

WYKRYWANIE ZAKOPANYCH MIN METODĄ AKTYWNEJ TERMOGRAFII W PODCZERWIENI W NIEKORZYSTNYCH WARUNKACH ATMOSFERYCZNYCH

Streszczenie: Zakopane w ziemi obiekty typu biernego, takie jak miny lądowe, mogą ujawnić swoją obecność na jej powierzchni widzianej jako obraz termiczny tylko w wyniku pobudzenia cieplnego, którego naturalnym źródłem jest promieniowanie słoneczne. W tym przypadku odpowiednia – wystarczająco duża – różnica temperatury między tłem i miejscem zakopania przedmiotów pojawia się w optymalnym czasie obserwacji, który uzależniony jest od głębokości zakopania obiektu. Warunki meteorologiczne mają duży wpływ na temperaturę powierzchni gruntu, ale ich modelowanie jest trudne. Źródło promieniowania mikrofalowego zostało użyte do zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia zakopanych obiektów za pomocą termografii w podczerwieni. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań polowych metodą aktywnej termografii w podczerwieni, prowadzonych w niekorzystnych warunkach atmosferycznych.

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, mikrofałe, zakopane miny

DETECTION OF BURIED MINES BY ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY METHOD UNDER DISADVANTAGEOUS WEATHER CONDITIONS

Abstract: Underground objects of a passive type such as land mines can manifest their presence on the surface of the ground detected as infrared thermal image only as a result of thermal stimulation that usually occurs as natural solar radiation. In this case an appropriate temperature differences – sufficiently high ones-between the backgrounds and the sites of the buried objects appear for the optimum observation time being dependent on objects depths. The ground surface temperature is strongly affected by meteorological conditions and their correct modelling is difficult. A microwave source was used to increase the detection probability of buried objects by using the IR thermography method. In this paper the results of outdoor experiments carried out under disadvantageous weather conditions, utilizing active infrared thermography for detection of buried objects like mines, are presented.

Keywords: infrared thermography, microwave, buried mines

1. Wstęp

Zagadnienie wykrywania min (obiektów), usytuowanych pod powierzchnią ziemi, można traktować jako szczególny przypadek wykrywania niejednorodności podpowierzchniowych materiału. Jedną z metod wykorzystywanych w nieniszczących badaniach struktur podpowierzchniowych jest termografia w podczerwieni. Badania termograficzne mogą być

realizowane metodą pasywną, gdy dla wykonania badania nie jest wymagane specjalne wymuszenie cieplne, lub metodą aktywną, gdy wykonanie badania warunkowane jest zapewnieniem zewnętrznego wymuszenia cieplnego skutkującego zmianami w rozkładzie pola temperatury, a zatem określonym przepływem ciepła. Badane są przejściowe procesy cieplne. Przy zastosowaniu tych metod do wykrywania min pod powierzchnią gruntu, metoda pasywna jest użyta kiedy wykorzystuje się naturalne ogrzewanie ziemi przez promieniowanie słoneczne. Aby zwiększyć temperaturę poszukiwanego obiektu ukrytego pod warstwą ziemi, tak aby na powierzchni ukazał się tzw. „śląd” cieplny tego obiektu, należy powierzchnię ziemi nagrzewać stosunkowo długo energią słoneczną. Taki powolny proces nagrzewania związany jest z cieplnym przewodnictwem ziemi, którego wartość jest dość niska. W dodatku skuteczność takiego ogrzewania jest ograniczona przez sezonowe i dobowe warunki pogodowe.

Wymiana ciepła między powierzchnią gruntu, a atmosferą odbywa się na drodze:

- Promieniowania krótkofalowego Słońca, pochłanianego przez atmosferę i powierzchnię gruntu;
- Przewodnictwa cieplnego pomiędzy powierzchnią gruntu, a podłożem;
- Przenoszenia ciepła pomiędzy powierzchnią gruntu, a atmosferą, lub między powierzchnią lądową i wodną dzięki ruchom turbulencyjnym powietrza.

Temperatura na powierzchni ziemi zależy głównie od wilgotności ziemi, zdolności absorpcji promieniowania cieplnego przez powierzchnię ziemi, przewodnictwa cieplnego ziemi, jej pokrycia przez szatę roślinną, śniegiem leżącym na powierzchni ziemi i stopnia zachmurzenia.

Z punktu widzenia pasywnej metody niekorzystne warunki atmosferyczne do wykrywania zakopanych min mogą występować w przypadku małych dobowych różnic temperatury powietrza między nocą a dniem, dużego zachmurzenia i opadów (śniegu lub deszczu). W klimacie umiarkowanym w jakim znajduje się Polska takie warunki często występują między październikiem a marcem, czyli w okresie jesienno-zimowym i częściowo na wiosnę. Najbardziej korzystne warunki do wykrywania obiektów znajdujących się pod ziemią metodą pasywnej termografii w podczerwieni występują w Polsce latem.

Alternatywnym rozwiązaniem w przypadku występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych może być zastosowanie metody aktywnej termografii w podczerwieni. Jako źródło dodatkowego ogrzewania powierzchni gruntu, pod którym może znajdować się zakopana mina można zastosować źródło promieniowania mikrofalowego.

2. Symulacyjne badania wpływu niekorzystnych warunków środowiskowych na skuteczność wykrywania min

W pracy [1] podano, że wartość stosunku procentowego sumy ciepła wnikającego do gleby i sumy całkowitego promieniowania słonecznego średnio wynosi 17,7%, zaś w większości przypadków mieści się w przedziale od 15 do 20%. W innych pracach dotyczących tego zagadnienia są podawane mniejsze wartości. W pracy [2] z pomiarów przeprowadzonych na glebie bez roślin wartość ta wynosi od 4,8 do 12,6%, zaś w pracy [3] wartość tego stosunku wynosi od 9,7 do 12,7%. Na podstawie powyższych prac można stwierdzić, że ilość ciepła wnikającego podczas całego dnia do odkrytej gleby stanowi mniej niż 20% sumy dobowej całkowitego promieniowania słonecznego. W przypadku występowania szaty roślinnej dopływ promieniowania słonecznego do gleby jest nie tylko ograniczony. Dodatkowo szata roślinna powoduje powstanie zmiennych w czasie i przestrzeni warunków wymiany ciepła.

W Polsce, w miesiącach letnich przy bezchmurnym niebie, w godzinach koło południa astronomicznego maksymalna gęstość strumienia promieniowania słonecznego może wynosić około 900 W/m^2 , zaś średnią powierzchniową gęstość dzienną energii słonecznej docierającą do powierzchni gruntu można przyjąć na poziomie 500 W/m^2 . Zimą dzienna średnia gęstość strumienia promieniowania słonecznego (przy bezchmurnym niebie) wynosi około 100 W/m^2 . Biorąc pod uwagę, że ilość ciepła, które wnika do gruntu jest poniżej 20%, gęstość strumienia ciepła wnikałego w głąb gruntu jest mniejsza niż 20 W/m^2 . Przy zachmurzonym niebie wartość ta jest oczywiście o wiele niższa.

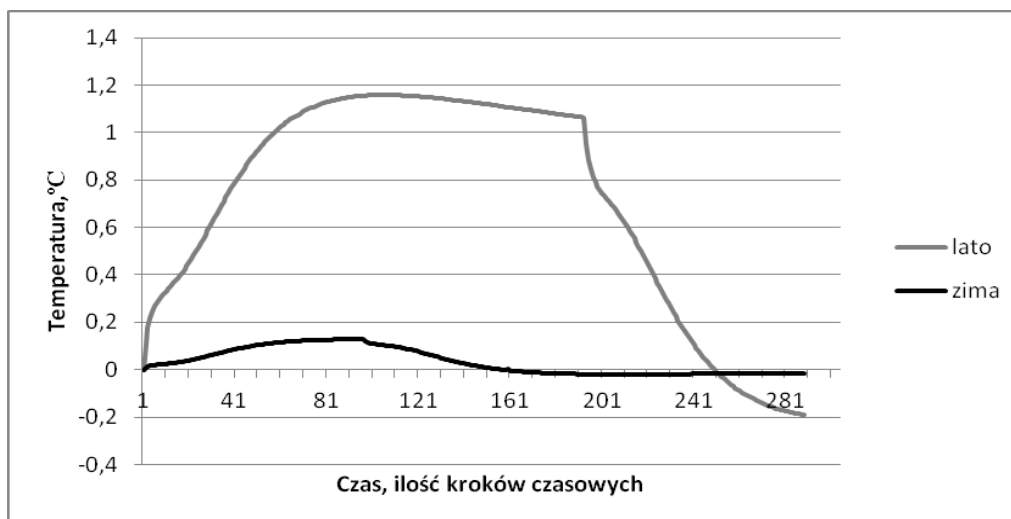
Najbardziej niekorzystne warunki w ciągu roku w Polsce dla pasywnego wykrywania w podczerwieni obiektów ukrytych pod ziemią trwają od listopada do marca. Średnia temperatura w tych miesiącach spada poniżej $+5^\circ\text{C}$, zaś w najzimniejszym miesiącu, tj. styczniu, temperatura spada poniżej -5°C . W tym okresie występuje również najwięcej w ciągu roku dni pochmurnych.

W celu przedstawienia wpływu na wykrywalność poszukiwanego obiektu zakopanego w ziemi, warunków atmosferycznych oraz parametrów cieplnych ośrodka, w którym znajduje się poszukiwany obiekt, przeprowadzono szereg symulacji numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania ThermoCalc– MineTM. Wybrane wyniki tych symulacji przedstawione są na wykresach rys.1-4. Parametry cieplne obiektu oraz piasku, w którym zakopany był poszukiwany obiekt przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Parametry termofizyczne materiałów poszukiwanych obiektów oraz gleby otaczającej te obiekty

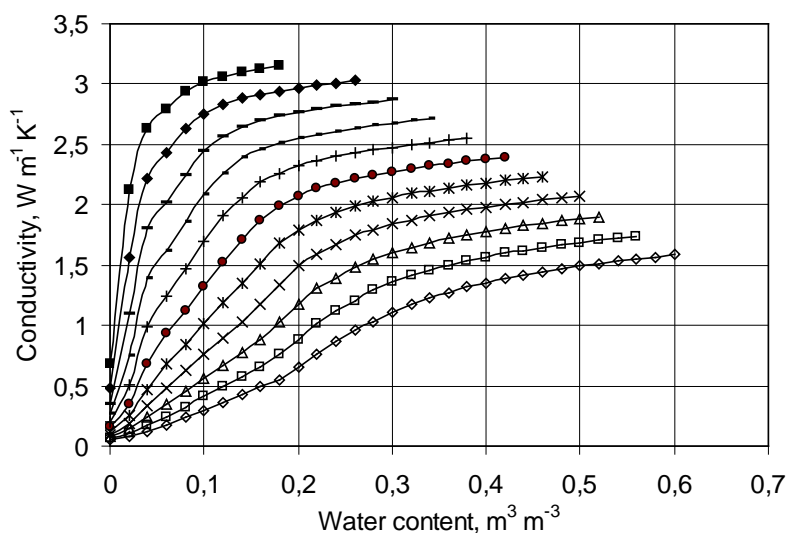
Material	Przewodność cieplna [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Ciepło właściwe [$\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
drewno	0,20	440	790
TNT	0,23	1703	1500
piasek, zawartość wody $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$	2,057	2840	1400
piasek, zawartość wody $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$	1,144	2429	1000
piasek, zawartość wody $0,0 \text{ m}^3/\text{m}^3$	0,157	1170	1400

Na wykresach rys. 1 przedstawiono porównanie możliwości wykrycia drewnianej miny zakopanej w suchym piasku o gęstości 1400 kg/m^3 latem i zimą. W symulacji przyjęto, że w trakcie bezchmurnej pogody czas nagrzewania promieniowaniem słonecznym w okresie letnim wynosi 16 godzin, a w okresie zimowym 8 godzin. Średnią gęstość dzienną promieniowania słonecznego przyjęto dla okresu letniego 500 W/m^2 , a dla zimowego 100 W/m^2 , uwzględniając jaka ilość ciepła wnika do gruntu. Jak widać na przedstawionych wykresach różnice w możliwości wykrycia drewnianej miny latem i zimą są istotne. Biorąc pod uwagę, że poziom szumów wynosi około $0,1^\circ\text{C}$, wartość temperatury nad miną zimą jest na granicy wykrywalności.



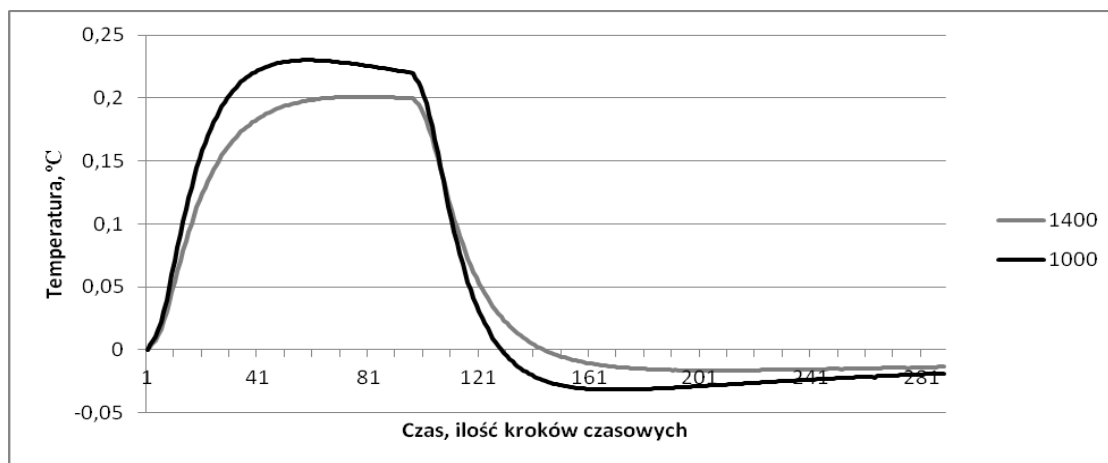
Rys. 1. Porównanie zmian temperatury na powierzchni piasku nad miną latem i zimą (krok czasowy – 300 s)

Z prac [4, 5] wiadomo, że istotny wpływ na wykrywalność może mieć stopień zagęszczenia oraz wilgotność gruntu, w którym znajduje się zakopany obiekt. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane eksperymentalnie, w postaci krzywych opisujących zmiany przewodności cieplnej gleby (piasku) w zależności od zawartości w niej wody oraz gęstości. Wraz ze wzrostem gęstości gleby wzrasta dynamika wzrostu przewodności cieplnej i jej wielkość.



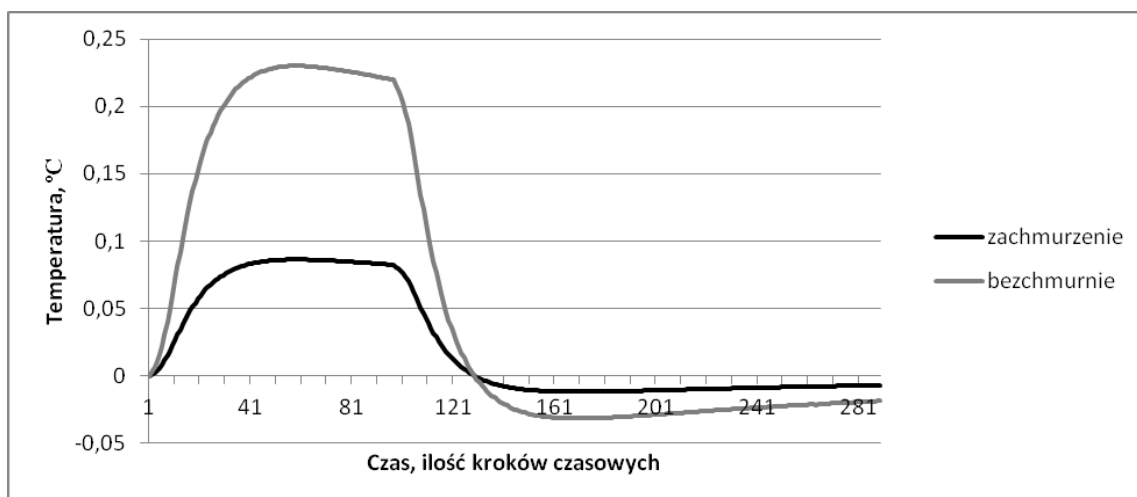
Rys.2. Przewodność cieplna próbki piasku przy różnych jego gęstościach i zawartości wody

Na rys.3, poniżej przedstawiono porównanie możliwości wykrycia miny w warunkach zimowych przy bezchmurnym niebie, zakopanej na głębokości 5 cm pod powierzchnią piasku o tej samej wilgotności ($0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$), ale różnym stopniu zagęszczenia ($1400 \text{ kg}/\text{m}^3$ i $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$). Z przedstawionej symulacji wynika, że lepsze warunki wykrycia występują przy mniejszej gęstości piasku.



Rys. 3. Porównanie zmian temperatury na powierzchni piasku nad drewnianą miną przy różnym stopniu jego zagęszczenia (gęstości wyrażonej w kg/m^3) (krok czasowy – 300 s)

Na rys.4 pokazano porównanie możliwości wykrycia miny drewnianej zakopanej w piasku o tej samej gęstości i wilgotności, ale przy różnym zachmurzeniu nieba. Jak widać na wykresie w trakcie zachmurzonego całkowicie nieba wykrycie miny jest praktycznie niemożliwe (zmiany temperatury na poziomie szumów).



Rys. 4. Porównanie zmian temperatury na powierzchni piasku nad drewnianą miną przy różnym stopniu zachmurzenia nieba w warunkach zimowych (krok czasowy – 300 s)

Jak wynika z przedstawionych powyżej symulacji wykrycie poszukiwanego obiektu z wykorzystaniem pasywnej metody termografii w podczerwieni w warunkach zimowych w zdecydowanej większości przypadków będzie niemożliwe. Tylko zastosowanie metody aktywnej termografii w podczerwieni może zwiększyć prawdopodobieństwo wykrycia poszukiwanych obiektów.

3. Wyniki badań eksperymentalnych

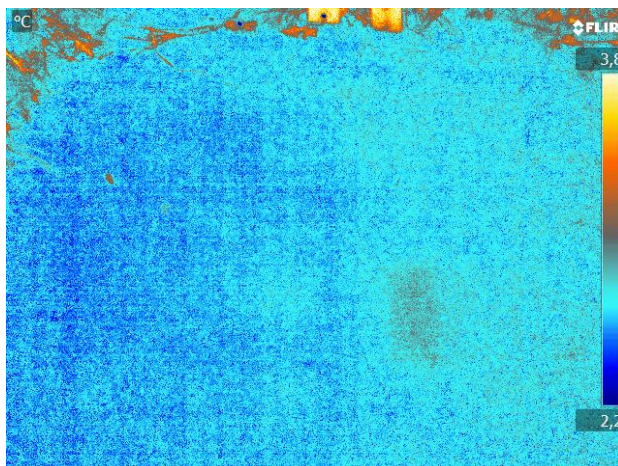
Na rys.5 pokazano rozmieszczenie na polowym polu pomiarowym miny drewnianej i metalowej puszkki przed ich zakopaniem. Przedstawione poniżej przykładowe wyniki badań przeprowadzone były 4 stycznia 2013 r. między godzinami 12:00 ÷ 13:00, przy następujących warunkach atmosferycznych: temperatura powietrza - $+3,5 \div +4,0^\circ\text{C}$, wilgotność powietrza - $75 \div 80\%$, brak opadów, ciśnienie atmosferyczne - 1017 hPa, prędkość wiatru - około 6 m/s z kierunku północno-zachodniego, zachmurzenie całkowite.



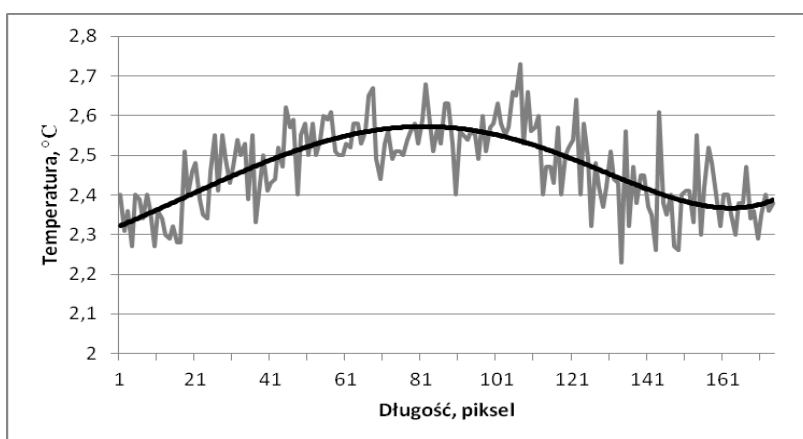
Rys. 5. Mina drewniana i metalowa puszka przed zakopaniem na zewnętrznym polu pomiarowym

W nocy poprzedzającej badania występowały następujące warunki atmosferyczne: temperatura powietrza – 0,0°C, wilgotność powietrza - 85 – 95%, opady deszczu około 0,5 mm/h przez 5 godzin, ciśnienie atmosferyczne - 1012 hPa, prędkość wiatru - 7÷8 m/s z kierunku zachodniego, zachmurzenie całkowite. Obiekty badań zostały zakopane na głębokości około 5 cm.

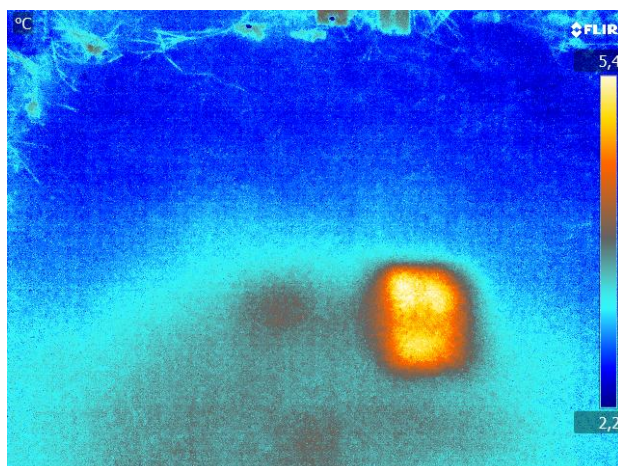
Na podstawie termogramu i wykresów przedstawionych na rys. 6 i 7 można stwierdzić, że przy zastosowaniu metody pasywnej termografii potwierdzenie występowania zakopanych obiektów jest bardzo utrudnione i tylko na podstawie znajomości miejsca ich zakopania można zauważyć bardzo słabo widoczne ich ślady cieplne. Zupełnie inaczej sytuacja wygląda przedstawiona na termogramie rys.8 wykonanym po nagrzewaniu powierzchni pola pomiarowego źródłem mikrofalowym. Zarówno ślady cieplne miny jak i puszkę są dobrze widoczne na powierzchni pola pomiarowego. Widać to również wyraźnie na wykresach (rys.9 i 10). Różnica temperatury po nagrzewaniu na powierzchni nad puszką i poza puszką wynosiła ok. 0,6°C (rys.9) podczas gdy przed nagrzewaniem była poniżej 0,1°C. Zaś różnica temperatury nad miną i poza miną wynosiła po nagrzewaniu około 2°C (rys.9) podczas gdy przed ogrzewaniem wynosiła ok. 0,15°C (rys.7). Źródło mikrofalowe (moc – 2 kW, częstotliwość 2,45 GHz) było umieszczone 1,5 m nad powierzchnią pola pomiarowego, które było nagrzewane przez 10 minut.



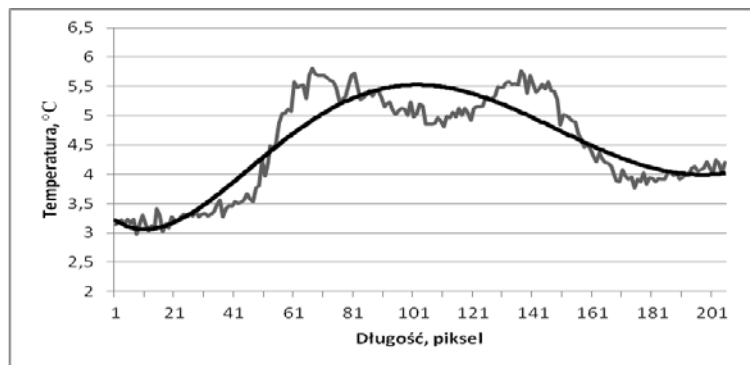
Rys. 6. Termogram pola pomiarowego z zakopaną miną drewnianą i metalową puszką



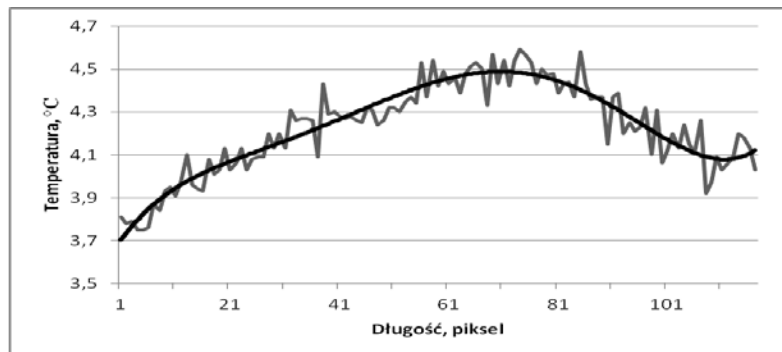
Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni piasku nad miną drewnianą – termogram (rys. 6)



Rys. 8. Termogram pola pomiarowego z zakopaną miną drewnianą i metalową puszką po nagrzewaniu źródłem mikrofalowym



Rys. 9. Rozkład temperatury na powierzchni piasku nad miną - termogram (rys. 8)



Rys.10. Rozkład temperatury na powierzchni piasku nad puszką - termogram (rys. 8)

4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały możliwości wykrywania zakopanych pod powierzchnią gruntu obiektów (min lądowych) metodą aktywnej termografii w podczerwieni w niekorzystnych warunkach atmosferycznych.

W celu zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia obiektów metodą aktywnej termografii przyszłe prace chcemy ukierunkować na:

- opracowanie nowych algorytmów analizy obrazów,
- zastosowanie metody fuzji danych (fusion data), polegającej na połączeniu obrazów z metody aktywnej termografii, pasywnej termografii, multispektralnej (UV, VIS i NIR) i georadaru GPR. Taka analiza powinna ograniczyć wpływ zakłóceń, których źródłem jest nierównomierne nagrzewanie powierzchni gruntu, różnice w wilgotności powierzchni, różnego rodzaju obiekty znajdujące się na powierzchni gruntu, cienie od budynków i drzew itp.

Literatura

- [1] Kossowski J., The relation between soil heat flux and solar radiation., *Acta Agrophysica*, 10 (1), 121-135, 2007
- [2] Enz J.W., Brun L.J., Larsen J.K., Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil., *Agric. For. Meteorol.*, 43, 59-70, 1988
- [3] Olivier S.A., Olivier H.R., Wallace J.S., Roberts A.M., Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate., *Agric. For. Meteorol.*, 39, 257-269, 1987

- [4] Pręgowski P., Świdorski W., Usowicz B., Walczak R., Role of time and space variability of moisture and density of sand for thermal detection of buried objects – modeling and experiments. *AeroSense'99, SPIE Vol. 3700*, p.444-457, 1999
- [5] Usowicz B., A new physical-statistical model of hydraulic conductivity in porous medium. *Acta Agrophysica*, Vol. 29, 112, 2000

Projekt rozwojowy nr 0 R00 0091 12 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków na naukę latach 2010-2012