

**STRUMIEŃ CIEPŁA W GRUNCIE A PROMIENIOWANIE
POCHŁONIĘTE NA TUNDRZE ARKTYCZNEJ
PRZY RÓŻNYCH TYPACH POGODY
(REGION HORNSUNDU, SPITSBERGEN)**

Marek Angiel

*Uniwersytet Jagielloński, Kraków
Instytut Geografii, Stacja Naukowa Łazy k/Bochni*

Wprowadzenie

Wymianę energii między atmosferą a podłożem należy rozumieć jako jeden z podstawowych procesów, które kształtują czasową i przestrzenną strukturę środowiska i warunkują jego funkcjonowanie. Od natężenia wymiany energii między atmosferą a podłożem zależy bowiem natężenie wszystkich zjawisk w przyrodzie. Wymianę tę opisuje równanie bilansu cieplnego powierzchni czynnej. W równaniu tym suma: salda promieniowania w pełnym zakresie widma (Q), turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego (H), turbulencyjnego strumienia ciepła utajonego (LE) i strumienia ciepła w gruncie (S) wynosi w każdym momencie zero. Jak wiadomo, bilans promieniowania (Q) jest sumą salda promieniowania krótkofalowego (K_1), (źródłem promieniowania krótkofalowego jest Słońce) i salda promieniowania długofalowego (L_2), (źródłem promieniowania długofalowego jest powierzchnia Ziemi i atmosfera). Saldo promieniowania krótkofalowego (K_1) jest różnicą pomiędzy promieniowaniem słonecznym całkowitym i promieniowaniem słonecznym odbitym od powierzchni czynnej. Wielkość K_1 jest równoznaczna z promieniowaniem słonecznym pochłoniętym przez powierzchnię czynną.

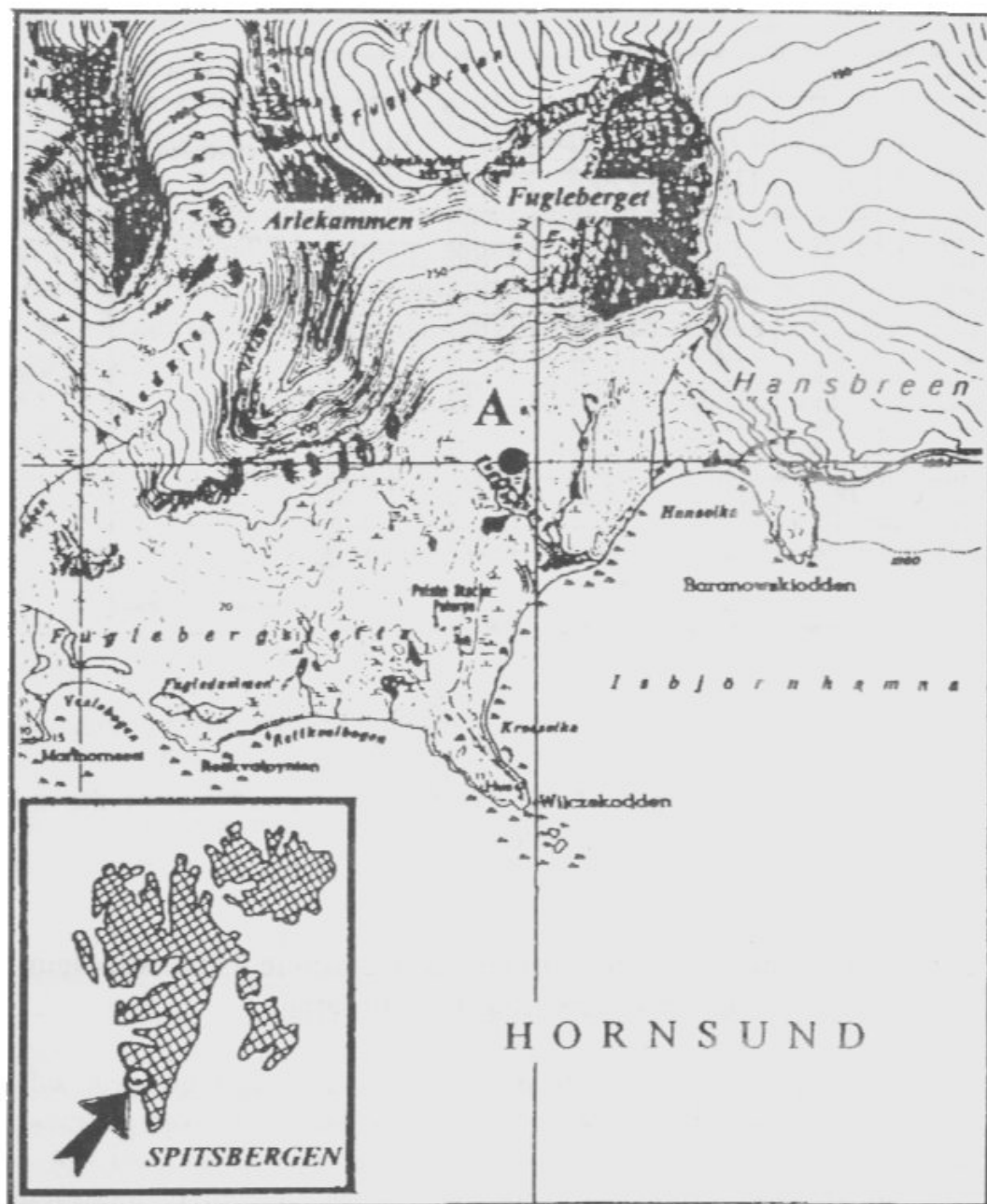
Promieniowanie przekształcane jest w gruncie na energię ciepłą zużywaną na parowanie, ogrzanie gruntu i przypowierzchniowej warstwy powietrza zgodnie z równaniem bilansu cieplnego. Z równania tego wynika, że pomiędzy poszczególnymi jego członami istnieje związek, który przy zmieniającej się wilgotności gleby i wysokości pokrywy roślinnej oraz odmiennych warunkach meteorologicznych może się różnie kształtować.

Celem podjętych badań było określenie związków między strumieniem ciepła w gruncie (S) a promieniowaniem słonecznym pochłoniętym (K_2) dla jednego z charakterystycznych typów środowisk glebowo-roślinnych tundry arktycznej przy różnych typach pogody. Poznanie tych związków powinno stać się przydatne przy określaniu przybliżonej wielkości wymiany ciepła w gruncie w okresie wiosenno-letnim na podstawie znanych właściwości fizycznych pokrywy glebowo-roślinnej tundry arktycznej i założonych warunkach meteorologicznych opisanych przez typ pogody.

Obszar badań, aparatura

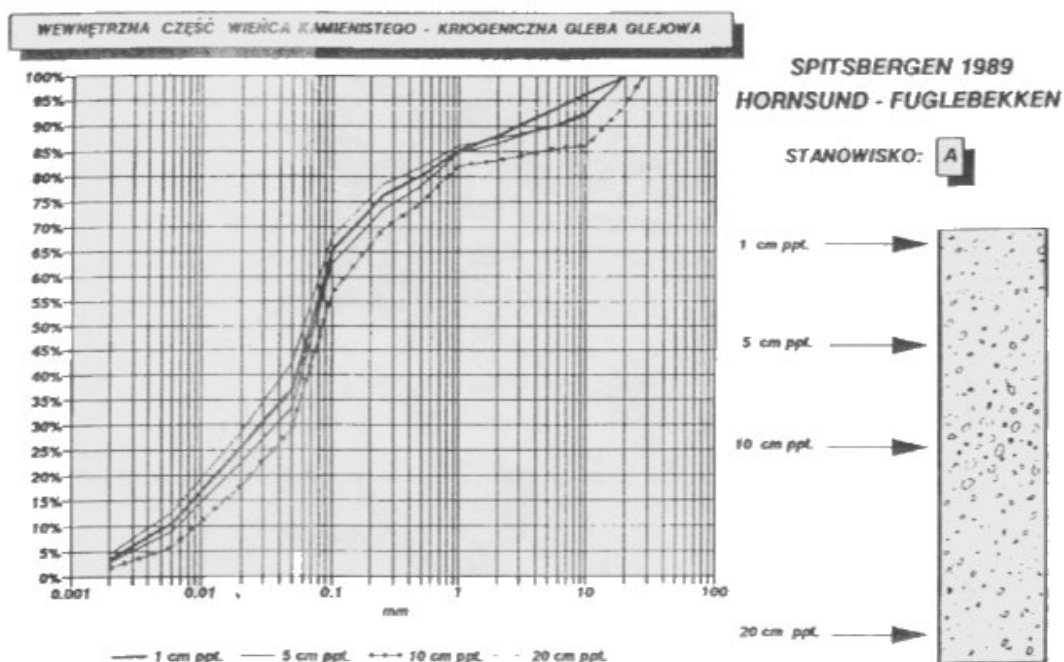
Stanowisko badawcze (A) zlokalizowano na równinie podniesionej terasy morskiej u podnóża góry Fugleberget (fjord Hornsund, SW Spitsbergen) na wysokości 10 m n.p.m. (ryc.1). Równina ta, to rozległa powierzchnia o nachyleniu od 1° do 3° , okryta pokrywą pochodzenia niweofluwialnego i glacyfluwialnego, w której rozwinęła się sieć poligonalna należąca do grawitacyjnego typu gruntów modelowanych (Jahn 1970). Na takim podłożu wytworzyła się kriogeniczna gleba glejowa (Skiba 1991). Stanowisko badawcze usytuowano w miejscu charakterystycznym dla ubogiej, kamienistej tundry arktycznej z dobrze wykształconymi wieńcami kamienistymi. Czujniki pomiarowe zainstalowano wewnątrz wieńca kamienistego na powierzchni prawie całkowicie pozbawionej roślinności. Utwór glebowy należy do pyłu gliniastego. Części piaszczyste stanowią ok. 25%, pylaste 45% a pozostałe 30% zajmują części ilaste. Skład mechaniczny materiału budującego tę glebę na głębokościach: 1, 5, 10 i 20 cm p.p.t. przedstawiono na rycinie 2.

Zastosowana w trakcie badań aparatura pomiarowa umożliwiła uzyskać wyniki pozwalające prześledzić dobowy i sezonowy rozkład strumienia ciepła w gruncie, rozkład promieniowania pochłoniętego oraz prędkości wiatru w okresie wiosny i lata polarnego (od 15 maja do 15 sierpnia 1989 r.). Wartości strumieni i prędkość wiatru były mierzone automatycznie co 60 sekund przez cały okres obserwacji. Do pomiarów strumienia ciepła w gruncie wykorzystano czujnik natężenia strumienia ciepła MGS-3 (w zestawie z przekonstruowanym miernikiem HFM-1A), promieniowanie całkowite i promieniowanie odbite mierzono solarymetrem MW-81 i albedometrem MW-91, prędkość wiatru wiatromierzem W-841. Do rejestracji wykorzystano rejestrator cyfrowy („LOGGER”). Dzięki możliwości współpracy „LOGGERA” z komputerem klasy PC, wyniki były wprowadzane do pamięci komputera. Szczegółowy sposób pomiaru i przetwarzania danych zastosowany w trakcie badań przedstawiono w pracy [1].



Ryc. 1. Położenie stanowiska pomiarowego (A) w zlewni rzeki Fuglebekken (Hornsund, SW Spitsbergen)

Fig. 1. Location of the research site (A) in the Fuglebekken basin (Hornsund, SW Spitsbergen)



Ryc. 2. Krzywe uziarnienia materiału budującego wewnętrzną część wieńca kamienistego w warstwie 0-20 cm p.p.t. na stanowisku A

Fig. 2. Grain size curves of the ground within inner part of the stone polygon (for the depth 0 - 20 cm); site A

Związki między strumieniem ciepła w gruncie a strumieniem promieniowania pochłoniętego

Wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią czynną a gruntem zależy przede wszystkim od właściwości termiczno - wilgotnościowych gruntu oraz od wysokości i gęstości szaty roślinnej. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na wielkość strumienia ciepła w gruncie są zmiany temperatury gruntu (T) w przestrzeni (z) (gradient pionowy T/z) i w czasie (T/t) oraz przewodnictwo cieplne i pojemność cieplna gruntu. Na zmienność tych elementów największy wpływ ma wilgotność gruntu (która w dużym stopniu zależy od opadu) oraz obecność szaty roślinnej (im wyższa i bardziej zwarta roślinność tym słabsze nagrzewanie gruntu).

Na wielkość wymiany ciepła w pozbawionych roślinności pokrywach glebowych tundry arktycznej decydujący wpływ ma - obok strumienia promieniowania pochłoniętego - wilgotność gruntu oraz prędkość wiatru.

Na potwierdzenie tej tezy dokonano analizy dobowego rozkładu wielkości strumienia ciepła w gruncie (S) na tle rozkładu promieniowania po-

chłoniętego (K_2) w dniach o różnych typach pogody. Przeanalizowano również związki między S a K_2 w tych dniach. Typy pogody wydzielono biorąc pod uwagę te elementy meteorologiczne, które w sposób decydujący wpływają na wielkość strumienia K_2 i S . Uwzględniono: a) wielkość zachmurzenia (tylko chmury niskie), b) dobową sumę usłonecznienia, c) występowanie i czas trwania opadu atmosferycznego i mgły, d) średnią dobową prędkość wiatru. Wydzielono pięć typów pogody; średnia dobową prędkość wiatru stanowiła kryterium podziału danego typu na dwa lub trzy podtypy. W ciągu 93 dni okresu wiosenno-letniego 1989 roku poszczególne typy pogody wystąpiły przez:

Typ 1 (dni pogodne bez opadu z bardzo wysokim usłonecznieniem) - 7% dni,

Typ 2 (dni z zach. umiarkowanym bez opadu z wysokim usłonecznieniem) - 31% dni,

Typ 3 (dni pochmurne bez opadu z małym usłonecznieniem) - 26% dni,

Typ 4 (dni z opadem, pochmurne z bardzo małym usłonecznieniem) - 19% dni,

Typ 5 (dni z opadem i mgłą z zachm. całkowitym bez usłonecznienia) - 17% dni.

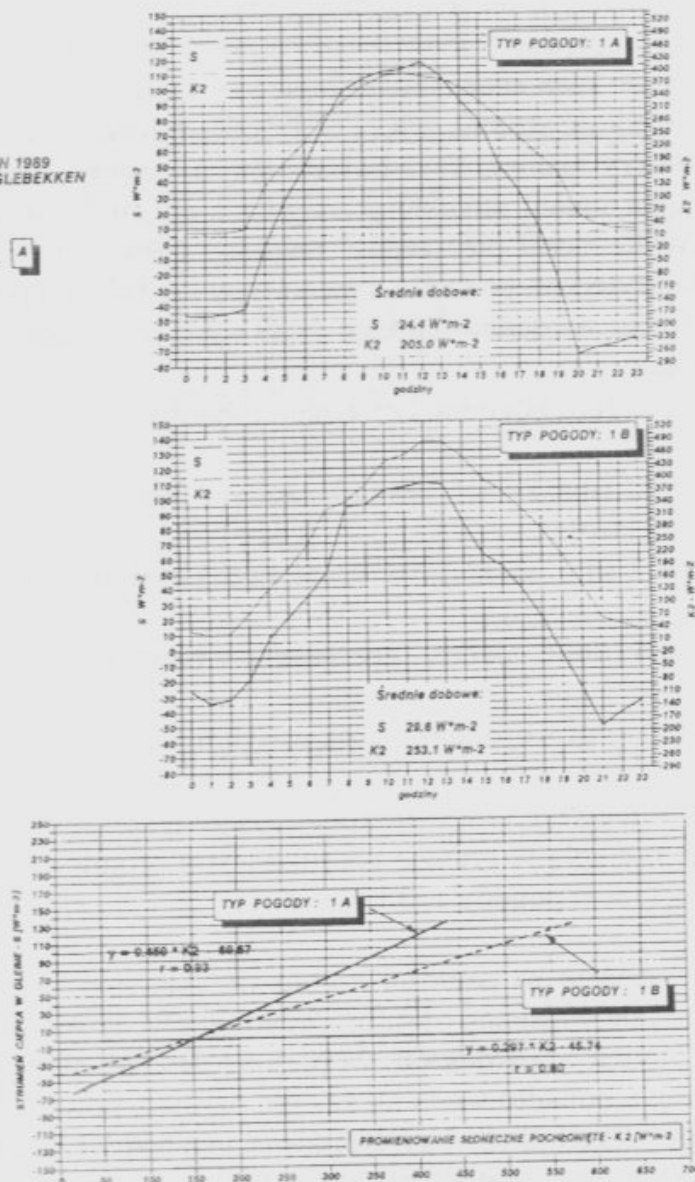
W niniejszej pracy przeanalizowano szczegółowo związki między strumieniem ciepła w gruncie a strumieniem promieniowania pochłoniętego w dniach z typem pogody 1, 3 i 4.

O wzroście wilgotności gruntu wewnętrznej części wieńca kamiennego w okresie wiosenno - letnim decyduje przede wszystkim opad atmosferyczny. Chłodna woda deszczowa padając na cieplejsze podłoże obniża jego temperaturę, a ponadto woda ta, szybko parując, powoduje dodatkowe straty energii z powierzchni czynnej. Dobowa suma opadów staje się (w warunkach suchych gruntów poligonalnych strefy arktycznej) jednym z głównych czynników wpływających na wielkość strumienia S w dniu z opadem. Również wzrost średniej dobowej prędkości wiatru (do wiatru umiarkowanego, bądź silnego) powoduje wzrost ubytków ciepła z nieosłoniętej przez roślinność powierzchni gruntu. Szczególnie silnie jest to widoczne podczas dni z opadem oraz dni bezchmurnych i pogodnych.

W dni pogodne lub bezchmurne, bez opadu i z bardzo wysokim usłonecznieniem (typ pogody 1) wilgotność gruntu jest mała. W ciągu doby grunt o małej wilgotności nagrzewa się bardzo szybko i szybko traci ciepło. Jednocześnie obserwuje się szybsze ogrzewanie gruntu w godzinach przedpołudniowych (ryc.3). Związki między promieniowaniem pochłoniętym (K_2) a strumieniem ciepła w gruncie (S) w dni określone typem pogody 1 przed-

SPITSBERGEN 1989
HORNSTUND - FUGLEBEKKEN

STANDOWISKO:



Ryc. 3. Średni dobowy rozkład wielkości strumieni S i K_2 oraz związki między strumieniem promieniowania pochłoniętego (K_2) a strumieniem ciepła w gruncie (S) wewnętrznej części wieńca kamienistego (okres wiosenno - letni; dni z typem pogody 1: dni pogodne, bez opadu i z bardzo wysokim usłonecznieniem)

Fig. 3. Mean daily course of S and K_2 , and the relations between the short - wave net radiation (K_2) and the soil heat flux (S) in the inner part of the stone polygon

(spring and summer; type of weather 1: sunny days, without precipitation, and long sunshine)

stawiono na ryc.3. Zobrazowano tu zależność S od K_2 w warunkach różnej średniej dobowej prędkości wiatru (typ pogody 1A - dzień z wiatrem bardzo słabym, typ pogody 1B - dzień z wiatrem słabym lub umiarkowanym). Wzrost średniej dobowej prędkości wiatru powoduje wzrost ubytków ciepła z powierzchni gruntu - stąd też słabsza zależność S od K_2 :

$$S \text{ TYP 1A} = 0.459 \cdot K_2 - 69.67$$

$$S \text{ TYP 1B} = 0.297 \cdot K_2 - 45.74$$

Współczynnik a [$a = f(K_2)$] wynoszący 0.459 w typie 1A jest modyfikowany wyłącznie przez zachmurzenie, natomiast w typie 1B ($a = 0.297$) przez zachmurzenie i prędkość wiatru. Bardzo wysokie współczynniki korelacji: $r = 0.93$ (dla typu 1A) i $r = 0.80$ (dla typu 1B) świadczą o silnej zależności liniowej S od K_2 w dni o typie pogody 1. W dni pogodne, bez opadu i z bardzo wysokim usłonecznieniem gdy wiatr jest bardzo słaby (typ 1A) - promieniowanie pochłonięte ma znaczący wpływ na wielkość strumienia S . Gdy średnia dobową prędkość wiatru wzrasta (wiatr słaby lub umiarkowany) (typ 1B), wpływ promieniowania pochłoniętego na wielkość strumienia S zmniejsza się do umiarkowanego.

W dni pochmurne, bez opadu i z małym usłonecznieniem (typ pogody 3) wilgotność gruntu jest przeważnie większa niż w dni pogodne. W ciągu doby grunt umiarkowanie wilgotny nagrzewa się powoli i powoli traci ciepło. Nagrzewanie gruntu w godzinach przedpołudniowych jest takie samo jak w godzinach popołudniowych (ryc.4). Związki między S a K_2 dla dni pochmurnych, bez opadu przedstawiono na ryc.4. Uwzględniono różną średnią dobową prędkość wiatru: dni z wiatrem bardzo słabym oznaczono 3A, dni z wiatrem słabym lub umiarkowanym jako 3B. Wzrost średniej prędkości wiatru do umiarkowanej nie powoduje (jak to obserwowano podczas dni z typem pogody 1) spadku wielkości strumienia S . Tłumaczyć to należy wysokim zachmurzeniem, a ściślej, dopływem ciepła zwrotnego z atmosfery, które kompensuje straty ciepła z powierzchni gruntu wywołane wzrostem prędkości wiatru. Zależność S od K_2 jest prawie taka sama w dni z typem pogody 3A (dni z wiatrem słabym) jak i w dni z typem pogody 3B (dni z wiatrem umiarkowanym):

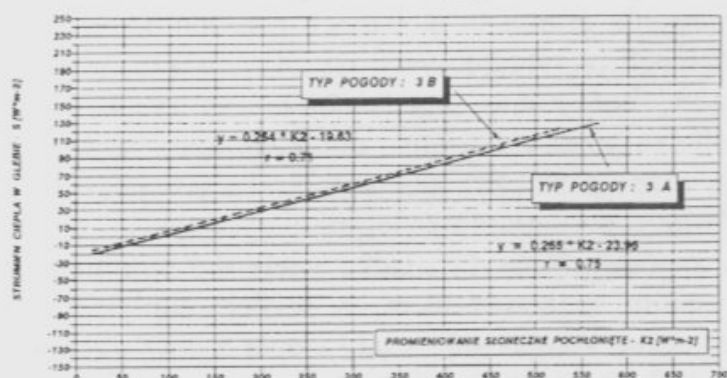
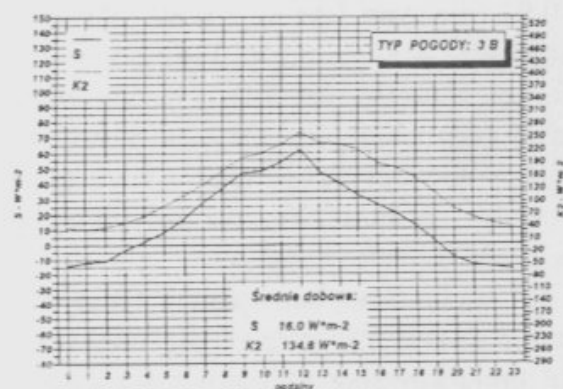
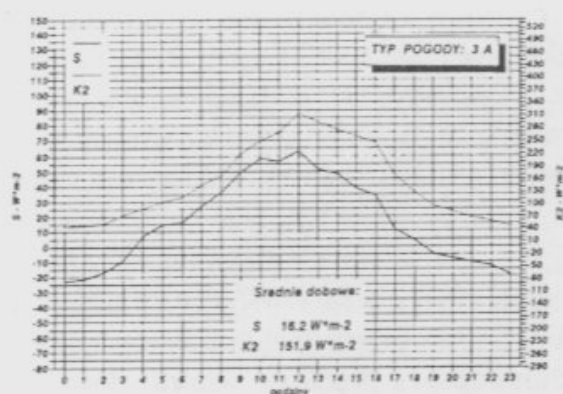
$$S \text{ TYP 3A} = 0.265 \cdot K_2 - 23.96$$

$$S \text{ TYP 3B} = 0.264 \cdot K_2 - 19.63$$

Współczynnik a [$a = f(K_2)$] wynoszący 0.26 jest modyfikowany wyłącznie przez zachmurzenie zarówno w dni z typem pogody 3A jak i dni z typem 3B. Współczynniki korelacji $r = 0.75$ (typ 3A) i $r = 0.71$ (typ 3B) świadczą o dużej zależności liniowej S od K_2 przy tym typie pogody. Promieniowanie pochłonięte ma umiarkowany wpływ na kształtowanie się strumienia S w gruncie w dni pochmurne, bez opadu i z małym usłonecznieniem.

SPITSBERGEN 1989
HORNSUND - FUGLEBEKKEN

STANOWISKO: A



Ryc. 4. Średni dobowy rozkład wielkości strumieni S i K_2 oraz związki między strumieniem promieniowania pochłoniętego (K_2) a strumieniem ciepła w gruncie (S) wewnętrznej części wieńca kamienistego

(okres wiosenno - letni; dni z typem pogody 3: dni pochmurne, bez opadu i z małym usłonecznieniem)

Fig. 4. Mean daily course of S and K_2 , and the relations between the short - wave net radiation (K_2) and the soil heat flux (S) in the inner part of the stone polygon

(spring and summer; type of weather 3: cloudy days, without precipitation, and short sunshine)

W dni z opadem, pochmurne i z małym usłonecznieniem (typ pogody 4) wilgotność gruntu wzrasta do dużej lub bardzo dużej. W ciągu doby grunt nagrzewa się bardzo powoli. Taką sytuację obserwuje się gdy wiatr jest słaby lub umiarkowany. Natomiast gdy w ciągu dnia wiatr jest silny - pozbawione roślinności wnętrza wieńca kamienistego traci ciepło (średnia dobową wielkość S ma wartość ujemną). O tym, czy grunt otrzyma więcej (lub straci więcej) ciepła w godzinach przed czy popołudniowych decyduje termin wystąpienia opadu i jego intensywność powodująca wzrost wilgotności gruntu (ryc.5). Na ryc. 5 przedstawiono związki między S a K_2 w dni z typem pogody 4; uwzględniono różną średnią dobową prędkość wiatru obrazując zależności między S a K_2 w dni z wiatrem bardzo słabym (typ pogody 4A), dni z wiatrem umiarkowanym (typ pogody 4B) i dni z wiatrem silnym (typ pogody 4C). Wzrost prędkości wiatru powoduje bardzo gwałtowny ubytek ciepła z wilgotnego gruntu, którego nie jest w stanie zrekompensować dopływ ciepła zwrotnego z atmosfery (tak jak obserwowano to w dniach z typem pogody 3). Wzrost prędkości wiatru powoduje osłabienie zależności S od K_2 i obniżenie wartości współczynnika a [$a = f(K_2)$]:

$$S \text{ TYP } 4A = 0.371 \cdot K_2 - 15.04$$

$$S \text{ TYP } 4B = 0.248 \cdot K_2 - 10.38$$

$$S \text{ TYP } 4C = 0.225 \cdot K_2 - 18.15$$

Współczynnik a w dni z typem pogody 4A ($a = 0.371$) jest modyfikowany przez zachmurzenie i opad atmosferyczny, w dni z typem 4B ($a = 0.248$) przez zachmurzenie, opad atmosferyczny i prędkość wiatru. W dni z typem pogody 4C prędkość wiatru wpływa w sposób decydujący na modyfikację wielkości współczynnika a ($a = 0.225$); prędkość wiatru ma większe znaczenie niż opad i zachmurzenie. Współczynniki korelacji $r = 0.93$ (typ 4A) i $r = 0.70$ (typ 4B) świadczą o bardzo dużej i dużej zależności liniowej S od K_2 w dni z opadem. Natomiast w dni z opadem i silnym wiatrem (typ 4C) istnieje mała zależność liniowa S od K_2 ($r = 0.59$). W dni z opadem, pochmurne, z bardzo małym usłonecznieniem i słabym wiatrem (typ 4A) promieniowanie pochłonięte (K_2) ma umiarkowanie silny wpływ na S . Gdy średnia dobową prędkość wiatru wzrasta (typ 4B) - wpływ K_2 na S zmniejsza się do umiarkowanego. W dni z silnym wiatrem (typ 4C) wpływ promieniowania pochłoniętego na strumień ciepła w gruncie jest słaby.

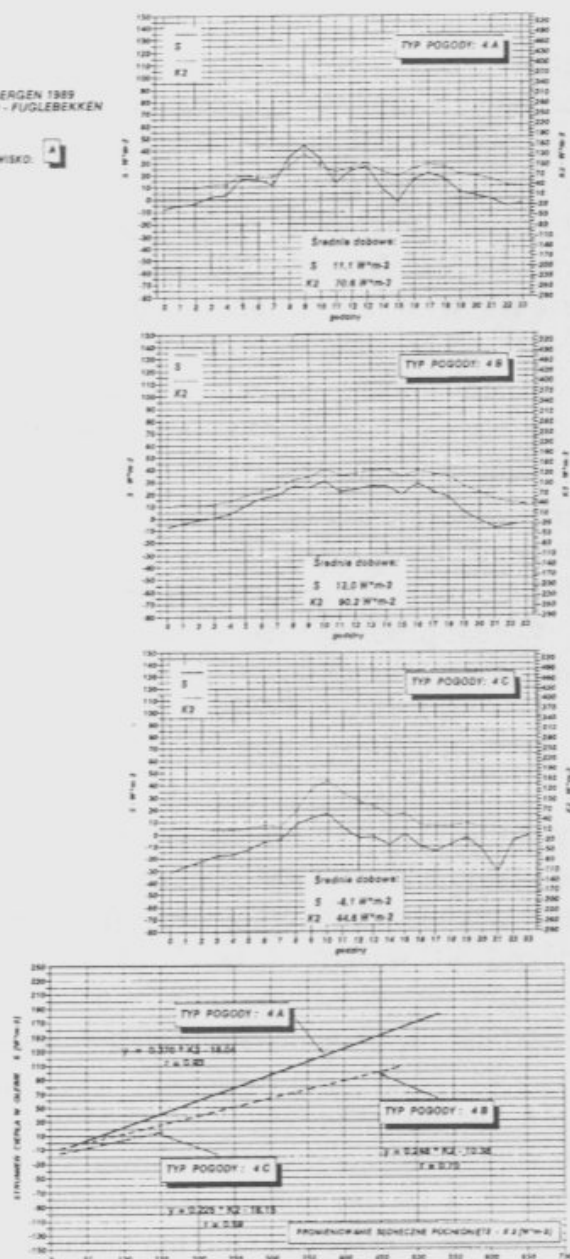
Podsumowanie

Decydujący wpływ na wielkość wymiany ciepła z gruntem mają w warunkach arktycznych gruntów poligonalnych budowanych z utworów pyłowo-gliniastych i całkowicie pozbawionych roślinności:

- promieniowanie pochłonięte,

SPITSBERGEN 1989
HORNSUND - FUGLEBEKKEN

STANOWISKO: A



Ryc. 5. Średni dobowy rozkład wielkości strumieni S i K₂ oraz związki między strumieniem promieniowania pochłoniętego (K₂) a strumieniem ciepła w gruncie (S) wewnętrznej części wieńca kamienistego

(okres wiosenno - letni; dni z typem pogody 4: dni z opadem, bez mgły, pochmurne, z bardzo małym usłonecznieniem)

Fig. 5. Mean daily course of S and K₂, and the relations between the short - wave net radiation (K₂) and the soil heat flux (S) in the inner part of the stone polygon

(spring and summer; type of weather 4: days with precipitation, without fog, cloudy, and very short sunshine)

- wilgotność gruntu, zależna w dużym stopniu od dobowej sumy opadów atmosferycznych,
- średnia dobowa prędkość wiatru w warstwie przy powierzchniowej.

Obserwuje się silną zależność kształtowania się strumienia ciepła w gruncie (S) od promieniowania pochłoniętego (K2) gdy grunt jest suchy, a dni są pogodne bez opadu i z dużym usłonecznieniem.

Zależność ta maleje wraz ze wzrostem zachmurzenia o ile grunt w dalszym ciągu jest umiarkowanie wilgotny. Zmniejszenie się ilości ciepła docierającego do gruntu wraz z promieniowaniem bezpośrednim zmniejsza rolę promieniowania pochłoniętego w kształtowaniu wielkości strumienia S (wzrasta rola promieniowania zwrotnego atmosfery).

W dni z intensywnym opadem - gdy grunt jest mokry, zależność S od K2 jest słaba. Gdy opad jest krótkotrwały i o małym natężeniu, powodującym niewielki wzrost wilgotności gruntu, zależność S od K2 jest umiarkowana (zbliżona do dni z typem pogody 3).

Wzrost średniej dobowej prędkości wiatru wpływa bardzo znacząco na kształtowanie się strumienia ciepła w gruncie w dni o typie pogody 1 i 4 - obserwuje się w te dni silne wychładzanie gruntu. W dni o typie pogody 3 wzrost średniej dobowej prędkości wiatru do umiarkowanej nie powoduje wychładzania gruntu.

Wraz ze wzrostem średniej prędkości wiatru maleje rola promieniowania pochłoniętego w kształtowaniu się strumienia ciepła w gruncie.

Literatura

1. **Angiel M.** (1993). Pomiar wpływu podłoża atmosfery na strukturę bilansu cieplnego powierzchni czynnej (sposób pomiaru i przetwarzania danych). W: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce, wybrane problemy. A.Kostrzewski (red.), Bibl. Monitor. Środ., Warszawa: 113 - 127.
2. **Angiel M.** (1994). Heat flux in selected polar soils in spring and summer (Hornsund, Spitsbergen). *Pol. Polar Res.*, 15: 61 - 77.
3. **Grzybowski J.** (1986). Mapa wymiany energii między atmosferą a podłożem jako podstawa analizy funkcjonowania środowiska geograficznego. *Przegl. Geogr.*, 58: 131 - 144.
4. **Grzybowski J., Itier B.** (1984). Związki między składnikami bilansu cieplnego powierzchni czynnej. *Przegl. Geofiz.*, 29: 27 -39.
5. **Jahn A.** (1970). Zagadnienia strefy peryglacjalnej. PWN, Warszawa: 202 pp.
6. **Skiba S.** (1991). The soil cover in NW Sorkapp Land, Spitsbergen, Svalbard. XVIII Sympozjum Polarne. Szczecin: 81 -83.

RELATIONS BETWEEN THE SOIL HEAT FLUX AND THE SHORT - WAVE NET RADIATION UNDER DIFFERENT WEATHER CONDITIONS IN ARCTIC TUNDRA (HORNSUND, SW SPITSBERGEN)

Summary

The research was carried out in the spring - summer season of 1989 (May 14 - August 15) at the site representing the stony tundra of elevated marine terrace in Hornsund fjord (SW Spitsbergen), (Fig.1). The albedometer and the heat flux sensor for the ground were installed within a stone polygon (gleyey cryogenic soil), (Fig.2). Heat flux in soil was measured and recorded automatically every 60 s. The relation between the heat flux intensity in the ground (S) and the short - wave net radiation (K_2) were analysed for different types of weather.

It was found that in the bare grounds built of clayey silt the largest influence on the intensity of heat fluxes have, except short - wave net radiation:

- soil moisture related to daily precipitation totals and
- mean daily wind velocity.

The intensity of the heat flux (S) depends on the short - wave radiation esp. on sunny days without precipitation and with long lasting sunshine and dry ground conditions (Fig.3). Along with the increase of cloudiness in case the ground is still moderately moist this dependence decreases (Fig.4). On days with large precipitation totals and moist ground this dependence is weak (Fig.5). On clear - sky days as well as the days with precipitation the increase of mean daily wind velocity influences the heat flux substantially (Fig. 3 and 5). Along with the increase of wind velocity the importance of K_2 in heat flux formation decreases.