

Piotr Węzyk

TECHNIKI FOTOGRAMETRII CYFROWEJ, GIS ORAZ GPS W BADANIACH NAD PRZESTRZENNĄ DEPOZYCJĄ PYŁÓW WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH NA OBSZARZE LASU WOLSKIEGO W KRAKOWIE.

1. Wstęp

Raporty z ostatnich lat sporządzane przez Instytutu Badawczego Leśnictwa donoszą o alarmującym stanie zdrowotnym ekosystemów leśnych w Polsce. Okazuje się, że tylko 10,4% drzewostanów powyżej 40-tego roku życia nie wykazuje objawów uszkodzeń koron. W klasie pierwszej uszkodzeń (klasa ostrzegawcza) znajduje się około 49,8% powierzchni lasów Polski. Silne uszkodzenia (klasa 2-4) stwierdzono u ponad 39,8% drzew [*Monitoring biologiczny lasów, 1997*].

Jedyną pozostałością w rejonie Krakowa, o w miarę zachowanym naturalnym układzie zbiorowisk roślinnych, jest kompleks główny Lasu Wolskiego [*Dubiel E., 1971*]. Jego stan zdrowotny stale się jednak pogarsza co związane może być ze skażeniem siedlisk leśnych metalami ciężkimi.

O tym jak bardzo środowisko Krakowa podlegało niszczeniu, świadczą dane o emisji Huty im T. Sendzimira, (dawna Huta im. Lenina), która w latach siedemdziesiątych wypuszczała rocznie do atmosfery 104 000 t pyłu rocznie. W roku 1990 wielkość emisji tego zakładu spadła do 1/3 ww. wielkości tj. 35 000 ton [*Gorlach E. i in. 1994*]. Dane za okres ostatnich 10 lat wykazują ciągłą tendencję spadkową emisji zanieczyszczeń pyłowych w woj. krakowskim. Porównując dane z roku 1996 do tych z 1987, zauważamy redukcję pyłów o 84 %, a gazowych zanieczyszczeń o 73% [*Turzański K.P. i in., 1997*].

Wykorzystanie opracowań fotogramaterycznych dla celów leśnictwa i ochrony przyrody wciąż wzrasta [*Pröbsting, 1994*]. Idzie to w parze z rozwojem GIS i zwiększającym się zapotrzebowaniem na szybki dostęp do informacji przestrzennej. Fotogrametria analityczna dostarcza danych cyfrowych, które bez większych problemów dają się implementować dla potrzeb GIS [*Kappas, Grunwald 1993; Hardegen, 1994; Haß, 1994; Kaczyński, 1995; Mansberger, Gelber, Schneider, 1993; Münch, 1994; Orlińska J., Preuss R., 1993*]. Jeszcze bardziej nowoczesnym rozwiązaniem w pozyskiwaniu danych cyfrowych dla leśnictwa są opracowania wykonywane za pomocą fotogrametrii cyfrowej. Istotnym rozwiązaniem może być generowanie ortofotografii cyfrowej, która z powodzeniem może i powinna być stosowana na szeroką skalę w leśnictwie [*Mansberger, 1994; Węzyk, Mansberger 1997*].

Użycie odbiorników GPS w pozyskiwaniu atrybutów obiektów dla baz GIS oraz współrzędnych punktów nawiązania, które również z tym systemem mogą być zintegrowane, staje się powoli praktyką nawet w leśnictwie.

2. Metodyka badań

2.1. Wybór metody monitorowania zanieczyszczeń.

Badaniami nad przestrzennym rozkładem zanieczyszczeń pyłami metali ciężkich i związków siarki w Lesie Wolskim w Krakowie, objęto wierzchnie poziomy genetyczne gleby ze względu na typ gleby i rolę poziomu organicznego w obiegu materii w ekosystemie leśnym.

Do pomiarów przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń wybrano stochastyczną metodę polegającą na pobraniu próbek materiału w regularnie rozmieszczonych oczkach siatki. Do tego celu wykorzystano siatkę powierzchni kołowych zastabilizowanych w 1980 roku w Lesie Wolskim i służących statystyczno-matematycznemu sposobowi inwentaryzacji lasu [Rutkowski B., 1984]. Z siatki tej o oczku 80 x 120 metrów wybrano co drugą powierzchnię na osi N-S oraz co trzecią na osi W-E. Uzyskano w ten sposób w miarę równomierną sieć opróbowania o oczku 240 x 240 metrów. Ogółem wykorzystano i założono 109 powierzchni monitoringowych.

Do analiz na zawartość metali ciężkich oddzielnie pobrano próbki:

- materiału organicznego: tj. wierzchniej warstwy ścioly O_L (liście oraz igły na powierzchniach z kategorii „LAS”) lub traw i roślinności zielnej - na powierzchniach kategorii „NIE LAS”;
- z poziomu próchniczno-mineralnego (A);
- z poziomu przejściowego (A/E_d), a także,
- z poziomu wymycia E_d (ok. 25 cm).

2.2 Prace laboratoryjne

W celu określenia zawartości metali ciężkich, zbliżonej do całkowitej, przyjęto metodę mineralizacji „na mokro”. Materiał roślinny roztwarzano w roztworze stężonego 70% kwasu nadchlorowego ($HClO_4$). W celu przeprowadzenia wszystkich pierwiastków do roztworu, materiał glebowy traktowano mieszaniną 70% kwasu nadchlorowego ($HClO_4$) i stężonego azotowego HNO_3 . Oznaczenie koncentracji : Cd, Cr, Cu, Ni, Fe, Mn, Pb oraz Zn dokonano metodą płomieniowej absorpcji atomowej przy pomocy spektrofotometru Varian Spectr AA-20.

2.3 Prace kameralne

Wyniki analiz chemicznych wprowadzono wstępnie do arkusza kalkulacyjnego Excel (Microsoft), a następnie importowano do innego programu, w którym zaprojektowano relacyjną bazę danych tj. Access (Microsoft). Inne dane opisowe pochodzące z prac terenowych wprowadzono bezpośrednio do formularza bazy danych Access.

W badaniach korelacji pomiędzy rozkładami przestrzennymi analizowanych pierwiastków wykonano przy zastosowaniu gotowych algorytmów modułu GRID (Arc/Info Unix) oraz metody "CORR" w programie SAS.

W opracowaniach fotogrametrycznych (analitycznych i cyfrowych) zostały wykorzystane następujące instrumenty i oprogramowanie: stereoskop lustrzany Aviopret (Wild - Herreburg), autograf analityczny: Leica SD2000 (Leica), autograf cyfrowy: Video

Stereo Digitizer (AGH), SoftCopyStation: Image Station (Intergraph) oraz oprogramowanie: Micro Station (Bentley) i PCI.

Do tworzenia map numerycznych i analiz przestrzennych użyto oprogramowania GIS: PC ArcInfo 3.4 D+ (DOS) oraz PC Arc/Info 3.5.1 (Windows), ArcInfo UNIX ver. 6.0 oraz 7.1.x, a także ArcView (PC i UNIX).

Dodatkowo posłużono się technologią GPS-NAVSTAR tj. użyto odbiorników firmy Corvalis Microtechnology (CMT-Leica) w celu lokalizacji punktów pomiarowych.

Część z tych opracowań i analiz wykonana została przez autora samodzielnie (z wyjątkiem ortofotografii cyfrowej) na urządzeniach w Katedrze Ekologii Lasu A.R. w Krakowie, w Katedrze Planowania i Ochrony Przyrody wydziału Leśnego w Monachium (LMU) oraz Instytucie Miernictwa Teledetekcji i Informacji o Terenie (IVFiL) we Wiedniu (BOKU). Pozostałe (w tym wszystkie analizy chemiczne) wykonane zostały w Katedrze Ekologii Lasu Akademii Rolniczej w Krakowie. Ze względu na czasochłonność niektórych analiz GIS (np. interpolacji), poza stosowaniem stacji roboczej DEC Alpha 255 (Digital), wykorzystano też stację roboczą Silicon Graphic ("kuna") z oprogramowaniem Arc/Info Unix, dostępną poprzez sieć komputerową w Cyfronet-Kraków. Kompozycje mapowe drukowano na ploterze HP DesignJet 750C oraz drukarce CanonBJC620. Część z nich przedstawiono na prezentowanym w czasie sympozjum posterze.

2.4 Opracowania fotogrametryczne zdjęć lotniczych.

W przedstawianej pracy starano się zastosować wszelkie dostępne informacje kartograficzne do zasilania geometrycznej bazy systemu GIS, zarówno te najbardziej aktualne jak i z przeszłości. Takim właśnie źródłem danych o niepodważalnym obiektywizmie są zdjęcia lotnicze. Do badań wykorzystano materiał z lat : 1954, 1991 oraz 1994.

2.4.1. Fotogrametria analityczna.

Fotointerpretacja zdjęć archiwalnych miała na celu inwentaryzację powierzchni leśnych i analizę ich struktury (skład gatunkowy, stopień zwarcia koron, podział powierzchniowy, wiek drzewostanów). Wyniki te były z kolei punktem wyjścia do późniejszych analiz przestrzennych prowadzonych pod kątem zmian wielkości powierzchni użytkowania ziemi w okresie 1953-1991. Zdjęcia panchromatyczne z 1954 roku zakupione z Wojskowego Ośrodka Geodezji i Teledetekcji w Warszawie, wykonane zostały w skali 1:10 000. Posłużono się wtedy kamerą o formacie ramki łowej 18 x 18 cm i stałej obiektywu 210,25 mm. Nalot wykonywany był jesienią w godzinach popołudniowych. W okresie tym większość drzew liściastych utraciła już aparat asymilacyjny (oprócz bardzo wyraźnie widocznych modrzewi z przebarwionymi igłami) przez co widoczna była struktura piętrowa drzewostanu. Dzięki temu oświetlone zostało dno lasu i można było digitalizować przebieg niektórych obiektów liniowych, które na zdjęciach z lat 1991 i 1994 były przykryte przez zwarte korony drzew.

Zdjęcia z roku 1991 były gorszej jakości i wykonane zostały w skali 1:20 000. Ponieważ nalot przeprowadzono w szczycie okresu wegetacji nie można było dokonać fotointerpretacji obiektów leżących bezpośrednio pod koronami drzew. Utrudniało to digitalizację linii oddziałowych przebiegających wzdłuż dróg i jarów.

Opracowania fotogrametryczne zdjęć z lat 1954 oraz 1991 dokonano na autografie analitycznym firmy Leica SD 2000, w Katedrze Planowania Krajobrazu i Ochrony Przyrody na Wydziale Leśnym, Uniwersytetu w Monachium. Prace fotogrametryczne dotyczyły obszaru

około 40 km², pokrytego przez 14 stereoskopowych modeli z roku 1953 (skala 1: 10 000), 4 z roku 1991 (skala 1: 20 000) i 3 z roku 1994 (skala 1:10 000).

Błąd zewnętrznej orientacji modeli wyniósł poniżej 1,3 metra dla współrzędnych „x” i „y” oraz 0,5 metra dla „z”. Te duże błędy spowodowane były słabiej jakości odbitkami stykowymi w postaci diapozytywów oraz utrudnioną fotointerpretacją punktów osnowy. Czasami przenoszono punkty ze zorientowanych modeli z roku 1954 jako nowe punkty nawiązania dla nalotu z 1991 roku, i na odwrót.

Należy jednak podkreślić, iż celem tych prac nie było wykonanie opracowań o najwyższej klasie dokładności, lecz pozyskanie informacji wspomagających wytworzenie numerycznej leśnej mapy gospodarczej. Ta z kolei nie mogła być wykonana z materiałów analogowych (mapy papierowe) gdyż granice administracyjne MPiOZ Las Wolski nie pokrywają się z naturalnymi granicami kompleksów leśnych pomiędzy Górą św. Bronisławy a Kryspinowem.

Położono więc nacisk na rodzaj informacji, a nie na jej absolutną dokładność. Same późniejsze analizy GIS opierały się w głównej mierze na interpolacjach i przestrzennych działaniach na zbiorach rastrowych o wymiarze piksela 10 x 10 metrów.

W pracach fotogrametrycznych koncentrowano się na digitalizacji kompleksów leśnych, a w szczególności na przebiegu: granicy lasu, dróg, ścieżek i polan leśnych oraz budynków (np. zabudowań klasztornych z otaczającymi je murami) i terenu Kopców. Wykonano również opracowanie struktury zwarcia koron drzew w powiązaniu z wiekiem drzewostanów.

W wyniku prac sporządzano różne mapy tematyczne. Skala opracowań była dowolna tzn. w każdym momencie można było edytować jak też drukować mapę w dowolnie przyjętej skali. Opracowania fotogrametryczne obiektów (liniowych, powierzchniowych i punktowych) było bardzo ważne ze względu na ich występowanie na leśnych mapach gospodarczych i tym samym możliwość rewizji przygotowywanej numerycznej mapy gospodarczej.

Edycję map prowadzono w programie typu CAD tj. MicroStation (program pracujący razem z produktem firmy Leica PRO 600 wspomagający autograf analityczny) i eksportowano następnie w formacie DXF do pakietu Arc/Info (ESRI), gdzie obiektom nadawano topologię i przystępowano do analiz z zakresu GIS. Poszczególne opracowania wydrukowano na ploterze na specjalnej folii, którą użyto w następnych etapach prac, jako podkładu dla mapy numerycznej.

2.4.2. Fotogrametria cyfrowa.

Barwne zdjęcia spektrostrefowe wykonane na materiale Kodak Aerochrom 2443 opracowywano na autografie cyfrowym VSD (AGH). Wykonane one zostały w czerwcu 1994, w ramach nalotu fotogrametrycznego dla Zespołu Jurajskich Parków Krajobrazowych. W postaci odbitek oraz zeskanowanych obrazów cyfrowych zakupiono je od IGiK w Warszawie.

Fotointerpretacja gatunków drzew na zdjęciach spektrostrefowych, rejestrujących w jednej z trzech warstw, promieniowanie podczerwone odbijane od obiektów, ma swoje ogromne zalety [Wętyk 1997; Wętyk, Mansberger 1997] w pracach związanych z oceną kondycji zdrowotnej lasu. Stąd zamierzono wykorzystać materiał wykonany w 1994 roku, lecz niestety ze względu na procedury odtajnienia zdjęć lotniczych nie uzyskano wszystkich zamówionych modeli, co uniemożliwiło dokończenie tego opracowania.

Spodziewano się, iż na zdjęciach spektrostrefowych możliwa będzie fotointerpretacja martwych i zamierających drzew na obszarze badań. Niestety, wszystkie drzewa wykazujące objawy zamierania lub te, które obumarły są i były na bieżąco usuwane w ostatnich latach z całego terenu MPiOZ Las Wolski. Te właśnie działania służb leśnych, które należą do ich obowiązku

spowodowały, iż ocena drzewostanów pod kątem stopnia uszkodzenia koron nie mogła zostać przeprowadzona.

Dodatkowo sprawę komplikował fakt niewykonania zaraz po nalocie klucza do fotointerpretacji uszkodzeń koron poszczególnych gatunków drzew. W okresie do 14 dni po wykonaniu nalotu fotogrametrycznego sporządza się taki zestaw przykładów wykonując je w terenie na wybranych polach treningowych.

Zdjęcia wykorzystano jednak do kartowania składu gatunkowego, zasilenia bazy opisującej zwarcie koron drzewostanów i ich strukturę.

Ponieważ pomiędzy rokiem 1991 i 1994 nie nastąpiły żadne większe wylesienia i zalesienia, nie prowadzono dodatkowych prac mających na celu korygowanie przebiegu granic drzewostanów. Drugim argumentem był fakt braku posiadania kompletnych materiałów zdjęciowych, ponieważ nie zostały one w całości odtajnione.

2.4.3. Ortofotografia cyfrowa dla Lasu Wolskiego

Dla prezentowanego projektu użyto 6-ciu zdjęć panchromatycznych o pokryciu stereoskopowym w skali 1:20 000 (rozdzielczość terenowa w granicach 0.5 metra), które przetworzono na obraz cyfrowy za pomocą wysokiej klasy skanera PS1 firmy ZEISS-INTERGRAPH w Instytucie Geodezji, Teledetekcji i Informacji Przestrzennej (IVFL) na Uniwersytecie Rolniczym w Wiedniu. Wielkość piksela przyjęto na poziomie 30 μm .

Automatyczne wygenerowanie cyfrowego modelu terenu (a raczej Cyfrowego Modelu Powierzchni) odbywało się przy zastosowaniu programu MATCH-T firmy INPHO, Stuttgart. Z niewielkich obliczonych automatycznie, względnie domierzonych ręcznie powierzchni, przy użyciu oprogramowania MSM (MicroStation Modeller, Intergraph) wygenerowano cyfrowy model terenu (triangulacja, model TIN - Triangulated Irregular Network). W procesie tym brano pod uwagę digitalizowane wcześniej linie nieciągłości oraz automatycznie pomierzone punkty (w regularnej siatce). W celu lepszej kontroli jakości wyświetlono stereoskopowy obraz rastrowy oraz wektorową sieć trójkątów (TIN), co umożliwiło dalszą korekcję błędów poprzez ręczne pomiary wysokości.

Cały teren opisywanego projektu pokryty jest całkowicie przez trzy kolejne zdjęcia. Generowanie ortofotografii odbywało się przez przekształcanie elementów zdjęcia obejmujących grupy pikseli o wymiarze 8 x 8 z wykorzystaniem interpolacji biliniowej. Ta metoda umożliwia znaczne przyspieszenie procesu przekształcania zdjęć bez straty ich dokładności [Wężyk, Mansberger 1997].

2.5. Geograficzny System Informacyjny dla Lasu Wolskiego

2.5.1. Opracowanie struktury relacyjnych baz danych i ich wypełnienie

Bazy danych oparto na opisowych informacjach zawartych w Planie Urządzenia Gospodarstwa Leśnego, zwanego także operatem. Ich aktualność datuje się na 1991 rok, gdyż sporządza się takie dokumenty co 10 lat.

Każda baza relacyjna została tak zaprojektowana, iż posiada kolumnę o unikatowej nazwie oraz zestaw kodów (user-id) umożliwiających tworzenie relacji z bazą geometryczną. Należy nadmienić, iż niektóre atrybuty obiektów występowały dwa razy lecz pod innymi nazwami. Odnosi się to głównie do powierzchni jednostek kontrolnych, które po procesie digitalizacji map i ich transformacji, wykazywały inną wielkość powierzchni niż podawana w operacie.

Innym przykładem baz relacyjnych były informacje wprowadzone z kołowych powierzchni urzędzeniowych z roku 1989. Posłużyły one wygenerowaniu map klas żywności drzewostanów wg. klasyfikacji opartej na metodzie przyrostu i ubytku miąższości drzewostanów [Rutkowski, 1991a]. Poprzez unikatowy identyfikator możliwe było utworzenie relacji z poszczególnymi punktami siatki monitoringu a także fazami rozwojowymi. Najistotniejszym momentem w implementacji systemu GIS, dla obiektu badań połączenie baz geometrycznych z opisowymi. Bazą geometryczną była w większości przypadków numeryczna mapa gospodarcza Lasu Wolskiego, z której w razie potrzeb generowano inne np. mapę jednostek kontrolnych bądź własności. W bazie geometrycznej znajdowała się również cała sieć punktów monitoringowych. Tworzenie relacji pomiędzy tymi samymi identyfikatorami w bazie opisowej i geometrycznej, dawało możliwość łączenia ze sobą jednocześnie informacji o wielkości skażenia poszczególnymi metalami ciężkimi z ich przestrzenną lokalizacją. Odpowiedzią na zapytania do systemu był obraz na ekranie komputera, który albo zapisywano w postaci kolejnej mapy numerycznej, bądź też używano do wygenerowania kompozycji mapowej i drukowano na ploterze.

2.5.2. Leśna numeryczna mapa gospodarcza dla Lasu Wolskiego

Aby dokonać transformacji map do systemu GIS dla Lasu Wolskiego, należało zastosować inne opracowania celem zdobycia odpowiedniej liczby punktów nawiazania w układzie współrzędnych 1965. Niestety nie udało się pozyskać od odpowiednich służb geodezyjno-kartograficznych Krakowa, współrzędnych punktów granicznych Lasu Wolskiego wykreślonych na mapie gospodarczej.

Wybrano metodę wpasowania map leśnych w inne mapy geodezyjne wykreślone w układzie 1965. W tym celu mapy geodezyjne Krakowa (1:5000) skopiowano na niekurczliwą folię na specjalistycznej kopiarce nie powodującej zniekształceń odbitek. Następnie na specjalnym stole z podświetlanym blatem, przyklejono inną folię z wydrukowanymi wcześniej granicami lasu, niektórymi drogami i ścieżkami oraz punktami charakterystycznymi takimi jak Kopiec im. J. Piłsudskiego lub T. Kościuszki pochodzącymi z opracowania fotogrametrycznego. Bardzo ważną informację na tej folii stanowiła linia przedstawiająca kontury kompleksów leśnych z lat 1954 i 1991. Niestety w niektórych wypadkach, we fragmentach gdzie nastąpił silny rozrost koron drzew lub sukcesja formacji leśnych, nie można było przebiegu tej linii traktować jako granicy własności Lasu Wolskiego. Tak więc pod folię, na której w skali 1:5 000 wydrukowano obiekty z opracowania fotogrametrycznego wsunięto i dopasowano folię ze skopiowaną leśną mapą gospodarczą w tej samej skali (wszystkie mapy w jednolitej skali 1:5000). Ponieważ fragmenty mapy gospodarczej nie zawsze możliwe były do wpasowania (duże zniekształcenia wynikające ze złej jakości oryginału oraz błędami dochodzącymi do 200 metrów !!!), posłużono się trzecią mapą tj. mapą geodezyjną. Na niej znajdowała się większość dróg przebiegających przez las, linie warstwiczne oraz niektóre obiekty ważne przy późniejszej transformacji.

Podział powierzchniowy Lasu Wolskiego pod kątem gospodarczym wykorzystuje w głównej mierze drogi i naturalny przebieg linii terenowych (jary, wąwozy). Stąd pomocnym stało się dopasowanie przebiegu linii oddziałowych do form terenowych i obiektów liniowych (dróg) wykreślanych poprawnie na mapach geodezyjnych. Przerysowanie niektórych linii jak np. ścieżek leśnych przebiegających pod okapem drzewostanu było możliwe tylko z mapy gospodarczej, ponieważ ani na mapach geodezyjnych, ani też na zdjęciach lotniczych nie były one wykreślone bądź możliwe do interpretacji.

W ten sposób w czasie dokonywania złożonej korekcji przebiegu linii oddziałowych, wydzielen, dróg, ścieżek, granic polan itp., wkreślano ją na pierwszą folię leżącą najwyżej. Praca ta odpowiadała pracom edycyjnym z zakresu GIS ale została wykonana ręcznie ze względu na brak możliwości zeskanowania map i pacy z danymi rastrowymi. W późniejszym etapie prac dokonywano jeszcze poprawek całej wykreślonej na nowo mapy poprzez transformowanie jej do nowego układu na podstawie punktów nawiązania pomierzonych przez autora odbiornikami GPS.

Produktem przejściowym była więc mapa gospodarcza w skali 1: 5 000 wykreślona na folii. Aby ułatwić następne prace tj. digitalizację, kreśląc na folii ww. mapę posłużono się tak jak ma to miejsce w technikach GIS atrybutami tworzonych obiektów. Każda linia o określonym znaczeniu (np. linia oddziałowa mająca funkcję drogi leśnej nieutwardzonej) posiadała swój kod liczbowy (np. user-id = 34), a na folii wyróżniała się odpowiednim kolorem bądź kreskowaniem. Ułatwiło to w znacznej mierze proces digitalizacji tej mapy.

Dzięki zastosowaniu kodowania linii, bardzo sprawnie dokonywano selekcji zdigitalizowanych linii poprzez ich atrybuty (w tym wypadku kody) i kopiowano je do nowych warstw edycyjnych. Powstały w ten sposób mapy (warstwy - ang. coverages):

- własności - obejmujące tylko linie łączące punkty graniczne;
- jednostek kontrolnych (oddziałów);
- faz rozwojowych (wydzielen);
- komunikacji (ścieżki, drogi leśne, szlaki zrywkowe, drogi publiczne i inne).

Dalsze prace w module Arcedit polegały na nadaniu poszczególnym mapom (warstwom) topologii w zależności od ich charakteru. Mapy granic administracyjnych (własności), jednostek kontrolnych i faz rozwojowych otrzymały identyfikatory (label) wewnątrz poligonów. Dzięki nim właśnie możliwe stało się w późniejszej fazie prac, dokonanie połączenia bazy geometrycznej z opisową (relacyjną bazą danych) oraz identyfikacja przez użytkownika poszczególnych obiektów.

Specjalnie zaprojektowany do tego celu „klucz kodowania” powierzchni pozwolił na szybkie tworzenie zapytań do systemu i relacji z innymi bazami. Klucz ten składający się z 7 cyfr umożliwił zakodowanie: numeru jednostki kontrolnej, fazy rozwojowej drzewostanu, jej kolejnego numeru w jednostce oraz powierzchni nieleśnych np. polan, parkingu itp. Dla przykładu kod 1240302 - oznaczał jednostkę kontrolną nr 24, fazę rozwojową terminalną (03) o kolejnym numerze 02 (w tej jednostce występowały cztery różne fazy terminalne). Każda tworzona później relacyjna baza danych zawierała kolumnę z identycznymi kodami poligonów dzięki czemu można było utworzyć relację tabelą atrybutów poligonu (cover_name.PAT) poprzez kolumnę (KOD-ID).

Warstwy o charakterze liniowym (komunikacja), zostały odpowiednio zaprojektowane i obiektom w nich występującym przypisano wiele atrybutów poprzez bezpośrednią edycję na ekranie monitora. W ten sposób sporządzono np. sieć szlaków komunikacyjnych, turystycznych, konnych bądź rowerowych. Nie były one jednak wykorzystywane w późniejszych pracach polegających na powiązaniu informacji z operatu urządzeniowego z mapami odnoszącymi się do obiektów o charakterze powierzchniowym (jednostki kontrolne-oddziały, fazy rozwojowe drzewostanów-wydzienia).

Dzięki tym żmudnym pracom wygenerowano w końcu możliwie najdokładniejszą numeryczną mapę gospodarczą, spełniającą rolę bazy geometrycznej wiązanej w późniejszych pracach z wieloma innymi bazami opisowymi w celu generowania efektów zapytań do systemu (np. poszukiwaniu drzewostanów o najmniejszym przyroście zasobności itp.). Błąd transformacji

spowodowany ww. problemami pozyskania punktów nawiazania oraz błędami na mapach leśnych, po końcowej korekcie (transformacji dzięki pomiarom DGPS) oszacowany został na poniżej 1,5 metra.

2.5.3. Cyfrowy Model Terenu

W prezentowanych badaniach, cyfrowy model terenu (powierzchni gruntu) sporządzony został za pomocą modułu TIN, części pakietu Arc/Info ver. 7.x (ESRI). Digitalizacji poddano 6 arkuszy map geodezyjnych (układ 1965) miasta Krakowa sporządzonych w skali 1:5000.

Prowadzono ją bezpośrednio w środowisku Arc/Info (ESRI) w module Arcedit wykorzystując dygityzer ALTEK32 (format A0). Założono, że dla celów projektu wystarczające będzie zdigitalizowanie linii warstwicznych w cięciu 10 metrowym, choć czasami ze względu na bardzo urozmaiconą rzeźbę terenu pozyskiwano warstwicę nawet w 5-cio metrowym cięciu. W celu dokładniejszych interpolacji i uniknięcia zbyt dużej liczby terenów płaskich (tzw. Flat triangle) na powstającym CMT, w miejscach wierzchołków lub na szczytach wzniesień o bardzo łagodnych kulminacjach, wprowadzano ręcznie niewielką linię warstwicową bądź punkt wysokościowy. Użyta opcja uwzględniająca wprowadzone linie nieciągłości (Hard line/Break lines) i pikietki wysokościowe dodatkowo nie pozwalała na wystąpienie błędów interpolacji. Na sam czas generowania CMT, jako linie nieciągłości wprowadzono przebiegi licznych jarów nadając im atrybut wysokości (-9999).

CMT posłużył do wygenerowania nowych informacji bezwzględnie koniecznych w celu testowania hipotez statystycznych o braku wpływu takich zmiennych niezależnych jak: ekspozycja i spadek terenu oraz lokalizacja punktu monitoringu n.p.m. na zróżnicowanie ładunku zanieczyszczeń pyłów metali ciężkich.

Dzięki wygenerowaniu CMT uzyskano także możliwość wizualizacji poprzez różne dostępne techniki np. generowania map cieniowania i oświetlania zboczy (ang. Hillshade)

CMT wykorzystywany był w wielu postaciach w projekcie „Las Wolski”. W zależności od używanych modułów stosowano wektorowy model TIN bądź model rastrowy. Ten ostatni wykonano po konwersji modelu TIN do postaci GRID (rastra) o oczku 10 x 10 metrów. O wielkości komórki CMT zadecydowały interpolacje powierzchni skażeń poszczególnymi polutantami również w oczkach siatki 10 x 10 metrów. W postaci rastrowej (grid) CMT mógł zostać użyty przy tworzeniu map ryzyka w programie ArcView. Tu również wykorzystano go jako tło podświetlające kompozycje mapowe przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń, co nadawało im wyraz 2,5 D.

Drugim modelem jaki wygenerowano przy okazji tworzenia cyfrowej ortofotografii dla Lasu Wolskiego był Cyfrowy Model Powierzchni - CMP [Wętyk P., Mansberger R., 1997]. Różni się on od wyżej opisywanego CMT tym, iż w terenach leśnych o dużym zwarciu koron drzew znaczek pomiarowy autografu cyfrowego umieszczany był automatycznie na powierzchni górnej koron. To powoduje różnice wartości współrzędnej „Z”, która w wypadku CMP może różnić się o ponad 30 metrów (wysokość drzew) od wartości odczytanej z CMT.

2.5.4. Pomiary DGPS wybranych punktów monitoringowych

Punkty monitoringowe nie były zlokalizowane w terenie w regularnej siatce. Ze względu na urozmaiconą rzeźbę terenu oraz prace wielu zespołów zakładających osie tej siatki, pojawiły się w Lesie Wolskim punkty o lokalizacjach obciążonych błędami powyżej 25 metrów. Jeśli punkt taki występował w obszarze o silnych deniwelacjach terenu, istniała

wtedy obawa, iż jego atrybuty odczytywane z CMT będą nieprawidłowe. Wystarczy bowiem niekiedy błąd lokalizacji 10 metrów aby punkt opróbowania „przesunął” się z jednej kategorii spadku bądź ekspozycji do innej. Wynik takich błędów miałby bezpośredni wpływ na obliczenia statystyczne.

Pomiary punktów monitoringowych odbywały się odbiornikiem (MC-GPS, 6 kanałowy, 5 MB RAM, rejestrator z klawiaturą alfanumeryczną) i trwały zwykle około 45-60 minut (sesje 2700- i 3600- pomiarowe, interwał 1 sek.) kiedy na stacji bazowej umieszczano inny PCL5 9400 (12 kanałowy, 4 MB RAM).

Błąd współrzędnych "X,Y" po dokonaniu korekcji różnicowej i transformacji do układu "1965" (program GeoTrans) określono na około 1,0 m, natomiast współrzędna "Z" obarczona była zwykle błędem 1,5 -3 krotnie większym. Ponieważ w większość sesji pomiarowych prowadzono w drzewostanach liściastych o dużym zwarciu koron drzew, jako porę roku wybrano okres jesienno-zimowy. Występowanie na drzewach aparatu asymilacyjnego powoduje w pewnym stopniu pogorszenie odbioru co uwidacznia się współczynnikiem tzw. PDOP. Porównując współrzędne punktu mierzonego pod drzewostanem w fazie bezlistnej i z pełni wykształconym aparatem asymilacyjnym, maksymalne różnice pomiarów osiągały 6-8 metrów dla wszystkich trzech współrzędnych.

Wykonano również próbę nawigowania się do punktów, na których w 1996 roku pobrano materiał do analiz. W tym celu z bazy geometrycznej pozyskano współrzędne „X” i „Y” (po wykonaniu polecenia w warstwie o topologii punktowej - ADDXY) oraz „Z” (ta ostatnia po wykonaniu funkcji TINSPOT dla warstwy o topologii punktowej z CMT). W ten sposób otrzymane współrzędne poddano zamianę na plik tekstowy i wyeksportowano do programu „Geo-Trans”, którego zadaniem było ich przeliczenie na układ WGS84, w którym odbiornik GPS pracuje.

W oprogramowaniu PC-GPS zakupionym razem z odbiornikami, który zwykle stosowano do wykonania korekcji różnicowej, z przygotowanych punktów utworzono marszrutę (ang. Route) oraz specjalny arkusz atrybutów obiektów punktowych (pkt. monitoringowych) oraz liniowych (drogi, ścieżki itp.).

Po wgraniu przygotowanych plików do odbiornika, w terenie rozpoczęto nawigację do wybranych punktów. Odnajdywano je z błędem około 17 metrów na terenie otwartym i około 25 metrów pod drzewostanem. Była to wystarczająca odległość by zauważyć drzewo z wyraźnie oznaczonym numerem powierzchni.

3. Wnioski

Złożoność otaczającego nas środowiska przyrodniczego wymaga od nas przeprowadzania wielu analiz i pozyskiwania licznych informacji w celu podejmowania próby opisu zjawisk zachodzących pod wpływem antropopresji.

Zbieranie danych za pomocą narzędzi oferowanych przez nowoczesne techniki fotogrametryczne, komputerowe systemy GIS i GPS, dla celów badań z zakresu ochrony środowiska i leśnictwa jest sposobem na lepszą, szybszą i pełniejszą diagnozę procesów degradacji środowiska naturalnego.

Literatura

- Dubiel E., 1971, *Aktualny stan roślinności Lasu Wolskiego - Miejskiego Parku w Krakowie*, Chrońmy Przyrodę Ojczyzną, Roczn. 27 (1), PWN:18-26;
- Gorlach E., Gambuś F., Brydak K., 1994, *Zawartość metali ciężkich w glebach i roślinach łąkowych wokół Huty im. Tadeusza Sendzimira*, Acta Agr. et Silv., ser. Agr. XXXII: 13-24;
- Hardegen L., 1994, *Luftbildmessung im Forstwesen - Erfahrungsbericht eines Ingenieurbüros*, Photogrammetrie und Forst, Freiburg;
- Haß T., 1994, *Erschließung Photogrammetrischen Daten und Zusatzdaten für ein GIS-Forst*, Photogrammetrie und Forst, S. 125-143, Freiburg;
- Kaczyński R., 1995, *Mapy cyfrowe ze zdjęć satelitarnych i lotniczych*, Archiwum Fotogrametrii Kartografii i Teledetekcji, vol. 3, s. 61-66 Kraków;
- Kappas M., Grunwald B., 1993, *Reliefanalyse unter Zuhilfenahme von digitaler Luftbildanalyse am Stereocord G3 (Zeiss) und dem GIS-System SPANS*, Salzburger Geographische Materialien, Heft 20, Salzburg;
- Mansberger R., 1994, *Digitale Photogrammetrie, Anwendungen in der Forstwirtschaft*, Photogrammetrie und Forst, Freiburg;
- Mansberger R., Gelber P., Schneider W., 1993, *Forest decline monitoring using interactive digitizing of tree crown from aerial CIR - Photographs*, 25th International Symposium. Remote Sensing and Global Environment Change, Graz;
- Monitoring biologiczny lasów 1996, Raport o stanie lasów Polski*, Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa;
- Münch D., 1994, *Photogrammetrisch kartierte Waldstrukturen als Eingangsgrößen für Ökosystemmodellierung*, Photogrammetrie und Forst, Freiburg;
- Orlińska J., Preuss R., 1993, *Photogrammetry in GIS technologies, GIS for Environment*, Conference on GIS in Environmental Studies, Kraków;
- Pröbsting T., 1994, *Einsatz von Luftbildern in der Forstwirtschaft in Europa - Ein Überblick*, Photogrammetrie und Forst, Freiburg;
- Rutkowski B., 1984, *Eksperymentalne urządzenie lasów komunalnych Miejskiego Parku i Ogrodu Zoologicznego w Krakowie*, Sylwan, 10:1-12;
- Turzański K.P., Wertz J., 1997, *Raport o stanie środowiska w województwie krakowskim w 1996 roku*, PIOŚ, WIOŚ - Kraków, Wydział Ochrony Środowiska U.W. w Krakowie, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Kraków;
- Wężyk P., 1997, *Leśnictwo i ochrona przyrody, Kompleksowe wykorzystanie informacji ze zdjęć lotniczych, Część III, Szczegółowe aplikacje zdjęć lotniczych w różnych dziedzinach gospodarki narodowej*, Skrypt, Kraków-Sieradz;
- Wężyk P., Mansberger R., 1997, *Przykład wykorzystania ortofotografii cyfrowej i systemu GIS w leśnictwie, Nowoczesna ortofotografia i GIS dla potrzeb gospodarki terenami*, Arch. Fotogr. Kartogr. i Teledetekcji, Vol. 6, Kraków: 133-151.