

*Stanisław Wasilewski\*, Tomasz Choroba\**

## ZDALNE POMIARY TEMPERATURY W OCENIE AKTYWNOŚCI TERMICZNEJ SKŁADOWISK ODPADÓW WĘGLOWYCH\*\*

---

### 1. Wstęp

Pierwsze zastosowanie metod teledetekcji do wykrywania i lokalizacji samozagrzewania hałd węglowych udokumentowano w Stanach Zjednoczonych w roku 1963 w Scranton w stanie Pensylwania. Pokazano wówczas termogramy palących się hałd w skali szarości. W latach 60. i 70. wielu naukowców amerykańskich prowadziło obserwacje lokalnych pożarów hałd kamerami termowizyjnymi z pokładu samolotów. Jednak możliwości techniczne w tym okresie i uzyskana gęstość skaningu termicznego pozwalały jedynie na zgrubną ocenę obszarów o podwyższonej temperaturze i występujących pożarów, stąd wykorzystywano gęstość skaningu termicznego do monitorowania zagrzewania i samozapalenia pokładów węgla. Na początku lat 80. badania z zastosowaniem teledetekcji prowadzono już w kilku krajach, w których poziom technologiczny w dziedzinie górnictwa był wysoki. Metody teledetekcji pożarów hałd na podstawie spektralnego skaningu w termicznej podczerwieni stosowano od roku 1983 do badania pożarów węgla na hałdach w chińskich regionach Tažyan Xishan w prowincji Shanxi [1], a także w Jharia (Indie), gdzie opracowano mapy samozagrzewania. Problem ten znalazł swoje miejsce w badaniach satelitarnych Landsat TM. Badania te pokazały, że mimo znacznego postępu, teledetekcja i pomiary temperatury z zastosowaniem tej technologii mogą być efektywnie stosowane jedynie w przypadku wystąpienia pożarów na znacznych obszarach [8] z uwagi na małą rozdzielczość przestrzenną skaningu termicznego powierzchni.

Obecnie w dziedzinie metrologii występuje coraz większe zapotrzebowanie na bezkontaktowe, optyczne metody pomiaru i badań służące do kontroli, diagnozowania i monitorowania obiektów inżynierskich. Rozwój technik pomiarowych oraz postęp technologiczny w dziedzinach elektroniki i informatyki przyczyniły się również do rozwoju

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

\*\* Artykuł został przygotowany w ramach prac statutowych nr 11.11.100.280 oraz 11.11.100.482 realizowanych w Katedrze Ekologii Terenów Przemysłowych Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii AGH w roku 2010

i rozszerzenia możliwości bezkontaktowego pomiaru temperatury. Pirometria optyczna, a przede wszystkim termografia, znalazła szerokie zastosowanie do celów diagnostycznych (medycyna, mechanika, budownictwo), militarnych (wojsko, policja), ratunkowych (straż pożarna, ratownictwo górskie), a także naukowo-badawczych.

Biorąc pod uwagę różnorodność obiektów oraz elementów środowiska geograficznego mamy do czynienia ze zróżnicowaniem termicznym podłoża, które z kolei decyduje o pochłanianiu, rozpraszaniu lub odbijaniu energii cieplnej docierającej do powierzchni Ziemi. Zjawiska te rejestrowane przez systemy termowizyjne można odnajdywać na termogramach. Do uzyskania konturów badanych obiektów na termogramach niezbędne są dodatkowe, równoległe z termogramami, zobrazowania wizyjne [6, 7], czarno-białe lub barwne w barwach naturalnych. W tym przypadku wykorzystuje się dane z systemu GIS, które zapisuje się równoległe z rejestracją termalną w pamięci komputera. Jednocześnie, w najnowocześniejszych wizyjnych systemach pomiarowych, stosowanych w badaniach, standardem stają się zaawansowane metody przetwarzania pozyskanych obrazów cyfrowych, stosowanie metod umożliwiających automatyzację procesu przetwarzania oraz komputerowe modelowanie obiektów w rzeczywistości wirtualnej.

W ostatnich latach zanotowano znaczny postęp w konstrukcjach kamer termowizyjnych oraz narzędzi i oprogramowania do przetwarzania i analizy termogramów i obrazów, co daje możliwość rejestracji temperatur na dużych obszarach takich jak hałdy, składowiska odpadów czy wyrobiska kopalni odkrywkowych [2, 3], co skłoniło autorów do zastosowania kamery termowizyjnej jako przyrządu pomiarowego do celów badawczych.

## 2. Zdalne pomiary temperatury obiektów inżynierskich

Każde ciało w większym lub mniejszym stopniu promieniuje fale elektromagnetyczne, zwykle w postaci niewidzialnego promieniowania podczerwonego. Ciała w temperaturze kilku kelwinów emitują promieniowanie w zakresie dalekiej podczerwieni. Promieniowanie ciepłe, zwane również termicznym, jest odzwierciedleniem energii wewnętrznej ciała. Przedmioty cieplejsze emitują więcej promieniowania i o mniejszej długości, przykładowo ciała o temperaturze pokojowej emitują najwięcej promieniowania o długości fali rzędu 10  $\mu\text{m}$ . Promieniowanie to zależy od temperatury ciała, ale i właściwości optycznych. Naturalnym zjawiskiem jest wymiana ciepła między ciałami. Objawia się ono samoistnym procesem przekazu energii na drodze emisji i absorpcji fal elektromagnetycznych w postaci ciepła od ciał o temperaturze wyższej do ciał o temperaturze niższej. Ten specyficzny rodzaj wymiany energii zwany jest promienistą (radiacyjną) wymianą ciepła. Charakterystyczną cechą promieniowania ciepłego jest zdolność kompensacji strat energii ciała, wynikających z promieniowania termicznego, przez absorpcję energii promieniowania padającego na to ciało, co w konsekwencji pozwala na zachowanie stanu równowagi termodynamicznej z bezpośrednim otoczeniem. Kierunki rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w postaci ciepła są jednakowo prawdopodobne. Wynika to z braku polaryzacji równania promieniowania ciepłego, które jest izotropowe

$$dW = \frac{c}{4} \rho(v, T) dv$$

gdzie:

$dW$  — energia promieniowania cieplnego w próżni o częstotliwościach od  $\nu$  do  $\nu + d\nu$ ,

$\rho$  — gęstość spektralna objętościowej energii promieniowania,

$T$  — temperatura ciała,

$c$  — prędkość światła.

Składowiska odpadów powęglowych, stanowiące przedmiot badań, można traktować jako rozległe ciała emitujące promieniowanie cieplne. Do pomiaru temperatury takich ciał bardzo dobrze nadają się kamery termowizyjne, które pozwalają ilustrować obraz temperatury badanych obiektów. Urządzenia te w swej funkcjonalności wykorzystują zjawiska fizyczne wynikające ze zdolności emisyjnej ciał, rozumianej jako stosunek energii  $dW$  wypromieniowanej w postaci fal elektromagnetycznych przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu do szerokości przedziału długości fali  $d\lambda$ :

$$r_\lambda = \frac{dW}{d\lambda}$$

Całkowitą zdolność emisyjną ciała, tzw. luminancję energetyczną  $R_e$ , można określić na podstawie prawa Kirchhoffa:

$$R_e = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda$$

Zależność ta dotyczy ciał doskonale czarnych, czyli takich, które w pełni pochłaniają padające na nie promieniowanie. W otaczającym człowieka świetle ciała doskonale czarne nie istnieją, gdyż znana mu materia nie jest zdolna do całkowitej absorpcji fal elektromagnetycznych. Hałdy, a także wszelkie inne obiekty, są przykładem ciał szarych, dla których

$$R_e^* = \varepsilon R_e$$

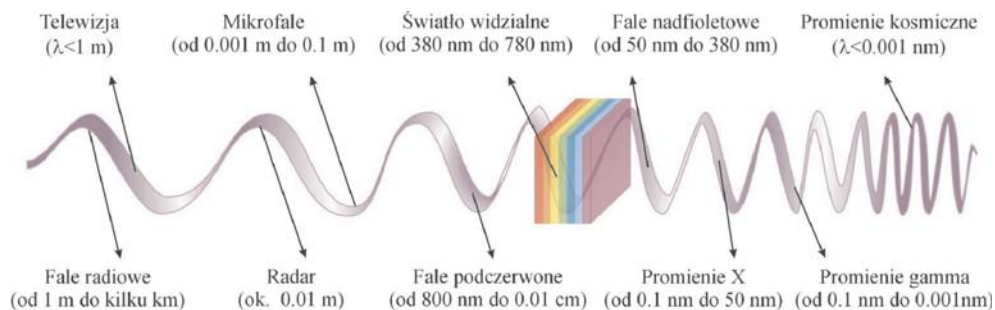
gdzie  $R_e^*$  jest całkowitą zdolnością emisyjną ciała szarego, a  $\varepsilon$  zwany współczynnikiem emisyjności jest stopniem czarności ciała, zależnym od rodzaju ciała, stanu jego powierzchni oraz temperatury [1]. Emisyjność materiałów spotykanych w praktyce jest mniejsza od 1.

Powszechnie znanym prawem, opisującym zależność między luminancją, traktowaną również jako całkowita moc emitowanego promieniowania, a temperaturą ciała doskonale czarnego, jest prawo Stefana–Boltzmanna

$$R_e = \sigma T^4$$

gdzie  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ . Wynika z niego, iż luminancja promieniowania cieplnego ciała jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury. Prawo to stało się fundamentem współczesnej termografii.

Termografia i termowizja obejmują metody badawcze polegające na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metody te są oparte na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne (rys. 1).



Rys. 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego [13]

Wykonanie pomiarów temperatury metodami bezkontaktowymi wymaga znajomości zjawisk fizycznych, które mają miejsce podczas pomiarów. Materiał, z którego wykonany jest obiekt mierzony, stan jego powierzchni, czynniki zewnętrzne (w tym atmosferyczne) mają duży wpływ na dokładność pomiaru.

Jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących możliwości pomiarowe metodami bezkontaktowymi jest rozdzielczość optyczna. Jest to stosunek odległości do średnicy pola pomiaru.

Jeżeli np. rozdzielczość optyczna wynosi 50:1, oznacza to, że przy odległości równej np. 1200 mm, średnica pola pomiaru będzie wynosić 24 mm (natomiast dla rozdzielczości 10:1 przy tej samej odległości 1200 mm średnica mierzonego pola wynosiłaby aż 120 mm). Im większa rozdzielczość optyczna, tym pomiar z dużych odległości jest bardziej precyzyjny.

Drugim istotnym parametrem mającym wpływ na dokładność wykonywanych pomiarów jest wspomniany już współczynnik emisyjności  $\epsilon$ . Współczynnik ten zależy od materiału, z którego zbudowany jest obiekt, oraz stanu jego powierzchni. Zakres emisyjności wynosi od 0,1 dla obiektów silnie odbijających światło do 1,0 dla obiektów idealnie czarnych.

W podstawowych pirometrach emisyjność ustawiona jest na stałe (0,95–0,97) i jest odpowiednia dla 90% typowych pomiarów. Wyższej klasy pirometry mają współczynnik  $\epsilon$  regulowany płynnie. Możliwość regulacji pożądana jest głównie przy wykonywaniu pomiarów wymagających największej dokładności. W tabeli 1 zostały przedstawione wartości współczynnika  $\epsilon$  różnych materiałów.

TABELA 1

Wartości współczynnika  $\epsilon$  różnych materiałów

Material	Emisyjność
Asfalt	0,90÷0,98
Beton	0,94
Piasek	0,92÷0,96
Śnieg	0,83
Węgiel drzewny (pył)	0,96
Tlenki chromowe	0,81
Tlenki miedzi	0,78
Tlenki żelaza	0,78÷0,82

### 3. Urządzenia do bezkontaktowego pomiaru temperatury

Urządzenia do bezkontaktowych pomiarów temperatury możemy podzielić na takie, które mierzą temperaturę w określonym punkcie lub rejestrują jej rozkład na powierzchni. Do bezkontaktowych pomiarów punktowych są stosowane pirometry oraz specjalne głowice pomiarowe. Urządzenia te zbudowane są z układu optycznego, detektora poczerwieni i modułu elektronicznego przetwarzającego sygnał elektryczny na wartość temperatury. Wynik pomiaru może być dostępny w postaci cyfrowej na monitorze pirometru lub w formie sygnału.

Określenie „pomiar punktowy” jest umowne i w rzeczywistości wielkość obszaru, z którego dociera promieniowanie podczerwone, jest uzależniona od układu optycznego przyrządu i od odległości, z jakiej prowadzony jest pomiar. Na przykład, z odległości 2 m prosty pirometr mierzy średnią temperaturę z obszaru koła o średnicy ok. 70 mm. Oznacza to, że precyzyjny pomiar temperatury obiektów o niewielkich rozmiarach z dużych odległości jest niemożliwy, ponieważ pirometr uśredni temperaturę obiektu oraz jego tła. Wynik pomiaru może być obarczony dużym błędem.

#### Pirometry

Pirometry są przyrządami do pomiaru temperatury, w których wykorzystywana jest zależność między wypromieniowaną energią a temperaturą. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się moc ogólna promieniowania oraz moc promieniowania w poszczególnych długościach fal. Jednocześnie maksimum mocy emitowanej przesuwają się w kierunku fal krótkich. Wykorzystując te zależności, zbudowano trzy podstawowe rodzaje pirometrów:

- radiacyjne,
- monochromatyczne,
- bichromatyczne.

Głównym elementem każdego z wymienionych urządzeń jest przetwornik energii promienistej na sygnał elektryczny. Stosowane są przetworniki fotoelektryczne, zamieniające bezpośrednio energię promieniowania na sygnał elektryczny oraz przetworniki, w których następuje zamiana energii promieniowania na energię cieplną. W tych ostatnich przetwornikach energia promieniowania odbierana jest przez płytkę absorpcyjną, powodując jej ogrzewanie. Temperaturę płytki ustala się na taką wartość, przy której następuje równowaga między mocą absorbowaną a chłodzeniem i jej stratami energetycznymi. Przyrost temperatury płytki jest mierzony termoelementami lub termorezystorami. W celu zwiększenia czułości termoelementy łączy się szeregowo po kilka sztuk w tzw. termostosy. Umieszczone są one na ogół w ochronnych, próżniowych lub wypełnionych gazem szlachetnym bańkach szklanych. Wówczas spełniają one jednocześnie rolę płytek absorpcyjnych.

Klasyczne pirometry, niezależnie od zastosowanej na drodze toru pomiarowego technologii, umożliwiają pomiar temperatury w granicach od ok. 400 do prawie 3500°C, z dokładnością na poziomie 1–2%. Do pomiaru niższych temperatur wykorzystuje się wyspecjalizowane pirometry niskotemperaturowe. Tego typu przyrządy pozwalają mierzyć temperaturę od –50°C. Wykorzystują one zwierciadlane układy optyczne, w których zwierciadła wykonywane są z wypolerowanych powierzchni stopów srebra zabezpieczonych pokryciami chroniącymi metal przed wpływem czynników atmosferycznych i pyłów. Dodatkowo powierzchnie zwierciadeł pokrywa się cienką warstwą germanu, a całość układu optycznego montuje jako hermetyczny zespół zabezpieczony od zewnątrz szybą wykonaną ze zmodyfikowanego szkła fluorytowego.

### **Kamery termowizyjne**

Urządzeniem pomiarowym o większych możliwościach jest kamera termograficzna umożliwiająca wizualizację i rejestrację rozkładu temperatury w postaci kolorowych termogramów. Kolory umownie reprezentują wartości temperatury, które można odczytać w postaci cyfrowej po wskazaniu danego punktu na monitorze kamery lub komputera w trakcie obróbki danych. Rozdzielczość przestrzenna kamery jest wyższa niż pirometrów. Przykładowo, kamera o rozdzielczości 0,6, umożliwia poprawny pomiar temperatury obiektów o wymiarach 6x6mm z odległości 10 m.

Obecnie produkowane kamery termalne z matrycami cyfrowymi i chłodzeniem w układzie zamkniętym, wyposażone w bogate oprogramowanie stwarzają dużo większe możliwości zobrazowań i opracowań zarejestrowanych obrazów termalnych. Z reguły brak jest wiarygodnych informacji o wartościach mierzonych temperatur na zarejestrowanych termogramach w wyniku braku dokładnej znajomości współczynnika emisyjności badanych elementów terenowych, wpływu oddziaływań obiektów sąsiadujących oraz wpływu warunków atmosferycznych podczas rejestracji termogramów. Zbyt wiele czynników oddziaływających na badany element podczas rejestracji i niemożność ich poznania dotychczas zniechęcała do wykorzystywania termowizji w analizach środowiska, które również podlega ciągłym zmianom. Aby częściowo uniknąć tych problemów, proponuje się często rezygnację z posługiwania się wartościami temperatur na rzecz ich różnic określanych z termogramów zarejestrowanych w danych przedziałach temperatur.

Kamery termowizyjne rejestrują zwykle promieniowanie podczerwone w odpowiednim paśmie zgodnie z zadaniem poziomem i zakresem temperatury lub dobierają parametry

te automatycznie. Umożliwiają one cyfrową rejestrację obrazów na specjalnej karcie pamięci (np. SD lub SDHC), której zawartość może być następnie przeniesiona do komputera za pomocą czytnika. Zapisane w komputerze termogramy mogą być poddawane interpretacji i obróbce cyfrowej specjalnym pakietem programów. Efektem tej obróbki są barwne obrazy otrzymywane na monitorze komputera z wartościami temperatur porządkowanymi poszczególnym barwom.

## 4. Nowe technologie w monitoringu składowisk powęglowych

Prowadzenie nadzoru aerologicznego i termicznego na składowiskach odpadów powęglowych według zasad GIG Katowice obejmuje sieć punktów pomiarowych, w których w odstępach od kilkunastodniowych do comiesięcznych wykonywane są pomiary temperatury wnętrza obiektu na głębokości 1 m, specjalistycznym sprzętem z sondą pomiarową – analizatorem spalania gazów, pirometrami oraz cyfrowymi miernikami temperatury. W trakcie tych badań określany też jest skład chemiczny atmosfery wnętrza obiektu pozwalający w momencie pomiaru określać zmiany stężeń gazów takich jak stężenie tlenu, dwutlenku węgla i zawartość tlenu.

Badania dotychczas prowadzone są okresowo przez próbobiorców z częstotliwością zależną od oceny zagrożenia. Wydawało się, że budowanie infrastruktury kontrolno-pomiarowej na całym składowisku jest zbyt kosztowne.

Badania zjawisk związanych z powstawaniem i rozwojem ognisk samozagrzewania z zastosowaniem nowoczesnych technologii podjęto w ramach projektu badawczego własnego [9, 10], realizowanego na wydziale Górnictwa i Geoinżynierii, a finansowanego przez MNiSW. Przyjęto tam dwustopniowe badania i analizy stanu termiczno-gazowego składowiska. W pierwszej kolejności umiejscawiano ogniska samozagrzewania za pomocą badań termowizyjnych. Drugim krokiem była obserwacja rozwoju ognisk metodą ciągłego monitoringu gazowo-termicznego. Te badania prowadzono z wykorzystaniem telemonitoringu w bezprzewodowej sieci punktów pomiarowych. Dane rejestrowane w systemie telemonitoringu są na bieżąco analizowane w celu oceny zagrożenia pożarowego oraz określenia konieczności rozpoczęcia działań prewencyjnych [11].

### **Pomiar temperatury składowiska odpadów z powierzchni terenu w czasie wizji lokalnej**

Przedmiotem analizy było zwałowisko odpadów XXXX znajdujące się w miejscowości AAAA o współrzędnych:

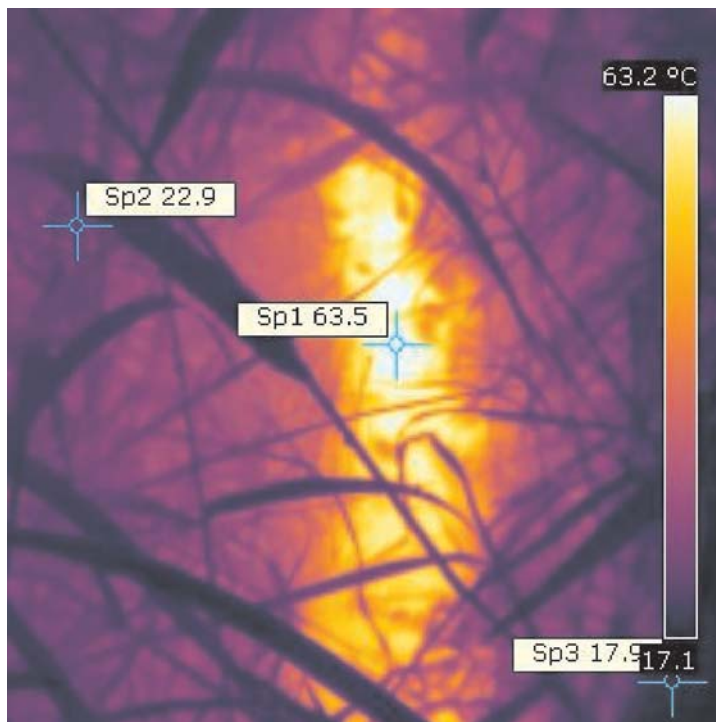
- współrzędne hałdy: GPS 50,056391; 18,494002;
- współrzędne geograficzne: +50° 3' 23,01", +18° 29' 38,41".

Badania przeprowadzono za pomocą kamery termowizyjnej typu *Flir i60*, o parametrach:

- zakres mierzonych temperatur: od -20°C do +350°C,
- rozdzielczość 180 × 180 pikseli,
- dokładność pomiaru: ±2%,
- rozdzielczość termiczna 0,1°C.

Analizę termogramów wykonano przy użyciu oprogramowania *Flir QuickReport*.

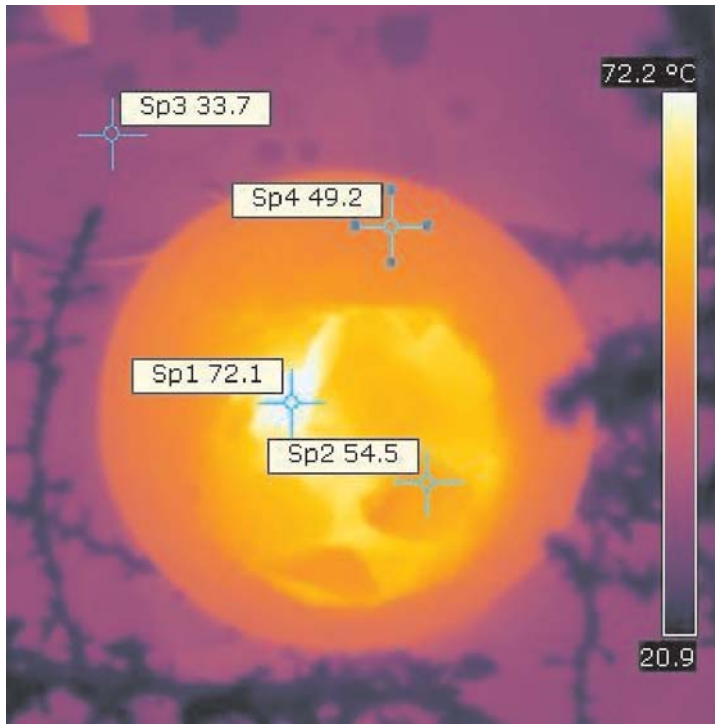
Hałda XXXX podlega okresowej obserwacji i kontroli termiczno-gazowej, a z uwagi na poważne zagrożenie dla środowiska w przypadku stwierdzenia powstającego samozapalenia podejmowane są działania profilaktyczne. Na termogramie (rys. 2) pokazano rozkład temperatur w szczelinie, gdzie widać wyraźne podwyższenie temperatury sięgające ponad 60°C na powierzchni hałdy. Kształt obszaru o podwyższonej temperaturze pozwala przypuszczać, że w miejscu tym przebiega uskok, w którym uwalniane są gazy z wnętrza hałdy. W odległości ok. 20 cm od uskoku temperatura powierzchni hałdy jest znacznie niższa i tylko nieznacznie (od 2 do 4°C) wyższa od najniższych temperatur obserwowanych na hałdzie.



Rys. 2. Rozkład temperatur w szczelinie

Na termogramie (rys. 3) pokazano wyniki pomiarowe w punkcie, w którym w hałdzie wkopana jest rura służąca do lokalnego pomiaru parametrów termiczno-gazowych i prowadzenia działań profilaktycznych. W normalnym stanie rura jest zaczopowana od góry. Po odsłonięciu pomiary pokazują wyraźnie podwyższoną temperaturę zarówno na powierzchni otaczającej rurę (ponad 30°C), jak i w głębi rury. Maksymalna temperatura zmierzona w punkcie Sp1 na termogramie wynosi 72,1°C.





Rys. 3. Rozkład temperatur wewnątrz rury

### Termowizja w rejestracji środowiska i obrazowaniu terenu z pułapu lotniczego

Zastosowanie obrazowania terenu wymaga wykonywania zdjęć aktywności termicznej rozległych składowisk odpadów. Pomiar temperatury składowiska odpadów z powierzchni terenu w czasie wizji lokalnej nie zabezpiecza próbnobiorców przed zagrożeniami wynikającymi z możliwości kontaktu z podwyższoną temperaturą powierzchni składowiska czy gazami pożarowymi. Istnieje również zagrożenie powstawania pustek bezpośrednio pod powierzchnią na skutek wypalenia materiału.

W tej sytuacji podjęto próby zobrazowania składowisk odpadów powęglowych z pokładu samolotu. Rejestracja temperatury składowisk odpadów z powietrza możliwa jest z pokładu samolotu wyposażonego w kamerę termowizyjną, którym przeprowadza się nalot na badany obiekt, wykonując wzdłuż trajektorii lotu zdjęcia stanowiące materiał badawczy.

Seria termogramów umożliwia stworzenie termograficznej mapy terenu, którą w dalszej kolejności można poddawać analizie za pomocą numerycznych metod przetwarzania obrazu. Zdjęcia rejestrowane kamerą termowizyjną zawierają informacje na temat energii promieniowania cieplnego emitowanej przez ciała. W badaniach wykonano termogramy kamerą termowizyjną ThermoCAM SC640.

**Dane techniczne kamery termowizyjnej ThermaCAM SC640**  
(źródło: <http://photonics.com>)

<b>Pole widzenia / minimalna ogniskowa</b>	24 × 18° / 0,3 m
<b>Rozdzielczość przestrzenna (IFOV)</b>	0,65 mrad
<b>Czułość termiczna</b>	60 mK przy 30°C
<b>Częstotliwość obrazu</b>	30 Hz bez przepłotu
<b>Rodzaj detektora</b>	matryca niechłodzonych detektorów mikrobolo- metrycznych (FPA), 640 × 480 pikseli
<b>Zakres widmowy</b>	7,5–13 μm
<b>Zakres temperaturowy</b>	–40°C do +500°C w dwóch podzakresach, opcjonalnie do +2000°C
<b>Dokładność</b>	±2°C, ±2% odczytu
<b>Tryb pomiarowy</b>	punkty/obszary (prostokąty, okręgi), izotermi (powyżej, poniżej, interwał) delta T
<b>Korekcja transmisji atmosferycznej</b>	automatyczna, na podstawie wprowadzonej od- ległości, temperatury atmosfery i wilgotności względnej
<b>Korekcja emisyjności</b>	zmienna, od 0,01 do 1,0, lub wybór z ustalonej listy materiałów

Zarejestrowane termogramy na pokładzie samolotu mogą być rejestrowane w postaci cyfrowej i gromadzone w pamięci komputera lub przesyłane do stacji naziemnej drogą radiową. Pozyskany termalny obraz rastrowy bywa zaszumiany, stąd potrzeba wstępnej analizy i selekcji termogramów oraz filtracji, a także skalowania. Wykorzystanie tej metody wymaga specjalistycznego oprogramowania do zbierania i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym oraz doświadczenia w zakresie analizy i rozpoznawania obrazów.

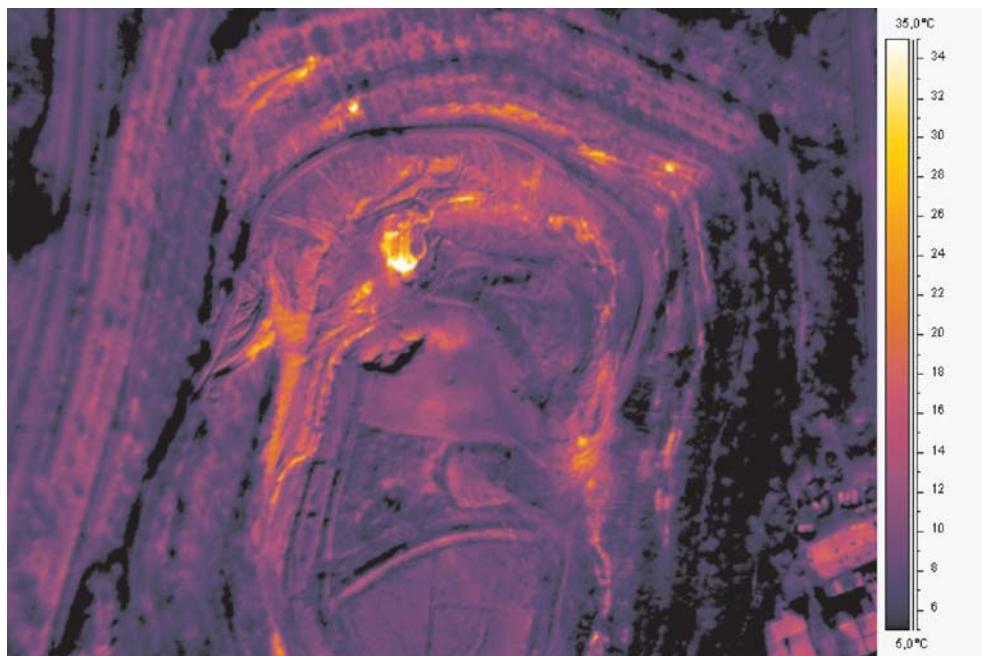
W szczególności wymaga:

- analizy strumieniowej danych wizyjnych,
- rozpoznawania i analizy obrazów,
- automatycznej identyfikacji zmian w rejestrowanych obrazach.

Takie zadania wymagają doświadczenia w zakresie programowania systemów, szczególnie w zakresie analizy i rozpoznawania obrazów.

Opracowanie zarejestrowanych obrazów termalnych polegało na analizie powierzchniowego rozkładu temperatury miejsc emisji ciepła, odczytaniu wartości temperatury w wybranych punktach i pomiarze współrzędnych pikselowych, analizie rozkładu temperatury wzdłuż przekrojów, wzajemnie prostopadłych lub dowolnie definiowanych, oraz odczycie z panelu informacji o parametrach rejestracji. Na podstawie tych danych wykonuje się opisową interpretację termogramów. W procesie opracowania termograficznego wykorzystano dodatkowo z funkcji konturowania, zoomowania, interpolacji i zmiany palety kolorów.

Na rysunku 4 zilustrowano przykładowy termogram zarejestrowany kamerą termowizyjną ThermaCAM SC640.

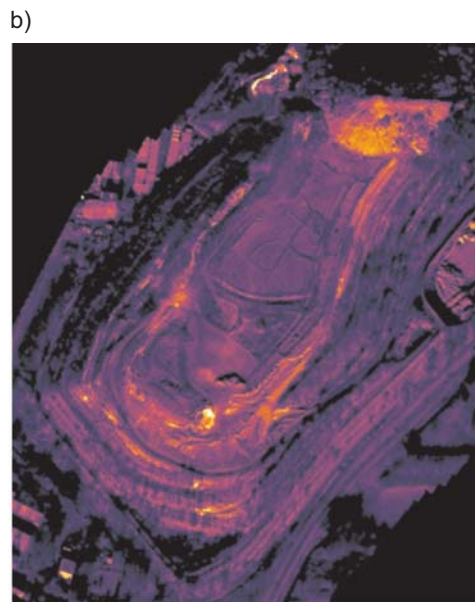


**Rys. 4.** Rozkład temperatur zarejestrowany kamerą termowizyjną w czasie nalotu

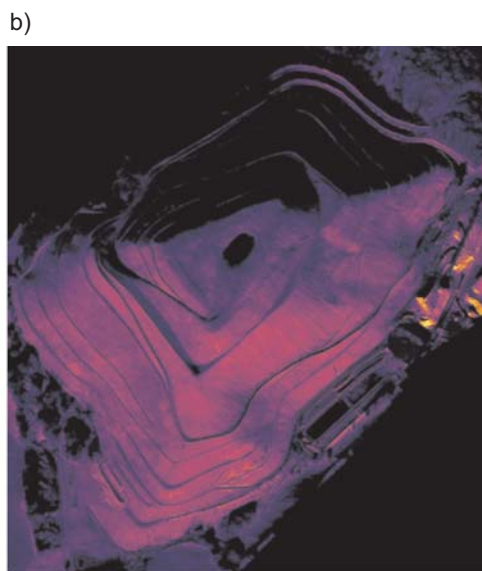
Celem pomiarów temperatury jest identyfikacja (w obrębie badanego obiektu) fragmentarycznych obszarów składowisk, aby wykryć miejsca o podwyższonej temperaturze oraz samozapalenia się węgla. Ich odnalezienie jest możliwe na drodze poszukiwania rejonów o podwyższonej aktywności temperaturowej na termograficznej mapie terenu. Badania prowadzono na kilku składowiskach odpadów powęglowych, z czego poniżej zaprezentowano dwa, a mianowicie hałdę XXXX położoną w miejscowości AAAA, o współrzędnych satelitarnych GPS 50,1413 18,8787 oraz hałdę YYYYY znajdującą się w miejscowości BBBB, o współrzędnych satelitarnych GPS 50,1408 18,8553. Na kolejnych rysunkach pokazano zdjęcia satelitarne i mapy termograficzne hałdy XXXX (rys. 5a i b) oraz hałdy YYYYY (rys. 6a i b).

Analizę obrazów termowizyjnych przeprowadzano w środowisku naukowo-technicznym MATLAB. Do tego celu posługiwano się wyspecjalizowanym pakietem *Image Processing Toolbox* [5]. Odpowiednie przetwarzanie termogramów pozwoliło na odczyt zapisanych w nich informacji.

Przetwarzanie obrazów termowizyjnych, którego celem jest odczytanie zapisanych w termogramach informacji pomiarowych, realizowane jest za pomocą programu, zaprojektowanego specjalnie na potrzeby omawianego problemu. Dane wejściowe programu stanowi termogram, który w trakcie przeprowadzania na nim operacji numerycznych reprezentowany jest wewnątrz środowiska MATLAB przez zmienną macierzową.



**Rys. 5.** Hałda XXXX – zdjęcie satelitarne (a); termograficzna mapa terenu (b)



**Rys. 6.** Hałda YYYY – zdjęcie satelitarne (a); termograficzna mapa terenu (b)

Podczas rejestracji obrazów kamerą termowizyjną wykorzystywany jest tylko jeden parametr, omawiana już wcześniej długość fali, co w konsekwencji umożliwia akwizycję obrazów monochromatycznych. Barwność termogramu tworzona jest w sposób programowy wewnątrz urządzenia, w celu poprawy jakości rozróżnialności temperatur. Do analizy numerycznej wystarczającym nośnikiem informacji jest termogram czarno-biały, stąd pierwszym krokiem jest transformacja obrazu barwnego w monochromatyczny. W celu wykazania rejonów podejrzanych o nadmierną aktywność termiczną w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących wewnątrz składowiska obrazu poddano binaryzacji. Takie przekształcenie polega na zamianie obrazu monochromatycznego w obraz zapisany za pomocą dwóch barw: białej i czarnej. Jako kryterium podziału na barwy przyjęto próg na wybranym poziomie skali szarości, powyżej którego piksele stają się białe, pozostałe zaś czarne. W przypadku analizowanych termogramów założono 50-procentowy próg odcięcia, co odpowiada połowie zakresu temperaturowego skali pomiarowej. Autorzy ponadto przedstawili sposób przetwarzania obrazu monochromatycznego w obraz przedziałów temperaturowych (obszary quasi-izotermiczne), gdzie jako kryterium podziału wybrano odpowiednie progi na ustalonych poziomach skali szarości, odpowiadające dalej żądanym temperaturom.

Ostatnim z problemów analizy była próba oszacowania współrzędnych satelitarnych GPS dla miejsc podejrzanych o nadmierną aktywność termiczną. Obrazem bazowym, na podstawie którego przeprowadzono obliczenia, był zmodyfikowany termogram zbinaryzowany. Modyfikacja polegała na filtracji obrazu binarnego wzdłuż wierszy macierzy w taki sposób, by sąsiadujące ze sobą w kolumnie piksele zostały zastąpione przez pojedynczy piksel środkowy. Dzięki takiej operacji zidentyfikowano punkty lub też linie leżące w granicach obszarów o podwyższonej temperaturze. W celu oszacowania współrzędnych GPS przyjęto bazowe współrzędne dla charakterystycznych punktów termogramu na krańcach obrazu (każdy z boków obramowania termogramu). Odejmując od siebie parami wartości współrzędnych długości geograficznych oraz szerokości geograficznych i dzieląc otrzymane odległości przez odpowiednie parametry rozdzielczości obrazu, można było w każdym z kierunków wyznaczyć wartość kroku zmiany współrzędnych, a tym samym przypisać współrzędne GPS zidentyfikowanym punktom i liniom.

## 5. Podsumowanie

Skuteczność prac profilaktycznych związanych z likwidacją ognisk pożarowych zależy od dokładnej oceny stanu termicznego składowiska i umiejscowieniu ognisk pożarowych w składowisku odpadów powęglowych. Tylko w ten sposób możliwe jest ograniczenie ich zasięgu i stopniowe wygaszanie.

W celu odnalezienia ognisk pożaru na zwałowisku prowadzona jest jego okresowa ocena termiczna. Badania są wykonywane kamerą termowizyjną, aby uzyskać obraz rozkładu temperatury, co pozwala na wskazanie obszarów o podwyższonej temperaturze. Użycie kamery termowizyjnej do graficznego przedstawienia rozkładu temperatur jest przykładem zastosowania nowoczesnej technologii do celów badawczych.

Zastosowanie obrazowania terenu z pułapu lotniczego ma kapitalne znaczenie z uwagi na czas niezbędny do wykonywania zdjęć aktywności termicznej rozległych składowisk

odpadów. Nie bez znaczenia jest fakt ochrony próbobiorców przed zagrożeniami wynikającymi z możliwości kontaktu z podwyższoną temperaturą powierzchni składowiska czy gazami pożarowymi. Istnieje również zagrożenie powstawania pustek bezpośrednio pod powierzchnią na skutek wypalenia materiału.

Badania termowizyjne promieniowania podczerwonego pochodzącego z badanego obiektu umożliwiają cyfrową rejestrację rozkładu temperatur badanego obiektu. Analiza termogramów pozwala na określanie rozkładu temperatur oraz wykreślanie izoterm, a także na dalsze analizy wraz z modelowaniem numerycznym zjawisk.

Właściwa ocena rozkładu temperatur z wykorzystaniem kamer termowizyjnych powinna uwzględniać czynniki wpływające na promieniowanie podczerwone w powietrzu [4]. Szczególnie para wodna oraz dwutlenek węgla, a także odparowania węglowodorów w początkowej fazie samozagrzewania, mają wpływ na tłumienie promieniowania i zniekształcanie wyników pomiarów. Ponadto należy eliminować wpływ nasłonecznienia mierzonej powierzchni.

#### LITERATURA

- [1] *Chunli Liu, Shushen Li, Qingdang Qiao, Jingshu Wang, Ziqiang Pan*: Management of Spontaneous Combustion in Coal Mine Waste Tips in China, Water, Air, & Soil Pollution 1998, Volume 103, Numbers 1–4
- [2] *Dattoma V., Marcuccio R., Pappalitere C., et al.*: Thermography investigation of sandwich structure made of composite material. International Journal of Non Destructive Testing & Experiment 2001, 34(8), s. 515–520
- [3] *Gielisch H.*: Exploration von Kohlefeuern – Einsatz innovativer und erprobter Explorationstechnik zur Ortung und Bekämpfung von Kohlebränden, Bergbau 3/2006, s. 116–122
- [4] *Korski J.*: Termowizja w monitoringu i zwalczaniu pożarów składowisk odpadów pogórnich. Górnictwo i Geologia (kwartalnik AGH) 2010, tom 5, zeszyt 2, s. 91–103
- [5] *Pratap R.*: MATLAB 7 dla naukowców i inżynierów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2007 (ISBN-10 83-01-15017-3)
- [6] *Sawicki P.*: Opracowanie obrazów cyfrowych w systemie video-termalnym VISION PLUS, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 1999, Vol. 9
- [7] *Tang Shilu*: Using remote sensing and GIS techniques in spatial information monitoring of coal refuse disposal piles. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 2008, Vol. XXXVII, Part B8, s. 177–182
- [8] *Wang Yun-jia, Sheng Yao-bin, Gu Qiang, Sun Yue-yue, Wei Xiu-jun, Zhang Zhi-jie*: Infrared thermography monitoring and early warning of the spontaneous combustion of coal Gangue pile, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 2008, Vol. XXXVII, Part B8, s. 2003–2006
- [9] *Wasilewski S.*: Zastosowanie nowoczesnych technologii monitoringu w badaniach aktywności termicznej składowisk odpadów kopalnianych, Przegląd Górniczy 2009, 5–6, s. 88–92
- [10] *Wasilewski S.*: Raport roczny za 2009 rok projektu N N524 372934 pt. Badania aerologiczne i termiczne składowisk odpadów kopalnianych celem prognozowania rozwoju ognisk samozagrzewania oraz możliwości ich likwidacji, Kraków, 2010
- [11] *Wasilewski S., Korski J.*: Wczesne wykrywanie pożarów jako element monitoringu składowisk odpadów powęglowych. Early fire detection as a part of mine waste dump monitoring. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2010, nr 8, s. 3–17
- [12] <http://www.energyjustice.net/coal/wastecoal/>
- [13] <http://www.skaczmarek.ps.pl/Presentation1.ppt>