

Zmienność przestrzenna NDVI i wskaźników tekstury Zaborskiego Parku Krajobrazowego w zależności od gospodarczego oddziaływania człowieka

Spatial variability of NDVI and texture indices for the Zaborski Landscape Park in the gradient of economic influence of man

Mieczysław KUNZ
Andrzej NIENARTOWICZ

The landscape structure can be analysed in different ways while using different methods, research tools and initial data. One of the effective research methods is remote sensing together with satellite imageries obtained by this method. This technology used to be successfully applied in ecology, e.g. for evaluation of forest landscape structure modified by economic activity of man. In the studies carried out by remote sensing methods, it was found that the current landscape structure results from its previous states and is shaped both by man and by natural processes.

Having the above statements as a starting point, an analysis of forest landscape structure was performed in the territory of the Zaborski Landscape Park, based on Landsat satellite imageries from the period 1975-2003. The NDVI was calculated for the entire park as well as for three research plots situated within the park. Squares were set up as research plots, with a side of 5040 m long. Each square encompassed 28 224 pixels of dimensions 30 x 30 m. The squares were set up in areas of different intensity of forestry and different share of secondary forests on formerly arable soils.

On the basis of generated images presenting the spatial diversification of NDVI, the following texture parameters were defined for each research plot: diversity (H), fragmentation

(F), fractal dimension (FD). In calculations of the diversity index and fragmentation, the size of the matrix window amounted to 5x5 pixels. The fractal dimension was calculated with the triangular prism method described by Altobelli et al. (2001).

The NDVI was also calculated for three sets, each comprising 24 or 25 test areas distributed within each research plot. Test areas were squares with a side of 300x300 metre long representing all age classes of tree stands in the habitat of fresh and dry pine forest.

The completed database on subdivisions of the surface area division as well as the course of the process of deforestation and afforestation of the region during the period 1796-2003, allowed the detailed analysis of the obtained results with reference to land use history in this area. In the comparative analysis of three research plots on the basis of structure indices, the graphic method of Jentys-Szaferowa (1948) was applied and methods of numerical taxonomy.

On the basis of the performed analyses, it was concluded that together with the increased human pressure on the nature, the average value of NDVI decreased together with the simultaneous increase of indices expressing the diversity, fragmentation and fractal dimension of the landscape.

Wstęp

Działalność człowieka należy do głównych czynników wywołujących zmiany w strukturze ekosystemów i krajobrazów. W analizach historycznych krajobrazu leśnego często bada się wpływ tego czynnika na inne parametry fizjocenozy, jak typ roślinności, wiek ekosy-

stemu, rozmieszczenie przestrzenne gatunków roślin, cechy dendrometryczne drzewostanu, liczbę warstw roślinności, stan biomasy zielonej, itp.

Na zmienność przestrzenną struktury roślinności spowodowaną przez czynniki antropogeniczne nakłada się zróżnicowanie wynikające ze zmian topograficznych i siedliskowych. Współczesny obraz krajobrazu jest

czynnikami naturalnymi nakłada się heterogeniczność spowodowana prowadzoną w rejonie dzisiejszego ZPK od ponad 130 lat intensywną gospodarką leśną.

Lasy podlegają Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Toruniu. Mimo silnych przekształceń zbiorowisk leśnych przyroda tego obszaru odznacza się tak wysokimi walorami, że w 1996 roku w południowej części parku krajobrazowego utworzono Park Narodowy „Bory Tucholskie” o powierzchni około 48 km². Poza parkiem narodowym na badanym terenie występuje sześć rezerwatów przyrody.

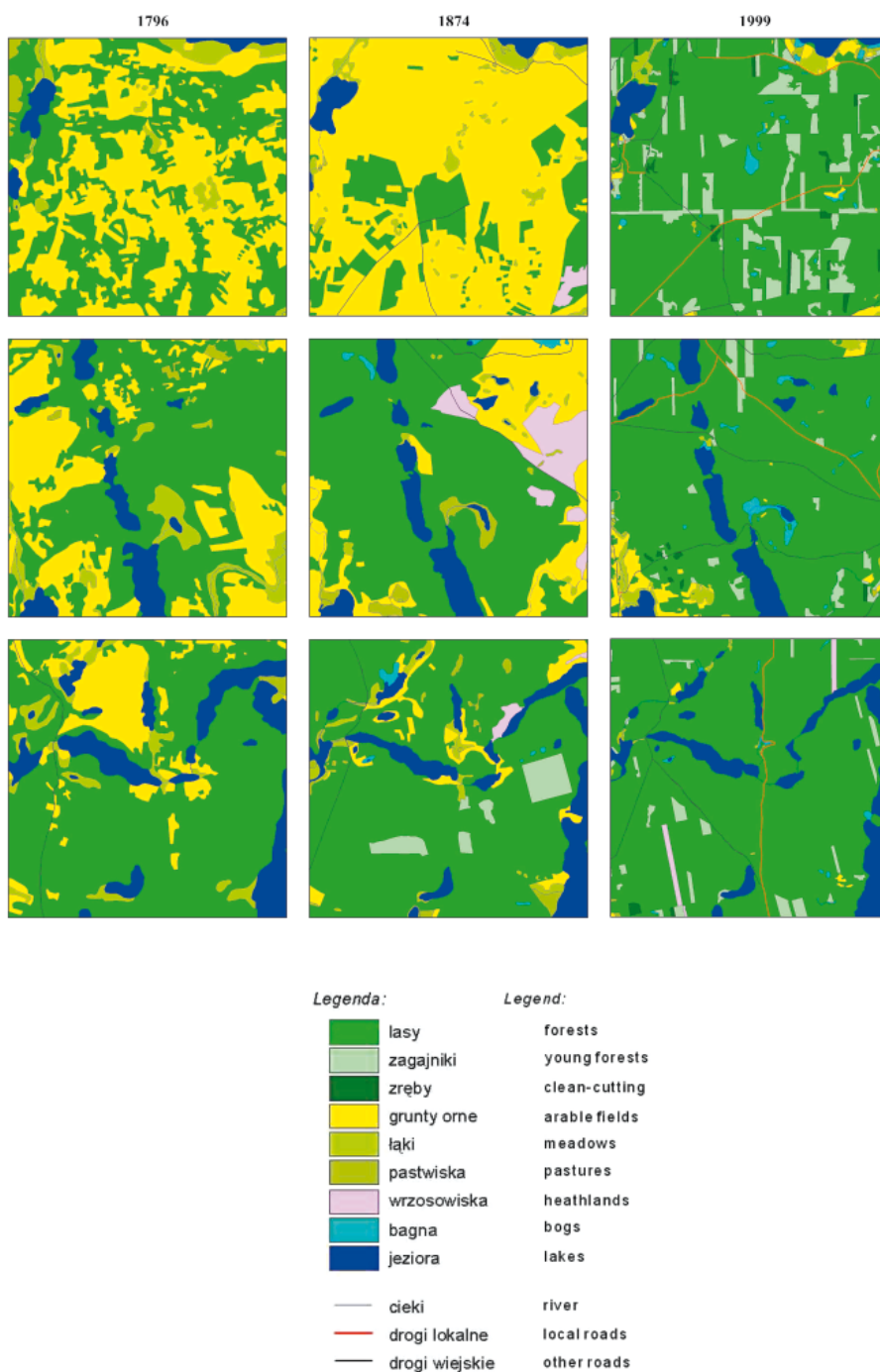
Przedmiotem analizy jest obszar całego Zaborskiego Parku Krajobrazowego, w którego poszczególnych fragmentach gospodarka leśna w przeszłości realizowana była z różną intensywnością (ryc. 1). Dla określenia wpływu użytkowania lasu na zmienność przestrzenną krajobrazu wyznaczono, w gradencie zmniejszającego się oddziaływania człowieka (ryc. 2), trzy duże poligony badawcze:

– obszar na północ od rzeki Zbrzycy w rejonie jeziora Krużyńskiego, gdzie w jeszcze w końcu XIX wieku dominowały ubogie pastwiska owcze; tereny te zostały zalesione po utworzeniu pruskiego *Oberforstereich Zwangshoff* i w następnych latach był to obszar najintensywniejszej gospodarki leśnej na całym rozważanym terenie (poligon badawczy Kruszyn),

– obszar na północ od linii jezior Witocznno – Łąckie – Dybrzk, gdzie, według danych zamieszczonych na dawnych mapach topograficznych, nieprzerwanie występowały kompleksy leśne; na tym terenie znaczne powierzchnie zajmują dziś rezerваты przyrody oraz najstarsze drzewostany na całym obszarze ZPK (poligon badawczy Laska),

– obszar leżący w obrębie Parku Narodowego „Bory Tucholskie”, gdzie od 1996 roku pozyskiwanie drewna i innych produktów leśnych odbywa się w bardzo ograniczonym zakresie (poligon badawczy PNBT).

Każdy poligon badawczy ma wymiar kwadratu o boku 5 040 m. Składa się z 168x168 pikseli (razem 28 224



Ryc. 2. Użytkowanie terenu w roku 1796, 1874 i 1999: poligon badawczy Kruszyn – góra, poligon badawczy Laska – środek i poligon badawczy PNBT – dół.

Fig. 2. Land use in 1796, 1874 and 2000: sample plot Kruszyn – top, sample plot Laska – center, sample plot PNBT – down.

pikseli o wymiarach 30x30m). Tak wyznaczone powierzchnie są podstawą do analizowania wskaźników tekstury. Ponadto na poligonie badawczym Kruszyn wybrano 25, zaś na poligonach Laska i PN BT po 24 obszary testowe (powierzchnie próbne) o wymiarach 300x300m. Reprezentują one różne klasy wiekowe drzewostanu i dwa podstawowe typy siedlisk (tj. bór świeży i bór suchy) całego obszaru ZPK.

Metody

W prezentowanym opracowaniu głównym źródłem informacji o czasowych i przestrzennych zmianach struktury krajobrazu są zobrażenia satelitarne Landsat zarejestrowane w latach 1975-2003 (Tab. 1). Obróbkę zdjęć i wykonanie map przeprowadzono w technologii GIS z wykorzystaniem następujących programów: ArcView wraz z rozszerzeniami, IDRISI oraz MatLab. Algorytmy przetwarzania obrazów (Image Analyst, IDRISI) umożliwiły przeprowadzenie interaktywnych operacji na zdjęciach satelitarnych. Było to zwłaszcza procedury przeprowadzania korekcji radiometrycznej, geometryzacji zdjęć, lokalizacji powierzchni badawczych na zdjęciach i określania wielkości odbicia promieniowania elektromagnetycznego (odpowiedź spektralna) przez drzewostany i inne elementy pokrycia terenu.

Tab. 1. Wykaz wykorzystanych zobrażeń satelitarnych.
Tab. 1. List of used satellite imageries.

Data	Satelita	Numer sceny
Data	Satellite	Sceno No
30.05.2003	Landsat ETM+	190-22
05.05.2000	Landsat ETM+	190-23
28.07.1990	Landsat TM	191-22
05.04.1981	Landsat MSS	206-22
12.10.1979	Landsat MSS	205-22
26.05.1978	Landsat MSS	205-22
09.09.1975	Landsat MSS	205-22

Dla całego parku oraz wybranych poligonów badawczych sporządzono mapy zmienności przestrzennej NDVI. Wskaźnik ten obliczano według wzoru zaproponowanego przez Rouse i in. (1973):

$$NDVI = (IR-R)/(IR+R),$$

gdzie IR oznacza promieniowanie w bliskiej podczerwieni a R promieniowanie czerwone. Wykaz wykorzystanych kanałów przy obliczaniu NDVI dla różnych typów skanera Landsat zawiera Tabela 2.

Tab. 2. Wykaz wykorzystywanych kanałów wybranych satelitów dla obliczania wskaźnika NDVI.

Tab. 2. List of used bands of chosen satellites for calculation of NDVI index.

Satelita	RED	IR
Satellite	RED	IR
Landsat MSS	MSS 5	MSS 7
Landsat TM	TM 3	TM 4
Landsat ETM+	ETM 3	ETM 4

Dla obszaru całego ZPK oraz trzech poligonów badawczych obliczenia wykonano dwukrotnie. Oprócz NDVI liczonego na poziomie całej rozpatrywanej powierzchni określono także wartości tego wskaźnika bez uwzględniania jezior i terenów bagiennych. Na podsta-

wie otrzymanych wartości NDVI obliczono różnorodność (H), fragmentację (F) oraz wymiar fraktalny (FD) poszczególnych poligonów badawczych. W procesie obliczania dwóch pierwszych miar tekstury stosowano wielkość okna 5x5 pikseli. Każdą powierzchnię charakteryzowały średnie wartości H oraz F . Były to średnie arytmetyczne z wartości uzyskanych dla zbioru kwadratów, których środkowym polem był kolejno każdy piksel rozpatrywanej powierzchni.

Różnorodność badanego fragmentu krajobrazu obliczono stosując wzór Shannon'a:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i,$$

gdzie p_i oznacza udział i – tej klasy pikseli ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), n – liczbę kategorii pikseli w kwadracie (25 pikseli).

Fragmentację obliczono według wzoru:

$$F = (n - 1)/(c - 1),$$

gdzie n oznacza, podobnie jak we wzorze poprzednim, liczbę kategorii pikseli, zaś c – liczbę pikseli w kwadracie (25 pikseli).

Szczegółowy opis sposobu obliczania obu wskaźników podali Monmonier (1974), Murphy (1985) i Turner (1989).

Dla obliczenia wymiaru fraktalnego użyto tzw. metody graniastosłupa trójkątnego (TPM), która określa złożoność przestrzenną krajobrazu. W metodzie tej wykorzystywane jest przesuwane okno o wymiarze 9x9 pikseli. Dla każdego kwadratu o czterech różnych rozdzielczościach (8x8, 4x4, 2x2 i 1x1 piksel) obliczane jest pole powierzchni ścian utworzonej bryły. Po połączeniu środków pikseli tworzy się 4 ścienny graniastosłup (ryc. 3) o określonej powierzchni dla każdej rozdzielczości. W metodzie tej użyte wartości pikseli (narożniki graniastosłupa) odpowiadają wartościom NDVI a wartość wysokości bryły jest średnią arytmetyczną wartości narożników.

Powierzchnia bryły obliczana jest z wykorzystaniem zależności trygonometrycznych i wzoru Herona.

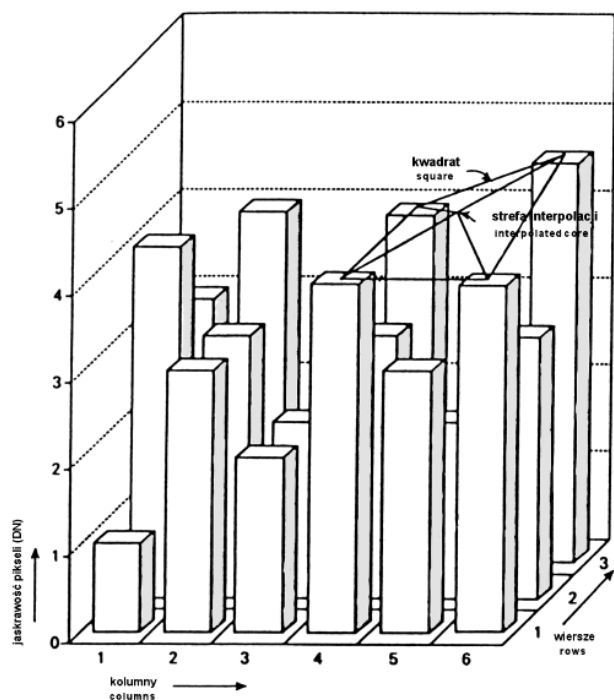
Wymiar fraktalny jest obliczany zgodnie ze wzorem:

$$FD = 2.0 - B,$$

gdzie B jest nachyleniem otrzymanej linii regresji pomiędzy logarytmem pola powierzchni bryły a rozdzielczością.

Powyższą metodę obliczeń zaproponowali Clarke (1986) oraz Jagii i in. (1993). W analizach struktury krajobrazu dotychczas wykorzystywali ją m.in. Lam (1990), Olsen i in. (1993), De Jong i Burrough (1995) oraz Altobelli i in. (2001). W obliczeniach przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy wykorzystano skrypt *sommaco* napisany w programie MatLab przez dra Albobelli'ego (Trieste University, Italy).

W celu uściślenia zależności pomiędzy charakterystykami spektralnymi trzech poligonów badawczych a typami porastających je zbiorowisk roślinnych przeprowadzono analizę wskaźnika NDVI w poszczególnych



Ryc. 3. Zasada obliczania wymiaru fraktalnego metodą graniastoslupa trójkątnego (za De Jong S.M. i Burrough P.A., 1995).
 Fig. 3. Calculation rule of fractal dimension for Triangular Prism Methods (after De Jong S.M. and Burrough P.A., 1995).

typach lasu na powierzchni próbnych wytypowanych w obrębie tych poligonów. W analizie wykorzystano zdjęcie satelitarne z maja 2000 roku. Wielkość powierzchni próbnych wyniosła 300x300m, co odpowiada 100 pikselom obrazu satelity Landsat TM i Landsat ETM+. Porównanie zmienności przestrzennej krajobrazu tych powierzchni, zwłaszcza wynikającej z różnej intensywności pozyskiwania drewna, stosowania zrębów zupełnych, wprowadzania elementów liniowych, jak drogi, linie oddziałowe, granice wydzielen, dokonano również poprzez obliczenie wskaźników H, F i FD każdej powierzchni próbnej.

Wykorzystanie zasobów utworzonego systemu informacji geograficznej Zaborskiego Parku Krajobrazowego (Kunz 1999) pozwoliło określić historię zalesiania badanego terenu oraz sprecyzować zależności pomiędzy odpowiedzią spektralną roślinności a wiekiem drzewostanu i typem siedliska występującym na każdej powierzchni próbnej. Na dalszych etapach badań umożliwiło to zinterpretowanie zmienności wskaźników struktury krajobrazu w badanych zbiorach powierzchni i poligonów badawczych.

Dla sprecyzowania różnic i podobieństw pomiędzy trzema poligonami badawczymi dokonano porównania ich stanów z 2000 roku metodą graficzną Jentys-Szaferowej (1948) oraz metodami taksonomii numerycznej. Analizę porównawczą przeprowadzono na podstawie sześciu cech. Wykaz cech uwzględnionych w obliczeniach zamieszczono na rycinie 5. Klasyczna metoda

graficzna jest stosowana przeważnie do porównań wielkości i kształtu roślin. Polega ona na dzieleniu wartości kolejnych cech przez wartość cechy jednostki porównawczej. Jednostką porównawczą może być średnia arytmetyczna z wartości cech wszystkich prób albo wektor cech jednej z prób. W niniejszym opracowaniu zastosowany był drugi wariant obliczeń. Jednostką porównawczą były cechy powierzchni PNBT. Na podstawie uzyskanych ilorazów sporządzono wykres prezentujący odchylenie powierzchni Kruszyn i Laska od jednostki porównawczej (ryc. 5). Położenie punktów reprezentujących cechy nanoszono względem skali położonej z lewej strony rysunku i wyrażającej wielkość ilorazu. Na wykresie jednostkę porównawczą wyraża pozioma linia prosta a porównywane do niej poligony badawcze Laska i Kruszyn są reprezentowane przez linie łamane. Odchylenia tych linii w dół od linii poziomej wskazują, że cechy porównywanych prób są mniejsze od jednostki porównawczej, natomiast odchylenia w górę świadczą, że są one od niej większe (ryc. 5).

Klasyfikację hierarchiczną przeprowadzono metodą UPGMA stosując kwadrat odległości euklidesowej jako miarę różnic pomiędzy poligonami badawczymi. Dla sporządzenia diagramu ordynacyjnego wykonano analizę składowych głównych PCA. W obliczeniach użyto pakietu MVSP (Kovach 1993).

Wyniki

Ze względu na różnice w rozdzielczości przestrzennej wykorzystywanych obrazów satelitarnych (80 i 30 metrów) analiza wyników została podzielona na dwa okresy czasowe: 1975-1981 i 1990-2003. Otrzymane wyniki wielkości NDVI dla wszystkich poligonów badawczych zawiera Tabela 3. W analizach obejmujących pierwszy przedział czasowy (1975-1981) najwyższe wartości NDVI uzyskano dla poligonu badawczego Kruszyn a najniższe dla poligonu badawczego PNBT. Największe różnice pomiędzy tymi powierzchniami dotyczyły okresu 1976-1981. Należy przy tym zaznaczyć, że znaczny dystans taksonomiczny pomiędzy poligonami Kruszyn i PNBT uzyskano zarówno w przypadku obliczeń wskaźnika NDVI dla całkowitych powierzchni poligonów, jak i w analizach przeprowadzonych bez uwzględnienia ekosystemów wodnych i bagiennych. W tym drugim przypadku największe różnice zanotowano dla roku 1981.

Poligon badawczy PNBT, który w pierwszych latach uzyskiwał najniższe wartości NDVI, w drugim przedziale czasowym, obejmującym lata 1990-2003 i analizowanym w oparciu o zdjęcia Landsat TM i ETM+, osiągał najwyższe wartości tego parametru. Zdecydowanie najniższymi wartościami w tym porównaniu, dotyczącymi okresu od 1990 roku, odznaczał się poligon badawczy Kruszyn. Inaczej kształtowała się zależność dla 2000 roku, kiedy to dla poligonu badawczego Laska osiągnięto wartości wyższe niż dla poligonu badawczego PNBT. Dotyczy to zarówno analiz wykonanych dla całych poligonów badawczych, jak i cyklu obliczeń przeprowadzo-

Tab. 3. Wartości NDVI i wskaźników tekstury poligonów badawczych w latach 1975-2003 (objaśnienia w tekście).
 Tab. 3. Values of NDVI and textures indices of study area in 1975-2003 (explanation in the text).

Obszar badań Study area	Wskaźnik Index	Satelita / Satellite						
		MSS (09.09.1975)	MSS (26.05.1978)	MSS (12.10.1979)	MSS (05.04.1981)	TM (28.07.1990)	ETM+ (05.05.2000)	ETM+ (30.05.2003)
Kruszyn	NDVI	0,3733	0,1413	0,1779	0,0657	0,6885	0,2949	0,6905
	max NDVI	0,6667	0,4805	0,4237	0,2394	1,0000	0,8667	0,9629
	NDVI *	0,3895	0,1477	0,1858	0,0733	0,6926	0,3252	0,7007
	H	2,8148	2,7920	2,6483	2,6528	2,6373	2,9031	2,8369
	FD	2,9014	2,9145	2,9055	2,9153	2,8247	2,9176	2,8443
	F	0,8798	0,8649	0,7694	0,7741	0,6848	0,8526	0,7922
Laska	NDVI	0,3562	0,1221	0,1484	0,0442	0,6982	0,3533	0,7496
	max NDVI	0,6744	0,5189	0,4545	0,2527	0,9375	0,8730	1,0000
	NDVI *	0,4097	0,1497	0,1836	0,0649	0,7343	0,4437	0,7593
	H	2,8024	2,8104	2,6497	2,6091	2,6471	2,9080	2,7855
	FD	2,8947	2,9150	2,9049	2,9077	2,8269	2,8988	2,8363
	F	0,8733	0,8781	0,7677	0,7413	0,6883	0,8551	0,7720
PNBT	NDVI	0,3625	0,0960	0,1440	0,0162	0,7180	0,3097	0,7490
	max NDVI	0,6962	0,4130	0,3898	0,1733	0,9420	1,0000	1,0000
	NDVI *	0,4109	0,1308	0,1861	0,0443	0,7419	0,3996	0,7637
	H	2,8017	2,8039	2,6370	2,5559	2,5770	2,8689	2,7749
	FD	2,9094	2,9206	2,9075	2,9170	2,8096	2,8960	2,8363
	F	0,8729	0,8740	0,7643	0,7178	0,6493	0,8295	0,7545
Cały ZPK Total area of ZPK	NDVI	0,2925	0,1231	0,1415	0,0385	0,6338	0,2378	0,7048
	max NDVI	0,7297	0,6157	0,4794	0,3265	1,0000	1,0000	1,0000
	NDVI *	0,3537	0,1423	0,1630	0,0471	0,6778	0,2936	0,7236

* średni wskaźnik NDVI obliczony bez uwzględnienia ekosystemów wodnych

* mean NDVI index calculated disregarding aquatic ecosystems

nych bez uwzględnienia ekosystemów wodnych i bagiennych w badanych krajobrazach.

W przypadku analiz wskaźnika fragmentacji najwyższe wartości w całym badanym horyzoncie czasowym uzyskiwano dla poligonu badawczego Kruszyn a najniższe dla poligonu PNBT. Podobnie układały się różnice pomiędzy trzema badanymi obiektami w porównaniach wskaźnika różnorodności. Również w tych analizach najniższe wartości osiągał poligon badawczy PNBT. Uzyskane wyniki wskazują więc, że zaniechanie wyrębów i dominacja jednej formy pokrycia terenu, jaką na obszarze parku narodowego stanowią drzewostany wyższych klas wieku, prowadzi do obniżenia heterogeniczności krajobrazu.

Trzeci z analizowanych wskaźników tekstury, tj. wymiar fraktalny, najwyższe wartości osiągał dla poligonu badawczego Kruszyn, ale tylko dla lat 1990-2003. Najniższymi wartościami FD odznaczał się natomiast poligon badawczy PNBT. Dla okresu wcześniejszego, który obejmował lata 1975-1981, zaobserwowano zależność odwrotną, tzn. wyższe wartości uzyskiwał poligon badawczy PNBT. Wynik ten wskazuje, że teren dzisiejszego parku narodowego w latach siedemdziesiątych minionego stulecia był obszarem intensywnej gospodarki leśnej. Świadczy o tym również niska wartość NDVI dla tego przedziału czasowego. Spadek wskaźnika FD dla okresu 1990-2003 potwierdził natomiast wspomnianą już zależność, że ograniczenie wyrębów na obszarze

dzisiejszego parku narodowego doprowadziło do ujednolicenia struktury wiekowej drzewostanów i – w dalszej konsekwencji – do obniżenia wymiaru fraktalnego badanego krajobrazu leśnego.

Na podstawie porównań zbioru 25 powierzchni próbnych 300x300 m rozmieszczonych na poligonie badawczym Kruszyn stwierdzono, że próby, wg operatu leśnego założone na siedlisku boru suchego, mają zazwyczaj wyższe wartości NDVI od powierzchni próbnych zlokalizowanych na siedlisku boru świeżego. Analizując natomiast zmienność przestrzenną wskaźnika NDVI na zdjęciu z 2000 roku względem zmian zasięgu lasów w ostatnich dwóch stuleciach odnotowano, że powierzchnie próbne, które były cały czas porośnięte lasem (kolor ciemnoszary na rycinie 4a), mają wyższe wartości NDVI niż powierzchnie wyznaczone na gruntach porolnych (ryc. 4a, kolor jasnoszary).

W analizie rozkładu przestrzennego wskaźnika NDVI na poligonie Laska z 2000 roku w odniesieniu do rozmieszczenia dawnych gruntów ornych daje się zauważyć, że powierzchnie badawcze, które 126 lat temu były użytkowane rolniczo (kolor jasnoszary na rycinie 4b) mają niższe wartości NDVI niż powierzchnie wyznaczone na obszarach zajmowanych cały czas przez lasy (ryc. 4b, kolor ciemnoszary). Niższe wartości NDVI dla powierzchni próbnych będących w przeszłości gruntami ornymi w stosunku do powierzchni leśnych uzyskano we wszystkich analizach przeprowa-

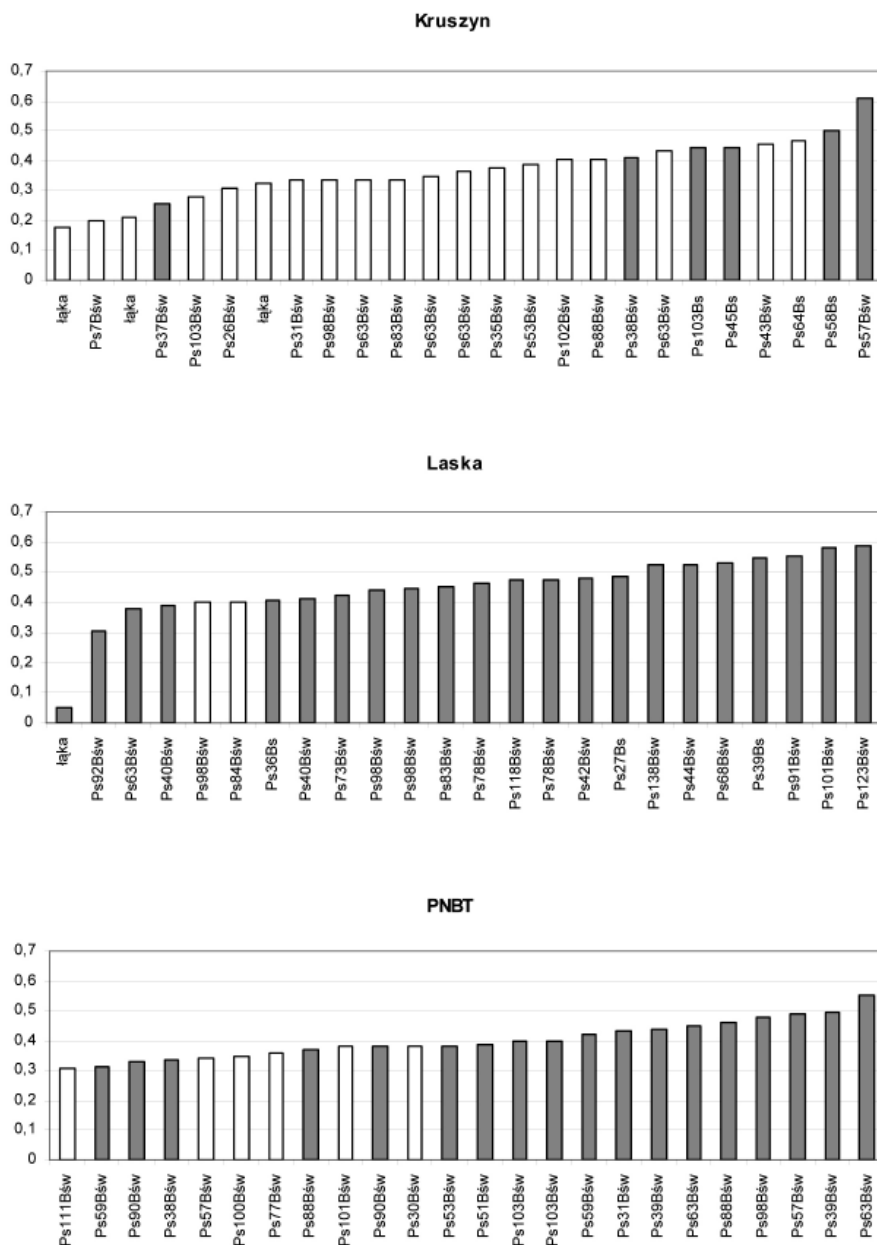
dzonych na bazie zdjęć Landsat TM i ETM+.

Każdą powierzchnię próbną wyznaczoną w obrębie poligonu badawczego PNBT dziś porastają drzewostany wyższych klas wieku na siedlisku boru świeżego. Te z nich, które ponad 120 lat temu były gruntami ornymi mają niższe wartości NDVI od powierzchni, które przez cały rozważany horyzont czasowy były porośnięte lasem. Na rycinie 4c powierzchnie w przeszłości użytkowane rolniczo zaznaczone są kolorem jasnoszarym. Niższe wartości NDVI porolnych powierzchni próbnych wystąpiły we wszystkich uwzględnianych okresach rejestracji satelitarnej skanerami Landsat TM i ETM+.

W analizach zmienności wskaźnika roślinności na powierzchniach próbnych trzech poligonów badawczych nie stwierdzono korelacji pomiędzy średnim wiekiem drzewostanu a średnią wartością NDVI.

Syntezę porównań wskaźników struktury krajobrazu dla trzech poligonów badawczych, obliczonych ze zdjęć satelitarnych o wyższej rozdzielczości (t.j. TM, ETM+), prezentuje rycina 5. Krzywe wykreślone metodą graficzną Jentys-Szaferowej (1948) wskazują, że we wszystkich przypadkach najniższe wartości NDVI uzyskiwał poligon Kruszyn. W analizach przeprowadzonych na podstawie zdjęć Landsat ETM+ z 2000 roku różnice pomiędzy powierzchniami były największe. Tylko w tej analizie poligon badawczy Laska uzyskał najwyższą wartość NDVI. W analizie ETM+ z 2003 roku zaznaczyło się natomiast duże podobieństwo poligonów badawczych Laska i PNBT. Na rycinie 5 ich linie niemal pokrywają się.

Dane zamieszczone w tabeli 3 oraz położenie punktów oznaczających poszczególne cechy na ryc. 5 wskazują, że niższym wartościom NDVI odpowiadają wyższe wskaźniki H, FD i F. Zwłaszcza ten ostatni parametr uzyskuje wysoką wartość przy niskim NDVI. Wymienione zależności najsilniej ujawniły się w analizach przeprowadzonych na podstawie zobrazowania ETM+ z 2003 roku w serii obliczeń bez uwzględnienia wód i terenów bagiennych. W takiej analizie poligonu badawczego Kruszyn, obejmującego sporo lasów wtór-

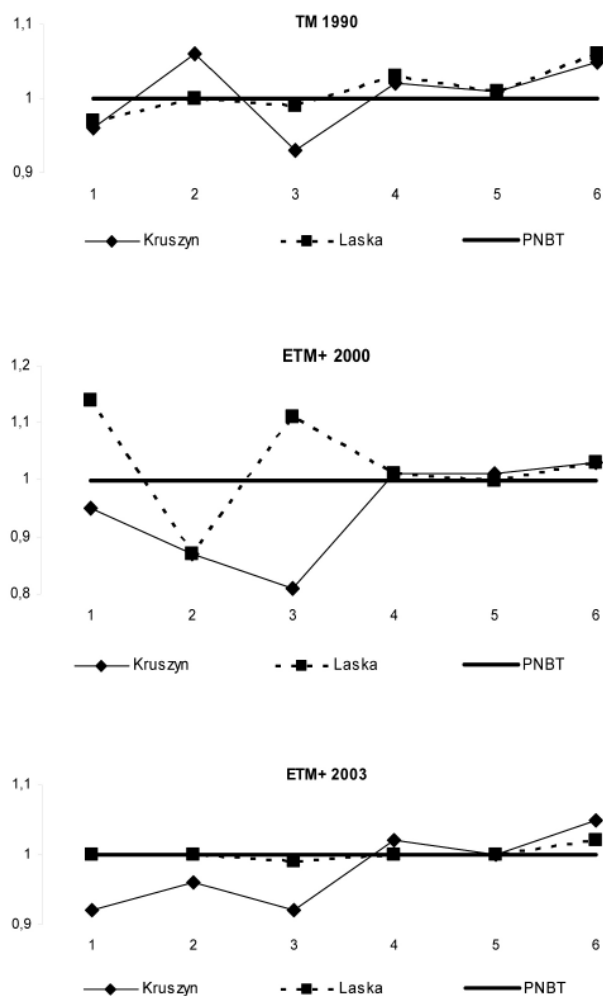


Ryc. 4. Średnia wartość NDVI (rok 2000) obszaru badań (kolor ciemnoszary pokazuje obszary, gdzie w 1874 roku występowały ekosystemy leśne); oznaczenia: Ps – *Pinus sylvestris*, wiek drzewostanów, Bśw lub Bs – bór świeży lub bór suchy.

Fig. 4. Mean NDVI value (year 2000) of researched areas within study areas (a dark grey colour marks the areas on which there were forest ecosystems in 1874); notation: Ps – *Pinus sylvestris*, age of trees, Bśw or Bs – fresh or dry pine forest.

nych na gruntach porolnych, uzyskano niskie wartości NDVI i wysoki FD. Poligon badawczy PNBT, na którym brak było powierzchni zrębowych, osiągnął natomiast wysoki NDVI przy niskiej wartości FD.

Znaczne podobieństwo powierzchni Laska i PNBT (a tym samym odrębność powierzchni Kruszyn) potwierdziły wyniki klasyfikacji ordynacji numerycznej. Poligony badawcze Laska i PNBT na dwóch spośród trzech sporządzonych dendrogramów tworzą wspólne skupienie (ryc. 6). Położone są też blisko siebie na diagramie ordynacyjnym wykonanym metodą składowych głównych (ryc. 7).



Ryc. 5. Porównanie wskaźników 3 powierzchni badawczych metodą graficzną Jentys-Szaferowej dla TM1990, ETM+2000 i ETM+2003. PNBT (linia pozioma) jest jednostką porównawczą. Oznaczenie cech: 1- NDVI, 2 –max NDVI, 3- NDVI bez ekosystemów wodnych, 4 – różnorodność (H), 5 – wymiar fraktalny (FD), 6 – fragmentacja (F).

Fig. 5. The comparison of indices of 3 study areas analyzed by the graphical method of Jentys-Szaferowa for TM1990, ETM+2000 and ETM+2003. PNBT (vertical line) is the comparison unit. Notation of features: 1- NDVI, 2 –max NDVI, 3 – NDVI disregarding aquatic ecosystems, 4 – diversity (H), 5 – fractal dimension (FD), 6 – fragmentation (F).

Dyskusja i wnioski

Przeprowadzone w oparciu o zobrazowania satelitarne analizy porównawcze poligonów badawczych wykazały istnienie dość wyraźnych różnic w strukturze przestrzennej krajobrazu pozornie homogenicznych obszarów. Wybrane poligony badawcze, mimo, iż dzisiaj prawie w całości pokryte są przez bory sosnowe i reprezentują jeden typ krajobrazu, w przeszłości porośnięte były przez bardziej zróżnicowane fitocenozy, zarówno leśne jak i nieleśne, odpowiadające różnorodnym formom użytkowania terenu. Oprócz zmienności wynikającej ze sposobu użytkowania i zagospodarowania kra-

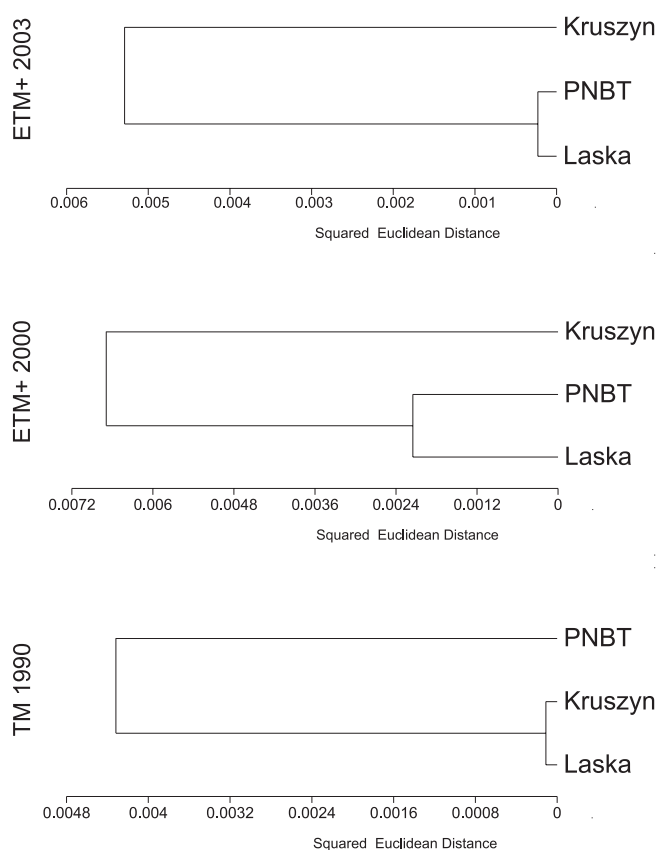
jobrazu w przeszłości analizowane poligony badawcze wykazują wyraźne zróżnicowanie ze względu na stosowaną współcześnie formę ochrony ich walorów przyrodniczych. Jest to dziś główny czynnik, który decyduje o intensywności prowadzenia gospodarki leśnej na poszczególnych obszarach.

Z porównań zakresów i średnich wartości NDVI na trzech poligonach badawczych oraz danych pochodzących z historycznych materiałów kartograficznych wynika, że zmiany przestrzenne wartości NDVI odnotowane na aktualnych zdjęciach satelitarnych zdeterminowane są przez odmienne typy roślinności jakie rozwinęły się w miejscach różnie użytkowanych w przeszłości. Na obszarach leśnych zlokalizowanych w północnej części Zaborskiego Parku Krajobrazowego, gdzie wyznaczono poligon badawczy Kruszyn, przeważają bory sosnowe odtworzone na gruntach porolnych. Pod względem składu gatunkowego występujące tu fitocenozy nawiązują do borów suchych *Cladonio-Pinetum*. Podobieństwo wynika głównie z mniejszego udziału krzewinek oraz wysokiej frekwencji i pokrycia porostów naziemnych. Znaczną powierzchnię w tej części parku krajobrazowego zajmuje też wyróżnione przez Boińskiego (1992) zbiorowisko *Pinus-Calluna*. Bór wrzosowy wykształcił się głównie wskutek zalesiania na przełomie XIX i XX wieku ubogich pastwisk. W zbiorowisku tym, oprócz wrzosu zwyczajnego i mszaków, znaczną rolę odgrywają porosty naziemne. Pod względem składu gatunkowego i fizjonomicznie fitocenozy tej jednostki syntaksonomicznej są więc dość mocno zbliżone do boru suchego.

Ze względu na mniejszy stan biomasy zielonej i niższą zawartość chlorofilu na jednostkę powierzchni terenu notowaną w lasach nawiązujących do borów suchych, NDVI w kompleksach lasów porolnych, w których dominują takie fitocenozy, jest niższy niż w lasach, których rozwój nie był przerwany czasowym użytkowaniem rolniczym. Na podstawie wcześniejszych badań przeprowadzonych metodami teledetekcji satelitarnej stwierdzili to Kunz i in. (2000). Analiza poligonu badawczego Kruszyn przeprowadzona w ramach niniejszej pracy wskazuje jednak, że w kompleksach lasów porolnych nie zawsze występuje taka zależność.

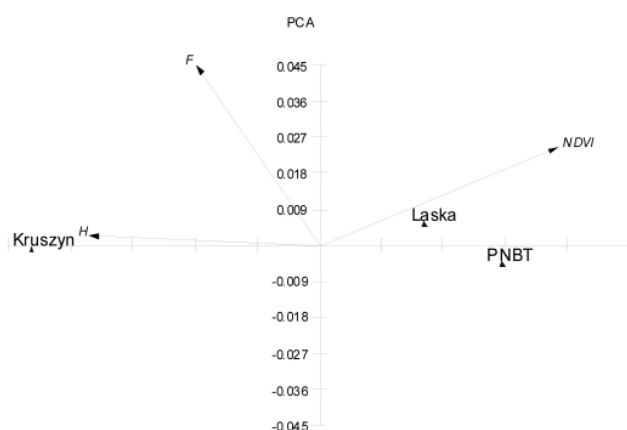
Inne zbiorowiska leśne dominują w południowej części terenu badań, tj. w miejscu gdzie utworzono park narodowy. Ponieważ obszar ten nie był w przeszłości użytkowany rolniczo, a degeneracja zbiorowisk leśnych następowała głównie poprzez wprowadzanie monokultur sosnowych na zręby, dziś dominują tu bory świeże, sklasyfikowane jako zespół *Leucobryo-Pinetum*. Wskaźnik NDVI fitocenz tego syntaksonu jest zazwyczaj wyraźnie wyższy niż płatów roślinności należących do zespołu boru suchego *Cladonio-Pinetum*.

Z danych podawanych przez Barcikowskiego (1992) wynika, że na niższe wartości NDVI dla obszarów obejmujących lasy intensywnie eksploatowane na siedlisku boru suchego i boru świeżego najbardziej wpływa obecność zrębów i kilkuletnich upraw sosnowych. Biomasa zielona i wskaźnik chlorofilu w takich układach ekologicznych są bardzo niskie. W fitocenzach w wieku od



Ryc. 6. Różnice pomiędzy powierzchniami badawczymi Kruszyn, Laska i PNBT.

Fig. 6. Dissimilarity between plots Kruszyn, Laska and PNBT.



Ryc. 7. Ordynacja trzech powierzchni badawczych na podstawie obrazu Landsat ETM+ z 2000 roku.

Fig. 7. Ordination of three sample plots analyzed on the basis of Landsat ETM+ imagery from 2000.

około 20 lat zmiany obu parametrów w zależności od wieku drzewostanu są już niewielkie. Stąd też na obszarze dzisiejszego parku narodowego, gdzie dominuje drzewostan od III do VI klasy wieku na siedlisku boru

świeżego, zaznacza się nie tylko wyższa wartość NDVI, ale również notuje się niższą różnorodność i fragmentację krajobrazu obliczoną na podstawie zmienności przestrzennej tego wskaźnika.

Natomiast na powierzchniach obejmujących lasy intensywnie eksploatowane obecność wielu powierzchni zrębowych i kilkuletnich upraw sosnowych powoduje, że wartość NDVI jest niska, zaś różnorodność i fragmentacja wysoka. Kierunek zmian dwóch ostatnich parametrów jest zgodny z obliczeniami jakie na teoretycznych modelach struktury krajobrazu leśnego charakteryzujących się różnym udziałem i rozmieszczeniem powierzchni zrębowych przeprowadzili Franklin i Forman (1987).

W porównaniach przeprowadzonych w niniejszej pracy użyto zdjęć satelitarnych z lat 1975-2003. Badano więc stan istniejący na kilka lat przed i w okresie ponad 8 lat po ustanowieniu Parku Narodowego „Bory Tucholskie”. Po utworzeniu parku narodowego pozyskanie drewna zostało mocno ograniczone a czystych zrębów nie stosuje się wcale. Stąd różnice pomiędzy częścią południową i środkową badanego kompleksu leśnego a jego częścią północną pogłębiły się, chociaż na terenach intensywnej gospodarki leśnej ogranicza się dziś także stosowanie czystych zrębów, a jeśli są one stosowane to na porębach pozostawia się zazwyczaj biogrupy drzew poprzedniego pokolenia jako nasienniki.

Powstanie parku narodowego przyczyniło się do zmniejszenia różnorodności i fragmentacji krajobrazu leśnego w tej części Borów Tucholskich. Jakie są następstwa stosowania od niedawna nowych technologii w lasach gospodarczych będzie można określić poprzez porównanie współczesnych obrazów satelitarnych z tymi które zostaną wykonane dopiero w następnej dekadzie, tj. po 2010 roku.

W przeprowadzonej analizie dało się zauważyć wpływ dwóch zasadniczych czynników na aktualną zmienność przestrzenną NDVI w Zaborskim Parku Krajobrazowym. Pierwszy to dawne użytkowanie rolnicze tego terenu, które przejawiało się przede wszystkim w dużej odrębności poligonu badawczego Kruszyn (dawne wrzosowiska i pastwiska) oraz znacznym podobieństwem poligonów Laska i PNBT, na których w przeszłości zręby były szybko zalesiane. Drugi czynnik to intensywność bieżącej gospodarki leśnej. Poligon badawczy Laska z lasami gospodarczymi (użytkowanymi dziś z podobną intensywnością jak lasy w rejonie Kruszyna) ma parametry NDVI i FD bardziej zbliżone do poligonu PNBT niż Kruszyn. Wartości NDVI poligonu badawczego Laska, który w przeszłości nie był użytkowany rolniczo, są jednak niższe od NDVI parku narodowego, w którym dziś drewno nie jest pozyskiwane i uprawy leśne nie występują.

Stwierdzona przez nas odwrotna zależność pomiędzy NDVI a wymiarem fraktalnym w krajobrazie leśnym jest zgodna z zależnościami podanymi przez Altobelliego i in. (2001) dla obszaru charakteryzującego się większą liczbą typów krajobrazu niż raczej jednorodny obszar ZPK. Podobnie jak autorzy cytowanej pracy w naszych

badaniach również stwierdziliśmy, że presja człowieka na przyrodę powoduje spadek NDVI i wzrost fragmentacji krajobrazu.

Przeprowadzona analiza wykazała też dużą przydatność metod taksonomii numerycznej do analizy do interpretacji danych pozyskanych ze zdjęć satelitarnych oraz do określenia związków pomiędzy wskaźnikami opisującymi strukturę krajobrazu.

Charakterystykę spektralną pokrywy roślinnej Zaborskiego Parku Krajobrazowego utrudnia bardzo duże zróżnicowanie wiekowe drzewostanów i występowanie dużej ilości pododdziałów leśnych o niewielkich powierzchniach. Ten drugi czynnik sprawia, że przy rozdzielczości terenowej pikseli wynoszącej 30x30 m trudno znaleźć odpowiednio dużą, jednorodną powierzchnię badawczą. Dla precyzyjnego określenia wpływu dawnego użytkowania rolniczego gleb na kondycję odtworzonych lasów i zmienność przestrzenną NDVI należałoby więc przeprowadzić analizę przy zastosowaniu wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych. Umożliwiłoby to pozyskanie z obrazu satelitarnego dużych zbiorów pikseli, które stanowiłyby odpowiedzi spektralne drzewostanów tego samego wieku występujących na tym samym siedlisku i w miejscach o podobnym użytkowaniu terenu w przeszłości.

Literatura

- Altobelli A., Feoli E., Ourabia L., 2001, An overview of landscape structure through the application of fractal dimension to remotely sensed images using GIS technology, [In:] Nienartowicz A., M. Kunz (eds.) *GIS and remote sensing in studies of landscape structure and functioning*, pp. 39-50, Nicolaus Copernicus University Press, Toruń.
- Barcikowski A. 1992, Differentiation in the structure and energy flow in phytocenoses with primary and secondary succession, [In:] Bohr R., Nienartowicz A., Wilkoń-Michalska J. (eds.), *Some ecological processes of biological systems in North Poland*, pp. 35-58, Nicolaus Copernicus University Press, Toruń.
- Boiński M., 1992, *Osobliwości szaty roślinnej Borów Tucholskich*, Tow. Miłośników Borów Tucholskich, Toruń.
- Clarke K.C., 1986. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surface using the Triangular Prism Surface Area Methods, *Computer and Geosciences*, 12: 713-722.
- Franklin J.F., Forman R.T.T., 1987, Creating landscape pattern by forest cutting: Ecological consequences and principles, *Landscape Ecology* 1: 5-18.
- Jagii S., Quattrochi D.A., Lam N.S.N., 1993. Implementation and operation of three fractal measurement algorithms for analysis of remote sensing data. *Computer and Geosciences*, 19: 745-767
- Jentys-Szaferowa J., 1948, Graficzna metoda porównywania kształtów roślinnych, *Kosmos* 66: 349-357.
- De Jong S.M., Burrough P.A., 1995, A fractal approach to the classification of Mediterranean vegetation types in remotely sensed images, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61 (8): 1041-1053.
- Kovach W. L., 1993, *MVSP – A Multi Variate Statistical Package for IBM PC's*, version 2.1, Kovach Computing Services, Pentraeth, Wales, UK.
- Kunz M., 1999, System Informacji Geograficznej (GIS) Zaborskiego Parku Krajobrazowego, [W:] Barcikowski A., Boiński M., Nienartowicz A. (red.), *Wielofunkcyjna rola lasu. Ochrona Przyrody-Gospodarka-Edukacja*, Wyd. UMK, Toruń.
- Kunz M., Nienartowicz A., Deptuła M., 2000, The use of satellite remote sensing imagery for detection of secondary forests on post-agricultural soils: A case study of Tuchola Forest, northern Poland, [In:] Casanova L. (ed.), *Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications*, pp. 61-66, A.A. Balkema/ Rotterdam/Brookfield.
- Lam M.S.N., 1990, Description and measurement of Landsat TM images using fractals, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56 (2): 187-195.
- Monmonier M.S., 1974, Measures of pattern complexity for choropleth maps, *The American Cartographer* 1(1): 159-169.
- Murphy D.L., 1985, Estimating neighborhood variability with a binary comparison matrix, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 51(6): 667-674.
- Olsen E.R., Ramsey R.D., Winn D.S., 1993, A modified fractal dimension as a measure of landscape diversity, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59 (10): 1517-1520.
- Rouse, J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *ERTS Symposium*, NASA SP-351 I: 309-317.
- Turner M.G., 1989, Landscape ecology: the effect of pattern on process, *Annales Reviews in Ecology and Systematics* 20: 171-197.



Dr Mieczysław Kunz jest adiunktem w Zakładzie Kartografii, Teledetekcji i GIS Instytutu Geografii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Zajmuje się wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej (GIS) i teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego. Wykłada m.in. przedmioty: GIS, teledetekcja środowiska oraz analizy przestrzenne w badaniach środowiska przyrodniczego.



Prof. dr hab. Andrzej Nienartowicz jest kierownikiem Pracowni Modelowania Procesów Ekologicznych w Instytucie Ekologii i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Wykłada m.in. przedmioty: GIS i teledetekcja, taksonomia numeryczna, energetyka ekologiczna. Główne zainteresowania badawcze to: energetyka dużych systemów ekologicznych, ekorozwój i systemy informacji geograficznej.