

BOHDAN BOHONOS
WOJCIECH BYCHAWSKI

528.74:528.482:622.1

Wyznaczenie wielkości przemieszczeń i odkształceń powierzchni terenu metodą fotogrametryczną

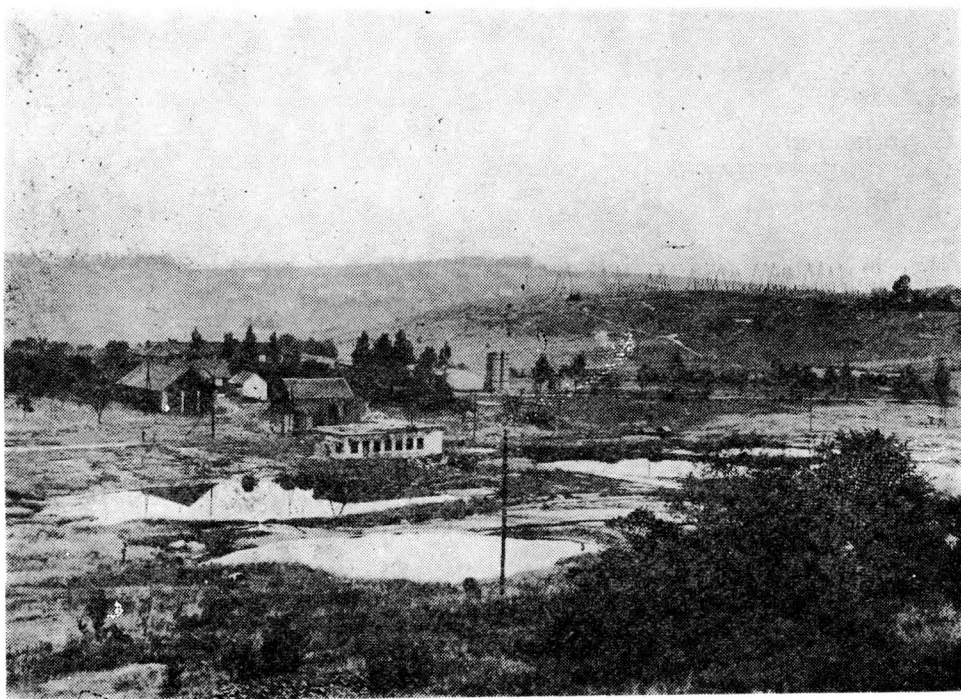
Część I

(opracował: Bohdan Bohonos)

1. Program badań i rejestracja stanu aktualnego powierzchni terenów górnich na podstawie zdjęć lotniczych

Do terenów ulegających znacznym odkształceniom, wywołanym eksploatacją górnictw, należą tereny kopalni otworowych. W kopalniach tych surowce mineralne wydobywa się w postaci ich roztworów wodnych (sole) lub w postaci płynnej (siarka), stosując jedną z najbardziej wydajnych metod eksploatacji, a mianowicie metodę podziemnego ługowania. Ten efektywny system eksploatacji, polegający na ługowaniu minerałów gorącą parą wodną lub wodą doprowadzaną do złoża pod ciśnieniem za pośrednictwem otworów wiertniczych, powoduje znaczne odkształcenia i uszkodzenia powierzchni terenu. W wyniku intensywnej eksploatacji powstają wewnątrz górotworu puste przestrzenie poeksploatacyjne, które likwidując się z czasem powodują znaczne zmiany na powierzchni terenu (przemieszczenia, odkształcenia, zapadliska). Zjawiska te, zależnie od głębokości zalegania eksploatowanego złoża i budowy geologicznej górotworu, mają różny charakter i różnie przebiegają w czasie, nie kończąc się z reguły wraz z momentem zakończenia eksploatacji złoża. Temu procesowi geomechanicznych przekształceń terenu towarzyszą ponadto zmiany w strukturze gleby oraz naruszanie istniejących stosunków wodnych. Tereny, które przed rozpoczęciem eksploatacji złóż wymienioną metodą były zagospodarowane, stają się z czasem nieużytkami pokrytymi siecią spękań, lejów oraz zapadlisk.

Typowym przykładem zmian morfologii terenów górniczych są zapadliska na terenie jednej z kopalń otworowych soli, której widok ogólny przedstawia zdjęcie (rysunek 1). Na pierwszym planie tego zdjęcia są widoczne zapadliska oraz ruiny przepompowni a na horyzoncie — zabudowa nowych otworów wiertniczych.



Rys. 1. Ogólny widok kopalni otworowej

Ponowne zagospodarowanie terenów poeksploatacyjnych jest możliwe tylko w przypadku:

- pełnej znajomości dynamiki zmian powierzchni terenu, zachodzących tak w czasie eksploatacji, jak i po jej zakończeniu, oraz
- znajomości okresu czasu, po którym zachodzące zmiany powierzchni terenu praktycznie nie będą miały wpływu na jej ponowne zagospodarowanie.

Szerokie prace badawcze, zmierzające do rekultywacji terenów jednej z kopalni soli, gdzie eksploatacja odbywa się metodą podziemnego ługowania, podjął w latach 1969/1970 Kombinat Kopalń Soli i Barytu. Celem tych badań było:

- opracowanie podstaw technicznych do rekultywacji istniejących kopalni otworowych,
- opracowanie metody prognozowania zmian powierzchni terenu, która umożliwi określenie sposobu przyszłego użytkowania terenu już przy podejmowaniu decyzji budowy nowych kopalni otworowych.

W ramach powyższych badań Kombinat Kopalń Soli i Barytu zlecił Instytutowi Geodezji i Kartografii opracowanie metody i technologii wyznaczania na dużych obszarach zmian powierzchni terenu, wywołanych

eksploatacją złóż metodą podziemnego ługowania oraz zastosowanie opracowanej technologii na terenach Kopalni Soli w Wieliczce.

Opracowana metoda wyznaczenia zmian powierzchni terenu powinna zapewnić:

- pomiar kontrolny wszystkich zaprojektowanych punktów badanego obszaru w możliwie jak najkrótszym okresie czasu, tak aby ich położenie (wyznaczone względem punktów stałych — nie podlegających lokalnym ruchom) mogło być praktycznie uznane za określone na jeden moment czasu,

- wyznaczenie okresowych bezwzględnych zmian położenia (przemieszczeń) badanych punktów terenu na podstawie okresowo przeprowadzanych pomiarów kontrolnych,

- określenie ilościowe i jakościowe charakteru zmian powierzchniowych badanego obszaru (na podstawie wyznaczonych przemieszczeń oraz innych informacji zebranych w czasie pomiaru),

- średnie błędy wyznaczenia składowych przemieszczeń punktów nie większe od $\pm 0,1$ m,

- rejestrację na moment pomiaru zmian położenia zapadlisk, linii brzegowych i rzędnych lustra wody zbiorników powstałych na skutek zmian konfiguracji terenu i innych towarzyszących tym zmianom czynników.

Znane i dotychczas stosowane metody wyznaczania przemieszczeń terenu nie mogły być w omawianym przypadku zastosowane ze względu na:

- stosunkowo duży obszar podlegający badaniom,

- dużą prędkość ruchu punktów badanych (zmiany położenia punktów zachodzące w czasie koniecznym do przeprowadzenia pomiaru nie mogą być pominięte),

- niejednostajny w czasie przebieg zjawisk deformacyjnych powierzchni terenu (raptowne powstawanie zapadlisk i zmiany zapadlisk już istniejących).

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione przesłanki należało poszukiwać takich metod pomiaru przemieszczeń, które zapewniałyby po pierwsze — praktyczną jednoczesność obserwacji i po drugie — nie stawiały ograniczeń co do ilości badanych punktów. Do takich metod pomiaru należą metody fotogrametryczne, wykorzystujące zdjęcia lotnicze. Wykonuje się je jednocześnie dla całego badanego obszaru, rejestrując w ten sposób aktualny stan powierzchni terenu względem uprzednio wybranych i wzajemnie powiązanych punktów, położonych poza zasięgiem wpływów eksploatacji. Jeżeli zatem wykona się ponownie zdjęcia lotnicze (nawiązane do tych samych co uprzednio punktów po sprawdzeniu ich wzajemnej stałości) tego samego obszaru w określonym odstępie czasu, to po wyko-

naniu odpowiednich pomiarów i zaobserwowaniu identycznych punktów na dwóch kolejnych seriach zdjęć, istnieje możliwość obliczenia przemieszczeń badanych punktów. Ponadto zdjęcia lotnicze dostarczają bardzo wiele obiektywnych informacji o stanie sfotografowanego terenu, co nie jest bez znaczenia, gdy chodzi o interpretację zjawisk towarzyszących odkształceniom powierzchni. Świadczy o tym pomniejszone zdjęcie lotnicze rejonu wspomnianej już kopalni otworowej soli, przedstawionej na rysunku 2.



Rys. 2. Pomniejszone zdjęcie lotnicze rejonu kopalni otworowej soli

Zdjęcie powyższe zostało wykonane w roku 1970 ze śmigłowca w przybliżonej skali 1 : 5000 szerokokątną kamerą lotniczą. Jest ono znakomitą ilustracją zmian jakie dokonały się na powierzchni terenu kopalni, jeżeli się zważy, że na miejscach odfotografowanych zapadlisk rozciągały się przed rozpoczęciem eksploatacji pola uprawne.

1.1. Uzasadnienie wyboru metody fotogrametrii lotniczej do wyznaczania przemieszczeń i odkształceń dużych obszarów

Na podstawie wstępnego rozeznania, przeprowadzonego z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego, podjęto w Instytucie decyzję opracowania metody i technologii wyznaczania przemieszczeń i odkształceń dużych obszarów, opartej o metody fotogrametryczne. Wybór metody fotogrametrii lotniczej umotywowany jest następującymi przesłankami:

— Istnieje możliwość wykonywania okresowych zdjęć lotniczych w dużych skalach z pokładu śmigłowca. Praktycznie osiągalna skala tych zdjęć może się wahać w zależności od warunków meteorologicznych, wielkości obszaru i wymaganych dokładności pomiaru w granicach od 1 : 5000 do 1 : 1000.

— Obecny stan techniki pomiaru zdjęć na precyzyjnych stereokomparatorach i autografach pozwala na wyznaczanie współrzędnych łkowych badanych punktów z wysoką dokładnością; średni błąd pomiaru waha się bowiem w granicach od ± 5 do ± 15 mikrometrów (μm), co zależy od jakości fototechnicznej zdjęć oraz użytego do pomiaru przyrządu.

— Rozwój analitycznych metod fotogrametrycznych, w tym również blokowego wyrównania aerotriangulacji na elektronicznych maszynach cyfrowych (EMC) umożliwia, przy wyżej wymienionych skalach, wyznaczenie współrzędnych badanych (sygnalizowanych przed lotem fotogrametrycznym) punktów ze średnim błędem w granicach od kilku do kilkunastu centymetrów.

— W przypadku wyznaczenia współrzędnych pojedynczego punktu ze średnim błędem np. $m_x = m_y = m_z \leq \pm 7$ cm, średnie błędy składowych przemieszczenia tego punktu $m_{\Delta x} = m_{\Delta y} = m_{\Delta z}$, zgodnie z przyjętym założeniem, nie przekroczą wartości $\pm 0,1$ m. Dokładność ta w omawianym przypadku badań jest wystarczająca, ponieważ zleceniodawcy chodzi o wyznaczenie makroruchów terenu, które na obszarach objętych eksploatacją są znaczne i dochodzą w pewnych partiach terenu do wielkości rzędu kilku metrów. O wielkości i charakterze zmian terenu może świadczyć chociażby porównanie zasięgu zapadlisk i lejów sprzed około 13 laty (zaznaczonych na rysunku 2 linią punktową na podstawie zdjęcia z 1957 r.) ze stanem aktualnym przedstawionym na tym samym zdjęciu z roku 1970.

— Zastosowanie w omawianym przypadku do wyznaczenia przemieszczeń klasycznych metod geodezyjnych jest nie uzasadnione ani technicznie ani ekonomicznie. Np. wykonanie okresowych obserwacji poprzez zakładanie sieci rozproszonych punktów niwelacyjnych, pozwoliłoby na prawidłowe wyznaczenie zmian konfiguracji terenu, tylko

w przypadku przeprowadzenia pomiaru przez dużą liczbę zespołów pomiarowych (ze względu na konieczność ograniczenia czasu obserwacji całego obszaru do kilku dni). Koszt tak przeprowadzonych obserwacji przekracza znacznie koszty opracowań fotogrametrycznych.

1.2. Prace naukowo-badawcze przeprowadzone w związku z opracowaniem metod i technologii wyznaczenia przemieszczeń terenu na podstawie wielkoskalowych zdjęć lotniczych

Chociaż w praktyce fotogrametrycznej znane są metody wyznaczania położenia przestrzennego pojedynczych punktów terenowych na podstawie zdjęć lotniczych (np. metoda aerotriangulacji), to jednak, ze względu na wymagania dokładnościowe niezbędne przy badaniu odkształceń terenów górniczych, istniejące technologie opracowania zdjęć nie mogły być zastosowane. Dlatego też w Instytucie Geodezji i Kartografii przeprowadzono szereg prac naukowo-badawczych, mających na celu zaspokojenie potrzeb na odcinku podniesienia dokładności pomiarów fotogrametrycznych i opracowania nowych technologii w zakresie wykonania i opracowania zdjęć lotniczych. Do najważniejszych zagadnień, które trzeba było rozwiązać w związku z podjętym tematem, należałyby następujące zagadnienia:

Sposób i rodzaj stabilizacji punktów obserwacyjnych

Ze względu na okresowość badań przewidziano trwałą stabilizację około 400 punktów, rozmieszczonych wg projektu zleciennodawcy na obszarze około 6 km². Wychodząc z założenia, że punkt obserwacyjny — badawczy nie jest reperem fundamentalnym, nie ulegającym zmianom, lecz takim elementem, który jak najwłaściwiej reprezentuje zmiany zachodzące na powierzchni terenu, ustalono, że punkty obserwacyjne będą stabilizowane w terenie rurami żelaznymi o średnicy od 50 do 100 mm wbitymi w grunt do głębokości 100 cm. W celu kontroli zachowania się tych rur w gruncie przewidziano dla pojedynczo wybranych punktów stabilizację rurami do głębokości 160 cm.

Wybrany na omawianym obszarze sposób stabilizacji pozwala mieć pewność, że ruch punktów obserwacyjnych w prawidłowy sposób reprezentuje ruch terenu, na którym jest zastabilizowany, eliminując przypadkowe zmiany powierzchni badanej (np. zmiany spowodowane erozją, przypadkowe przemieszczenia nie związane z ruchem górotworu).

Sygnalizacja zastabilizowanych punktów

W celu odfotografowania się na zdjęciach lotniczych zastabilizowanych punktów przewidziano ich sztuczną sygnalizację za pomocą tarcz sygnalizacyjnych zamocowanych centrycznie na wystających końcach rur.

Wielkość i kształt tarcz oraz barwę znaków sygnalizacyjnych ustalono na podstawie wyników przeprowadzonych prac doświadczalnych. Średnicę znaku sygnalizacyjnego, uzależniono od skali wykonywanych zdjęć i wielkości znaczka pomiarowego autografu. Średnica ta nie powinna być mniejsza od średnicy d , obliczonej wg empirycznego wzoru

$$d \geq \frac{m_{\pi}}{30000} \text{ (w metrach),} \quad (1)$$

gdzie m_{π} — mianownik skali wykonywanych zdjęć.

Najbardziej dogodnym kształtem znaku sygnalizacyjnego okazał się znak krzyża równoramiennego o barwie białej lub czarnej w zależności od tła otaczającego terenu.

Opracowanie warunków technicznych wykonania zdjęć lotniczych

Charakter badawczy wykonywanych prac oraz istniejące możliwości wykonania zdjęć z pokładu śmigłowca uzasadniały wykonanie zdjęć w dwóch skalach, a mianowicie:

$$\begin{array}{lll} 1 : 5000 & \text{przy wysokości lotu } w = 760 \text{ m,} \\ 1 : 3000 & \text{„ „ „ „ } w = 460 \text{ m.} \end{array}$$

Do ważniejszych danych technicznych przyjętych do wykonania zdjęć należą: odległość obrazu kamery lotniczej $f = 152 \text{ mm}$, format zdjęć $23 \times 23 \text{ cm}$, pokrycie podłużne zdjęć w szeregu 80%, pokrycie poprzeczne między szeregami 60%.

Warto podkreślić, że przyjęcie 80% pokrycia podłużnego podyktowane było możliwością wykorzystania dwóch niezależnych zestawów zdjęć danej skali, nadających się do ich stereoskopowego opracowania. Fakt ten stwarza ponadto możliwość oceny dokładności pomiarów fotogrametrycznych na drodze doświadczalnej. W ramach planowania lotu fotogrametrycznego powstał również problem sygnalizacji osi szeregów w terenie ze względu na nieaktualność mapy, służącej nawigatorowi do prowadzenia śmigłowca wzdłuż zaplanowanej osi szeregu.

Wstępna ocena przewidywanej dokładności wyznaczenia współrzędnych X, Y, Z punktów na podstawie pomiaru współrzędnych tłowych na zdjęciach lotniczych

Przy wstępnej analizie dokładności wyznaczenia współrzędnych X, Y, Z wykorzystano związki geometryczne między terenem a zdjęciem ściśle pionowym.

Ze znanych wzorów:

$$X = x' \frac{w}{f}; \quad Y = y' \frac{w}{f}; \quad w = \frac{bf}{p}; \quad (2)$$

gdzie: X, Y, Z — współrzędne wyznaczanego punktu w układzie geodezyjnym,

x', y' — współrzędne tłowe mierzonego punktu w układzie tłowym lewego zdjęcia,

f — odległość obrazu (ogniskowa obiektywu) kamery lotniczej,

w — wysokość lotu,

b — baza zdjęć,

p — paralaksa podłużna punktu mierzona na stereogramie, po ich zróżniczkowaniu względem zmiennych x', y', p i przejściu do błędów średnich otrzymamy:

$$m_X = \pm \frac{w}{f} m_{x'} ; \quad m_Y = \pm \frac{w}{f} m_{y'} ; \quad (3)$$

$$m_Z = \pm \frac{w}{f\vartheta} m_p ; \quad (4)$$

gdzie $\vartheta = \frac{b}{w}$ jest tzw. stosunkiem bazowym.

We wzorach (3) i (4), określających błędy średnie wyznaczonych współrzędnych X, Y, Z przyjęto założenie, że błąd wysokości lotu m_w odpowiada błędowi rzędnej m_Z .

Dla zdjęć formatu 23×23 cm i pokryciu podłużnym zdjęć w szeregu równym 60%, po podstawieniu do wzorów (3) i (4) wartości liczbowych: $f = 152$ mm, $m_{x'} = m_{y'} = \pm 15$ μ m, $m_p = \pm 10$ μ m otrzymamy dla odpowiednich skal średnie błędy wyznaczenia współrzędnych geodezyjnych, przedstawione w tablicy 1.

Tablica 1

Dane techniczne zdjęć				Błędy średnie współrzędnych		Składowe przesunięcia	
Skala	Wysokość lotu w (m)	Baza zdjęć b (m)	Stosunek bazowy ϑ	$m_X = m_Y$ w cm	m_Z w cm	$m_{\Delta X} = m_{\Delta Y}$ w cm	$m_{\Delta Z}$ w cm
1 : 5000	760	460	3 : 5	$\pm 7,5$	$\pm 8,3$	$\pm 10,5$	$\pm 1,6$
1 : 3000	450	275	2 : 3	$\pm 4,5$	$\pm 5,0$	$\pm 6,3$	$\pm 7,0$

Z uwagi na wykorzystanie do analizy wstępnej wzorów słusznych dla zdjęć ściśle pionowych, przyjęto do obliczenia tablicy 1 maksymalny błąd średni pomiaru współrzędnych tłowych na zdjęciach. Faktycznie błąd ten, przy wykorzystaniu do pomiaru zdjęć precyzyjnych stereokomparatorów, jest znacznie mniejszy. Wobec powyższego, podane w tablicy 1 wartości

można traktować jako orientacyjne dane, charakteryzujące dokładność współrzędnych i przemieszczeń wyznaczonych metodą fotogrametrii analitycznej.

Z przytoczonej pobieżnej analizy wzoru (4) wynika ponadto, że dokładność wyznaczenia wysokości Z punktów terenowych zależy w stosunku wprost proporcjonalnym od wysokości lotu (w) i odwrotnie proporcjonalnym od stosunku bazowego zdjęć ($\vartheta = b : w$). Porównanie wzorów (3) i (4) upoważnia również do stwierdzenia, że przy ocenie dokładności wyznaczenia punktów metodami fotogrametrycznymi decydująca jest ocena błędu wysokości punktów (m_z), jako wartości większej od błędów współrzędnych położenia ($m_x = m_y$).

Opracowanie metody analitycznej aerotriangulacji blokowej

Prace naukowo-badawcze, mające na celu opracowanie analitycznej metody obliczeń i wyrównania współrzędnych dowolnej liczby punktów terenowych na podstawie zdjęć lotniczych, prowadzono w Instytucie w dwóch równoległych kierunkach, a mianowicie:

a) doskonalenia, rozwijanej w Zakładzie Informatyki Geodezyjnej i Kartograficznej metody aerotriangulacji blokowej na podstawie niezależnych modeli,

b) opracowania w Zakładzie Fotogrametrii metody numerycznego opracowania zdjęć fotogrametrycznych nazywanej w skrócie metodą aerotriangulacji blokowej z niezależnych zdjęć.

Schemat procesu technologicznego obydwu metod zawiera następujące etapy prac:

- opracowanie projektu dowiązania bloku zdjęć do punktów terenowych o wyznaczonych współrzędnych geodezyjnych (punktów dostosowania),

- geodezyjne dowiązanie zdjęć do punktów dostosowania, wybranych w przypadku badania odkształceń terenu poza zasięgiem wpływów eksploatacji górniczej,

- wykonanie zdjęć lotniczych przygotowanego zawczasu obszaru badań (stabilizacja i sygnalizacja punktów obserwacyjnych),

- opracowanie projektu obserwacji punktów, służących do rozwinięcia aerotriangulacji i wyznaczenia punktów obserwacyjnych — badanych,

- pomiar objętych projektem punktów na precyzyjnych przyrządach fotogrametrycznych,

- opracowanie wstępne danych pomiarowych,

- rozwinięcie i wyrównanie aerotriangulacji blokowej oraz obliczenie współrzędnych punktów obserwacyjnych na elektronicznych maszynach cyfrowych.

Obydwie metody są metodami analitycznymi, które wykorzystują do budowy analitycznego modelu terenu związki matematyczne, opisujące

zależności zachodzące między zdjęciem i terenem. Metody te mają stanowić określony system aerotriangulacji analitycznych zapewniających wysoką dokładność wyznaczanych współrzędnych (w granicach błędów średnich podanych w tablicy 1), uzależnionych w pierwszej kolejności od dokładności danych pomiarowych oraz dokładności pomiaru i poprawności rozmieszczenia punktów dostosowania opracowywanego bloku zdjęć. Wspomniany system aerotriangulacji analitycznych cechuje ponadto bardzo duża elastyczność w wyborze aparatury pomiarowej, oraz swoboda w przyjęciu najwłaściwszego sposobu korekcji danych wstępnych, eliminacji błędów systematycznych i wyrównaniu wyników końcowych. Dla przykładu można podać najważniejsze właściwości omawianego systemu:

— Podstawowymi przyrządami stereoskopowymi służącymi do pomiaru zdjęć jest stereokomparator precyzyjny, zapewniający dokładność nominalną pomiaru współrzędnych łkowych rzędu 1—2 μm .

— W metodzie aerotriangulacji z niezależnych modeli mogą być wykorzystane do pomiaru zdjęć również autografy precyzyjne, umożliwiające stosowanie powyższej metody tak w pracach naukowo-badawczych, jak i masowych pracach produkcyjnych.

— Metoda aerotriangulacji z niezależnych zdjęć umożliwia ponadto pomiar pojedynczych zdjęć na precyzyjnych monokomparatorach, o nominalnej dokładności odczytu rzędu 0,1 μm , co predysponuje powyższą metodę do prac naukowo-badawczych.

— Podstawowa różnica koncepcji obydwu omawianych metod polega na tym, że w metodzie aerotriangulacji z niezależnych modeli, wyrównaniu końcowemu podlegają wielkości mierzone na modelu lub funkcje wielkości mierzonych na zdjęciach, natomiast w metodzie aerotriangulacji z niezależnych zdjęć wyrównuje się wielkości mierzone na zdjęciach tj. współrzędne łkowe. Szczegółowe opracowania naukowe oraz odpowiednie programy obliczeń na EMC znajdują się we wspomnianych na wstępie Zakładach Instytutu Geodezji i Kartografii.

Analiza wstępna metody analogowej wyznaczenia wysokości punktów obserwacyjnych

Koncepcja omówionych badań przewidywała, że oprócz wyznaczenia przemieszczeń na podstawie punktów zastabilizowanych, będą prowadzone obserwacje zmian wysokości pojedynczych punktów terenu wybranych w ten sposób, aby jak najbardziej reprezentowały badaną powierzchnię. Punkty te, tworzące sieć około 500 tzw. Z-punktów, położonych w odstępach od 50 do 100 m, służą do zagęszczenia sieci punktów stabilizowanych. Celem ich pomiaru jest wzbogacenie informacji o zachowaniu się terenu i stworzenie przez to dodatkowych danych dla pełniejszej interpretacji zachodzących zmian powierzchniowych.

Ze względu na trudności w identyfikacji Z-punktów na zdjęciach lotniczych (nie są one z reguły wyraźnymi szczegółami sytuacyjnymi) do okresowego wyznaczania ich wysokości, najbardziej nadają się fotogrametryczne przyrządy analogowe — autografy precyzyjne.

Prace doświadczalne z zakresu opracowania zdjęć metodą analogową na autografach wykazały, że przy zachowaniu identycznych warunków wykonania zdjęć jak dla metody analitycznej, średni błąd (m_z) wyznaczenia wysokości Z-punktów można określić empirycznym wzorem

$$m_z = \text{od } \pm 0,1\% \text{ do } \pm 0,2\% w, \quad (5)$$

gdzie: w — wysokość lotu w metrach.

Podany w nim przedział wielkości błędów średnich zależy jest od dokładności identyfikacji mierzonych punktów na zdjęciach. Wielkość błędów obliczonych na podstawie przybliżonego wzoru (5), przy założeniu, że zdjęcia były wykonane kamerą szerokokątną przedstawia tablica 2.

Tablica 2

Skala zdjęć	Wysokość lotu w w m	Błędy średnie m_z w cm	Przemieszczenia pionowe $m_{\Delta z}$ w cm
1 : 5000	760	$\pm 8 - \pm 15$	$\pm 11 - 21$
1 : 3000	460	$\pm 5 - \pm 9$	$\pm 7 - 13$

Koncepcja dowiązania zdjęć do punktów stałych

Wychodząc z warunku, że położenie przestrzenne punktów obserwacyjnych, oraz ich przemieszczenia powinny być odniesione do układu lokalnie stałego, przewidziano założenie w terenie dwurzędowej sieci kąto-wo-liniowej. Pierwszy rząd sieci zwany „siecią główną” przewidywał wyznaczenie punktów stałych, rozmieszczonych poza zasięgiem wpływów eksploatacji górniczej. Drugi rząd sieci składał się z punktów dostosowania zdjęć tzw. fotopunktów, określonych w nawiązaniu do sieci głównej.

Biorąc pod uwagę wyniki wstępnej analizy dokładności wyznaczenia współrzędnych (tablica 1) oraz warunek, że błąd wyznaczenia przemieszczeń nie powinien przekroczyć wartości $\pm 0,1$ m, przyjęto odpowiednie założenia dla konstrukcji powyższych sieci, metod pomiaru i dokładności wyznaczanych punktów. Założenia powyższe przewidywały wyznaczenie współrzędnych fotopunktów z błędem średnim

$$m_x = m_y = m_z = \pm 4,0 \text{ cm.}$$

Z uwagi na okresowość omawianych prac badawczych przewidziano ponadto:

— przeprowadzenie, na podstawie analizy geologicznej, górniczej i gruntoznawczej, prac mających na celu wybranie i zastabilizowanie w terenie punktów sieci głównej, co do których istnieje duże prawdopodobieństwo, że przez cały kilkuletni okres badań zachowają warunki wzajemnej stałości, tzn. nie będą ulegały ruchom lokalnym, spowodowanym działalnością górniczą lub innymi przyczynami;

— sprawdzanie, przed wykonaniem zdjęć, wzajemnego położenia (stałości) punktów sieci głównej na podstawie odpowiednio dokładnych pomiarów geodezyjnych;

— okresowe dowiązywanie zdjęć lotniczych do fotopunktów, których współrzędne będą wyznaczane na „moment” lotu fotogrametrycznego w nawiązaniu do sprawdzonych punktów sieci głównej.

1.3. Program prac związanych z wyznaczeniem przemieszczeń powierzchni terenów kopalni soli eksploatowanej metodą ługowania

Biorąc pod uwagę wymienione w punkcie 1.1 przesłanki, opracowano program badań deformacji terenu na obszarze jednej z kopalń Kombinatu Kopalń Soli i Barytu. Program ten obejmuje przeprowadzenie w pierwszym etapie badań trzech cykli pomiarowych, a mianowicie:

I cykl obserwacyjny — stwierdzenie i udokumentowanie stanu wyjściowego, poprzez wyznaczenie współrzędnych przestrzennych około 400 punktów zasygnalizowanych w terenie i wyznaczenie wysokości około 500 Z-punktów nie sygnalizowanych w terenie;

II cykl obserwacyjny — obserwacja stanu aktualnego po upływie jednego roku oraz wyznaczenie przemieszczeń;

III cykl obserwacyjny — obserwacja stanu aktualnego po upływie dwóch lat, wyznaczenie przemieszczeń oraz interpretacja geodezyjna i geometryczna uzyskanych wyników.

Należy podkreślić, że realizacja tego programu badań wymaga spełnienia trzech podstawowych warunków, a mianowicie:

a) synchronizacji „momentu” wykonania zdjęć lotniczych z pomiarem geodezyjnym fotopunktów, tj. osnowy fotogrametrycznej;

b) odfotografowania się na zdjęciach lotniczych możliwie wszystkich punktów zaprojektowanych do obserwacji w każdym z cykli obserwacyjnych;

c) konieczności jednoczesnego prowadzenia obserwacji, tj. realizacji prac wymienionych w poszczególnych cyklach pomiarowych, oraz rozwijania badań naukowych zapewniających opracowanie odpowiedniej

technologii fotogrametrycznego wyznaczenia przemieszczeń i ich interpretacji.

Spełnienie pierwszego warunku wymaga bardzo sprawnej koordynacji pomiaru geodezyjnego, prac związanych z sygnalizacją punktów oraz wykonania zdjęć lotniczych. Chodzi mianowicie o to, aby wyznaczone współrzędne fotopunktów były odniesione do stałego i niezmiennego w czasie trwania badań układu odniesienia i ponadto odpowiadały aktualnemu położeniu fotopunktów, zarejestrowanych na zdjęciach lotniczych.

Drugi warunek jest również bardzo istotny, ponieważ nieodfotografowanie się jednego i tego samego punktu chociażby w jednym z cykli obserwacyjnych, uniemożliwia wyznaczenie przemieszczenia danego punktu, a więc zmniejsza ilość danych do interpretacji zjawisk deformacyjnych.

1.4. Realizacja I cyklu badań

I cykl badań zakończony w czerwcu 1971 r. obejmował wykonanie następujących prac programowych:

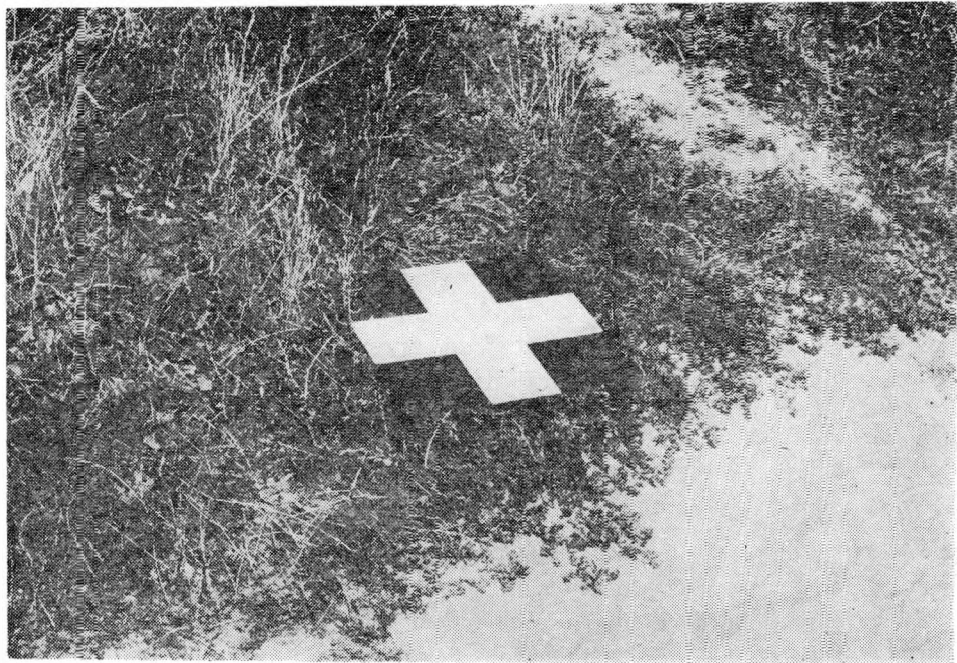
1. Stabilizacja sieci punktów obserwacyjnych

Na obszarze o powierzchni około 6 km² zastabilizowano 349 punktów obserwacyjnych. Punkty te, odpowiednio wybrane w terenie, zastabilizowano rurami żelaznymi o średnicy 60 mm i długości od 1000 do 1600 mm. Oprócz pojedynczych punktów rozmieszczonych w odstępach od 80 do 100 m, ustalono w terenie trójkątne wycinki, ograniczone 4 punktami w ten sposób, że trzy punkty wyznaczały trójkąt równoboczny o bokach około 20-metrowych, a czwarty wyznaczał środek ciężkości wymienionego trójkąta. Wycinki powyższe rozciągały się wzdłuż dwóch pasów zaprojektowanych przez zleceniodawcę w celu uzyskania dodatkowych danych do interpretacji.

2. Sygnalizacja zastabilizowanych punktów

Do sygnalizacji wykorzystano płyty kwadratowe ze sklejk o boku 500 mm, mocowane do wyżej wymienionych rur za pomocą śrub. Na płytach, zwanych tarczami sygnalizacyjnymi, wymalowane zostały znaki sygnalizacyjne w postaci białych krzyży na czarnym tle o szerokości ramion krzyża równej 150 mm. Dla określonej liczby punktów zastosowano znak czarny na białym tle, zwiększając szerokość ramion krzyża do 200 mm. Zróznicowanie barwy i wymiarów znaku podyktowane było rodzajem tła terenu oraz zjawiskiem pochłaniania promieni świetlnych przez znaki barwy czarnej. Ten rodzaj sygnalizacji w omawianym terenie zdał egzamin.

Przykłady znaków sygnalizacyjnych przedstawione są na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Tarcza sygnalizacyjna na pojedynczym punkcie badanym



Rys. 4. Tarcze sygnalizacyjne na czterech punktach

3. Wykonanie zdjęć lotniczych

Zdjęcia lotnicze w skalach 1 : 5000 i 1 : 3300 zostały wykonane z pokładu śmigłowca za pomocą lotniczej kamery szerokokątnej Wilda RC8 o stożku 152 mm. Podczas wykonywania zdjęć utrzymano zaplanowane 80% pokrycie podłużne w szeregach oraz 60% pokrycie między szeregami. Ogółem wykonano 4 szeregi zdjęć w skali 1 : 5000 i 8 szeregów w skali 1 : 3300. Ze względu na konieczność objęcia zdjęciami fotopunktów, rozmieszczonych poza obszarem badanym, długość poszczególnych szeregów wyniosła około 7 km. Doświadczenie w zakresie wykorzystania śmigłowca wykazało, że utrzymanie wymaganych parametrów technicznych i jakości fotograficznej wykonywanych zdjęć, zależne jest w bardzo dużym stopniu od warunków meteorologicznych oraz przygotowania załogi do wykonywania lotu wzdłuż zaplanowanych osi szeregów. W zakresie powyższych prac fotolotniczych wydaje się, że jest celowe podjęcie prac badawczych, zarówno co do doskonalenia istniejącej techniki wykonywania zdjęć, jak i wyposażenia środka latającego w kamery lotnicze o możliwościach automatycznego poziomowania kamery podczas lotu i zwiększenia cyklu pracy samej kamery.

4. Geodezyjny pomiar fotopunktów

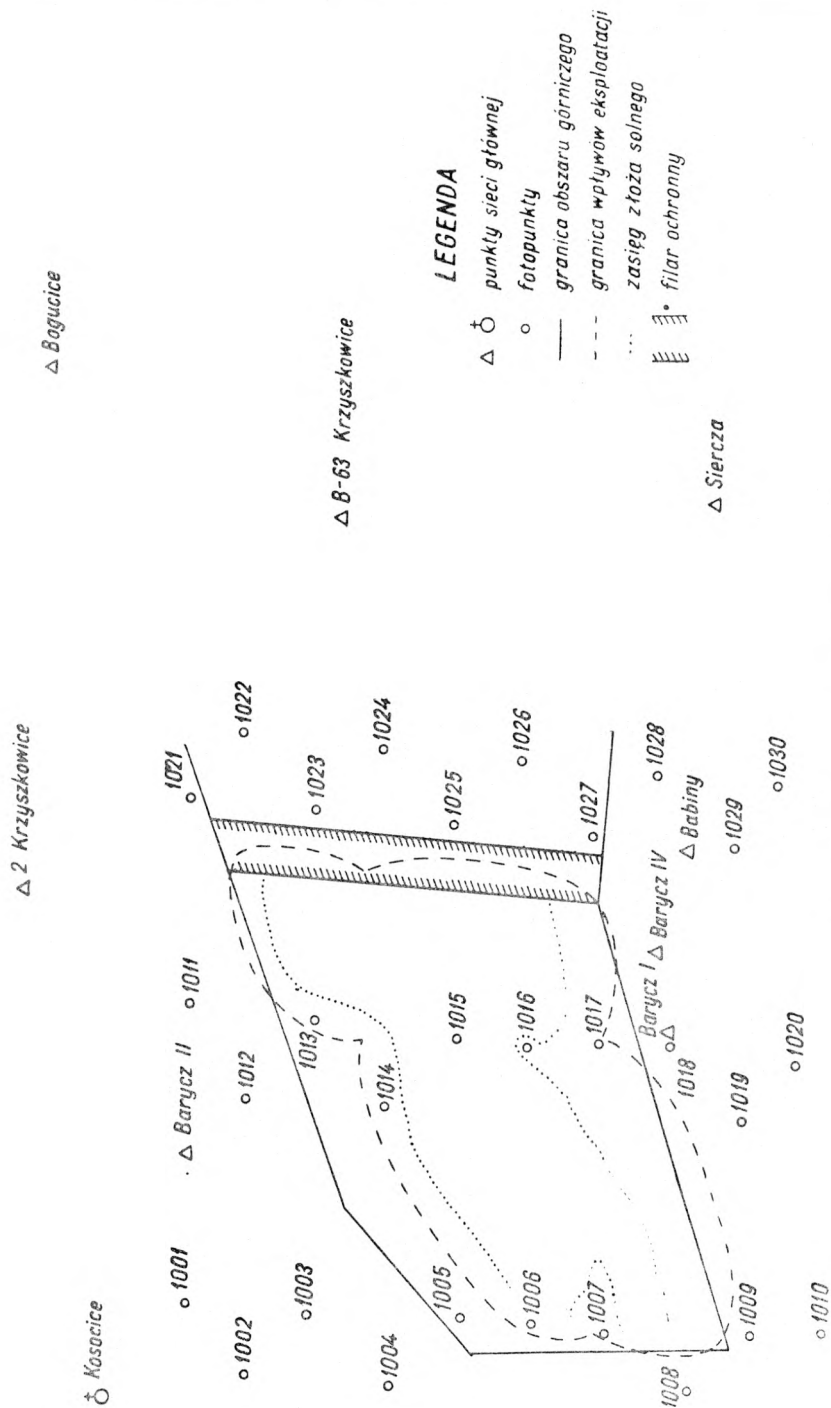
Zgodnie z koncepcją dowiązania zdjęć lotniczych założono na obszarze badanym lokalną dwurzędową sieć kątoowo-liniową. Pierwszy rząd, czyli tzw. sieć główna, obejmowała 9 punktów wybranych na „punkty stałe” nie ulegające lokalnym zmianom pod wpływem eksploatacji górniczej, natomiast drugi rząd sieci obejmował 30 fotopunktów dowiązanych do punktów sieci głównej i rozmieszczonych na całym obszarze badanym. Szkic położenia powyższych punktów przedstawia rysunek 5.

Kąty poziome w sieci pomierzono teodolitami Wilda T3, natomiast boki — dalmierzami elektromagnetycznymi RG10 z dokładnością zapewniającą wyznaczenie współrzędnych geodezyjnych fotopunktów z błędem średnim $m_x = m_y = \pm 4,0$ cm.

W pojedynczych przypadkach, do wyznaczenia fotopunktów trudno dostępnych, zastosowano metodę poligonizacji w związku z czym błąd średni współrzędnych nieznacznie przekroczył założone wartości.

Do pomiaru wysokości fotopunktów (nawiązanych do reperów niwelacyjnych), zastosowano metodę niwelacji technicznej zapewniającą wyznaczenie wysokości poszczególnych fotopunktów z błędem średnim $m_z \leq \pm 4,0$ cm.

Pomiary przeprowadzone we wrześniu 1971 r. podczas prac polowych II cyklu obserwacyjnego wykazały, że punkty sieci głównej, po upływie ponad jednego roku, nie zmieniły wzajemnego położenia, przez co zostały zachowane warunki stałości punktów odniesienia.



Rys. 5. Szkic osnowy fotogrametrycznej

5. Prace fotogrametryczne

Zadania I cyklu obserwacyjnego, sprecyzowane w punkcie 1.3 zostały wykonane przy użyciu dwóch instrumentów fotogrametrycznych: stekometru i autografu.

a) Na stekometrze firmy C. Zeiss-Jena wykonano pomiar współrzędnych łowych 326 punktów sygnalizowanych oraz określonej liczby punktów innych, niezbędnych do rozwinięcia analitycznej aerotriangulacji blokowej. Wymienione współrzędne łowe, automatycznie zarejestrowane na taśmach perforowanych, posłużyły do obliczenia na EMC współrzędnych terenowych wyznaczonych punktów. Z ogólnej liczby 349 punktów zasygnalizowanych w terenie nie odfotografowało się na zdjęciach w skali 1 : 5000 23 punkty (6,6%) oraz na zdjęciach w skali 1 : 3300 58 punktów (16,6%). Przyczyną nieodfotografowania się wymienionych punktów było zniszczenie tarcz sygnalizacyjnych przed lotem fotogrametrycznym.

b) Na autografie Wilda A8 wykonano:

— pomiar wysokości 500 Z-punktów nie sygnalizowanych, których położenie zostało wkartowane na specjalne podkłady celem umożliwienia ich pomiaru w następnych cyklach obserwacyjnych. Punkty powyższe, wybierano w miejscach odkrytych, najwłaściwiej reprezentujących poziom powierzchni terenu, np.: skrzyżowania i rozwidlenia dróg i ścieżek, trwałe miedze, miejsca przy zabudowaniach nie pokryte roślinnością itp. Przykład punktu wybranego na drodze przedstawiony jest na rysunku 6, natomiast punktu wybranego w obrębie otworów wiertniczych na rysunku 7.

— opracowanie mapy rzeźby terenu w skali 1 : 1000 w rejonie czynnej eksploatacji soli.

6. Wyniki I cyklu obserwacyjnego:

W wyniku realizacji programu prac przewidzianych w I cyklu obserwacyjnym otrzymano następujące materiały rejestrujące stan wyjściowy powierzchni terenu na badanym obszarze:

— Zdjęcia lotnicze w skali 1 : 5000 i 1 : 3300, stanowiące cenny materiał porównawczy do interpretacji zmian fizjograficznych zachodzących na powierzchni badanego obszaru.

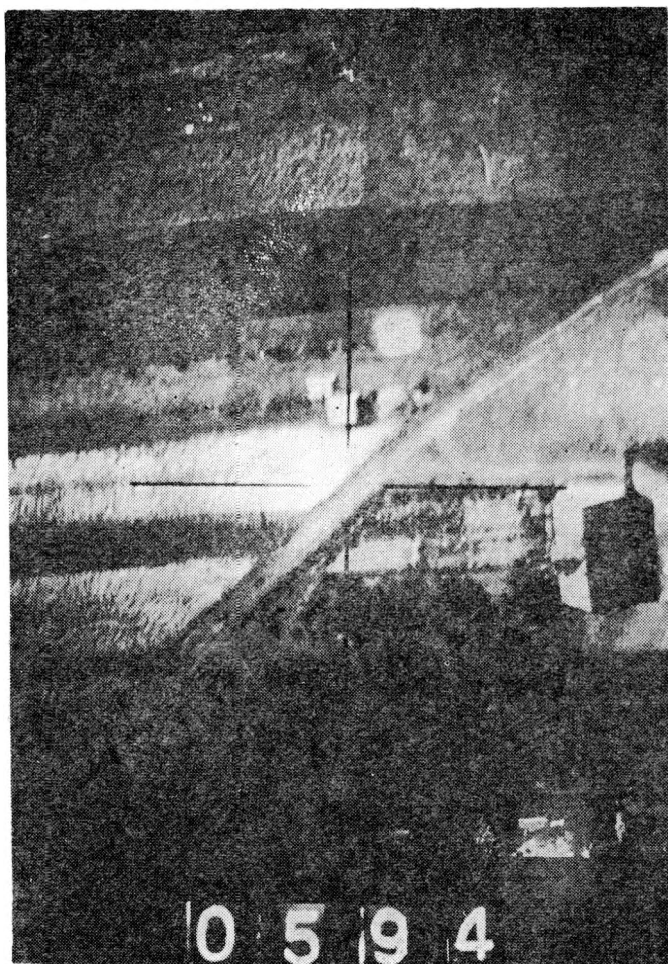
— Mapa rzeźby terenu w skali 1 : 1000, wybranego fragmentu obszaru w rejonie aktualnie prowadzonej eksploatacji górniczej. Celem tego opracowania jest stworzenie możliwości porównania okresowych zmian morfologii terenu. Rzeźba terenu przedstawiona została za pomocą warstwicy o cięciu zasadniczym co 1 m i pomocniczym co 0,5 m.

— Wykaz wysokości 500 Z-punktów nie sygnalizowanych, rozmieszczonych na całej powierzchni badanego obszaru i wyznaczonych na podstawie zdjęć lotniczych w skali 1 : 5000 na autografie metodą analogową.

Dokładność wyznaczenia wysokości powyższych punktów została oceniona błędem średnim równym $m_z = \pm 13$ cm. Błąd ten, którego wartość

odpowiada 1,7‰ wysokości lotu mieści się w granicach błędów podanych w tablicy 2. Warto zauważyć, że jako punkty nie sygnalizowane były wybierane punkty na drogach, trwałych miedzach itp., co do których istnieje prawdopodobieństwo, że ich wysokość może ulegać zmianom w związku z użytkowaniem terenu lub działaniem czynników atmosferycznych.

— Wykaz współrzędnych 326 punktów obserwacyjnych sygnalizowa-



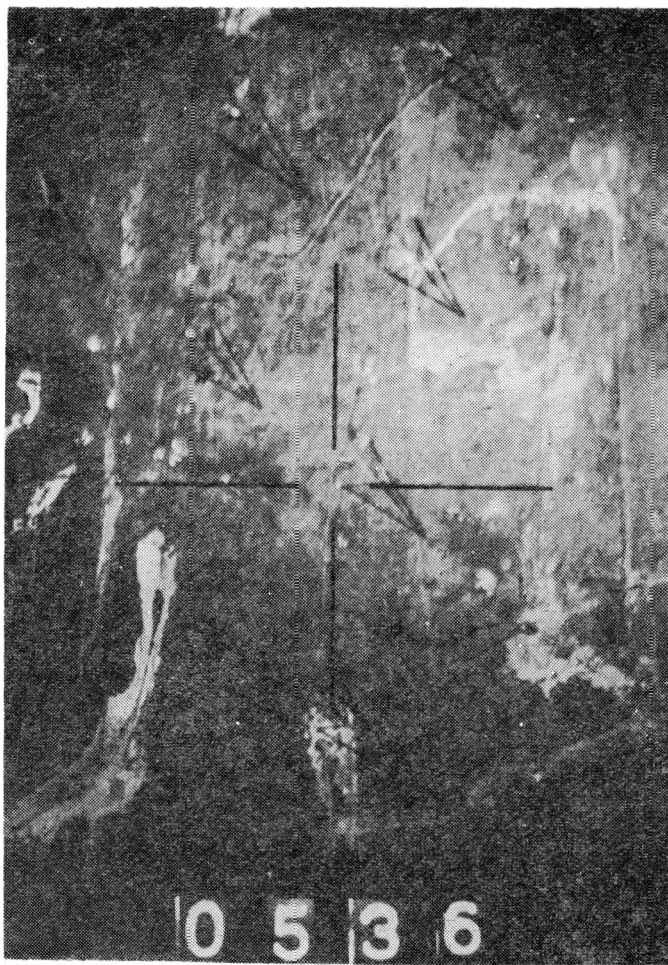
Rys. 6. Przykład punktu wybranego na drodze

nych, wyznaczonych metodą fotogrametrii analitycznej. Obliczenie i wyrównanie powyższych współrzędnych wykonano na elektronicznych maszynach cyfrowych GEO2 i ODRA 1204. Do obliczeń wykorzystano program blokowej aerotriangulacji analitycznej oparty na wyrównaniu niezależnych modeli.

Dokładność współrzędnych punktów sygnalizowanych charakteryzują następujące błędy średnie, obliczone na podstawie wzoru

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum [v^2]}{[n-1]}} \quad (6)$$

a) błąd średni współrzędnych punktów aerotriangulacyjnych (fotopunktów, punktów wiążących i środków rzutu), który wynosi:



Rys. 7. Przykład punktu wybranego w obrębie otworów wiertniczych

- przy opracowaniu zdjęć w skali 1 : 5000 i $n = 85$
 $m_x = \pm 10,3$ cm; $m_y = \pm 5,4$ cm; $m_z = \pm 9,7$ cm
- przy opracowaniu zdjęć w skali 1 : 3300 i $n = 96$
 $m_x = \pm 6,5$ cm; $m_y = \pm 4,8$ cm; $m_z = \pm 5,9$ cm

Do obliczenia powyższych błędów wg wzoru (6) przyjęto następujące oznaczenia:

v — różnice pomiędzy współrzędnymi geodezyjnymi i współrzędnymi z poszczególnych modeli — w odniesieniu do fotopunktów, oraz różnice pomiędzy współrzędnymi wyrównanymi i współrzędnymi z poszczególnych modeli — w odniesieniu do punktów wiążących i środków rzutów,

h — liczba modeli, w których występuje dany punkt (dla fotopunktów liczbę h zwiększono o jedność),

n — liczba punktów.

b) błąd średni współrzędnych punktów wyznaczanych (obserwacyjnych), który wynosi:

— przy opracowaniu zdjęć w skali 1 : 5000 i $n = 274$

$$m'_x = \pm 6,0 \text{ cm}; \quad m'_y = \pm 4,2 \text{ cm}; \quad m'_z = \pm 7,0 \text{ cm};$$

— przy opracowaniu zdjęć w skali 1 : 3300 i $n = 39$

$$m'_x = \pm 4,0 \text{ cm}; \quad m'_y = \pm 2,3 \text{ cm}; \quad m'_z = \pm 5,5 \text{ cm};$$

Do obliczenia powyższych błędów wg wzoru (6) przyjęto następujące oznaczenia:

v — różnice pomiędzy współrzędnymi wyrównanymi i współrzędnymi z poszczególnych modeli,

h — liczba modeli,

n — liczba punktów.

Warto zauważyć, że przy obliczaniu błędów średnich nie uwzględniono punktów, których współrzędne były wyznaczone tylko z jednego modelu. Ilustracją stopnia zgodności współrzędnych jednego i tego samego punktu, wyznaczonego z kilku modeli może służyć np. tablica 3, zawierająca fragment wyników obliczeń na EMC ODRA 1204.

Na podstawie przytoczonych wyników I cyklu obserwacyjnego oraz prac doświadczalno-badawczych w zakresie wykorzystania do badania odkształceń terenów górniczych zdjęć lotniczych w przybliżonej skali 1 : 3000 można sformułować wniosek, że składowe przemieszczeń Δx , Δy , Δz , liczone ze współrzędnych wyznaczonych w dwóch kolejnych cyklach obserwacyjnych będą określone z błędami średnimi rzędu jednego decymetra.

Technologii, opracowanej w Instytucie, fotogrametrycznej metody wyznaczania przemieszczeń i odkształceń terenów górniczych nie można uznać za ostateczną. Prowadzone są bowiem dalsze prace zmierzające do zwiększenia dokładności wyznaczanych przemieszczeń tak, aby wyniki pomiarów w pełni zaspakajały potrzeby naukowców i praktyków, badających szkody górnicze spowodowane eksploatacją surowców mineralnych metodą ługowania.

Tablica 3

Obliczenia wykonano na maszynie ODRA-1204

Wykazwspółrzędnych punktów sygnalizowanych, wyznaczonych na podstawie
zdjęć lotniczych w skali 1 : 5000

Nr punktu	Nr modelu	x	y	z	Uwagi
1006	7	636,29	-955,93	287,73	wsp. pktu 1006 z mod. nr 7
	16	636,11	-955,97	287,69	wsp. pktu 1006 z mod. nr 16
	17	636,11	-955,99	287,70	wsp. pktu 1006 z mod. nr 17
	19	635,93	-955,89	287,65	wsp. pktu 1006 z mod. nr 19
		636,11	-955,94	287,69	wsp. średnie pktu nr 1006
		,15	,04	,04	bł. średnie pktu nr 1006
					itd.
158	7	901,13	-398,58	270,47	
	8	901,23	-398,49	270,47	
	15	901,19	-398,51	270,54	
		901,18	-398,53	270,49	
		,05	,05	,04	
176	7	800,56	-402,22	271,24	
	8	800,61	-402,09	271,13	
	15	800,63	-402,10	271,18	
		800,60	-402,14	271,18	
		,04	,07	,06	
204	7	711,57	-409,83	268,17	
	8	711,61	-409,72	268,06	
	15	711,63	-409,71	268,05	
	20	711,57	-409,76	268,12	
		711,60	-409,75	268,10	
		,03	,05	0,6	

Część II

(opracował: Wojciech Bychawski)

**2. Uzupełniające badanie odkształceń terenu prowadzone metodami
fotogrametrii naziemnej**

Eksploracja złóż mineralnych prowadzona metodą podziemnego ługowania powoduje, jak już wspomniano, odkształcenia powierzchni terenu. Zmiany wywołane eksploatacją mają w różnych miejscach różny charakter. Najbardziej widoczną formą zmian terenu są zapadliska powodujące

całkowite zniszczenie krajobrazu. Znajomość faz rozwojowych zapadlisk, oprócz wartości poznawczych, ma istotne znaczenie przy prognozowaniu sytuacji katastroficznych na obszarze odkształcanym.

Częstotliwość powtarzania prac badawczych wykorzystujących zdjęcia lotnicze wynika z dążenia do zarejestrowania i zinterpretowania ogółu zmian powierzchniowych całego obszaru będącego pod wpływem eksploatacji. Zatem, przy ustalaniu tej częstotliwości, bierze się pod uwagę przeciętną szybkość zmian kształtu powierzchni całego terenu, która w przybliżeniu znana jest z doświadczenia. Szybkość tych zmian w rejonie zapadlisk jest z reguły znacznie większa od przeciętnej. Powstała więc obawa, że rejestracja faz rozwojowych zapadlisk wykonywana tylko na podstawie zdjęć lotniczych, głównie z uwagi na znaczny odstęp czasu między cyklami badawczymi, może nie charakteryzować tych faz dostatecznie dobrze. Zdecydowano się na wykonanie próby rejestrowania faz rozwojowych zapadlisk metodami fotogrametrii naziemnej. Decyzja ta uzasadniona jest tym, że oprócz zachowania podstawowych cech pomiaru fotogrametrycznego zwłaszcza takich, jak jednoczesność spostrzeżeń i brak ograniczenia liczby punktów kontrolowanych, ułatwia się proces pozyskiwania materiałów zdjęciowych i obniża się koszty opracowania.

Warunki terenowe oraz dążenie do możliwie najbardziej komunikatywnego sposobu przedstawienia zmian powierzchniowych zapadlisk spowodowały, że przyjęto następujące założenia wstępne:

1. Głównym źródłem informacji o zmianach kształtu powierzchni będą zmiany wysokości (ΔZ) zespołu nie sygnalizowanych punktów rozproszonych o z góry zadanych współrzędnych X i Y . W dalszej treści punkty te nazywać się będzie „punktami kontrolowanymi wysokościowo”.

2. Uzupełniającym źródłem informacji będą zmiany położenia zespołu punktów sygnalizowanych bądź też wybieranych na istniejących szczegółach sytuacyjnych, związanych z odkształcaną powierzchnią terenu. Zmiany położenia tych punktów określane będą w postaci trzech składowych przemieszczeń (ΔX , ΔY , ΔZ). W dalszej treści punkty te nazywać się będzie „punktami kontrolowanymi sytuacyjnie i wysokościowo”.

3. Pomocniczym źródłem informacji będą wielkoskalowe mapy sytuacyjno-wysokościowe (1 : 500 lub 1 : 250) obrazujące generalne zmiany rzeźby terenu oraz zmiany linii brzegowych i rzędnych lustra wody w zbiornikach zapadlisk.

Zmiany wysokości punktów kontrolowanych wysokościowo oraz zmiany położenia punktów kontrolowanych sytuacyjnie i wysokościowo, postanowiono określać jako różnice rzędnych bądź współrzędnych tych punktów wyznaczonych metodą fotogrametryczną raz ze stereogramów rejestrujących stan pierwotny zapadliska, drugi raz ze stereogramów rejestrujących stan wtórny. W obu wypadkach współrzędne określano w raz przy-

jętym układzie współrzędnych ($X Y Z$). Układ ten zdefiniowany jest zespołem danych punktów triangulacyjnych i reperów położonych poza zasięgiem wpływu szkód górniczych i jest traktowany jako nie ulegający zmianom w okresie między zdjęciami. Wzajemna stałość punktów odniesienia jest okresowo kontrolowana metodami geodezyjnymi.

W 1970 roku zarejestrowano dwukrotnie, w odstępie około dwóch miesięcy, fragment wybranego zapadliska o powierzchni około 7 ha.

Ukształtowanie powierzchni zapadliska nie bardzo odpowiadało wymaganiom stawianym przez fotogrametrię naziemną, głównie z uwagi na stosunkowo płaski teren i liczne zagłębienia powodujące „martwe pola”, których zlikwidowanie wymagało tworzenia pomocniczych stereogramów. Dlatego też obszar objęto aż czterema stereogramami zdjęć normalnych bądź zwróconych, wykonanych z trzech baz. Odległość fotografowania mieściła się w granicach od 200 do 350 metrów. Zdjęcia wykonano fototeodolitem Zeissa 19/1318 na płytach ORWO TOPO-PLATTE T01.

Odkryty horyzont oraz konieczność wykonywania dużej, jak na taki obszar, liczby stereogramów skłoniły do zastosowania opracowanej w Instytucie analitycznej metody tworzenia osnów kameralnych oraz numerycznego opracowania zdjęć naziemnych (W. Bychawski, W. Mizerski „Analityczne opracowanie pojedynczego stereogramu dowolnie zwróconych zdjęć naziemnych” Prace IGiK tom XVIII, zeszyt 1 (42), 1971). Metoda ta pozwala eliminować wpływy błędów elementów orientacji zdjęć w oparciu o znane współrzędne punktów bazowych i pomierzone z tych punktów kierunki do widocznych na zdjęciach daleko położonych szczegółów sytuacyjnych. Uniknięto w ten sposób konieczności sygnalizowania i określania wcięciami geodezyjnymi przynajmniej 36 fotopunktów, które musiałyby być dane, gdyby zastosowano konwencjonalny sposób geometryzowania modeli utworzonych ze zdjęć naziemnych, co obniżyło pracochłonność prac polowych o około 50%.

Punkty kontrolowane wysokościowo, które zgodnie z założeniami wstępnymi mają w głównej mierze charakteryzować zmiany powierzchni zapadliska, wybrano obserwując modele stereoskopowe utworzone z odpowiednich par zdjęć, na których zarejestrowano stan wyjściowy zapadliska. Przy wyborze zwracano uwagę, aby punkty te były w miarę równomiernie rozmieszczone na całym badanym obszarze, jak również, aby były sytuowane w miejscach odkrytych, pozbawionych szaty roślinnej. Punktów takich wybrano około stu, co oznacza, że odległość między punktami kontrolowanymi wynosiła średnio około 25 metrów.

Rzędne punktów kontrolowanych wysokościowo określono metodą analogową posługując się stereoautografem Zeissa 1318. Strojenie zdjęć w stereoautografie wykonywano w oparciu o ośnowę kameralną uzyskaną na drodze analitycznej wspomnianą już metodą. Po odczytaniu z licznika ste-

reoaautografu rzędnej punktu kontrolowanego ustalano numerycznie i graficznie położenie sytuacyjne takiego punktu (X , Y). Średni błąd wyznaczenia rzędnych punktów kontrolowanych wysokościowo, określony na podstawie różnic na fotopunktach po zestrojeniu zdjęć, nie przekraczał wielkości $\pm 0,08$ m.

Następnie przystąpiono do opracowania stereogramów utworzonych z odpowiednich par zdjęć, na których zarejestrowano stan zapadliska po upływie około dwóch miesięcy od stanu wyjściowego.

Strojenie nowych zdjęć w stereoautografie wykonano w oparciu o nową osnowę kameralną uzyskaną, jak poprzednio, na drodze analitycznej. Dzięki temu obserwowano zgeometryzowane modele stereoskopowe zorientowane względem przyjętego układu współrzędnych.

Na podstawie określonego poprzednio położenia sytuacyjnego punktów kontrolowanych (X , Y) odnajdywano je w przestrzeni modelu stereoskopowego i odczytywano na liczniku stereoautografu nowe rzędne tych punktów. Różnice rzędnych poszczególnych punktów kontrolowanych wysokościowo są miarą zmiany kształtu powierzchni zapadliska.

Przeprowadzony eksperyment potwierdził spodziewaną przydatność zdjęć naziemnych do badania faz rozwojowych zapadlisk prowadzonego w oparciu o zespół punktów kontrolowanych wysokościowo, jak również potwierdził przydatność zastosowanej tu analitycznej metody kameralnego tworzenia osnów dla opracowań stereoautogrametrycznych.

Dokładność wyznaczenia zmian wysokości punktów kontrolowanych, określona na podstawie średnich błędów wyznaczenia rzędnych z obu zespołów zdjęć i potwierdzona na podstawie różnic wysokości punktów stałych oraz specjalnie założonych punktów kontrolnych, nie jest mniejsza od 0,1 metra.

Otrzymane różnice rzędnych punktów kontrolowanych wysokościowo nie wykazały zmian powierzchni zapadliska w okresie między zdjęciami.

Punkty kontrolowane sytuacyjnie i wysokościowo, które zgodnie z założeniami wstępnymi mają dostarczać uzupełniających informacji o zmianach powierzchni zapadliska wybrano, w liczbie 12, wykorzystując widoczne na zdjęciach szczegóły sytuacyjne.

Opracowanie stereogramów utworzonych ze stereogramów, na których zarejestrowano stan wyjściowy zapadliska oraz ze stereogramów, na których zarejestrowano stan zapadliska po upływie około dwóch miesięcy, wykonano numerycznie wykorzystując ponownie wspomnianą już analityczną metodę opracowaną w IGiK. W wyniku tego otrzymano dwa wykazy współrzędnych tych samych punktów, z tym, że jeden z wykazów obrazował położenie punktów kontrolowanych w chwili wykonywania zdjęć pierwszych (stan wyjściowy), drugi zaś określał położenie tych samych punktów w tym samym układzie lecz w chwili wykonywania zdjęć

drugich (po upływie około dwóch miesięcy od zarejestrowania stanu wyjściowego). Różnice współrzędnych jednoimiennych punktów obu wykazów są poszukiwaną miarą zmian położenia tych punktów w stosunku do przyjętego układu współrzędnych.

Ponieważ celem eksperymentu było sprawdzenie przydatności zastosowanej metody i określenie możliwych do osiągnięcia w istniejących warunkach dokładności, współrzędne punktów kontrolowanych określano dwukrotnie, niezależnie dla obu zarejestrowanych stanów zapadliska. Uzyskano dzięki temu możliwość oceny dokładności wyznaczenia współrzędnych określających położenie punktów kontrolowanych w chwili wykonywania zdjęć pierwszych jak i zdjęć drugich, a więc i ocenę dokładności wyznaczenia zmiany współrzędnych.

Stwierdzono, że różnice współrzędnych punktów kontrolowanych sytuacyjnie i wysokościowo nie sygnalizowanych, lecz wybieranych na istniejących szczegółach sytuacyjnych, określano przeciętnie z błędem średnim położenia rzędu $\pm 0,09$ m i błędem średnim wysokości rzędu $\pm 0,03$ m. Stwierdzono również, na podstawie analizy dokładności zastosowanej metody popartej danymi empirycznymi, że dominującym źródłem niedokładności określania współrzędnych punktów kontrolowanych jest błąd nacełowania, czyniony przez obserwatora przy pomiarze współrzędnych tło-owych tych punktów. Stwierdzenie to oznacza, iż można mówić o możliwości podniesienia dokładności opracowań omawianą metodą w przypadku, gdy punkty kontrolowane będą sygnalizowane w momencie wykonania zdjęć. Z 12 punktów kontrolowanych, siedem określonych było przez obserwatora jako bardzo dobrze widoczne czyli tak, jak powinny być widoczne punkty specjalnie sygnalizowane. Po wykonaniu obliczeń okazało się, że na tych punktach błędy średnie położenia zawierały się w granicach od $\pm 0,01$ m do $\pm 0,04$ m zaś błędy średnie wysokości nie przekraczały wielkości $\pm 0,02$ m.

Badanie zmian położenia punktów kontrolowanych sytuacyjnie i wysokościowo potwierdziło informację uzyskaną z badania zmian rzędnych punktów kontrolowanych wysokościowo, z której wynika, iż w okresie między zdjęciami powierzchnia zapadliska nie uległa zmianie.

Wielkoskalowe mapy sytuacyjno-wysokościowe mające, zgodnie ze wstępnymi założeniami, stanowić pomocnicze źródło informacji o stanie zapadliska, wykonywane były przy użyciu stereoaautografu Zeissa 1318. Dla sporządzenia tych map wykorzystywano zgeometryzowane modele stereoskopowe tworzone dla określenia rzędnych punktów kontrolowanych wysokościowo, o których była już mowa. Sposób opracowania tych map nie odbiegał od zwykłego, a więc nie wymaga osobnego omówienia. Dodać tylko można, że na podstawie tych map jeszcze raz otrzymano potwierdzenie, iż stan zapadliska nie uległ zmianie w okresie między zdjęciami. Zarys

linii brzegowych i rzędne lustra wody zbiorników zapadliska nie uległy zmianie w granicach dokładności opracowania.

Eksperymentalne zastosowanie metod fotogrametrii naziemnej do badania faz rozwojowych zapadlisk potwierdziło słuszność przyjętych założeń i zastosowanych technologii. Wyniki i otrzymane dokładności zadowalają zainteresowanych. W roku 1972 planuje się rozpoczęcie systematycznych badań faz rozwojowych zapadlisk, lecz będą one prowadzone już przez przedsiębiorstwo produkcyjne, w którym Instytut wdrożył omówioną metodę wyznaczania przemieszczeń terenu w oparciu o fotogrametryczne zdjęcia naziemne.

Recenzował: doc. dr Andrzej Hermanowski

Rękopis złożono w Redakcji w kwietniu 1972 r.

БОГДАН БОХОНОС
ВОЙЦЕХ ВЫХАВСКИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

Целью научно-исследовательских работ в области применения фотограмметрии для исследования деформации шахтных территорий является определение технических основ рекультивирования выработанных территорий и способа прогнозирования шахтных влияний. Представлена долголетняя программа исследования деформации территории на одной из открытых соляных шахт, которая эксплуатировалась методом подземного выщелачивания, а также выводы, полученные на основании анализа технических возможностей проведения вышеуказанных заданий. На базе принятого технологического процесса описаны результаты первого цикла исследований, касающихся стабилизации и сигнализации сети наблюдательных пунктов, выполнения снимков с вертолѐта, геодезического измерения фотопунктов, а также фотограмметрических измерений и вычислений. Описывается также опытное применение наземной фотограммометрии для исследований фаз развития провалов.

BOHDAN BOHONOS
WOJCIECH BYCHAWSKI

FOTOGRAMMETRIC DETERMINATION OF THE DISPLACEMENT AND DEFORMATION VALUES OF THE TERREIN SURFACE

Summary

The scientific-research works in scope of using the large-scale photogrammetry for an investigation of deformations of the mining terrains are aimed at obtaining the technical basis for recultivation of postexploitation terrains, and at obtaining the method of predicting the effects of mining operations. There has been presented a many years program and technical possibility of the investigation of terrain deformations at one of salt mines where the process of leaching is employed. There have been described the results of the first cycle of the investigation dealing with a net of markers on the ground, a geodetic measurement of control points, taking photographs with a camera mounted in a helicopter as well as photogrammetric measurements and calculations. An experimental works to use the ground photogrammetry for an investigation of phases of sink holes extension have also been presented.