

Doc. dr inż. BOHDAN BOHONOS
Mgr inż. JANINA FEDEROWSKA
Mgr inż. MICHAŁ GRODZICKI

**Instytut Geodezji i Kartografii
Zakład Fotogrametrii**

Zastosowanie Topofleksu Zeissa z Jeny do opracowania treści wewnętrznej map gospodarczych nadleśnictw

1. Wstęp

W drugiej połowie lat siedemdziesiątych zakłady VEB Carl Zeiss Jena skonstruowały nowy analogowy przyrząd fotogrametryczny o nazwie Topofleks, przeznaczony do aktualizacji map, opracowań mapowych w skalach średnich i małych oraz sporządzania map tematycznych, takich jak: leśne, geologiczne, archeologiczne itp.

Instytut Geodezji i Kartografii, współpracując z Biurem Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej (BULiGL) podjął pracę, mającą na celu zbadanie możliwości zastosowania Topofleksu do opracowania treści wewnętrznej map gospodarczych nadleśnictw w skali 1 : 5000. Pod pojęciem treści wewnętrznej należy rozumieć treść mapy gospodarczej nadleśnictw (granice wyłączeń taksacyjnych, drogi leśne, rowy, luki powstałe w wyniku wyřębu, itp.), wykorzystywanej do urządzania lasu. Dotychczas elementy te wyznaczano na ogół na podstawie terenowych pomiarów busolowych lub, w niewielkim zakresie, ze zdjęć lotniczych. W tym drugim wypadku tereny o małych deniwelacjach opracowywano za pomocą przetwornika fotomechanicznego po uprzednim odczytaniu zdjęć pod stereoskopem zwierciadlanym. Tereny o deniwelacjach większych od 100 metrów opracowywano na autografie Wilda A8.

Zastosowanie Topofleksu, z uwagi na łatwość jego obsługi oraz połączenie stereoskopowego odczytywania zdjęć z jednoczesnym kartowaniem, stwarza możliwość szerszego zastosowania fotogrametrii w leśnictwie.

2. Opis Topofleksu

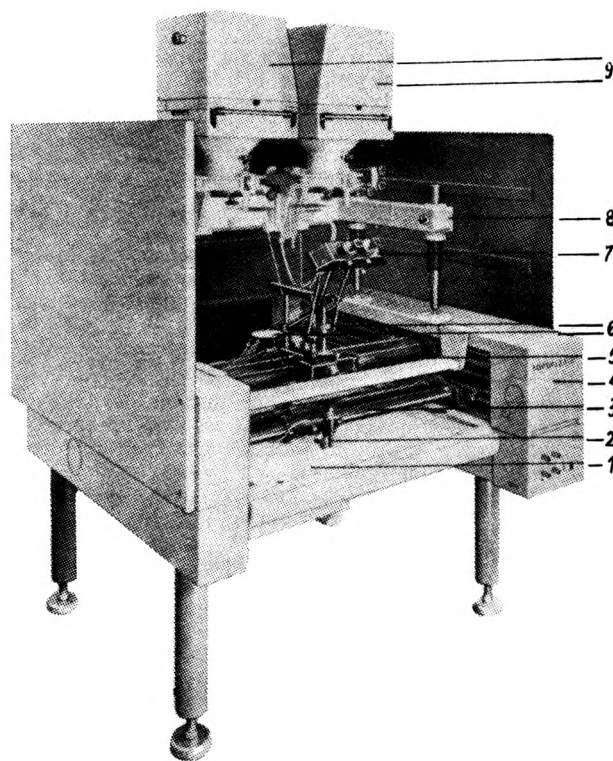
Topofleks jest fotogrametrycznym przyrządem analogowym, którego budowa jest oparta na zasadzie podwójnej projekcji. Ogólny widok Topofleksu wraz z objaśnieniem podstawowych części przyrządu przedstawia rysunek.

Do najważniejszych danych technicznych, które określają zakres, możliwości i specyfikę tego nowego przyrządu, według [3] należą:

- 1) format zdjęcia: 18 cm × 18 cm lub mniejszy, 23 cm × 23 cm, 30 cm × 30 cm tylko do zdjęć na filmie o powierzchni użytkowej 23 cm × 23 cm

2) kamery projekcyjne:

- stała kamery (odległość obrazu) $c = 152$ mm
- zakres ogniskowania od -3 mm do $+8$ mm
- otwór względny obiektywu 1 : 16; 1 : 22; 1 : 32; 1 : 45



Ogólny widok Topofleksu: 1 — stół kreślarski, 2 — urządzenie kreślące, 3 — prowadnica urządzenia kreślącego, 4 — skrzynka przekładni trybowych, 5 — prowadnica stolików pomiarowych, 6 — stoliki pomiarowe, 7 — stereoskop zwierciadlany, 8 — nośnik kamer, 9 — kamery z projektorami

- 3) stoliki pomiarowe ze stereoskopem:
 - średnica stolika 88 mm
 - zakres wysokości stolików 100 mm
 - powiększenie optyczne zdjęć $4\times$ do $8\times$
- 4) wykorzystana powierzchnia stołu kreślarskiego 600 mm $\times$ 600 mm
- 5) powiększenia w przyrządzie:
 - zdjęcie: model $2,2\times$ do $2,8\times$ przy $\Delta z = \pm 12\%$ wysokości lotu
 - model: mapa $0,16\times$ do $2,0\times$
 - zdjęcie: mapa $0,35\times$ do $5,6\times$
- 6) dokładność przyrządu:
 - średni błąd współrzędnych w płaszczyźnie stołu kreślarskiego $m_{x,y} \leq \pm 0,2$ mm
 - średni błąd wysokości $m_h \leq \pm 0,15\%$ wysokości lotu

Zdjęcia lotnicze (diapozytywy lub negatywy) oryginalnych formatów są zakładane do kamer przyrządu. Obrazy tych zdjęć, zrutowane na dwa stoliki projekcyjne, obserwuje się przez stereoskop zwierciadlany. Plansza z opracowaniem układana jest na stole kreślarskim, usytuowanym wewnątrz przyrządu. System przekładni trybowych umożliwia wykonywanie opracowania również w skali innej niż skala modelu. Ponadto, Topofleks może być stosowany jako prosty przetwornik optyczny. Płaszczyznę projekcji stanowi płyta, zakładana w miejsce wymontowanego stereoskopu ze stolikami projekcyjnymi. Cechą szczególną Topofleksu jest stała odległość obrazu kamer projekcyjnych $c = 150$ mm oraz konstrukcja licznika wysokości. Licznik wysokości jest tak skonstruowany, że można z niego odczytywać wysokości (w metrach) przy każdej dowolnej skali wysokościowej modelu.

3. Zasady i możliwości opracowań afinicznych

Topofleks jest przeznaczony do opracowań zdjęć lotniczych o stałej kamery $c_k = 150$ mm. W praktyce jednak zdarzają się wypadki, kiedy trzeba opracować zdjęcia o innej wartości stałej na przykład $c_k = 210$ mm lub $c_k = 115$ mm. Zachodzi więc konieczność opracowania zdjęć przy zmienionej stałej kamery, co jest równoznaczne z afinicznym przekształceniem modelu w Topofleksie.

Zagadnienie opracowania zdjęć w autografach z zastosowaniem afinicznego przekształcenia modelu szczegółowo opisano w literaturze fachowej. Niniejsze rozważania teoretyczne oparto na publikacji [1].

3.1. Opracowanie zdjęć ściśle pionowych

Przy opracowaniu afinicznym zdjęć ściśle pionowych, o kącie nachylenia $\nu = 0^\circ$, należy:

- wyznaczyć współczynnik przekształcenia afinicznego

$$k = \frac{c}{c_k} \quad (1)$$

gdzie:

- c — stała kamery Topofleksu;
- c_k — stała kamery lotniczej;

- założyć zdjęcia do kasety przyrządu, centrując punktem głównym zdjęcia na punkt środkowy kasety;
- wykonać wszystkie obliczenia i czynności związane ze strojeniem zdjęć w przyrządzie i wykonać orientację wzajemną, to jest zestroić model stereoskopowy terenu;
- orientację bezwzględną modelu (skalowanie i poziomowanie) wykonujemy według ogólnych zasad pracy na autografie, z tym że licznik wysokości stolika pomiarowego Topofleksu ustawiamy w ten sposób, żeby przekształcone afinicznie wysokości fotopunktów można było odczytywać jako wysokości normalne w metrach.

Miedzy skalą poziomą modelu (skalą sytuacji) a jego skalą pionową (skalą wysokości) zachodzi zależność

$$M_z = \frac{M_p}{k} \quad (2)$$

gdzie:

- M_z — mianownik skali pionowej;
- M_p — mianownik skali poziomej.

3.2. Opracowanie zdjęć nachylonych

Przy opracowaniu afinicznym zdjęć nachylonych terenu o pewnych deniwelacjach można postąpić następująco:

a) przetwarzamy zdjęcia nachylone na zdjęcia ściśle pionowe w skali 1:1 za pomocą przetwornika fotomechanicznego. Sposób takiego przetwarzania jest opracowany w Instytucie Geodezji i Kartografii i stosowany w produkcji fotogrametrycznej Państwowego Przedsiębiorstwa Geodezyjno-Kartograficznego. Wykorzystanie zdjęć przetworzonych w skali 1:1 zapewnia ich dokładne opracowanie na Topofleksie według zasad podanych w punkcie 2.1;

b) przeffotografujemy zdjęcia na pomniejszalniku (fotoreduktorze) w ten sposób, że pozostają one nadal nachylone, lecz są w skali odpowiadającej stałej kamery Topofleksu $c = c_k = 150$ mm. Opracowanie tak przeffotografowanych zdjęć odbywa się według ogólnie przyjętych zasad. Należy jednak przy tym sprawdzić, czy stopień zmniejszenia skali zdjęć po przeffotografowaniu zapewnia ich czytelność i wymaganą dokładność;

c) opracujemy zdjęcia z zastosowaniem decentracji zdjęć w kasetach Topofleksu i przekształcenia afinicznego według metody prof. A. N. Łobanova [2]. Wielkość decentracji oblicza się według wzoru

$$\delta_x = c \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \bar{\varphi} \quad (3)$$

$$\delta_y = c \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \bar{\omega}$$

gdzie:

$\bar{\varphi}, \bar{\omega}$ — przekształcone kąty nachylenia zdjęć w Topofleksie, wyznaczone drogą kolejnych przybliżeń podczas wzajemnej orientacji;

decentrację wprowadza się w ten sposób, że po założeniu zdjęć do kasety przyrządu punktami głównymi na punkty środkowe odpowiednich kasety, przesuwa się punkt główny zdjęcia o wartości obliczonej ze wzorów (3). Przesuw następuje w kierunku do punktu nadirowego zdjęcia. Potrzebne

kąty $\bar{\varphi}$ i $\bar{\omega}$ odczytuje się z liczników Topofleksu po pierwszym zestrojeniu wzajemnym zdjęć. Decentrację wprowadza się drogą kolejnych przybliżeń, dopóki przy kolejnym strojeniu paralaksa poprzeczna modelu nie zmienia już swojej wartości i umożliwia opracowanie modelu. Sposób ten jest nieściśły pod względem geometrycznym, nadaje się do stosowania przy opracowaniach na Topofleksie, jest jednak dość uciążliwy.

d) w wypadku:

- gdy nachylenie zdjęć jest nieduże;
- teren nie wykazuje znacznych deniwelacji;
- dokładność opracowywanej mapy sytuacyjnej (bez wykreślania rzeźby) nie nakłada wymagań stawianych mapie zasadniczej, można zastosować przekształcenie afiniczne modelu bez wprowadzania wspomnianych w punkcie c) decentracji zdjęć. Wówczas opracowanie zdjęć przebiega w sposób opisany w punkcie 3.1. Zdjęcia nie są jednak ściśle pionowe i dlatego należy się liczyć z błędami opracowania. Błędy te wynikają z zastosowania przybliżonej metody opracowania. W celu zorientowania się o wielkości błędów towarzyszących afinicznemu opracowaniu, bez wprowadzania decentracji zdjęć, opracowano tablicę 1. Wartości błę-

Tablica 1

ΔH w [m]	Błędy położenia szczegółów sytuacyjnych Δ w [m]						Uwagi
	$k_1 = 0,7$			$k_2 = 1,3$			
	1°	2°	3°	1°	2°	3°	
10	—0,12	—0,24	—0,37	0,09	0,17	0,26	$k_1 = \frac{150}{210}$
20	—0,24	—0,49	—0,73	0,17	0,35	0,52	
30	—0,37	—0,73	—1,10	0,26	0,52	0,77	$k_2 = \frac{150}{115}$
40	—0,49	—0,98	—1,45	0,35	0,70	1,05	
50	—0,61	—1,22	—1,83	0,44	0,87	1,31	Skala mapy 1 : 5000 Skala zdjęć 1 : 16 600
100	—1,22	—2,44	—3,67	0,87	1,75	2,62	

dów położenia szczegółów sytuacyjnych Δ , podanych w tablicy 1, obliczono na podstawie wzoru

$$\Delta = \Delta H \operatorname{tg} v \left(k - \frac{1}{k} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- ΔH — deniwelacja terenu;
 v — kąt nachylenia zdjęcia;
 k — współczynnik przekształcenia afinicznego.

Podstawą do wyprowadzenia wzoru (4) są zależności geometryczne opisane w publikacji [1]. Należy zauważyć, że oprócz błędów Δ , mających charakter systematyczny, opracowanie przybliżone d będzie obarczone jeszcze błędami przypadkowymi. Błąd średni położenia szczegółów sytuacyjnych, obliczony na podstawie błędów przypadkowych, według oceny producenta przyrządu Topofleks, a także wyników badań własnych wynosi $m_p = \pm 0,2$ mm w skali opracowania. Przy opracowaniu mapy w skali 1:5000 błąd ten odpowiada wartości 1 m w terenie. Błędy przypadkowe mogą osiągnąć wartość dwukrotnego, a w pojedynczych wypadkach trzykrotnego błędu średniego. Będą więc tego samego rzędu co błędy Δ wynikające z zastosowania przybliżonej metody opracowania, podane w tablicy 1. W celu praktycznego sprawdzenia przyjętych założeń teoretycznych wykonano odpowiednie prace doświadczalne.

4. Prace badawczo-doświadczalne

W celu zbadania możliwości zastosowania Topofleksu do opracowania treści wewnętrznej map gospodarczych nadleśnictw wykonano prace badawczo-doświadczalne, do których materiałami wyjściowymi były:

— diapozytywy zdjęć lotniczych w skali 1:16 600, o formacie 18×18 cm i stałej kamery $c_k = 210$ mm. Zdjęcia wykonano w Państwowym Przedsiębiorstwie Geodezyjno-Kartograficznym. Ponieważ zdjęcia te były już używane do opracowań mapowych miały zasygnalizowaną kameralnie osnowę fotogrametryczną;

— wtórniki mapy gospodarczej nadleśnictwa w skali 1:5000, wykonany na materiale przezroczystym. Mapę gospodarczą nadleśnictwa wykonano metodą bezpośrednich pomiarów w terenie prowadzonych przez BULIGL. Na mapie zewnętrzne granice lasu, drogi publiczne, cieki i zbiorniki wodne oraz szczegóły sytuacyjne pomierzyła służba geodezyjna, zgodnie z wymogami odpowiednich instrukcji GUGiK. Drogi leśne, rowy, granice wyłączeń taksacyjnych i inne elementy sytuacyjne, służące do celów zarządzania lasu pomierzono metodą ciągów busolowych.

Dla sprawdzenia wpływu zmiany stałej kamery i sposobu orientacji zewnętrznej modelu w Topofleksie na dokładność opracowania wykonano arkusz mapy w trzech wersjach A, B i C. Założono, że wersje te będą różnić się między sobą rodzajem osnowy fotogrametrycznej i instrumentem służącym do opracowania arkusza mapy. W tym celu do opracowania arkusza mapy w wersji B i C pomierzono i obliczono metodą aerotriangulacji punkty osnowy fotogrametrycznej, kameralnie zasygnalizowanej na zdjęciach. Wyrównanie aerotriangulacji wykonano na podstawie współrzędnych geodezyjnych fotopunktów, otrzymanych z PPGK.

Wersja A. Mapę opracowano na Topofleksie z zastosowaniem stałej kamery projekcyjnej $c = 150$ mm. Jako punkty osnowy fotogrametrycznej płaskiej posłużyły zidentyfikowane na zdjęciu i podkładzie (wtórniki mapy gospodarczej nadleśnictwa) wyraźne szczegóły i linie sytuacyjne. Modele poziomowano na wysokości odczytane z mapy topograficznej w skali 1:25 000, z dokładnością ± 2 m. Po zorientowaniu modelu przeniesiono z niego na podkład opracowywanej mapy — punkty zasygnalizowanej osnowy fotogrametrycznej do późniejszej analizy dokładności.

Wersja B. Mapa opracowana na Topofleksie z zastosowaniem stałej kamery projekcyjnej $c = 150$ mm. Orientację bezwzględną modeli wykonano na podstawie punktów zasygnalizowanych osnowy fotogrametrycznej otrzymanej z aerotriangulacji.

Wersja C. Mapa opracowana na autografie Wilda A8 z zastosowaniem właściwej odległości obrazu zdjęć, to jest $c_k = 210$ mm. Orientację bezwzględną modeli wykonano na podstawie punktów zasygnalizowanej osnowy fotogrametrycznej, podobnie jak w wersji B.

Na arkuszach map, opracowanych w trzech wersjach, skartowano wszystkie drogi, klasyfikując je jako drogi dobrze widoczne i drogi słabo widoczne, oraz granice wyłączeń taksacyjnych. Porównanie wyników opracowania arkusza mapy w trzech wersjach potwierdziło założenie, że przy

wymaganych dokładnościach położenia punktów sytuacyjnych wewnętrznej treści mapy $m_p = \pm 1,0$ mm w skali opracowania można wykonać mapę według wersji A. Wniosek ten dotyczy mapy nadleśnictwa sporządzanej do celów zarządzania lasów, wykonywanej na podstawie zdjęć prawie pionowych, terenów o deniwelacjach mniejszych od 100 m (patrz tablica 1).

5. Ocena dokładności

Opracowane w skali 1:5000 mapy nadleśnictwa poddano sprawdzeniu terenowemu i ocenie kameralnej.

5.1. Ocena kameralna

Ocenę kameralną wykonano tylko w odniesieniu do arkusza mapy w wersji A. Podstawą do tej oceny było porównanie zgodności położenia punktów, zasygnalizowanej na zdjęciach osnowy fotogrametrycznej, nakłutych na arkusz mapy w wersji A (podczas opracowania zdjęć w Topofleksie), z odpowiadającymi im punktami naniesionymi według współrzędnych na arkuszach map w wersjach B i C.

W tym celu porównano położenie 11 punktów wspomnianej osnowy rozmieszczonych na arkuszach map w wersjach A i B oraz A i C. Na podstawie pomierzonych odchyłek określono dokładność opracowania szczegółów sytuacyjnych na Topofleksie z wykorzystaniem wtórnika mapy gospodarczej jako podkładu do poziomowania poszczególnych modeli w przyrządzie. Obliczony z odchyłek rozmieszczonych na całym obszarze mapy błąd średni położenia wyniósł $m_p = \pm 1,0$ mm w skali opracowania.

5.2. Kontrolne prace terenowe

Na wybranym fragmencie opracowanej mapy założono kontrolny ciąg poligonowy długości około 1,5 km. Otrzymała odchyłkę zamknięcia ciągu, wynoszącą 2,4 m, co odpowiada 0,5 mm w skali mapy, uznano za dopuszczalną do

Tablica 2. Zestawienie różnic Δd położenia punktów kontrolnych dla map A, B i C

Rodzaj szczegółu	Lp.	Nr punktu	Mapa A Δd w [mm]	Mapa B Δd w [mm]	Mapa C Δd w [mm]
Drogi dobrze widoczne	1	12	0,2	—	—
	2	14	0,0	—	0,4
	3	17	0,4	0,6	0,6
	4	18	0,9	0,1	0,2
	5	19	0,9	0,2	0,3
	6	21	0,4	0,2	0,1
	7	23	0,3	0,1	0,4
	8	24	0,0	0,0	0,1
	9	26	0,8	0,6	1,1
	10	27	0,5	0,0	0,5
	11	28	0,6	0,2	0,6
	12	29	0,6	0,1	0,7
	13	31	0,5	0,8	0,4
	14	34	0,0	0,0	—
	15	35	0,1	0,3	0,3
	16	36	0,2	0,3	0,4
	17	37	0,3	0,4	0,3
	18	38	0,2	0,8	0,4
$m\Delta d = \pm 0,5$				$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
Drogi słabo widoczne	1	1	0,2	0,5	—
	2	2	2,0	0,2	0,9
	3	3	2,4	1,0	1,4
	4	4	1,2	0,3	1,2
	5	6	2,5	1,3	0,6
	6	8	0,7	0,9	0,6
	7	12	—	1,3	0,1
	8	13	0,0	—	—
	9	14	0,3	0,4	—
	10	32	—	—	0,4
	11	33	—	—	0,3
	12	34	—	—	0,4
$m\Delta d = \pm 1,5$				$\pm 0,8$	$\pm 0,8$
Wyłączenia	1	7	1,8	1,8	—
	2	8	0,0	0,0	0,0
	3	9	1,0	0,8	0,6
	4	10	1,5	1,2	0,3
	5	11	1,4	1,0	0,8
	6	13	—	0,3	0,7
	7	24	0,0	1,2	0,1
	8	25	2,0	2,4	0,7
	9	27	0,6	0,0	0,6
	10	34	0,5	1,7	0,6
	11	37	0,3	0,4	0,1
$m\Delta d = \pm 1,1$				$\pm 1,2$	$\pm 0,5$
Ogółem			$m\Delta d = \pm 1,1$	$\pm 0,9$	$\pm 0,6$

celów kontroli opracowanych map gospodarczych nadleśnictw. W wyniku otrzymano wyrównane współrzędne punktów ciągu kontrolnego.

Jednocześnie z pomiarem ciągu wykonano metodą tachymetryczną pomiar charakterystycznych punktów sytuacyjnych mapy. Ogółem pomierzono 15 takich punktów, obliczając następnie ich współrzędne oparte na współrzędnych punktów kontrolnego ciągu poligonowego. Łącznie do kontroli opracowanych map wyznaczono współrzędne 38 punktów sytuacyjnych.

Wyniki pomiarów terenowych wkartowano według współrzędnych na mapy wykonane w wersjach A, B i C. Na podstawie porównania położenia punktów kontrolnych opracowano tablicę 2. Zawiera ona zestawienie różnic położenia Δd między punktami na mapach w wersji A, B i C oraz odpowiadającymi im punktami, wkartowanymi na te mapy na podstawie pomiaru terenowego.

5.3. Omówienie wyników sprawdzenia terenowego

Jak widać z tablicy 2, błąd średni położenia szczegółu sytuacyjnego, otrzymany z porównania punktów kontrolnych na mapach w wersjach A, B i C wynosi odpowiednio $\pm 1,1$ mm, $\pm 0,9$ mm i $\pm 0,6$ mm. Błąd ten wyraża dokładność fotogrametrycznego opracowania treści wewnętrznej mapy gospodarczej nadleśnictwa w skali 1:5000. Uzyskana dokładność mapy w wersji A, czyli opracowanej afinicznie na Topofleksie bez wprowadzania decentracji zdjęć z wpasowaniem na wyraźne szczegóły i linie sytuacyjne, odpowiada założonej dokładności ± 1 mm i wymogom stawianym przez użytkowników map leśnych. Potwierdziła ona również założenia teoretyczne, że zgodnie z tablicą 1, wpływ błędów

spowodowanych niewprowadzaniem decentralizacji można pominąć przy opracowaniu map leśnych, gdy:

- nachylenie zdjęć ν nie przekracza 3° ;
- opracowanie wykonuje się przy współczynniku przekształcenia afinicznego $k =$ od 0,7 do 1,3;
- deniwelacje terenu ΔH w obrębie jednego stereogramu są mniejsze od 100 m.

Z porównania błędów średnich położenia punktów na mapach w wersjach A i B wynika, że strojenie modelu w Topofleksie na osnovę z aerotriangulacji (wersja B) tylko o 20% zwiększyło dokładność opracowania mapy.

Mapę w wersji C porównano z wersją A w celu sprawdzenia możliwości do osiągnięcia dokładności klasycznego opracowania mapy leśnej ($k = 1$) w skali 1:5000 na podstawie zdjęć lotniczych w skali 1:16 600 i aerotriangulacyjnej osnovy fotogrametrycznej. Jakkolwiek dokładność opracowania mapy w wersji C jest dwukrotnie wyższa od dokładności mapy w wersji A (tabl. 2), to ze względów ekonomicznych i wymagań dokładnościowych stawianych mapom leśnym korzystniej jest stosować wersję A.

Otrzymane wyniki prac doświadczalnych pozwalają na stwierdzenie przydatności Topofleksu do opracowania mapy gospodarczej nadleśnictwa w skali 1:5000.

LITERATURA

- [1] Bohonos B.: O prawidłowym sposobie afinicznego przekształcenia modelu przy opracowaniu nadszerokokątnych zdjęć na autografie. Geod. i Kar. R. XVI: 1967 nr 1
- [2] Łobanow A. N.: Teoriya transformirovaniya pary snimok i sozdaniye karty po transformirovannym izobraženijam. Moskwa 1954
- [3] Fabryczna instrukcja obsługi Topofleksu