

Stanisław Mularz, Alina Wróbel

**BADANIE ROZKŁADU TEMPERATURY POWIERZCHNI
TERENU Z WYKORZYSTANIEM ZOBRAZOWAŃ
TERMOWIZYJNYCH**

**INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
ON A TERRAIN SURFACE USING THERMOVISION IMAGING**

*Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
AGH University of Science and Technology,
Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering*

Streszczenie:

Głównym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie wymiernych, ilościowych danych o rozkładzie przestrzennym i zmianach temperatury powierzchni terenu w cyklu dobowym. Tego rodzaju dane są niezbędne do ustalenia metodyki wykonywania obserwacji termowizyjnych, m.in. dla potrzeb termalnego monitoringu środowiska. Pole testowe stanowił fragment (300 x 200 m) południowego zbocza o nachyleniu około 20 %, z wyraźną poprzeczną undulacją powierzchni i jednolitą pokrywą gleb lessowych. Strukturę użytków rolnych stanowiły pola o odkrytej powierzchni gleb, trwałe użytki zielone oraz pola w różnym stopniu pokryte roślinnością uprawową. Zgodnie z przyjętą metodyką obserwacje termowizyjne wykonywano w cyklu całodobowym rejestrując co godzinę termogramy obejmujące obszar pola testowego. Zestaw danych analitycznych stanowiły wyniki punktowego pomiaru temperatur na termogramach każdej serii obserwacyjnej. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że poziom oraz amplituda temperatury dobowej zależą wyraźnie od ukształtowania i cech strukturalnych powierzchni terenu oraz od rodzaju i stopnia pokrycia roślinnością. Zmienność temperatury gruntu w czasie zależy głównie od dynamiki procesów cieplnych, natomiast zróżnicowanie temperatury odkrytych gleb jest związane przede wszystkim z ukształtowaniem powierzchni terenu. Stwierdzono, że dla detekcji anomalii termicznych o różnej genezie termogramy należy wykonywać tuż przed wschodem słońca, natomiast najlepsze warunki rejestracji termograficznej dla interpretacji cech strukturalnych powierzchni terenu istnieją pomiędzy godziną 13 i 14, kiedy to temperatura powierzchni gruntu osiąga swoje maksimum. Przedstawiono również dwa przykłady zastosowania w praktyce opracowanej metodyki dla wykrywania anomalii towarzyszących naturalnym procesom geotermicznym

SŁOWA KLUCZOWE: temperatura radiacyjna, temperatura gruntu, termowizja, termogrametria.

„Najważniejsze jest niewidoczne dla oczu” A. Saint-Exupery

1. WPROWADZENIE

Pomiar lub wyznaczenie temperatury powierzchni gruntu jest zagadnieniem niezwykle złożonym. Temperatura powierzchni gruntu zależy bowiem od wielu czynników, takich jak: temperatura i przewodność cieplna podpowierzchniowych warstw, wilgotność, porowatość powierzchniowej warstwy gruntu, wartość współczynnika emisyjności, temperatura otoczenia (nasłonecznienie). Temperatura ta jest zmienna zarówno w czasie, jak też zmienny jest jej rozkład na powierzchni. Zmienność temperatury gruntu w czasie zależy głównie od dynamiki procesów cieplnych oddziałujących na powierzchnię, natomiast powierzchniowe zróżnicowanie temperatury gruntu niepokrytego roślinnością wynika przede wszystkim z nierówności jego powierzchni.

W tym kontekście, celowym wydaje się podjęcie badań z wykorzystaniem obserwacji termowizyjnych dla określenia, w cyklu dobowym, rozkładu i zmian temperatury powierzchni terenu o wyraźnym mezo- i mikroreliefie oraz różnym stopniu pokrycia roślinnością.

Oprócz walorów poznawczych tego rodzaju badania są niezbędne dla opracowania szczegółowej metodyki prowadzenia obserwacji termowizyjnych dla potrzeb termalnego monitoringu środowiska, w tym m.in. dla wykrywania anomalii termicznych o różnej genezie, które ujawniają się na powierzchni terenu. Źródłem tego rodzaju anomalii mogą być zarówno naturalne warunki i procesy endogeniczne (np. cechy fizyczne górotworu, zaburzenia tektoniczne, wysadowe struktury solne, zjawiska wulkaniczne, warunki hydrogeologiczne w tym zwłaszcza cyrkulacja wód geotermalnych itp.) jak również podpowierzchniowe obiekty i procesy związane z inżynierską działalnością człowieka (np. techniczna infrastruktura podziemna, w tym zwłaszcza awarie ciągów ciepłowniczych i sieci wodno-kanalizacyjnej, pożary w podziemnych wyrobiskach górniczych itp.).

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było uzyskanie wymiernych, ilościowych danych o rozkładzie przestrzennym i zmianach temperatury powierzchni terenu w cyklu dobowym oraz stwierdzenie w jakim stopniu takie czynniki jak morfologia powierzchni terenu (mezorelief) i obecność roślinności uprawowej wpływają na poziom i amplitudę mierzonej temperatury.

Zakres wykonanych prac badawczych obejmował:

- wykonanie serii terenowych obserwacji termowizyjnych pola testowego w cyklu dobowym,
- wykonanie szczegółowej inwentaryzacji stanu użytkowania i pokrycia w obrębie pola testowego,
- opracowanie termogramów i interpretację wyników,
- weryfikację założeń metodyki obserwacji termowizyjnych w praktyce.

3. CHARAKTERYSTYKA POLA TESTOWEGO

Pole testowe ma kształt zbliżony do prostokąta o wymiarach około 300 x 200 metrów i zlokalizowane jest w pagórkowatym terenie, na południowym zboczu o nachyleniu dochodzącym do 20%. W obserwowanym obszarze nachylenie to jest zróżnicowane. Teren ten w większości stanowią użytki rolne o dosyć drobnej szachownicy pól uprawnych i kilku działkach zabudowanych (zabudowa siedliskowa i jednorodzinna). W czasie wielu dni poprzedzających pomiar nie występowały opady deszczu i powierzchnia gleb odkrytych była przesuszona.

W obszarze pól uprawnych znajdują się:

- gleby odkryte: o strukturze „rzędowej”, gładkiej – ubitej, i zabronowanej
- gleby pokryte całkowicie roślinnością: zboże, trawa, koniczyna, nieużytki
- gleby częściowo pokryte roślinnością: bób w rzędach, truskawki w rzędach, ćwikła
- drogi gruntowe, miedze trawiaste, krzewy i drzewa śródpolne

Charakter użytkowania i pokrycia terenu w obrębie pola testowego przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Widok pola testowego
Fig. 1. View over the test area

4. METODYKA BADAŃ

Obserwacje termograficzne wykonano kamerą AGEMA 590 PAL, z obiektywem o kącie widzenia 12° , bez filtrów. Odległość obrazowania wynosiła około 600 metrów. Z tej odległości zobrazowania terenowa wielkość piksela wynosi około $0.5 \times 0.5/\sin \alpha$ [mxm], (α to kąt nachylenia terenu), a więc zróżnicowanie temperatury spowodowane mikroreliefem nie jest tu już obserwowane. Stanowisko kamery znajdowało się około 5 metrów ponad powierzchnią terenu, na przeciwległym zboczu w stosunku do pola testowego. Generalny kierunek obserwacji termograficznych to: południe - północ.

Obserwacje termograficzne wykonano w cyklu całodobowym, rejestrując co godzinę termogramy obejmujące obszar pola testowego. W czasie od godz. 20³⁰ dnia 29.05.2003 do godz. 20²⁰ dnia 30.05.2003 zarejestrowano 23 serie pomiarowe. Równocześnie z rejestracją termogramów mierzono temperaturę powietrza w cieniu na wysokości około 1.60 m nad powierzchnią terenu w pobliżu stanowiska kamery. Z uwagi na wielkość powierzchni pola testowego niemożliwy był pomiar temperatury powietrza nad polem testowym. Cały obszar pola testowego w każdej serii przedstawiony jest na trzech termogramach. Na rysunkach 2 i 3 przedstawione są przykładowe termogramy pola testowego.

Podczas rejestracji termogramów pogoda była słoneczna w dzień, w nocy niebo bezchmurne, bardzo słaby wiatr (czasem lekkie podmuchy). Temperatura powietrza w cieniu wynosiła od 11°C w nocy do 27°C w dzień.

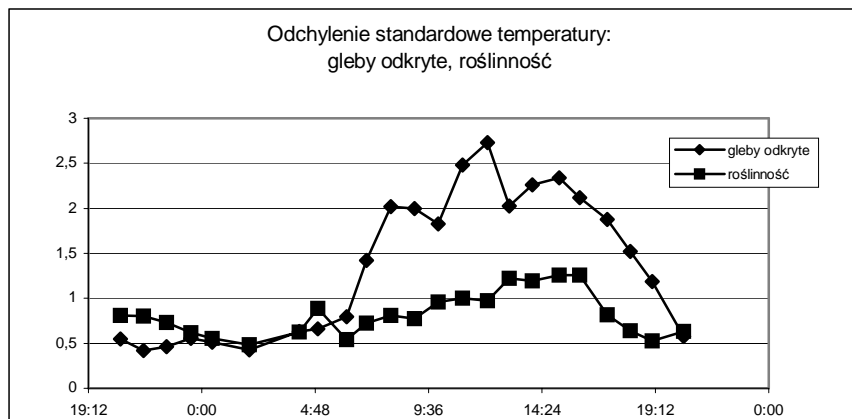
5. OPRACOWANIE I INTERPRETACJA WYNIKÓW

Termogramy zarejestrowane w sposób numeryczny analizowano przy użyciu programu Thermacam. Obliczono temperatury uwzględniając korekcje:

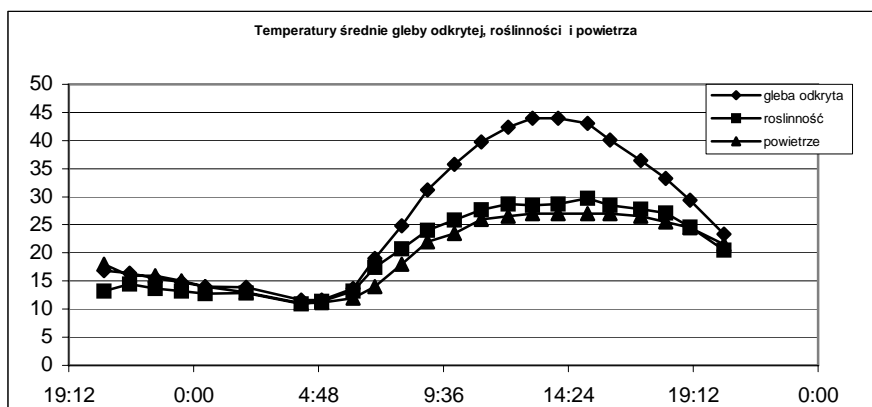
- tłumienia promieniowania w atmosferze, zależną od odległości obrazowania
- rzeczywistego współczynnika emisyjności (współczynnik emisyjności określony metodą spektrometryczną wynosi 0.95 zarówno dla gleb, jak i pokrywy roślinnej)
- wpływu promieniowania otoczenia (jako temperaturę otoczenia przyjęto temperaturę powietrza mając świadomość uproszczenia, ale ponieważ otoczenie jest tu jednakowe dla całego obszaru testu, to jego wpływ nie obarcza zróżnicowania poszczególnych fragmentów pola testowego).

Temperatury na termogramach mierzono w sposób punktowy, sytuując na każdym użytku rolnym od jednego do kilku punktów pomiarowych. Przy wyborze liczby punktów pomiarowych kierowano się zasadą „im bardziej zróżnicowana temperatura w obszarze pojedynczego użytku, tym więcej punktów pomiarowych”. W każdej serii termogramów pomierzono temperatury w 47 punktach, korzystając z programowej funkcji odczytu temperatury we wskazanym punkcie. Rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury przedstawione jest na Rys. 4. W poszczególnych seriach termogramów położenie punktów pomiarowych odtwarzano metodą szacunkową. Aby ocenić niedokładność pomiaru wynikającą z nieidentycznego wyboru położenia punktu

pomiary wykonano niezależny dwukrotny pomiar w 13 punktach dla wszystkich 23 serii uzyskując 299 różnic pomiaru temperatury. Średni błąd pojedynczego pomiaru temperatury obliczony na podstawie tych różnic wynosi 0.30°C .



Rys. 6. Wykres zmian odchylenia standardowego poziomu temperatury w cyklu dobowym
Fig. 6. Diagram of standard deviation of the temperature level in a day and night cycle



Rys. 7. Wykres dobowych zmian średnich temperatur
Fig. 7. Diagram of mean temperature values during a day and night

Wyznaczone z termogramów wartości temperatury różnych użytków w cyklu całodobowym stanowiły materiał wyjściowy do analizy zależności występujących pomiędzy nimi. Graficzną syntezę wyników pomiaru i analiz stanowią Rys. 5, 6, 7 i 8, które ilustrują w postaci zależności funkcyjnej, zmiany badanych parametrów w czasie. Jak wynika z Rys. 5 wartości temperatury powierzchni wyraźnie różnicują się w czasie dnia osiągając maksimum około godz. 13:00. Miarą tego zróżnicowania może być odchylenie standardowe temperatury obliczone dla wszystkich punktów pomiarowych pola testowego. Minimalne zróżnicowanie temperatur powierzchni ma miejsce w godz. 24:00 – 6:00.

Następnie, spośród obserwowanych w obrębie pola testowego użytków wyodrębniono:

- gleby odkryte – reprezentowane przez 20 punktów pomiarowych
- gleby całkowicie pokryte roślinnością - reprezentowane przez 16 punktów pomiarowych.

Dla tak wyodrębnionych grup obliczono następnie: temperatury średnie oraz odchylenie standardowe temperatury.

Dobowa zmienność odchylenia standardowego dla obu powyższych grup użytków pokazana jest na Rys. 6, z którego wynika że gleby odkryte charakteryzuje większa zmienność temperatury w dzień niż w nocy, podczas gdy obraz termalny pól pokrytych całkowicie roślinnością jest bardziej wyrównany i wykazuje zdecydowanie mniejsze fluktuacje poziomu temperatury zarówno w dzień jak i w nocy.

Dobowy przebieg temperatury średniej dla pokrywy roślinnej, gleb odkrytych i powietrza ilustruje Rys.7. Z analizy diagramu wynika, że:

- temperatura gleb odkrytych jest wyższa od temperatury pokrywy roślinnej; w nocy nieznacznie, a w ciągu dnia do kilkunastu stopni;
- w późnych godzinach wieczornych temperatura gleb odkrytych wyrównuje się z temperaturą powietrza;
- temperatura pokrywy roślinnej późnym wieczorem jest nieznacznie niższa od temperatury powietrza, a w ciągu dnia wyższa od niej o kilka stopni (podobnie jak w doświadczeniu opisanym w [1]);
- najbardziej wyrównane temperatury: gleb odkrytych, pokrywy roślinnej i powietrza są w czasie około wschodu słońca

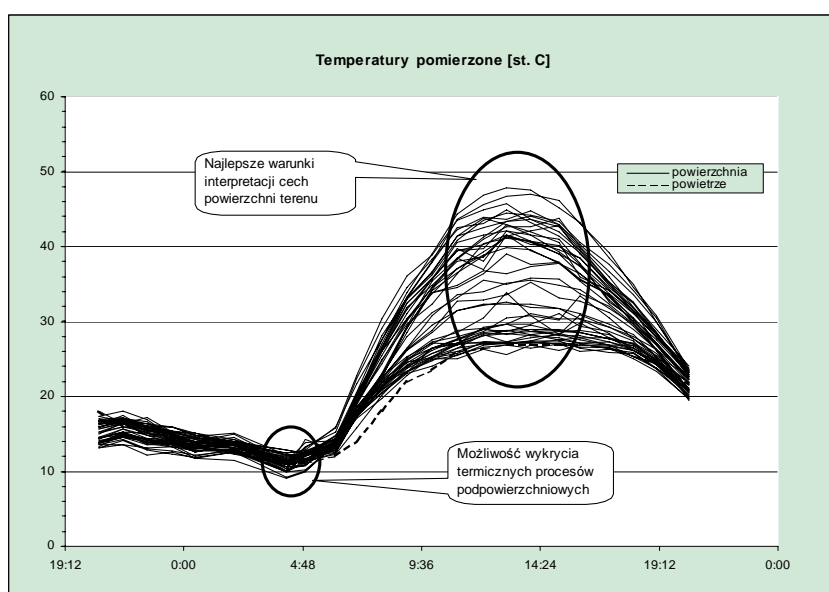
Dobowy przebieg temperatury gleb częściowo pokrytych roślinnością zawiera się pomiędzy temperaturą pokrywy roślinnej i gleb odkrytych.

Na uwagę zasługuje dobowy rozkład temperatury świeżo skoszonej roślinności. W godzinach wieczornych jej temperatura jest zbliżona do temperatury gleby odkrytej, a w ciągu dnia przewyższa ją nawet o kilka stopni. Świadczy to o braku dostępu wody dla roślin [2].

Dla gleb odkrytych obserwuje się zależność rozkładu temperatury od ukształtowania terenu.

W oparciu o uzyskane wyniki badań opracowano szczegółowe wytyczne do metodyki prowadzenia obserwacji termowizyjnych dla potrzeb szeroko pojętego monitoringu środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem termalnego odwzorowania powierzchni podłoża gruntowego, w tym głównie pokrywy gleb: nagich oraz w różnym stopniu pokrytych roślinnością uprawową. Z przeprowadzonego eksperymentu wynika,

że zmienność temperatury gruntu w czasie, zależy głównie od dynamiki procesów cieplnych, natomiast zróżnicowanie temperatury odkrytych gleb jest związane przede wszystkim z ukształtowaniem powierzchni terenu. Stwierdzono, że dla detekcji anomalii termicznych o różnej genezie termogramy należy wykonywać tuż przed wschodem słońca, natomiast najlepsze warunki rejestracji termograficznej dla interpretacji cech strukturalnych powierzchni terenu istnieją pomiędzy godziną 13 i 14, kiedy to temperatura podłoża gruntowego osiąga swoje maksimum. Fakt ten dokumentuje Rys. 8. Poprawność powyższych założeń metodycznych potwierdzają również przykładowe aplikacje praktyczne. Badania termowizyjne pozwoliły, między innymi na geometryzację wieloletniej zmarzliny, w formie wyspowej w Koziej Dolinie w Tatrach [3], a także na detekcję anomalii termicznych związanych z wysadowymi strukturami solnymi w rejonie Inowrocławia [10].



Rys. 8. Graficzna interpretacja wyników eksperymentu
 Fig. 8. Graphical interpretation scheme of the experimental data set.

KONKLUZJA: Rezultaty przeprowadzonych badań pozwalają na opracowanie uogólnionej metodyki obserwacji termowizyjnych prowadzonych dla potrzeb szeroko pojętego monitoringu środowiska, w tym zwłaszcza dla wykrywania anomalii termicznych o różnej genezie. W toku eksperymentu stwierdzono, że rozkład przestrzenny temperatury powierzchni terenu, zmiany w czasie oraz wielkość jej amplitudy dobowej determinują głównie takie czynniki jak: ukształtowanie powierzchni (mikro- i mezorelief), jej struktura oraz charakter i stopień pokrycia roślinnością, zwłaszcza uprawową.

PISMIENNICTWO

- [1] Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T. „Weryfikacja modeli wyliczania ewapotranspiracji w badaniach lizymetrycznych z zastosowaniem pomiaru temperatury radiacyjnej.” Materiały III Ogólnopolskiej Konferencji Termografii i Termometrii w Podczzerwieni”, , str. 219-224, Warszawa 1996.
- [2] Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T., Sobczuk H., „Zastosowanie pomiaru temperatury radiacyjnej do oceny stresu wodnego roślinności łąkowej. Doświadczenie wazonowe.” Materiały III Ogólnopolskiej Konferencji Termografii i Termometrii w Podczzerwieni”, , str. 225-229, Warszawa 1996
- [3] Kędzia St., Mościcki J., Wróbel Al.: Studies on the occurrence of permafrost in Kozia Valley (The Hight Tatra Mts.). IV Conference of Polish Geomorphologists: Relief, Quaternary palaeogeography and changes of the polar environment, str. 51-57, Lublin 1998.
- [4] Mularz S., Ciołkosz A.: Badania powierzchniowych zmian termiki gruntu rejonu złoża siarki w Grzybowie metodą termowizyjną. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, Tom XXIV z.1/55, 1977.
- [5] Mularz S.,A. Tokarczyk, R. Tokarczyk: Termowizyjne badania skarp kopalni odkrywkowej węgla brunatnego. Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja Nr 84, 1984.
- [6] Mularz S.: Termowizyjne obserwacje skarp w kopalni odkrywkowej. Fotointerpretacja w Geografii, Tom III z. 18, 1985.
- [7] Mularz S.: - Badania termowizyjne gruntów zwałowych. Ochrona Terenów Górniczych Nr 80/2, str. 36-44, 1987.
- [8] Mularz S.: Thermal monitoring of a slope for geotechnical purposes. 6-tf Conf. on thermogrammetry and thermal engineering. Abstracts, t.1. Budapest 1989.
- [9] Hejmanowska B., S Mularz, R. Sroka, M. Stencel, – Pomiary temperatury kinetycznej powierzchni gruntu przy użyciu cyfrowego termometru matrycowego. Mat. XXVII Międzuczelnianej Konferencji Metrologów MKM `96, Tom 1, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, str. 204 – 209, 1996.
- [10] Mularz S., Wróbel Al.: Badania termowizyjne i powierzchniowe pomiary spektrometryczne. Praca zbiorowa: Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych, str.49-60, Kraków 2003

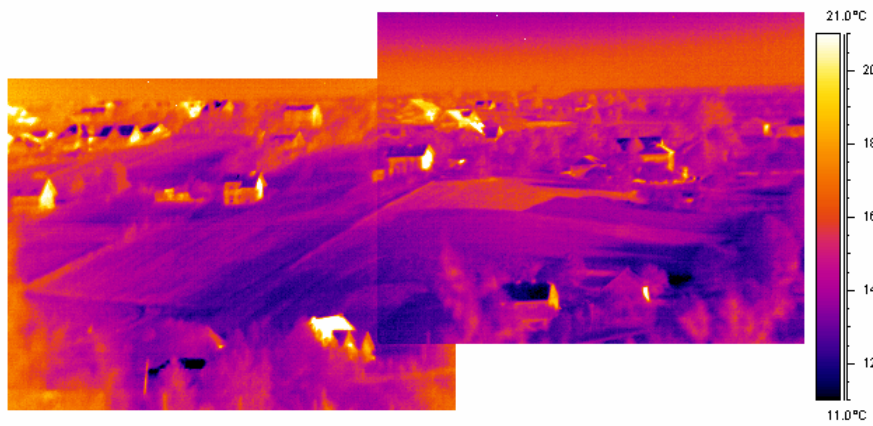
INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON A TERRAIN SURFACE USING THERMOVISION IMAGING

KEY WORDS: radiation temperature, ground temperature, thermovision, thermogrammetry

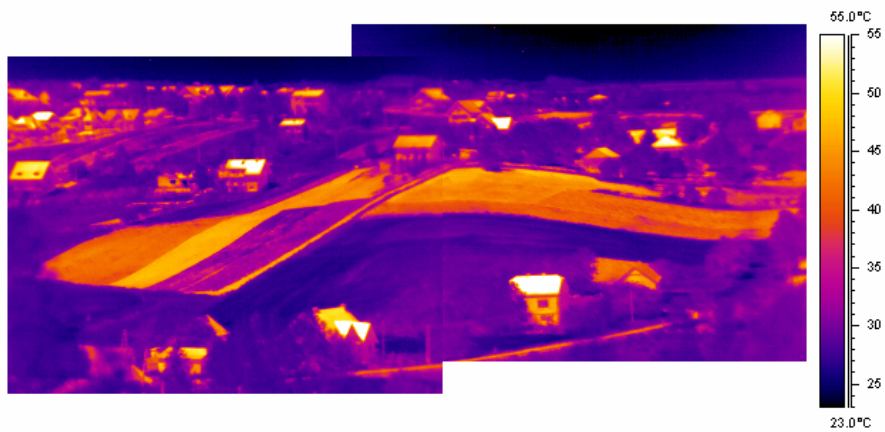
S u m m a r y

The main goal of the study presented was to obtain the measurable, quantitative data related to spatial temperature distribution and temperature changes on a real terrain surface during a day and night. This kind of data have been essential for methodology principles definition of the thermovision registrations for environmental monitoring purposes. As a study area a part (300 x 200 m) of south-facing slope (about 20 %) characterized by clear cross-undulated form of barren

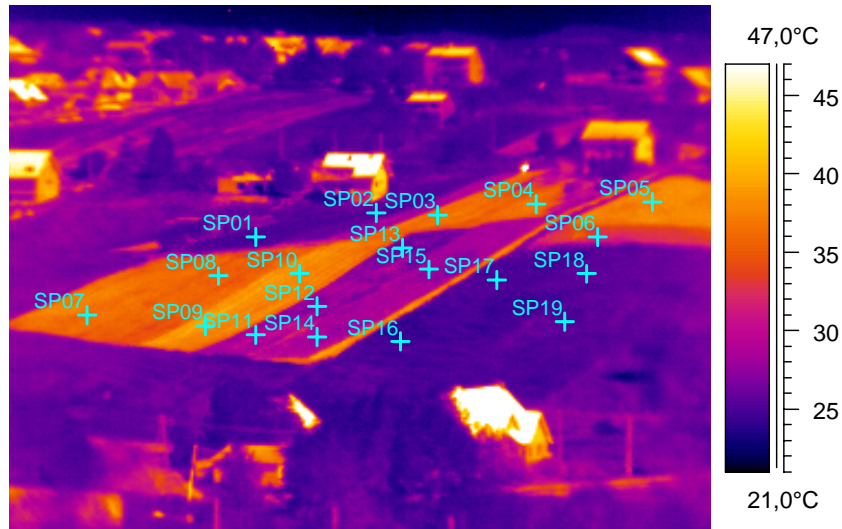
soil surface mixed with different type of vegetation cover was selected. According to methodology being used a thermal imaging have been taken at every hour during a day and night time. Analytical data set was created by point temperature measurements on all thermograms. Analysis of the investigation results indicated that diurnal temperature amplitude and temperature level are strongly depended on texture of the terrain surface and also on type and density of vegetation cover. It has been also stated that the ground temperature changes in time are mainly depended on the dynamics of thermic process, while the temperature differences of the bare soils are connected with mezo-relief of the test area. In order to detect the thermal anomalies different in origin, the thermograms should be done just before sunrise, while the thermograms taken between 2 and 3 o'clock p.m. have been provided an unique information for structural features interpretation of the terrain surface, when the peak of ground temperature is observed. In addition, two examples of application this methodology for the thermal anomalies detection connected with natural phenomena are presented.



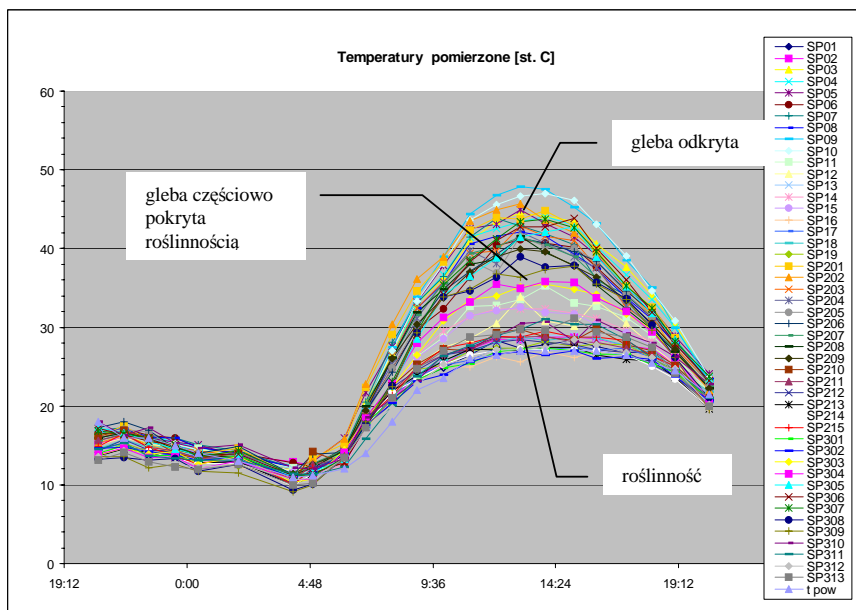
Rys. 2. Termogram pola testowego (rejestracja o godz. 6)
Fig. 2. Thermogram over the test area (registration at six o'clock a. m.)



Rys. 3. Termogram pola testowego (rejestracja o godz. 14)
Fig. 3. Thermogram over the test area (registration at two o'clock p. m.)



Rys. 4. Rozmieszczenie sieci punktów pomiarowych
 Fig. 4. Configuration of the measurement points set



Rys. 5. Wykres dobowych zmian temperatury w obrębie pola testowego
 Fig. 5. Diagram of temperature changes on the test area during a day and night time