

TERMOWIZYJNE OBSERWACJE SKARP W KOPALNI ODKRYWKOWEJ

WPROWADZENIE

Celowość podjęcia eksperymentalnych prac w zakresie termowizyjnych obserwacji skarp uzasadniona jest przede wszystkim znaczeniem problematyki geologiczno-inżynierskiej dla funkcjonowania kopalni odkrywkowej oraz związaną z tym koniecznością ciągłego rozszerzania i doskonalenia bazy metodycznej celem właściwej oceny warunków stateczności. Ważną kwestią w tym zakresie jest specyfikacja obszarów o szczególnej podatności do osuwisk, a następnie wykrywanie wstępnej fazy rozwoju deformacji, pozwalające na skuteczne przeciwdziałanie wraz z podjęciem trafnych decyzji ruchowych. Jest to tym bardziej uzasadnione, że pomimo prowadzenia intensywnych badań, istnienia szerokiego wachlarza metod obserwacyjno-pomiarowych, skonstruowania specjalnej aparatury (o wielu pomysłowych rozwiązaniach) do rejestracji przemieszczeń na powierzchni i wewnątrz masywu nie udało się jak dotąd opracować uniwersalnego i niezawodnego systemu permanentnej kontroli stateczności skarp. Dlatego też wykorzystanie termowizji jako metody komplementarnej w stosunku do stosowanych dotychczas metod klasycznych wydaje się być w pełni uzasadnione. Ponadto, metody bezpośrednio bazują na ogół na punktowym określeniu odpowiednich cech fizyczno-mechanicznych utworów, jak również wyznaczeniu zespołu parametrów opisujących stany naprężeń oraz ewentualne przemieszczenia występujące w obrębie masywu gruntowego. Termowizja natomiast jest metodą bezkontaktową, umożliwiającą szybkie monitorowanie badanego obiektu, a więc w tym przypadku uzyskiwanie infor-

* Dr inż. Stanisław Mularz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Geodezji Górniczej i Przemysłowej, Zakład Fotogrametrii, al. Mickiewicza 30, 30-05^a Kraków

macji o wielkości, rozkładzie i zmianach promieniowania termalnego na całej powierzchni skarpy. Ma to istotne znaczenie dla geologiczno-inżynierskiej interpretacji wyników obrazowania termalnego.

Termowizja należy do grupy zdalnych metod badawczych, bazujących na detekcji długofalowego promieniowania podczerwonego, zaliczanego do tzw. podczerwieni termalnej. Wykorzystywana jest tu zasada, że każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego jest źródłem tego zakresu promieniowania. Kamery termowizyjne przetwarzają w czasie rzeczywistym powierzchniowy rozkład radiacji termalnej badanego obiektu w obraz widzialny.

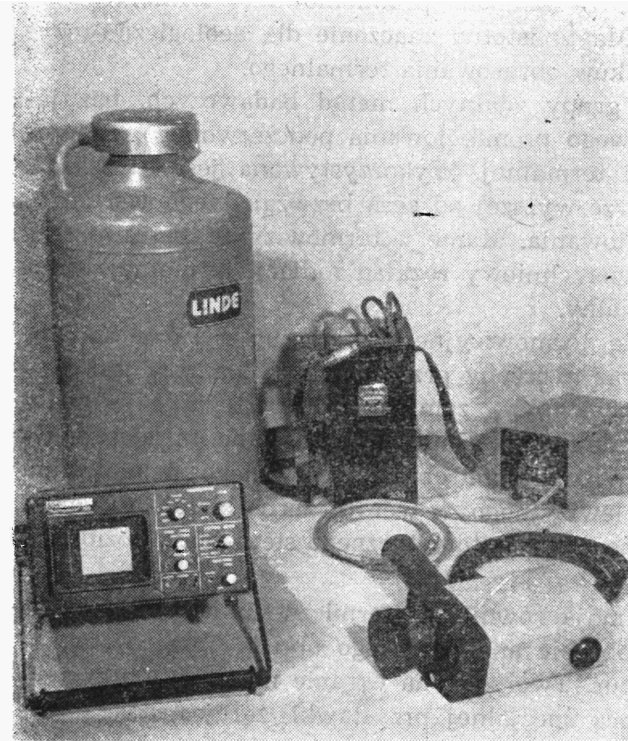
Produkowane urządzenia termowizyjne działają na zasadzie układu telewizji przewodowej. Obraz tworzony przez obiektyw kamery jest skanerowo analizowany, a następnie zamieniony elektryczne sygnały wizyjne, które po odpowiednim wzmocnieniu przesyłane są łączem do urządzenia obrazującego. Wizualizacja obrazu termalnego dokonywana jest na ekranie monitora telewizyjnego, w wersji czarno-białej lub barwnej, z możliwością manualnego lub automatycznego sterowania poziomem kontrastu i jasności.

Urządzenia obrazujące mają również izotermiczne układy funkcyjne służące do wybierania w obrębie analizowanego obrazu obszarów o zadanym przedziale temperatur. Tworzony na ekranie monitora obraz termalny może być, za pomocą specjalnej przystawki, zarejestrowany fotograficznie. Bardziej udoskonalone wersje mają również możliwość zapisu obrazu na taśmie magnetycznej.

ZAKRES I WARUNKI WYKONANIA OBSERWACJI

Testowe badania termalne fragmentu zbocza w kopalni „Machów” wykonano przy użyciu zestawu termowizyjnego AGA-750 produkcji szwedzkiej. System ten składa się z kamery termalnej, urządzenia obrazującego oraz układu zasilania (fot. 1). Jest to urządzenie przenośne, a dzięki swej portatywności nadaje się do wykonywania badań w trudnych warunkach polowych.

Kamerą prowadzi się detekcję promieniowania podczerwonego w zakresie $2\ \mu\text{m}$ — $5,6\ \mu\text{m}$ dla rzeczywistej temperatury obiektów w przedziale od -20°C do $+900^{\circ}\text{C}$ (z możliwością rozszerzenia zakresu do $+2000^{\circ}\text{C}$ dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów). Zwraca uwagę wysoka rozdzielczość wyznaczania różnic temperatury, wynosząca $0,2^{\circ}\text{C}$, jeżeli obiekt znajduje się w temperaturze $+30^{\circ}\text{C}$ i czułości 2°C . Urządzenie obrazujące umożliwia prezentację obrazu w wersji normalnego i odwróconego odwzorowania (pozytyw/negatyw), a także z pojedynczą i podwójną izotermą. Poziomą izotermę może być w sposób ciągły zmieniany w całym zakresie rejestrowanego promieniowania, umożliwiając tym



Fot. 1. Zestaw termowizyjny AGA-750

Phot. 1. AGA-750 thermovisional complex

samym wyodrębnienie zmian wielkości radiacji termalnej w obrębie całego obrazu

Posiadany zestaw umożliwiał ponadto fotograficzną rejestrację dowolnej postaci zwiualizowanego na monitorze termogramu.

Obszar testowy zlokalizowany był na południowym zboczu odkrywki i obejmował około 130-metrowy odcinek rozległej niszy osuwiskowej (fot. 2). W polu widzenia kamery znajdowała się stroma, około 10-metrowej wysokości zerwa oraz część leżących u jej podnóża obsuniętych gruntów. Wytypowany do obserwacji fragment charakteryzował się urozmaiconą mikrorzeźbą oraz znacznym zróżnicowaniem warunków wodnych, a więc odpowiadał przyjętym w założeniu kryteriom.

Wyrównana, miejscami nawet gładka, powierzchnia górnej części niszy kontrastuje z ukształtowaniem dolnej partii, gdzie zdeponowany materiał jest intensywnie erodowany zarówno przez wody opadowe, jak również przez wody gruntowe wypływające ze skarpy. W strefach skoncentrowanych wycieków powstają w efekcie dość głębokie rozcięcia, tworzące się na kierunkach największego spadku, a więc w większości prostopadle do obrysu niszy.

Masyw gruntowy *in situ*, odsłaniający się w ścianie niszy, budują od góry utwory czwartorzędowe, w przewodzie piaszczyste oraz leżą-



Fot. 2. Widok ogólny pola testowego z lokalizacją miejsc opróbowania

Phot. 2. General view of the testing site with the samples localization

ca poniżej stropowa partia iłów krakowieckich, złożona z naprzemianległych przewarstwień piasków drobnych, piasków pylastych i pyłów oraz cienkich wkładek ilastych.

Obsuniętą masę koluwiów tworzą w tym rejonie głównie grunty piaszczyste, różniące się składem granulometrycznym, barwą, a także genezą.

Program badań termowizyjnych przewidywał wykonanie pełnego cyklu obserwacji, obejmującego trzy serie obrazowania wybranego pola testowego, tj.:

- obrazowanie w ciągu dnia, w warunkach bezpośredniego oddziaływania słońca,
- obrazowanie wieczorem, tuż po zachodzie słońca, a więc w warunkach maksymalnego kontrastu termalnego,
- obrazowanie nad ranem, przed wschodem słońca, w sytuacji „wychłodzenia” podłoża, kiedy różnego rodzaju zakłócenia znikają lub są minimalne, umożliwiając rejestrację subtelnych nawet różnic radiacji termalnej.

Ze względu na usterki techniczne (awaria kamery) nie zdołano zrealizować trzeciej serii obserwacji termalnych, najbardziej obiecującej

z metodycznego punktu widzenia. Każda seria obserwacyjna składała się z następujących operacji:

- próbna wizualizacja w różnych zakresach czułości oraz przy zmiennym poziomie jasności i kontrastu w celu określenia optymalnych warunków obrazowania,
- wstępna analiza obrazu (z wykorzystaniem izotermicznych układów funkcyjnych), której celem było doskonalenie kwantyzacji efektów obrazowania oraz powiązanie treści termogramu z sytuacją terenową,
- fotograficzna rejestracja wybranych termogramów dokumentujących kolejne fazy przetwarzania obrazu termalnego.

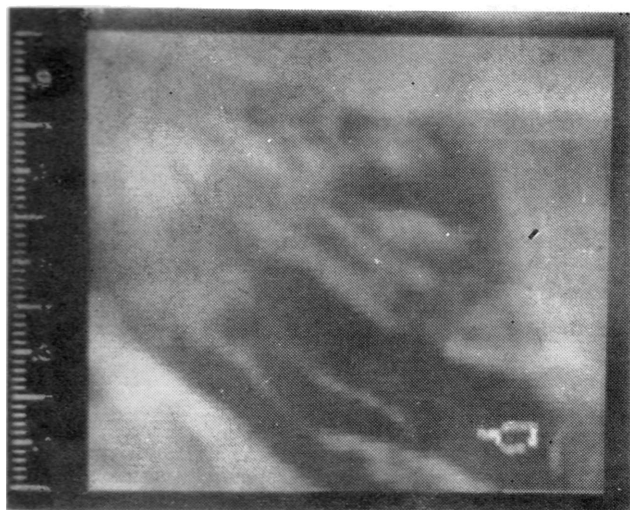
W ramach prac terenowych pobrano również próby gruntów z warstwy powierzchniowej celem określenia ich wilgotności naturalnej w strefach wykazujących wyraźne różnice w obrazie termalnym skarpy. Wyniki badań laboratoryjnych wraz z makroskopowym opisem prób zawiera tab. 1, zaś lokalizację miejsc poboru prób zaznaczono na fot. 2.

Tabela 1

Table 1

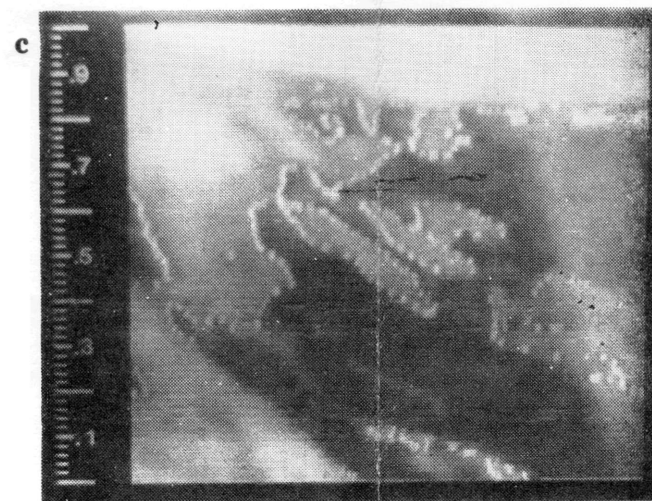
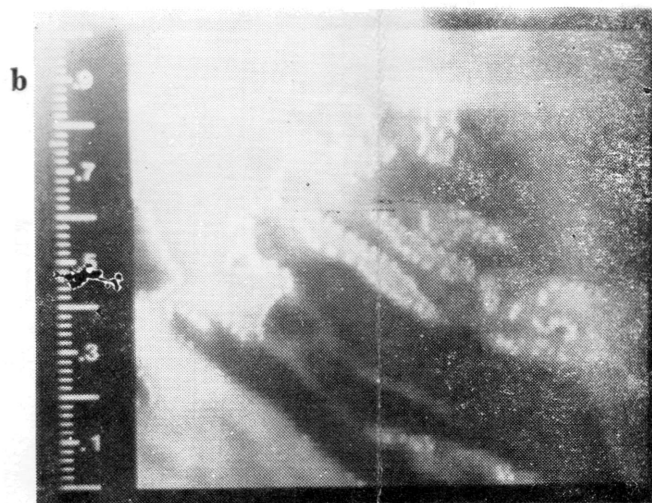
Wyniki badań laboratoryjnych prób gruntu
Results of the soil samples laboratory studies

Numer stanowiska (Site No)	Wilgotność naturalna W_n (Natural moisture) [%]	Oznaczenie makroskopowe gruntu (Macroscopic designation of soil)
1	19,5	piasek drobny + piasek gruboziarnisty żółty
2	29,2	piasek pylasty, popielaty
3	13,1	piasek średnioziarnisty, ciemno-żółty
4	18,1	piasek drobnoziarnisty, popielaty
5	18,8	piasek drobnoziarnisty, popielaty
6	24,0	piasek drobnoziarnisty, popielaty
7	11,8	piasek średnioziarnisty, jasno-żółty
8	2,0	piasek średnioziarnisty, żółty



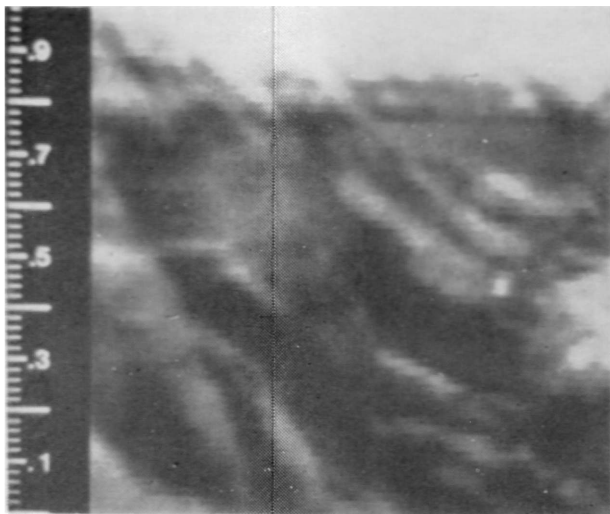
Fot. 3. Termogram „dzienny”

Phot. 3. „Day-time” thermogram

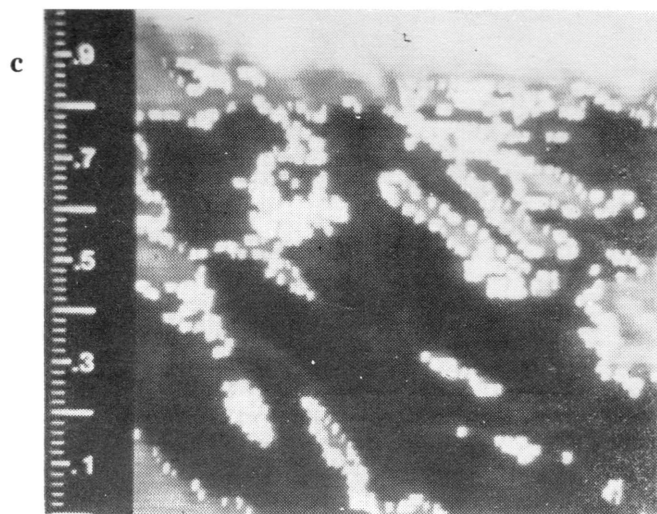
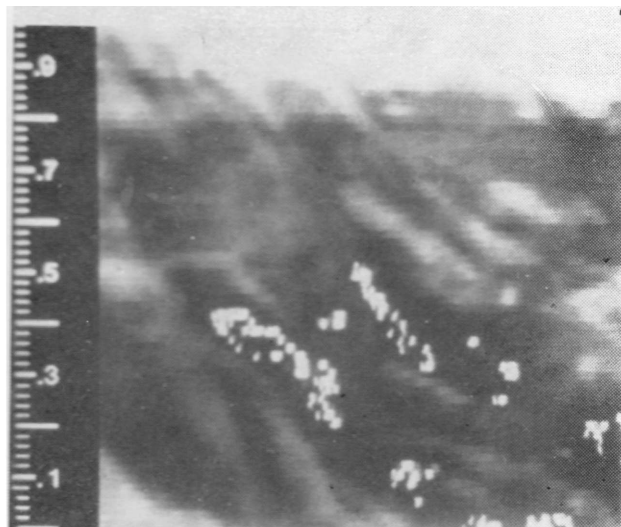


Fot. 4. Termogram „dzienny” z izoterma:
a — zakres 10°C, poziom izotermy — 0,20, **b** — zakres 10°C,
 poziom izotermy — 0,76, **c** — zakres 10°C, poziom izotermy — 0,94

Phot. 4. Isotherm including „day-time”
 thermogram:
a — 10°C range, isotherm level — 0,20, **b** — 10°C range, iso-
 therm level — 0,76, **c** — 10°C range, isotherm level — 0,94



Fot. 5. Termogram „wieczorny” — zakres 5°C
 Phot. 5. „Evening” thermogram — level 5°C



Fot. 6. Termogram „wieczorny” z izoterma:
 a — zakres 5°C, poziom izotermy — 0,20, b — zakres 5°C,
 poziom izotermy — 0,56, c — zakres 5°C, poziom izotermy — 0,80

Phot. 6. Isotherm including „evening” thermogram:
 a — 5°C range, isotherm level — 0,20, b — 5°C range, iso-
 therm level — 0,56, c — 5°C range, isotherm level — 0,80

INTERPRETACJA TERMOGRAMÓW

Analizując wyniki „dziennego” obrazowania (fot. 3), można stwierdzić, że efekt termalny wywołany jest tu przede wszystkim określoną konfiguracją i warunkami „oświetlenia” skarpy. W rozkładzie radiacji termalnej obserwuje się wyraźne nawiązanie do zróżnicowania tonalnego na zdjęciu panchromatycznym. Partie ocienione zbocza, które na zdjęciu panchromatycznym mają ciemniejszy w stosunku do otoczenia fototon, również w obrazie termalnym odwzorowują się w postaci ciemnych, niemal czarnych plam, a więc są „zimne” w badanym zakresie temperatur.

Relatywnie wysoką emisją promieniowania termalnego charakteryzują się części bezpośrednio oświetlone słońcem, tworzące na termogramach jasne, a więc „ciepłe” pola. Przy ogólnie dużym kontraście termalnym pomiędzy wydzielonymi obszarami zróżnicowanie radiacji wewnątrz tych obszarów jest stosunkowo niewielkie. Dokumentuje to sekwencja obrazów z konturem izotermicznym, gdzie na kolejnych termogramach układ izoterm dla wzrastających poziomów temperatury ulega niewielkim zmianom w obrębie analizowanych pól (fot. 4). Fakt ten można wiązać z jednej strony z dużą jednorodnością tworzywa (w prze-wadze grunty piaszczyste), z drugiej zaś z daleko idącą generalizacją efektu radiacji wynikającą z małej skali termogramów.

Rezultaty analizy wskazują zatem, że w obrazie termalnym skarpy, wykonanym w warunkach dziennych, dominują efekty promieniowania słonecznego, które dzięki dużemu natężeniu skutecznie ekranują wielokrotnie słabszą emisję „własną” obiektu.

Wyraźnie odmienną treść oraz walory interpretacyjne mają termogramy „wieczorne”. Uderza w nich przede wszystkim znaczna rozpiętość natężenia promieniowania, wyrażona poprzez dużą kontrastowość ogólną obrazu oraz wyrazistość konturów (fot. 5). Związane jest to przede wszystkim z porą obrazowania, gdyż w warunkach naturalnych maksymalny kontrast termalny występuje w stosunkowo krótkim przedziale czasu po zachodzie słońca, tzn. wówczas, gdy powstają warunki swobodnej emisji termalnej, nie zakłóconej przez oddziaływanie zewnętrznego źródła energii, jakim jest słońce. W obrazie termalnym skarpy nie znajdują teraz odzwierciedlenia cechy morfologiczne obiektu, ani też rozkład tonalny nie nasuwa skojarzeń ze zdjęciami panchromatycznymi.

Porównując termogramy obydwu serii, można bez trudu zauważyć, że w wielu przypadkach nastąpiło odwrócenie znaczenia tonu, tzn. że obszary aktywne termalnie w dzień wykazują wieczorem relatywnie mniejszą bądź nawet znikomą radiację termalną.

Zwraca ponadto uwagę różnica w odwzorowaniu górnego konturu niższy, który na termogramach „dziennych” wyraźnie odcina się od tła,

natomiast na termogramach drugiej serii jej obrys jest nieregularny, jakby poszarpany. Jest to prawdopodobnie wynik koincydencji promieniowania nieba i obiektów znajdujących się w pobliżu skarpy.

Obraz termalny stromej części niszy osuwiskowej wykazuje wyraźną strukturę warstwową, odpowiadającą zgeneralizowanej stratyfikacji zalegających w skarpie utworów czwartorzędowych (jaśniejszy fototon) oraz trzeciorzędowych (ciemniejsze przesmużenia).

Rezultaty analizy prowadzonej z wykorzystaniem izotermicznego układu funkcyjnego wskazują, że najbardziej wydajne emitory promieniowania można wiązać z miejscami skoncentrowanego wypływu wód gruntowych bądź ze strefami silnie zawodnionych koluwiów (fot. 6). Ewidentny jest również związek niektórych spośród widocznych na „ciepłych” termogramach stref z obszarami o podwyższonej tylko wilgotności, co wynika zarówno z lokalizacji, geometrii ich obrazu termalnego, jak i badań wilgotności gruntów. Przykładowo można tu prześledzić odwzorowanie termalne dróg skoncentrowanego spływu wód opadowych, które w postaci jaśniejszych smug tną ukośnie obraz skarpy.

PODSUMOWANIE

W konkluzji można stwierdzić, że obraz termalny umożliwia (w pewnych przynajmniej zakresach) detekcję zjawisk wodnych występujących na testowanym fragmencie skarpy. Możliwość określenia na kanwie analizy termalnej obszarów, w których mają występować skoncentrowane wycieki wód, a przede wszystkim specyfikacja lokalnych stref o podwyższonej wilgotności, może mieć, jak się wydaje, istotne znaczenie dla oceny warunków stateczności i prognozy geologiczno-inżynierskiej. Przydatne do tych celów okazały się termogramy „wieczne”, chociaż nie można wykluczyć, że walory interpretacyjne obrazów wykonanych przed wschodem słońca nie byłyby lepsze. Doskonalenia wymaga ponadto metodyka obserwacji oraz interpretacji termogramów. Trzeba bowiem zdawać sobie sprawę, że w odwzorowaniu elementów budowy oraz właściwości „tworzywa” gruntowego zasadniczą rolę odgrywają nie tyle bezwzględne wartości temperatury, co istniejąca różnica temperatury radiacyjnej. Jak wiadomo, efekt rejestrowanego przez kamerę promieniowania termalnego, oprócz takich cech jak emisyjność, rodzaj powierzchni i temperatura rzeczywista obiektu, zależy również od temperatury otoczenia. Zależności te należy uwzględnić zarówno podczas dokonywania obserwacji termowizyjnych, jak i w trakcie prowadzenia geologicznej interpretacji obrazu termalnego skarp. Dzięki bowiem wysokiej rozdzielczości systemu obrazującego powinno się dążyć do uchwycenia pewnych, subtelnych nawet, różnic w emitowanej przez masyw gruntowy porcji promieniowania termalnego. Wynika stąd konieczność uwzględnienia wszystkich czynników, które mogą mieć wpływ

na poprawność ustaleń interpretacyjnych podczas formułowania programu dalszych badań w tym zakresie.

Reasumując, trzeba stwierdzić, że podjęcie próby wykorzystania termowizji do badania zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich rozwijających się w obrębie zbczy kopalni odkrywkowej uznać należy za celowe, tak z punktu widzenia poznawczego, jak i możliwości praktycznego wykorzystania wyników. Uzyskane dzięki obrazowaniu termalnemu informacje, poddane odpowiedniemu przetworzeniu i interpretacji, mogą bowiem stanowić cenny materiał uzupełniający do prawidłowego ustalania i weryfikacji prognozy geologiczno-inżynierskiej w zakresie stateczności skarp odkrywki i zwałowisk: wewnętrznego i zewnętrznego.

LITERATURA

- Blanchard M.B., Greeley R., Goettelman R., 1974: *Use of visible, near infrared, and thermal infrared sensing to study soil moisture*, NASA Tech. Mem. X-62, 343, 8 p.
- Carr D.D., Blakely R.F., 1966: *Temperature variation at a depth of 30 cm in clay till and outwash sand and gravel*, [in:] *Proc. 4th Symposium Remote Sensing Environ.*, pp. 203—214.
- De Vries D.A., 1963: *Thermal properties of soils*, [in:] *Physics of the Plant Environment* W.R. Van Wijk (ed.), John Wiley and Sons, Interscience, New York, pp. 210—235.
- Ellyett C.D., Pratt D.A., 1975: *A review of the potential applications of remote sensing techniques to hydrogeological studies in Australia*, Aust. Water Res. Council Tech. Paper No. 13, 147 p.
- Ellyett C.D., Pratt D.A., 1979: *The Thermal Inertia Approach to Mapping of Soil Moisture and Geology*, *Remote Sensing of Environ.*, 8, 151—168.
- Idso S.B., Jackson R.R., Reginato R.J., Kimball B.A., Nakajima F.S., 1975a: *The dependence of bare soil albedo on soil water content*, *J. Appl. Met.* 14(I), pp. 109—113.
- Idso S.B., Schmugge T.J., Jackson R.D., Reginato R.J., 1975b: *The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status*, *J. Geophys. Res.* 80(21), pp. 3044—3049.
- Idso S.B., Jackson R.D., Reginato R.J., 1976: *Compensating for environmental variability in the thermal inertia approach to remote sensing of soil moisture*, *J. Appl. Met.*, 15, pp. 811—817.
- Kahle A.B., Gillespie A.R., Goetz A.F.H., 1976: *Thermal inertia imaging: A new geologic mapping tool*, *Geophys. Res. Lett.* 3(1), pp. 26—28.
- Miller D.E., Aarstad J.S., 1973: *Effective available water and its relation to evapotranspiration rate, depth of wetting and soil texture*, *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, pp. 763—766.
- Quiel F., 1975: *Thermal/IR in geology. Some limitations in the interpretation of imagery*, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 41 (3), pp. 341—346.
- Reginato R.J., Idso S.B., Vedder J.F., Jackson R.D., Blanchard M.B., Goettelman R., 1976: *Soil water content and evaporation determination by thermal parameters obtained from ground-based and remote measurements*, *J. Geophys. Res.* 81(9), pp. 1617—1620.

STANISŁAW MULARZ

THERMOVISIONAL OBSERVATION OF THE SLOPES IN A STRIP MINE

Summary

The paper describes the results of the thermovisional observation of the slopes in the sulphur strip mine in Machów near Tarnobrzeg. The testing site was a fragment of the extensive landslide structure covering a major part of the south slope of the mine. The author presents the results of the analysis of thermograms drawn in the morning and in the evening. It was ascertained that the effects of thermal radiation registered in particular by the „evening” thermograms afforded possibilities to detect some water phenomena observable within the exploited portion of the slope in the form of concentrated seepage, and some zones of a higher, in relation to the adjacent parts, degree of humidity. The specification of those zones, based on the results of thermal imagery, may be of considerable importance when evaluating the conditions of the slopes stability and making the geological-technological forecast more precise.

STANISŁAW MULARZ

OBSERVATIONS THERMOVISUELLES DES ESCARPEMENTS DANS UNE MINE A CIEL OUVERT

Résumé

Dans cet article nous avons présenté les résultats d'observations thermovisuelles des escarpements de la mine de soufre à ciel ouvert de Machów près de Tarnobrzeg. Le champ testé était constitué par un fragment d'une vaste structure à éboulis englobant une grande partie de l'escarpement méridional de la mine à ciel ouvert. Nous avons exposé les résultats de l'analyse des thermogrammes réalisés le jour ainsi que le soir. Nous avons constaté que les effets de la radiation thermique enregistrés surtout sur les thermogrammes „vespéraux” permettent une détection de phénomènes dus à l'eau apparaissant dans le segment enlevé de l'escarpement sous forme d'écoulement concentré et de zones à un degré d'humidité plus élevé que l'environnement immédiat. La spécification de ces zones à partir des résultats de l'illustration thermique peut avoir une importance essentielle pour l'estimation des conditions de stabilité des escarpements et la plus grande précision des prévisions géologiques et technologiques.

Traduit par Michał Michalak