

**WYMIAR FRAKTALNY FRAGMENTÓW ZDJĘĆ LOTNICZYCH STREFY
PRZYBRZEŻNEJ JEZIORA MIKOŁAJSKIEGO, ŚNIARDW I ŁUKNAJNO**

**FRACTAL DIMENSION OF FRAGMENTS OF AERIAL IMAGES OF SHORELINE
ZONES OF THE LAKES MIKOŁAJSKIE, ŚNIARDWY AND ŁUKNAJNO**

Jerzy Mialdun¹, Marek Ostrowski²

¹Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

²Organization of Scientific Research SCI-ART, Independent Image Information
Study & Faculty of Biology, Warsaw University

SŁOWA KLUCZOWE: teledetekcja, wymiar fraktalny, krajobraz ekologiczny, litoral, jeziora: Śniardwy, Łuknajno, Mikołajskie

STRESZCZENIE: Opis, klasyfikacja i wizualizacja cech przestrzeni są podstawowymi czynnikami budującymi wielowymiarowy intelektualny model środowiska naturalnego. Jednym z kryteriów opisu środowiska jest wnioskowanie analityczne i ocena dynamiki zjawisk na podstawie cech strukturalnych, przy czym struktura przestrzeni i kształtujące ją zjawiska zależą w znacznym stopniu od przyjętych założeń i sposobu rejestracji, analizy oraz zastosowanych narzędzi. Jedną z metod oceny krajobrazu ekologicznego, która staje się coraz bardziej znacząca i doceniana, jest wymiar fraktalny satelitarnych i lotniczych zobrazowań powierzchni Ziemi.

W pracy, i w opisie krajobrazu, wykorzystano wymiary fraktalne, których algorytmy obliczania zostały oparte na „metodzie graniastosłupów trójkątnych” w opcji zarówno globalnej, jak i lokalnej.

Do testowania metody wykorzystano zeskanowane spektrostrefowe zdjęcia lotnicze pobraża i litoralu jezior charakterystycznych jezior mazurskich: Mikołajskiego, Śniardw i Łuknajno. Są to obszary o zróżnicowanym przestrzennie i strukturalnie litoralu obejmującego pasy: roślinności bagiennej, roślin wynurzonych (trzciniowiska), roślin pływających, jak i – również uwidocznioną na zdjęciach – strefę podwodną roślin zanurzonych, które porastają dno zbiornika. W celu porównania i klasyfikacji obliczonych wymiarów fraktalnych wybrano fragmenty wymienionych zbiorników obrazujące przykłady różnych stref roślinności przybrzeżnej, a także dodatkowo, jako obszary referencyjne, obszary lądowe w różnym stopniu użytkowane rolniczo, zalesione lub zurbanizowane, charakteryzujące się zróżnicowanymi formami tekstury.

Wyniki badań wykazały, że przy odpowiedniej standaryzacji przygotowania danych teledetekcyjnych, wymiar fraktalny może być cennym wskaźnikiem różnorodności krajobrazu i jego klasyfikacji jakościowej.

1. WSTĘP

Jedną z podstawowych metod rozpoznania powierzchni troposfery są metody obrazowe, w tym teledetekcja lotnicza i satelitarna. Polegają one na radiometrycznym mapowaniu przestrzeni w poszczególnych zakresach spektralnych w dwóch lub trzech wymiarach geometrycznych. Analiza obrazów uzyskanych tą drogą prezentuje typ krajobrazu niezna-

nego wcześniej człowiekowi, a jego rozpoznanie jest jednym z elementów ewolucji cywilizacyjnej ery antropocenu i jednocześnie formą opisu i rozumienia przestrzeni.

Informacja obrazowa jest transformacją wielowymiarowej przestrzeni rzeczywistej w dwuwymiarową przestrzeń obrazu. Ten sposób uporządkowania informacji uprościł złożoność rzeczywistej przestrzeni, z drugiej zmusił do wypracowania wyspecjalizowanych procedur analizy i wynikającej z niej interpretacji tak uporządkowanej informacji.

W badaniach obrazowych środowiska najczęściej mamy do czynienia z obiektami dyskretnymi wydzielanymi ze struktur obrazowych na podstawie zróżnicowania tonalnego, spektralnego i teksturalnego. Jest to podstawowa, ewolucyjnie najbardziej fundamentalna forma analizy informacji obrazowej odpowiadająca wstępnemu etapowi analizy obrazu dokonującemu się na powierzchni siatkówki oka zrastrowanej receptorami i polami receptorowymi. Obiekty obrazowe są zależne nie tylko od skali odwzorowania obiektów terenowych, ale również skali analizy samego rastra obrazu, zbudowanego w dużej skali z podstawowych jednostek obrazu: ziaren srebra lub pikseli (vokseli). Wraz ze zmniejszaniem się skali i wzrastającą generalizacją układają się one w obiekty obrazowe wyższego stopnia tworząc nowe zbiory. Obiekty te wyodrębniają i reprezentują formy środowiska: morfologiczne, teksturalne, spektralne, kontekstualne itd.

Pierwotna informacja i jej dyskretne przetworzenia w mózgu ulegają ciągłym złożonym przekształceniom generując struktury ciągłe (dynamiczne). Procesy te, będące fundamentem aktywności naturalnych sieci neuronowych, można próbować opisywać m.in. poprzez definiowanie równań różniczkowych lub modeli procesów stochastycznych.

Wśród wielu różnorodnych procedur służących do wyznaczania obszarów obrazowych i badania ich jednorodności można wymienić analizę fraktalną, jako narzędzie kwantyfikacji przestrzennej i strukturalnej.

Geometria fraktalna jest procedurą, która umożliwia opisanie i klasyfikację przestrzeni, a jednym ze sposobów wymiarowania jest wyznaczanie wymiaru fraktalnego D_f struktur obrazowych. Pozwala on wyodrębniać jednorodne obszary i formy, a jednocześnie generalizować je w celach ich kartowania.

Analiza fraktalna umożliwia bezpośrednie badanie złożonych form geometrycznych bez używania modeli znacznie upraszczających dane źródłowe (obrazowe). Wynika to bezpośrednio z założenia, że rzeczywistość fraktalna (natura) ma strukturę samopodobną w każdej skali w sensie stochastycznym. Wymiar fraktalny lotniczego lub satelitarnego obrazu powierzchni Ziemi jest obecnie uznawany za istotną cechę rozpoznawczą przestrzeni, w tym krajobrazu ekologicznego (Frohn R., 1998, Olszewski R., 2001). Analizę fraktalną stosuje się w bardzo wielu dziedzinach. Najczęściej, już klasycznie, stosuje się do opisu złożoności struktur liniowych nie tylko dużych obiektów np. linii brzegowej, sieci rzecznej, krawędzi pól, ale z równym powodzeniem w skali makroskopowej np. obrysu kształtu blaszek liściowych czy rozkładu sieci naczyń niezbędnych w modelowaniu struktury mózgu (La Brecque M., 1986, Peitgem H.-O et al., 1996).

Kolejnym obszarem zastosowań analizy fraktalnej jest analiza procesów chaotycznych zachodzących w układach dynamicznych. Dotyczy to m.in. przepływów, dyspersji, turbulencji, fluktuacji – zjawisk opisywanych nie tylko w naukach zajmujących się badaniem zjawisk naturalnych świata fizycznego i biologicznego, ale również zjawisk z zakresu socjologii czy ekonomii (Mandelbrot, 2005).

Analiza fraktalna wykorzystywana jest coraz częściej do badania nierównomierności rozkładu powierzchniowego. Podmiotem badań są zarówno zjawiska związane z wielkoob-

szarowym przemieszczaniem się zawiesziny w toni zlewni, sieci rzek lub zawieszonych w toni mórz i oceanów, jak i obrazy struktur makroskopowych np. form geologicznych czy też powierzchni dna oka. Przykładem reprezentującym pierwsze z tych zagadnień są opracowania począwszy od zastosowań w geofizyce (Schulz C. H., 1989) po obszerne badania fluktuacji rozprzestrzeniania się zawieszin w zlewni, które opracowują rozbudowane interdyscyplinarne zespoły badawcze złożone z wielu specjalistów z różnych dziedzin. (Godsey, 2010) Z kolei przykładem badań nierównomierności powierzchni w skali makroskopowej jest np. badania dna oka. Wymiar fraktalny różnicuje przestrzennie powierzchnię siatkówki pozwalając na rozpoznanie odstępstw w kierunku jaskry (wymiar fraktalny 2,5–2,7) od normy (wymiar fraktalny 2,4–2,5) (Berndt-Schreiber M., 2004). Badania powierzchni rastrowej, jaką jest siatkówka oka złożona z receptorów i funkcjonalnych pól receptorowych, są bardzo bliskie analizom środowiskowym objętych niniejszą pracą.

Przedmiotem analiz w tej pracy są zdjęcia spektrostrefowe w zakresie widzialnym i podczerwieni stref granicznych (przejściowych) między lądem i zbiornikami wodnymi. Strefy przejściowe (wszelkie strefy przejściowe – nie tylko geomorfologiczne, ale również klimatyczne, antropogeniczne, zbiorowiskowe, czasowe, kulturowe itd.) czyli powstające na styku jednorodnych obszarów (zagadnień) są jednymi w ciekawszych poznawczo tematów analizy środowiska przyrodniczego. Badane w niniejszej pracy strefy graniczne rozdzielają dwie klasy obszarów środowiskowych: lądowe i wodne. Granice nie muszą stanowić statycznej, biernej bariery rozdzielającej obszary, ale odwrotnie – mogą stanowić obszar intensywnej wymiany między sąsiadującymi obszarami, pełniąc aktywną rolę w przepływie i w transformacjach materii, energii i informacji, wyróżniając się przy tym swoją entropią – dynamiką spontanicznych procesów wynikających z przepływu.

Strefa brzegowa rozdziela obszary lądu od obszarów wodnych. Składa się z wielu gradientowo usytuowanych podstref ułożonych równolegle do siebie: pasa wybrzeża (pasa lądu przyległego do zbiornika), pobrzeża (strefy przejściowej) oraz litoralu.

Litoral jest zanurzoną częścią dna zbiornika stanowiącą przedłużenie spadku wyniesienia lądowego. Charakteryzuje się zarówno strefowością, jak i w jej obrębie wewnętrzną niejednorodnością strukturalną będącymi indykatorami głębokości, składu gatunkowego i zróżnicowania zbiorowisk roślinnych. Zróżnicowaniu temu towarzyszy zmienność populacji zwierząt wodnych związanych z siedliskiem (głębokością, natlenieniem, rodzajem podłoża, falowania itd.) – rys. 1. Zbiorowiska tych podstref są rozpoznawalne na obrazach lotniczych i satelitarnych i stanowią element klucza interpretacyjnego.

Na poziomie teledetekcyjnym rozpoznawalne spektralnie i teksturalnie są zarówno zbiorowiska roślin wynurzonych, jak i tworzących podwodne łąki. W układzie poziomym tworzą one nie tylko ciągłe czy poprzerywane strefy pasowe wzdłuż brzegów, ale występują też w postaci struktur o bardziej zróżnicowanych formach (np. układy liniowe, formy pierścieniowe). Na podstawie tych wartości można mapować z jednej strony zasięg stref roślin wynurzonych i podwodnych, z drugiej określać skład gatunkowy i dominanty zbiorowisk.

Ilościowe i jakościowe rozpoznanie na podstawie analizy zdjęć lotniczych w podczerwieni: zbiorowisk roślinnych budujących strefę przejściową oraz litoral, składu gatunkowego makrofitów, gęstości pokrycia, biomasy, a także ich kondycji ma duże znaczenie praktyczne. Rośliny te są naturalną barierą ograniczającą spływ do wód zanieczyszczeń lądowych zarówno mineralnych (bariera mechaniczna), jak i nawozów, pestycydów, metali (bariera chemiczna). Największe znaczenie mają pasy oczeretów – obszary o najsilniejszej akumulacji zanieczyszczeń ograniczające ich rozprzestrzenianie się w toni jezior.



Rys. 1. Strefowość litoralu w przekroju pionowym.
Profil stref roślinności w toni zależnie od głębokości (penetracji światła)

Rozpoznanie spektralne w zakresie widzialnym oraz podczerwieni nie jest jednak wystarczające do rozpoznania, sklasyfikowania gatunkowego i scharakteryzowania wewnętrznej struktury zbiorowisk roślin przybrzeża i pasa oczeretów, tak ważnej w jakościowej klasyfikacji i ocenie kondycji zbiorowisk roślinnych. Istotne jest odczytanie zróżnicowania teksturalnego, które zależne jest nie tylko od gatunku, ale nawet od lokalnych korytarzy i strumieni powietrza (również prądów strumieni przepływających w toni jeziora) powodujących m.in. kładzenie się roślin czy ukierunkowanie rozprzestrzenia się. Stąd potrzeba szukania nowych metod i nowych wzorców teledetekcyjnych.

Jednym z kierunków takiego rozpoznania może stać się analiza fraktalna, która pozwala charakteryzować i obliczać nie tylko złożone ciągi obwodów pól obrazowych odpowiadających zasięgom gatunków, zbiorowisk czy zróżnicowaniu mechanicznemu roślin, ale również jakościowo rozpoznawać (identyfikować) obiekty i obszary na podstawie wzorców teksturalnych.

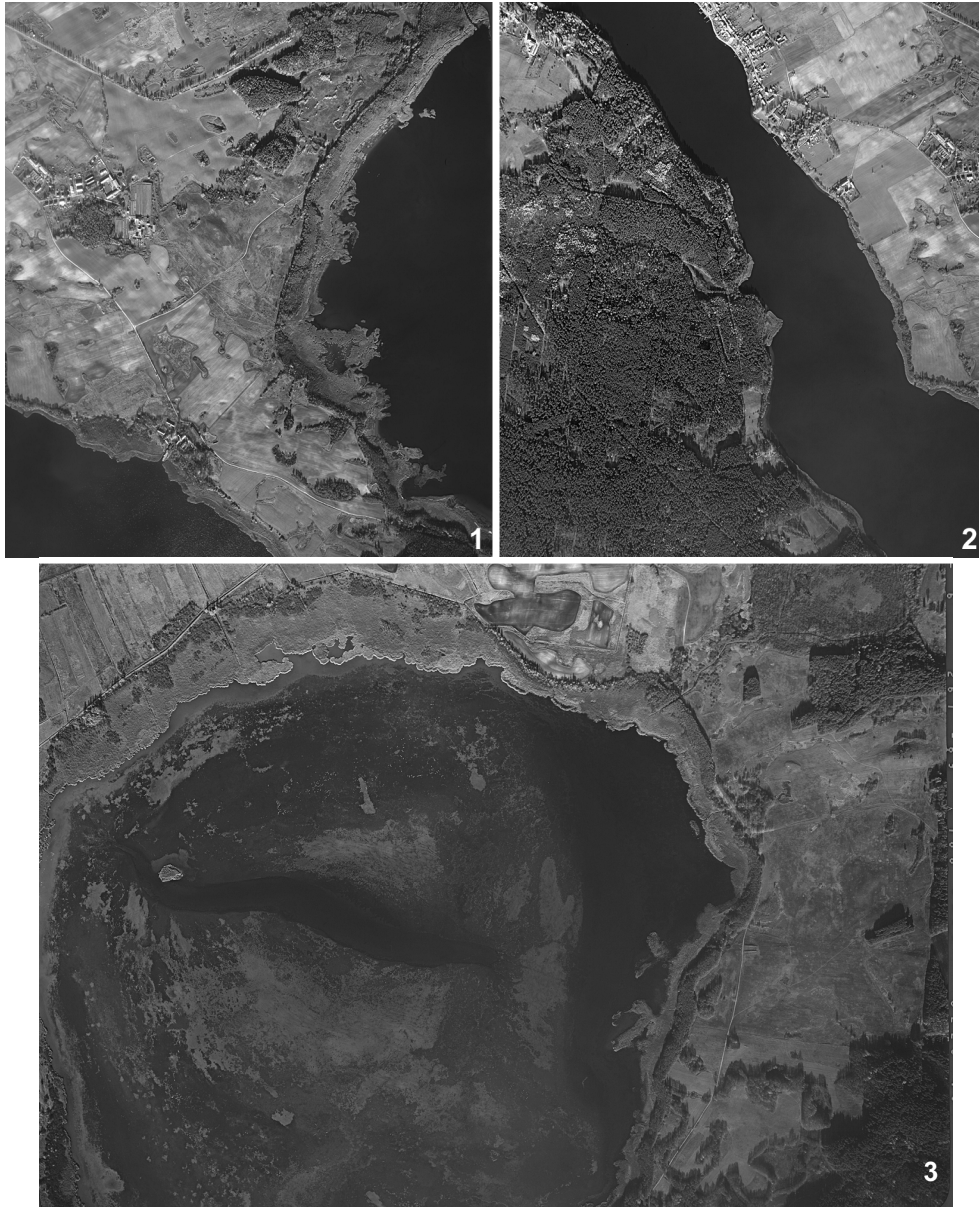
W badaniach sływu zanieczyszczeń z lądu do zbiorników oraz badania wpływu zanieczyszczeń na makrofitę wynurzone i zanurzone litoralu jeziornego rozpoznawanie i klasyfikowanie powinno dotyczyć w przyszłości nie tylko samej strefy przejściowej stanowiącej naturalną oczyszczalnię, ale również przylegających obszarów lądowych i wodnych, które rozdziela. Badania teksturalne powinny obejmować rozpoznanie otaczającego zbiorniki środowiska lądowego, zarówno naturalnego, jak i przekształconego.

Analizy fraktalne wymienionych środowisk wodnych i lądowych powinny być prowadzone tą samą metodą, aby można było porównywać je między sobą. Dlatego też badania struktury zbiorowisk roślinnych stref granicznych między lądem a wodą prowadzone metodą analizy fraktalnej należy zastosować bardziej wszechstronnie.

2. MATERIAŁ I METODY

Jako materiał źródłowy posłużyły zdjęcia lotnicze pobrażone jezior: Łuknajno, Mikołajskie i Śniardwy wykonane w listopadzie 2002 r. na materiale spektrostrefowym (Ostrowski, 2002). Zdjęcia zeskanowano skanerem EPSON PERFECTION V750 PRO z rozdzielczością 1200 DPI w trybie barwnym R, G, B 8 bitów na kanał. Pobieża charakteryzują się prostą linią brzegową typową dla większości jezior obszaru Polski, a więc wypracowane wnioski będą miały bardziej uniwersalne zastosowanie. Do analizy zostały

wybrane te fragmenty, w których rozpoznane na zdjęciach powierzchnie makrofitów litoralu są zróżnicowane zarówno pod względem szerokości pasa, składu gatunkowego, form zarastania jeziora, jak i niejednorodności strukturalnej (rys. 2).



Rys. 2. Fragmenty zdjęć spektrostrefowych wyrażonych w skali szarości wykorzystanych w badaniach: 1 – jezioro Mikołajskie i Śniardwy w okolicy wsi Stawek i Dybowo, 2 – jezioro Mikołajskie na południe od Mikołajek, 3 – północno-wschodnia część jeziora Łuknajno

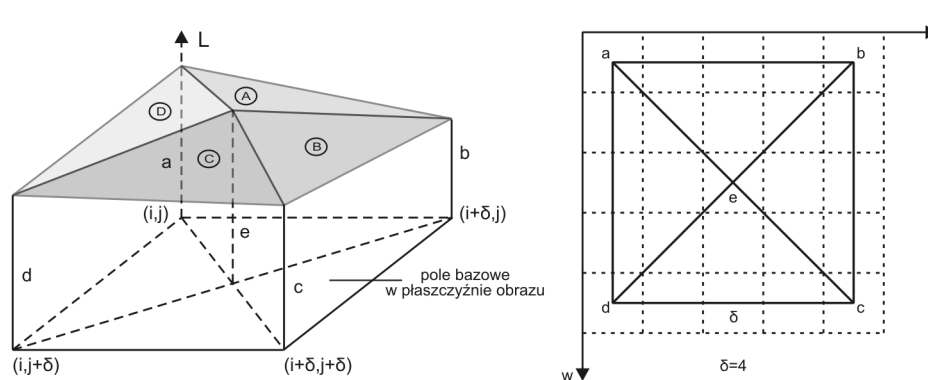
W dalszej części pracy szczególną uwagę skierowano na obszar strefy litoralu jez. Łuknajno. Jez. Łuknajno jest jeziorem wyplyconym (średnia głębokość 0.6 m), zarastającym, eutroficznym, w którym strefa litoralu obejmuje całą powierzchnię zbiornika. Na obrazie lotniczym wyróżniają się nie tylko strefy roślinności wynurzonej i pływającej, ale również podwodne łąki ramienic (*Chara* sp.). Pas roślinności wynurzonej zbudowany jest z szuwarów trzcinowych i turzycowych z kępami zarośli wierzbowych, którym towarzyszą podmokłe olsy. Struktury te wydają się wykazywać cechy samopodobieństwa, przynajmniej w pewnym zakresie powiększeń.

Brzegi wokół zbiornika są płaskie. Szeroka strefa lądu otaczająca jezioro to obszar rolniczy z mozaiką pól użytków i nieużytków rolnych rozpoznawanych na podstawie odmiennej tekstury.

2.1. Obliczanie wymiaru fraktalnego metodą graniastosłupów trójkątnych

Pojęcie wymiaru fraktalnego D_f wprowadził Mandelbrot (Mandelbrot, 1967). Nie jest on jednak pojęciem jednoznacznie zdefiniowanym, a dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że matematycy podają kilka różnych definicji. Dlatego metod obliczania wymiaru fraktalnego jest wiele. Wśród nich jest często stosowana metoda graniastosłupów trójkątnych (Clarke, 1986; De Jong et al., 1995; Qiu et al., 1999; Sun et al., 2005; Sun, 2006). Opiera się ona na podobieństwie do obliczania wymiaru metodą cyrklową (Mandelbrot, 1967; Peitgen et al., 1996). Wielkość wymiaru liczona tym sposobem dla powierzchni zawiera się między $1 \div 2$.

Pole powierzchni chropowatej można obliczać z różną precyzją stosując różne wielkości miar. Zwiększając precyzję uzyskujemy coraz większe pola powierzchni. Ta zależność jest podstawą wyznaczania wymiaru fraktalnego. Szczegóły tej techniki ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Schemat obliczania składowych pól powierzchni przykrywającej pole bazowe w układzie współrzędnych: w – wiersze macierzy, k – kolumny macierzy, L – wartości pikseli

Pole bazowe jest kwadratem o boku δ , którego długość wyrażona jest w pikselach. Pole to można podzielić przekątnymi na 4 trójkąty równoramienne i zbudować na nich graniastosłupy ścięte. Długości ich boków będą równe wartościom pikseli, na których stoją (w przedziale $0 \div 255$). Graniastosłupy przykryte są trójkątami (fasetami). Suma 4 pól powierzchni faset jest polem powierzchni przykrywającej pole bazowe. Pole powierzchni trójkąta przykrywającego graniastosłup obliczane jest wg wzoru:

$$P = \sqrt{s(s-b_1)(s-b_2)(s-b_3)} \quad (1)$$

$$b_1 = \sqrt{\delta^2 + (b-a)^2} \quad (2)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{\delta^2}{2} + (e-b)^2} \quad (3)$$

$$b_3 = \sqrt{\frac{\delta^2}{2} + (a-e)^2} \quad (4)$$

$$s = (b_1 + b_2 + b_3) / 2 \quad (5)$$

Powyższy wzór dotyczy pola oznaczonego literą A. Pola pozostałych trójkątów B, C, D obliczane są analogicznie.

Powierzchnia obrazu dzielona jest na kwadraty (okna) o bokach $\delta = 3, 5, 9$ i 17 . Dla każdego okna obliczane jest pole powierzchni faset. Logarytmy dziesiętne sum pól powierzchni okien jednego typu tworzą zbiór Y. Zbiorem X są odpowiednio logarytmy dziesiętne odwrotności kwadratów długości boków δ . Pomiedzy tymi zmiennymi istnieje związek liniowy. Obliczony współczynnik regresji liniowej (6) pozwala na wyznaczenie wymiaru fraktalnego (7) dla całego obrazu.

$$a = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (6)$$

S_{xy} – kowariancja zmiennych x i y, S_{xx} – wariancja zmiennej x.

$$D_f = a + 1 \quad (7)$$

Tak obliczony wymiar obarczony jest błędem standardowym współczynnika regresji :

$$m_f = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left(\frac{S_{yy}}{S_{xx}} - a^2 \right)} \quad (8)$$

n – liczebność próby.

Wykorzystano go do wyznaczenia przedziałów ufności (rys. 4 i 5). O istotności wymiaru fraktalnego decydowała weryfikacja hipotezy o niezależności zmiennych (wtedy współczynnik regresji jest równy 0). Obliczona statystyka:

$$t = \frac{|a|}{m_f} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (9)$$

r – współczynnik korelacji liniowej Pearsona.

ma być większa od wartości krytycznej. W warunkach słuszności hipotezy zerowej statystyka t ma rozkład t-Studenta z n-2 stopniami swobody. Z tablic rozkładu t-Studenta odczytujemy, dla wcześniej przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0.1$, wartość krytyczną $t_{n-2, \alpha}$.

Opisana wyżej technika obliczeniowa dotyczy całej powierzchni obrazu. Dzieląc obraz na mniejsze fragmenty opracowano algorytm obliczania lokalnego wymiaru fraktalnego. Może on być wyróżnikiem lokalnych cech obrazu, pozwalającym na wydzielenie plam (płatów) o szczególnych właściwościach, powiązanych ze skupiskami różnych roślin (rys. 6).

3. WYNIKI BADAŃ

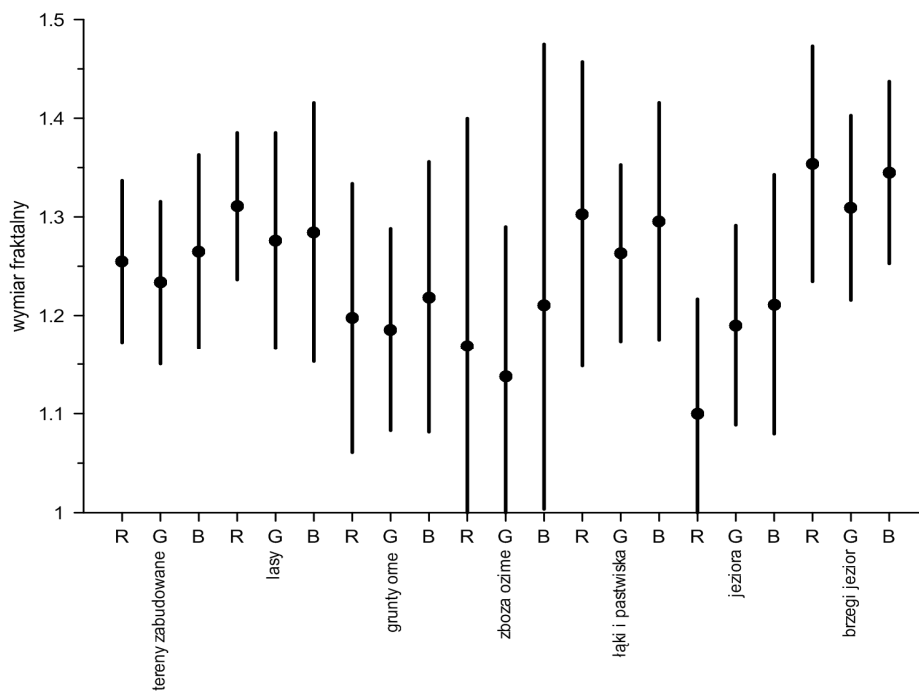
Obliczenia przeprowadzono w środowisku programu Matlab (Wróbel et al., 2004, Malina et al., 2005). Wyniki obliczeń wymiaru fraktalnego dla całych fragmentów zdjęć z rys. 2 przedstawiono w tabeli 1. Obliczono wartości wymiaru dla kanałów R, G, B oraz w odcieniach szarości. Zamianę kolorów na odcienie szarości wykonano w programie Adobe Photoshop 7.0. Podczas obliczeń dokonywano weryfikacji hipotezy zerowej przy poziomie ufności $\alpha = 0.1$. W każdym przypadku hipoteza była odrzucana, co oznacza, że między polem powierzchni a wielkością miary zachodzi istotny związek liniowy.

Tabela 1. Wymiar fraktalny fragmentów zdjęć wykorzystanych w badaniach

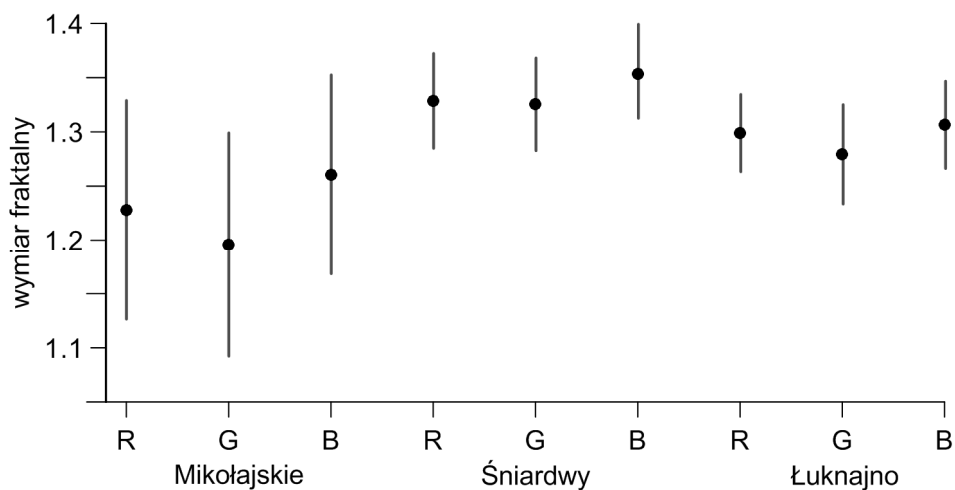
	kanał	wariancja	średnia arytmetyczna	współczynnik korelacji	wymiar fraktalny	błąd standardowy wymiaru fraktalnego
Fot. 1	szary	1950.7	92.39	0.9988	1.2457	0.0070
	R	2310.4	77.97	0.9990	1.2730	0.0069
	G	1817.1	74.91	0.9985	1.2479	0.0076
	B	1780.8	78.31	0.9972	1.2797	0.0121
Fot. 2	szary	2200.2	80.84	0.9926	1.2382	0.0169
	R	2971.3	63.36	0.9915	1.2624	0.0199
	G	2042.3	64.10	0.9957	1.2298	0.0124
	B	1899.4	66.69	0.9980	1.2631	0.0094
Fot. 3	szary	494.2	57.70	0.9951	1.2070	0.0116
	R	881.8	42.76	0.9989	1.2429	0.0066
	G	578.4	55.30	0.9988	1.2582	0.0072
	B	535.0	70.39	0.9989	1.2954	0.0082

Następnie obliczono wymiar fraktalny dla wybranych fragmentów zdjęć reprezentujących różne sposoby pokrycia terenu (rys. 4). Dla każdego typu pokrycia wybrano po 5 reprezentatywnych próbek o wymiarach 330×330 pikseli.. Wartości średnie dla kanałów w poszczególnych klasach liczono metodą ogólnej średniej arytmetycznej. Wagami były odwrotności kwadratów błędów standardowych $1/m_j^2$. Przedziały ufności obliczono dla $\alpha = 0.05$. Tak przyjęty poziom ufności spowodował, że przedziały ufności dla terenu pokrytego zbożem ozimym i kanału czerwonego jezior zawierały wartość wymiaru równą 1. To oznacza, że hipoteza zerowa nie może być odrzucona a wymiar fraktalny nie spełnia kryterium testu istotności.

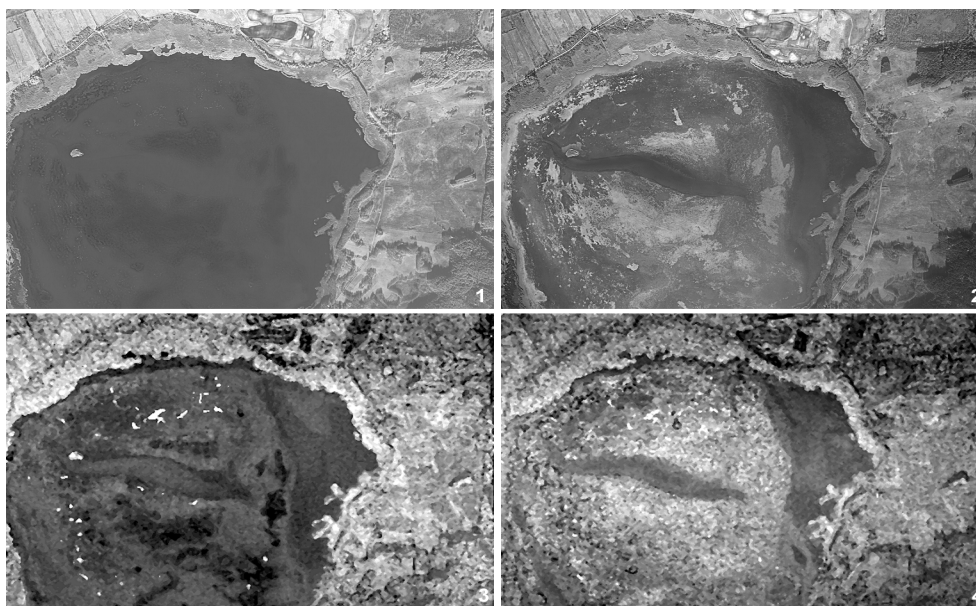
Obliczono również wymiar fraktalny, po 5 próbek strefy brzegowej, każdego z trzech jezior (rys. 5). Dla stref przybrzeżnych największe wartości wymiaru uzyskano w kanałach niebieskim i czerwonym. Dlatego do obliczeń i wizualizacji wyników lokalnego wymiaru fraktalnego wybrano tylko te kanały obrazu, bogatej w roślinność wynurzoną i zanurzoną, strefy brzegowej jez. Łuknajno. Do obliczeń przyjęto okno bazowe o wymiarach boku 16 pikseli, dzielonym w kolejnych 3 krokach przez 2, 4 i 8.



Rys. 4. Wartości średnie wymiaru fraktalnego wybranych typów pokrycia terenu oraz przedziały ufności dla $\alpha = 0.05$



Rys. 5. Wartości średnie wymiaru fraktalnego charakterystycznych obrazów stref przybrzeżnych jezior: Mikołajskiego, Śniardwy i Łuknajno oraz przedziały ufności dla poziomu ufności $\alpha = 0.05$



Rys. 6. Jezioro Łuknajno: 1 – obraz z kanału czerwonego, 2 – obraz z kanału niebieskiego, 3 – zobrazowanie lokalnego wymiaru fraktalnego kanału czerwonego, 4 – zobrazowanie lokalnego wymiaru fraktalnego kanału niebieskiego

4. WNIOSKI

W tradycyjnej interpretacji teledetekcyjnych obrazów środowiska szczególne znaczenie mają dane spektralne, ich wzajemne relacje, oraz częściowo cechy strukturalne związane z szorstkością powierzchni. Teksturę powierzchni zazwyczaj interpretuje się intuicyjnie. Wymiar fraktalny stanowi istotne uzupełnienie jakościowe i ilościowe.

Zróznicowane pod względem teksturalnym różnorodnych typów pokrycia terenu zebranych i uwidocznionych na zdjęciach wziętych do analizy ukazuje rysunek 6. Trzy zdjęcia zawierają szerszą paletę zróżnicowania strukturalnego – będą stanowić pełniejsze odniesienie (tło) do mniej wewnętrznie zróżnicowanych powierzchni litoralu jeziornego jez. Łuknajno.

Widać, że wyższe wartości wymiaru fraktalnego są wyraźnie związane ze strukturami o wysokiej szorstkości bez dostrzeganego wewnętrznego uporządkowania (wzoru, patternu): oczeretami porastającymi brzegi jezior i makrofitami, powierzchniami lasów, a także niejednorodnością łąk i pastwisk porośniętych wysoką roślinnością i licznymi krzewami. Wśród badanych powierzchni lądowych najniższy wymiar fraktalny charakteryzuje pola ozimin i gruntów ornych. Są to powierzchnie, którym również przypisana jest szorstkość, ale w stosunku do poprzednich powierzchni jej wzór (pattern) jest bardziej regularny. Oddają to wartości wyników. Złożoność, a z drugiej strony niejednoznaczność uporządkowania tych struktur wyraża szeroki rozrzut średnich wartości w przedziale ufności $\alpha = 0.05$. Nie musi on być wynikiem błędów pomiarów lub niedoskonałości metody. Rozrzut wyników może być również spowodowany rozpoznaniem ukrytych lub nakładających się

kilku rodzajów szorstkości. Potwierdza to założenie, że wymiar fraktalny może być wskaźnikiem istotnym w rozpoznawaniu nie tylko tekstury, ale również jej form, stopnia uporządkowania i wewnętrznych regularności.

Charakterystyczny jest również niski wymiar fraktalny powierzchni zbiorników. Wynika on z jednej strony z gładkości strukturalnej powierzchni wody, ale z drugiej uwzględnia falowanie i jego kierunkowość, jak również obecny na zdjęciach, prześwitujący przez słup wody, rysunek zbiorowisk roślinnych porastających dno. Wskazuje na to m.in. zróżnicowanie wymiaru fraktalnego dla poszczególnych zakresów spektralnych związanych z przenikaniem w ton wody (najniższa przenikliwość dla podczerwieni objawia się również znacznie obniżonymi wartościami wymiaru fraktalnego w stosunku do zakresów zielonego i niebieskiego).

Warte uwagi są również wymiary fraktalne dla całych jezior uwzględniające głębokość zbiorników (wyrażoną bezstrukturalną jednorodnością spektralną) oraz charakter strefy brzegowej i litoralu. Wśród badanych jezior, najgłębszym, o najniższym współczynniku powierzchni makrofitów wynurzonych i z liśćmi pływającymi jest jezioro Mikołajskie charakteryzujące się najniższymi wartościami wymiaru fraktalnego. Znacznie bardziej szorstkie wydają się powierzchnie jezior Śniardwy i Łuknajno. Wydaje się przy tym intuicyjnie, że Łuknajno powinno mieć nieznacznie wyższe wartości wymiaru fraktalnego (por. zdjęcia źródłowe – rys. 2). Choć wartości wymiaru fraktalnego są zbliżone do siebie, dla jeziora Łuknajno jest on jednak nieco niższy. Być może zależy to również od wybranych do analizy fragmentów i wskazuje, jak czułą metodą może stać się wymiar fraktalny.

Wizualizację wymiaru fraktalnego i jego rozkładu przestrzennego (topograficznego) na przykładzie jeziora Łuknajno pokazuje rysunek 6.

Wymiar fraktalny wniósł nowe cechy rozpoznawcze i interpretacyjne. Przy założonym stopniu generalizacji obszary makrofitów okalające zbiornik nie zostały wyróżnione w postaci osobnej klasy, ale wyraźnie nastąpiło zróżnicowanie w ich obrębie (strefa pobrzeża i przylegająca do lądu strefa litoralu). Silnie wyeksponowane zostały natomiast pola ramienic porastających dno jez. Łuknajno. Są one dobrze odseparowane od tła osadów dennych tworząc osobną, jednorodną teksturalnie, klasę obrazową (widoczną szczególnie na rysunku 6-4).

Szczególne znaczenie ma wyliczenie i wizualizacja wymiaru fraktalnego zaprezentowana na rysunku 6-3. W porównaniu z danymi źródłowymi (rys. 6-1) dobrze została uwidoczniła obecność silnego strumienia podwodnego kształtującego dno jeziora. Łuknajno (w kierunku zachód-wschód) i odpowiadający mu rozkład podwodnych zbiorowisk ramienic. Na źródłowym obrazie (rys. 6-1) informacja ta jest ukryta.

Jez. Łuknajno jest obszarem, na którym licznie gromadzą się łabędzie (noclegowisko i lęgowisko) i z tej m.in. racji zostało wpisane na listę UNESCO jako jeden z rezerwatów biosfery. Patrząc wnikliwie na rysunek 6-1 można dostrzec ptaki w postaci białych punktów będących w tej skali generalizacji na granicy rozdzielczości. Tymczasem lokalny wymiar fraktalny wyeksponował obecność łabędzi na wodzie zarówno jakościowo, jak i ilościowo. Jest to istotny wynik tej pracy, ponieważ ujawnia wartości ilościowe rozkładu gęstości. Pojawiły się bardzo wyraźne białe pola odpowiadające zgrupowaniom ptaków proporcjonalne swoją wielkością do liczby osobników w danym podzbiórce i ich uformowania przestrzennego. Wielkość białych plam jest wskaźnikiem ilościowym liczebności ptaków w danej grupie, a rozkład grup ptaków pozwala na interpretacje ekologiczne (rozkład osobników podzielonych na trzymające się osobno stada, rozmieszczenie ptaków okalają-

cych jezioro związane z obecnością pasa oczeretów stanowiącego barierę przed wiatrem, jednocześnie powiązanie z głębokością i potencjalnym dostępem do pokarmu).

Na polach podwodnych łąk (rys. 6-3) wyróżniły się ciemne obszary (których nie widać na rysunku 6-4), trudne do interpretacji przyrodniczej bez szczegółowego rozeznania, ale samo ich wyodrębnienie jest istotnym czynnikiem ukierunkowującym badania terenowe.

Również obszary lądowe zostały sklasyfikowane z wyróżnieniem obszarów nieużytków oraz leśnych (wymiar fraktalny wybranych typów pokrycia został przedstawiony ilościowo na rysunku 5).

W tym miejscu warto podkreślić, że zastosowany w opracowaniu opis monofrakalny jest znacznym uproszczeniem, ponieważ nie niesie w sobie informacji o zróżnicowaniu gęstości. Opis taki rozpatruje zbiór jako jednorodny pod względem upakowania (steżenia, nagromadzenia) elementów. W konsekwencji uniemożliwia w pełni ilościowe przedstawienie badanych struktur pozwalając w zasadzie na dokonanie ogólnej, porównawczej analizy jakościowej. Znacznie dokładniejsza pod tym względem jest analiza multifrakalna uwzględniająca układy niejednorodne, które traktuje jako podzbiory o odrębnych (lokalnych) właściwościach samopodobnych.

Uzyskane efekty potwierdzają celowość wprowadzenia wymiaru fraktalnego do rozpoznania i kwalifikacji obiektów (pól obrazowych) w teledetekcji i analizie środowiska. Dalsze prace powinny skupić się na zastosowaniu wymiaru fraktalnego do klasyfikacji strukturalnej zbiorowisk na obrazach w mniejszej skali (większej generalizacji).

5. LITERATURA

Berndt-Schreiber M., Brączkowska A., 2004. Numerical analysis of fundus eye images in frequency domain. *J. Med. Informat&Technologies* 7, s. 15–22.

Clarke K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the prism surface area method, *Computers and Geosciences*, 12(5), s. 713–722.

De Jong S.M., Burrough P.A., 1995. A fractal approach to the classification of Mediterranean vegetation types in remotely sensed images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, Nr 8, s. 1041–1053.

Frohn R.C., 1998. Remote sensing for landscape ecology, *Lewis Publishers*.

Godsey S.E., Aas W., Clair T.A., de Wit H.A., Fernandez I.J., Kahl J.S., Malcolm I.A., Neal C., Neal M., Nelson S.J., Norton S.A., Palucis M.C., Skjelkvale B.L., Soulsby C., Tetzlaff D., Kirchner J.W., 2010. Generality of fractal 1/f scaling in catchment tracer time series, and its implications for catchment travel time distributions. *Hydrol. Process.* 24, s. 1660–1671.

La Brecque M., 1986. Fractal Applications, *National Science Foundation Mosaic*, 17 (4).

Lam N.S-N., 1990. Description and Measurement of Landsat TM Image Using Fractals, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, Nr 2, s. 187–195.

Malina W., Smiatacz M., 2005. Metody cyfrowego przetwarzania obrazów, *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa.

Mandelbrot, B. B., 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 155, s. 636–638.

Mandelbrot, B. B., 2005. The Unity of Mathematics from the „Fundamenta” to the Fractal Geometry of Roughness. Uniwersytet Warszawski, wykład im. Wacława Sierpińskiego.

- Olszewski R., 2001. Zastosowanie analizy fraktalnej w kartograficznej metodzie badań wybranych komponentów środowiska przyrodniczego. Politechnika Warszawska – praca doktorska.
- Ostrowski M., 2002, Rejestrowane archiwum cyfrowe zdjęć lotniczych SCI-ART, poz. 23738.
- Peitgen H. O., Jürgens H., Saupe D., 1996, Granice chaosu fraktale, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Qiu, H.L., N.S.N. Lam, D.A. Quattrochi, and J.A. Gamon, 1999. Fractal characterization of hyperspectral imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 65, Nr 1, s. 63–71.
- Schulz. C. H., Mandelbrod B. B., 1989. Fractals in Geophysics. *Birkhaeuser Verlag*.
- Sun W., 2006. Triangular Prism Metod for Computing the Fractal Dimension of Remote Sensing Image. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 72. Nr 4, s. 373–382.
- Wróbel Z., Koprowski R., 2004. Praktyka przetwarzania obrazów w programie Matlab, *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa.
- Sun W., Kolappal A.Z., Gong P., 2005. Two Computation Methods for Detecting Anisotropy in Image Texture, *Geographic Information Sciences*, Vol. 11, Nr 2, s. 87–96.

FRACTAL DIMENSION OF FRAGMENTS OF AERIAL IMAGES OF SHORELINE ZONES OF THE LAKES MIKOŁAJSKIE, ŚNIARDWY AND ŁUKNAJNO

KEY WORDS: remote sensing, fractal dimension, ecological landscape, littoral zone

SUMMARY: A description and classification of the characteristics of space are the fundamental factors in building a multidimensional model of the natural environment. One of the criteria of describing an environment is analytical inferring and evaluation of the dynamics of phenomena based on structural attributes. The structure of space depends on the point of view.

In this study, also in landscape description, were used fractal dimensions whose calculation algorithms were based on the „triangular prism method” in both the global and local options.

To test the method, scanned infrared spectrozonal aerial images of the shore zones of the Mazury lakes Mikołajskie, Śniardwy and Łuknajno were chosen. There are areas with variously developed littoral zone embracing belts of marsh vegetation, emerged plants (reeds), floating plants, as well as the – also visualized in the images – zone of submerged plants growing on the bottom of the water body. To compare the calculated fractal dimensions, fragments were chosen of the mentioned water bodies representing different zones of shoreline vegetation, as well as the surrounding land under agricultural use, forest cover and urbanized areas.

The results of the investigation revealed that, with appropriate standardization of remote sensing data preparation, the fractal dimension can be a valuable indicator of quality of landscape diversity.

dr inż. Jerzy Miałdun
jerzy.mialdun@uwm.edu.pl
www.morska.com/mialdun

dr Marek Ostrowski
samper@samper.pl
www.samper.pl