

PAWEŁ ORŁOWSKI, JERZY WYSOCKI

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego —
— Akademia Rolnicza
Warszawa

FOTOINTERPRETACJA I FOTOGRAMETRIA W OPRACOWANIACH WYSOKOŚCIOWYCH DLA CELÓW PROJEKTOWYCH

WSTĘP

Jakość i szybkość różnego rodzaju prac projektowych jest w dużej mierze związana z dostarczeniem projektantowi coraz bardziej szczegółowych i aktualnych informacji o terenie. Zdjęcia lotnicze jako nośnik tych informacji wykazują pod tym względem zdecydowaną przewagę nad metodami konwencjonalnymi, co potwierdzają liczne prace badawcze i eksperymentalne prowadzone w wielu krajach. Jednocześnie z coraz szerszym wykorzystaniem zdjęć lotniczych w postaci „surowej” (odbitki stykowe, negatywy, diapozytywy) stosowanych do uzyskiwania informacji jakościowych wzrasta zapotrzebowanie na informację natury ilościowej, uzyskiwaną na przykład poprzez odpowiednie opracowania fotogrametryczne.

Badania nad możliwością stosowania zdjęć lotniczych w opracowaniach projektowych, na przykład dla celów melioracyjnych, wskazują na celowość wykorzystania tych zdjęć przy opracowaniu map glebowych, do określenia lokalizacji gruntów podmokłych, inwentaryzacji istniejących systemów drenarskich czy też dokumentacji przeobrażeń krajobrazu.

Nie mniej istotnym zagadnieniem w opracowaniach przygotowywanych na potrzeby projektowania jest szczegółowość i dokładność rozpoznania rzeźby terenu. Model stereoskopowy uzyskany ze zdjęć w odpowiedniej skali pozwala na rozpoznanie różnych szczegółów reliefu, jak np.: wododziały, grzbiety, pagórki, obniżenia, doliny, rynny erozyjne itp. Dalszym etapem uściślenia informacji o rzeźbie terenu i przedstawienia jej w postaci ilościowej są opracowania fotogrametryczne. Dokładność przedstawienia rzeźby terenu ma istotne znaczenie nie tylko w pracach projektowych, lecz także w badaniach specjalnych różnych dziedzin nauk o Ziemi.

W artykule przedstawiono wyniki badań nad dokładnością fotogrametrycznych opracowań wysokościowych oraz praktyczne próby wykorzystania fotointerpretacji i fotogrametrii w celach projektowych na przykładzie projektu sieci melioracyjnej.

METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Zakres prac obejmował fotogrametryczne opracowania analogowe (autogrametryczne) oraz analityczne. Przeprowadzono badanie dokładności opracowań numerycznych (punktowych) oraz opracowań warstwicznych. W celach porównawczych wykonano również opracowanie za pomocą stereoskopu i stereomikrometru.

Opracowania analityczne zostały wykonane metodą aerotriangulacji z niezależnych zdjęć według programu na maszynę cyfrową. Pomiar współrzędnych łkowych i paralaks wykonano na Stekometrze firmy Carl Zeiss — Jena. Automatycznie zarejestrowane na taśmie perforowanej wielkości posłużyły do obliczenia współrzędnych terenowych (wysokości) wyznaczanych punktów. Obliczenia zostały wykonane na EMC ODRA 1204.

Opracowania analogowe wykonano na autografie Wild A 8, Stereoplanigrafie C 5 oraz Topoflexie firmy Carl Zeiss — Jena. W przypadku opracowań na Stereoplanigrafie wykorzystano przystawkę do automatycznej rejestracji współrzędnych — Koordimetr Zeissa.

Badania przeprowadzono na obiekcie eksperymentalnym o urozmaiconej rzeźbie terenu i różnicach wysokości dochodzących do 30 m w granicach stereogramu.

Ocenę dokładności fotogrametrycznych opracowań warstwicznych wykonano metodą liniową. Przy wyborze metody kierowano się możliwością badania zarówno bezwzględnej, jak i względnej dokładności warstw. **Ocena poprawności odtworzenia form terenowych (dokładność względna)** może mieć istotne znaczenie tak w pracach projektowych, jak i w badaniach specjalnych różnych nauk. W badaniu dokładności warstwicz wykorzystano warstwicę „prawdziwe” wyznaczone w terenie metodą bezpośredniego warstwiczowania za pomocą niwelatora (rys. 3). Dokładność określenia wysokości punktów warstwicy można oszacować na kilka centymetrów.

Autorzy dysponowali zdjęciami lotniczymi w skali 1 : 17 500, wykonanymi kamerą szerokokątną o ogniskowej 11,5 cm i formacie zdjęcia 18 cm × 18 cm. Zdjęcia były wykonane z wysokości około 2000 m.

Zdjęcia lotnicze i opracowania posłużyły również do przeprowadzenia próby wykorzystania fotointerpretacji i fotogrametrii do celów projektowych.

OCENA DOKŁADNOŚCI OPRACOWAŃ NUMERYCZNYCH

Tabela 1
Tableau 1
Dokładność fotogrametrycznych pomiarów numerycznych (punktowych)
Précision des mesures photogramétriques numériques

Sposób opracowania (Mode d'élaboration)	Błędy średnie (Erreurs moyennes)	
	[w metrach] [en mètres]	[w promilach wysokości lotu] [en pour mille d'hau- teur du vol]
Metoda anali- tyczna	0,22	0,11‰ H
Stereoplanigraf C5	0,24	0,12‰ H
Autograf Wild A8	0,34	0,17‰ H
Topoflex	0,5	0,25‰ H
Stereomikrometr	3,3	1,65‰ H

Ocenę dokładności fotogra-
metrycznych opracowań nume-
rycznych przeprowadzono na
podstawie analizy błędów o-
trzymanych z porównania wy-
sokości punktów uzyskanych
z opracowań fotogrametrycz-
nych z wysokościami tych sa-
mych punktów wyznaczonymi
metodą niwelacji geometrycz-
nej z dokładnością rzędu 3 cm.

Dane liczbowe odnośnie do
dokładności opracowań nume-
rycznych przedstawiono w
tab. 1.

Podana w tabeli dokładność
wysokości punktów wyznaczo-
nych metodą analityczną odno-
si się do pojedynczych stereo-
gramów, dla których po trans-
formacji ortogonalnej została
zastosowana transformacja wie-
liomianowa typu:

$$\bar{X} = \bar{x} + A \cdot g,$$

gdzie:

\bar{x} — wektor współrzędnych pierwotnych,

\bar{X} — wektor współrzędnych poprawionych,

A — $[1, x, xy, x^2, y^2]$,

g — macierz kolumnowa złożona z wyrazów: $a_0, a_1, a_2 \dots$

Jak wynika z tabeli, dokładność wyznaczenia wysokości punktu zależy w dużej mierze od instrumentu oraz jego dokładności i może być podniesiona poprzez zwiększenie skali zdjęć lotniczych (zmniejszenie wysokości lotu). Opracowania wykonane metodą analityczną na podstawie pomiarów na stereokomparatorze dały dokładność około 15 razy większą niż opracowania wykonane za pomocą stereomikrometru.

OCENA DOKŁADNOŚCI OPRACOWAŃ WARSTWICOWYCH

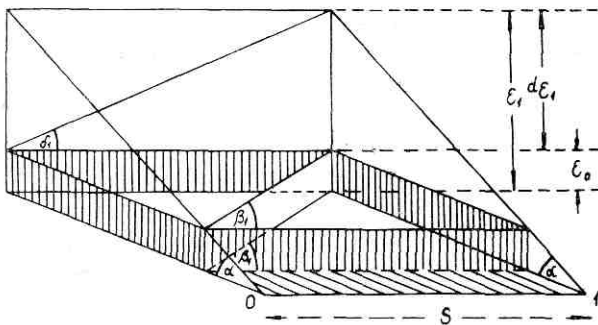
Metody fotogrametryczne pozwalają na szybkie opracowanie rzeźby terenu. Jednak inna geneza otrzymywania linii warstwicznych w opracowaniach autogrametrycznych niż w opracowaniach konwencjonalnych wymaga odpowiedniej metodyki badań.

UWAGI NA TEMAT BADANIA DOKŁADNOŚCI WARSTWIC

Opracowana przez C. Koppego prawie sto lat temu metoda badania warstwic z uwagi na swoją prostotę i przejrzystość jest powszechnie stosowana do chwili obecnej. Metoda ta pozwala na punktowe sprawdzenie bezwzględnej dokładności warstwic. Nie ma jednak możliwości oceny poprawności kształtu warstwic, który wynika z prawidłowości odtworzenia morfologii terenu. Z uwagi na fakt, że w wielu zagadnieniach poprawność odtworzenia form terenowych ma bardzo duże znaczenie, dokładność względna warstwic była w ostatnich latach przedmiotem zainteresowania wielu badaczy. Pierwsza i jedna z najbardziej znanych metod została opracowana przez G. Lindiga (1956). Wierność form jest w tym przypadku sprawdzana poprzez wyrażony w jednostkach kątowych błąd kierunku, który jest kątem pomiędzy odpowiednimi cięciwami warstwic pomierzonej oraz warstwic „prawdziwej”, jak również błąd krzywizny, który jest różnicą pomiędzy krzywizną w punkcie leżącym na warstwic pomierzonej oraz krzywizną w odpowiadającym mu punkcie na warstwic wzorcowej.

Metoda Lindiga była następnie wykorzystana przez wielu badaczy. Na przykład R. F ö r s t n e r (1957), widząc, że przebieg badanej warstwic względem warstwic wzorcowej ma postać krzywej sinusowej, przedstawił warstwic badaną w postaci szeregu Fouriera. Faza i amplituda odchyłeń posłużyła tu jako podstawa oceny dokładności.

Pewnym mankamentem metody Lindiga może być fakt, że błędy kierunku czy krzywizny są określone w jednostkach kątowych. Miara kątowa może być trudna do percepcji. W pojedynczych przypadkach mogą powstać trudności określenia, czy otrzymany wynik jest dobry, czy zły. W związku z tym lepszym rozwiązaniem wydaje się określenie względnej dokładności warstwic za pomocą błędu wyrażonego w mierze liniowej (S c h o l z, 1962) (rys. 1).



Rys. 1. Liniowe badanie dokładności warstwic fotogrametrycznych

Fig. 1. Etude linéaire sur la précision des courbes de niveau photogrammétriques

DOKŁADNOŚĆ OPRACOWAŃ WARSTWICOWYCH

W ramach przeprowadzonych badań dokładność względną warstwic określono jako:

$$\Delta = \pm \sqrt{\frac{[d \varepsilon^2]}{n}}$$

Z poszczególnych błędów wysokości warstwicy (ε) (rys. 1), określonych na sąsiednich punktach kontrolnych, tworzono na bieżąco różnice $d\varepsilon$, na podstawie których była określana wielkość błędu Δ . Jak wynika z rys. 1, przyjęty sposób określania dokładności względnej jest zgodny z założeniami metody Lindiga, ponieważ błąd kierunku może być określony na podstawie błędu Δ :

$$\tan \delta_1 = \frac{d\varepsilon_1}{s} = \tan \alpha \cdot \tan \beta_1,$$

lub

$$\tan \delta = \tan \alpha \cdot \tan \beta = \frac{\Delta}{s}$$

$$\delta = \pm \frac{q}{s} \sqrt{\frac{[d\varepsilon^2]}{n}} = \pm \Delta \cdot \frac{q}{s},$$

gdzie:

- $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ — błąd wysokości warstwicy w sąsiednich punktach badawczych 0 oraz 1 (leżących w odległości s),
- β — błąd kierunku warstwicy,
- α — kąt nachylenia terenu,
- δ — błąd nachylenia poprzecznego.

Oceny dokładności fotogrametrycznych opracowań wysokościowych dokonano w przypadku:

- opracowań wykonanych metodą bezpośrednią przez różnych obserwatorów na Stereoplanigrafie C 5 oraz autografie Wild A 8,
- warstw opracowanych na podstawie pomiarów numerycznych wykonanych metodą analogową oraz analityczną.

W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono podobną dokładność

warstw wykonanych wymienionymi metodami z tych samych zdjęć lotniczych. Skala opracowań wynosiła 1 : 5 000.

Dane liczbowe charakteryzujące dokładność autogrametryczną opracowań warstwowych wykonanych metodą bezpośrednią przedstawiono w tab. 2.

Jak wynika z przytoczonych w tab. 2 danych, dokładność względna warstw fotogrametrycznych jest wyższa niż

Tabela 2
Tableau 2

Dokładność warstw fotogrametrycznych
Précision des courbes de niveau photogramétriques

Sposób opracowania (Mode d'élaboration)	Błędy średnie (Erreurs moyennes)	
	m_h	Δ
	(w metrach) (en mètres)	
Stereoplanigraf C5	0,34	0,26
Autograf Wild A8	0,32	0,20

dokładność bezwzględna wyrażona błędem m_h obliczonym według wzoru Koppego. Podobną dokładność warstwicy otrzymano również dla opracowania klasycznego wykonanego w terenie metodą tachymetryczną. Jednak w tym przypadku względna i bezwzględna dokładność warstwicy były prawie takie same.

WYKORZYSTANIE FOTOINTERPRETACJI I FOTOGRAMETRII DLA CELÓW PROJEKTOWYCH

Zakres przeprowadzonych prac obejmował:

- próbę sporządzenia projektu sieci melioracyjnej bezpośrednio na modelu stereoskopowym z wykorzystaniem stereomikrometru,
- próbę sporządzenia projektu sieci bezpośrednio na modelu stereoskopowym uzyskanym za pomocą Topoflexu z uściśleniem profili poprzez pomiary numeryczne wykonane również na tym instrumencie,
- sporządzenie tego samego projektu na mapach warstwicznych opracowanych fotogrametrycznie różnymi metodami.

UWAGI OGÓLNE O TOPOFLEXIE

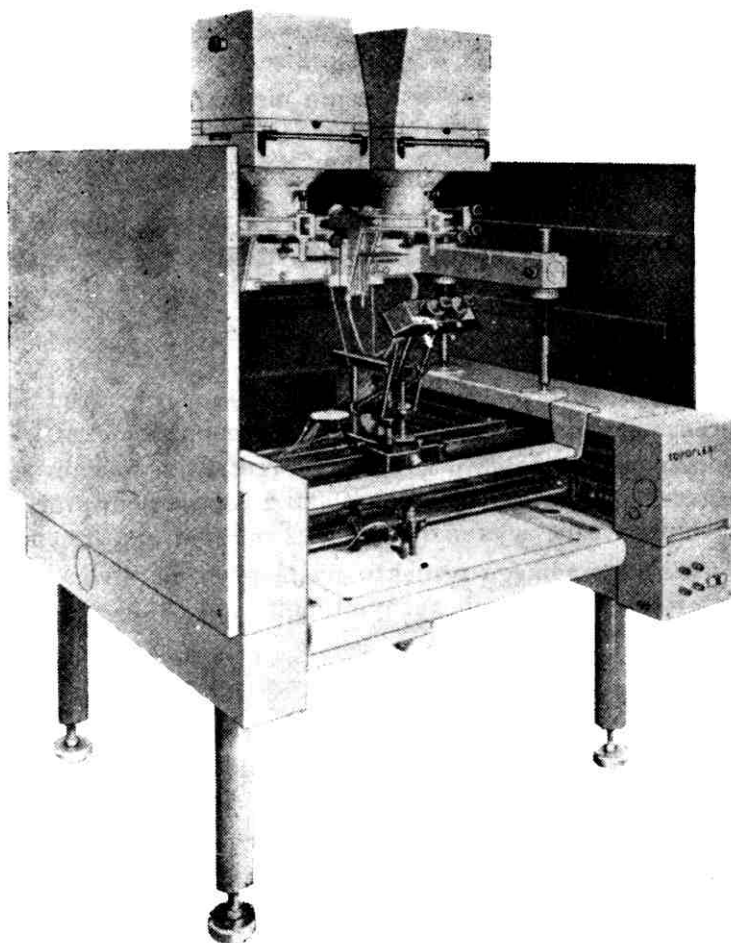
Topoflex jest nowym przyrządem do stereoskopowego kartowania, produkowanym przez firmę VEB Carl Zeiss-Jena. Ogólny widok instrumentu przedstawiono na fot. 1.

Różni się on istotnymi szczegółami od innych autografów. Zastosowano czystą projekcję optyczną. Zdjęcia oryginalne (negatywy lub diapozytywy o wymiarach 23 cm × 23 cm) tworzące stereogram są zakładane do dwóch kamer autografu. Obrazy z kamer są rzutowane na dwa stoliki projekcyjne, zaś obraz stereoskopowy jest obserwowany przez system obserwacyjny, który stanowi stereoskop zwierciadlany. Stół, na którym kreślony jest rysunek w wybranej skali, znajduje się pod stereoskopem, bezpośrednio przed obserwatorem. Instrument jest zaopatrzony w licznik wysokości z trybem ciernym, który umożliwia bezskokowe ustawienie skali modelu stereoskopowego.

Instrument jest zbudowany pod kątem jak największej przydatności do reambulacji map. Jednak przejrzysta budowa i prosta obsługa pozwalają na jego szerokie wykorzystanie do opracowań różnych zagadnień, które wymagają danych liczbowych w procesie interpretacji zdjęć lotniczych.

OPRACOWANIE PROJEKTU SIECI ODWADNIAJĄCEJ

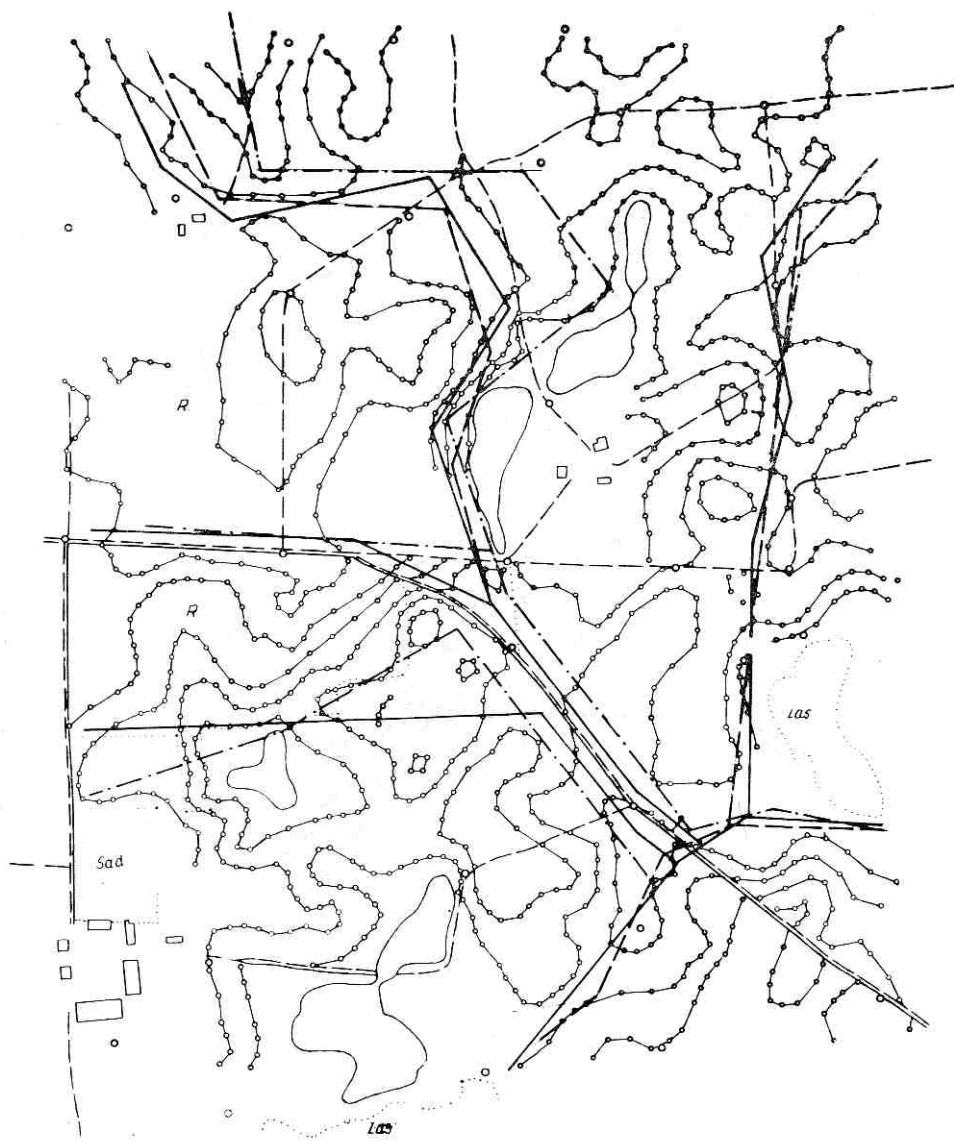
Jednym z głównych celów opracowania była ocena dokładności zaprojektowania niwelet podstawowych elementów sieci i do tego zagad-



Fot. 1. Topoflex
Phot. 1. Topoflex

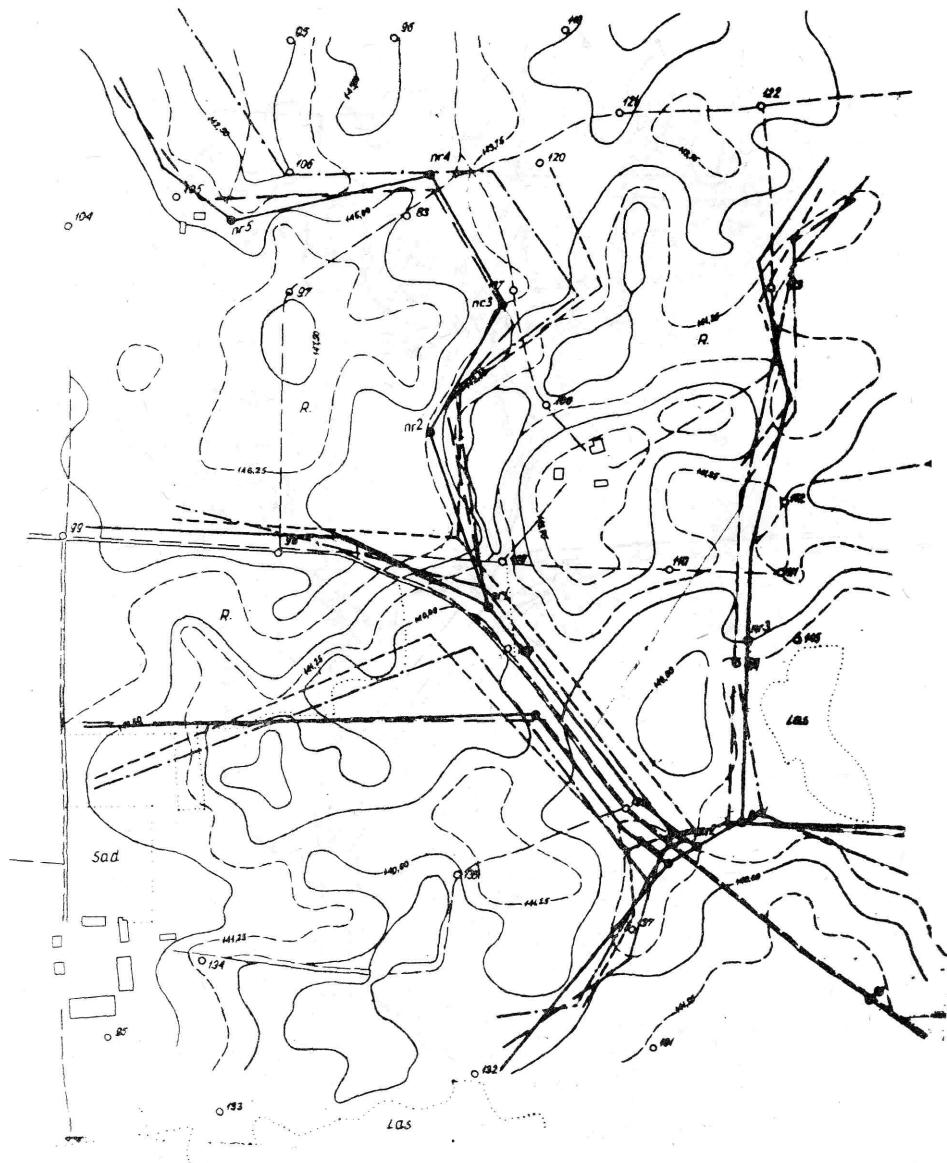
nienia ograniczono szeroki zakres prac potrzebnych do wykonania pełnego projektu technicznego drenowania.

Model stereoskopowy pozwala na wszechstronny wgląd w opracowywany teren. Na podstawie obserwowanego przestrzennego modelu wyrysowano na wspólny podkład charakterystyczne linie wododziałowe i ściekowe zgodnie z ich naturalnym położeniem w terenie. Wododziały główne wyznaczyły granice pomiędzy poszczególnymi działami drenarskimi. Następnie w naturalnych dolinkach i zagłębieniach terenu w poszczególnych działach poprowadzono zbieracze główne i boczne, otrzymując w ten sposób układ poziomy sieci odwadniającej. Niezależnie od tego projekt sieci odwadniającej sporządzono również na mapach warstwicznych opracowanych różnymi metodami fotogrametrycznymi (rys. 2, 3).



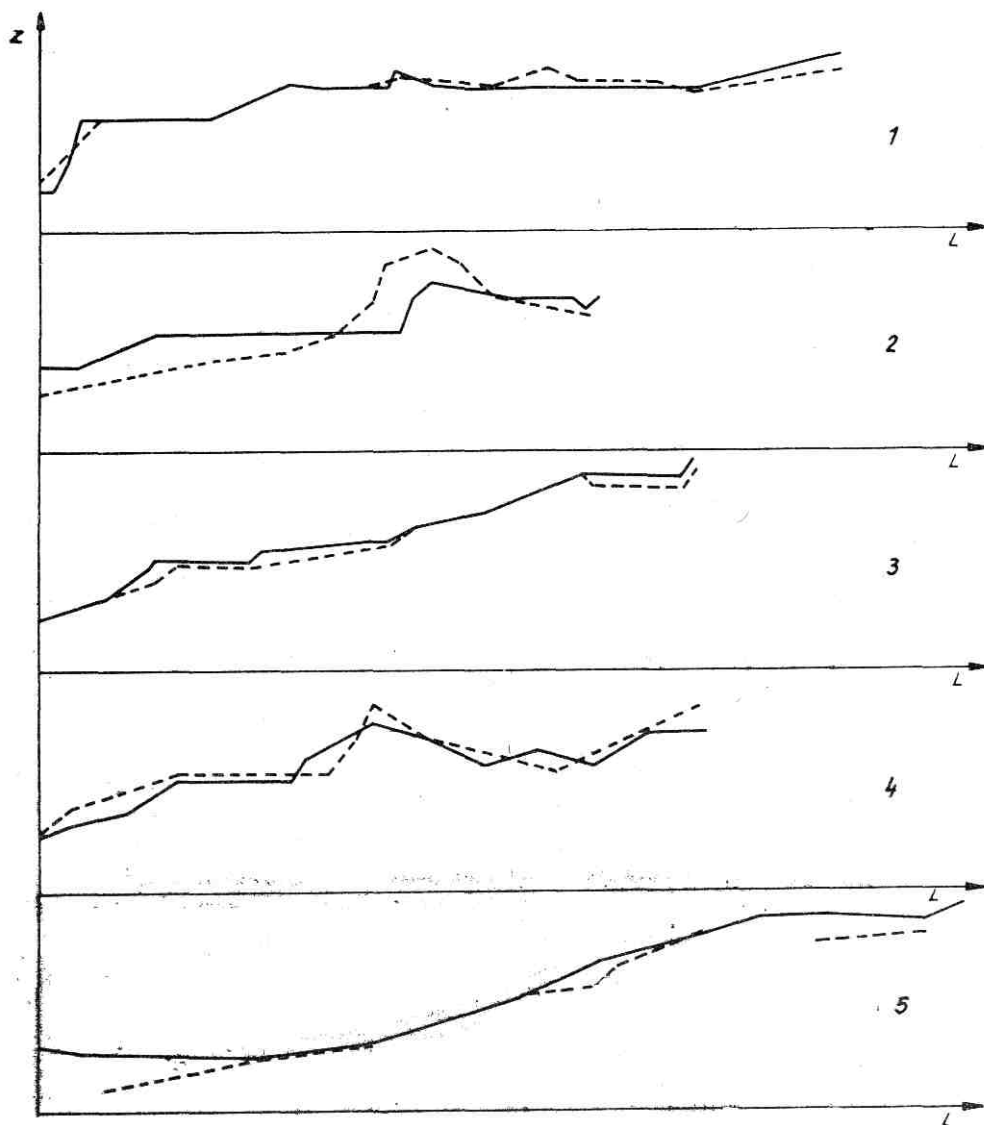
Rys. 2. Porównanie tras zbieraczy zaprojektowanych na:
 - - - - modelu stereoskopowym, - . - . modelu stereoskopowym na Tropoflexie, ——— mapie tachimetrycznej; ○—○—○—○ warstwie wyznaczone metodą bezpośredniego warstwizowania

Fig. 2. Comparaison des trajets des ramasseurs projetés sur:
 - - - - le modèle de stéréoscope, - . - . le modèle de stéréoscope sur Topoflexie, ——— la carte tachimétrique, ○—○—○—○ les courbes de niveau jalonnées en méthode direct



Rys. 3. Porównanie tras zbieraczy zaprojektowanych na:
 ----- mapie sporządzonej na stereoplanigrafie C5, ----- mapie sporządzonej na
 podstawie opracowań analitycznych, -.-.-.- mapie sporządzonej na Topoflexie, ——— mapie tachimetrycznej

Fig. 3. Comparaison des trajets des ramasseurs projetés sur:
 ----- la carte élaborée sur le stéréoplanigraphie C5, ----- la carte préparé à partir
 des élaborations analytiques, -.-.-.- carte élaborée sur Topoflex, ——— la carte tachi-
 métrique



Rys. 4. Porównanie profili terenowych sporządzonych na podstawie map warstwicowych opracowanych różnymi metodami; skala $1 : \frac{200}{5000}$:

— — — profil sporządzony na podstawie danych geodezyjnych: 1 — mapa sporządzona na stereoplanigrafie C5, 2 — mapa sporządzona na Topoflexie, 3 — mapa sporządzona na podstawie opracowań analitycznych, 4 — profil sporządzony na podstawie numerycznego pomiaru na Topoflexie, 5 — model stereoskopowy

Fig. 4. Comparaison des profils de terrain réalisés à partir des cartes de courbes de niveau élaborées en méthodes différentes: échelle $1 : \frac{200}{5000}$:

— — — profil réalisé à partir des données géodésiques: 1 — carte élaborée sur le stéréoplanigraphe C5, 2 — carte élaborée sur Topoflex, 3 — carte préparée à partir des élaborations analytiques, 4 — profil réalisé à partir de la mesure numérique sur Topoflex, 5 — modèle stéréoscopique

Jak wynika z rys. 2, 3, przedstawiających układ poziomy sieci odwadniającej, w terenie o wyraźnych formach terenowych model stereoskopowy uzyskany ze zdjęć w odpowiedniej skali pozwala na ogólnie poprawne zaprojektowanie głównych elementów sieci. Wykorzystanie modelu stereoskopowego przy projektowaniu przebiegu tras dla innych typów prac projektowych powinno być jednak poprzedzone odpowiednimi pracami eksperymentalnymi.

Dużą pomoc przy wykonywaniu projektu jest możliwość interpretacji użytków rolnych, dróg, terenów zabudowanych, gruntów pod wodami itp.

Następnym etapem prac projektowych było sporządzenie profili terenowych potrzebnych do zaprojektowania niwelet rurociągów. Profile zostały opracowane na podstawie map warstwicowych wykonanych różnymi metodami fotogrametrycznymi, jak również z pomiarów numerycznych wykonanych na Topoflexie. Dużą zaletą projektowania bezpośrednio na Topoflexie była możliwość ciągłego konfrontowania przez obserwatora (projektanta) sytuacji rysowanej na stole rysunkowym z obrazem stereoskopowym widocznym w okularach stereoskopu.

Przykładowe profile terenu opracowane przy wykorzystaniu różnych metod przedstawiono na rys. 4.

Przeprowadzono analizę dokładności opracowania profili terenu, która wykazała, że dokładność ta odpowiada dokładności map warstwicowych opracowanych różnymi metodami. W przypadku opracowań wykonanych na Topoflexie dokładność profili uzyskanych z warstwic (skala zdjęć lotniczych 1 : 17 500) oszacowano na $\pm 0,85$ m, zaś dokładność profili opracowanych metodą punktową, z odczytywaniem wysokości punktów z licznika, wyniosła $\pm 0,5$ m. Jak z tego wynika, zaproponowana metoda polegająca na wstępnym sporządzeniu projektu z wykorzystaniem modelu stereoskopowego, a następnie wykonaniu fotogrametrycznych pomiarów punktowych wzdłuż zaprojektowanych tras, pozwoliła na zwiększenie dokładności profili prawie o 50% w stosunku do mapy warstwicowej.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analizy wskazują na celowość wykorzystywania fotointerpretacji i fotogrametrii do opracowań wysokościowych w celach projektowych. Zakres wykorzystywania tych opracowań zależeć będzie od skali zdjęć lotniczych i metody opracowania. Przeprowadzona w ramach badań ocena dokładności opracowań wysokościowych wykonanych różnymi metodami może być pomocna przy wyborze zarówno skali zdjęć lotniczych, jak i metody opracowania. Otrzymaną dokładność opracowań wysokościowych można ogólnie oszacować na około 0,2‰ wysokości lotu. W związku z tym przy wymaganej na przykład w projektach melioracyjnych dokładności rzędu 0,2 m zdjęcia lotnicze powinny być wykonane z wysokości około 1000 m, czyli skala tych zdjęć powinna wy-

nosić około 1 : 8 000 (dla kamery o ogniskowej 11,5 cm i formacie zdjęcia 18 cm × 18 cm). Z uwagi na dużą pracochłonność metody analitycznej wydaje się, że wykorzystanie jej w celach projektowych może być najwłaściwsze w terenach zupełnie płaskich, gdzie bezpośrednio wysokościowe opracowania autogrametryczne są trudne. Ocena dokładności przedstawienia rzeźby terenu może być także wykorzystana w badaniach specjalnych różnych dziedzin nauk o Ziemi.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów zaproponowano metodę, polegającą na wstępnym sporządzeniu projektu sieci z wykorzystaniem modelu stereoskopowego i niezbędnych opracowań fotogrametrycznych, a następnie uściślenia wykonanego projektu poprzez fotogrametryczne pomiary profili terenowych wzdłuż zaprojektowanych tras.

LITERATURA

- Lindig G., 1956: *Neu Methoden der Schichtlinienprüfung*, „Z. Vermessungswes”, No 7, S. 296—303.
Förstner R., 1957: *Schichtlinienfehler*, „Z. Vermessungswes”, No 12, S. 445—448.
Scholz W., 1962: *Zur Höhengenaugigkeit photogrammetrischer Modellauswertungen*, Wiss. Arb. Geod. u. Phot. Th Hannover, No 17.

PAWEŁ ORŁOWSKI, JERZY WYSOCKI

PHOTOINTERPRETATION AND PHOTOGRAMMETRY IN THE WORKING OUT OF ALTITUDES IN PROJECTED TARGETS

Summary

In this article the results are presented of investigations into photogrammetric accuracy of altitude elaborations, as well as the practical tests for utilizing photo-interpretation and photogrammetry in projected targets (the example being the project to improve the network). A method is proposed relying on the initial map of the project network, using the stereoscopic model and the indispensable photogrammetric elaborations, and next on the produced project defined accurately by photogrammetric measurements of the terrain profile along the projected route.

Translated by Peter L. McGuire

PAWEŁ ORŁOWSKI, JERZY WYSOCKI

PHOTOINTERPRÉTATION ET PHOTOGRAMMÉTRIE DANS L'ÉLABORATION DE L'ALTITUDE

Résumé

Cet article montre les résultats des recherches sur la précision des élaborations photogrammétriques de l'altitude. A l'exemple du projet de drainage sont présentés les essais de la mise à profit de la photointerprétation et de la photogrammétrie dans la pratique.

Les auteurs ont proposé une méthode qui consiste à élaborer le projet préliminaire utilisant le modèle de stéréoscope et les élaborations photogrammétriques indispensables. Le projet, ainsi obtenu, est ensuite précisé par des mesures photogrammétriques des profils suivant les itinéraires jalonnés.

Traduit par Teresa Korba-Fiedorowicz