

Zmiany w zasięgu pięter roślinnych w Tatrach w latach 1977–1999¹

Changes of the limits associations of vegetation in the Tatra Mountain in the during 1977–1999

Aleksandra PATEREK, Jan R. OŁĘDZKI

The use of remote sensing and geographical information systems (GIS) in the monitoring of plant cover in mountain areas allows to obtain fast and regular information on the types and limits of such cover. Owing to an analysis of colour aerial photographs of the Tatra National Park made in 1999, a map was prepared which shows the limits of such plant communities as forests, dwarf mountain pine (*Pinus montana*), mountain meadows and clearings, were marked; also, the distribution of lakes was shown, and a general category of 'unforested land' was distinguished. A comparison with a similar map from 1977 allowed to evaluate changes in the surface areas covered by individual types of cover over this 22-year period, and show the increase (or decrease) in the upper forest of dwarf mountain pine limits. Using the ArcView 3.3 software, the surface areas of different cover types were evaluated for the years in question, the results of changes in the surface areas were compared, and a map was prepared to show where and what kinds of changes in the plant

cover occurred during these 22 years. The Numerical Terrain Model made it possible to determine the upper limit of the dwarf mountain pine layer and the forest layer, and to calculate the actual surface areas covered by a given category.

In the years 1977–1999, the area covered by forests increased by 9.24%, and by dwarf mountain pine – by 25.37%. At the same time, the area covered by meadows and clearing diminished by 32.59%; unforested areas – by 19.52%, and lakes – by 3.05%.

It has to be borne in mind, however, that a detailed quantitative analysis was conducted using different kinds of photographs: black and white aerial photographs from 1977 and colour photographs from 1999, taken in different scales. They were interpreted by different persons, which could affect the accuracy of the interpretation. Maps were also prepared using different techniques. Nonetheless, the findings produced show general tendencies of environmental change in the Tatra National Park.

Wstęp

Przekształcenia pokrycia terenu mogą świadczyć o zmianach dokonujących się w środowisku, naturalnych lub wywołanych przez człowieka. Zanim powołano Tatrzański Park Narodowy, przez kilkaset lat gospodarka człowieka miała znaczący, zdecydowanie negatywny wpływ na kształt szaty roślinnej tych terenów. Hutnictwo i górnictwo, wypas owiec i bydła, w końcu rabunkowa wręcz gospodarka leśna doprowadziły do znacznych zmian zarówno krajobrazowych jak i gatunkowych w środowisku naturalnym Tatr. Od 1954 roku, kiedy to powstał TPN, obejmujący swym obszarem najbardziej znaczącą, cenną i reprezentatywną pod względem przyrodniczym część Tatr Polskich, wszelkie działania na jego terenie podporządkowane są ochronie przyrody (Mirek, 1996) oraz przywróceniu środowiska do stanu bli-

skiego pierwotnej harmonii. Istotnym narzędziem wspomagającym podejmowane działania ochronne jest monitorowanie zmian zachodzących w przyrodzie Tatr. Narzędzie to przydatne jest w zgodnym z zasadami zrównoważonego rozwoju planowaniu gospodarki leśnej czy inwestycji służących turystyce.

Celem niniejszej pracy jest wykonanie ilościowej analizy zmian zasięgu badanych pięter roślinnych na wybranym terenie Tatrzańskiego Parku Narodowego oraz pokazanie zagrożeń i ewentualnych korzyści związanych z kierunkiem tych zmian w szacie roślinnej. W pracy podjęto także temat wykorzystania i przydatności teledetekcji i systemów informacji geograficznej w monitorowaniu i analizowaniu pokrycia roślinnością terenów górskich. Metody te są powszechnie stosowane w badaniach środowiska przyrodniczego, zauważalny jest także ich ciągły i bardzo szybki rozwój.

Badania obejmowały interpretację zdjęć lotniczych, wektoryzację ortofotomapy oraz mapy zasięgu pięter roślinnych z roku 1977. Porównano otrzymane cyfrowe mapy dla lat 1977 oraz 1999, a następnie przeanalizowano

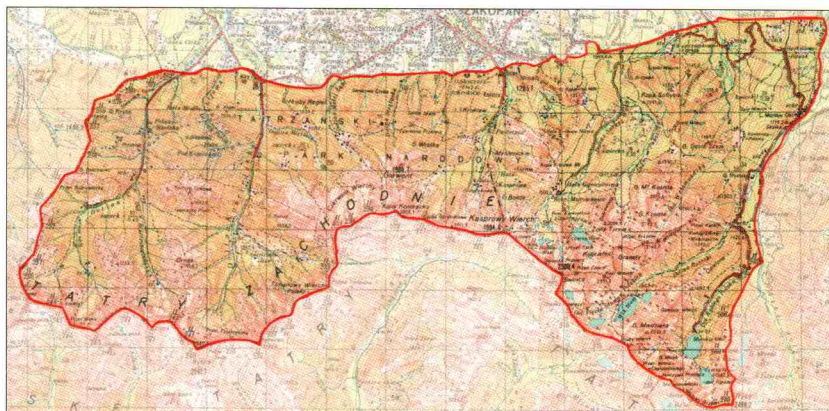
* Artykuł ten powstał na podstawie materiałów zawartych w pracy magisterskiej A. Paterek pt. *Zmiany zasięgów pięter roślinnych w Tatrach w latach 1977–2000 w świetle danych teledetekcyjnych.*

różnice występujące między nimi: liczbę poligonów, wielkość powierzchni poszczególnych pięter, wysokość zasięgu górnej granicy lasów i kosodrzewiny. Wzięto także pod uwagę różnice między powierzchnią planimetryczną, pozyskiwaną bezpośrednio z mapy, a rzeczywistą i obliczono faktyczną powierzchnię zajmowaną przez poszczególne piętra roślinne w roku 1999. Końcowym etapem badań było stworzenie mapy obrazującej przejście poszczególnych wydzielen w inne na danym terenie i analiza tych zmian.

Tatry ze względu na swoją unikalną, w skali tego regionu Europy, budowę i szatę roślinną, są stałym obiektem badań naukowców wielu dziedzin. Jednak tylko nieliczni zajmują się monitoringiem zmian zachodzących w szacie roślinnej tych gór. Badania zmian w pokryciu terenu TPN dla lat 1934–1977 na podstawie zdjęć lotniczych i naziemnych wykonała w 1986 roku na Uniwersytecie Warszawskim Elżbieta Bielecka. Mapy pokrycia terenu dla roku 1977 wykonane zostały na podstawie czarno-białych zdjęć lotniczych. Ponieważ trudno było odróżnić na tego typu zdjęciach piętro łąk alpejskich od porośniętych mchem, zielonkawych w rzeczywistości skał piętra turniowego, E. Bielecka (1986) wyrysowała tylko zasięg pięter reglowych oraz kosodrzewiny. Analiza stereoskopowa polegała więc na rozróżnianiu poszczególnych elementów szaty roślinnej na podstawie różnic w fototonie, strukturze czy teksturze obiektów. Poza wykonaniem mapy zasięgu wybranych pięter roślinnych autorka zwróciła szczególną uwagę na czynniki degradujące drzewostany, a w szczególności wiatr, który jest powodem znacznych ubytków w szacie leśnej tych terenów. Niniejsza praca jest swoistą kontynuacją pracy wykonanej przez E. Bielecką. Jednak metodyka jej wykonania różni się znacznie, ze względu na inną jakość materiałów źródłowych oraz dostępność nowych technologii umożliwiających szybszą i bardziej dokładną analizę danych oraz cyfrową prezentację wyników badań.

Granice obszaru badań

Obszar badawczy niniejszej pracy obejmuje jedynie Tatry Polskie, całkowicie objęte ochroną w formie Tatrzańskiego Parku Narodowego, którego powierzchnia wynosi 21 164 ha, z czego na obszar właściwych Tatr przypada 17 500 ha, pozostałe 3664 ha na Rów Podtatrzański i Pogórze Spisko–Gubałowskie. TPN obejmuje jedynie północne stoki Tatr Zachodnich i Wysokich, natomiast Tatry Bielskie znajdują się w całości na terytorium Słowacji. W dalszej części pracy wszelkie charakterystyki czynników biotycznych i abiotycznych będą odnosić się do środowiska części Tatrzańskiego Parku Narodowego, obejmującego teren o powierzchni 19 840 ha. Z obszaru TPN wyłączono północne fragmenty TPN bez Działu Poponińskiego, Hurkotnego Działu i fragmentu Kotliny Białczańskiej (ryc. 1).



Ryc. 1. Tatry. Granice terenu objętego badaniami.

Fig. 1. The Tatras. boundaries of the research area.

Materiały wykorzystywane w badaniach

Zdjęcia lotnicze

Podstawowy materiał źródłowy, zdjęcia lotnicze, zostały wykonane we wrześniu 1999 r. dzięki funduszom programu PHARE. Są to zdjęcia kolorowe, w skali 1:26 000, obejmujące swym zasięgiem cały Tatrzański Park Narodowy. W niniejszej pracy wykorzystano 15 zdjęć pokrywających TPN. Posłużyły one do stworzenia uproszczonej ortofotomapy, na podstawie której zanalizowano zasięg wybranych pięter roślinnych w roku 1999. Przykładowe zdjęcie pokazano na ryc. 2.

Numeryczny Model Terenu

Numeryczny model terenu (NMT) został wykonany i udostępniony przez Agatę Goździk. Obejmuje (ryc. 3)



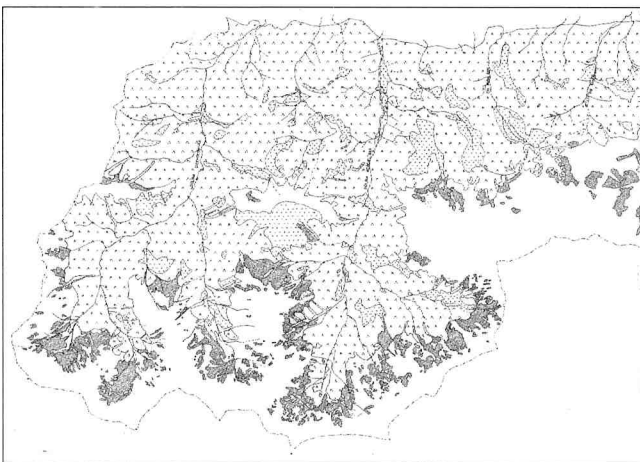
Ryc. 2. Przykład barwnego zdjęcia lotniczego wykorzystanego w badaniach. Rejon Doliny Gąsienicowej i Doliny Pięciu Stawów (za zgodą CODGiK).

Fig. 2. Example of a colour satellite image used in the research. Area of the Gąsienicowa Valley (Dolina Gąsienicowa) and the Five Ponds Valley (Dolina Pięciu Stawów Polskich) (with permission from CODGiK).



Ryc. 3. Numeryczny Model Terenu Tatrzańskiego Parku Narodowego. Udobrytniony przez A. Goździk.

Fig. 3. Numerical Terrain Model. Tatra National Park (Courtesy of A. Goździk).



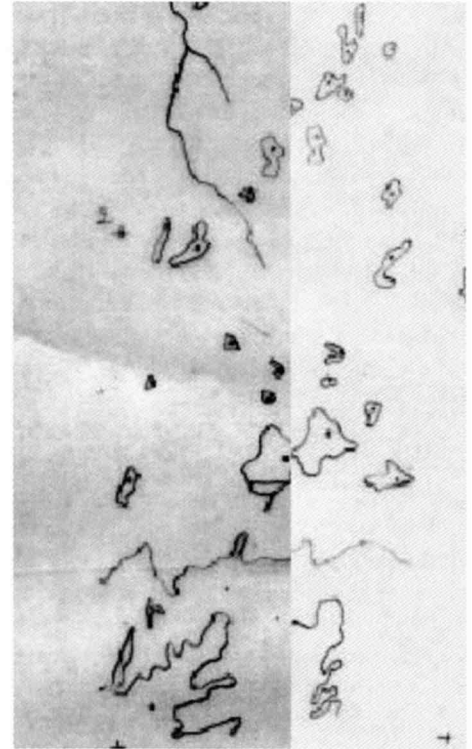
Ryc. 4. Zasięg pięter roślinnych w Tatrach w roku 1977. Udobrytniony przez Zakład Teledetekcji Środowiska WGiSR UW.

Fig. 4. Vegetation layers boundaries in the Tatras in 1977. (Courtesy of the Department of Remote Sensing of the Environment, Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University).

on praktycznie obszar całego Tatrzańskiego Parku Narodowego, poza północnymi obszarami Pogórza Bukowskiego. Został on wykonany za pomocą metody kartograficznej, polegającej na wektoryzacji i edycji izohips bezpośrednio na mapach topograficznych lub podkładach poziomicowych. Do wykonania NMT wykorzystano mapy topograficzne w skali 1:10 000, w układzie „1992”, w odwzorowaniu Gaussa–Krügera, elipsoida GRS-80. Jest to NMT typu GRID (mapa rastrowa), składający się z siatki komórek, z których każda zawiera liczbę, którą można interpretować jako średnią wysokość terenu nad poziomem morza dla obszaru danej komórki. W celu uzyskania jednolitości układów kartograficznych w niniejszej pracy, NMT poddano transformacji układu z „1992” na „1942”.

NMT został wykorzystany:

- do geometryzacji analizowanych zdjęć lotniczych jako źródło danych wysokościowych wybieranych w czasie rektyfikacji punktów;
- podczas obliczania powierzchni rzeczywistej poligonów na powstałych mapach zasięgu pięter roślinnych;
- do wyznaczenia wysokości górnej granicy zasięgu piętra kosodrzewiny i piętra lasów.



Ryc. 5. Przykład wzajemnego niedopasowania dwóch zgeometryzowanych fragmentów kalek interpretacyjnych.

Fig. 5. Example of mutual mismatches between two geometrised fragments of overlay interpretations.

Materiały kartograficzne

Głównym materiałem kartograficznym wykorzystanym w niniejszej pracy były dwa arkusze mapy zasięgu pięter roślinnych w Tatrach dla roku 1977 (ryc. 4), wykonane przez E. Bielecką. Mapa w skali 1:20 000 powstała w wyniku stereoskopowej interpretacji zdjęć lotniczych za pomocą instrumentu *Radial Line Plotter*, który umożliwia mechaniczne przetwarzanie obrazu lotniczego wykonanego w rzucie środkowym na rzut ortogonalny.

W pracy wykorzystana została także mapa w skali 1:50 000 w układzie „1992” transformowana do układu 1942. Na podstawie tego podkładu kartograficznego zostały zgeometryzowane zarówno arkusze mapy z roku 1977 oraz zdjęcia lotnicze. Mapa ta posłużyła także jako podkład do wektoryzacji sieci rzecznej badanego obszaru.

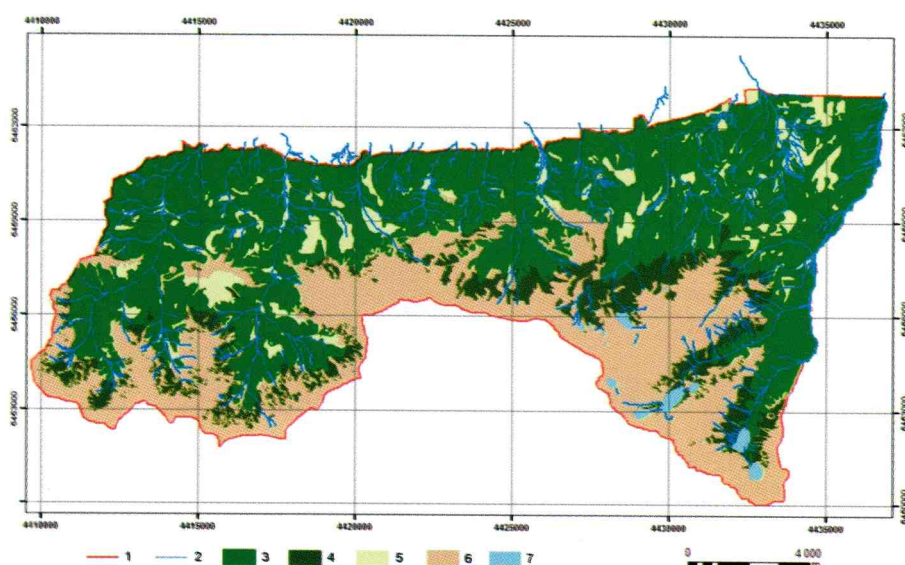
Analizy zdjęć lotniczych

Podczas analizy stereoskopowej zdjęć lotniczych na 15 kalkach wyrysowano zasięg wybranych pięter roślinnych. Następnie zeskanowano i zrektifikowano powstałe kalki w programie ERDAS IMAGINE. Jednak efekt był niezadowalający.

Kontury wykreślone na sąsiednich kalkach interpretacyjnych nie łączyły się płynnie (ryc. 5). W związku z tym dalszą interpretację zasięgów pięter roślinnych przeprowadzono na podstawie uproszczonej ortofotomapy, powstałej przez zgeometryzowanie i zmozaikowanie zdjęć lotniczych (ryc. 6). Na podkładzie tym wyznaczono zasięgi poszczególnych płatów roślinności w roku 1999,



Ryc. 6. Uproszczona ortofotomapa Tatrzańskiego Parku Narodowego.
Fig. 6. Simplified orthophotomap of the Tatra National Park.



Ryc. 7. Zdygitalizowana mapa zasięgów badanych pięter roślinnych w Tatrach, według stanu z 1977 r.: 1 – granica obszaru badań, 2 – cieki, 3 – lasy, 4 – kosodrzewina, 5 – łąki górskie i polany śródleśne, 6 – obszary nie zalesione, 7 – jeziora.

Fig. 7. Digitalised map of the vegetation layers boundaries in the Tatras, based on the 1977 situation: 1 – limit of research area, 2 – streams and rivers, 3 – forests, 4 – dwarf mountain pine, 5 – mountain meadows and clearing, 6 – unforested areas, 7 – lakes.

które poddano wektoryzacji w programie ArcView 3.3/. W programie tym zwektoryzowano również zasięgi roślinności wyznaczone na mapach przedstawiających sytuację z roku 1977.

Mapy zasięgu badanych pięter roślinnych w latach 1977 i 1999

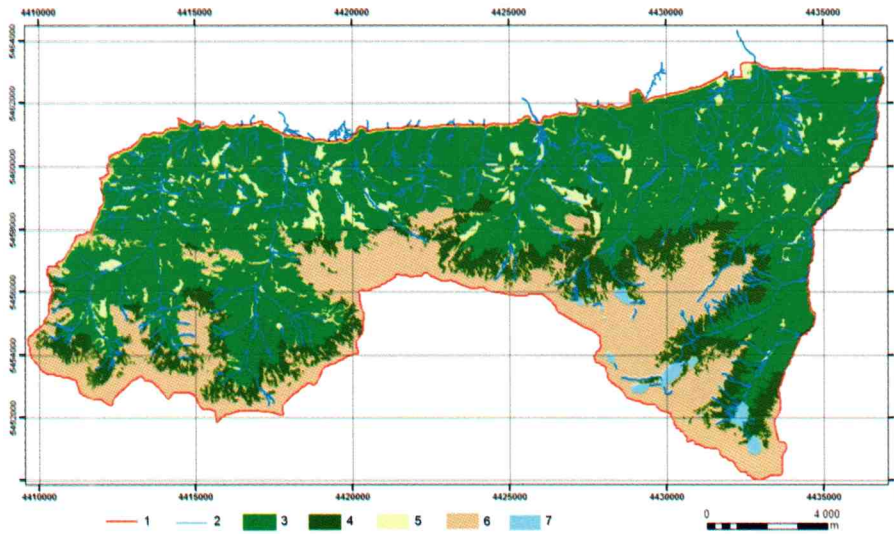
W celu wyznaczenia zmian w zasięgu badanych pięter roślinnych konieczne było stworzenie dwóch map obrazujących stan wybranych pięter roślinnych w roku 1977 oraz w 1999. Aby obydwie mapy mogły być porównane w formie cyfrowej, musiały zostać sprowadzone do tego samego układu współrzędnych oraz przedstawiać te same klasy pokrycia terenu i ten sam obszar TPN. Każda z map powstała na podstawie innych danych źródłowych, przez co metodyka ich wykonania była różna.

Cyfrowa mapa zasięgu pięter roślinnych w roku 1977 powstała na podstawie analogowej mapy wykonanej przez E. Bielecką. Mapa ta została zeskanowana, a następnie zgeometryzowana i poddana mozaikowaniu w programie ERDAS IMAGE. W efekcie uzyskano mapę rastrową, którą poddano wektoryzacji. Ukazuje ona zasięgi pięter roślinnych w Tatrach w roku 1977 (ryc. 7). Na mapie tej wyróżniono cztery klasy pokrycia terenu: 1 – lasy; 2 – kosodrzewinę; 3 – łąki i polany; 4 – jeziora. Pozostałe tereny nie zostały sklasyfikowane, jednak w celu późniejszego porównywania map z obu okresów oznaczono je jako „obszary niezalesione”. Sytuację z roku 1999 przedstawia ryc. 8. Klasa „lasy” obejmuje zarówno piętro regla dolnego jak i górnego wraz z młodnikami. Granica tej klasy została wyznaczona tak, aby włączyć do niej także niezbyt gęsto porośnięte tereny na górnej granicy regla górnego. Klasa „kosodrzewina” uwzględnia tylko piętro kosodrzewiny wraz z rzadkimi jej kępami położonymi w strefie przejściowej pomiędzy piętrzem kosodrzewiny a piętrzem hal. Klasa „łąki i polany” obejmuje zarówno łąki w okolicach strumieni jak i wyraźnie odznaczające się polany w wyższych partiach gór. Klasa „jeziora” dotyczy wszystkich zbiorników wodnych wyróżnionych na podstawie interpretacji ortofotomapy. W obrębie klasy „obszary niezalesione” znalazły się zarówno tereny skalne, jak i powierzchnie zmienione przez człowieka: parkingi czy duże schroniska.

Tabela 1. Liczba wydzielonych poligonów poszczególnych kategorii pokrycia terenu na mapach dla lat: 1977 i 1999.

Table 1. Number of distinguished polygons of individual land cover categories on maps from 1977 and 1999.

Rok Year	Liczba poligonów Number of polygons					
	Ogółem On the whole	Lasy Forests	Kosodrzewina Dwarf of mountain pine	Łąki górskie i polany Mountain meadows and clearings	Jeziora Lakes	Obszary niezalesione Unforested areas
1977	495	21	253	160	27	170
1999	649	25	186	287	27	124



Ryc. 8. Cyfrowa mapa zasięgów badanych pięter roślinnych w Tatrach, według stanu z roku 1999: 1 – granica obszaru badań, 2 – ciek i rzeki, 3 – lasy, 4 – kosodrzewina, 5 – łąki górskie i polany śródleśne, 6 – obszary niezalesione, 7 – jeziora.

Fig. 8. Digital map of the vegetation layers boundaries in the Tatras, based on the 1999 situation: 1 – limit of research area, 2 – streams and rivers, 3 – forests, 4 – dwarf mountain pine, 5 – mountain meadows and clearing, 6 – unforested areas, 7 – lakes.

Analiza zasięgów wyróżnionych klas pokrycia terenu w latach 1977–1999

Analiza ilościowa poligonów

Powstałe mapy wektorowe różnią się między sobą stopniem generalizacji oraz liczbą poligonów. Na podstawie prostej analizy statystycznej ilości poligonów poszczególnych wydzieleni (tab. 1) widać, że na mapie przedstawiającej stan z roku 1999 wyróżniono o 150 poligonów więcej niż na mapie z roku 1977.

Świadczyć to może o większej generalizacji mapy z roku 1977. Jednak po podzieleniu ogólnej liczby poligonów na poszczególne klasy okazało się, że liczba wydzieleni „kosodrzewiny” i „obszarów niezalesionych” jest większa na mapie 1977 niż 1999. Przestrzenne rozmieszczenie płatów kosodrzewiny charakteryzuje się dużą liczbą małych skupisk roślinności w górnej partii tego piętra.

Jednak przy wektoryzacji uproszczonej ortofotomapy przyjęto, że poligony tej samej klasy oddalone od siebie o mniej niż 15 m będą łączone w większe poligony, natomiast na mapie z roku 1977 wyznaczono nawet bardzo małe poligony oddalone od siebie o mniej niż 15 m (ryc. 9).

Różnica w liczbie poligonów charakteryzujących obszary niezalesione (choć mniejsza niż w przypadku piętra kosodrzewiny) także wynika z łączenia na mapie z roku 1999 mniejszych poligonów w jeden większy. Mapa dla roku 1977 powstała na podstawie czarno-białych zdjęć lotniczych, na których trudno było miejscami odróżnić skały od łąk i najprawdopodobniej takie obszary zostały niesklasyfikowane. Natomiast interpretacja kolorowej ortofotomapy dała dużo większe możliwości wizualnej klasyfikacji tych terenów.

Znacznie większa liczba poligonów klasy „łąk i polan” w roku 1999 wynika z bardziej dokładnej analizy zdjęć lotniczych i mniejszej generalizacji niż to było w przypadku mapy przedstawiającej sytuację w roku 1977 (ryc. 10).

Mapy różnią się też dokładnością w wyznaczaniu górnych granic badanych pięter roślinnych. Szczególnie widać to na przykładzie kosodrzewiny. Górna granica jej

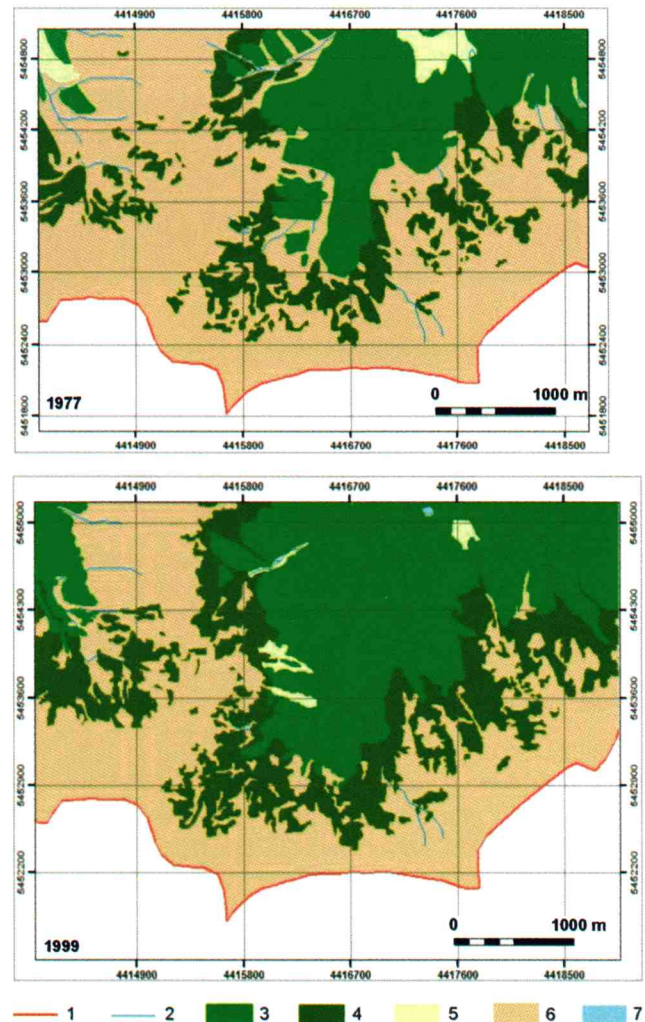
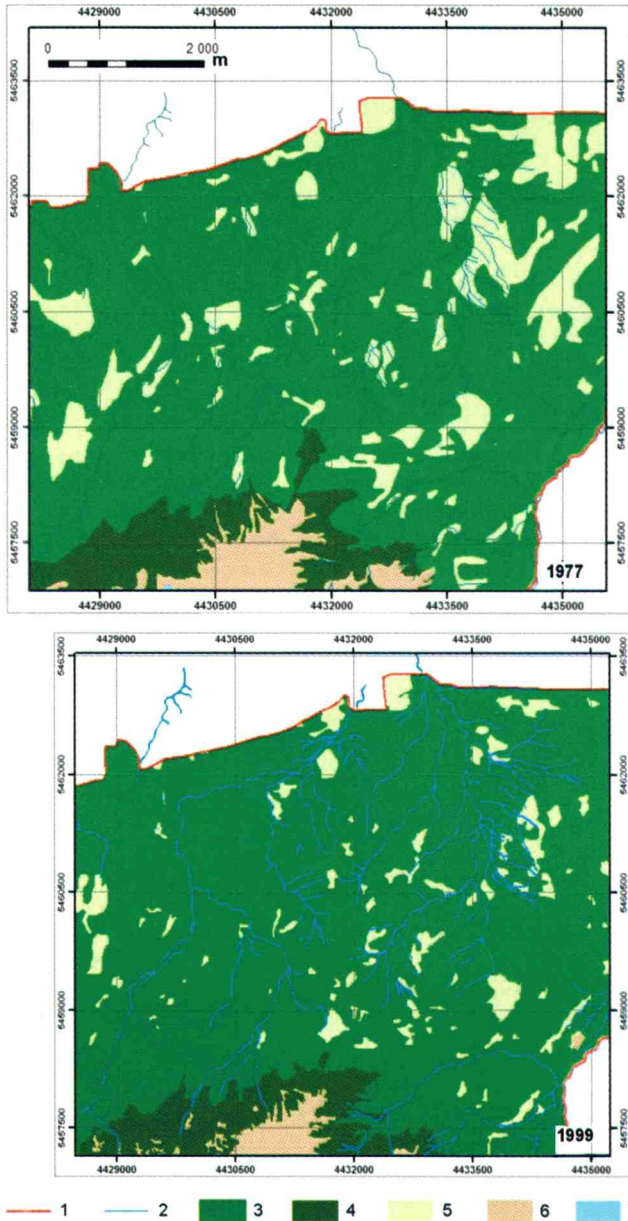


Fig. 9. Różnice w wyznaczaniu zasięgów poszczególnych płatów kosodrzewiny na mapach z lat 1977 i 1999: 1 – granica obszaru badań, 2 – ciek i rzeki, 3 – lasy, 4 – kosodrzewina, 5 – łąki górskie i polany śródleśne, 6 – obszary niezalesione, 7 – jeziora.

Fig. 9. Differences in delimiting the boundaries of individual dwarf mountain pine (*Pinus montana*) patches on maps from 1977 and 1999: 1 – limit of research area, 2 – streams and rivers, 3 – forests, 4 – dwarf mountain pine, 5 – mountain meadows and clearing, 6 – unforested areas, 7 – lakes.

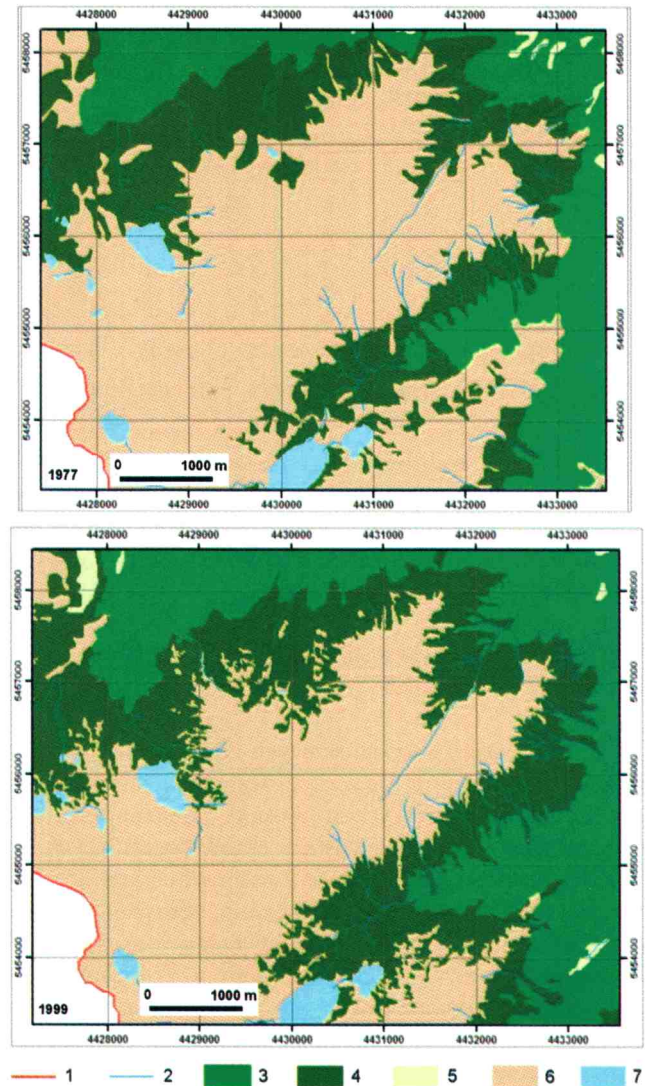


Ryc. 10. Różnice w wyznaczaniu zasięgów poszczególnych płatów łąk i polan śródleśnych na mapach z lat 1977 i 1999: 1 – granica obszaru badań, 2 – cieki, 3 – lasy, 4 – kosodrzewina, 5 – łąki górskie i polany śródleśne, 6 – obszary niezalesione, 7 – jeziora.

Fig. 10. Differences in delimiting the boundaries of individual meadow patches and clearings on maps from 1977 and 1999: 1 – limit of research area, 2 – streams and rivers, 3 – forests, 4 – dwarf mountain pine, 5 – mountain meadows and clearing, 6 – unforested areas, 7 – lakes.

występowania na mapie z roku 1977 jest bardziej gładka, mniej pofałdowana niż na mapie dla roku 1999 (ryc. 11).

Wyżej opisane różnice wynikają głównie z innej metodyki wykonywania map. Bezpośrednia wektoryzacja uproszczonej ortofotomapy, możliwość dokładnego zbliżenia na monitorze wybranego fragmentu terenu, regulacji parametrów narzędzi służących do wektoryzacji, znacznie zwiększają możliwość dokładnego wyznaczenia granic obiektów interpretowanych płatów roślinnych.



Ryc. 11. Różnice w wyznaczaniu górnej granicy lasu i kosodrzewiny na mapach z lat 1977 i 1999: 1 – granica obszaru badań, 2 – cieki, 3 – lasy, 4 – kosodrzewina, 5 – łąki górskie i polany śródleśne, 6 – obszary niezalesione, 7 – jeziora.

Fig. 11. Differences in delimiting the boundaries of the upper tree limits and individual dwarf mountain pine (*Pinus montana*) limits on maps from 1977 and 1999: 1 – limit of research area, 2 – streams and rivers, 3 – forests, 4 – dwarf mountain pine, 5 – mountain meadows and clearing, 6 – unforested areas, 7 – lakes.

Analiza powierzchni planimetrycznej badanych wydziałów

Powierzchnia badanego terenu, która wynosi 19 840 ha, jak i poszczególnych klas została obliczona w programie ArcView 3.3 (tab. 2). Jest to powierzchnia planimetryczna, nie uwzględniająca deniwelacji terenu. Oznacza to, że powierzchnie niektórych terenów, w szczególności tych znajdujących się w wyższych partiach gór, gdzie występują duże powierzchnie stromych stoków, jest w rzeczywistości większa niż powierzchnia obliczona na mapie.

Z analizy tabeli 2 wynika, że znacznie zwiększyła się powierzchnia lasów, czyli regła dolnego i górnego oraz kosodrzewiny, natomiast zmniejszyła powierzchnia łąk i polan oraz obszarów sklasyfikowanych jako niezalesione.

Tabela 2. Powierzchnia planimetryczna wyróżnionych kategorii pokrycia terenu w latach 1977 i 1999.

Table 2. Planimetric surface area of the distinguished land cover categories in 1977 and 1999.

Rok Year	Powierzchnia planimetryczna [ha] Planimetric area [ha]				
	Lasy Forests	Kosodrzewina Dwarf of mountain pine	Łąki górskie i polany Mountain meadows and clearings	Jeziora Lakes	Obszary niezalesione Unforested areas
1977	10503,12	1993,72	1357,27	144,96	5840,65
1999	11473,89	2499,72	1023,64	140,66	4703,24

Świadczy to o wzroście lesistości w ciągu 22 lat. Można stwierdzić, że obszary niezalesione straciły swoją powierzchnię na rzecz piętra kosodrzewiny oraz lasów. Podobnie łąki, znajdujące się na wysokości pięter reglowych, zostały w części porośnięte lasem.

Wyliczenie rzeczywistej powierzchni badanych wydziałów

W większości prac naukowych zajmujących się problemem powierzchni roślinności wyliczana jest tylko powierzchnia planimetryczna. Jednak powierzchnia planimetryczna obszarów górskich, charakteryzujących się dużymi deniwelacjami, różni się znacząco od powierzchni rzeczywistej. Tereny bardziej strome, widoczne na zdjęciach jako niewielkie obszary, w rzeczywistości mogą charakteryzować się dużą powierzchnią. Poznanie prawdziwych powierzchni pokrytych roślinnością może być przydatne w szeregu badań naukowych czy planowaniu gospodarki leśnej. Z tego względu postanowiono pokazać różnice między powierzchnią obliczaną bezpośrednio z mapy a rzeczywistą, wyliczoną na podstawie danych zawartych w numerycznym modelu terenu. Do obliczenia powierzchni rzeczywistej wykorzystano rozszerzenie *Surface Areas and Ratios from Elevation Grid* programu ArcView (Jenness, 2004). Poniżej przedstawiono opis algorytmów zastosowanych w tej aplikacji.

Rzeczywista powierzchnia każdej komórki mapy rastrowej uzyskiwana jest na podstawie ośmiu trójkątów, które powstają poprzez połączenie środka bieżącej komórki ze środkami komórek sąsiednich, z których pobierana jest informacja o ich wysokościach (ryc. 12).

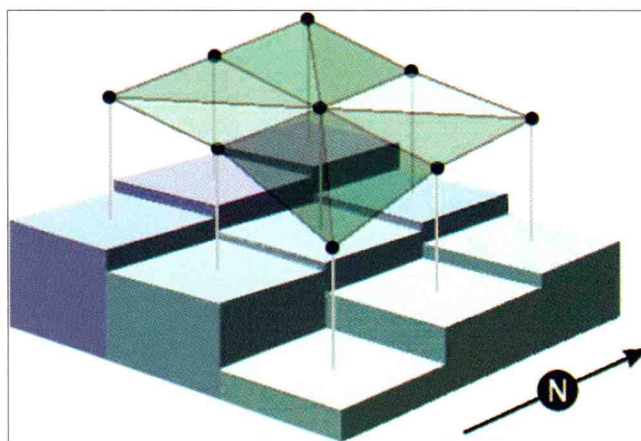
Algorytm oblicza długości 8 linii łączących centralny punkt danej komórki z centralnymi punktami 8 pozostałych komórek. Następnie wyliczane są długości zewnętrznych brzegów trójkątów. Mając dane długości wszystkich boków każdego z trójkątów obliczana jest powierzchnia każdego z nich (ryc. 13).

Przy obliczaniu długości brzegów trójkątów wykorzystywane jest twierdzenie Pitagorasa, wyrażające się wzorem: $a^2 + b^2 = c^2$; gdzie: a to przyprostokątna pozioma, b to przyprostokątna pionowa, a c to przeciwprostokątna, będąca rzeczywistą odległością pomiędzy dwoma punktami znajdującymi się na stoku. Wartość „ b ” to różnica między wartościami dwóch sąsiadujących komórek, na

210	190	170	155	140	135
204	183	165	145	125	120
200	175	160	122	110	100
208	187	165	150	126	120

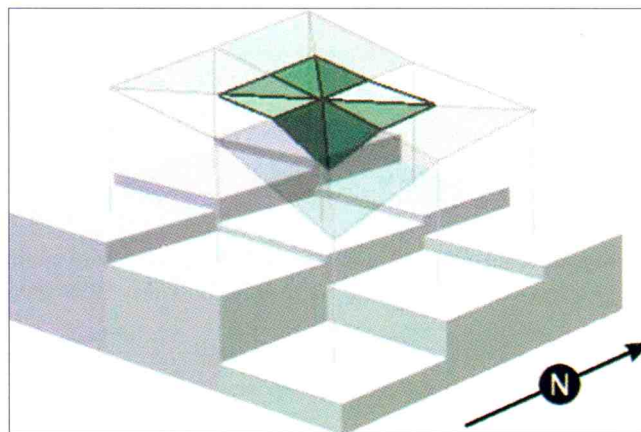
Ryc. 12. Rzeczywista powierzchnia komórki obliczana na podstawie wysokości 8 komórek sąsiednich. Przykład dla komórki o wartości 183 (według Jenness, 2004).

Fig. 12. Actual cell size, calculated on the basis of the height of 8 adjacent cells. Example for cell with the value of 183 (after Jenness, 2004).



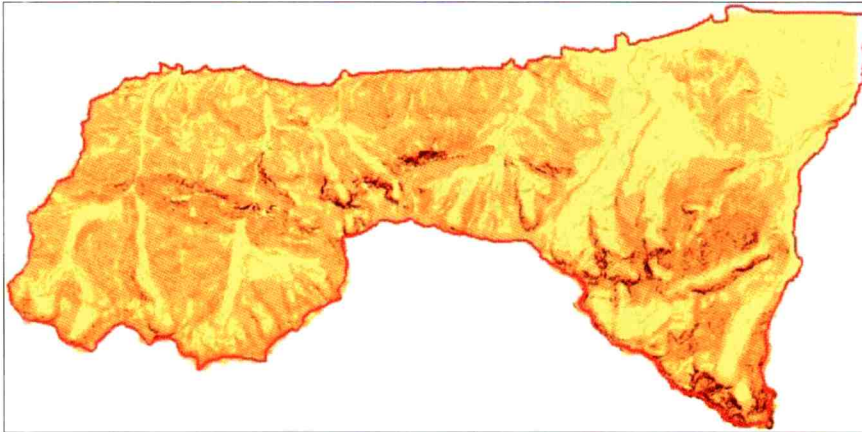
Ryc. 13. Schemat przedstawiający położenie trójkątów, na podstawie których obliczano powierzchnię komórki (według Jenness, 2004).

Fig. 13. Diagram showing the location of triangles on the basis of which the cell's surface area was calculated (after Jenness, 2004).



Ryc. 14. Schemat przedstawiający części trójkątów obejmujące powierzchnię komórki bieżącej (według Jenness, 2004).

Fig. 14. Diagram showing parts of triangles comprising the surface area of the current cell (after Jenness, 2004).



Ryc. 15. Mapa powierzchni rzeczywistych powstała przy użyciu aplikacji *Surface Areas and Ratios From Elevation Grid*.

Fig. 15. Map of actual surface areas, made using the *Surface Areas and Ratios From Elevation Grid*.

tomiast wartość „ a ” jest równa długości boku komórki – dla komórek o boku wspólnym z komórką bieżącą oraz iloczynowi długości boku komórki i pierwiastka z dwóch, dla pozostałych komórek.

Następnym krokiem jest podzielenie boków trójkątów (to jest linii łączących środek komórki bieżącej z sąsiednimi) w połowie tak, aby pozostały tylko te części trójkątów, które znajdują się w obrębie komórki bieżącej (ryc. 14).

Ostatnim krokiem jest obliczenie powierzchni pozostałych, mniejszych trójkątów obejmujących obszar całej komórki bieżącej. Suma powierzchni tych trójkątów równa jest rzeczywistej powierzchni analizowanej komórki.

Powstała na tej zasadzie mapa (ryc. 15) została wykorzystana do wyliczenia powierzchni rzeczywistych badanych wydzieli na mapie z roku 1999. Dane przedstawione w tabeli 3. uwidaczniają różnice powierzchni rzeczywistej i planimetrycznej wydzielonych klas pokrycia terenu.

Analiza wysokości zasięgu górnej granicy piętra lasów i kosodrzewiny

Średnia wysokość górnej granicy lasów w Tatrach określana jest na około 1550 m n.p.m. (Mirek, 1996). Natomiast średnia wysokość górnej granicy piętra kosodrzewiny określana jest na 1800 m n.p.m. Górna granica tych pięter może być obniżana w wyniku działania lawin lub wiatru halnego. Jednak najbardziej widoczne ubytki drzewostanów są dziełem człowieka. W latach czterdziestych XX wieku, kiedy wypas owiec na halach był bardzo intensywny, górna granica regla górnego i kosodrzewiny obniżyła się o średnio 100 m.

Aby zbadać zmiany górnej granicy tych dwóch pięter roślinnych w badanym okresie przeanalizowano ich przebieg na mapach z lat 1977 i 1999. Następnie, korzystając z narzędzia *Summarize Zones* rozszerzenia *Spatial Analyst* programu ArcView oraz danych

wysokościowych z NMT, wyliczono minimalną, średnią i maksymalną wysokość górnej granicy badanych klas pokrycia terenu dla obydwu lat (tab. 4 i 5).

Tabela 3. Powierzchnia planimetryczna i rzeczywista badanych kategorii pokrycia terenu w roku 1999.

Table 3. Planimetric and actual surface area of the researched land cover categories in 1999.

	Lasy Forests	Kosodrzewina Dwarf of mountain pine	Łąki górskie i polany Mountain meadows and clearings	Jeziora Lakes	Obszar niezalesione Unforested areas
Powierzchnia planimetryczna [ha] Planimetric area [ha]	11473,89	2499,72	1023,64	140,66	4703,24
Powierzchnia rzeczywista [ha] Reality area [ha]	12761,59	2969,29	1116,25	141,3	5995,61

Tabela 4. Wysokość górnej granicy lasu w latach 1977 i 1999.

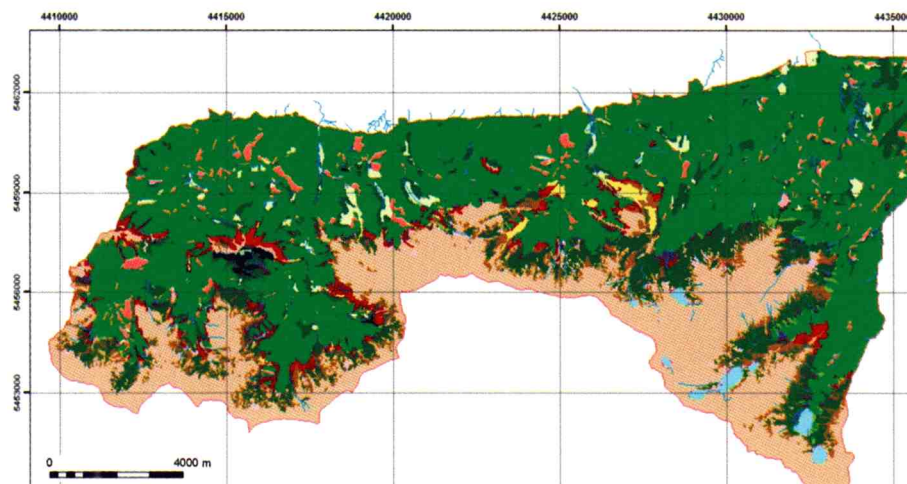
Table 4. Altitude of the upper forest limit in 1977 and 1999.

Rok Year	Wysokość górnej granicy piętra lasów [m n.p.m.] Tree line [m a.s.l.]					
	Tatry Zachodnie West Tatra mountains			Tatry Wysokie High Tatra mountains		
	Minimalna Minimal	Średnia Mean	Maksymalna Maximal	Minimalna Minimal	Średnia Mean	Maksymalna Maximal
1977	1029	1374	1564	1045	1408	1709
1999	1027	1419	1659	1068	1434	1711

Tabela 5. Wysokość górnej granicy kosodrzewiny w latach 1977 i 1999.

Table 5. Altitude of the upper dwarf mountain pine (*Pinus montana*) limit in 1977 and 1999.

Rok Year	Wysokość górnej granicy piętra kosodrzewiny [m n.p.m.] Upper limit of the dwarf of mountain pine [m a.s.l.]					
	Tatry Zachodnie West Tatra Mountains			Tatry Wysokie High Tatra Mountains		
	Minimalna Minimal	Średnia Mean	Maksymalna Maximal	Minimalna Minimal	Średnia Mean	Maksymalna Maximal
1977	1280	1588	1830	1319	1656	1941
1999	1273	1629	1891	1396	1736	1986



Ryc. 16. Mapa zmian w zasięgu pięter roślinnych w Tatrach w latach 1977–1999.

Fig. 16. Map of changes in the limits of plant layers in the Tatras in 1977–1999.

Z danych zawartych w obu tabelach wynika, że wysokość zasięgu górnej granicy obydwu zbiorowisk roślinnych (las i kasodrzewina), w badanym okresie wyraźnie wzrosła. Jednak bardziej spektakularny wzrost zanotowano w przypadku kosodrzewiny, której to górna granica podniosła się średnio o 41 m w Tatrach Zachodnich i aż 80 m w Tatrach Wysokich.

Średnia wysokość zasięgu górnej granicy lasów wzrosła o 45 m w Tatrach Zachodnich i o 26 m w Tatrach Wysokich.

Warto zauważyć różnicę w średniej wysokości górnych granic obu pięter roślinnych między wschodnią i zachodnią częścią Tatr w roku 1999. W przypadku lasów jest ona o 15 m niżej położona w Tatrach Zachodnich, natomiast w przypadku kosodrzewiny aż o 107 m.

Zmiana zasięgu pięter roślinnych w Tatrach w latach 1977–1999

Dokładną analizę zmian zasięgów i powierzchni poszczególnych klas pokrycia terenu przeprowadzono poprzez porównanie map z lat 1977 i 1999. W tym celu przekształcono wektorowe mapy zasięgu badanych pięter roślinnych dla roku 1977 i 1999 w gridy i przy pomocy rozszerzenia *Spatial Analyst*, służącego do analizy map rastrowych w programie ArcView, połączono obie mapy rastrowe i wykonano mapę obrazującą zmiany w pokryciu terenu w poszczególnych kategoriach. W wyniku połączenia obu map wyznaczono 25 klas obszarów o zmienionym pokryciu terenu, z czego 20 wskazuje na zmianę jednej klasy w inną, a pozostałe 5 nie wykazywało przekształceń (ryc. 16, tab. 6).

Analiza i dyskusja wyników

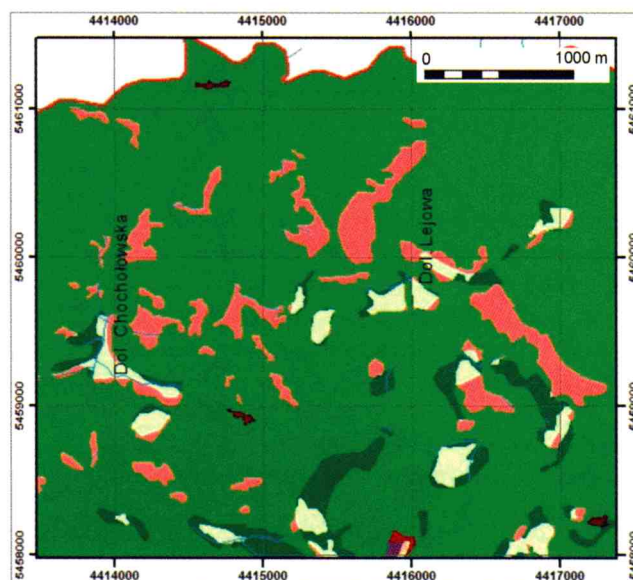
Na podstawie otrzymanej mapy i wielkości powierzchni, które uległy zmianie, przeprowadzono analizę zmian poszczególnych wydzieleni.

Lasy. Aż 92,6% powierzchni lasów nie uległo przekształceniu. Mimo wzrostu ogólnej lesistości badanego

obszaru o prawie 1000 ha, nastąpiła redukcja lasów o 533,13 ha na rzecz łąk i polan, co prezentuje klasa nr 4. Tego typu zmiany mogą wynikać z czynników naturalnych, typu lawiny czy wiatr halny, i widoczne są głównie w wyższych i środkowych partiach gór, a także powstawać w wyniku działalności człowieka poprzez wycinkę lasów.

Obszary zmienione w wyniku działalności człowieka widoczne są szczególnie w części Doliny Chochołowskiej i Doliny Lejowej (ryc. 17), które to tereny o powierzchni 2200 ha są własnością Wspólnoty Witowskiej. Wspólnota ta zajmuje się planowaniem gospodarki na należących do niej terenach, nawet

tych w granicach Parku Narodowego. TPN sprawuje jedynie nadzór nad gospodarką leśną i kwestiami ochrony przyrody tych obszarów. Jedną z głównych podstaw funkcjonowania wspólnoty jest pozyskiwanie i sprzedaż drewna.






Ryc. 17. Przekształcenie lasów w łąki i polany (kolor różowy) na terenie Wspólnoty Witowskiej w Dolinie Chochołowskiej w Tatrach.

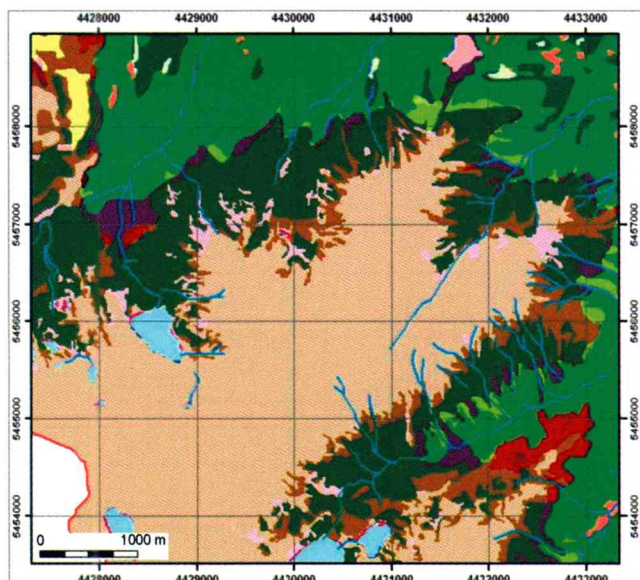
Fig. 17. Transformation of forests into meadows and clearings (in pink) in the area of the Witów Community in the Chochołowska Valley (Dolina Chochołowska) in the Tatras.

W wyższych partiach gór, w okolicach Doliny Gąsienicowej (ryc. 18) zanotowano obniżenie się górnej granicy lasów i zastąpienie tych obszarów kosodrzewiną, jednak powierzchnia tych zmian to niewiele ponad 75 ha.

Kosodrzewina. Piętro kosodrzewiny nie uległo znaczącym zmianom. W wyższych partiach gór Doliny Rybiego Potoku nastąpiło fragmentaryczne podniesienie się dolnej granicy tego piętra. Jednak w tych samych rejonach, co opisano wyżej, górna granica kosodrzewiny podniosła się, co potwierdza fakt, że strefa przejścia lasów w piętro

Tabela 6. Legenda do ryc. 16 wraz z rodzajem zmian pokrycia terenu i ich powierzchnią.
 Table 6. Legend to Figure 16 with types of changes in land cover and their surface area.

	Kod Code	Pokrycie terenu w roku 1977 <i>Land cover in 1977 year</i>	Pokrycie terenu w roku 1999 <i>Land cover in 1999 year</i>	Powierzchnia planimetryczna [ha] <i>Planimetric area [ha]</i>
	1	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	Lasy <i>Forests</i>	918,11
	2	Lasy <i>Forests</i>	Lasy <i>Forests</i>	9732,48
	3	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	349,71
	4	Lasy <i>Forests</i>	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	533,13
	5	Jeziora <i>Lakes</i>	Lasy <i>Forests</i>	0,95
	6	Jeziora <i>Lakes</i>	Jeziora <i>Lakes</i>	135,10
	7	Lasy <i>Forests</i>	Jeziora <i>Lakes</i>	0,34
	8	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	Jeziora <i>Lakes</i>	0,07
	9	Jeziora <i>Lakes</i>	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	0,01
	10	Lasy <i>Forests</i>	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	102,11
	11	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	83,97
	12	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	Lasy <i>Forests</i>	503,70
	13	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	4314,65
	14	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	118,99
	15	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	899,81
	16	Lasy <i>Forests</i>	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	75,85
	17	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	1516,26
	18	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	Lasy <i>Forests</i>	216,80
	19	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	18,00
	20	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	196,07
	21	Łąki górskie i polany <i>Mountain meadows and clearing</i>	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	5,39
	22	Jeziora <i>Lakes</i>	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	2,36
	23	Jeziora <i>Lakes</i>	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	6,50
	24	Obszary niezalesione <i>Unforested areas</i>	Jeziora <i>Lakes</i>	3,65
	25	Kosodrzewina <i>Dwarf mountain pine</i>	Jeziora <i>Lakes</i>	1,49

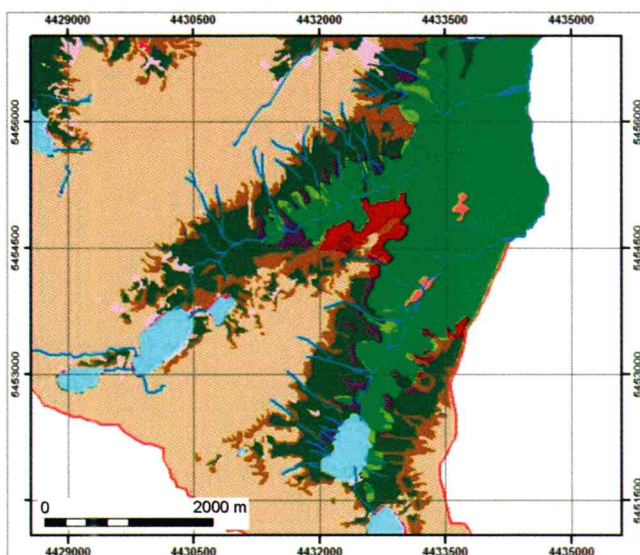


Ryc. 18. Zmiany przestrzenne na granicy lasów i kosodrzewiny. Fragment Doliny Gąsienicowej. Oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 18. Spatial changes at the boundary of the forest and the dwarf mountain pine (*Pinus montana*) layer. Part of the Gąsienicowa Valley (Dolina Gąsienicowa) (see Table 6).

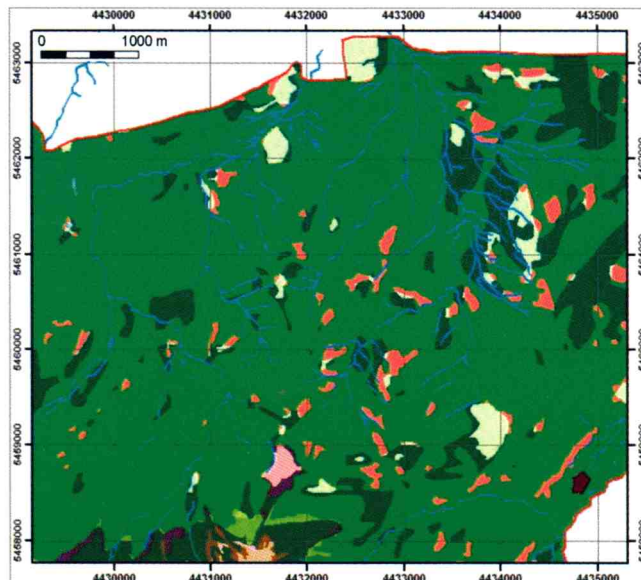
kosówki jest bardzo płynna i nieregularna. Takie przekształcenia są w pełni naturalne (ryc. 19).

Łąki i polany. Największą zmianę pokrycia terenu, 918,18 ha (klasa 1), zanotowano na terenach łąk i polan, które obecnie zaklasyfikowano jako lasy. Na mapie zasięgu badanych pięter roślinnych dla roku 1977 widoczne są głównie duże łąki znajdujące się w lesie, na wysokości pięter reglowych, natomiast w roku 1999 na tych samych



Ryc. 19. Zmiany w zasięgu górnej granicy kosodrzewiny w Tatrach Wysokich. Kolorem brązowym zaznaczono przekształcenie obszarów niezalesionych w kosodrzewinę. Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 19. Changes in the upper dwarf mountain pine (*Pinus montana*) limit in the High Tatras. Transformation of unforested areas into a dwarf mountain pine (*Pinus montana*) layer was marked in brown.



Ryc. 20. Zmiany w zasięgu łąk i polan. Dolina Suchej Wody. Kolorem ciemnozielonym oznaczono przekształcenie łąk i polan w lasy. Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 20. Changes in the meadows and clearings limits. Dolina Suchej Wody (Dry Water Valley). Transformation of meadows and clearings into forests was marked in dark green. Other symbols as in Table 6.

terenach zaobserwowano już dużo mniejsze polany, odseparowane od siebie lasem (ryc. 20).

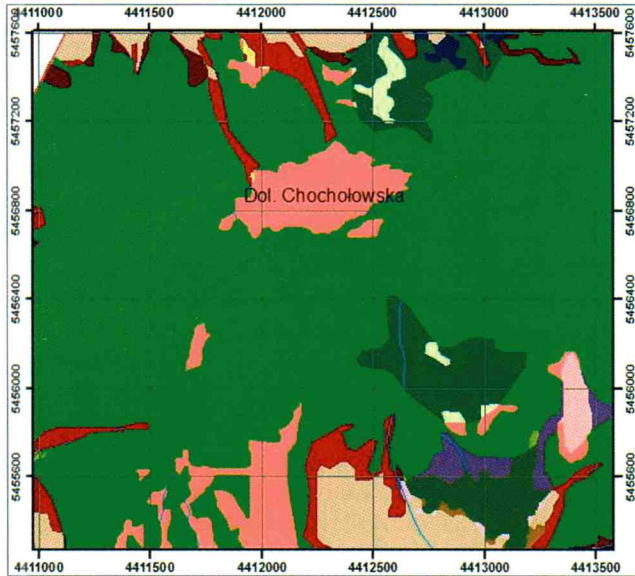
Duże obszary łąk i polan, niegdyś wykorzystywane przez człowieka jako pastwiska, teraz niezagospodarowane, poddają się powolnej sukcesji lasów.

Jedną z zmian zdecydowanie wynika z błędnej interpretacji zdjęć z roku 1977. Jest to obszar Doliny Chochołowskiej, który został całkowicie pominięty na mapie zasięgu badanych pięter w roku 1977 (ryc. 21).

Opisując zmiany dawnych terenów łąk i polan warto zwrócić uwagę na klasę numer 11 przedstawiającą zanik tego typu roślinności na rzecz obszarów niezalesionych. Zmiana ta wynika z innej interpretacji dosyć dużego obszaru okolic Kominiarskiego Wierchu. Na mapie z roku 1977 tereny te sklasyfikowano jako łąki. Natomiast na mapie z roku 1999 tereny te zaklasyfikowano jako obszary niezalesione (ryc. 22).

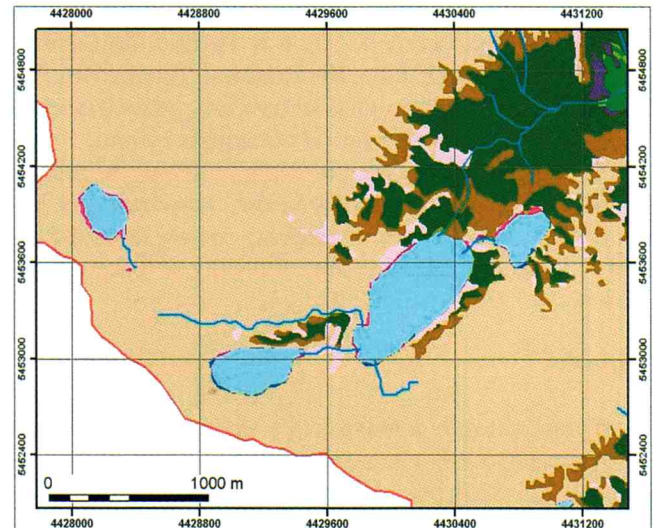
Jeziora. Z analizy obu map wynika, że powierzchnia jezior tatrzańskich uległa nieznacznej zmianie. Jednak wynika to z różnej generalizacji map. Największe różnice zauważyć można w linii Wielkiego Stawu w Dolinie Pięciu Stawów Polskich, gdzie linia brzegowa jest bardziej wcięta (ryc. 23)

Obszary niezalesione. Na przykładzie tej kategorii pokrycia terenu widać jak bardzo podniosła się górna granica piętra kosodrzewiny. Analizując klasę nr 15, na mapie zmian zasięgów badanych pięter roślinnych widać, że na całym terenie Tatrzańskiego Parku Narodowego nastąpiła sukcesja kosodrzewiny na tereny, które według mapy z roku 1977 nie były porośnięte żadną roślinnością. Wielkość powierzchni, która uległa tego typu przekształceniu to prawie 900 ha. Największy wzrost pokrycia terenów skalistych kosodrzewiną widoczny jest na



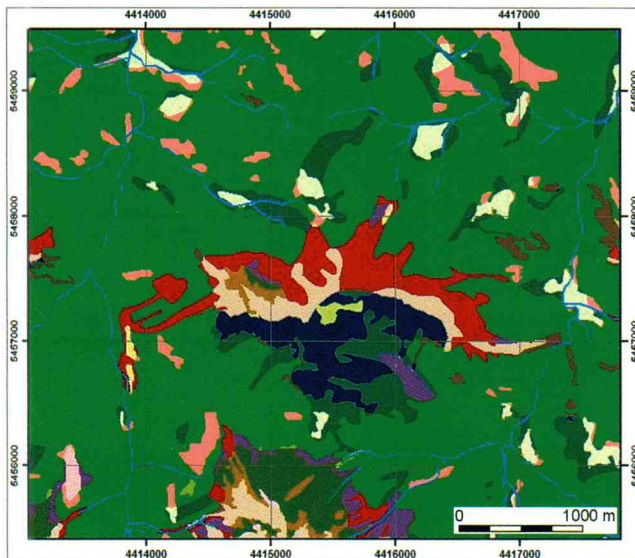
Ryc. 21. Przykład rozbieżności w interpretacji zdjęć lotniczych z roku 1977 i 1999. Na mapie z roku 1977 łąki w Dolinie Chocholowskiej potraktowano jako lasy skąd wynika na mapie „zmian” pozorny przyrost łąk, kosztem lasów. Oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 21. Example of disparities in the interpretation of aerial photographs from 1977 and 1999. On the 1977 map, meadows in the Chocholowska Valley (Dolina Gąsienicowa) were interpreted as forest, hence the apparent increase in meadows, at the expense of forests, in the map of 'changes'. Other symbols as in Table 6.



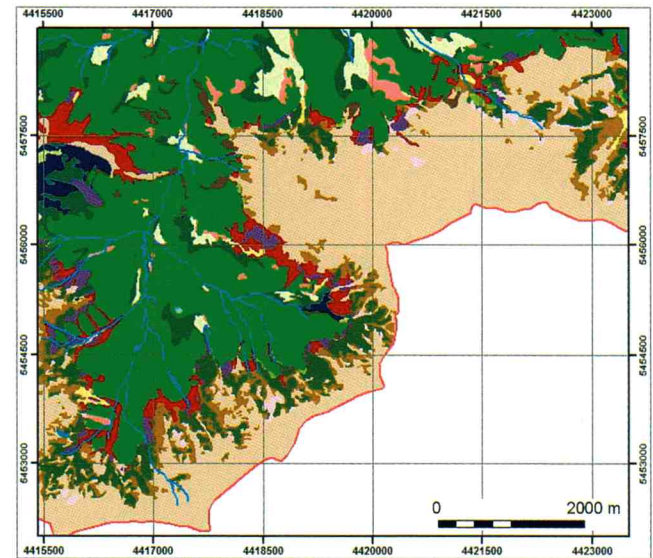
Ryc. 23. Zmiany w zasięgu linii brzegowej jezior w Dolinie Pięciu Stawów Polskich. Kolorem ciemnoróżowym oznaczono zamianę powierzchni jezior w tereny niezalesione. Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 23. Changes in the lake shoreline in the Five Ponds Valley (Dolina Pięciu Stawów Polskich). Transformation of the lakes into unforrested land was marked in deep pink. Other symbols as in Table 6.



Ryc. 22. Przykład różnic w interpretacji szaty roślinnej w rejonie Kominiarskiego Wierchu. Na mapie z roku 1977 tereny oznaczone kolorem granatowym interpretowane były jako łąki i polany, na mapie z roku 1999 zakwalifikowano je jako obszary niezalesione. Stąd pozorny przyrost powierzchni terenów niezalesionych.

Fig. 22. Example of disparities in the interpretation of the plant cover near Kominiarski Wierch. On the 1977 map, areas marked in navy blue were interpreted as meadows and clearing, and categorised as unforrested areas on the 1999 map, hence the apparent increase in the unforrested area.



Ryc. 24. Zmiany w zasięgu górnej granicy kosodrzewiny i lasów w Tatrach Zachodnich. Kolorem brązowym zaznaczono przekształcenie obszarów niezalesionych w kosodrzewinę, a kolorem bordowym w las. Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 6.

Fig. 24. Changes in the upper dwarf mountain pine (*Pinus montana*) and the forest limits in the Western Tatras. Transformation of unforrested areas into a dwarf mountain pine (*Pinus montana*) layer was marked in brown, and into forest – in claret. Other symbols as in Table 6.

obszarze Tatr Wysokich w Dolinie Roztoki i Dolinie Pięciu Stawów Polskich (ryc. 19), a w Tatrach Zachodnich w wyższych partiach dolin: Kondratowej, Tomanowej, Starorobociańskiej i Pyszniańskiej (ryc. 24), gdzie widoczne są także powierzchnie wtórnie porośnięte lasami.

Tego typu zmiany potwierdzają obliczony wcześniej wzrost zasięgu górnej granicy lasów i kosodrzewiny. Widoczny jest także znacznie większy rozwój lasów na obszarze Tatr Zachodnich i kosodrzewiny w Tatrach Wysokich.

Wnioski

Wykorzystanie teledetekcji i systemów informacji geograficznej (GIS) w monitoringu pokrycia roślinnością terenów górskich pozwala na szybkie i regularne otrzymywanie informacji dotyczących zasięgu i rodzaju tego pokrycia. Dzięki analizie kolorowych zdjęć lotniczych z roku 1999, z terenu Tatrzańskiego Parku Narodowego, wykonano mapę, na której wyznaczono zasięg takich zbiorowisk roślinnych jak lasy, kosodrzewina, łąki górskie i polany śródleśne, a ponadto pokazano rozmieszczenie jezior oraz wyróżniono ogólną kategorię „tereny niezalesione”. Porównanie z podobną mapą przedstawiającą sytuację w roku 1977 umożliwiło ocenę zmian w powierzchniach zajmowanych przez poszczególne kategorie pokrycia terenu w ciągu 22-letniego okresu. Uwidocznił się również wzrost lub spadek górnej granicy lasu i kosodrzewiny. Wykorzystując oprogramowanie ArcView 3.3, obliczono powierzchnię poszczególnych kategorii pokrycia terenu

dla badanych lat, porównano wyniki zmian wielkości powierzchni oraz wykonano mapę pokazującą, gdzie i jakiego zmiany zaszły w pokryciu roślinnością w ciągu 22 lat. Numeryczny Model Terenu umożliwił określenie wysokości górnej granicy zasięgu piętra kosodrzewiny i lasów oraz wyliczenie rzeczywistej powierzchni zajmowanej przez daną klasę.

W okresie 1977–1999 powierzchnia lasów wzrosła o 9,24% a kosodrzewiny o 25,37%. Natomiast zmalała powierzchnia łąk i polan śródleśnych o 32,59%, obszarów niezalesionych o 19,52% a powierzchni jezior o 3,05%.

Należy jednak zdawać sobie sprawę, że szczegółowa analiza ilościowa prowadzona była na różnych materiałach zdjęciowych – czarno-białe zdjęcia lotnicze z roku 1977 i kolorowe z roku 1999, wykonane w różnych skalach. Były one interpretowane przez różne osoby, co mogło mieć wpływ na szczegółowość interpretacji. Mapy były wykonywane różnymi metodami. Tym nie mniej uzyskane wyniki wskazują na ogólną tendencję przekształcania środowiska na Terenie Tatrzańskiego Parku Narodowego.

Literatura

- Bielecka, E., 1986, *Zmiany w zasięgu pięter roślinnych w Tatrach w świetle danych teledetekcyjnych w latach 1934–1977* (materiał z serii), Uniwersytet Warszawski.
- Jenness J. 2004, *Methods of Calculating Surface Area Grids*, www.jennessent.com/arcview/surface_areas
- Mirek Z. (red.), 1996, *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*, Tatrzański Park Narodowy, Kraków, Zakopane.



Mgr Aleksandra Paterek ukończyła studia w roku 2005, na Międzywydziałowych Studiach Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego, specjalizując się na kierunku ochrona środowiska. Studia magisterskie i pracę dyplomową wykonywała w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Jana R. Olędzkiego.



Prof. dr hab. Jan R. Olędzki jest kierownikiem Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Przewodniczącym Komisji Teledetekcji Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych przy Prezydium Polskiej Akademii Nauk oraz Przewodniczącym Klubu Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego. Zajmuje się zastosowaniem teledetekcji w badaniach struktury środowiska oraz jego monitoringu i ochronie. Adres Uniwersytet Warszawski Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR, Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, e-mail: jroledzk@uw.edu.pl.