

## Detekcja zmian pokrycia terenu na zdjęciach satelitarnych Landsat – porównanie trzech metod

*Land cover change detection using Landsat imagery – comparison of three methods*

Jan NIEDZIELKO, Stanisław LEWIŃSKI

**Słowa kluczowe:** Pokrycie terenu, wykrywanie zmian, Landsat, różnica obrazów, klasyfikacja nadzorowana, analiza głównych składowych.

**Key words:** Land cover, change detection, Landsat, image difference, supervised classification, principal components analysis.

**Otrzymano:** 26 lipca 2012; **Zaakceptowano:** 27 sierpnia 2012

**Received:** 26 July 2012; **Accepted:** 27 August 2012

*Environmental changes are amongst the most important research subjects in geography. The changes may be natural, but also may be caused by human activity. Land cover is a significant component of the changing environment. Monitoring of its changes involves usage of satellite techniques. Landsat mission provides comparable data since forty years, very useful in land cover studies. Utilization of satellite techniques in such researches is developing quickly. This paper is an example of methods that enable quick and quite accurate assessment of range and spatial distribution of land cover changes. Practical application of image difference, principal component analysis and supervised classification to detect land cover changes is presented. Methods are applied to study area containing different land cover classes. Accuracy of methods was tested and compared.*

*Combining methods presented in earlier researches, five new methods were developed: image difference, image difference*

*with classification, classification, principal component analysis, principal component analysis with classification. Methods were applied to three different input datasets: pairs of images with different level of preprocessing. First dataset was a pair of georeferenced Landsat Thematic Mapper images. The second dataset was the same pair of images, atmospherically corrected using dark object subtraction method. Normalization of one image to the other provided the third dataset.*

*Accuracy assessment was executed. Results were obtained from confusion matrices. Overall accuracy of methods was high, from 77% to 91%. Supervised classification was the most accurate method. Combining fully automatic methods with supervised classification has increased overall accuracy of automatic change detection, however not significantly. Studies on combining change detection methods should be continued. Future studies should concentrate on the automation of change detection process.*

### Wstęp

Zmiany pokrycia terenu są bardzo ważnym elementem zmieniającego się środowiska Ziemi. Wpływają na zmiany klimatyczne, zmiany bioróżnorodności, zanieczyszczenia wód, gleby i powietrza. Monitoring i predykcja zmian stały się jednym z priorytetów naukowców oraz decydentów (Ellis, 2010). Pokrycie terenu ściśle wiąże się z jego użytkowaniem przez człowieka. Pojęcia pokrycia i użytkowania terenu bywają uważane jako równoznaczne, można je jednak rozróżnić. Pokrycie terenu odzwierciedla biofizyczne cechy środowiska, użytkowanie terenu mówi natomiast o funkcji przestrzeni

z punktu widzenia społeczno-ekonomicznego (Jankowski, 1972). W badaniach teledetekcyjnych obserwuje się pokrycie terenu, na jego podstawie wnioskując o użytkowaniu. Konstruuje się więc legendy, w których konkretne wydzielenia pasują do obu pojęć, zestawiając w danej klasie konkretny typ pokrycia terenu odpowiadający jego użytkowaniu. Tego typu legendy szeroko stosowane są w badaniach, których przedmiot określany jest pojęciem *Land Use/Land Cover* (Civco i in., 2002; Chen i in., 2003; Cakir i in., 2006).

Szczególnie istotnym źródłem informacji o środowisku geograficznym, co za tym idzie jego zmianach, są dane satelitarne. Przy badaniu zmian pokrycia terenu

szczególnie ważnymi walorami zdjęć satelitarnych są: synoptyczność, duża powtarzalność obrazowania tych samych terenów, stosunkowo niski koszt pozyskiwania oraz automatyzacja procesu interpretacji ich treści (Ciołkosz, Poławski, 2006). Istotnym czynnikiem przy wykorzystaniu tego typu danych jest ich dostępność. Misja Landsat dostarcza danych o Ziemi nieprzerwanie od czterdziestu lat. Wszystkie archiwalne oraz aktualne obrazy dostępne są dla każdego użytkownika na całym świecie, bez żadnych opłat. Sensory *Thematic Mapper* oraz *Enhanced Thematic Mapper* + umieszczone na satelitach poruszających się po orbicie heliosynchronicznej są źródłem obrazów wielospektralnych o rozdzielczości terenowej 30 m. Misja Landsat rozpoczęła swój etap obrazowania Ziemi z kosmosu 23 lipca 1972 r., wraz z wystrzeleniem na orbitę satelity Landsat 1. Pierwsze trzy satelity z serii wyposażone były w sensory wielospektralne MSS (*Multispectral Scanner System*). Kolejne dwa posiadały już bardziej zaawansowany spektralnie oraz o lepszej rozdzielczości przestrzennej system nazywany TM (*Thematic Mapper*). Wystrzelenie szóstego satelity serii zakończyło się niepowodzeniem. Landsat 7 natomiast, wyposażony w skaner ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper* +), został wprowadzony na orbitę 15 kwietnia 1999 r. Satelity oznaczone numerami 5 oraz 7 nadal z powodzeniem dostarczają obrazów naszej planety z orbity okołobiegunowej. Kompozycje barwne z kanałów TM oraz ETM+ od wielu lat służą tworzeniu map pokrycia terenu oraz jego użytkowania.

## Przegląd literatury

Podstawową przesłanką użycia danych teledetekcyjnych do badania zmian pokrycia terenu jest założenie, że zmiany te muszą powodować również zmiany w wartościach odbicia a także muszą być odróżnialne od spowodowanych przez inne czynniki (Ingram i in., 1981, za Singh, 1989). Najbardziej ogólnym podziałem tych metod jest podział na dwa podejścia: analiza porównawcza dwóch osobno sklasyfikowanych obrazów oraz jednoczesna analiza obrazów wieloczasowych (Singh, 1989). Już prawie pięćdziesiąt lat temu zauważono, iż istnieje potrzeba opracowania automatycznego sposobu wykrycia zmian między dwoma cyfrowymi obrazami satelitarnymi tego samego terenu, wykonanymi w odstępnie czasowym. Umożliwiłoby to dostarczenie interpretatorowi do analiz jednego obrazu zmian, zamiast dwóch obrazów satelitarnych (Shephard, 1964, za Singh, 1989). Ze wzrostem ilości dostępnych danych teledetekcyjnych coraz pilniejsza staje się potrzeba automatycznego, nienadzorowanego przetwarzania ich. Równocześnie wraz z rozwojem technologii cyfrowej pojawia się coraz więcej możliwości stosowania tego typu podejścia. Wykrycie zmian bezpośrednio na obrazach satelitarnych polega na odróżnieniu realnych zmian pokrycia terenu od zmian innego typu. Zmiany odbicia na wieloczasowych zdjęciach tego samego obszaru mogą być spowodowane zmianą zagospodarowania terenu, jednak mogą także pozostawać

pod wpływem innych czynników. Inne czynniki są to: zmiany warunków atmosferycznych, zmiany kąta padania promieni słonecznych, różnice w wilgotności gleby, fenologiczny cykl wegetacji, cykl hydrologiczny (Jenson, 1983, za Singh, 1989; Khorram i in, 1999, za Cakir i in., 2006). Czynniki te powinny być możliwie stałe. Często niemożliwe jest uzyskanie zobrazowań w identycznych warunkach, wymagane jest więc zastosowanie korekcji i normalizacji radiometrycznej (Cakir i in., 2006). Wpływ na różnice w obrazach mają również parametry systemów teledetekcyjnych. Mogą być one przyczynami fałszywych zmian na obrazach. Te parametry to: rozdzielczość czasowa, przestrzenna, spektralna i radiometryczna, kąt widzenia detektora. Optymalnie powinny być one stałe (Khorram i in, 1999, za Cakir i in., 2006). Wobec powyższych faktów wybór sensora oraz terminów zobrazowań ma kluczowe znaczenie dla powodzenia zamierzonych analiz. Również geometryzacja oraz dokładne przestrzenne dopasowanie dwóch obrazów jest bardzo ważne przy stosowaniu wielu metod wykrywania zmian (Singh, 1989). Z tego powodu użycie danych z satelity Landsat wydaje się zasadne, ponieważ są one dostępne już po geometryzacji, więc pominąć można jeden z czasochłonnych etapów przetwarzania obrazów.

Najprostszą metodą automatycznego wykrywania zmian jest metoda różnicy obrazów. Polega na odjęciu wartości odbicia promieniowania elektromagnetycznego zarejestrowanej na jednym obrazie od wartości z drugiego obrazu tego samego obszaru, piksel po pikselu. Piksele przedstawiające zmiany powinny znaleźć się na końcach histogramu wartości obrazu wynikowego, natomiast obszary niezmienione powinny oscylować wokół zera. Metoda jest prosta, a obraz wynikowy łatwy w interpretacji. Najczęściej korzysta się z różnicy zobrazowań w paśmie czerwonym, czyli w przypadku *Landsata* trzecim. Według Ridd i Liu (1998) różnica w tym kanale najlepiej nadaje się do badania zmian pokrycia terenu, co udowodnili porównując wyniki uzyskane przy zastosowaniu różnic innych kanałów. Sohl (1999) zbadał zmiany pokrycia terenu na obszarze emiratu Abu Dhabi w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, również używając kanału trzeciego. Badania te prowadzone były w klimatach suchych, co może mieć wpływ na ich wyniki.

Kolejną metodą wykrywania zmian jest klasyfikacja. Powszechnie używa się klasyfikacji do rozpoznawania form pokrycia terenu na zdjęciach, można jej użyć również do wykrywania zmian. Przy podejściu nienadzorowanym metoda polega na połączeniu kanałów dwóch obrazów (ang. *Stacking*), tak by otrzymać jeden wielokanałowy zbiór. Następnie taki zbiór klasyfikuje się by wyznaczyć obszary zmienione. Mas (1999) używa klasyfikacji nienadzorowanej do wyznaczenia zmian na połączonych kanałach dwóch obrazów ze skanera MSS, w sumie na ośmiu kanałach. Li i Yeh (1998 za: Lu i in., 2004) zastosowali klasyfikację nadzorowaną metodą największego prawdopodobieństwa do wykrycia zmian pokrycia terenu na obszarze delty Rzeki Perłowej w Chinach.

Następną metodą jest analiza głównych składowych. Najczęstszym sposobem użycia tej metody jest przepro-

wadzenie analizy na zbiorze utworzonym z kanałów dwóch obrazów. Różnice między obrazami powinny być widoczne w drugim komponentcie analizy (Byrne i in., 1980). Przy użyciu większej liczby kanałów, kolejne komponenty PCA zawierają coraz mniej informacji, a więcej szumów, dlatego do badania zmian wybiera się komponent drugi. Mas (1999) przeprowadził analizę głównych składowych tylko na dwóch wybranych kanałach, po jednym z każdego porównywanego obrazu. Najlepszy wynik osiągnął dla kanału drugiego skanera MSS. Deng i in. (2008) połączyli dane z satelitów *Landsat* oraz *SPOT*, następnie po przekształceniu ich analizą PCA sklasyfikowali zmiany przy pomocy klasyfikacji hybrydowej. Zestawienie dwóch obrazów o różnym terminie akwizycji a następnie przeprowadzenie analizy głównych składowych pozwala na wykorzystanie w procesie klasyfikacyjnym danych będących syntezą zmian spektralnych klas pokrycia terenu. Takie podejście zastosowano do klasyfikacji pokrycia terenu na podstawie danych ze skanera MODIS (Lewiński, 2010).

Wyczerpującego przeglądu metod wykrywania zmian dokonali Lu i in. (2004). Podzielili oni metody na siedem ogólnych grup: metody algebraiczne, transformacje, klasyfikacje, modele, zastosowanie systemów informacji geograficznej, analizy wizualne oraz inne podejścia.

Do grupy pierwszej, metod polegających na działaniach algebraicznych na wartościach pikseli z obrazów wieloczasowych, należy m.in. metoda różnicy obrazów, stosowana w tej pracy. Innymi metodami z tej grupy jest np. regresja obrazów, polegająca na znalezieniu zależności między dwoma obrazami, a następnie przekształceniu jednego z obrazów za pomocą równania regresji. Wartości z obrazów można również podzielić przez siebie, otrzymując stosunek obrazów. Odejmować i dzielić można również nie tylko same wartości odbicia w poszczególnych pikselach, ale również wartości wskaźników obliczonych na podstawie obrazu. Do wykrycia zmian pokrycia terenu w Północnej Karolinie posłużono się różnicą wartości wskaźnika NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) oraz danych z transformacji *Tasseled Cap*, przeprowadzonej na obrazach z *Landsata* (Lunetta i in., 2002). Byeong-Hyeok i Kwang-Hoon (2008) użyli różnicy wskaźnika NDVI do szacowania zmian stanu roślinności oraz rekultywacji lasów na opuszczonym obszarze górniczym. Kolejnym podejściem są analizy wektora zmian (*change vector analysis*). Metoda polega na znalezieniu kierunku oraz wielkości wektora zmiany między dwoma badanymi terminami dla każdego piksela. Metody tej użyto do zbadania zmian pokrycia terenu na obszarze wybranych parków narodowych Kanady, bazując na danych z *Landsata* (Fraser i in., 2009). Do wykrycia zmian pokrycia terenu na obszarze dystryktu Haidian w Chinach zaproponowano zmodyfikowaną wersję analizy wektora zmian, osiągając wyniki na poziomie współczynnika Kappa powyżej 0,87 (Chen i in., 2003). Villa i in. (2009) do badania zmian pokrycia terenu użyli wskaźnika *Normalized Difference Reflectance*, uzyskując zestandaryzowaną różnicę odbicia między parą zdjęć satelitarnych. Zbadano zmiany

pokrycia terenu spowodowane przejściem huraganu *Katrina*.

Druga grupa metod to transformacje. Do tej grupy należy analiza głównych składowych, stosowana w tej pracy. Inną transformacją, możliwą również do przeprowadzenia na obrazach z *Landsata*, jest transformacja *Tasseled Cap*. Przykładem zastosowania tej transformacji jest wykrycie zmian pokrycia terenu w Stanach Zjednoczonych, w Północnej Karolinie (Lunetta i in., 2002). Z kolei Ridd i Liu (1998) opracowali metodę z użyciem testu Chi-kwadrat, zaaplikowaną do danych ze skanera TM do wykrycia zmian pokrycia terenu w przestrzeni miejskiej.

Trzecią grupą metod są klasyfikacje. W tej grupie znajduje się również metoda klasyfikacji zastosowana w niniejszej pracy. Najpopularniejszą metodą jest tzw. analiza postklasyfikacyjna. Polega na porównaniu dwóch niezależnych klasyfikacji, przeprowadzonych na dwóch obrazach tego samego terenu. Metodę tę stosowali m.in.: Civco (2002) – nienadzorowana klasyfikacja pokrycia terenu metodą ISODATA, przy użyciu obrazów z *Landsata*; Bauer i in. (2003) – badanie zmian pokrycia terenu w obszarze metropolitalnym miast Minneapolis i St. Paul na podstawie danych z *Landsata*, porównanie własnych, złożonych metod klasyfikacji; Michałowska, Głowienka-Mikrut (2010) – badanie zmian pokrycia terenu na obszarze Słowińskiego Parku Narodowego za pomocą klasyfikacji metodą największego prawdopodobieństwa, przeprowadzoną na obrazach z satelitów *Landsat*; Prakasam (2010) – nadzorowana klasyfikacja pokrycia terenu na zdjęciach z sensora TM. Porównanie dwóch niezależnych klasyfikacji preferuje Bochenek (2004), porównując dokładność tej metody z metodami porównywania wartości odbicia spektralnego z dwóch terminów rejestracji, porównywania wartości wskaźników zieleni, analizy głównych składowych, analizy wektora zmian, klasyfikacji połączonych obrazów. Porównanie zostało przeprowadzone na wysokorozdzielczych satelitarnych zdjęciach fragmentu aglomeracji warszawskiej. Innym rodzajem klasyfikacji są metody korzystające z tzw. sztucznej inteligencji, np. sieci neuronowych. Ten rodzaj klasyfikacji zastosowano do wykrycia zmian pokrycia terenu w rejonie rzeki Millestone w New Jersey (Civco i in., 2002).

Czwartą grupę metod stanowią modele. Lu i in. (2004) podają przykłady zastosowań takich modeli. Do kartowania i monitoringu lasów użyto modelu Li-Strahlera (Macomber, Woodcock, 1994, za: Lu i in., 2004). Jest to model geometryczno-optyczny, służący do szacowania wielkości i gęstości drzew na podstawie danych teledetekcyjnych. Bazuje na trójwymiarowej strukturze baldachimu roślinności jako głównym czynnikiem wpływającym na odbicie promieniowania. Do wykrywania sukcesji leśnej w dorzeczu Amazonki wykorzystano model biofizyczny (Lu, 2001, za: Lu i in., 2004). Parametrem biofizycznym wykorzystanym w modelu był stosunek biomasy drzew do całkowitej biomasy na danym terenie. Parametr ten obliczano na podstawie pomiarów terenowych oraz zdjęć z *Landsata*. Symeonakis i in. (2006) użyli australijskiego modelu badania zmian, bazujące-

go na serii zdjęć z *Landsata* zintegrowanych z danymi terenowymi, do zbadania zmian pokrycia przez lasy wybrzeży Morza Śródziemnego w Hiszpanii.

Piątą grupę stanowi podejście do wykrywania zmian poprzez zastosowanie narzędzi systemów informacji geograficznej. Polega ono na porównaniach map historycznych z aktualnymi, nakładaniu na siebie warstw i odpowiednich przetworzeniach. Zastosowano to podejście do badania wpływu rozwoju miasta Tuen Mun w Hong Kongu na środowisko (Lo, Shipman, 1990). Użyto zdjęć lotniczych, map topograficznych oraz geologicznych. Zastosowano techniki nakładania obrazów oraz binarnego maskowania. Do badania zmian krajobrazu na różnych poziomach podziału administracyjnego użyto narzędzi GIS oraz zdjęć lotniczych (Taylor i in., 2000).

Kolejnym sposobem na wykrycie zmian jest interpretacja wizualna. Polega na utworzeniu kompozycji barwnej np. z tego samego kanału zobrazowań wykonanych w różnym czasie. Można w ten sposób analizować trzy stany danego obszaru w czasie. Analiza ta pozwala interpretować również takie cechy obrazu jak tekstura i struktura. Takie podejście jest jednak bardzo czasochłonne i wymaga szerokiej wiedzy interpretatora. Do wykrywania zmian pokrycia terenu podejście to wykorzystali: Mycke-Dominko, Górńska (2007) – wyznaczenie zmian użytkowania terenu na obszarze Narwiańskiego Parku Narodowego wraz z otuliną na podstawie interpretacji ortofotomapy i porównania z innymi mapami użytkowania; Sochacka, Pabjanek, Olędzki (2008) – badanie zmian użytkowania ziemi w zlewni Strugi Toruńskiej na podstawie wieloczasowych zdjęć lotniczych; Nasiłowska (2008) – zmiany użytkowania zlewni Górnej Narwi, z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych z *Landsata* oraz materiałów kartograficznych.

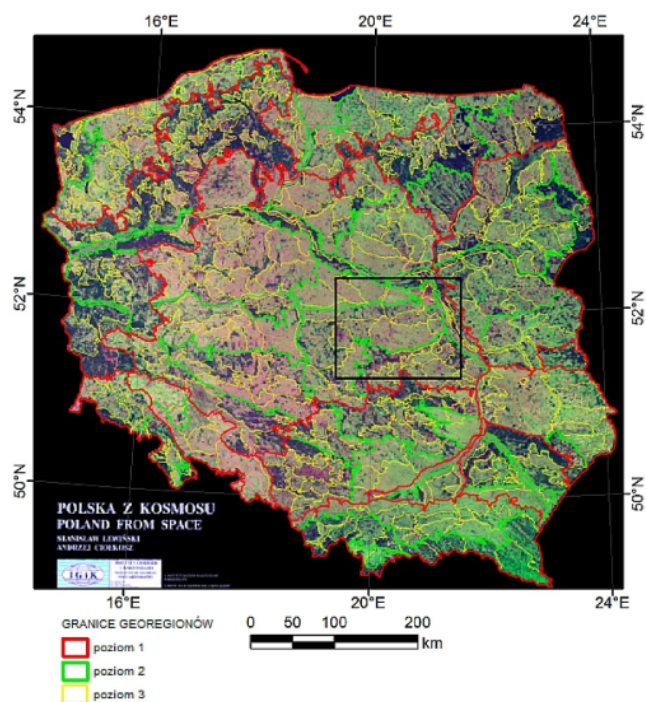
Najnowszym podejściem do wykrywania zmian jest stosowanie złożonych algorytmów. Przykładem jest postępowanie zastosowane w ramach projektu SATChMo/Geoland2 w Centrum Badań Kosmicznych PAN. Do wykrycia zmian oraz uzyskania informacji o ich charakterze wykorzystano transformację IR-MAD, opartą na metodzie analizy różnic w wielowymiarowych zbiorach danych. Dzięki włączeniu do analizy informacji o możliwościach zmian pokrywy roślinnej uzyskanych ze wskaźnika NDVI oraz o teksturze obrazu przetworzonego za pomocą filtru Sigma, wykryto zmiany w pokryciu terenu które nie są wynikiem naturalnych cykli fenologicznych (Aleksandrowicz i in., 2012).

Używając wieloczasowych obrazów z satelity *Landsat*, można również przewidywać przyszłe zmiany. Technika Markova pozwala na szacowanie prawdopodobieństwa przyszłych zmian na podstawie zmian, które zaszły wcześniej. Została użyta przez Wijanarto (2006), na danych ze skanera ETM+, do predykcji zmian pokrycia terenu.

Wiele technik wykrywania zmian jest kombinacjami wyżej wymienionych metod. Odpowiedni dobór technik, materiałów oraz parametrów pozwala na uzyskanie lepszych wyników. Takimi metodami kombinowanymi są techniki zastosowane w tej pracy.

## Teren badań

Teren badań stanowi obszar o pokryciu terenu typowym dla Polski, znajdują się na nim wszystkie najczęściej występujące w Polsce klasy. Przy wyborze kierowano się dostępnością obrazów ze skanera Thematic Mapper w dobrej jakości, z jak najmniejszym udziałem chmur, oraz z takich lat, dla których dostępne były zobrazowania wykonane o podobnej porze roku. Kolejnym kryterium była dostępność danych referencyjnych, takich jak mapy topograficzne i zdjęcia lotnicze. Zwrócono uwagę na aktualność topograficznych map. Ważnym aspektem było również wybranie tylko jednej sceny, aby nie obarczyć wyników dodatkowym błędem mogącym wynikać z łączenia obrazów. Zdecydowano się wybrać wycinek jednej sceny, o wymiarach 4000 na 5000 pikseli, obejmujący 18 tys. km<sup>2</sup> (Ryc. 1). Stanowi on kompromis pomiędzy wielkością danych, pozwalającą na sprawne i szybkie wykonanie dużej ilości przetworzeń i klasyfikacji, a zawartością różnych typów pokrycia terenu. Na terenie badań znalazły się zarówno duże, szybko rozwijające się miasta, jak Warszawa, Łódź czy Radom, jak i tereny rolnicze, różnego typu lasy, również zmieniające swoją powierzchnię w badanym okresie. Na terenie badań występują również rzeki (odcinek Wisły o bardzo zmiennym układzie piaszczystych łach) oraz niewielkie zbiorniki wodne.



Ryc. 1. Teren badań na tle mapy regionów geograficznych według regionalizacji prof. Jana R. Olędzkiego (2007).

Fig. 1. Study area localization within the map of Geographical regions of Poland (2007).

## Metodyka wykrywania zmian pokrycia terenu

Postępowanie podzielono na przetworzenia wstępne, właściwy proces wykrycia zmian oraz analizę dokład-

ności. Najważniejszymi elementami przetworzeń wstępnych są korekcje: geometryczna i radiometryczna. Dane z sensora *Thematic Mapper*, udostępniane przez Służbę Geologiczną Stanów Zjednoczonych, są poddane geometryzacji, co znacznie przyspiesza zaadaptowanie ich do procesu wykrywania zmian. Najważniejszym punktem przetworzeń wstępnych w tej pracy była korekcja radiometryczna. Założono stworzenie trzech odrębnych zestawów zdjęć gotowych do dalszych przetworzeń. Celem takiego zabiegu było sprawdzenie jaki sposób korekcji najlepiej przygotowuje dane do wykrycia zmian. Również ważna jest odpowiedź na pytanie czy sposób korekcji radiometrycznej powinien zależeć od wybranej metody wykrywania zmian, czy też do każdej metody jeden konkretny sposób korekcji jest najlepszy. Trzy zestawy danych wejściowych pozwolą dla każdej zastosowanej metody wykrywania zmian uzyskać trzy wyniki dokładności: nieprzetworzonych zdjęć *TM*, obrazów po korekcji *DOS* (Dark Object Subtraction) oraz do obrazów znormalizowanych.

Korekcja modelem *DOS* zakłada że obiekty o właściwościach najbardziej zbliżonych do ciała doskonale czarnego, takie jak czysta, głęboka woda, powinny mieć wartość odbicia bliską zera. Wartość *Digital Number* jaka reprezentuje te tereny na obrazie jest spowodowana wpływem atmosfery na zobrazowanie. Odjęcie tej wartości od wartości każdego piksela obrazu powinno zniwelować wpływ atmosfery na zobrazowanie. Dla każdego kanału wyznaczono empirycznie, przy pomocy analizy histogramów, wartości do wprowadzenia do modelu (Tab. 1). Następnie użyto funkcji *Dark Subtract* w programie *ENVI 4.5* wprowadzając własne wartości do odjęcia.

Tabela 1. Wartości odjęte od każdego kanału przy korekcji *DOS*, wyznaczone empirycznie.

Table 1. Values subtracted from each band during *DOS* atmospheric correction, determined empirically.

Kanał Band	1994	2006
1	50	52
2	17	20
3	12	14
4	11	10
5	6	6
7	3	3

Normalizacja polega na korekcji zależnej, gdzie jedno ze zdjęć korygowane jest względem drugiego. Zastosowano wzór (1) zaproponowany przez Cakir i in. (2006), przy badaniach zmian pokrycia terenu, gdzie użyto również danych pochodzących z satelity *Landsat*:

$$Dn_{date2-new} = \bar{x}_{date1} + \left( \frac{\sigma_{date1}}{\sigma_{date2}} \right) \times (Dn_{date2} - \bar{x}_{date2}) \quad (1);$$

Gdzie:

$Dn_{date2-new}$  – nowa wartość piksela obrazu normalizowanego

$\bar{x}_{date1}, \sigma_{date1}$  – średnia i odchylenie standardowe obrazu referencyjnego

$\bar{x}_{date2}, \sigma_{date2}$  – średnia i odchylenie standardowe obrazu normalizowanego

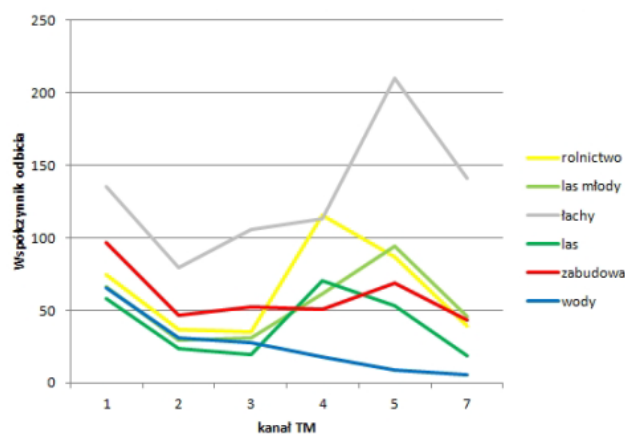
$Dn_{date2}$  – wartość piksela obrazu normalizowanego

W ten sposób przygotowane dane stanowiły trzecią parę obrazów gotową do dalszych przetworzeń.

Metodyka wykrywania zmian została opracowana w oparciu o przegląd metod stosowanych w tej tematyce badań. Zdecydowano się na użycie metod zaproponowanych w literaturze oraz ich kombinacji, w efekcie dających pięć różnych postępowań metodycznych, zwanych dalej metodami. Przegląd literatury posłużył wyborowi następujących metod: różnica obrazów, klasyfikacja połączonych obrazów, analiza głównych składowych. Następnie z ich kombinacji utworzono pięć różnych postępowań metodycznych zaaplikowanych do tych samych obrazów satelitarnych o różnym stopniu przetworzeń wstępnych (Tab. 2).

Każda metoda została zaaplikowana do trzech wcześniej przygotowanych zestawów danych wejściowych. Takie podejście zakładało uzyskanie wyników dla trzech wariantów zastosowania metody: do nieprzetworzonych obrazów, do obrazów po korekcji *DOS* oraz do obrazów po normalizacji. W efekcie powstało piętnaście map zmian pokrycia terenu dla obszaru badań. Następnie założono przeprowadzenie weryfikacji map przy pomocy pól weryfikacyjnych co miało pozwolić na sklasyfikowanie uzyskanych map ze względu na ich dokładność.

Przed wykonaniem analiz zmian pokrycia terenu trzeba odpowiedzieć na pytanie: co uznajemy za zmianę pokrycia terenu. W tej pracy wybrano następujący sposób odpowiedzi: utworzono legendę pokrycia terenu składającą się z pięciu ogólnych klas pokrycia terenu. Następnie odszukano na obrazie wszystkie występujące kombinacje tych klas na obszarach gdzie zmienia się klasa między dwoma obrazami. Wybór klas wspomogła analiza krzywych średniego odbicia spektralnego (Ryc. 2).



Ryc. 2. Wykresy średnich wartości pikseli w początkowo zakładanych klasach pokrycia terenu.

Fig. 2. Graphs of mean pixel values in initially assumed land cover classes.

Tabela 2. Zastosowane kombinacje metod wykrywania zmian.  
 Table 2. Applied combinations of change detection techniques.

Nazwa skrócona <i>Abbreviation</i>	Nazwa pełna <i>Full name</i>	Postępowanie <i>Proceedings</i>	Dane wejściowe <i>Input data</i>
m1w1	Metoda 1, wariant 1 <i>Method 1, option 1</i>	Różnica obrazów <i>Image differencing</i>	Bez korekcji <i>No correction</i>
m1w2	Metoda 1, wariant 2 <i>Method 1, option 2</i>	Różnica obrazów <i>Image differencing</i>	Po korekcji DOS <i>DOS correction</i>
m1w3	Metoda 1, wariant 3 <i>Method 1, option 3</i>	Różnica obrazów <i>Image differencing</i>	Po normalizacji <i>Normalization</i>
m2w1	Metoda 2, wariant 1 <i>Method 2, option 1</i>	Różnica obrazów, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Image differencing, classification of combined dataset</i>	Bez korekcji <i>No correction</i>
m2w2	Metoda 2, wariant 2 <i>Method 2, option 2</i>	Różnica obrazów, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Image differencing, classification of combined dataset</i>	Po korekcji DOS <i>DOS correction</i>
m2w3	Metoda 2, wariant 3 <i>Method 2, option 3</i>	Różnica obrazów, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Image differencing, classification of combined dataset</i>	Po normalizacji <i>Normalization</i>
m3w1	Metoda 3, wariant 1 <i>Method 3, option 1</i>	Klasyfikacja połączonych obrazów <i>Classification of combined dataset</i>	Bez korekcji <i>No correction</i>
m3w2	Metoda 3, wariant 2 <i>Method 3, option 2</i>	Klasyfikacja połączonych obrazów <i>Classification of combined dataset</i>	Po korekcji DOS <i>DOS correction</i>
m3w3	Metoda 3, wariant 3 <i>Method 3, option 3</i>	Klasyfikacja połączonych obrazów <i>Classification of combined dataset</i>	Po normalizacji <i>Normalization</i>
m4w1	Metoda 4, wariant 1 <i>Method 4, option 1</i>	Analiza głównych składowych <i>Principal component analysis</i>	Bez korekcji <i>No correction</i>
m4w2	Metoda 4, wariant 2 <i>Method 4, option 2</i>	Analiza głównych składowych <i>Principal component analysis</i>	Po korekcji DOS <i>DOS correction</i>
m4w3	Metoda 4, wariant 3 <i>Method 4, option 3</i>	Analiza głównych składowych <i>Principal component analysis</i>	Po normalizacji <i>Normalization</i>
m5w1	Metoda 5, wariant 1 <i>Method 5 option 1</i>	Analiza głównych składowych, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Principal component analysis, classification of combined dataset</i>	Bez korekcji <i>No correction</i>
m5w2	Metoda 5, wariant 2 <i>Method 5 option 2</i>	Analiza głównych składowych, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Principal component analysis, classification of combined dataset</i>	Po korekcji DOS <i>DOS correction</i>
m5w3	Metoda 5, wariant 3 <i>Method 5 option 3</i>	Analiza głównych składowych, klasyfikacja połączonych obrazów <i>Principal component analysis, classification of combined dataset</i>	Po normalizacji <i>Normalization</i>

Przeanalizowano krzywe ze średnich wartości pikseli z pól treningowych dla wstępnie zakładanych klas: wód, lasów, lasów młodych, rolnictwa, łąch oraz zabudowy. Po analizie podjęto decyzję o wydzieleniu osobnej klasy terenów rolniczych nie pokrytych roślinnością, w którą włączono tereny odkryte nie związane z zabudową oraz łąchy piaszczyste. Następnie utworzono klasę terenów rolniczych z pokrywą roślinną, w którą włączono wcześniej zakładaną klasę rolnictwa oraz młode lasy (powstałe w wyniku sukcesji roślinnej), ze względu na ich większe podobieństwo w odpowiedzi spektralnej do tej klasy niż do klasy lasów. Uzyskano pięć klas pokrycia terenu (Tab. 3).

Zatem za zmianę pokrycia terenu między drugim lipca 1994 r. a trzecim lipca 2006 r. uznano przejście między wyżej wymienionymi klasami. Obszary pozostające w obrębie jednej z klas uznano za nie zmienione. W założeniu wybrane metody wykrywania zmian miały wskazać właśnie te zmiany.

Postanowiono wskazać przykładowe obszary zmienione oraz nie zmienione, utworzono więc poligony treningowe. Najpierw dla obszarów na których na obu obrazach wystąpiła ta sama klasa, następnie dla ob-

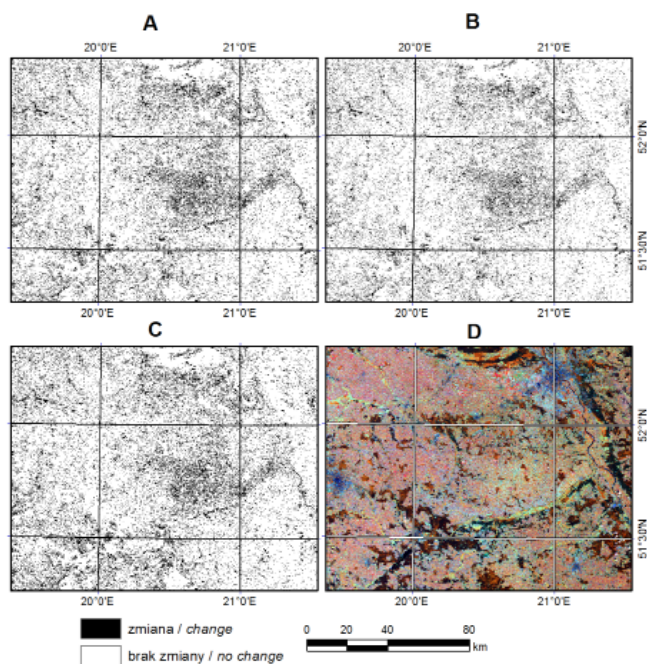
szarów na których zmieniła się klasa pokrycia terenu. Wizualną analizę obrazów wsparto bazą zmian Corine Land Cover 90–00 oraz 00–06 w formacie wektorowym, co pozwoliło na nałożenie granic poligonów zmian na obrazy satelitarne. Analizę wsparto ogólnodostępnymi w internecie zdjęciami satelitarnymi i lotniczymi, m.in. Google Maps, oraz mapami topograficznymi z geportal.gov.pl. Wyznaczono w sumie piętnaście kombinacji klas, pięć bez zmiany pokrycia terenu oraz dziesięć ze zmianą (Tab. 4). Poligony posłużyły jako pola treningowe w klasyfikacjach nadzorowanych.

Pierwsza z zastosowanych metod polegała na obliczeniu różnicy między wartościami odbicia z kanału trzeciego obrazów z 1994 oraz 2006 roku. Użyto funkcji *Band Math* w programie ENVI 4.5. Uzyskano obraz wynikowy którego każdy piksel stanowił wynik odejmowania wartości odpowiadających sobie pikseli z obrazów wejściowych. Histogram z obrazu wynikowego powinien układać się w następujący sposób: piksele reprezentujące zmiany powinny znaleźć się na końcach rozkładu, natomiast piksele reprezentujące brak zmian powinny znajdować się blisko zera. Aby lepiej przeanalizować wartości dla pikseli reprezentujących zmiany i brak

Tabela 3. Klasy pokrycia terenu.  
Table 3. Land cover classes.

Nazwa Name	Kod Code	Opis Description
Wody Water	wody	Zbiorniki wodne, rzeki Water bodies, rivers
Lasy Forests	las	Obszary leśne Forsted land
Tereny rolnicze pokryte roślinnością Vegetated arable land	pokr	Tereny rolnicze pokryte roślinnością, łąki oraz młode lasy Arable land with vegetation, meadows and young forests
Tereny rolnicze nie pokryte roślinnością Non-vegetated arable land	bez_pokr	Obszary nie pokryte roślinnością nie związane z zabudową oraz łachy. Non-vegetated non-built-up areas and sandbanks
Tereny zabudowane Built-up areas	zabud	Tereny zabudowane Built-up areas

zmian, zebrano histogramy z pól treningowych. Jeden histogram ze wszystkich pól reprezentujących tereny zmienione, drugi ze wszystkich pól reprezentujących tereny niezmienione. Po analizie histogramów zebranych z obrazu wynikowego ustanowiono progi, tak by podzielić obraz na piksele zmienione i niezmienione. Jako wartości progowe przyjęto  $-14$  i  $6$ . Wszystkie piksele o wartości poniżej  $-14$  oraz powyżej  $6$  zostały sklasyfikowane jako zmienione. Natomiast piksele o wartościach z przedziału od  $-14$  do  $6$  zostały sklasyfikowane jako niezmienione. Dla obrazów po korekcy DOS progi były następujące:  $-12$  i  $8$ , natomiast dla obrazów po normalizacji:  $-12$  i  $5$ . W ten sposób uzyskano binarne mapy zmian (Ryc. 3).

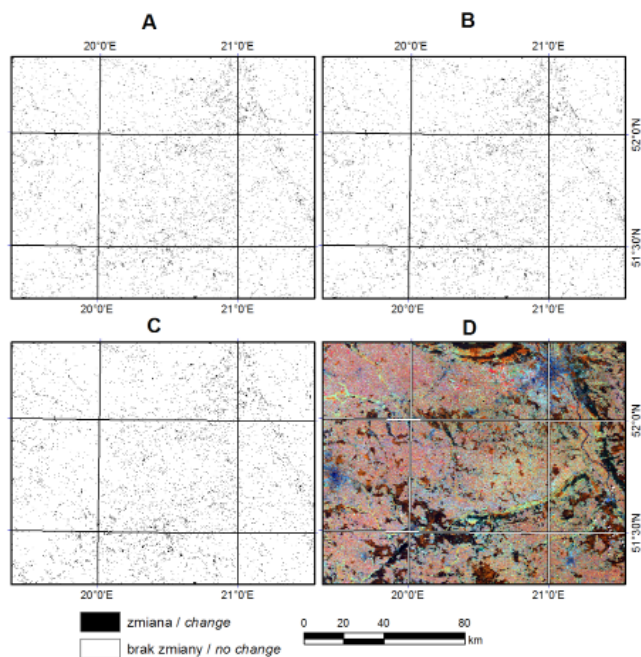


Ryc. 3. Metoda 1 wykrywania zmian – odejmowanie obrazów. A – bez korekcy, B – korekcja DOS, C – normalizacja, D – kompozycja TM RGB 453.  
Fig. 3. Change detection Method 1 – image differencing. A – no correction, B – DOS correction, C – normalization, D – TM RGB 453.

Tabela 4. Kombinacje klas wskazane przez pola treningowe.  
Table 4. Class combinations obtained using training data.

L.p.	1994	2006
	bez zmian	
1	wody	wody
2	las	las
3	pokr	pokr
4	bez_pokr	bez_pokr
5	zabud	zabud
	zmiany	
1	wody	bez_pokr
2	las	pokr
3	las	bez_pokr
4	las	zabud
5	pokr	wody
6	pokr	las
7	pokr	bez_pokr
8	pokr	zabud
9	bez_pokr	wody
10	bez_pokr	pokr

Druga metoda polegała na wskazaniu poprzez różnicę kanału trzeciego z obu obrazów potencjalnych obszarów zmian, następnie na klasyfikacji nadzorowanej tych obszarów. Obraz różnicowy podzielono na piksele niezmienione i piksele potencjalnie zmienione w celu utworzenia maski. Zrobiono to analogicznie do metody pierwszej. Maskę służyła wyeliminowaniu z klasyfikacji terenów uznanych za niezmienione. Na wszystkich kanałach obu obrazów przeprowadzono klasyfikację nadzorowaną metodą największego prawdopodobieństwa. Jako pól treningowych użyto poligonów opisanych w rozdziale 3.2.3. Następnie przeprowadzono reklasyfikację na dwie klasy: obszarów zmienionych i niezmienionych. Identyfikacja postąpiono z trzema parami obrazów wejściowych, co stanowiło trzy warianty metody. Otrzymano binarne mapy zmian (Ryc. 4).

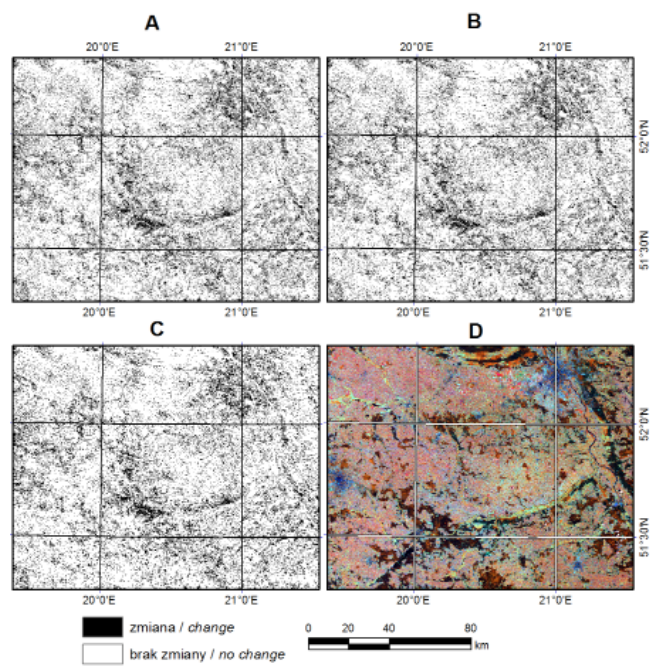


Ryc. 4. Metoda 2 wykrywania zmian – odejmowanie obrazów i klasyfikacja. A – bez korekcji, B – korekcja DOS, C – normalizacja, D – kompozycja TM RGB 453.

Fig. 4. Change detection method 2 – image differencing and classification. A – no correction, B – DOS correction, C – normalization, D – TM RGB 453.

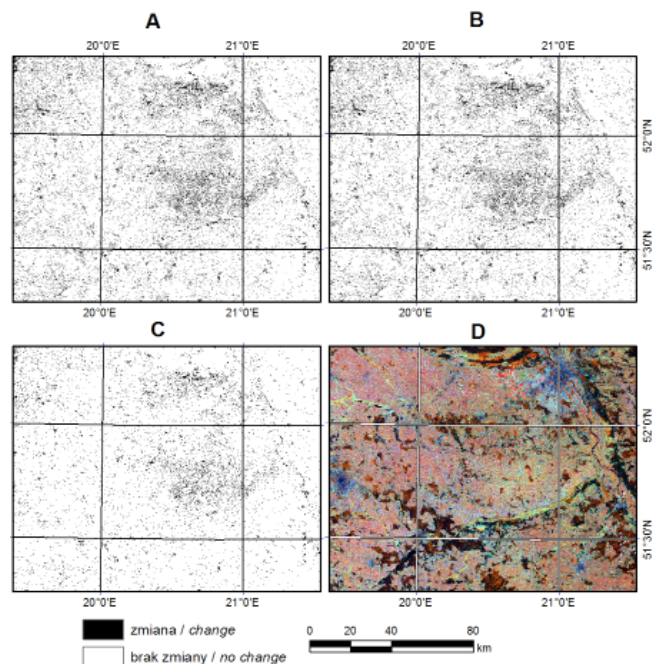
Metoda trzecia ograniczyła się tylko do klasyfikacji metodą największego prawdopodobieństwa przeprowadzoną na kanałach z obu obrazów. Wszystkie kanały z obrazów z 1994 oraz 2006 połączono w jeden zbiór, który potraktowano na potrzeby klasyfikacji jako jeden wielokanałowy obraz. Jako pól treningowych użyto poligonów opisanych w rozdziale 3.2.3. Następnie przeprowadzono reklasyfikację na dwie klasy: obszarów zmienionych i niezmienionych. Klasyfikację przeprowadzono trzy razy, na trzech parach obrazów wejściowych, z użyciem tych samych poligonów treningowych. Otrzymano binarne mapy zmian (Ryc. 5).

Metoda czwarta polegała na przeprowadzeniu analizy głównych składowych na połączonych kanałach z dwóch obrazów: drugim, trzecim i siódmym. Taka kombinacja kanałów dawała najlepsze rezultaty, co ustalono metodą prób i błędów. Następnie na komponentie drugim (*PC2*) ustalono wartości progowe w celu wyznaczenia obszarów zmienionych i niezmienionych. W tym celu przeanalizowano histogramy wartości w tym komponentie, zebrane odpowiednio z wcześniej wyznaczonych pól treningowych: jeden dla obszarów zmienionych i jeden dla niezmienionych. Ostatecznie zdecydowano się na zaklasyfikowanie wszystkich pikseli o wartościach z przedziału od  $-20$  do  $12$  jako obszary niezmienione a piksele nie mieszczące się w tym przedziale uznano za obszary zmienione. Identyczne wartości progowe wyznaczono dla obrazów po korekcji DOS. Obrazy po normalizacji przedstawiały nieco inne histogramy, po ich analizie wyznaczono wartości progowe:  $-23$  i  $15$ . Otrzymano binarne mapy zmian. (Ryc. 6).



Ryc. 5. Metoda 3 wykrywania zmian – klasyfikacja. A – bez korekcji, B – korekcja DOS, C – normalizacja, D – kompozycja TM RGB 453.

Fig. 5. Change detection method 3 – classification. A – no correction, B – DOS correction, C – normalization, D – TM RGB 453.



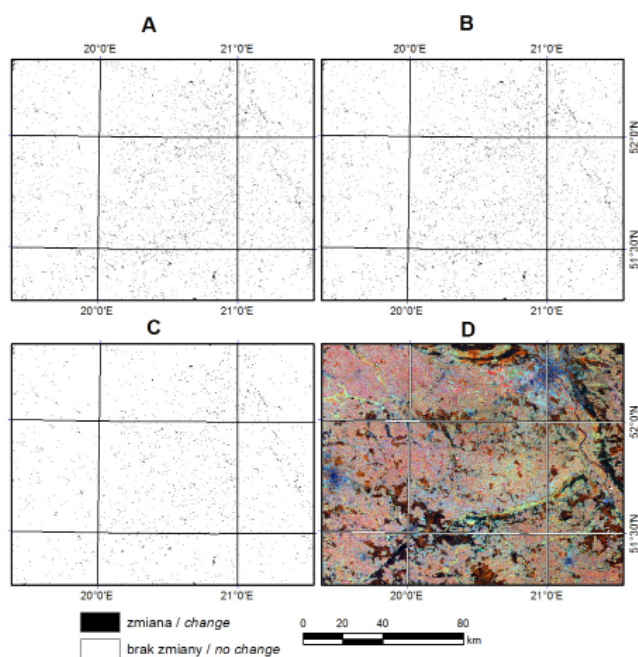
Ryc. 6. Metoda 4 wykrywania zmian – analiza głównych składowych. A – bez korekcji, B – korekcja DOS, C – normalizacja, D – kompozycja TM RGB 453.

Fig. 6. Change detection method 4 – principal component analysis. A – no correction, B – DOS correction, C – normalization, D – TM RGB 453.

Metoda piąta zakładała wyznaczenie obszarów niezmienionych oraz potencjalnie zmienionych za pomocą analizy głównych składowych a następnie sklasyfikowa-



niu obszarów z potencjalnymi zmianami. Na kanałach drugim, trzecim i siódmym z obu obrazów przeprowadzono analizę głównych składowych. W komponencie *PC2* ustalono wartości progowe, aby utworzyć maskę obszarów niezmiennych. Następnie na wszystkich kanałach z obu obrazów sklasyfikowano obszary potencjalnie zmienione metodą największego prawdopodobieństwa. Jako pól treningowych użyto poligonów opisanych w rozdziale 3.2.3. Następnie przeprowadzono reklasyfikację na dwie klasy: obszarów zmienionych i niezmiennych. Identycznie postąpiono z trzema parami danych wejściowych o różnym stopniu korekcji. Otrzymano binarne mapy zmian (Ryc. 7).



Ryc. 7. Metoda 5 wykrywania zmian – analiza głównych składowych i klasyfikacja. A – bez korekcji, B – korekcja DOS, C – normalizacja, D – kompozycja TM RGB 453.

Fig. 7. Change detection method 5 – principal component analysis and classification. A – no correction, B – DOS correction, C – normalization, D – TM RGB 453.

Wszystkie obrazy wynikowe będące binarnymi mapami zmian, poddano przetworzeniom końcowym. Celem tych działań było uzyskanie obrazów o założonej minimalnej jednostce powierzchni. Przyjęto powierzchnię 0,36 ha, co odpowiada czterem pikselom skanera *Thematic Mapper*. Następnie usunięto tzw. zjawisko „soli i pieprzu”, czyli niejednorodnych granic wydzieleni, gdzie często pojedyncze piksele bądź ich bardzo małe grupy zostają zaklasyfikowane do jednej klasy, pozostają jednak w otoczeniu innej klasy o znacznie większej powierzchni. Dokonano tego używając w ENVI 4.5 funkcji *Majority Analysis*, filtrującej w oknie 3×3. Funkcja ta polega na przyporządkowaniu piksela środkowego do klasy przeważającej w całym oknie.

Bardzo ważnym aspektem przy tworzeniu map pokrycia i użytkowania terenu na podstawie danych sa-

telitarnych jest ich dokładność. Istnieje bardzo wiele czynników mogących mieć wpływ na dokładność: jakość obrazu satelitarnego, metodyka przetwarzania obrazów, niezgodność czasowa z danymi referencyjnymi czy niejednorodność informacji spektralnej w obrębie jednego piksela zobrazowania. Podobnie jest przy mapowaniu zmian pokrycia terenu. Postanowiono obliczyć podstawowe wskaźniki dokładności map tematycznych, które mogą zostać wygenerowane z macierzy błędów. Aby stworzyć taką macierz, należy porównać obraz wynikowy z obrazem referencyjnym, bądź częścią obrazu wynikowego z innymi danymi referencyjnymi, np. w określonych punktach bądź poligonach. W tej pracy zdecydowano się na losowe rozrzucenie poligonów referencyjnych, których łączna powierzchnia stanowiła 20 000 pikseli dla obszarów zmian i również 20 000 dla obszarów niezmiennych. Do losowego rozmieszczenia poligonów użyto funkcji *Random selection* w programie *QuantumGIS* 1.7.4. Poligony interpretowano na podstawie wizualnej oceny obrazów z *Landsata* w kompozycji barwnej RGB 453, a także przy pomocy danych referencyjnych: map topograficznych udostępnianych przez *geoportal.gov.pl* oraz wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych i zdjęć lotniczych dostępnych w programie *Google Earth*. W przypadku wątpliwości pomijano taki poligon i losowano inny, aby nie zakłamywać wyniku analizy przez błędne zinterpretowanie danych referencyjnych. Zestawiono liczbę pikseli zaklasyfikowanych poprawnie, do klasy „zmiana” bądź „brak zmiany” zarówno na mapach wynikowych jak i na poligonach weryfikacyjnych z pikselami zaklasyfikowanymi do dwóch różnych klas. Obliczono dokładność całkowitą dla wszystkich metod, jest ona stosunkiem sumy wszystkich pikseli sklasyfikowanych poprawnie do sumy wszystkich pikseli w poligonach weryfikacyjnych. Zastosowano wzór (2) wg Jensena (2004).

$$I_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^k X_{i,i}}{N} \quad (2);$$

Gdzie:

$I_{CP}$  – dokładność całkowita

$k$  – liczba klas

$N$  – liczba pikseli porównawczych

$X_{i,i}$  – liczba pikseli sklasyfikowanych poprawnie

Wyniki dokładności całkowitej dla poszczególnych metod przedstawiono w tabeli (Tab. 5). Dokładność całkowita wszystkich metod waha się od 74% do 91%. Najwyższą dokładność osiągnięto dla 3 metody czyli dla klasyfikacji nadzorowanej. Dla wszystkich metod nie zanotowano różnic między wariantem 1 i 2. Wariant 3 w przypadku metod 1, 2 i 3 dał wynik nieznacznie wyższy od wariantów 1 i 2 (w granicach 1%), w przypadku metod 4 i 5 dał wynik znacznie niższy.

W przypadku metod 2, 3 i 5 osiągnięto dokładność użytkownika dla klasy „zmiana” oraz dokładność produ-

Tabela 5. Wyniki zbiorcze analizy dokładności.  
Table 5. Summary results of accuracy assessment.

Metoda Method	Dokładność całkowita Overall accuracy
m1w1 – Odejmuwanie kanałów (bez korekcji) <i>Image differencing (no correction)</i>	77%
m1w2 – Odejmuwanie kanałów (korekcja DOS) <i>Image differencing (DOS correction)</i>	77%
m1w3 – Odejmuwanie kanałów (normalizacja) <i>Image differencing (normalization)</i>	78%
m2w1 – Odejmuwanie kanałów i klasyfikacja (bez korekcji) <i>Image differencing and classification (no correction)</i>	82%
m2w2 – odejmowanie kanałów i klasyfikacja (korekcja DOS) <i>Image differencing and classification (DOS correction)</i>	82%
m2w3 – odejmowanie kanałów i klasyfikacja (normalizacja) <i>Image differencing and classification (normalization)</i>	83%
m3w1 – Klasyfikacja (bez korekcji) <i>Classification (no correction)</i>	91%
m3w2 – Klasyfikacja (korekcja DOS) <i>Classification (DOS correction)</i>	91%
m3w3 – Klasyfikacja (normalizacja) <i>Classification (normalization)</i>	91%
m4w1 – PCA (bez korekcji) <i>PCA (no correction)</i>	78%
m4w2 – PCA (korekcja DOS) <i>PCA (DOS correction)</i>	78%
m4w3 – PCA (normalizacja) <i>PCA (normalization)</i>	74%
m5w1 – PCA i klasyfikacja (bez korekcji) <i>PCA and classification (no correction)</i>	81%
m5w2 – PCA i klasyfikacja (korekcja DOS) <i>PCA and classification (DOS correction)</i>	81%
m5w3 – PCA i klasyfikacja (normalizacja) <i>PCA and classification (normalization)</i>	78%

centa dla klasy „brak zmiany” na poziomie ponad 99%. Oznacza to w praktyce iż znikoma powierzchnia terenu nie zmienionego została zaklasyfikowana jako zmiany.

### Podsumowanie i wnioski

W pracy przeanalizowano i porównano dokładność wykrycia zmian pokrycia terenu pięcioma różnymi metodami, każdą stosując w trzech wariantach. Obliczono procent obszaru poprawnie sklasyfikowanego przez poszczególne metody. Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować o przydatności owych metod, zasadności pewnych zabiegów, przetworzeń i działań przeprowadzonych w ramach pracy.

Metody automatyczne wykrywania zmian pokrycia terenu na podstawie obrazów satelitarnych pozwalają wykrywać zmiany z dość wysoką dokładnością, rzędu 78%. Mogą one znacznie ograniczyć czas oraz koszty procesu wykrycia zmian, który metodą interpretacji wizualnej wiąże się z dwukrotną klasyfikacją całego obszaru. Metody automatyczne dają możliwość niemal natychmiastowej orientacji jaki jest rząd wielkości udziału terenów zmienionych w obszarze badań oraz wskazują obszary gdzie zmiany są najintensywniejsze.

Wskazanie pól treningowych i zastosowanie klasyfikacji nadzorowanej pozwala podnieść dokładność nawet do 91%. Taki wynik uzyskano dla klasyfikacji nadzorowanej, zastosowanej na znormalizowanych obrazach z *Landsata*. Taka dokładność pozwala na stosowanie metody do tego celu z dużym zaufaniem. Kluczowym etapem zastosowania metody jest odpowiednie wskazanie pól treningowych, będących wzorcowymi przykładami terenów zmienionych oraz tych gdzie pokrycie terenu pozostało bez zmian. Przy wyborze poligonów i ocenie ich jakości należy postępować analogicznie jak przy zwykłej nadzorowanej klasyfikacji pokrycia terenu, uznając wszystkie kanały z obu badanych obrazów za jedną wielowymiarową przestrzeń spektralną.

Metody automatyczne wsparte klasyfikacją nadzorowaną, czyli metody 2 i 5 dały wyniki na poziomie 80% dokładności rozpoznania. Jest to wynik nieco lepszy od uzyskanego przez metody czysto automatyczne, 1 i 4 (78%). Jednak znacznie niższy od wyniku uzyskanego przez samą klasyfikację. Można więc wnioskować iż nie jest celowe łączenie tych metod w zaproponowany w pracy sposób. Zauważalny jest jednak potencjał takiego połączenia. Należałoby przeprowadzić badania i próby w celu znalezienia najlepszego sposobu połączenia metod automatycznych z klasyfikacją nadzorowaną.

Metody automatyczne takie jak różnica kanałów oraz analiza głównych składowych pozwalają szybko i dość dokładnie (prawie 80%) szacować powierzchnię i rozkład zmian pokrycia terenu. Zaproponowane w pracy konkretne przykłady zastosowań tych metod są gotowymi algorytmami, które mogą z powodzeniem zostać użyte do wykrywania zmian pokrycia terenu w Polsce na podstawie zdjęć z *Landsata*.

Metoda pierwsza (różnica obrazów) oraz czwarta (analiza PCA) dały bardzo podobne wyniki, na poziomie około 78%. Wynika to z pewnych podobieństw między nimi. W przypadku metody pierwszej dane wejściowe stanowiły obrazy w zakresie czerwonym. Metoda czwarta polegała na analizie głównych składowych, a więc znalezieniu w wielowymiarowej przestrzeni spektralnej osi o najmniejszej korelacji. Wielowymiarową przestrzeń stworzyły kanały: drugi, trzeci oraz siódmy z obu obrazów. W obu przypadkach największą zmienność między dwiema datami zobrazowań prawdopodobnie spowodowała zmiana w pokryciu roślinnością. Wzrost tego pokrycia a także jego spadek mają znaczny wpływ na odbicie promieniowania elektromagnetycznego w paśmie czerwonym.

Korekcja *Dark Object Subtraction* przeprowadzona za pomocą narzędzi dostępnych w programie ENVI

4.5 nie ma wpływu na dokładność wyznaczenia zmian. Świadczy o tym porównanie wyników wariantu 1 i 2 wszystkich metod, które w przypadku każdej metody były identyczne. Zasadność zastosowania korekcji atmosferycznej do celu wykrywania zmian może zależeć od czynników takich jak zastosowane metody oraz termin akwizycji obrazów (Song i in., 2001). Niniejsza praca potwierdza taką tezę.

Normalizacja jednego zdjęcia względem drugiego może powodować nieznaczną poprawę wyników, jednak nie gwarantuje że wynik nie ulegnie pogorszeniu. W przypadku metod 1, 2 i 3 normalizacja pozwoliła uzyskać dokładność lepszą o około 1%. Jednak w przypadku metod 4 i 5, czyli przy zastosowaniu analizy głównych składowych zanotowano spadek dokładności o 3–4%.

Duży wpływ na wykrywanie zmian ma jakość wykorzystanych obrazów, na co wpływa dzień wykonania zobrazowania, warunki atmosferyczne. Do pracy wybrano dobrze dobrane zdjęcia, wykonane w tym samym okresie fenologicznym, w podobnym stopniu rozwoju roślinności. Również warunki atmosferyczne w czasie wykonywania obu zdjęć były bardzo podobne. Świadczy o tym bardzo mała różnica w wartościach progowych zastosowanej metody korekcji DOS. Ważnym aspektem jest także niemal całkowity brak zachmurzenia, co pozwala porównywać całe obszary, bez potrzeby tworzenia masek chmur, co oprócz zmniejszenia powierzchni badanego obszaru jest również czasochłonne i wymaga dodatkowych przekształceń obrazów.

Zastosowana w pracy metodyka jest alternatywnym sposobem badania zmian pokrycia terenu wobec tradycyjnych, szeroko stosowanych w polskich badaniach, metod manualnych. Metody interpretacji wizualnej pozwalają śledzić zmiany z dużą dokładnością, zarówno jakościowo jak i ilościowo. Pozwalają z powodzeniem wyznaczyć powierzchnię oraz kierunki zmian. Wymagają jednak dużo czasu oraz nakładu pracy. Kluczową kwestią jest doświadczenie fotointerpretatora. Poziom umiejętności analizy wizualnej obrazów satelitarnych wpływa znacząco na czas wykonania pracy oraz jej jakość. Metody takie pozwalają na kompleksowe spojrzenie na obszar przedstawiony na obrazie, na analizę jego struktury oraz tekstury. Metody automatyczne, takie jak przedstawione w pracy, mają swoje zalety i wady. Zaletą jest z pewnością oszczędność czasu, możliwość uzyskania powtarzalności przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów. Automatyzacja procesów pozwala na stworzenie narzędzi które mogą być wykorzystane przez mniej doświadczonych użytkowników. Można przetworzyć znacznie większe ilości danych w znacznie mniejszym czasie. Wadą jest mniejsza dokładność tego typu opracowań. Automatycznie nie da się wskazać niektórych zmian, praktycznie możemy przewidzieć jedynie podstawowe kierunki zmian zachodzących w pokryciu terenu.

Kluczowym aspektem metod automatycznych wykrywania zmian jest odpowiedni dobór wartości progowych, w celu oddzielenia obszarów zmienionych od niezmienionych. W pracy zastosowano metodę empirycznego, ręcznego ustawienia progów. Wspomagano się histogramami

obrazów wynikowych. Możliwe jest również podejście statystyczne. Progi mogą zostać ustalone na podstawie pewnej liczby odchyłeń standardowych od średniej wartości obrazu wynikowego. Takie podejście może znacznie przyspieszyć proces wykrycia zmian i istotnie zwiększyć jego automatyzację.

Podsumowując, nie można powiedzieć że metody automatyczne wykrywania zmian są lepsze bądź gorsze od metod tradycyjnych, manualnych. Służą do nieco innych celów. Głównym ich zastosowaniem jest wskazanie potencjalnych obszarów zmian, ogólne nakreślenie tendencji przestrzennych zmian. Pozwalają szybko znaleźć obszary potencjalnie najbardziej zmienione, stanowią znakomity wstęp do bardziej szczegółowych badań. Metody automatyczne są również nieodzowne przy ogromnej liczbie danych, których używanie staje się codzienną praktyką. Potrzeba szybkiego przetwarzania szczegółowych danych dotyczących bardzo dużych terenów, często całego świata. Przy tego typu monitoringu jedynym praktycznym narzędziem są automatyczne metody wykrywania zmian.

## Literatura

- Aleksandrowicz S., Lewiński S., Kotarba A., 2012, Zastosowanie transformacji IR-MAD w detekcji zmian na zdjęciach satelitarnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 23, str. 11–17.
- Bauer M.E., Yuan F., Sawaya K.E., Loeffelholz B. C., 2003, Multi-temporal landsat image classification and change analysis of land cover in the twin cities (minnesota) metropolitan area. MutiTemp–2003, Second International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. July 16–18, 2003. Ispra, Italy.
- Bochenek Z., 2004, Zastosowanie różnych metod określania zmian pokrycia terenu na obszarach miejskich z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 14.
- Byeong-Hyeok Y., Kwang-Hoon C., 2008, An application research of multi-temporal satellite images for forest reclamation monitoring in the abandoned mine area. Asian Conference on Remote Sensing, Section TS21: Agriculture & Crops Forestry/Ecosystem.
- Byrne G. F., Crapper P. F., Mayo K. K., 1980, Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal landsat data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, z. 3, str. 175–184.
- Cakir H. I., Khorram S., Nelson S. A. C., 2006, Correspondence analysis for detecting land cover change. *Remote Sensing of Environment*, vol. 102, str. 306–317.
- Chen J., Gong P., He C., Pu R., Shi P., 2003, Land-Use/Land-Cover Change Detection Using Improved Change-Vector Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, nr 4, str. 369–379.
- Ciołkosz A., Poławski Z. F., 2006, Zmiany użytkowania ziemi w Polsce w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geograficzny*, vol. 78, z. 2, str. 173–190.
- Civco D. L., Hurd J. D., Wilson E. H., Song M., Zhang Z., 2002, A comparison of land use and land cover change detection methods. 2002 ASPRS-ACSM Annual Conference and FIG XXII Congress..
- Deng J. S., Wang K., Deng Y. H., Qi G. J., 2008, PCA-based land-use change detection and analysis using multitempo-

- ral and multisensor satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, nr 16, str. 4823–4838.
- Ellis Erle, 2010, Land-use and land-cover change. The Encyclopedia of Earth, <http://www.eoearth.org>.
- Fraser R. H., Olthof I., Pouliot D., 2009, Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, str. 1397–1409.
- Jankowski W., 1972, Mapy użytkowania ziemi w Polsce (Dorobek i perspektywy). *Polski Przegląd Kartograficzny*, vol. 4, nr 1, str. 14–26.
- Jensen J. R., 2004, *Introductory Digital Image Processing*, Prentice Hall, New Jersey.
- Lewiński S., 2010, Klasyfikacja obiektowa zdjęcia satelitarnego średniej rozdzielczości MODIS, pierwsze wyniki. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 21, str. 211–219.
- Lo C. P., Shipman R. L., 1990, A GIS approach to land-use change dynamics detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, nr 11, str. 1483–1491.
- Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E., 2004, Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, nr 12, str. 2365–2407.
- Lunetta R. S., Ediriwickrema J., Johnson D. M., Lyon J. G., McKerrow A., 2002, Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, str. 258–270.
- Mas J. F., 1999, Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, nr 1, str. 139–152.
- Michałowska K., Głowienka-Mikrut E., 2010, Wieloczasowe dane obrazowe w badaniu zmian pokrycia terenu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 21, str. 281–289.
- Mycke-Dominko M., Górska P., 2007, Zmiany użytkowania ziemi w Narwiańskim Parku Narodowym i jego otulinie w latach 1987–2005. *Teledetekcja środowiska*, vol. 37, str. 61–81.
- Nasiłowska S., 2008, Zmiany użytkowania ziemi zlewni górnej Narwi w XIX–XX w. *Teledetekcja Środowiska*, vol. 40, str. 53–68.
- Prakasam C., 2010, Land use and land cover change detection through remote sensing approach: A case study of Kodaikanal taluk, Tamil nadu. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, vol. 1, nr 2, str. 150–158.
- Ridd Merrill K., Liu Jiajun, 1998, A Comparison of Four Algorithms for Change Detection in an Urban Environment. *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, str. 95–100.
- Singh A., 1989, Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, nr 6, str. 989–1003.
- Sochacka E., Pabjanek P., Ołędzki J. R., 2008, Analiza zmian użytkowania ziemi zlewni Strugi Toruńskiej na podstawie wieloczasowych zdjęć lotniczych. *Teledetekcja Środowiska*, vol. 39, str. 67–84.
- Sohl T. L., 1999, Change Analysis in the United Arab Emirates: An Investigation of Techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, nr 4, str. 475–484.
- Song C., Woodcock C. E., Seto K. C., Lenney M. P., Macomber S. A., 2001, Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, str. 230–244.
- Symeonakis E., Caccetta P.A., Wallace J.F., Koukoulas S., 2006, Multi-temporal land use and land cover change detection in the spanish mediterranean coast. ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede.
- Taylor J. C., Brewer T. R., Bird A. C., 2000, Monitoring landscape change in the National Parks of England and Wales using aerial photo interpretation and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, nr 13–14, str. 2737–2752.
- Wijanarto Antonius B., 2006, Application of Markov change detection technique for detecting Landsat ETM derived land cover change over Banten Bay. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, vol. 12, nr 1, str. 11–21.
- Villa P., Lechi G., Gomasasca M. A., 2009, Multivariate Differencing Techniques for Land Cover Change Detection: the Normalized Difference Reflectance Approach. W: *Geoscience and Remote Sensing*, str. 277–299.



**Mgr Jan NIEDZIELKO**, absolwent studiów magisterskich na specjalizacji Geoinformatyka i Teledetekcja na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Zainteresowania naukowe obejmują przetwarzanie zobrażeń satelitarnych, wykrywanie zmian na zdjęciach satelitarnych oraz systemy informacji geograficznej. E-mail: [jan.niedzielko@gmail.com](mailto:jan.niedzielko@gmail.com).



**Dr hab. inż. Stanisław LEWIŃSKI prof. CBK**, kierownik Zespołu Obserwacji Ziemi w Centrum Badań Kosmicznych PAN (od roku 2011), adiunkt w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego; jest absolwentem Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. W latach 1984 – 2010 zatrudniony był w Instytucie Geodezji i Kartografii w Zakładzie Teledetekcji. Uczestniczył w różnorodnych projektach związanych z aplikacyjnym wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i systemów GIS, kierował również własnymi projektami naukowo-badawczymi. Specjalizuje się w klasyfikacji obiektowej zdjęć satelitarnych wysokiej i średniej rozdzielczości. Prowadzi zajęcia z cyfrowego przetwarzania zdjęć satelitarnych w Katedrze Geoinformatyki WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego.