

Waldemar ŚWIDERSKI, Paweł HŁOSTA

WOJSKOWY INSTYTUT TECHNICZNY UZBROJENIA,
ul. Prymasa Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka

Wykrywanie min metodami termografii w podczerwieni**Dr hab. inż. Waldemar ŚWIDERSKI**

Absolwent Wydziału Elektro-Mechanicznego Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej (1978). Stopień doktora habilitowanego nauk technicznych uzyskał w roku 2012 (budowa i eksploatacja maszyn). Od 1980 roku jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zainteresowania naukowe to badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni oraz zastosowania techniki podczerwieni w aplikacjach militarnych.

e-mail: waldemar.swiderski@wp.pl

**Mgr inż. Paweł HŁOSTA**

Absolwent Wydziału Elektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej (1999). Od 1999 jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Kierownik pracowni elektronicznej. Projektuje i programuje moduły układów elektronicznych systemów szkolno – treningowych. Zainteresowania naukowe to nieniszczące badania z wykorzystaniem kamer pracujących w podczerwieni.

e-mail: phpph@wp.pl

**Streszczenie**

Zakopane obiekty powodują zakłócenia w rozkładzie parametrów cieplnych gleby. W naturalnych warunkach wymiany ciepła mogą powstać ślady termiczne poszukiwanych obiektów na powierzchni gleby w zobrażeniu cieplnym. Dodatkowo zastosowanie źródła mikrofalowego zwiększa prawdopodobieństwo wykrywania zakopanych obiektów metodą termografii w podczerwieni. W artykule przedstawiono zarówno wyniki symulacji komputerowej jak i badań eksperymentalnych tego zagadnienia.

Słowa kluczowe: termografia w podczerwieni, mina, mikrofałe.

Mine detection with IR thermography methods**Abstract**

Many factors limit the efficiency of buried object detection by thermal methods. Underground objects create disturbances in the distribution of thermal parameters of the soil. Natural conditions of heat exchange can create a suitable thermal image on the soil surface - in the form of a wanted trace in the thermal image. The solar energy is the main source delivering heat to the soil. The range and character of changes of the heat stream and rate of accumulation in the soil on a given day depend on three factors: atmospheric conditions, the kind of surface and the properties of thermal soil. The active IR thermography method can increase probability and accelerate the detection. This method is used as one of the methods for nondestructive testing of different materials. The problem of detecting objects buried in the soil can be treated as a special case of detecting subsurface heterogeneity of a material. The active IR thermography method requires the use of a source of thermal stimulation to heat the tested objects. A microwave source was used to increase the probability of detecting the buried objects by this method. In this paper the results of such a computer simulation and experimental testing are presented.

Keywords: IR thermography, mine, microwaves.

1. Wstęp

Podczas wojny w Zatoce Perskiej miny przeciwpiechotne i przeciwpancerne spowodowały 34% strat wojsk amerykańskich. Szacuje się, że w wypadkach minowych na świecie ok. 20 000 osób rocznie traci życie lub odnosi ciężkie uszkodzenia ciała. W zakresie wykrywania min stosowane są coraz nowocześniejsze rozwiązania techniczne, które zmniejszają liczbę wypadków i zwiększają bezpieczeństwo pracy saperów oraz efektywność rozminowywania terenu.

Rodzaje działań rozminowywania są zazwyczaj różnicowane w zależności od charakteru działań demilitaryzacyjnych, tj. operacyjnych lub humanitarnych. Działania operacyjne są związane z operacjami wojskowymi, których celem jest likwidacja lub redukcja, w co najmniej 70%, niepotrzebnych materiałów/odpadów pozostałych w wyniku wojen. Według standardów międzynarodowych, w ramach operacji humanitarnych, przy marginesie ryzyka wynoszącego 0,4%, należy wykryć 99,6% niebezpiecznych obiektów. W tym celu, do wykrywania i rozbrajania bomb,

specjaliści stosują metody manualne. W celu poprawienia skuteczności i bezpieczeństwa podczas operacji wykonywanych ręcznie, wykorzystywane są detektory metali, buldożery oraz przeszkolone psy.

Miny stanowią największe niebezpieczeństwo pozostałości wojennych. Miny składają się z obudowy, ładunku materiału wybuchowego (kruszącego-zasadniczego/głównego) oraz zapalnika. Obudowa ich wykonana jest z różnych materiałów, takich jak metale, tworzywa sztuczne, drewno a nawet tektura. Bardziej zaawansowane obudowy są skonstruowane tak, aby miny były niewykrywalne i/lub odporne na działanie czynników środowiskowych. Współczesne obudowy bakelitowe oraz wykonane z żywic syntetycznych, które chronią minę przed korozją i oddziaływania chemicznych czynników znacznie obniżają skuteczność ich wykrywania przez elektroniczne urządzenia detekcji.

Na podstawie doświadczeń wynikających z realizowanego w WITU projektu badawczego [1] można stwierdzić, że zagadnienie wykrywania obiektów, zagłębionych pod powierzchnią ziemi, można traktować jako szczególny przypadek wykrywania niejednorodności podpowierzchniowych materiałów. Jedną z metod wykorzystywanych w nieniszczących badaniach struktur podpowierzchniowych jest termografia w podczerwieni. Badania termograficzne mogą być realizowane metodą pasywną, gdy do wykonania badania nie wymagane jest specjalne wymuszenie cieplne, albo metodą aktywną, gdy wykonanie badania warunkowane jest zapewnieniem zewnętrznego wymuszenia skutkującego zmianami w rozkładzie temperatury, a zatem określonym przepływem ciepła. Badane są przejściowe procesy cieplne. Nie jest istotne czy analizowany jest proces nagrzewania czy studzenia. Z uwagi na fakt, że termogram (obraz w podczerwieni) w sposób bezpośredni odzwierciedla jedynie chwilowy rozkład temperatury radiacyjnej na powierzchni obiektu, wymagane jest zastosowanie specyficznej dla badanego problemu procedury pomiarów oraz przetwarzania wyników. Wyniki badań pozostają w bezpośrednim związku z właściwym dopasowaniem czasowo-amplitudowej dynamiki wymuszeń cieplnych zarówno do specyfiki obiektu i rodzaju oczekiwanych anomalii jak i technicznych uwarunkowań systemu pomiarowego i metody badań. Opracowanie wyników badań termograficznych dla celów diagnostyki technicznej opiera się nie tylko o zautomatyzowane algorytmy i obliczenia numeryczne, ale również wykorzystywane jest heurystyczne doświadczenie operatorów.

Podobnie jak lokalne zagęszczenia gleby, wprowadzenie obiektu (np. miny, IED – Improvised Explosive Device) pod powierzchnię gleby, determinują termiczne, wilgotnościowe i powietrzne stosunki gleby (gruntu). Wszystkie te elementy zakłócają przestrzenny rozkład gęstości, wilgotności i innych właściwości fizycznych gleby, które wpływają bezpośrednio lub pośrednio na procesy przepływu masy i energii w glebie, a poprzez nie na temperaturę gleby. Stopień zagęszczenia gleby nad wprowadzonym obiektem do gleby zależy od rodzaju i stanu fizycznego gleby oraz czasu jaki upłynął od chwili wprowadzenia źródła niejednorodności do ośrodka glebowego. Różnicowanie temperatury

powierzchni gleby może być zatem spowodowane różnicami właściwości fizycznych gleby, wynikiem osłabienia dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni gleby przez pokrywę chmur i pokrywę roślinną. Poznanie i uwzględnienie natury tych procesów ma znaczenie podstawowe dla efektywności zastosowania termografii.

Powierzchniowe, ciepłe ślady od podziemnych obiektów mogą być wynikiem tzw. efektów powierzchniowych lub objętościowych. Pierwsze z nich są zwykle krótkotrwałe (godziny, dni od zakopania obiektu) jako, że wynikają z lokalnej zmiany emisyjności powierzchni, zruszonej gleby i wprowadzenia dodatkowego powietrza. Powietrze to działa spowalniająco na zmiany temperatury lecz jednocześnie może być łatwo zastąpione wodą, co przynieść może odwrotny skutek. Efekty objętościowe są wynikiem „trwałych” różnic pomiędzy pojemnością cieplną i przewodnością cieplną obiektu oraz otaczającej ją gleby [2]. W rzeczywistości nie są to „trwałe” różnice. Z natury interakcji gleba-otoczenie wynikają zarówno cykliczne (dobowe) jak i warunkowane minionymi oraz bieżącymi warunkami meteorologicznymi. Szczególnie silnym źródłem tych zmian są woda i para wodna zawarta w glebie. Skutkuje to dużą trudnością modelowania zjawisk radiacyjnych i licznymi ograniczeniami w stosowaniu znanych procedur termograficznego wykrywania anomalii w ciałach stałych [2-4].

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie metody aktywnej termografii w podczerwieni. Jako źródło dodatkowego ogrzewania powierzchni gruntu pod którym może znajdować się zakopana mina można zastosować źródło promieniowania mikrofalowego. Może to być szczególnie korzystne kiedy nagrzewanie słoneczne jest niewystarczające do wykrycia zakopanejminy.

2. Przepływ ciepła w gruncie

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 dzięki ruchom turbulencyjnym.

Powierzchnia terenu przekazuje uzyskaną od Słońca energię cieplną drogą przewodnictwa w głąb gruntu, natomiast drogą promieniowania długofalowego, oraz ruchów konwekcyjnych i turbulencyjnych energia ta dostarczana jest do atmosfery. Na powierzchni gruntu zachodzi parowanie oraz kondensacja pary wodnej, co także jest źródłem utraty, lub zysku pewnej ilości ciepła. Grunt pochłania energię słoneczną bardzo cienką warstwą (ok. 1 mm). Na skutek tego powierzchnia gruntu nagrzewa się silniej i szybciej w ciągu dnia, oraz latem. W przeciagu nocy, oraz zimą powierzchnia gruntu bardzo szybko traci ciepło poprzez wypromieniowanie. W przygruntowej warstwie powietrza wymiana ciepła odbywa się częściowo drogą promieniowania długofalowego powierzchni ziemi do atmosfery, a także atmosfery do powierzchni ziemi. Przewodnictwo cieplne odgrywa nieznaczną rolę, gdyż powietrze jest słabym przewodnikiem ciepła. Największe znaczenie ma przenoszenie ciepła w wyniku turbulencji, czyli nieustannych, chaotycznych ruchów niewielkich ilości powietrza, zarówno przy pionowych ruchach konwekcyjnych, jak i przy poziomym przemieszczaniu się powietrza.

Proces dopływu, transformacji i wymiany energii zachodzący na powierzchni czynnej jest głównym czynnikiem kształtującym stosunki termiczne gleby i przygruntowej warstwy powietrza w danym środowisku.

Wprowadzenie obiektów (min) w strukturę gleby zmienia przestrzenne profile parametrów termicznych gleby. Na powierzchni gleby mogą pojawiać się zmiany radiacyjne (różnice temperatury, rozkłady emisyjności) o oczekiwanej, specyficznej dynamice czasowo-amplitudowej (sygnatury termalne). Biorąc jednak pod uwagę przytoczone powyżej informacje dogodne warunki do wykrycia poszukiwanych obiektów mogą występować bardzo

krótco. Dlatego w wielu przypadkach bardzo użyteczne może być wykorzystanie dodatkowego źródła nagrzewania w postaci mikrofal co jest tematem dalszych rozważań w tym artykule.

3. Modelowanie wykrywania min w ośrodku jednorodnym

Do modelowania wykrywania min użyto oprogramowania ThermoCalc™ -Mine opracowanego na potrzeby prac prowadzonych w WITU przez prof. Vladimira Vavilova z Politechniki w Tomsku (Rosja) [5]. W programie ThermoCalc™ -Mine rozwiązywane są równania przewodnictwa ciepła przy zastosowaniu numerycznej metody elementów skończonych. U podstaw opracowania programu ThermoCalc™ -Mine leżały symulacje procesów z zakresu badań nieniszczących, dla których podstawowe znaczenie mają sygnały odpowiadające przejściowemu stanowi temperatury powierzchni ponad defektami podpowierzchniowymi. W programie zakłada się, że zarówno badana próbka jak i podpowierzchniowe defekty mają kształt równoległościannów. Ogrzewanie lub chłodzenie za pomocą zewnętrznego impulsu „ciepła” dokonywane jest po stronie powierzchni przedniej próbki. Zakłada się, że strumień ciepła po tej stronie jest jednorodny lub rozkład jego gęstości w przekrojach poprzecznych opisuje funkcja Gaussa. W drugim przypadku punkt maksymalnej gęstości strumienia może być lokowany w dowolnym miejscu powierzchni nagrzewanej. W tym celu wprowadzone są odpowiednie współczynniki przejmowania ciepła h . Parametry cieplne próbki i defektów mogą być określane niezależnie we wszystkich trzech płaszczyznach przestrzeni, dzięki czemu elementy te cechować może pełna anizotropowość. W modelu adiabaticznie, że boczne powierzchnie próbki są izolowane adiabaticznie. Natomiast ciągłość temperatury jest zachowana pomiędzy granicami warstw próbki oraz pomiędzy defektami i ich otoczeniem. W programie uwzględniono defekty pojemnościowe. Oznacza to, że inaczej niż w wielu innych modelach stosowanych w badaniach nieniszczących, w obliczeniach uwzględniane są zarówno dyfuzyjności jak i przewodnictwo cieplne defektów. Dzięki temu możliwy jest dokładniejszy opis zjawisk cieplnych związanych z defektem i jego otoczeniem. Oprogramowanie ma możliwość zarówno symulowania ogrzewania słonecznego jak i ogrzewania objętościowego symulującego ogrzewanie źródłem promieniowania mikrofalowego.

Do modelowania wykrywania zakopanych obiektów metodą termografii w podczerwieni wyznaczono eksperymentalnie parametry termo-fizyczne dwóch rodzajów piasku o różnej wielkości ziaren. Wyznaczono takie parametry jak przewodnictwo cieplne, pojemność cieplną i dyfuzyjność w zależności od wilgotności piasku.

Do pomiarów cieplnych właściwości piasków użyto miernika firmy Decagon Devices, Inc. KD2 Pro z podwójną igłą. Zastosowany w tej sondzie krótki impuls grzewczy do pomiarów cieplnych właściwości pozwala zminimalizować procesy ruchu wody wywoływane termicznie jak i zminimalizować czas potrzebny na pomiar. Moc cieplna jest również zminimalizowana, aby zminimalizować ruch wody i konwekcję swobodną. Zastosowanie stosunkowo krótkiego czasu nagrzewania oraz niskiego poziomu ogrzewania czujnika wymaga wysokiej rozdzielczości pomiarów temperatury i specjalnych algorytmów do obliczania właściwości cieplnych. KD2 Pro mierzy temperaturę z rozdzielczością 0,001 °C. Badania te wykonano w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie.

Otrzymane z badań eksperymentalnych dane użyto do wyznaczenia charakterystyk termo-fizycznych piasku (przewodnictwa cieplnego, pojemności cieplnej i dyfuzyjności cieplnej) z wykorzystaniem statystyczno-fizycznego modelu (opracowanego przez prof. Bogusława Usowicza z IA PAN) [6] z uwzględnieniem stanu uwilgotnienia i zagęszczenia piasków.

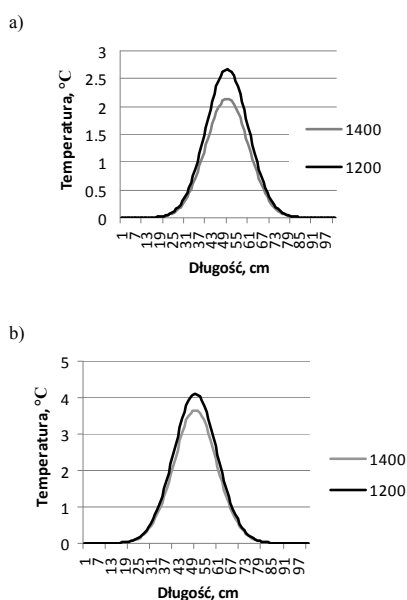
W większości prac dotyczących wykrywania min zwykle analizowane jest wykrywanie min, które mają obudowę wykonaną z metalu lub tworzywa sztucznego, ale występują równieżminy z obudową wykonaną z drewna. W artykule możliwości wykrywania min z obudową drewnianą będą przeanalizowane na przy-

kładzie miny PMD-7. Mina PMD -7 ma formę równoległociennego drewnianego pudełka o wysokości 51 mm, szerokości 76 mm i 152 mm długości. Masa miny wynosi 300 g, a ładunku wybuchowego TNT 75 g.

W tabeli 1 przedstawione są parametry cieplne materiałów, z których wykonana jest mina PMD-7. Wybrane wyniki symulacji przedstawione są na wykresach (rys. 1). Na rys. 1a) przedstawiono porównanie zmiany temperatury na powierzchni piasku o różnej gęstości (1400 kg/m^3 i 1200 kg/m^3), ale z tą samą zawartością wody (2%) w sytuacji kiedy pod jego powierzchnią nie ma miny. Powierzchnia piasku została ogrzana impulsem cieplnym symulującym ogrzewanie źródłem mikrofalowym. Maksymalna gęstość mocy impulsu cieplnego wynosiła $Q = 800 \text{ W/m}^2$ a czas nagrzewania $\tau_h = 1200 \text{ s}$. Na rys. 1b) pokazano porównanie tych zmian w przypadku zakopanej na głębokość 1 cm miny PMD-7.

Tab. 1. Parametry cieplne
Tab.1. Thermal parameters

Material	Pojemność cieplna J/kg·K	Współczynnik przewodzenia ciepła W/m·K	Gęstość kg/m ³
Drewno	2390	0,25	550
TNT	1703	0,23	1500



Rys. 1. Porównanie zmian sygnału temperatury na powierzchni piasku o różnej gęstości (1400 kg/m^3 i 1200 kg/m^3) i tej samej zawartości wody (2%) w wyniku ogrzewania źródłem mikrofalowym a) bez miny b) z miną [7]
Fig. 1. Changes of the temperature on the surface of sand with different densities (1400 kg/m^3 and 1200 kg/m^3) and the same content of water (2%), a) without a mine b) with a mine

4. Eksperymentalne badania laboratoryjne

Do budowy stanowiska laboratoryjnego (rys. 2) wykorzystano izolowaną komorę ($1000 \times 800 \times 1000 \text{ mm}$) o kontrolowanej temperaturze wewnętrznej i wilgotności.

Charakterystyczne cechy takiego laboratoryjnego ośrodka badawczego to:

- eliminacja zaburzeń powierzchniowych (brak wpływu wiatru, opadów, flory);
- stałe i przewidywalne warunki wilgotności podłoża;
- jednorodne parametry granulometryczne;
- ustalone warunki termiczne aparatury pomiarowej;
- precyzyjne sterowanie parametrami pola (nagrzewanie, nawilżanie, stopień utwardzenia podłoża).



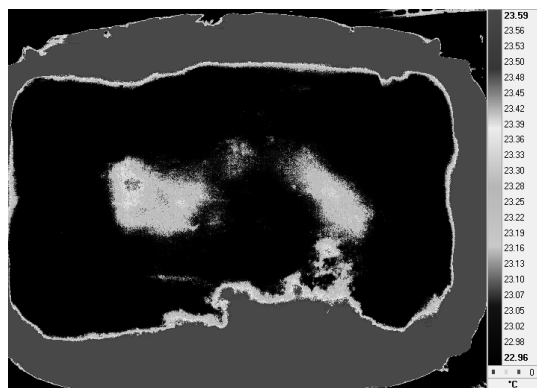
Rys. 2. Laboratoryjne stanowisko badawcze
Fig. 2. The laboratory set-up

Badania były przeprowadzone z użyciem kamery SC FLIR 7600 do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchni pola pomiarowego. Ponadto za pomocą przyrządów pomiarowych mierzono: temperaturę zakopanych min, zmiany temperatury w profilu pola pomiarowego, wilgotność piasku, gęstość mocy napromieniowania cieplnego na powierzchni pola pomiarowego i stan warunków zewnętrznych (temperatura i wilgotność powietrza). Do badań eksperymentalnych użyto miny PMD-7 (drewniana obudowa miny wypełniona woskiem, który ma zbliżone parametry cieplne do TNT) i miny MS-64 (metalowa obudowa miny wypełniona woskiem). Źródło mikrofalowe o mocy 180 W było umieszczone na wysokości 11 cm (dół anteny) nad polem pomiarowym, co zapewniało gęstość mocy impulsu cieplnego o wartości 800 W/m^2 . Badania prowadzono dla różnych częstotliwości promieniowania mikrofalowego 900 MHz, 2,45 GHz, 5 GHz i 7,5 GHz z tą samą gęstością mocy impulsu oraz przy różnej wilgotności piasku. Do symulacji ogrzewania słonecznego użyto dwóch promienników podczerwieni umożliwiających nagrzewanie całego pola pomiarowego impulsem cieplnym o wartości 500 W/m^2 .

Wybrane wyniki badań eksperymentalnych przedstawione są na rys. 3-4. Na rys. 3 przedstawiono termogram uzyskany w fazie chłodzenia po nagrzewaniu pola pomiarowego przez 160 minut promiennikami podczerwieni. Nagrzewanie odpowiadało nagrzewaniu słonecznemu przy słonecznej pogodzie w okresie jesieni w warunkach klimatycznych Polski. Pod powierzchnią piasku były umieszczone dwie miny: PMD-7 na głębokości 2,5 cm i MS – 64 na głębokości 3,5 cm. Wilgotność piasku w profilu pomiarowym wynosiła 1-3%. Jak widać na tym termogramie wykrycie min w takich warunkach jest bardzo trudne.

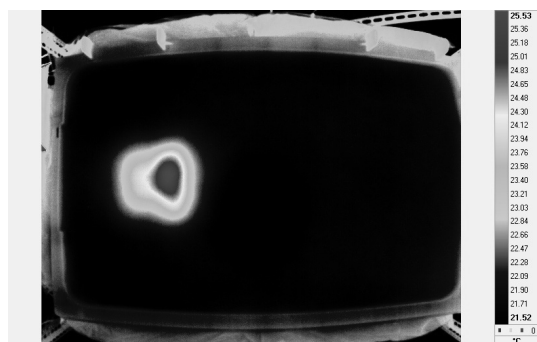
5. Wyniki badań polowych

Polowe badania eksperymentalne były przeprowadzone na zewnętrznym polu pomiarowym składającym się z czterech części, każda o powierzchni około 1 m^2 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$). Każda z tych części na głębokość 0,5 m była wypełniona różnym rodzajem podłoża (gleby): piaskiem, ziemią ogrodniczą, ziemią ogrodniczą pokrytą warstwą torfu (około 5cm) i żwirem. Różne typy min i inne obiekty (tj. metalowa zamknięta puszką wypełniona powietrzem, plastikowa butelka wypełniona wodą, szklana butelka wypełniona wodą i połowa białej cegły) były zakopane na głębokości 5 cm. Źródło promieniowania mikrofalowego było umieszczone 1,5 m nad polem pomiarowym i generowało promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz oraz mocy około 2 kW. W trakcie badań pole pomiarowe było ogrzewane przez źródło mikrofalowe przez 10 minut. Wszystkie badania były rejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej FLIR A645 i zestawu czujników umożliwiających pomiar: temperatury zakopanych min, temperatury profilu gleby, wilgotności gleby, temperatury i wilgotności powietrza (warunków zewnętrznych).



Rys. 3. Termogram pola pomiarowego z widocznymi „ślądami” min PMD-7 (z lewej strony) i MS-64 (z prawej) po ogrzewaniu promiennikami podczerwieni

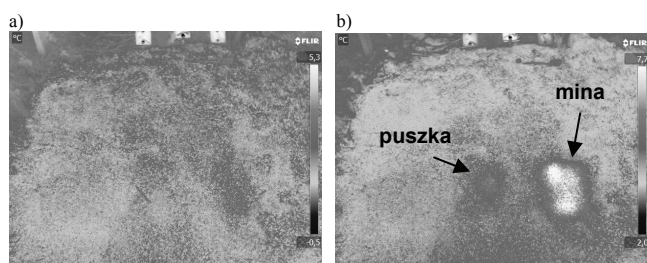
Fig. 3. Thermogram of the measured field with buried wooden PMD-7 (left) and metal MS-64 (right) mines after heating



Rys. 4. Termogram pola pomiarowego ze „ślądem” ciepłym miny PMD-7 po nagrzewaniu źródłem mikrofalowym (antena mikrofalowa nagrzewa piasek obok miny)

Fig. 4. Thermogram of the measured field with a buried wooden mine after heating (microwave antenna near mine)

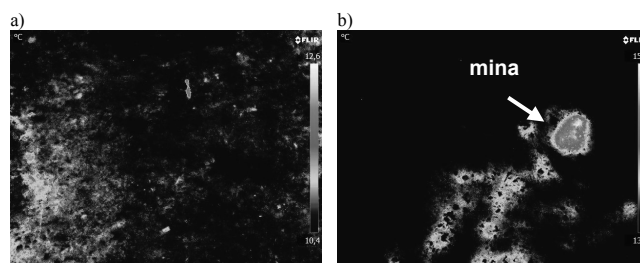
Na rys. 5 przedstawiono termogramy zewnętrznego pola pomiarowego wypełnionego piaskiem z zakopanymi na głębokości 5 cm miną PMD-7 i metalową puszką, na rys. 5a) jest termogram wykonany metodą termografii pasywnej na którym trudno jest wskazać „ślady ciepłe” szukanych obiektów, zaś na rys. 5b) widoczny jest bardzo wyraźnie na powierzchni piasku „śląd” ciepły miny jak również mniej wyraźny metalowej puszki.



Rys. 5. Termogramy zewnętrznego pola pomiarowego (wypełnionego piaskiem) z zakopaną drewnianą miną i metalową puszką wypełnioną powietrzem: a) przed nagrzewaniem, b) po nagrzewaniu mikrofalami

Fig. 5. Thermograms of the outside measurement field (filled with sand) with a buried wooden mine and a tin filled with air: a) before heating, b) after heating by a microwave source

Na rys. 6 przedstawiono termogramy zewnętrznego pola pomiarowego wypełnionego ziemią ogrodniczą pod powierzchnią której na głębokości 5 cm zakopano minę z metalową obudową MS – 64. Jak widać na termogramie rys. 6a) metodą pasywnej termografii w podczerwieni, w warunkach w jakich wykonywano badania, nie można wykryć śladu ciepłego miny na powierzchni gruntu. Po nagrzewaniu pola pomiarowego źródłem mikrofalowym, ślad ciepły miny jest wyraźnie widoczny.



Rys. 6. Termogramy zewnętrznego pola pomiarowego (wypełnionego ziemią ogrodniczą) z zakopaną miną metalową: a) przed nagrzewaniem, b) po nagrzewaniu mikrofalami

Fig. 6. Thermograms of the outside measurement field (gardening ground) with a buried metal mine: a) before heating, b) after heating by a microwave source

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że zwiększają się możliwości wykrycia zakopanych pod powierzchnią gruntu obiektów zawierających materiały wybuchowe przez zastosowanie aktywnej termografii z mikrofalowym źródłem nagrzewania. Jest ona bardziej skuteczna od pasywnej termografii.

Pomiary uzyskane w badaniach laboratoryjnych i polowych potwierdzają wyniki symulacji komputerowych. Różnice między nimi są na poziomie $0,1 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

Przyszłe prace chcemy ukierunkować na dalszą poprawę jej skuteczności poprzez:

- 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.

Badania wykonano przy wsparciu finansowym Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego nr 0 R00 0091 12, realizowanego w latach 2010-2013.

7. Literatura

- [1] Świdzki W., Pręgowski P.: Raport końcowy z realizacji projektu badawczego „Adaptacja przemysłowych metod dynamicznej, aktywnej termografii dla potrzeb wykrywania niejednorodności struktur podziemnych, a zwłaszcza pól minowych, w warunkach naturalnych wymuszeń przepływów ciepła, WITU, Zielonka, 1999.
- [2] Pręgowski P., Świdzki W., Usowicz B., Walczak R.: Surface and volume effects in thermal signatures of buried mines: experiment and modeling, QIRT'98. Łódź, 1998.
- [3] Pręgowski P., Świdzki 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, Volume 3700, str. 444-457, Orlando 1999.
- [4] Pręgowski P., Świdzki W.: Application of IR Thermography for detection of the buried mines – prediction and procedures, MATEST'99 proceedings, str. 227-232, Cavtat 1999.
- [5] ThermoCalcTM-Mine, Operation Manual, Innovation Ltd., Russia, Tomsk, 2010.
- [6] Usowicz B.: Statistical-physical model of thermal conductivity in soil, Polish J. Soil Sci., XXV/1, str. 27-34, 1992.
- [7] Świdzki W., Hłosta P., Jarzemiński J., Szugajew L., Usowicz J.: Role of moisture and density of sand for microwave enhancement of thermal detection of buried mines, Proc. SPIE Vol. 8357, p.83570P-1-13, Baltimore 2012.