

## WSPÓŁCZESNE TECHNIKI FOTOGRAMETRII I ICH ZASTOSOWANIE W LEŚNICTWIE<sup>1</sup>

### CURRENT PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES AND THEIR USE IN FORESTRY

Krzysztof Będkowski<sup>1</sup>, Joanna Adamczyk<sup>1</sup>, Sławomir Mikrut<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

<sup>2</sup>Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Akademia Górniczo-Hutnicza

**Słowa kluczowe: leśnictwo, fotogrametria, inwentaryzacja, ortofotomapa**

Keywords: forestry, photogrammetry, inventory, orthophotomap

## Wstęp

Istnieją trzy podstawowe obszary zastosowań fotogrametrii w leśnictwie: w kartografii leśnej, taksacji i inwentaryzacji zapasu oraz w ocenie stanu zdrowotnego i sanitarnego drzewostanów. Na rozwój fotogrametrii wpływ miał zawsze postęp techniczny, zarówno w dziedzinie środków zapisu informacji obrazowej (materiałów fotograficznych i kamer), jak i platform wnoszących aparaturę rejestrującą w przestrzeń ponad lasem. Współcześnie techniki fotogrametrii mogą być stosowane w leśnictwie z pułapu naziemnego, lotniczego lub satelitarne. Dostarczają danych o różnym poziomie szczegółowości, zarówno w odniesieniu do informacji geometrycznych (związanych np. z delimitacją przestrzenną obiektów i zjawisk), jak i wartości wielkości opisujących te zjawiska. W leśnictwie i dziedzinach pokrewnych mogą być z powodzeniem wykorzystywane do inwentaryzacji pojedynczych drzew, grup drzew, drzewostanów i kompleksów leśnych, a z pułapu kosmicznego – także regionów i obszaru całego kraju.

W Europie, w zastosowaniach leśnych, dominuje fotogrametria lotnicza. Niewiele podejmowano prób z zakresu fotogrametrii naziemnej, którą stosowano najczęściej w inwentaryzacji drzew i drzewostanów. Techniki satelitarne służą natomiast głównie potrzebom teledetekcji.

Obowiązująca w Państwowym Gospodarstwie Leśnym *Instrukcja urządzania lasu* (2003) stwierdza, że do prac taksacyjnych w drzewostanach można wykorzystać zdjęcia lotnicze i obrazy satelitarne. Nie określono jednakże zakresu zastosowania, ani też zalecanych źródeł danych oraz procedur ich przetwarzania metodami fotogrametrycznymi i teledetekcyjnymi. Taka sytuacja wynika z szeregu czynników, do których należą przede wszystkim:

---

<sup>1</sup> Niniejszy artykuł powstał na podstawie ekspertyzy pn. „Możliwości wykorzystania zdjęć lotniczych w pracach Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej” (Będkowski, Adamczyk, Mikrut, 2005).

- brak odpowiedniej metodyki,
- duże rozproszenie informacji zawartych w publikacjach naukowych,
- zmienność warunków technicznych i przyrodniczych – wpływające na uzyskiwane wyniki,
- koszty pozyskiwania i przetwarzania materiałów fotolotniczych i satelitarnych,
- znaczny koszt nabycia sprzętu oraz oprogramowania fotogrametrycznego i teledetekcyjnego,
- brak akceptacji faktu, że za pomocą metod fotogrametrycznych i teledetekcyjnych uzyskuje się zbliżone (inne), a nie identyczne wyniki inwentaryzacji, w porównaniu do metod naziemnych,
- brak odpowiednio przeszkolonej kadry.

Tymczasem na całym świecie wciąż rozwijane są nowe metody inwentaryzacji lasów z wykorzystaniem możliwości, jakie niosą ze sobą fotogrametria i teledetekcja, z ich sztywnymi produktami, do których należą numeryczny model terenu (NMT) oraz ortofotomapa.

## Fotogrametria w taksacji i inwentaryzacji lasu

Idea wykorzystania fotogrametrii w taksacji lasu i inwentaryzacji pojawiła się najwcześniej w literaturze niemieckiej. Pierwsze próby zastosowania w leśnictwie zdjęć, wykonywanych wówczas z balonów, miały miejsce już w 1887 r. (Hildebrandt 1992). Pierwsze zastosowania fotogrametrii w leśnictwie polskim datowane są na koniec lat czterdziestych ubiegłego stulecia, a jej dynamiczny rozwój trwał do lat sześćdziesiątych. Następne dziesięciolecia to spadek zainteresowania tą dziedziną, jednak szybki rozwój techniki cyfrowej (i jej dostępność w kraju) w ostatnim okresie czasu sprawiły, że fotogrametria nabiera znaczenia i jest coraz częściej wykorzystywana w leśnictwie.

Dane fotogrametryczne i teledetekcyjne mogą być wykorzystane do uzyskiwania informacji o takich elementach opisu drzewostanów oraz siedliska, jak: skład gatunkowy, zwarcie, zagęszczenie, przeciętna pierśnica drzewostanu, przeciętna wysokość drzewostanu, budowa pionowa, forma zmieszania, siedlisko, wiek, ukształtowanie terenu, zapas i jego przyrost. Niektóre z tych wielkości mogą być ustalane z dokładnością dorównującą metodom inwentaryzacji naziemnej, część z nich może być określana jedynie z dużym przybliżeniem. W literaturze krajowej istnieją obszerne opracowania przeglądowe dotyczące tego zagadnienia (Piekarski, Będkowski, 1991; Będkowski, 2005). Wyrazem wzrostu zainteresowania leśników technikami oraz technologiami fotogrametrycznymi i teledetekcyjnymi są publikacje będące wynikiem I i II Konferencji „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych” (Będkowski, Piekarski, 2001; Mozgawa, Choromański, Zawila-Niedźwiecki, 2001; Zajączkowski, Wężyk, 2003; Będkowski, 2003), a także opracowania wykonane na zamówienia Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych (Zajączkowski, Wężyk, 2004) oraz Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej (Będkowski, Adamczyk, Mikrut, 2005; Mozgawa, 2005). Z uwagi na przeglądowy charakter wymienionych powyżej publikacji, w niniejszym opracowaniu zagadnienia zastosowania fotogrametrii w taksacji lasu i inwentaryzacji zapasu nie będą omawiane.

## Współczesne techniki i technologie fotogrametryczne

Podstawowymi i zarazem najmniej złożonymi produktami przetwarzania zdjęć lotniczych są: odbitki stykowe, fotoszkice, fotoszkice ulepszone, powiększenia. Bardziej zaawansowane produkty to fotomapy i ortofotomapy. Techniki przetwarzania można umownie podzielić na jedno- i dwuobrazowe. Metody jednoobrazowe znajdują zastosowanie głównie dla terenów płaskich. Metody dwuobrazowe pozwalają wykorzystać efekt stereoskopowy do inwentaryzacji rzeźby terenu i przestrzennego charakteru analizowanych obiektów. Omówione dalej techniki przedstawione są na ogół w ujęciu analogowym. Współcześnie, dzięki cyfrowej postaci zdjęć (obrazów), każdy z produktów może być uzyskany na drodze przetwarzania numerycznego.

### Opracowania jednoobrazowe

Odbitki stykowe to kopie zdjęć oryginalnych wykonane na papierze fotograficznym. Gdy oryginał ma postać negatywu to kopiowanie ma charakter „stykowy”, tj. pod negatyw podkłada się papier fotograficzny i naświetla. Jeśli oryginał jest diapozytywem, wówczas wykonuje się roboczy negatyw albo stosuje się odwracalny proces kopiowania. Proces ten jest jednak znacząco droższy od zwykłego kopiowania. Dzisiaj rolę odbitek stykowych spełniają wydruki komputerowe wykonywane najczęściej w skali 1:1. Stosuje się również specjalne naświetlarki oraz dodatkowo foliowanie, celem przedłużenia ich trwałości. Klasyczne odbitki stykowe miały spełniać rolę głównie dobrego materiału poglądowego oraz podkładu, na którym można projektować czy nanosić dodatkowe informacje.

Fotoszkie powstaje przez ułożenie obok siebie i przyklejenie do sztywnej planszy odbitek fotograficznych. Dla terenu płaskiego zestawienie fotoszkie jest relatywnie łatwe, ale dla terenu górzystego bardzo trudno jest „zgrać” styki pomiędzy zdjęciami, co wynika z dużych zniekształceń geometrycznych (zmiana skali i przesunięcia treści) spowodowanych deniwelacjami terenu. Każde ze zdjęć ma niewielką część wspólną ze zdjęciem sąsiednim. Widoczne są różnice jasności poszczególnych zdjęć. W praktyce fotoszkie montuje się z „pełnych” odbitek, nie obcinając części wspólnej. Fotoszkie ulepszonym jest blok zdjęć przetworzonych do jednakowej skali, a nie zdjęć oryginalnych. Technika ta traci na praktycznym znaczeniu z racji czasochłonności. Fotoszkie i fotoszkie ulepszone tworzy się dzisiaj również z zeskanowanych zdjęć lotniczych. Można do tego celu wykorzystać praktycznie każde oprogramowanie pozwalające na operacje na plikach rastrowych (np. Photoshop).

Powiększenia zdjęć lotniczych wykonuje się w celu zwiększenia skali obrazu. Np. zdjęcie lotnicze o skali około 1:10 000 (dla zdjęcia oryginalnego skala jest przybliżona) powiększone pięć razy ma skalę ok. 1 : 2 000 a rozmiary nieco ponad metr na metr ( $5 \times 23 \text{ cm} = 115 \text{ cm}$ ).

Fotomapy (albo fotoplany) opracowuje się głównie dla terenów płaskich. Jeśli przyjmujemy umownie teren za płaszczyznę, to wtedy pomijamy zniekształcający wpływ rzeźby terenu i pozostaje tylko korygowanie nachylenia zdjęcia. Do tego celu stosuje się urządzenia zwane przetwornikami fotomechanicznymi. Są to urządzenia podobne do powiększalników fotograficznych, które pozwalają na przekształcenie płaszczyzny zdjęcia na płaszczyznę mapy. W przypadku obrazów cyfrowych, przetwarza się zdjęcie za pomocą transformacji rzutowej. Zdjęcia montuje się na podkładzie zachowując podział na arkusze map. Ta prosta technika była szeroko stosowana w Polsce dla terenów równinnych i lekko falistych. W przypadku terenów falistych dzieli się obszar na kilka stref wysokościowych, które można uwa-

zać za „płaskie”. Powstają podobszary odpowiadające poszczególnym strefom, a potem wykonuje się oddzielne przetworzenia tego samego zdjęcia. Docelowo wybiera się i montuje na podkładzie tylko te fragmenty zdjęcia, które odpowiadają kolejnym podobszarom. Taka metoda nazywa się przetwarzaniem strefowym. Obecnie traci ona na praktycznym znaczeniu, aczkolwiek pozostają jeszcze niszowe zastosowania, np. w fotogrametrii naziemnej przy przetwarzaniu zabytkowych elewacji.

Specyficzną techniką, pozwalającą na uzyskanie informacji przestrzennych z pojedynczego zdjęcia, jest monoplottting. Technika ta, korzysta z pojedynczego obrazu, jednak pozwala pozyskiwać informacje 3D (współrzędne X,Y,Z). Niezbędne jest posiadanie numerycznego modelu terenu oraz znajomość elementów orientacji zdjęć. Większość współczesnego oprogramowania pozwala również na użycie ortofotomapy jako obrazu georeferencyjnego. Zdjęcie lotnicze można „wpasować w istniejący NMT za pomocą 3 znanych punktów terenowych, a następnie wykonywać dowolne pomiary na obrazie (np. przekroje). Technika monoplotttingu ma bardzo duże zastosowanie w projektach leśnych na całym świecie.

### Opracowania dwuobrazowe

Głównymi produktami przetwarzania stereofotogrametrycznego są numeryczny model terenu NMT (lub numeryczny model pokrycia terenu NMPT) oraz mapy numeryczne. Zarówno dane do NMT jak i map numerycznych (kreskowych) pozyskuje się na drodze przestrzennej wektoryzacji przy pomocy specjalistycznego sprzętu i oprogramowania. Dane te można pozyskiwać z pojedynczego modelu, który wcześniej został odpowiednio przygotowany, lub bloku zdjęć.

Jeżeli dysponujemy pojedynczą parą zdjęć lotniczych oraz metryką kamery i minimum trzema fotopunktami, możemy wykonać proces orientacji zdjęć. W pierwszej kolejności mierzy się znaczki tłowe w procesie orientacji wewnętrznej. Następnie mierzymy minimum sześć jednakowych na obu zdjęciach punktów celem odtworzenia wzajemnego położenia zdjęć w przestrzeni. Proces ten nazywa się orientacją wzajemną. Dokładność orientacji wzajemnej określa się na poziomie 0,5 piksela. Następnie mając odpowiednio rozmieszczone fotopunkty należy je pomierzyć i dokonać transformacji modelu z układu pierwotnego na układ wtórny, czyli terenowy (geodezyjny). Dokładność wpasowania jest w zasadzie na poziomie dokładności określenia (wyznaczenia) współrzędnych fotopunktów.

Proces aerotriangulacji (wyrównanie bloku zdjęć) jest niejako analogiczny do poprzedniego, z tą różnicą, że dochodzi tutaj do jednoczesnego wyrównania wielu modeli. Aerotriangulacja może odbywać się metodą niezależnych wiązek lub niezależnych modeli. Dzisiaj częściej wykorzystuje się metodę niezależnych wiązek. Proces pomiaru sprowadza się do pomiaru położenia znaczków tłowych oraz punktów wiążących zdjęcia (a więc punktów jednakowych dla kilku zdjęć) oraz wprowadzenia fotopunktów. Dodatkowo, celem zredukowania ilości fotopunktów mierzonych w terenie, wyznacza się współrzędne środków rzutów zdjęć, co pozwala niejako „wzmocnić” geometrię sieci.

Bloki aerotriangulacji projektuje się przed nalotem. Często, głównie w przypadku bloków zdjęć w skalach większych, sygnalizuje się fotopunkty. W przypadku zdjęć w skalach mniejszych wykorzystuje się fotopunkty naturalne, stanowiące tzw. połowę osnowę fotogrametryczną. Mogą to być punkty o współrzędnych XYZ (tzw. F-punkty), XY (tzw. P-punkty) lub Z (tzw. Z – punkty). Punkty te projektuje się w zależności od kształtu bloku i przyjętych dokładności. Liczba projektowanych fotopunktów zależy również od tego czy nalot wyko-

nywany jest przy wsparciu techniki DGPS i czy w czasie nalotu wyznaczane są współrzędne środków rzutów.

Klasyczną dla fotogrametrii drogą opracowania map numerycznych jest utworzenie modelu przestrzennego na odpowiednim przyrządzie i rysowanie elementów mapy w postaci linii, symboli czy znaków umownych. Takie postępowanie „uwalnia” wynik od zniekształceń, jakie posiada samo zdjęcie. Do utworzenia przestrzennego, metrycznego modelu stereoskopowego stosuje się przyrządy zwane autografami. Ostatnio często używa się nazwy stereoploter, a czynność rysowania treści mapy z modelu określa się jako stereodigitalizację. Mapy numeryczne mogą powstawać też przez „zrysowanie” konturów sytuacyjnych z ortofotomapy, co w technologii komputerowej określa się jako wektoryzację. Uzupełnieniem treści sytuacyjnej są zwykle warstwy, przedstawiające zróżnicowanie wysokościowe terenu (na obszarach zurbanizowanych przedstawia się punkty wysokościowe, tzw. pikiety).

### Ortofotomapa

Produktem, który budzi coraz większe zainteresowanie leśników jest ortofotomapa. Opracowanie ortofotomapy polega na takim przetworzeniu zdjęć, które uwzględnia wpływ odchylenia osi kamery od pionu oraz wpływ rzeźby terenu. W rezultacie otrzymuje się obraz, który powstałby gdyby rejestracja fotograficzna odbywała się w rzucie ortogonalnym, a nie środkowym. Istnieje wiele metod pozwalających na uzyskiwanie takich przetworzeń, analogowych i numerycznych – cyfrowych.

Technologia wytwarzania ortofotomapy składa się z kilku zasadniczych etapów, w których najważniejszymi są (Florek-Paszkowski, Węgrzyn, Homa, 1997):

- wykonanie zdjęć (obrazów),
- utworzenie NMT na podstawie pomiarów na wykonanych zdjęciach lub danych pochodzących z zasobów geodezyjno-kartograficznych,
- ortorektyfikacja – przetworzenie różniczkowe zdjęć (obrazów),
- redakcja ortofotomapy i uzupełniających informacji wektorowo-opisowych.

Aktualnie stosowane technologie wytwarzania ortofotomapy można podzielić na dwie grupy:

- technologie cyfrowe – ortorektyfikacja jest wykonywana na obrazach cyfrowych – zarejestrowanych za pomocą kamer cyfrowych lub uzyskanych w procesie skanowania zdjęć analogowych,
- technologia analogowo-cyfrowa – ortorektyfikacja jest wykonywana na optycznym modelu utworzonym ze zdjęć analogowych (nieskanowanych), za pomocą autografu analitycznego; skanowanie obrazu odbywa się w trybie interaktywnym w trakcie ortorektyfikacji.

Ortofotomapa cyfrowa jest produktem kartometrycznym, a więc takim, w którym ujednolicono skalę odwzorowania oraz usunięto zniekształcenia obrazu spowodowane aberracjami i orientacją kamery (sensora) oraz deniwelacją terenu - wyrażające się przesunięciami radialnymi obrazu.

Proces ortorektyfikacji jest realizowany na podstawie informacji geometrycznych dotyczących orientacji wewnętrznej sensora oraz informacji o ukształtowaniu terenu pochodzących z NMT. Położenie pikseli ortofotomapy jest zdefiniowane za pomocą współrzędnych terenowych X, Y. Rzędne wysokościowe pikseli są interpolowane z NMT. Odcień szarości

lub barwa piksela jest kopiowana z oryginalnego obrazu lub interpolowana z sąsiednich pikseli.

Wynik przetworzenia zdjęcia do rzutu ortogonalnego nie jest jeszcze ortofotomapa, a jedynie ortoobrazem (czasem nazywanym też ortofotogramem, ortofotografią). Dlatego kolejnym etapem jest mozaikowanie wykonanych ortoobrazów. Taka mozaika ortoobrazów, dostosowana do kroju sekcyjnego map, jest ortofotomapa. W formie wydrukowanej musi być zaopatrzona w ramkę z siatką kwadratów, opisem, ewentualnie innymi elementami takimi, jak warstwy (oczywiście każdy z tych elementów wzbogacających może mieć postać nakładki wykonanej na przezroczystym materiale).

W procesie ortorektyfikacji eliminowane są jedynie przesunięcia spowodowane zróżnicowaniem wysokościowym powierzchni terenu, w związku z tym takie obiekty, jak wysokie budynki, drzewa, mogą być przesunięte na ortoobrazie. Wielkość tego przesunięcia jest funkcją stałej kamery  $ck$ , wysokości obiektu oraz miejsca, gdzie występuje obiekt na obrazie (odległości od punktu głównego zdjęcia). Ze wzrostem wielkości  $ck$  wielkość przesunięć zmniejsza się. Istnieje już oprogramowanie eliminujące przesunięcia radialne. Powstała w takim procesie ortofotomapa nosi nazwę „*True Ortho*”. Jest to jednak zabieg podnoszący koszty opracowań, ponieważ z reguły wymaga dokładnej informacji o obiektach „wystających” z modelu. Metoda ta pozwoliłaby np. usunąć zniekształcenia ortoobrazów występujące na terenach leśnych. Współczesne programy komputerowe zapewniają praktycznie automatyczną realizację procesu mozaikowania i wyrównania tonalnego zdjęć. Niezauważalne są teraz granice łączenia zdjęć, wyeliminowane są nieciągłości w przebiegu dróg, lasów, rzeki. Stało się tak, gdyż łączono ortoobrazy pozbawione wad geometrycznych.

Możliwe jest obecnie stosowanie przełożenia skal między skalą zdjęć i skalą ortofotomapy, wynoszącego nawet 1:10. A więc przy opracowywaniu leśnej mapy numerycznej o dokładności odpowiadającej mapie w skali 1:5000 (mapa gospodarcza) teoretycznie możliwe jest wykorzystanie zdjęć w skali 1:50 000. Międzynarodowa organizacja OEEPE określiła powiększenie skalowe ortofotomapy od 4,5 do 5 w stosunku do skali zdjęć, z jakich jest generowana. W praktyce do opracowania ortofotomap projektuje się zwykle zdjęcia w skali 2,5–3,5 razy mniejszej od skali ortofotomapy. W szczególnych warunkach można opracowywać ortofotomapy w skali do 8 razy większej ze zdjęć panchromatycznych i do 5 razy większej ze zdjęć barwnych. Przykładowo dla zdjęć PHARE 1:26 000 generowano ortofotomapę w skali 1:5000, o pikselu terenowym 0,5 m.

Obecnie realizowane są projekty, które mają na celu wykonanie aktualnych obrazów (lotniczych i satelitarnych) kraju oraz zbudowanie na ich podstawie ortofotomap. Rada Europy określiła minimalne charakterystyki dokładnościowe dla ortofotomapy:

- piksel terenowy  $\leq 1,0$  m
- średni błąd położenia sytuacyjnego  $m_p \leq 2,5$  m.

Dla tej części Polski, gdzie funkcjonuje mapa ewidencyjna w skali 1:5000, przyjęto standard I ortofotomapy:

- piksel terenowy 0,5–1,0 m
- średni błąd położenia sytuacyjnego  $m_p \leq 1,5$ –2,5 m.

Dla terenów o dużym rozdrobieniu struktury działek funkcjonują mapy ewidencyjne w skalach 1:2880 i 1:2000. Dla tych terenów proponuje się standard II ortofotomapy:

- piksel terenowy 0,25 m
- średni błąd położenia sytuacyjnego  $m_p \leq 0,75$  m.

Wariant wykonania ortofotomapy na bazie nowych zdjęć lotniczych w skali 1:26 000 obejmie głównie południowo-zachodnią część kraju, gdzie nie ma pokrycia zdjęciami PHARE (ok. 82 000 km<sup>2</sup>). Kolejny wariant zakłada wykorzystanie nowych zdjęć lotniczych w skali 1:13 000. Powstanie ortofotomapa zgodna ze standardem II dla około 87 000 km<sup>2</sup> Polski południowo-wschodniej. Wariant „satelitarny” obejmuje około 120 000 km<sup>2</sup> w północnej części kraju. Na podstawie obrazów satelitarnych można wykonać ortofotomapę zgodną ze standardem I.

Oszacowanie dokładności opracowań fotogrametrycznych jest bardzo trudne, gdyż jest funkcją wielu czynników. Często jest wyznaczana empirycznie. Przyjmuje się, że średni błąd położenia szczegółów sytuacyjnych na ortofotomapie powinien być poniżej 0,3 mm w skali ortofotomapy i nie przekraczać 2–3 pikseli obrazu. Ostatecznym kryterium oceny dokładności ortofotomapy mogą być kontrolne pomiary terenowe. Przykład procedury podał Dorskocz (2003). Wykonuje się pomiary w terenie oraz na ortofotomapie i wyznacza współrzędne  $X$ ,  $Y$  tych samych punktów kontrolnych. Wybierać należy dobrze identyfikowane punkty. Przy obliczaniu błędu średniego położenia szczegółów sytuacyjnych uwzględnia się dokładność pomiaru terenowego, która w związku ze stosowaniem tachimetrów elektronicznych jest bardzo wysoka (0,04 cm). Błąd średni położenia punktu na ortofotomapie można wyznaczyć z zastosowaniem następującej zależności:

$$m_p = \sqrt{m_{pl}^2 + \frac{\sum \Delta L^2}{N}}$$

gdzie:

$m_{pl}$  – błąd położenia punktu wyznaczonego z pomiaru bezpośredniego (tj. w terenie),

$\Delta L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$  – długość wektora przesunięcia punktu kontrolnego,

$N$  – liczba punktów kontrolnych.

Wektor przesunięcia każdego punktu obliczany jest z różnic  $\Delta X$  oraz  $\Delta Y$  współrzędnych odczytanych z ortofotomapy oraz współrzędnych wyznaczonych metodą pomiaru bezpośredniego w terenie.

Ortofotomapa cyfrowa ma szereg zalet istotnych z punktu widzenia leśnictwa:

- jest obrazem rastrowym w jednolitej skali, bez zniekształceń spowodowanych dystorsją obiektywu, czy nachyleniem zdjęć i deniwelacją terenu,
- można ją uzupełnić danymi wektorowymi, rysując bezpośrednio na obrazie,
- pozwala na łatwą aktualizację mapy numerycznej w postaci wektorowej,
- pomiar współrzędnych płaskich na ortofotomapie jest szybki, a dokładność nie zależy od położenia tego punktu na ortoobrazie,
- razem z NMT pozwala na generowanie widoków perspektywicznych.

Ortofotomapa cyfrowa posiada właściwości zarówno mapy jak i zdjęcia i może służyć jako jedna z warstw kartometrycznych w GIS, lub źródło aktualnej informacji o terenie, a więc jako warstwa do aktualizacji starych podkładów mapowych. Może służyć również jako dane do kontroli zmian, np. drzewostanów, a także do celów projektowych.

Wadą ortofotomapy jest degradacja obrazu oryginalnego (zdjęcia) oraz przesunięcia radialne szczegółów sytuacyjnych wystających poza NMT.

W opracowaniach na potrzeby leśnictwa regułą powinno być korzystanie z materiałów już istniejących. Niezbędna jest jednak ocena ich aktualności. Materiały znajdujące się Centralnym Ośrodku Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej, pochodzące z ostatnich projektów mają aktualność 1-3 lat. Większość z nich jest w skali 1:26 000, a część południowo-wschodnia Polski została sfotografowana w skali 1:13 000. Na tych obszarach wykonana jest już w większości ortofotomapa – odpowiednio w skali 1:5000 oraz 1:2000. Aktualna sytuacja jest prezentowana na stronach Ośrodka: <http://www.codgik.waw.pl/>.

### **Dostępny na rynku sprzęt i oprogramowanie fotogrametryczne**

Procedury przetwarzania obrazów lotniczych są realizowane na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych. Są to systemy, składające się ze sprzętu oraz oprogramowania, pozwalające na wykonywanie prac fotogrametrycznych z wykorzystaniem obrazów cyfrowych. Zasadniczym elementem jest odpowiednio wyposażony komputer (o maksymalnie dużej liczbie pamięci operacyjnej i wielkości dysku twardego, dobra karta graficzna) plus duży monitor, np. 21 cali, pozwalający na współpracę z systemem optycznym, w przypadku stereoskopu lub polaryzujących okularów, umożliwiających obserwację stereoskopową. Najistotniejszym jednak elementem stacji jest oprogramowanie, od którego zależą potencjalne możliwości stacji oraz technologia.

Typowa stacja fotogrametryczna pozwala realizować (a także częściowo zautomatyzować) – następujące procedury technologiczne:

- przeprowadzenie orientacji (wewnętrznej, wzajemnej i bezwzględnej),
- pomiar punktów stereogramu i pojedynczego zdjęcia z wykorzystaniem autokorelacji,
- wektoryzację elementów stanowiących treść opracowania (np. mapy),
- automatyczną lub półautomatyczną aerotriangulację,
- automatyczny pomiar danych do numerycznego modelu terenu (NMT lub z *ang.* *DTM*),
- wytwarzanie cyfrowych ortofotomap,
- pozyskiwanie różnych danych do SIP.

Na rynku oprogramowania coraz większą przewagę zaczynają mieć programy realizujące w sposób automatyczny aerotriangulację. Na uwagę zasługuje program ISAT firmy Intergraph oraz Match-AT, obecnie sprzedawany przez firmę INPHO. Programy te pozwalają w sposób automatyczny wykonywać pomiar na zdjęciach elementów orientacji. Szczególnie ważne jest to w przypadku orientacji wzajemnej, gdzie mierzy się te same punkty terenowe nawet na 6 zdjęciach. Warunkiem niezbędnym jest dobra jakość zdjęć.

Współcześnie istnieje wiele metod automatycznego pozyskiwania punktów siatki NMT. Metody te pozwalają na pozyskiwanie punktów siatki głównie w regularnych odstępach, wcześniej zdefiniowanych lub automatycznie proponowanych przez oprogramowanie. NMT pozyskiwany automatycznie wymaga korekt. W zasadzie najlepszą technologią jest ręczne rysowanie linii załamania terenu (*breaklines*, tj. linii szkieletowych), a następnie wygenerowanie siatki o zadanych parametrach. Istnieją również na rynku programy potrafiące dodatkowo zagęścić siatkę automatycznie. Jest to szczególnie istotne w terenach leśnych, gdzie pozyskuje się pikietę na terenie „tam gdzie widać”, a następnie dogęszcza się siatkę automatycznie, w oparciu o te pikietę. Takim programem jest np. 3DXM, działający w środowisku MicroStation.

Oprogramowanie firmy INPHO (OrthoVista) pozwala na automatyczne wyrównanie tonalne bardzo dużych bloków zdjęć (nawet kilkaset). Trwa to niekiedy bardzo długo, lecz



efekty są zadowalające. Oprogramowanie testowane było na dużym obszarze Rumunii, gdzie było bardzo dużo lasów i spełniło oczekiwania. Dodatkową zaletą oprogramowania jest automatyczne kreślenie linii mozaikowania.

Po automatycznych pracach niekiedy występuje konieczność wprowadzenia ręcznych poprawek. Doskonale nadaje się do tego celu program Adobe Photoshop, który pozwala w zasadzie na wszelkie poprawki obrazu, zarówno geometryczne, jak i radiometryczne. Innym, alternatywnym, rozwiązaniem jest zastosowanie Paint ShopPro lub darmowego programu Gimp. Problemem jest zwykle wielkość pliku. Photoshop znakomicie sobie radzi z dużymi plikami – nawet 2 GB.

Aktualnie dostępne są w Polsce niżej wymienione stacje fotogrametryczne (w kolejności alfabetycznej):

- Dephos (dystrybutorem w Polsce jest firma Dephos),
- DVP (dystrybutorem w Polsce jest firma INS),
- Image Station firmy Intergraph,
- Inpho (dystrybutorem w Polsce jest firma ECOGIS),
- PCI Geomatica (dystrybutorem w Polsce jest firma IINETRGIS),
- VSD-AGH (dystrybutor: AGH w Krakowie),
- 3DX (dystrybutor: firma Compass).

Do najbardziej rozpowszechnionych w Polsce należą:

- DEPHOS – produkt krakowskiej firmy Dephos (na dość drogich komponentach: profesjonalna karta graficzna, okulary ciekłokrystaliczne, manipulator),
- 3DX – produkt krakowskiej firmy Compass (nakładka na produkt Bentley – Micro-Station),
- Profesjonalne, ale drogie stacje cyfrowe firm INTERGRAPH, DVP oraz LEICA.

## Zakończenie

W pracach związanych z taksacją drzewostanów i inwentaryzacją zapasu można zaproponować następujący ogólny schemat postępowania:

- wykonanie nalotu fotogrametrycznego,
- konturowe opracowanie zdjęć pod prostymi przyrządami, zapewniającymi stereoskopową obserwację i możliwość wykreślenia granic (obiektu, podziału powierzchniowego, wydzielen, obiektów nie stanowiących wydzielen – kęp, gniazd, luk) na zdjęcie lub jego kopię, ewentualnie na folię. Zaznaczenie miejsc, które z różnych powodów taksator uzna za istotne do oglądu terenowego,
- taksacja kameralna: określenie liczby drzew, wielkości koron, skład gatunkowy, formy pokrycia, zwarcie, wysokość drzewostanu i in.,
- terenowa weryfikacja i uzupełnienie taksacji kameralnej,
- inwentaryzacja zapasu naziemna, ewentualnie kombinowana – na podstawie wyników pomiarów na zdjęciach i terenowych, z wykorzystaniem równań regresji.

W zależności od stopnia zaawansowania technologicznego, wymienione powyżej etapy można modyfikować. Np. podstawę prac mogą stanowić arkusze ortofotomapy wykonanej samodzielnie lub przejętej z powiatowego zasobu geodezyjnego (PODGiK). Taksator powinien mieć także możliwość obserwacji stereoskopowej zdjęć na cyfrowych stacjach foto-

grametrycznych, przynajmniej klasy VSD (Video Stereo Digitizera) – produktu AGH w Krakowie. Wyniki wykonanej przez niego stereodigitalizacji w procesie prac przygotowawczych mogą być później zweryfikowane w terenie i przeniesione do systemu informacji przestrzennej, jako podstawa do opracowania i redakcji numerycznej mapy wektorowej. Już obecnie realnym jest wyposażenie taksatorów w urządzenia umożliwiające edycję mapy wektorowej i obrazów lotniczych w terenie, co może zmienić zasadniczo prace związane z terenową weryfikacją i uzupełnianiem taksacji kameralnej.

Samodzielne wykonywanie ortofotoobrazów i ortofotomap wymaga przygotowania odpowiedniej pracowni, wyposażonej w sprzęt oraz oprogramowanie fotogrametryczne. Pracownia taka powinna posiadać jedną „mocną” stację fotogrametryczną oraz kilka stacji roboczych, pozwalających na równoczesną pracę nad tym samym projektem.

Główna stacja fotogrametryczna powinna zawierać moduły służące do:

- wykonania pomiaru (automatycznego) i wyrównania aerotriangulacji,
- automatycznego generowania numerycznego modelu terenu,
- generowania cyfrowej ortofotomapy oraz automatycznego mozaikowania i wyrównania tonalnego,
- przestrzennej wektoryzacji elementów stanowiących treść opracowania.

Stacje robocze powinny umożliwiać wykonywanie opracowań stereoskopowych.

Niezbędna jest oczywiście odpowiednio przygotowana kadra specjalistów, znających zagadnienia fotogrametryczne oraz specyfikę potrzeb gospodarki leśnej.

### Literatura

- Będkowski K., 2003: Skanowanie laserowe i jego zastosowanie w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki* T. II, z. 4: 33-40.
- Będkowski K., 2005: Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach. *Rozprawy Naukowe i Monografie*, Wyd. SGGW, Warszawa 2005.
- Będkowski K., Adamczyk J., Mikrut S., 2005: Możliwości wykorzystania zdjęć lotniczych w pracach Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej. Ekspertyza (niepublikowana).
- Będkowski K., Piekarski E., 2001: Możliwości wykorzystania zdjęć lotniczych w pomiarach drzewostanów. I Konferencja „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych”, Rogów, 3-5 grudnia (opublikowano na CD).
- Doskocz A., 2003: Ocena dokładności ortofotomapy cyfrowej. *Przegląd Geodezyjny* nr 4.
- Florek-Paszowski R., Węgrzyn Z., Homa G., 1997: Ortofotomapa cyfrowa – wybrane aspekty wytwarzania i zastosowań w Polsce. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 6: 87-96.
- Hildebrandt G., 1992: 100 Jahre forstliche Luftbildaufnahme. Zwei Dokumente aus den Anfängen der forstlichen Luftbildinterpretation. *Bildmessung und Luftbildinterpretation* 37: 48-54.
- Instrukcja urządzania lasu, cz. 1: Instrukcja sporządzenia planu urządzania lasu dla nadleśnictwa. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2003.
- Mozgawa J., Choromański, Zawila-Niedźwiecki, 2001: Potencjalne i praktyczne możliwości wykorzystania teledetekcji w Lasach Państwowych. I Konferencja „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych”, Rogów, 3-5 grudnia (opublikowano na CD).
- Mozgawa J., 2005: Możliwości wykorzystania zdjęć satelitarnych w pracach BULiGL. Ekspertyza, 2005 (niepublikowana).
- Piekarski E., Będkowski K., 1991: Fotografia lotnicza jako źródło informacji o lesie – fotogrametryczna taksacja drzewostanów i inwentaryzacja zapasu. *Metody oceny stanu i zmian zasobów leśnych*, Wyd. SGGW-AR, Warszawa: 105-118.
- Zajączkowski G., Wężyk P., 2003: Techniki teledetekcyjne w inwentaryzacji urządzeniowej. II Krajowa Konferencja „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych”, Rogów, 31 sierpnia – 2 września (opublikowano na CD).

Zajączkowski G., Wężyk P., 2004: Ocena i weryfikacja nowych sposobów pozyskiwania informacji z zakresu inwentaryzacji lasu do planu urządzania lasu oraz SILP. Projekt BLP 259. Zakład Urządzania i Monitoringu Lasu, Instytut Badawczy Leśnictwa w Warszawie (niepublikowane).

### **Summary**

*In the paper discuss possibilities of the use of current photogrammetric techniques in forestry, with special emphasis on digital orthophotography. The paper is a brief summary of a report about possible use of modern techniques in projects performed by the Office of Forest Management and Forest Survey. In the paper, advantages of photogrammetry, achieved products accuracy, sources of data and suggestions concerning the use of photogrammetric methods in forest management were discussed. The paper also contains description of digital photogrammetric stations generally used in Poland and lists other laboratory equipment for performing this kind of projects.*

dr hab. inż. Krzysztof Będkowski  
Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl

dr Joanna Adamczyk  
Joanna.Adamczyk@wl.sggw.pl

dr inż. Sławomir Mikrut  
smikrut@agh.edu.pl