

STANISŁAW MIŚCICKI

Pomiar zapasu grubizny z wykorzystaniem zdjęć lotniczych*

Inventory of merchantable timber volume using aerial photography

ABSTRACT

Miścicki S. 2009. Pomiar zapasu grubizny z wykorzystaniem zdjęć lotniczych. Sylwan 153 (6): 373-385.

Inventory of the growing stock in the territory of the Milicz Forest District was made using the combined, two-phase method. 1980 sample plots were measured on aerial photographs that constituted Phase I of the inventory. Phase II sampling consisted of 267 ground (permanent) plots and corresponding airphoto plots depending on their location in the photograph. In the airphoto sample plots, the following characteristics were measured (or controlled): tree height and age, degree of crown cover, species composition. Taking into consideration the relationship between the results of standing volume measurements on ground sample plots and stand characteristics on airphotos, the growing stock in age sub-classes and in the entire Forest District was calculated. Using aerial photography in forest survey and growing stock inventory, the cost of forest management planning operations is likely to be comparable to the cost of such operations performed in the traditional way.

KEY WORDS

growing stock, aerial photography, inventory, permanent sample plot, airphoto sample plot, two-phase method

ADDRESSES

Stanisław Miścicki – e-mail: stanislaw_miscicki@sggw.pl

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; SGGW; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

Wstęp

Wykorzystanie zdjęć lotniczych do określenia zapasu grubizny ma stosunkowo długą tradycję, sięgającą lat trzydziestych XX wieku [Hildebrandt 1996]. W ramach eksperymentów, ale także pomiarów dla potrzeb gospodarczych, stosowano różne metody inwentaryzacji – od szacunkowych po reprezentacyjne [Miścicki 2000a]. W tym ostatnim przypadku istnieją dwa odmienne rozwiązania. Pierwszym jest warstwowanie, w którym na podstawie interpretacji zdjęć lotniczych łączy się drzewostany w jednorodne grupy (warstwy), a następnie w tak utworzonych jednostkach inwentaryzacyjnych lokalizuje się naziemne powierzchnie próbne do pomiaru zapasu. W drugim rozwiązaniu, które można nazwać inwentaryzacją kombinowaną dwufazową, wykorzystując estymatory regresyjne, łączy się rezultaty pomiarów powierzchni próbnych fotolotniczych i naziemnych.

Pomiary (badania) dwufazowe stosuje się przede wszystkim wtedy, kiedy zebranie odpowiedniej informacji statystycznej jest technicznie trudne do przeprowadzenia lub kosztowne, więc należy ograniczyć się do stosunkowo małej próby [Zasępa 1972]. Aby zwiększyć

* Praca wykonana w ramach tematu badawczego nr 18/04 „Urządzenie obrębu leśnego z wykorzystaniem zdjęć lotniczych” finansowanego ze środków Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

precyzję szacunków, poszukuje się cech skorelowanych z cechami badanymi, lecz łatwych do zmierzenia. Jeżeli znajdzie się takie dodatkowe cechy, to część kosztów badania statystycznego może być użyta na wylosowanie kilkakrotnie większej próby i zebranie dla niej informacji o cechach dodatkowych. Jest to pierwsza faza badania. Zebrane informacje o cechach dodatkowych pozwalają wskazać odpowiedni sposób losowania i odpowiednią liczebność próby dla drugiej fazy badania. W drugiej fazie z reguły mierzy się więcej cech niż w pierwszej – oprócz jednej lub kilku cech podstawowych także cechy tzw. drugoplanowe.

Przy stosowaniu tej metody do pomiaru zapasu z zastosowaniem zdjęć lotniczych stawia się następujące warunki:

- cechy pomocnicze muszą być mierzone w łatwy i powtarzalny sposób,
- korelacja między zasobnością a cechami pomocniczymi musi być silna (przyjmuje się, że współczynnik korelacji powinien być większy niż 0,8),
- powinna istnieć duża zgodność miejsca lokalizacji obu rodzajów prób,
- koszt pomiaru cech pomocniczych na fotolotniczych powierzchniach próbnych powinien być znacznie mniejszy niż koszt pomiaru zasobności na powierzchniach naziemnych.

Biorąc powyższe pod uwagę konieczne jest:

- wykonanie, według ogólnie przyjętych zasad, pomiaru zasobności (sumy miąższości grubizny na jednostce powierzchni) na powierzchniach próbnych naziemnych,
- obliczenie współrzędnych geodezyjnych środków w celu wskazania ich położenia na odpowiednio zorientowanych zdjęciach lotniczych,
- wykonanie pomiaru wytypowanych cech fotogrametrycznych i fotointerpretacyjnych na fotolotniczych powierzchniach próbnych,
- obliczenie regresji między zasobnością na powierzchniach próbnych naziemnych a cechami mierzonymi na zdjęciu lotniczym; to obliczenie jest możliwe dzięki zebraniu danych na powierzchniach naziemnych i na fotolotniczych założonych w tych fragmentach zdjęcia lotniczego, które obrazują położenie powierzchni naziemnych,
- obliczenie zasobności na podstawie wyników pomiarów licznych prób fotolotniczych (I faza) i z wykorzystaniem zależności (regresji) między zasobnością na fotolotniczych oraz naziemnych powierzchniach próbnych (II faza); używa się do tego estymatorów regresyjnych; obliczenia są wykonywane najczęściej dla całego obiektu (obrębu leśnego) lub dla mniejszych jednostek inwentaryzacyjnych (np. podklas wieku).

Pomiary zapasu z wykorzystaniem zdjęć lotniczych były już wykonywane w Polsce, ale przez zespoły instytucji naukowych [Miścicki 2000b]. Aby taka metoda inwentaryzacji mogła być używana w przyszłości powszechnie, konieczne stało się opracowanie rozwiązań technologicznych i ich sprawdzenie w ramach prac urzędzeniowych.

Celem badań była ocena kombinowanej, dwufazowej metody inwentaryzacji zapasu drzewostanów z zastosowaniem powierzchni próbnych fotolotniczych i naziemnych. Obejmowała ona poznanie dokładności badanej inwentaryzacji zapasu rosnącego, porównanie jej wyników z wynikami inwentaryzacji urzędzeniowej wykonanej według metody stosowanej współcześnie oraz porównanie kosztów obu inwentaryzacji.

Obiekt badań

W związku z założeniem, że większość prac będzie polegać na współpracy między zespołem autorskim z Katedry Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW a zespołem

Oddziału Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej w Brzegu, jako obiekt badań postanowiono wykorzystać jeden z obrębów leśnych, dla którego w roku 2005 opracowywano plan urządzenia lasu. Wybrano Obręb Milicz z Nadleśnictwa Milicz (RDLP we Wrocławiu) położony w III Krainie Wielkopolsko-Pomorskiej, w 9. Dzielnicy Kotliny Żmigrodzko-Grabowskiej. Teren jest nizinny, miejscami falisty, a wysokość waha się od 100 do 230 m n.p.m. Według stanu na 1 stycznia 2006 roku ogólna powierzchnia obrębu wynosiła 8206 ha, w tym grunty zalesione – 7599 ha. Struktura wiekowa drzewostanów była zakłócona – dominowała IIIa podklasa wieku (tab.). Około 57% powierzchni zajmowały siedliska borowe. Dominującym gatunkiem była sosna (66%), a innymi gatunkami o znaczącym udziale były dąb, buk, świerk, brzoza i olsza.

Metodyka

POMIARY NAZIEMNYCH POWIERZCHNI PRÓBNYCH. Środki powierzchni próbnych rozmieszczone w wieźbie 250×500 metrów, zorientowanej według północy mapy w układzie odniesienia „1992”. Miejsca do założenia prób przyjęto w drzewostanach w wieku 16-20 lat, wylosowanych do inwentaryzacji zapasu programem LP „Taksator”. Wybór powierzchni zweryfikowano w terenie – niektóre drzewostany zostały wycięte kilka tygodni przed rozpoczęciem pomiarów, a w niektórych miejscach były błędy na dotychczasowej mapie. W okresie sierpień-wrzesień 2005 roku przeprowadzono pomiar 283 powierzchni próbnych, z czego 267 w drzewostanach w wieku powyżej 20 lat (tab.). Ich wielkość wynosiła 200 m² w drzewostanach w wieku 16-60 lat, 300 m² w drzewostanach w wieku 61-80 lat, 400 m² w drzewostanach w wieku 81-100 lat i 500 m² w drzewostanach w wieku powyżej 100 lat oraz w KO i KDO.

Środki powierzchni próbnych dowiązywano, z użyciem pomiaru busolowego, do trwałych elementów – głównie przecięć linii podziału powierzchniowego. Stosując technikę DGPS wykonano pomiary ich współrzędnych. Wykorzystano dane zbierane przez stację referencyjną WROCLAW. Zostały one udostępnione przez ośrodek ASG-PL w Katowicach.

Pomiar drzew wykonano według zasad przyjętych dla stałych kontrolnych powierzchni próbnych [Schmid-Hass i in. 1993]. Drzewa do pomiaru wysokości wybrano zgodnie z zasadami Instrukcji Urządzania Lasu [2003]. Stosując program LP „Taksator” obliczono miąższości grubizny drzew w obrębie poszczególnych powierzchni próbnych, a następnie zasobność (w m³/ha) w miejscu lokalizacji poszczególnych prób.

WYKONANIE ZDJĘĆ LOTNICZYCH I PRZYGOTOWANIE ICH DO POMIARÓW. Zdjęcia lotnicze zostały wykonane 25 czerwca 2005 roku przez przedsiębiorstwo Geo-Invent. Wykorzystano materiał w barwach umownych – uczulony na podczerwień (Kodak Aerochrome 1443). Skala zobrazowania wyniosła 1:10 000. Zastosowano obiektyw normalnokątny o ogniskowej 210 mm. Kierunek nalotu był wschód-zachód. Jakość zdjęć była nierówna. W części północnej była bardzo dobra, a w część południowej – dostateczna. Przyczyną tej ostatniej oceny było zbyt słabe naświetlenie zdjęć z obszaru, który w chwili fotografowania był zasłonięty chmurami.

W przedsiębiorstwie Geo-Invent, stosując program Intergraph, wykonano aerotriangulację zdjęć zeskanowanych i zapisanych w postaci cyfrowej. Jej celem było przygotowanie wszystkich par stereoskopowych do pomiarów fotogrametrycznych. Praktycznym rezultatem była tzw. orientacja bezwzględna zdjęć, dzięki której możliwe było odczytywanie współrzędnych XYZ w układzie odniesienia „1965” dowolnych punktów wskazanych na modelu stereoskopowym. Wyniki aerotriangulacji zostały przeniesione do stacji fotogrametrii cyfrowej Dephos, znajdującej się w KULGiEL SGGW. Wykorzystując program Dephos 4.15, wykonano zasadnicze pomiary fotolotniczych powierzchni próbnych.

W przedsiębiorstwie Geo-Invent przygotowano model rzeźby terenu (dna lasu). Wykorzystano do tego warstwice w odstępie co 1,25 metra z mapy topograficznej 1:10 000. Dla potrzeb pomiarów fotogrametrycznych zorientowano je według układu odniesienia „1965” i przedstawiono jako wektory trójwymiarowe. Ten model wykorzystano do późniejszego odczytywania rzędnej Z poziomu gruntu (z reguły niewidocznego na modelu stereoskopowym zdjęć z obszaru leśnego) w miejscu lokalizacji powierzchni próbnych.

Na potrzeby pomiarów w miejscach odwzorowania naziemnych powierzchni próbnych, na zdjęciach lotniczych umieszczono wektory trójwymiarowe obrazujące położenie środków tych powierzchni i ich granic (odpowiednich w skali zdjęcia do wielkości w terenie).

Przygotowano zestaw korekt barw zdjęć (tak zwanych LUT-ów) w miejscu lokalizacji danej powierzchni próbnej. Miało to na celu otrzymanie odpowiedniej jasności zdjęcia i usunięcie jej różnic między oboma zdjęciami pary stereoskopowej oraz uzyskanie tonacji typowej dla zdjęć barwnych w podczerwieni, pozwalającej najlepiej odróżnić (na podstawie barwy) poszczególne gatunki drzew.

POMIARY FOTOLOTNICZYCH POWIERZCHNI PRÓBNYCH. Pomiary wykonali dwaj pracownicy BULiGL na obrazie powiększonym (na ekranie komputera) do skali około 1:200. Obejmowały one:

- określenie liczby płatów j w obrębie powierzchni próbnej f (w wypadku takiej budowy poziomej, że istniały płaty różniące się wymiarami drzew lub zwarciem koron; w wypadku położenia na granicy drzewostanów brano pod uwagę tylko tę część, w której znalazł się środek powierzchni próbnej i gdy stanowiła ona $>50\%$ powierzchni),
- oszacowanie udziału poszczególnych płatów Q_j w obrębie granicy powierzchni próbnej f ,
- oszacowanie w obrębie granicy powierzchni próbnej f pokrycia powierzchni drzewostanu koronami drzew K ; wykorzystano klucz Arbeitsgruppe FL [2003],
- weryfikację wieku drzew W_i poszczególnych gatunków i ,
- oszacowanie udziału koron U_i poszczególnych gatunków i (wyróżniano: sosny, modrzewie, świerki, dęby, buki, brzozy, olsze, inne liściaste),
- pomiar rzędnej Z wierzchołków trzech najwyższych drzew (wyboru dokonywano proporcjonalnie do składu gatunkowego w obrębie powierzchni próbnej; jeżeli liczba gatunków była większa niż trzy, to mierzono więcej drzew),
- określenie rzędnej Z gruntu na środku powierzchni próbnej f , a w wypadku jej położenia w terenie pochyłym, rzędnych w miejscach rzutów wierzchołków mierzonych drzew.

OBLICZENIE CECH NA FOTOLOTNICZYCH POWIERZCHNIACH PRÓBNYCH. Na podstawie wyników pomiarów i obserwacji wykonano wstępne obliczenia dotyczące poszczególnych gatunków na fotolotniczych powierzchniach próbnych f :

- P_i – pokrycie przez korony drzew gatunku i (jako iloczyn udziału koron drzew gatunku przez stopień pokrycia $P_i = K \cdot U_i$),
- H_i – „górną wysokość” drzew danego gatunku (wysokość poszczególnych drzew obliczono na podstawie rzędnych Z wierzchołka i gruntu; w wypadku pomiaru kilku drzew danego gatunku górną wysokość obliczano jako średnią arytmetyczną),
- OZ_i – „objętość zielona” drzew danego gatunku $OZ_i = P_i \cdot H_i$ (jest to objętość walca obliczonego na podstawie powierzchni rzutu koron i górnej wysokości drzew).

Po wykonaniu obliczeń dla poszczególnych gatunków, mając na względzie konieczność zredukowania liczby cech wykorzystywanych w estymatorze regresyjnym, obliczono średnie dane dotyczące poszczególnych powierzchni próbnych f :

- Hk – średnia „górną wysokość skorygowana” drzewostanu (obliczona jako Hw średnia wysokość ważona udziałem poszczególnych gatunków, a następnie skorygowana przez dodanie stałej wartości m tak, aby prosta regresji dotycząca zależności zasobności V (obliczonej na skpp) od wysokości górnej Hw przecinała początek układu współrzędnych; w tym wypadku była to korekta $Hk=Hw-4,7$),
- OZk – średnia „objętość zielona skorygowana” drzewostanu (obliczona jako $OZkw$ średnia ważona udziałem oraz „ekspansywnością” e_i poszczególnych gatunków i , a następnie skorygowana przez dodanie stałej wartości m tak, aby prosta regresji dotycząca zależności zasobności V (obliczonej na skpp) od objętości zielonej $OZkw$ przecinała początek układu współrzędnych; w tym wypadku była to korekta $OZk=OZkw-20$; „ekspansywność” e_i wynika z różnicy między gatunkami, dotyczącej proporcji między miąższością pni, a objętością zieloną OZ ; obliczenia współczynników e wykonano na podstawie prostoliniowej regresji wielokrotnej bez wyrazu wolnego; im większa wartość e tym większa miąższość pnia przypada na jednostkę objętości zielonej; poszczególne gatunki otrzymały następujące współczynniki e : So – 0,22; Md – 0,22; Św – 0,31; Db – 0,25; Bk – 0,17; Ol – 0,18; Brz – 0,13; inne liściaste – 0,14),
- Wk – średni skorygowany wiek drzew (obliczony jako Wkw średnia ważona objętością zieloną OZi poszczególnych gatunków, a następnie skorygowana przez dodanie stałej wartości m tak, aby prosta regresji dotycząca zależności zasobności V (obliczonej na skpp) od średniego wieku Wkw przecinała początek układu współrzędnych; w tym wypadku była to korekta $Wk=Wkw-5$).

OBLICZENIE ZALEŻNOŚCI MIĘDZY ZASOBNOŚCIĄ NA ZIEMI A CECAMI FOTOLOTNICZYMI. Przyjmując, że zmienną zależną jest zasobność V , uzyskana z naziemnych pomiarów stałych kontrolnych powierzchni próbnych (skpp), a zmiennymi niezależnymi cechy obliczone na powierzchniach fotolotniczych (w miejscu odwzorowania skpp), obliczono regresję wielokrotną. Wykorzystano do tego 283 powierzchnie próbne – czyli także 16 z tych, które założono w drzewostanach w wieku 16-20 lat. Przyjęto kwadratową funkcję zmiennych niezależnych, która w wypadku dwóch zmiennych t i z ma ogólną postać:

$$V = a_0 + a_1t + a_2z + a_3t^2 + a_4z^2 + a_5tz$$

Jako zmienne niezależne przyjęto opisane wyżej cechy Hk , OZk i Wk oraz odpowiednie ich kwadraty i pary iloczynów. Dobór zmiennych do równania regresji wykonano metodą krokową „wstecz”, korzystając z programu Statistica.

Powyższe obliczenia potraktowano nie tylko jako nieodłączny element inwentaryzacji wykonywanej metodą dwufazową, ale także jako:

- sprawdzenie przydatności wytypowanych cech do końcowych obliczeń (wskazanie celowości ich pomiaru na zwiększonej liczbie powierzchni fotolotniczych, które w końcowych obliczeniach stanowią próby tzw. I fazy),
- wyszukanie obserwacji „odstających” z zamiarem stwierdzenia przyczyn tego zjawiska, a następnie wykonania poprawionych pomiarów, gdyby „odstawanie” było następstwem błędów pomiarów w terenie lub na zdjęciach lotniczych.

OBLICZENIE CEC NA ROZSZERZONEJ GRUPIE FOTOLOTNICZYCH POWIERZCHNI PRÓBNYCH. Po stwierdzeniu, które cechy na próbach fotolotniczych są przydatne do obliczenia korelacji między nimi a zasobnością V na naziemnych skpp, przeprowadzono pomiary i interpretacje na rozszerzonej grupie powierzchni próbnych fotolotniczych. Stwierdzono, że przydatne były wszystkie wytypowane cechy, w związku z tym zakres pomiarów prób fotolotniczych rozszerzonej grupy był

taki sam jak prób wykorzystanych do obliczenia regresji między zasobnością na skpp a cechami na próbach fotolotniczych. W wypadku, gdyby niektóre cechy były nieprzydatne, zakres pomiarów prób rozszerzonej grupy byłby zmniejszony. Łącznie z próbami wykorzystanymi we wstępnym etapie obliczeń (poszukiwania najlepszej regresji), w końcowym etapie obliczeń stanowiły one próby, tzw. I fazy.

Środki tych powierzchni zostały rozmieszczone systematycznie w więźbie, która w terenie odpowiadała by rozmiarowi 200×200 metrów. Siatka kwadratów była zorientowana według północy topograficznej mapy w układzie odniesienia „1992”. Zmierzono 1713 prób, co łącznie ze zmierzonymi wcześniej 267 próbami w drzewostanach w wieku powyżej 20 lat, stanowiło 1980 prób I fazy (tab.). Przyjęto jednakową wielkość powierzchni próbnych, która w terenie odpowiadała by 500 m². W przypadku powierzchni próbnych położonych na brzegu drzewostanu mierzone tylko tę część, w której znalazł się środek powierzchni próbnej.

OBLICZENIE ZASOBNOŚCI DRZEWOSTANÓW Z WYKORZYSTANIEM METODY KOMBINOWANEJ. Dla każdej z 1980 prób fotolotniczych, na podstawie zmierzonych i interpretowanych cech, wykorzystując równanie regresji, obliczono spodziewaną zasobność x_{yf} . Te dane połączono z wynikami z pomiarów naziemnych stałych kontrolnych powierzchni próbnych. Średnią zasobność dla jednostki inwentaryzacyjnej obliczono [Loetsch, Haller 1964]:

$$v = \bar{v}_N + b_{cx} (\bar{x} - \bar{x}_{cen})$$

gdzie:

\bar{v}_N – wartość średnia obliczona z powierzchni próbnych II fazy (skpp naziemne),

\bar{x} – wartość średnia obliczona ze wszystkich powierzchni próbnych I fazy (fotolotniczych) zlokalizowanych w danej jednostce inwentaryzacyjnej,

\bar{x}_{cen} – wartość średnia obliczona z tych powierzchni próbnych fotolotniczych, których położenie odpowiadało położeniu powierzchni II fazy (skpp naziemnych),

$b_{cx} = \frac{r \cdot s_{vy}}{s_x}$ – współczynnik kierunkowy równania regresji wartości v w zależności od x (r – współczynnik korelacji, s_{cx} – kowariancja cech v i x , s_x – odchylenie standardowe cechy x).

Obliczenie wartości błędu średniego oszacowania zasobności S_y wykonano według wzoru [Khan, Tripathi 1967]:

$$S_v^2 \approx \frac{s_v^2 \cdot (1 - R^2)}{n_2} \cdot \left(1 + \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \frac{p}{n_2 - p - 2} \right) + \frac{R^2 \cdot s_v^2}{n_1} - \frac{s_v^2}{N}$$

gdzie:

s_v^2 – wariancja zasobności obliczona z powierzchni próbnych II fazy (naziemnych skpp),

R^2 – współczynnik determinacji zależności między zasobnością na skpp a cechami mierzonymi na powierzchniach próbnych fotolotniczych,

p – liczba cech (zmiennych) niezależnych w równaniu regresji,

n_1 – liczba powierzchni próbnych I fazy (wszystkich prób fotolotniczych),

n_2 – liczba powierzchni próbnych II fazy (naziemnych skpp i odpowiadających im powierzchni fotolotniczym),

N – liczba możliwych do założenia prób.

Jako jednostki inwentaryzacyjne przyjęto łącznie traktowane drzewostany poszczególnych podklas wieku w zakresie 21-100 lat, klas wieku VI, VII (i starszych) oraz klasy odnowienia (łącznie

z niewielką powierzchnią drzewostanów klasy do odnowienia). Obliczono średnią zasobność, błąd oszacowania zasobności, a po uwzględnieniu powierzchni danej jednostki, zapas grubizny oraz błąd oszacowania zapasu. Po zsumowaniu wyników dotyczących zapasu poszczególnych jednostek uzyskano wynik dla Obrębu Milicz.

Dla porównania obliczono średnią zasobność i zapas jednostki inwentaryzacyjnej, którą stanowiły łącznie traktowane drzewostany obrębu w wieku powyżej 20 lat.

PORÓWNANIE INWENTARYZACJI KOMBINOWANEJ Z NAZIEMNĄ (URZĄDZENIOWĄ). Wyniki inwentaryzacji zapasu przeprowadzonej z wykorzystaniem metody kombinowanej porównano z wynikami przeprowadzonej w tym samym czasie inwentaryzacji urządzeniowej. Ta ostatnia była wykonywana na podstawie pomiaru kołowych powierzchni próbnych, z wykorzystaniem warstwowania na grupy wiekowo-gatunkowe [Instrukcja... 2003]. W Obrębie Milicz w roku 2005 dla potrzeb inwentaryzacji urządzeniowej zmierzono 834 naziemne powierzchnie próbne, przy czym 267 z nich to były te same próby, które wykorzystano w inwentaryzacji kombinowanej z zastosowaniem zdjęć lotniczych.

Wyniki

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY ZASOBNOŚCIĄ NA POWIERZCHNIACH PRÓBNYCH NAZIEMNYCH A CECAMI NA FOTOLOTNICZYCH POWIERZCHNIACH PRÓBNYCH. Stwierdzono, że zmienność zasobności V na powierzchniach próbnych naziemnych (skpp) była wystarczająco dobrze objaśniana, jeżeli w modelu regresji wykorzystano pięć cech: Hk^2 , Hk^3 , Wk^2 , $OZk \cdot Hk$, $Hk \cdot Wk$. Współczynnik determinacji wyniósł $R^2=0,646$ (współczynnik korelacji wielokrotnej $R=0,804$). Wartość średnia zasobności, obliczona na poszczególnych powierzchniach próbnych według równania regresji, była taka sama jak obliczona według skpp. Zależność między wartościami rzeczywistymi a obliczonymi na podstawie tego równania miała charakter prostoliniowy, co wskazało na dobre dopasowanie i także na dobry dobór cech. Pewna część obserwacji miała charakter „odstających”. Wskazano 12 najbardziej znaczących. Odszukano te powierzchnie próbne w terenie, stwierdzono przyczyny odstawiania, usunięto błędy i wykonano ponowne obliczenia.

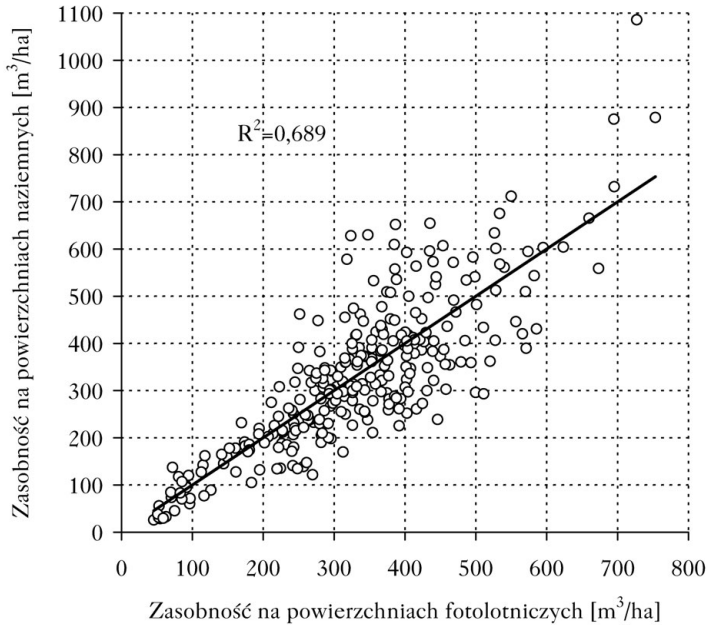
Po ponownym obliczeniu regresji między zasobnością na skpp a cechami na fotolotniczych powierzchniach próbnych współczynnik determinacji zwiększył się do $R^2=0,689$ (współczynnik korelacji wielokrotnej $R=0,830$) (ryc. 1). Równanie służące do obliczenia zasobności na powierzchniach fotolotniczych miało ostateczną postać:

$$V_{foto} = 35,6 + 1,083 \cdot Hk^2 - 0,0186 \cdot Hk^3 + 0,0341 \cdot Wk^2 + 0,0310 \cdot OZk \cdot Hk - 0,260 \cdot Hk \cdot Wk$$

gdzie:

- Hk – średnia „górna wysokość skorygowana” drzewostanu,
- $Hk=Hw-4,7$ – (średnia wartość 20,3, zakres wartości 2,6-36,6),
- Hw – wartość oryginalna,
- Wk – średni skorygowany wiek drzew,
- $Wk=Wkw-5$ – (średnia wartość 73,6, zakres wartości 11-170),
- Wkw – wartość oryginalna,
- OZk – średnia „objętość zielona skorygowana” drzewostanu,
- $OZk=OZkw-20$ – (średnia wartość 315, zakres wartości 54-736),
- $OZkw$ – wartość oryginalna.

W poszczególnych podklasach wieku współczynnik korelacji prostoliniowej między zasobnością zmierzoną na skpp (na ziemi) a zasobnością obliczoną na powierzchniach fotolotniczych przyjmował różne wartości – od 0,404 do 0,921 (tab.).



Ryc. 1.

Zależność między zasobnością obliczoną na naziemnych powierzchniach próbnych i na powierzchniach fotolotniczych po weryfikacji obserwacji odstających

Relationship between the growing stock volumes calculated on ground sample plots and on airphoto plots after the revision of outliers

Tabela.

Wielkość oraz liczba naziemnych i fotolotniczych powierzchni próbnych założonych w poszczególnych jednostkach inwentaryzacyjnych w Obrębie Milicz

Size and number of ground and airphoto sample plots established in particular inventory units located in the Milicz Forest District

Jednostka inwentaryzacyjna	Powierzchnia [ha]	Liczba powierzchni próbnych			r
		naziemnych skpp i odp. im fotolotniczych	dodatkowych fotolotniczych	razem fotolotniczych	
IIa	681,00	7	191	198	0,404
IIb	771,80	26	196	222	0,921
IIIa	1234,70	33	311	344	0,769
IIIb	526,70	8	146	154	0,552
IVa	486,58	31	123	154	0,715
IVb	550,58	27	143	170	0,873
Va	593,79	18	150	168	0,831
Vb	411,01	35	111	146	0,707
VI	610,30	36	158	194	0,440
VII+	357,69	24	84	108	0,791
KO	439,68	22	100	122	0,769
Obręb bez I kl. wieku	6663,83	267	1713	1980	0,802

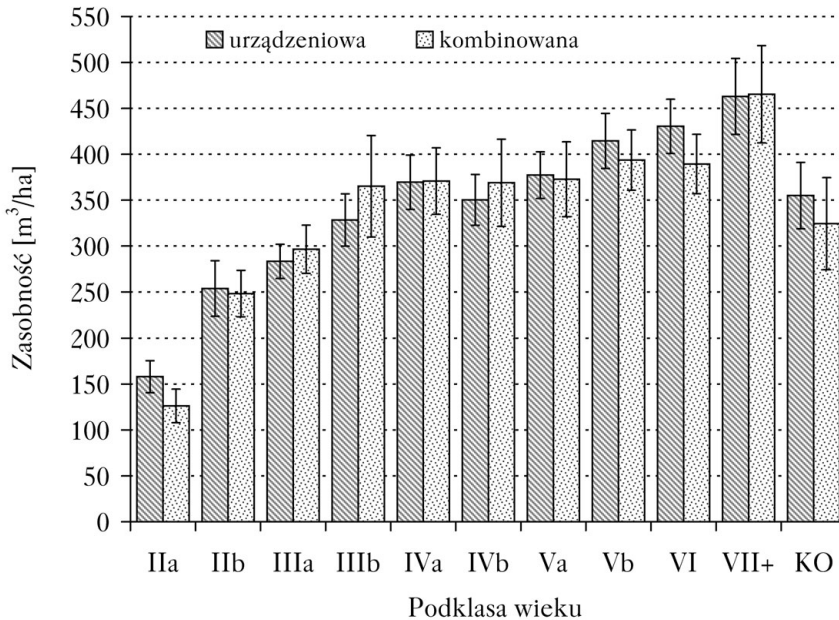
r – współczynnik korelacji prostopinowej między zasobnością obliczoną na stałych kontrolnych powierzchniach próbnych a obliczoną dla prób fotolotniczych

r – linear correlation coefficient between the growing stock volume calculated on the permanent ground control plots and on airphoto sample plots

OBLICZENIE ZAPASU DLA PODKLAS WIEKU I CAŁEGO OBRĘBU. Średnia zasobność w podklasach wieku obliczona z wykorzystaniem metody kombinowanej była zbliżona, a niekiedy bardzo podobna, do uzyskanej w metodzie stosowanej obecnie w urzędzaniu lasu (ryc. 2). Ta metoda jest także metodą reprezentacyjną, w której wynik jest oszacowany z pewnym błędem. Może więc służyć do porównania, ale nie jako wzorzec. Nie stwierdzono istotności różnic wartości średnich, obliczonych w poszczególnych podklasach wieku z zastosowaniem obu metod.

Z wyjątkiem jednej podklasy wieku, w metodzie kombinowanej błąd oszacowania średniej zasobności był większy niż w metodzie urządzeniowej. W poszczególnych podklasach wieku wahał się on w granicach ± 18 -55 m³/ha (przy poziomie istotności $\alpha=0,05$). Jako błąd względny zawierał się w przedziale $\pm 8,3$ -15,5%, przeciętnie $\pm 11,4\%$. Największe rozbieżności wyników między zasobnością obliczoną według metody kombinowanej a obliczoną według metody stosowanej obecnie w urzędzaniu lasu dotyczyły podklasy wieku IIa, IIIb i VI. W tych jednostkach wartość współczynnika korelacji prostoliniowej między zasobnością zmierzoną na skpp a zasobnością obliczoną na powierzchniach fotolotniczych była najmniejsza (tab.).

Oszacowano, że średnia zasobność drzewostanów Obrębu Milicz (w wieku powyżej 20 lat) po zsumowaniu wyników z poszczególnych podklas wieku wyniosła 322,5 \pm 10,9 m³/ha (tj. $\pm 3,4\%$). Był to wynik zbliżony do uzyskanego w metodzie urządzeniowej, w której wyniósł 326,8 \pm 8,1 m³/ha (tj. $\pm 2,5\%$). Średnia zasobność obliczona metodą kombinowaną, ale bez podziału na podklasy wieku (przy przyjęciu jednej jednostki inwentaryzacyjnej „wszystkie drzewostany obrębu”), wyniosła 327,9 \pm 12,4 m³/ha (tj. $\pm 3,8\%$).



Ryc. 2.

Średnia zasobność grubizny drzewostanów w podklasach wieku w Obrębie Milicz w roku 2005 według inwentaryzacji kombinowanej z zastosowaniem zdjęć lotniczych i według inwentaryzacji urządzeniowej (błędy oszacowania wartości średnich podano przy poziomie istotności $\alpha=0,05$)

Mean merchantable timber volume of stands in age sub-classes in the territory of the Milicz Forest District in 2005 by the combined inventory method using aerial photography, and by the contemporary ground method (mean value estimation errors at a significance level of $\alpha=0.05$)

Dyskusja

Znaczenie niniejszych badań może być rozpatrywane w dwóch aspektach. Pierwszy to przeprowadzenie inwentaryzacji zapasu drzewostanów z wykorzystaniem kombinowanej dwufazowej metody z zastosowaniem zdjęć lotniczych w całym obrębie leśnym. Drugi to przeprowadzenie eksperymentu o charakterze gospodarczym – przez zaangażowanie na wszystkich etapach pomiarów i obliczeń pracowników na co dzień zajmujących się pracami urządzeniowymi – w tym wypadku pracowników Oddziału BULiGL w Brzegu.

Mimo że w Obrębie Milicz udział drzewostanów sosnowych jest zbliżony do przeciętnego w Lasach Państwowych, to przeprowadzenie inwentaryzacji drzewostanów całego obrębu wiązało się z pewnymi problemami. Polegały one na tym, że podczas pomiarów i interpretacji zdjęć lotniczych konieczne było uwzględnienie innych, dość licznych gatunków panujących – przede wszystkim dębu, buka, olszy i brzozy – ale także gatunków mniej licznych. Ponadto pomiary obejmowały całe spektrum wieku drzewostanów. W tej sytuacji należało się liczyć z faktem, że korelacja między zasobnością obliczoną na naziemnych stałych powierzchniach próbnych a obliczoną na podstawie cech fotolotniczych, mogła być niezbyt silna. Okazało się, że dla danych z całego obrębu (łącznie z drzewostanami w wieku 16-20 lat) współczynnik korelacji wynosił 0,830, a dla drzewostanów w wieku powyżej 20 lat – 0,802. Była to więc wartość dość duża. Wprawdzie w literaturze [Stellingwerf 1962; Bogay 1970; Schade 1980; Akça i in. 1996] były podawane przykłady silniejszej zależności (w granicach od 0,77 do 0,96), ale dotyczyły one drzewostanów z tym samym gatunkiem panującym. Jeżeli jednak uwzględnić fakt, że warstwowanie przyczynia się do zmniejszenia błędu oszacowania (w tym wypadku zasobności), to w Obrębie Milicz, w wyniku podziału na podklasy wieku, średnia wartość współczynnika korelacji wyniosła 0,868 – a więc była porównywalna z najlepszymi wynikami podawanymi w literaturze.

Bardzo ważna dla badań była możliwość dokonania porównania wyników inwentaryzacji metodą kombinowaną z zastosowaniem zdjęć lotniczych z wynikami inwentaryzacji przeprowadzonej według metody przyjętej w Instrukcji [2003]. Zarówno dla podklas wieku, jak i dla całego obrębu różnice oszacowania zapasu pomiędzy obiema metodami były niewielkie. Oznacza to, że przy odpowiedniej liczbie powierzchni próbnych naziemnych i fotolotniczych można osiągnąć wyniki tak samo przydatne jak w metodzie stosowanej w urzędzania lasu na szeroką skalę.

W tym kontekście ważne jest pytanie o koszty inwentaryzacji kombinowanej i jak kształtują się one w stosunku do kosztów inwentaryzacji wykonywanej w ramach prac urządzeniowych, prowadzonych zgodnie z Instrukcją [2003]. Wobec faktu ustalania kosztów całości prac urządzeniowych w danym nadleśnictwie, obliczenie takie jest trudne i ma charakter przybliżony.

W ramach inwentaryzacji w Obrębie Milicz założono 834 powierzchnie próbne. Oszacowano, że koszt tych prac wynosił 110 000 PLN, a więc za jedną powierzchnię należało zapłacić 131,9 PLN. W przypadku obliczania kosztów inwentaryzacji kombinowanej punktem wyjścia była liczba powierzchni próbnych naziemnych i fotolotniczych niezbędnych do tego, aby uzyskać taką samą dokładność inwentaryzacji zasobności obrębu jak w wypadku inwentaryzacji urządzeniowej. Według Loetscha i Hallera [1964] liczba prób fotolotniczych wynosi:

$$k = \frac{s_{\%v}^2 \cdot \sqrt{\frac{C_{naz}}{C_{lot}} \cdot R^2 \cdot (1 - R^2) + s_{\%v}^2 \cdot R^2}}{S_{\%}^2}$$

gdzie:

$s_{\%v}$ – współczynnik zmienności regresji,

C_{naz} – koszt pomiaru próby naziemnej,

C_{lot} – koszt pomiaru próby fotolotniczej,

$S_{\%}$ – oczekiwana wielkość błędu średniego procentowego,

R – współczynnik korelacji między zasobnością obliczoną na próbach naziemnych a cechami na zdjęciach lotniczych.

Optymalna relacja liczby prób naziemnych do fotolotniczych wynosi zaś [Loetsch, Haller 1964]:

$$f = \frac{n}{k} = \sqrt{\frac{C_{lot}}{C_{naz}} \cdot \frac{1 - R^2}{R^2}}$$

gdzie:

n – liczba prób naziemnych, pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Zakładając, że $S_{\%}=1,27\%$, $R=0,868$, a relacja kosztów $C_{naz}/C_{lot}=10$, obliczono, że liczba prób fotolotniczych powinna wynosić $k=2582$, a prób naziemnych $n=467$. Przyjmując, że próby naziemne są w postaci stałych kontrolnych powierzchni próbnych, które (przy regularnym stosowaniu) są droższe o 15% od prób czasowych (stosowanych w zarządzaniu lasu), to koszt jednej wyniósłby 151,7 PLN. Za wszystkie próby naziemne należałoby zapłacić 70 844 PLN, a za fotolotnicze 39 169 PLN. Łącznie byłoby to 110 013 PLN.

Można przyjąć, że koszt wykonania zdjęć lotniczych i ich przygotowania do pomiarów dla nadleśnictwa złożonego z trzech obrębów wynosił 180 000 PLN, a więc 60 000 PLN dla jednego obrębu. W tej sytuacji za inwentaryzację wykonaną metodą kombinowaną należało zapłacić około 170 tys. PLN (przy relacji kosztów prób $C_{naz}/C_{lot}=10$). Byłoby to więcej niż w przypadku inwentaryzacji wykonywanej tylko przy użyciu prób naziemnych.

Wyniki obliczeń wskazują, że – przy dość dużych cenach zdjęć lotniczych – stosowanie kombinowanej metody inwentaryzacji jest nieopłacalne. Ale koszty te stają się mniejsze, jeżeli te same zdjęcia wykorzystuje się do innych zadań. Według Hildebrandta [1996] przy stosowaniu zdjęć lotniczych w terenie, taksacja drzewostanów staje się o połowę tańsza.

Przyjmując, że wykonanie taksacji w Obrębie Milicz kosztowało 110 tys. PLN, to przez stosowanie zdjęć lotniczych oszczędza się 55 tys. PLN. Łączny koszt prac taksacyjnych i inwentaryzacyjnych wyniósłby 225 tys. PLN. Byłoby to zaledwie o 5 tys. więcej niż w przypadku tradycyjnie przeprowadzonych prac taksacyjnych i inwentaryzacyjnych.

Wnioski

- ✦ Przy obecnych cenach usług fotolotniczych w Polsce, zastosowanie zdjęć lotniczych do samego pomiaru zapasu jest nieopłacalne. Ich dodatkowe wykorzystanie w taksacji drzewostanów tylko w niewielkim stopniu zmienia koszt prac urzędniowych. Istniejącą korzyścią, ale trudną do wyrażenia finansowego, jest za to zwiększenie dokładności opracowań urzędniowych, jeżeli stosuje się zdjęcia lotnicze.
- ✦ Ze względu na rozwiązania technologiczne, możliwy jest pomiar zapasu z wykorzystaniem zdjęć lotniczych. Utrudnieniem w codziennym stosowaniu może być konieczność dobierania odpowiednich cech fotolotniczych po wstępnym etapie pomiarów fotogrametrycznych. Osiągnięcie korzyści ze stosowania zdjęć w pracach urzędniowych – w tym do pomiaru zapasu – jest możliwe wtedy, kiedy tymi materiałami będzie się posługiwać odpowiednio przeszkolony i zorganizowany zespół wykonawców.

Literatura

- Akça A., Beisch T., Eilermann F. 1996. Two-phased sampling method using regression estimators and small-scale aerial IR-photographs in volume and increment estimation. Proc. Symp. Remote Sensing and Computer Technology for Natural Resource Assessment, IUFRO S 4.02-00, Tampere 1995: 255-264.
- Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) 2003. Luftbildinterpretationsschlüssel – Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. Landesforstpräsidium Sachsen, Pirna.
- Bogyay J. 1970. Möglichkeiten für die Verwendung von Luftbildern bei der Vorratsaufnahme von ungarischen Kiefernwäldern. I. Arch. Ph. XVIII – 7: 229-241.
- Hildebrandt G. 1996. Fernerkundung und Luftbildmessung. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Instrukcja Urzędzania Lasu. 2003. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. Warszawa.
- Khan S., Tripathi T. P. 1967. The use of multivariate auxiliary information in double-sampling. Journal Ind. Stat. Association 5: 42-48.
- Loetsch F., Haller K. E. 1964. Forest inventory. BLV Verlagsgesellschaft München, Basel, Wien.
- Miścicki S. 2000a. Przydatność praktyczna nowoczesnych technik SIP w zakresie oceny zasobności i jakości hodowlanej drzewostanów. Postępy Techniki w Leśnictwie 73: 24-29.
- Miścicki S. [red.] 2000b. Kombinowana dwufazowa inwentaryzacja lasów nizinnych z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i stałych-kontrolnych powierzchni próbnych. Fundacja „Rozwój SGGW” Warszawa.
- Schade J. 1980. Ein mehrphasiges Stichprobensystem für forstliche Großrauminventuren, gestützt auf Landsat MSS-Daten, Luftbilder 1:50000 und ergänzende terrestrische Messungen. Diss. Univ. Freiburg.
- Schmid-Hass P., Baumann E., Werner J. 1993. Kontrollstichproben: Aufnahmeinstruktion. Berichte Eidg. Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft 186: 1-143.
- Stellingwerf D. A. 1962. Holzmassenbestimmung von *Pinus silvestris* aus Luftbildern in den Niederlanden. AFZ 17: 29-30.
- Zasępa R. 1972. Metoda reprezentacyjna. PWE, Warszawa.

SUMMARY

Inventory of merchantable timber volume using aerial photography

The aim of the studies was to evaluate the combined, two-phase method of inventorying growing stock using airphoto and ground sample plots. The assessment included: determination of the accuracy of the assessed growing stock inventory method, comparison of its results (mean values and accuracy of their assessment) with the results of forest inventory using the contemporary ground method, comparison of the costs of both inventories.

The object of the study were stands in the Milicz Forest District (Wrocław Regional Directorate of the State Forests). Materials were collected in the framework of the forest management plans drawn up for this Unit using, as far as possible, forest survey staff. Colour, IR aerial photographs at a scale of 1:10 000 were used. A grid of 283 permanent ground control plots (of which 267 are in the stands aged 20+) was created. In the stands older than 60 years, their size ranged from 300 to 500 m², as specified in the Forest Management Instruction 2003. In younger stands, their size equalled 200 m². Merchantable timber volume was calculated for each plot. The coordinates of plot centres were measured using GPS data. Using a digital photogrammetric station, the coordinates enabled positioning of sample plots on the properly oriented aerial photographs (after the completion of aerotriangulation). The measurements of these plots (in connection with their placing on aerial photographs called airphotos) included: assessment of tree crown cover in a stand (a crown – density pattern was used), species identification (eight main tree species were identified), measurement of the three highest trees, revision of tree age (in relation to the taxation data).

A relationship between the standing volume on 283 ground sample plots (so-called Phase II sampling) and stand characteristics on the corresponding airphoto plots was determined. After correcting the stray observations that were produced mainly as a result of field measurement errors, the correlation coefficient was $R=0.83$ (Fig. 1). In the framework of so-called Phase I sampling, additional measurements of 1713 systematically distributed airphoto sample plots (only on the photographs) were made. The total number of airphoto sample plots in the stands aged 20+ amounted to 1980. This enabled calculation of the mean standing volume in particular age sub-classes and in the entire Forest District (Fig. 2). The obtained results regarding both the mean value and estimated error (the volume in the entire Forest District was $322.5 \pm 10.9 \text{ m}^3/\text{ha}$, i.e. $\pm 3.4\%$) did not markedly differ from the results of the forest management planning inventory carried out in accordance with the rules set in the Forest Management Instruction ($326.8 \pm 8.1 \text{ m}^3/\text{ha}$, i.e. $\pm 2.5\%$). In order to obtain the same accuracy of assessing growing stock by the combined inventory method as by the contemporary ground method, 2582 of airphotos and 467 ground sample plots should be measured (assuming that execution cost ratio is 1:10). It was estimated that using aerial photography in forest survey and growing stock inventory, the cost of this part of inventory operations can be comparable to the cost of such operations performed in the traditional way. The estimates do not take into consideration the benefits resulting from the improvement of the accuracy of forest survey for which aerial photography is used.