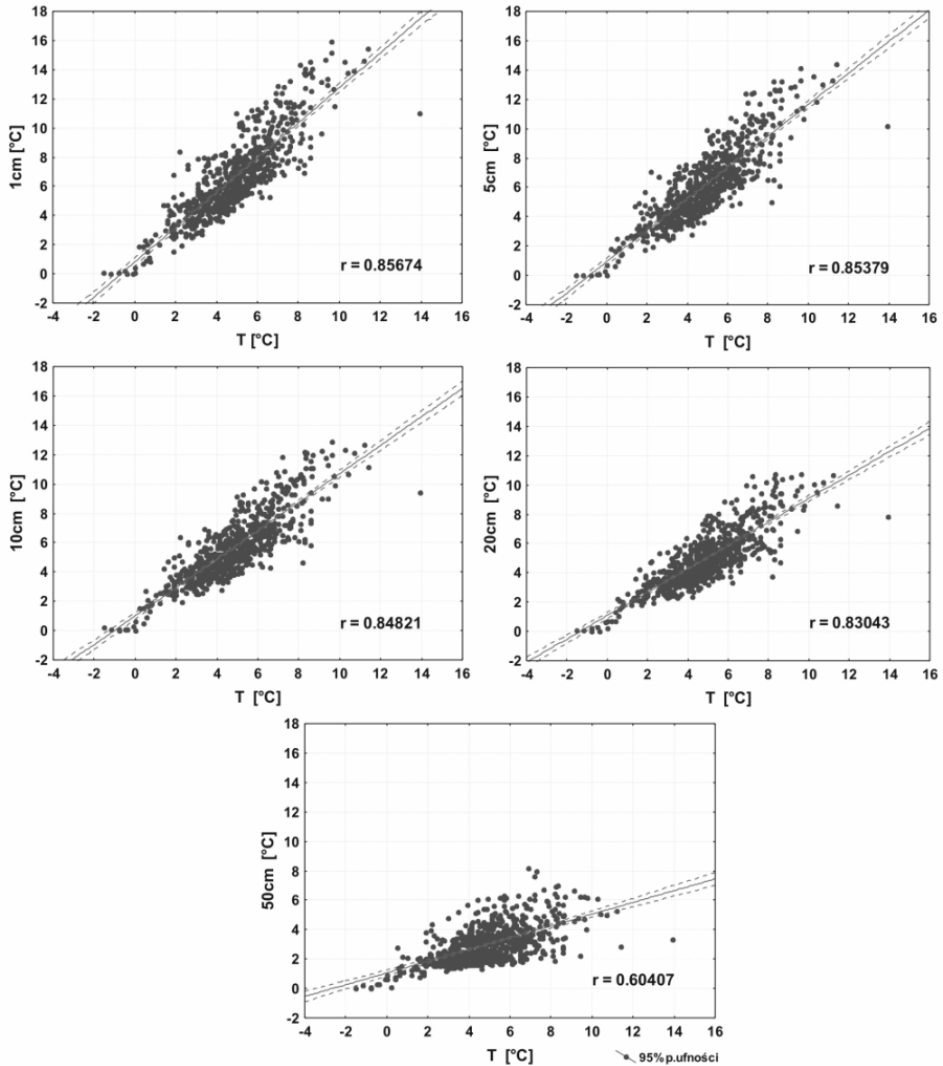
Correlation coefficients between the 'Beach' site (at different depths: 1, 5, 10, 20 and 50 cm) and mean daily values of selected meteorological elements on the Kaffiøyra Plain in the summer seasons: 1975-2009

Element Variable	Temperatura gruntu - Plaża – Ground temperature - Beach				
	1cm	5cm	10cm	20cm	50cm
Ti	0,86	0,85	0,85	0,83	0,60
Tmin	0,71	0,72	0,75	0,74	0,62
Tmax	0,61	0,61	0,58	0,55	0,32
f	-0,10	-0,07	-0,06	-0,03	0,01
e	0,70	0,71	0,71	0,71	0,53
V	-0,28	-0,26	-0,23	-0,20	-0,09
C	-0,25	-0,21	-0,19	-0,15	0,00
SS	0,23	0,21	0,19	0,15	0,01
P	-0,10	-0,09	-0,08	-0,08	0,00

Współczynniki korelacji istotne statystycznie na poziomie $p < 0,05$ są pogrubione (correlation coefficients statistically significant at the level of 0.05 are shown in bold). Objaśnienia (explanations):

Ti – średnia dobowa temperatura powietrza (mean daily air temperature), Tmin – średnia dobowa temperatura minimalna (mean daily minimum temperature), Tmax – średnia dobowa temperatura maksymalna (mean daily maximum temperature), f – wilgotność względna (relative humidity), e – ciśnienie pary wodnej (water vapour pressure), V – prędkość wiatru (wind velocity), C – zachmurzenie (cloudiness),

SS – usłonecznienie (sunshine duration), P – opad atmosferyczny (atmospheric precipitation)



Ryc. 7. Związek między średnimi dobowymi wartościami temperatury gruntu na stanowisku Plaża (na różnych głębokościach: 1, 5, 10, 20 i 50 cm) a temperaturą powietrza w sezonach letnich 1975-2009
 Objasnienia: wszystkie wartości współczynników korelacji są istotne statystycznie na poziomie $p < 0,05$

Fig. 7. Relation between values of mean daily ground temperature (at depths: 1, 5, 10, 20 and 50 cm) at the 'Beach' site and mean daily values of air temperature in summer seasons: 1975-2009
 Explanations: all values of correlation coefficients are statistically significant at the level of 0.05

Z ekstremalnych wartości temperatury powietrza wyraźnie większy wpływ na temperaturę gruntu w całym badanym profilu ma temperatura minimalna ($r > 0,7$ do głębokości 20 cm). Niezwykle interesującym wynikiem jest fakt, iż wywiera ona nieco większy wpływ na temperaturę gruntu na głębokości 50 cm niż temperatura średnia dobowa (tab. 6). Podobnie jak w przypadku temperatury średniej dobowej, wszystkie współczynniki korelacji są statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$.

Wysokie wartości współczynników korelacji temperatury gruntu uzyskane z prężnością pary wodnej są rezultatem ścisłego skorelowania tego elementu z temperaturą powietrza. Z pozostałych analizowanych elementów meteorologicznych znaczny wpływ na wartości temperatury gruntu ma zachmurzenie i usłonecznienie. W obydwu przypadkach współczynniki korelacji są niezbyt wysokie (wahają się od 0,15 do 0,25 dla warstwy 1-20 cm), ale statystycznie istotne. Ich wartości bezwzględne są niemal takie same. Wzrost zachmurzenia obniża temperaturę gruntu, a usłonecznienia ją podnosi. Elementy te nie są istotnymi czynnikami zmian temperatury gruntu na głębokości 50 cm (tab. 6). Nieco silniejszy wpływ na temperaturę gruntu w porównaniu z dwoma wyżej omówionymi elementami ma prędkość wiatru. Szczególnie warto podkreślić fakt, iż element ten wpływa także w istotny ochładzający sposób (choć bardzo niewielki, $r^2 = 0,0081$) na temperaturę gruntu na głębokości 50 cm. Ochładzający, niezwykle mały wpływ na temperaturę gruntu warstwy powierzchniowej do 20 cm (współczynniki korelacji wahają się od -0,8 do -0,10 i są statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$) wywiera opad atmosferyczny. Wilgotność względna wywiera niewielki wpływ jedynie na temperaturę gruntu na powierzchni ziemi (tab. 6).

4. Wnioski

1. Najwyższe wartości temperatura gruntu osiąga średnio w pierwszych dniach ostatniej dekady lipca, przekraczając 10°C na głębokości 1 cm. Średnio po 25 lipca występuje stopniowy jej spadek, silnie powiększony na przełomie lipca i sierpnia, kiedy bardzo często na Kaffiøyrze obserwuje się załamanie pogody i znaczne ochłodzenie.

2. W okresie 1978-2009 najcieplejszy grunt w całej badanej warstwie był średnio na stanowisku morena ($6,2^{\circ}\text{C}$), a najchłodniejszy na stanowisku tundra ($5,1^{\circ}\text{C}$). Jednak w warstwie najpłytszej (do 1 cm) zdecydowanie najcieplejsza była plaża, która z kolei wyraźnie najchłodniejsza była na głębokości 50 cm, co wynika z faktu najpłytszego zalegania na tym stanowisku stropu wieloletniej zmarzliny. W efekcie notuje się tutaj także największy pionowy gradient spadku temperatury z głębokością ($0,78^{\circ}\text{C}/10\text{ cm}$).

3. W najcieplejszych sezonach letnich wyraźnie jest większa zmienność temperatury gruntu w cyklu dobowym na wszystkich badanych stanowiskach w porównaniu z najchłodniejszymi sezonami, szczególnie dobrze widoczna w warstwie płytkiej do 20 cm.

4. W badanym okresie stwierdzono wyraźny wzrost temperatury gruntu na głębokościach do 20 cm począwszy od 1998 r., a na głębokości 50 cm z kilkuletnim opóźnieniem, gdyż wzrost rozpoczął się dopiero począwszy od 2005 r.

5. Stwierdzono bardzo wysokie i statystycznie istotne skorelowanie pomiędzy seriami dobowymi wartości temperatury gruntu na wszystkich poziomach pomiarowych i wszystkich stanowiskach.

6. Najsilniejszy i bardzo znaczący statystycznie istotny wpływ na kształtowanie się temperatury gruntu wywiera temperatura powietrza (r waha się od 0,6 do 0,86 dla jej średnich dobowych wartości) i powiązana z nią prężność pary wodnej. Wielokrotnie mniejsze znaczenie, ale jeszcze znaczące, stwierdzono dla prędkości wiatru, zachmurzenia i usłonecznienia. Zmienność tych elementów meteorologicznych, każdego z osobna, objaśnia od 2 do 9 % zmienności temperatury gruntu.

Podziękowania

Opracowanie wykonano w ramach projektu PNRF– 22– AI–1/07 pt. „Klimat Arktyki a środowisko Mórz Nordyckich, Svalbardu i Grenlandii (AWAKE)”. Dziękujemy anonimowemu recenzentowi za wszelkie uwagi i sugestie, które przyczyniły się do ulepszenia niniejszej pracy.

Literatura

- Araźny A., 2001. Zróżnicowanie termiki gruntu na Równinie Kaffiöyra (NW Spitsbergen) w lecie 1997 i 1998 w porównaniu z okresem 1975-98. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 11: 81–92.
- Araźny A., Grześ M., 2000. Thermal conditions and seasonal thawing of the ice-cored moraines of the Aavatsmark Glacier. [w:] Grześ M., Lankauf K.R., Sobota I. (red.), *Polish Polar Studies, 27th International Polar Symposium*: 135–152.
- Baranowski S., 1963. Niektóre wyniki badań nad temperaturą gruntu na Spitsbergenie w latach 1957-59. *Biuletyn Informacyjny Komitetu MRG*, 2: 58–67.
- Baranowski S., 1968. Termika tundry peryglacialnej SW Spitsbergen. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 68: 1–157.
- Czeppe Z., 1960. Thermic differentiation on the active layer and its influence upon the frost heave periglacial regions (Spitsbergen). *Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Geologiques et Geographiques*, 8 (2): 149–152.
- Czeppe Z., 1961. Roczny przebieg mrozowych ruchów gruntu w Hornsundzie (Spitsbergen) 1957-1958. *Zeszyty Naukowe UJ*, 42 ; *Prace Instytutu Geograficznego UJ*, zeszyt 25: 1–74.
- Czeppe Z., 1966. Przebieg głównych procesów morfogenetycznych w południowo-zachodnim Spitsbergenie. *Zeszyty Naukowe UJ*, 127; *Prace Geograficzne*, zeszyt 13: 1–129.
- Jahn A., 1961. Quantitative analysis of some periglacial processes in Spitsbergen. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Wrocławskiego, Seria B*, nr 5: 1–34.
- Kejna M., 1990. The differences in ground temperature between chosen ecotopes of polar environment on Kaffiöyra (NW Spitsbergen) in summer 1985. [w:] *Periglacial phenomena of Western Spitsbergen*, Sesja Polarna, UMCS, Lublin: 245–252.
- Kejna M., 1991. The rate of ground thawing in relation to atmospheric conditions and ground temperature on Kaffiöyra (NW Spitsbergen) in the summer of 1985. *Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen*, Lublin: 267–276.
- Kejna M., Marciniak K., Przybylak R., 1993. Temperatura gruntu w wybranych ekotopach na Równinie Kaffiöyra (NW Spitsbergen) w lecie 1989 r. [w:] *Wyniki badań VIII Toruńskiej Wyprawy Polarnej Spitsbergen'89*, UMK, Toruń: 47–64.
- Leszkiewicz J., 1977. Meteorological conditions on the northern part of Kaffiöyra Plain during the period from July 1 to August 31, 1975. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia* 13: 97–111.
- Marciniak K., Przybylak R., 1983. Meteorological conditions in the Kaffiöyra /NW Spitsbergen/ since 7th July to 5th September 1979. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia*, 18: 113–123.
- Marciniak K., Przybylak R., 1991. Warunki meteorologiczne na Równinie Kaffiöyra /NW Spitsbergen/ w okresie 5 VII-7 IX 1980 r. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia*, 22: 97–107.
- Marciniak K., Przybylak R., Kejna M., 1991. Vertical ground temperature distribution in some chosen ecotopes on Kaffiöyra (NW Spitsbergen) in the summer of 1989 [w:] *Arctic environment research*, Sesja Polarna, UMCS, Lublin: 277–288.
- Miętus M., Filipiak J., 2001. Temperatura gruntu w rejonie Stacji Polarnej w Hornsundzie. *Problemy Klimatologii Polarnej* 11: 67–80.
- Przybylak R., 1992. Stosunki termiczno-wilgotnościowe na tle warunków cyrkulacyjnych w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978-1983. *Dokumentacja Geograficzna*, 2: 1–105.

- Przybylak R., 2007. Recent air-temperature changes in the Arctic. *Annals of Glaciology* 46: 316–324.
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H., 2010. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007-2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes* 21 (2): 106-116.
- Wójcik G., 1982. Meteorological conditions at the Kaffiøyra Plain – Spitsbergen from 21st July to 28th August 1977. *Acta Universitatis Nicolai Copernici*, 16: 151–166.
- Wójcik G., Kejna M., Marciniak K., Przybylak R., Vizi Z., 1997. Obserwacje meteorologiczne na Ziemi Oskara II (Spitsbergen) i w Oazie Bungera (Antarktyda). *Zakład Klimatologii, Toruń*: 1–412.
- Wójcik G., Marciniak K., 1987. Ground temperature of main ecotopes of Kaffiøyra, Spitsbergen, summer 1978. *Polish Polar Research*, 8 (1): 25–46.
- Wójcik G., Marciniak K., 1983. Meteorological conditions in the Kaffiøyra Plain (NW Spitsbergen) since 21st July to 7th September 1978. *Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia*, 18: 99–111.
- Wójcik G., Marciniak K., Przybylak R., 1988. Time and spatial variation of temperature of active layer in summer on the Kaffiøyra Plain (NW Spitsbergen). V International Conference on Permafrost, Proceedings volume 1, Trondheim, Norway: 499–504.
- Wójcik G., Marciniak K., Przybylak R., 1991. Mezoklimatyczne i topoklimatyczne jednostki w regionie Kaffiøyry (NW Spitsbergen). *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 1213: 323–342.
- Wójcik G., Marciniak K., Przybylak R., Kejna M., 1990. Year-to-year changes of ground temperature in the period 1975-1989 on the Kaffiøyra Plain (NW Spitsbergen) [w:] *Periglacial phenomena of Western Spitsbergen, Sesja Polarna, UMCS, Lublin*: 233–243.
- Wójcik G., Marciniak K., Przybylak R., Kejna M., 1992. Temperatura powietrza i opady a cyrkulacja atmosferyczna w regionie Kaffiøyra (NW Spitsbergen) w sezonie letnim w okresie 1975-1989. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 2: 96–102.
- Wójcik G., Przybylak R., 1985. Pionowe gradienty temperatury powietrza na Lodowcu Waldemara /Ziemia Oskara II, Spitsbergen/. XII Sympozjum Polarne, Materiały, Szczecin: 67–74.

Wpłynęło: 15 sierpnia 2010; poprawiono: 11 października 2010.

Summary

In the present paper a comprehensive synthesis of ground temperature changes on the Kaffiøyra Plain (NW Spitsbergen) in the summer season (21st July to 31st August) from 1975 to 2009 is described. This has been done with two main aims in mind: i) to examine the influence of different ecotypes on ground temperature values in the layer 1-50 cm, and ii) to examine long-term changes of ground temperature.

The highest values of long-term average ground temperature in the summer season have been observed between 20th and 25th July. After this period a gradual decrease in ground temperature is observed (Table 2, Fig. 3). One clear cold singularity can be distinguished here occurring at the end of July and start of August which is connected with a significant decrease in air temperature observed very often during this time. In the period 1978-2009 the warmest ground in the entire analysed layer was observed at the 'Moraine' site (6.2°C), and the coldest was at the 'Tundra' site (5.1°C) – Table 3, Fig. 4. However, in the shallowest layer (up to 1 cm) markedly the warmest site was the beach, while the coldest was at a depth of 50 cm (Fig. 4). The reason for the large decrease of temperature in this

layer was that this was where the permafrost roof was at its shallowest. As a consequence of this temperature behaviour in the layer, the 'Beach' site shows the greatest lapse rate of ground temperature ($-0.78^{\circ}\text{C}/10\text{ cm}$) (Table 4). In the warmest summer seasons a greater range of ground temperature in the daily cycle is observed than in the coldest ones, which is very clearly seen, in particular in the layer from surface up to 20 cm (Fig. 5).

In the study period a significant increase in ground temperature in the layer 1-20 cm was observed starting in 1998, while at a depth of 50 cm this rise can be seen from 2005 onward (Fig. 6). Very high and statistically significant correlation have been found between series of daily ground temperature taken from all sites and all measurement depths (Table 5). Air temperature is a meteorological variable, which has the greatest influence on the values of ground temperature. Correlation coefficients between series of its daily values and series of average daily ground temperature in all analysed depths at the 'Beach' site oscillate from 0.6 to 0.86 (Table 6, Fig. 7). Important factors controlling values of ground temperature in the layer 0-20 cm are also wind velocity, cloudiness and sunshine duration (correlation coefficients oscillate between 0.15 and 0.28).

Key words: Spitsbergen, ground temperature, summer season, long-term changes.