

## Klasyfikacja zorientowana obiektowo w inwentaryzacji obiektów Zielonej Infrastruktury na przykładzie dzielnicy Ursynów w Warszawie

*Object-oriented classification in the inventory of Green Infrastructure  
objects on the example of the Ursynów district in Warsaw*

Mateusz PYRA

Globema Sp. z o.o.

ul. Wita Stwosza 22, 02-661 Warszawa

[mateusz.pyra@globema.pl](mailto:mateusz.pyra@globema.pl)

 Joanna ADAMCZYK

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Instytut Inżynierii Środowiska, Katedra Architektury Krajobrazu

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

[joanna\\_adamczyk@sggw.pl](mailto:joanna_adamczyk@sggw.pl)

### Streszczenie

Zielona Infrastruktura jest koncepcją zintegrowanego podejścia do funkcjonalnego i przestrzennie powiązanego planowania obszarów zurbanizowanych wraz z ochroną elementów środowiska, która na przestrzeni ostatnich lat została doceniona przez podmioty odpowiedzialne za planowanie przestrzenne. Niniejsza praca przedstawia możliwości wykorzystania przetworzeń zobrażeń satelitarnych metodami klasyfikacji obiektowej w inwentaryzacji, planowaniu i monitorowaniu obiektów Zielonej Infrastruktury. Do tego celu wykorzystano zobrazenie satelitarne pozyskane przez satelitę Pleiades w maju 2012 roku, reprezentujące obszar części dzielnicy Ursynów m.st. Warszawy. Wykorzystane w pracy metody klasyfikacji obiektowej wykazały wysoką efektywność w realizacji założonych zadań.

### Abstract

Green Infrastructure is a conception of an integrated approach to functional and spatially related planning of urban areas, along with environmental protection, which in recent years has been appreciated by spatial planning specialists. This study presents the capabilities of using satellite image processing with Geographic Object-Based Image Analysis methods in the inventory, planning and monitoring of Green Infrastructure objects. For this purpose, a satellite image acquired by the Pleiades satellite in May 2012, representing the area of a part of the Ursynów district of the capital city of Warsaw, was used. The object-oriented classification methods used in this work showed high effectiveness in the implementation of the tasks defined.

**Keywords:** remote sensing, Geographic Object-Based Image Analysis, green infrastructure, spatial management.

**Słowa kluczowe:** teledetekcja, klasyfikacja obiektowa, zielona infrastruktura, planowanie przestrzenne.

## Wprowadzenie

Pierwsze propozycje dotyczące wprowadzenia systemu przyrodniczego miasta do teorii i praktyki planowania przestrzennego pojawiały się od lat 80. i 90. XX wieku. Jedną z najważniejszych jest praca Andrzejewskiego (1985), który określił główne zasady tworzenia systemu ekologicznego w mieście. W opracowaniu Sukoppa i Wernera (1982) podane są dobre praktyki łączenia rozwoju przestrzennego założeń urbanistycznych ze środowiskiem. W koncepcji systemu przyrodniczego miasta (SPW), opracowaną przez Szulczewską i Kaliszuk (2005), rozumiany jest on jako zbiór koncepcji planistycznych, które mają na celu wyłonienie w strukturze przestrzennej miasta obszarów powiązanych, pełniących funkcje środowiskotwórcze. Odpowiednia identyfikacja takiego obszaru sprzyja utrzymaniu optymalnej kondycji środowiska przyrodniczego miasta, tym samym oddziałując pozytywnie na mieszkańców. Wyżej cytowana koncepcja rozszerza teorię płatów i korytarzy ekologicznych Formana i Godrona (1986). Ważnym jej elementem jest wielofunkcyjność obszarów przyrodniczych w mieście, które powinny spełniać jednocześnie kilka usług ekosystemowych, np.: ekologicznych, społecznych i rekreacyjnych (EEA 2011). W tym nurcie jedną z najważniejszych koncepcji jest Zielona Infrastruktura (ZI) (Szulczewska 2009), której zadaniem jest łączenie w sieć terenów zieleni naturalnej i seminaturalnej z obszarami zieleni antropogenicznej w miastach. Powinno się to odbywać w sposób planowany i odpowiednio zarządzany, aby możliwe było bardziej komplementarne korzystanie z usług ekosystemów. Koncepcja ta w swoim założeniu miała pełnić funkcję dopełniającą dla „zielonych pierścieni” wokół miast (*green belts*) (Tang i in. 2007).

W Unii Europejskiej zainicjowano szereg działań dążących do wdrożenia koncepcji ZI. Istotnym dokumentem określającym możliwości wprowadzenia jej dla krajów UE jest raport Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska (EEA) (2011), w którym, poza określeniem znaczenia obiektów Zielonej Infrastruktury, podzielono potencjalne tereny wchodzące w skład ZI pod względem skali odniesienia (hierarchii). Komisja Europejska wydała też komunikat (UE 2013), w którym stwierdzono konieczność zapewnienia wystarczających narzędzi służących ochronie kapitału przyrodniczego oraz uwzględnienie koncepcji usług ekosystemowych. We wnioskach ZI jest określana jako jeden z priorytetów inwestycyjnych, mających wkład w politykę regionalną i zrównoważony wzrost gospodarczy w Europie.

W Europie i Polsce istnieje kilka podejść do tworzenia Zielonej Infrastruktury. Na przykład w Londynie jako główny cel rozwoju ZI określono wypełnienie luki między mądrym zarządzaniem środowiskiem a rozwojem, poprzez wprowadzenie połączeń najbardziej wartościowych miejsc korytarzami w skali całej sieci miasta (Mayor of London 2012). W Barcelonie opracowano plan Zielonej Infrastruktury Barcelony z prognozą do 2020 roku (Ajuntament de Barcelona 2013). W dokumencie identyfikowane są obszary najbardziej wartościowe i kluczowe powiązania między

nimi oraz podkreślane jest zachowanie usług ekosystemowych w obszarze administracyjnym. W Gdańsku w 2001 roku władze miasta, w ramach aktualizacji Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego (SUiKZP Gdańsk 2007), wprowadziły Ogólnomiejski System Terenów Aktywnych Biologicznie, obejmujący najbardziej wartościowe tereny podmiejskie. Jest on konsekwentnie uwzględniany w zapisach Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego (Mieszkowska 2005). Dla Warszawy opracowano koncepcję Zielonej Infrastruktury Warszawy (BAiPP 2016), którą wdrożono w opracowaniu ekofizjograficznym (*Atlas ekofizjograficzny Warszawy*) (BAiPP 2018). W dokumencie tym utrzymanie i uzupełnienie ZI jest wskazywane jako jeden z najważniejszych czynników kształtowania polityki przestrzennej miasta.

Idea klasyfikacji obiektowej powstała około 2000 r. na podstawie dyskusji wśród badaczy i naukowców zajmujących się tematyką z przetwarzania zobrazowań satelitarnych. Podejście to pozwoliło połączyć GIS, analizę krajobrazową z analizą danych teledetekcyjnych (Blaschke, Lang, Hay 2008). Podstawowym założeniem w klasyfikacji obiektowej było odejście od analizy pojedynczego piksela obrazu cyfrowego na rzecz analizy przestrzennych struktur, jakie tworzą piksele oraz ich relacji z otoczeniem (Blaschke, Strobl 2001). W ten sposób powstała subdyscyplina Systemów Informacji Przestrzennej (GIS) zwana klasyfikacją obiektową *Geographic Object-Based Image Analysis* (GEOBIA). W jej ramach realizowany jest rozwój zautomatyzowanych metod wyodrębniania ze zobrazowań teledetekcyjnych znaczących dla użytkownika obiektów wraz z oceną ich charakterystyk przestrzennych, spektralnych oraz czasowych, które można wykorzystać jako wejściowe do analiz w oprogramowaniu GIS (Castilla, Hay 2008). Istotą klasyfikacji zorientowanej obiektowo jest tworzenie algorytmu pozwalającego na wyznaczenie obiektów docelowych. Użytkownik otrzymuje pożądaną obiekt czy klasę obiektów w ramach następujących i iteracyjnych etapów przetworzeń (Burnett, Blaschke 2003).

Użyteczność klasyfikacji obiektowej w wyodrębnianiu na zobrazowaniach teledetekcyjnych zarówno klas pokrycia, jak i użytkowania terenu jest potwierdzona. Już w jednych z pierwszych publikacjach naukowych prezentujących wyniki badań w tym zakresie wykazano wysokie dokładności wyników klasyfikacji. Na przykład Lackner i Conway (2008) w przygotowanej przez nich szczegółowej mapie użytkowania terenu dla miasta Mississauga (Kanada), dla zobrazowania IKONOS, osiągnęli dokładności 86–90%. Podobnie Su i in. (2008) dla wymagającego terenu miejskiego zlokalizowanego w mieście Kuala Lumpur (Malezja), na zobrazowaniu QuickBird, osiągnęli dokładności rzędu 80%. W Polsce pionierem wykorzystania klasyfikacji obiektowej do pozyskiwania zarówno pokrycia, jak i użytkowania terenu jest Lewiński (2007), z bardzo dobrym wynikiem dokładności ogólnej (pow. 94%, we wszystkich użytych wskaźnikach). Klasyfikacja ta została zrealizowana na scenie zobrazowania Landsat ETM+.

Wielu badaczy porównywało dokładność wyznaczenia klas pokrycia i użytkowania terenu za pomocą klasyfikacji obiektowej z innymi metodami. Przy pomocy GEOBIA dochodzili oni do najlepszych wyników. Przykładowo Thomas i in. (2003) mapowali tereny miejskie Scottsdale w Arizonie dla potrzeb oceny wielkości odpływu wody z deszczów nawalnych. Do podobnego wniosku doszli Carleer i in. (2005), którzy koncentrowali się na porównaniu różnych algorytmów segmentujących, dla różnych terenów zurbanizowanych na różnych obrazowaniach satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości (*Very High Resolution – VHR*).

W literaturze opisano również przykłady zastosowania GEOBIA w wyodrębnianiu Zielonej Infrastruktury. Na przykład Labib i Harris (2018) wykonali analizę dla miasta Dhaka (Bangladesz) na obrazowaniach Sentinel-2 oraz Landsat 8. Wykazali oni, że wyniki analizy są lepsze dla obrazowań o większej rozdzielczości przestrzennej, wspomnieli również o błędach w zasięgu cienia wysokich budynków. Dla obrazowania Pleiades również wykonywano klasyfikację terenów zieleni. Na przykład Trisakti (2017) testował klasyfikację bazującą na pikselach nadzorowaną i nienadzorowaną. Za pomocą obu metod uzyskał na wysokiej dokładności stosując kombinację indeksu wegetacyjnego NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) oraz kanału niebieskiego. Z kolei Sulma i in. (2016) wykorzystali do tego celu klasyfikację obiektową w połączeniu z metodą SVM (*Support Vector Machine*), bazując na indeksach spektralnych NDVI, NDWI (*Normalized Difference Water Index*) i MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*). Dla miasta Dżakarta (Indonezja) odróżniali oni tereny pokryte roślinnością od innych terenów miejskich i osiągnęli dokładność ogólną 86%. Największe niedokładności wykazane w wynikach dotyczyły granic zbiorników wodnych oraz cieni wysokich budynków.

Przedstawiona praca ma na celu sprawdzenie następującej hipotezy badawczej: Informacje uzyskane w wyniku przetwarzania obrazowań satelitarnych mogą być efektywnym źródłem informacji dla inwentaryzacji, planowania oraz monitorowania stanu i zmian na poziomie gminy lub dzielnicy w kontekście obiektów zielonej infrastruktury.

W ramach pracy realizowano następujące cele: określenie przydatności obrazowań satelitarnych w inwentaryzacji, planowaniu i monitorowaniu obiektów zielonej infrastruktury; opracowanie i sprawdzenie efektywności metod klasyfikacji zorientowanej obiektowo na przykładzie wybranego terenu badawczego. Zakres pracy obejmuje teren Ursynowa, dzielnicy m.st. Warszawy.

## Metodyka

### Teren badań

W niniejszej pracy badaniami objęto część obszaru dzielnicy Ursynów (ryc. 1) w Warszawie. Nazwa dzielnicy pochodzi od Jana Ursyna Niemcewicza, posiadającego liczne ziemie na terenie obecnego Ursynowa. Dawne wsie podwarszawskie zostały dołączone do Warszawy w roku

1951. Początkowo nowo przyłączone tereny nie były mocno urbanizowane. Jednak już w 1969 r., w dokumencie *Plan ogólny zagospodarowania przestrzennego Warszawy*, wskazano do urbanizacji pas ursynowsko-natoliński. Następnie w 1971 roku ogłoszono konkurs na projekt Ursynowa Północnego (Królikowski 2014). Charakterystyczna zabudowa Ursynowa ma swoją genezę w ówczesnej myśli urbanistycznej, w której decydującą rolę odgrywa Karta Ateńska (CIAM 1933). Jej zapisy określają parametry lokalizacji luźnej zabudowy w stosunku do tras komunikacyjnych, zapewniające dostęp do światła oraz terenów zieleni urządzonej w bliskiej odległości od zabudowy. Nawiązując do tych założeń, wewnątrz osiedli wydzielono tereny pod zielenią urządzonej. Dodatkowo wzbogacono osiedla o specyficzne ukształtowanie terenu z pagórkami utworzonymi z ziemi pochodzącej z wykopów pod fundamenty nowobudowanych bloków.

Współcześnie Ursynów jest jedną z najbardziej atrakcyjnych lokalizacji do zamieszkania, z uwagi na rozbudowaną infrastrukturę oraz zaplecze dydaktyczno-rekreacyjne (Krawczyk 2001). Obszar zajmowany przez dzielnicę wynosi 4325 hektarów, co stanowi 8,5% terytorium Warszawy i na dzień 1 stycznia 2018 roku mieszka w nim 150 668 osób (GUS 2019). Zgodnie z obowiązującym systemem planowania przestrzennego, w Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego opisano uwarunkowania Ursynowa, jako dzielnicy o przewadze zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej wzdłuż I linii metra Młociny-Kabaty i alei Komisji Edukacji Narodowej, a także zewnętrznych ulic zbiorczych. Znajdują się tam następujące rodzaje terenów charakterystyczne ze względu na pełnione funkcje: największy obszar zajmują tereny o zdecydowanej przewadze zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej oraz usługowej i obszar przemysłowo-usługowy wraz z jednym z największych w Warszawie kompleksów biurowych. Główny obszar terenów leśnych stanowi Las Kabacki, który jest prawnie chroniony, jako rezerwat krajobrazowy. Ważnym elementem struktury przestrzennej Ursynowa, jak i całej Warszawy jest Skarpa Warszawska, która, z uwagi na walory przyrodnicze oraz warunki nośne gleb, jest wyłączona z zabudowy. Tereny szkolnictwa wyższego i rekreacji to przede wszystkim kampus Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego i sportowo-rekreacyjny teren Wyścigów Konnych na Służewcu. Wyróżnia się również Centrum Onkologii, które jest dużą jednostką powierzchniową usług zdrowia. Istotny powierzchniowo jest również teren obiektów i urządzeń komunikacji miejskiej (metra). Niewielkie powierzchniowo tereny rolnicze znajdują się na południu Ursynowa.

Warto wspomnieć o współczesnych wyzwaniach i wynikających z nich problemach rozwoju przestrzennego Ursynowa. Pierwszym jest widoczna w zabudowie wielorodzinnej południowej części dzielnicy tendencja do intensyfikacji zabudowy. Przy nowych inwestycjach odchodzi się tu od założonych metod projektowania zabudowy na rzecz zabudowy pierzejowej zlokalizowanej wzdłuż głównych arterii komunikacyjnych (Królikowski 2014). Widoczny jest również wzmożony proces zagęszczania zabudowy, obejmujący tereny zieleni,



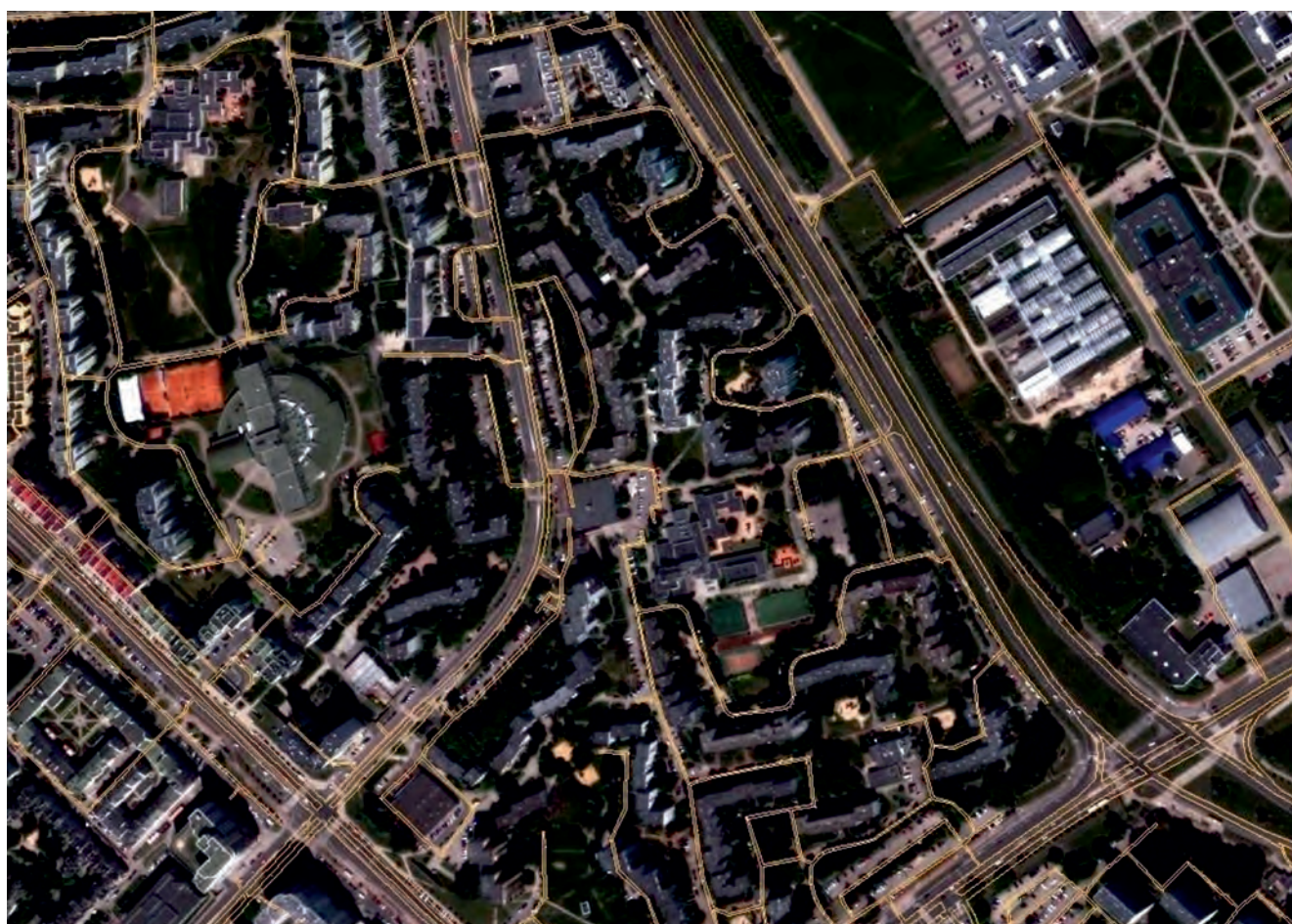
które w pierwotnych planach miały pozostać lokalnymi płucami dzielnicy. Poza problemami użytkowymi, wzmożone zagęszczenie zabudowy zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia chaosu urbanistycznego. Wyzwania stanowią również: trwająca realizacja południowej obwodnicy Warszawy, dalsza rozbudowa kompleksu usługowo-przemysłowego, wpływ ograniczeń wynikających z oddziaływań lotniska im. Fryderyka Chopina na przyszłą zabudowę. Część dzielnicy Ursynów boryka się z problematyką lokalnych podtopień, czego przyczyną jest brak uregulowania gospodarki wodno-deszczowej.

### Wykorzystane dane

W niniejszej pracy, jako materiał podstawowy, wykorzystano ortofotomapę obejmującą południową część

dzielnicy Ursynów, wykonaną na podstawie zobrażenia satelity Pleiades 1A w maju 2012 roku. Składa się ono z czterech kanałów spektralnych w zakresach: światła widzialnego (niebieski, zielony, czerwony) oraz bliskiej podczerwieni. Rozdzielczość przestrzenna piksela wynosi 0,5 metra, a radiometryczna 32 bity. Zobrażowanie zostało przez producenta poddane korekcji radiometrycznej oraz geometrycznej. Przeprowadzono również ortorektyfikację przy użyciu NMT (numerycznego modelu terenu), pozyskanego z instrumentu HRS satelity SPOT 5 o rozdzielczości 5 metrów.

Dodatkowo wykorzystano dane wektorowe z serwisu OpenStreetMap (OSM). Posłużyły one jako warstwa pomocnicza dla określenia użytkowania terenu (szczegóły poniżej) oraz wykluczenia terenów komunikacyjnych z wyników klasyfikacji (ryc. 1).



Ryc. 1. Dane dotyczące sieci drogowej z OpenStreetMap nałożone na ortofotomapę badanego obszaru (oprac. własne)

*Fig. 1. Data on the road network from OpenStreetMap overlaid on the orthophotomap of the studied area (own elaboration)*

### Klasyfikacja zorientowana obiektowo

W procesie wyodrębniania obiektów zielonej infrastruktury wykorzystano klasyfikację zorientowaną obiektowo. Zrealizowano przy tym standardowy schemat przetworzeń bazujący na budowie reguły decyzyjnej, często opisywany w literaturze (np. Adamczyk, Będkowski

2014). Na początkowym etapie klasyfikacji wykonywana jest segmentacja pikseli zobrażenia cyfrowego, powstałe obiekty opisuje się interesującymi użytkowymi cechami, na koniec następuje przyporządkowanie obiektów do poszczególnych klas docelowych.

Segmentacja polega na wyznaczeniu na obrazie obiektów wektorowych, bazując na jednorodności są-

siadających pikseli (według określonego poziomu podobieństwa). Na tak utworzonych obiektach wykonywane są dalsze analizy. Procedura klasyfikacyjna ma charakter iteracyjny, czyli proces jest powtarzany, aż określone przez użytkownika wymagania, zostaną spełnione. Mogą powstać kolejne poziomy obiektów, z których każdy może posiadać osobną hierarchię klas: super obiekty (np. tereny lasów) mogą zawierać pod-obiekty (np. gatunki drzewostanów). W ślad za kolejnymi iteracjami następuje ulepszanie segmentacji i zwiększenie zaangażowania użytkownika, w wyniku czego rośnie dokładność klasyfikacji w aspekcie tematycznym i geometrycznym (Adamczyk Będkowski 2014).

Do wyznaczenia obiektów podstawowych (*object primitives*) wybrano narzędzie bazujące na wyznaczaniu regionów (*region-based*), w którym algorytmy segmentujące opierają się na zasadzie jednorodności (*homogeneity*) obiektu. Pojedyncze piksele lub grupy pikseli łączone są z sąsiednimi aż do momentu spełnienia założonego kryterium jednorodności. W tym celu wykorzystano algorytm segmentacji wielopoziomowej (Lewiński, Bochenek 2008) (*multiresolution segmentation*) (Baatz, Schäpe 2000). Umożliwia on budowanie hierarchii obiektów zależnych od siebie „w pionie” (Schiewe 2002, Blaschke, Lang, Hay 2008, Adamczyk, Będkowski 2014).

Po dokonaniu segmentacji opracowano zestaw reguł decyzyjnych, który pozwala na automatyczne przyporządkowanie obiektów do interesujących użytkownika klas. Każda z reguł pozwala na wyznaczenie na zobrażowaniu satelitarnym interesującej użytkownika klasy, za pomocą opisanych przez nią charakterystyk. Użytkownik może opierać się na charakterystykach spektralnych grup pikseli zawartych w obiektach podstawowych, ale również może analizować ich właściwości statystyczne. Można również wziąć pod uwagę cechy geometryczne obiektów (np. kształt, orientację), zależności sąsiedztwa, czy analizę kontekstową poszczególnych obiektów względem siebie. Przykładem analizy kontekstowej jest sytuacja, gdy klasa: tereny zieleni urządzonej ma podobną charakterystykę spektralną do terenów łąk, jednak z uwagi na obecność w określonym zasięgu od zabudowy mieszkaniowej, może zostać przyporządkowana do właściwej klasy użytkowania terenu.

Oprócz mapy zawierającej wynikowe klasy przypisane do terenu, użytkownik otrzymuje zestaw reguł decyzyjnych (*ruleset*). Można go ponownie wykorzystać w innym terenie o podobnych uwarunkowaniach terenowych i na podobnym zobrażowaniu. Pewne zasady postępowania określone w zestawie reguł mogą się również okazać uniwersalne, niezależnie od wykorzystanego zobrażowania czy terenu badawczego. Możliwość wielokrotnego wykorzystania zestawu reguł jest największą zaletą klasyfikacji obiektowej realizowanej w schemacie reguły decyzyjnej. Stanowi to przewagę w stosunku do klasyfikacji nadzorowanej, gdzie wyznaczone pola wzorcowe są zazwyczaj indywidualne dla każdego zobrażowania i terenu.

## Wyznaczanie obiektów Zielonej Infrastruktury

W niniejszej pracy sprawdzano możliwość wykorzystania zautomatyzowanej metody klasyfikacyjnej, w wyznaczaniu obiektów Zielonej Infrastruktury według założeń zaproponowanych w opracowaniu dla m.st. Warszawy *Potencjał do kształtowania obiektów i obszarów Zielonej Infrastruktury* (BAiPP 2016), gdzie wszystkie etapy prowadzące do wyznaczenia obiektów ZI zostały zrealizowane „ręcznie”.

Na podstawie założeń zawartych w cytowanym opracowaniu przygotowano metodykę wyznaczania obiektów Zielonej Infrastruktury zawartą w niniejszej pracy (ryc. 6). W pierwszym etapie, za pomocą klasyfikacji obiektowej, wyodrębniono składowe ZI, a były nimi klasy pokrycia i użytkowania terenu. Są to rodzaje terenów stanowiące potencjał przestrzenny dla ZI (ryc. 2). Pokrycie terenu możliwe było do zidentyfikowania na podstawie interpretacji zobrazowania satelitarnego. Identyfikacja klas użytkowania terenu wymagała dodatkowego wykorzystania warstw tematycznych OSM.

Na podstawie spełnianych funkcji oraz ich hierarchii poszczególne składowe zostały pogrupowane w jednostki wyższego rzędu – obiekty na poziomie dzielnicowym (ryc. 2). Obiekty ZI są terenami, które z uwagi na swoje pokrycie roślinnością lub obecność wód powierzchniowych, zapewniają funkcjonowanie środowiska przyrodniczego miasta i poprawiają jakość życia.

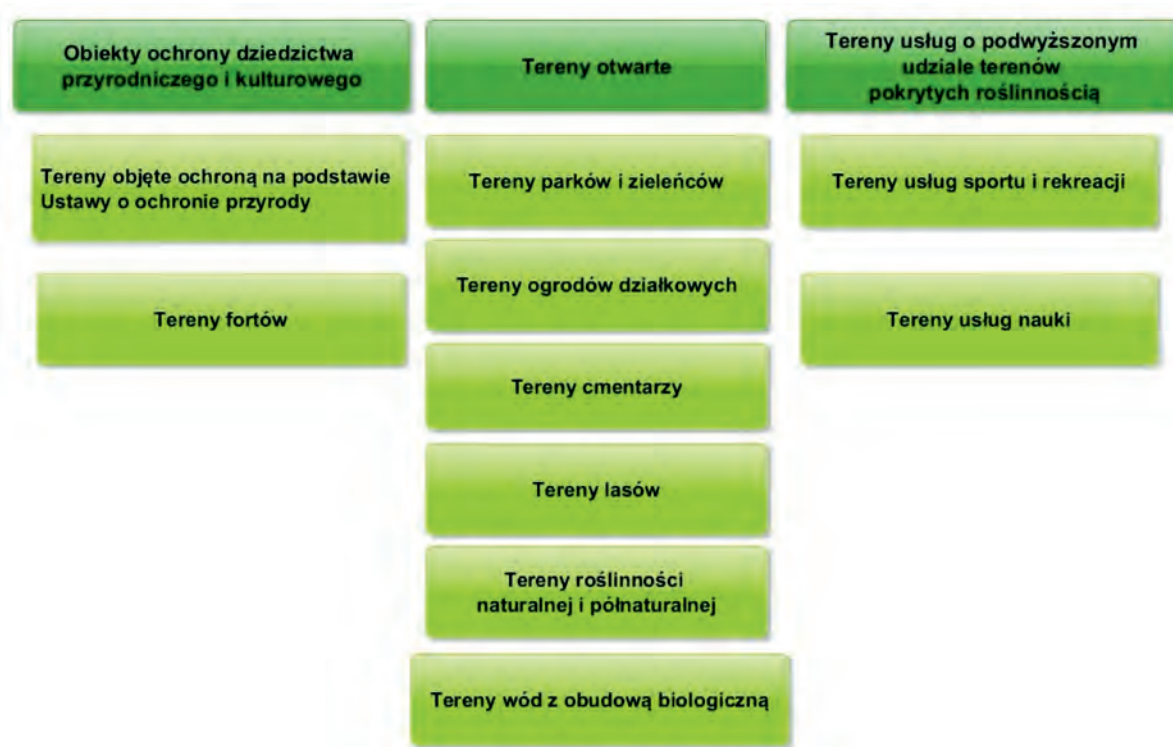
W oryginalnym opracowaniu wyznaczano również obiekty na poziomie miejskim, które są kluczowe dla funkcjonowania miasta. Zostały one pominięte w niniejszym opracowaniu, ze względu na ograniczenia powierzchniowe terenu badań.

## Segmentacja zobrażowania

Schemat etapów segmentacji przedstawiono na ryc. 3. W pierwszej kolejności wykonano segmentację wielopoziomową, gdzie optymalne wartości parametrów wyznaczono metodą empiryczną. Dodatkowo ustalono wagi poszczególnych kanałów spektralnych wykorzystanego zobrażowania satelitarnego. Dla kanału bliskiej podczerwieni ustalono wagę dwukrotnie większą niż dla pozostałych użytych kanałów spektralnych, ze względu na potencjał wykrywania terenów pokrytych zielenią. W procesie segmentacji wykorzystano również dane wektorowe pobrane z serwisu OSM, ułatwiające odróżnienie obiektów sieci drogowej od innych klas pokrycia terenu.

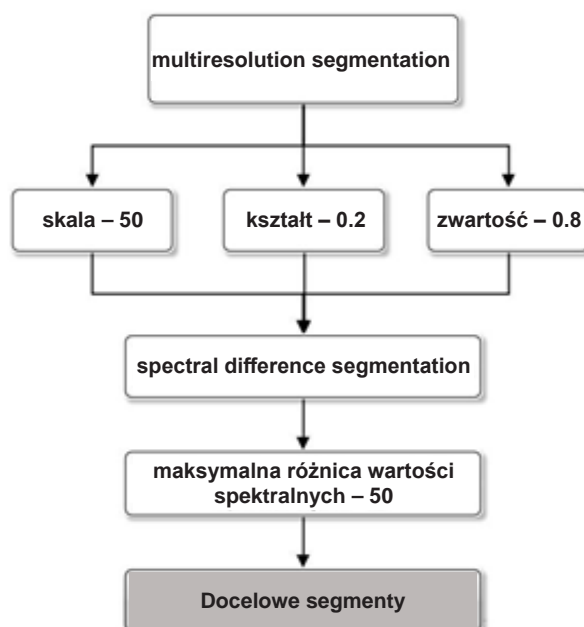
W następnym etapie wyodrębnione obiekty podstawowe zostały poddane segmentacji różnic spektralnych (*spectral difference segmentation*). Główne kryterium wykonania tej części segmentacji stanowi maksymalna wartość intensywności na poziomie 50 jednostek, poniżej której sąsiednie segmenty łączone są w całość (ryc. 4A). Tym sposobem wyodrębniono obiekty do dalszego procesu klasyfikacji (ryc. 4B).





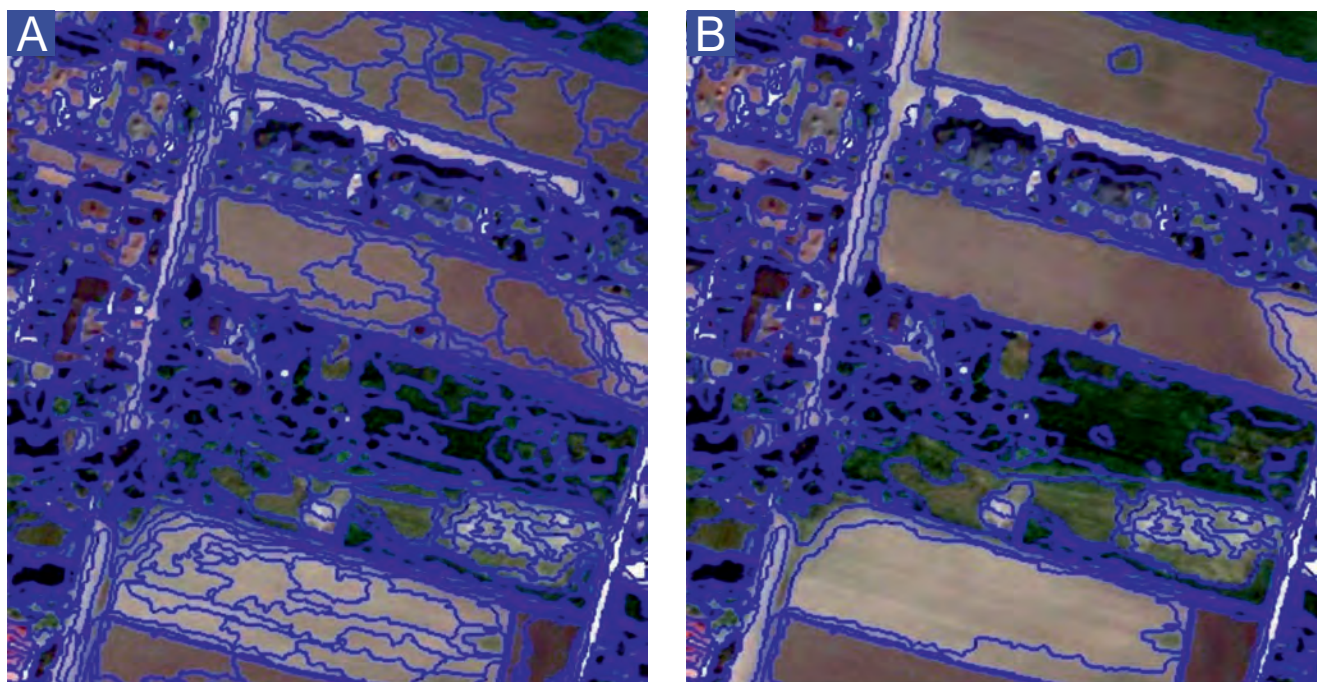
Ryc. 2. Obiekty Zielonej Infrastruktury na poziomie dzielnicowym oraz budujące je składowe (opr. własne na podstawie BAIPP 2016)

Fig. 2. Green Infrastructure Facilities at district level and their building elements (own elaboration based on BAIPP 2016)



Ryc. 3. Przebieg i parametry procesu segmentacji (opr. własne)

Fig. 3. Process and parameters of the segmentation process (own elaboration)



Ryc. 4. Fragment terenu opracowania przed (A) oraz po (B) procesie segmentacji różnic spektralnych (opr. własne)

Fig. 4. Part of the study site before (A) and after (B) the process of segmentation of spectral differences (own elaboration)

#### Charakterystyka klas i wyznaczenie składowych ZI

W tym etapie określono parametry, które muszą spełniać obiekty podstawowe, aby zostały zaklasyfikowane do poszczególnych klas, czyli jako składowe ZI (ryc. 5).

Pierwszą, wziętą pod uwagę, cechą była średnia wartość jasności pikseli w poszczególnych obiektach. W tym celu posłużono się zasobami biblioteki spektralnej ASTER (CIT 2009). Analiza krzywych spektralnych pozwoliła na odnalezienie prawidłowości między obiektami a właściwościami odbicia promieniowania elektromagnetycznego, na podstawie których znaleziono wartości progowe do wyodrębnienia następujących obiektów: odkryta gleba, niska roślinność trawiasta, kilka gatunków drzew, tereny wód powierzchniowych, antropogeniczne formy terenu (asfalt, beton, metalowe pokrycia dachowe).

Dla wzmocnienia możliwości wyodrębnienia odpowiednich klas zastosowano indeksy spektralne. Pierwszym jest indeks NDVI, którego wartości zawierają się w przedziale  $<-1; 1>$ , gdzie wartości bliżej „1” oznaczają powierzchnię bardziej porośniętą roślinnością, zaś bliżej „-1” teren o nawierzchni antropogenicznej lub niepokrytej roślinnością. Matematyczna postać wzoru wygląda następująco:

$$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

gdzie:

*RED* – odbicie promieniowania w zakresie czerwonym,  
*NIR* – odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni.

Drugim wykorzystanym wskaźnikiem jest SAVI (*Soil-adjusted Vegetation Index*). Zawarty w nim współczynnik korygujący w przedziale  $<0; 1>$ , pozwala uwzględnić udział tła glebowego, co jest przydatne do wyróżniania roślinności niskiej, jak np. traw. Na podstawie literatury przyjęto, że będzie on miał wartość 0,5 (Heute 1988).

$$\frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} \times (1 + L)$$

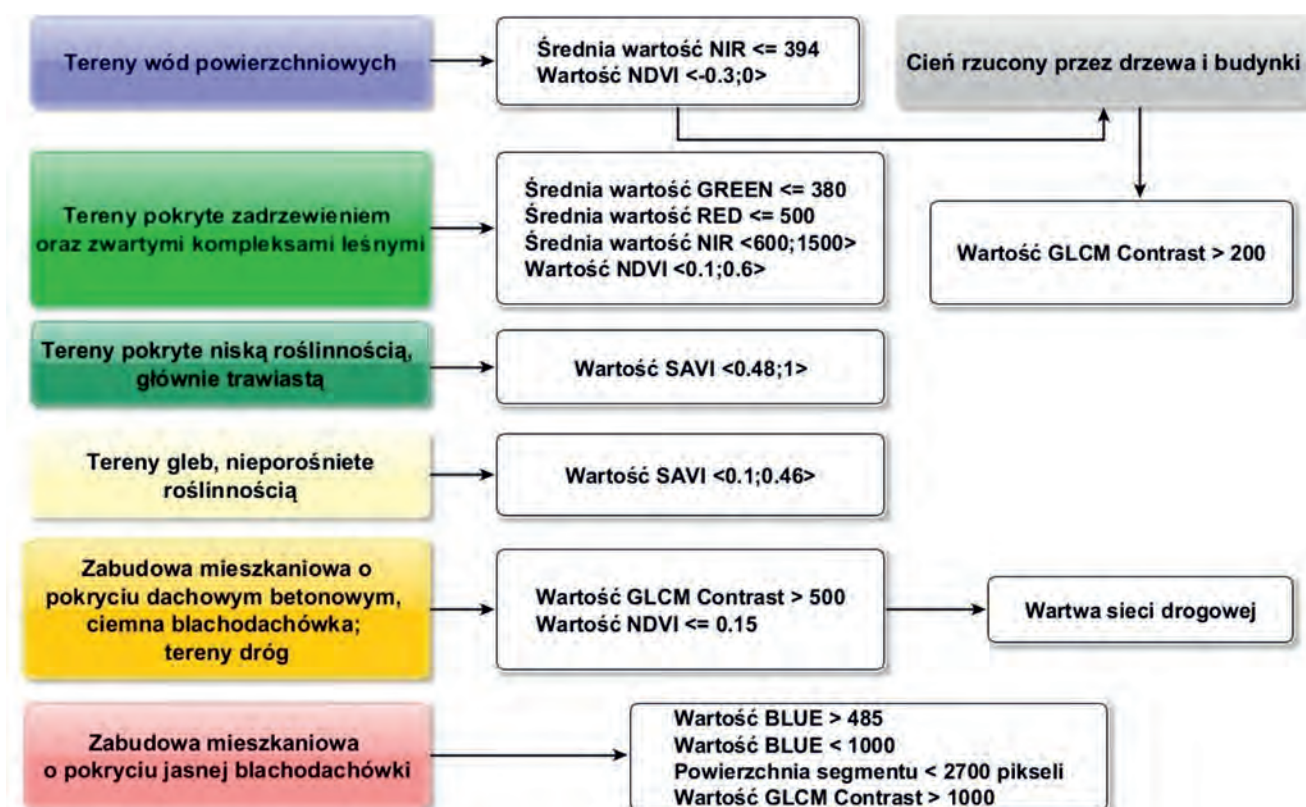
gdzie:

*RED* – odbicie promieniowania w zakresie czerwonym,  
*NIR* – odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni,

*L* – współczynnik korygujący w zależności od gęstości pokrycia roślinnością.

Zastosowano również analizę tekstury obrazu uwzględniającą lokalne zależności między wartościami pikseli w ramach obiektów. Konkretnie wykorzystano algorytm GLCM Contrast bazujący na analizie lokalnych zmian w obrazie (Harlick 1979).

Na podstawie przedstawionych kryteriów wyodrębniono składowe ZI, podstawowe klasy pokrycia i użytkowania terenu przedstawione na ryc. 6.



Ryc. 5. Parametry wykorzystane do wydzielenia podstawowych klas pokrycia (opr. własne). Objaśnienia: BLUE – zakres światła widzialnego niebieskiego, GREEN – zakres światła widzialnego zielonego, RED – zakres światła widzialnego czerwonego, NIR – zakres bliskiej podczerwieni, NDVI – indeks wegetacyjny NDVI, SAVI – indeks wegetacyjny SAVI, GLCM Contrast – wartość algorytmu określającego teksturę w obiektach

Fig. 5. Parameters used to separate elementary land cover classes (own elaboration). Explanations: BLUE – blue visible light range, GREEN – green visible light range, RED – red visible light range, NIR – near infrared range, NDVI – vegetation index NDVI, SAVI – vegetation index SAVI, GLCM Contrast – value of the algorithm determining texture within objects

### Wyznaczenie obiektów Zielonej Infrastruktury

Końcowym etapem było przyporządkowanie składowych do obiektów Zielonej Infrastruktury na poziomie dzielnicowym według schematu przedstawionego na ryc. 6. Najczęściej stanowiły one mozaikę obiektów o różnym typie użytkowania czy pokrycia terenu, zgodnym z koncepcją Zielonej Infrastruktury. Wynik tej operacji przedstawiono na ryc. 8.

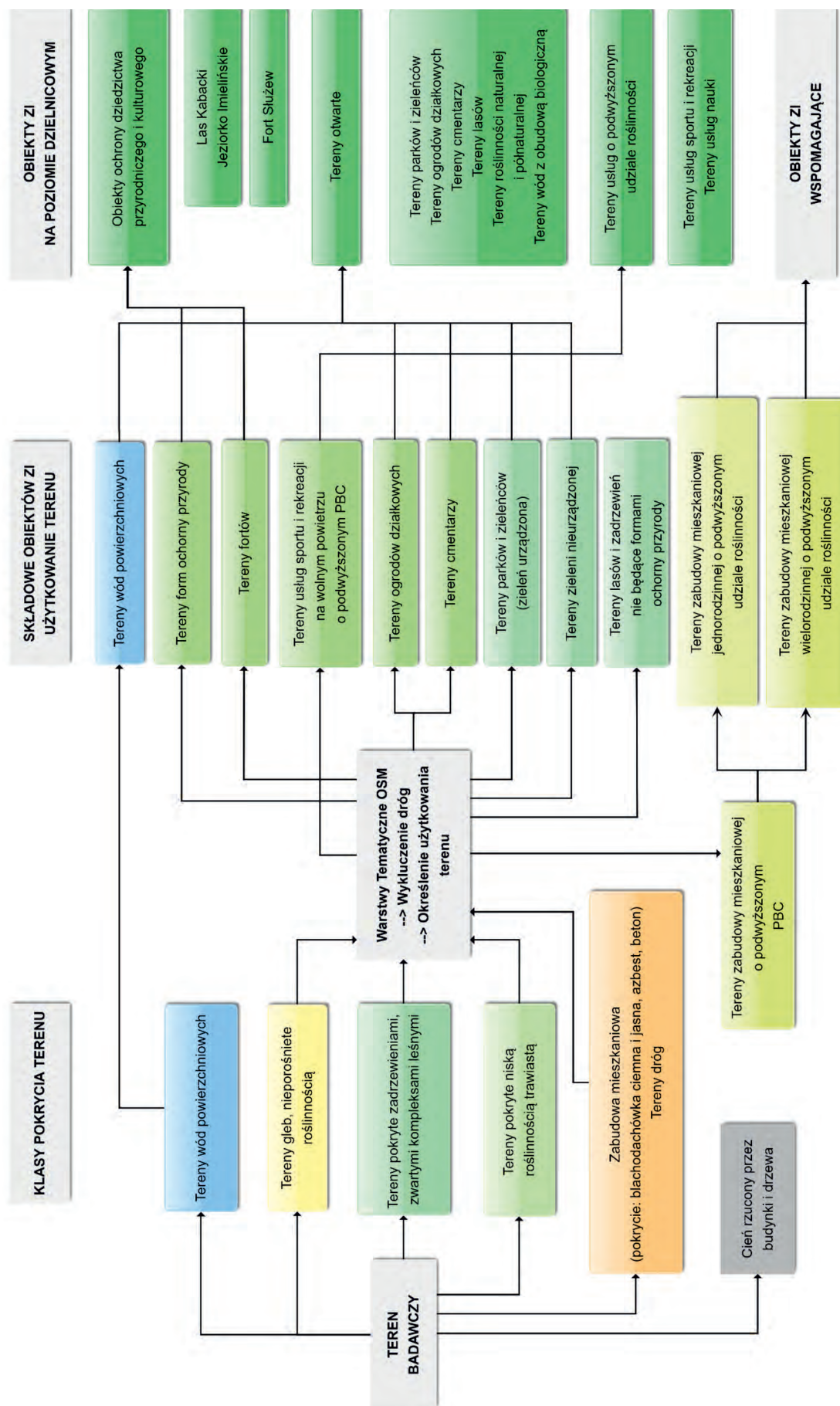
### Sprawdzenie dokładności klasyfikacji

W celu przeprowadzania oceny jakości klasyfikacji przygotowano punktową warstwę danych referencyjnych. Punkty rozmieszczono w granicach składowych ZI według następujących zasad: 1) dla małych obiektów, jak pojedyncze domy czy drzewa, wyznaczono je-

den punkt, 2) dla obszarów większych powierzchniowo losowano kilka punktów, 3) dodatkowo zagęszczono liczbę punktów referencyjnych poprzez utworzenie jednolitej siatki punktów oddalonych od siebie równomiernie w interwale 50–100 m. W przypadku, gdy któryś z punktów przypadł w miejscu trudnym do interpretacji, np. na granicy różnych obiektów, został on przesunięty na obiekt jednoznaczny pod względem weryfikacji. Ostatecznie warstwa referencyjna zawierała 4249 punktów (ryc. 7).

Klasyfikację punktów referencyjnych wykonano według takiego samego wzorca jak klasyfikacja obiektów składowych w bazie danych Zielonej Infrastruktury M. St. Warszawy (BAiPP 2016). Do porównania wykorzystano macierz błędów, zawierającą następujące współczynniki określające zgodność danych referencyjnych z wynikami klasyfikacji (tab. 1).





Ryc. 6. Schemat podejścia do wyznaczenia składowych i obiektów Zielonej Infrastruktury na poziomie dzielnicowym (opr. własne)  
 Fig. 6. Schematic diagram of the approach to the determination of green infrastructure components and objects on district level (own elaboration)

Tabela 1. Wyjaśnienie wskaźników błędów zastosowanych w ocenie jakości klasyfikacji (na podstawie Adamczyk i Będkowski 2007). Wyjaśnienie symboli:  $k$  – liczba wyróżnionych klas;  $i, j$  – kolejne klasy,  $n$  – liczba punktów

Table 1. Explanation of error indices used in the assessment of classification quality (based on Adamczyk and Będkowski 2007). Explanation of symbols:  $k$  – number of classes distinguished;  $i, j$  – subsequent classes,  $n$  – number of points

Nazwa błędu	Wzór	Znaczenie
Błąd przeszacowania	$E_C = 1 - \frac{n_{ii}}{\sum_{j=1}^k n_{ij}}$	Liczba sklasyfikowanych punktów danej klasy zakwalifikowanych do innych klas niż wynika to z punktów referencyjnych
Błąd niedoszacowania	$E_O = 1 - \frac{n_{jj}}{\sum_{i=1}^k n_{ij}}$	Liczba punktów referencyjnych, które zostały mylnie przyporządkowane do danego obiektu w wyniku klasyfikacji
Dokładność użytkownika	$A_U = \frac{n_{ii}}{\sum_{j=1}^k n_{ij}}$	Liczba punktów, które zostały poprawnie sklasyfikowane w danej klasie w odniesieniu do wszystkich punktów danej klasy w obrazie wynikowym klasyfikacji
Dokładność producenta	$A_P = \frac{n_{jj}}{\sum_{i=1}^k n_{ij}}$	Liczba punktów, które zostały poprawnie sklasyfikowane w danej klasie do wszystkich punktów danej klasy w punktach referencyjnych
Wskaźnik Kappa	$K = \frac{n \sum_{p=1}^k n_{pp} - \sum_{p=1}^k \left( \sum_{j=1}^k n_{pj} \sum_{i=1}^k n_{ip} \right)}{n^2 - \sum_{p=1}^k \left( \sum_{j=1}^k n_{pj} \sum_{i=1}^k n_{ip} \right)}$	Prawdopodobieństwo błędu, do jakiego może dojść w czasie klasyfikacji. Jego wartość mieści się w zakresie 0–1, gdzie 0 określa brak podobieństwa porównywanych warstw, zaś 1 oznacza identyczność warstw
Całkowita dokładność klasyfikacji	$I_{CP} = \frac{\sum_{p=1}^k n_{pp}}{n}$	Liczba pikseli sklasyfikowana poprawnie w stosunku do wszystkich pikseli pól referencyjnych

## Wyniki

Wynik klasyfikacji obiektowej widoczny jest na ryc. 8. W trakcie interpretacji wyników należało zweryfikować dokładność klasyfikacji w porównaniu do punktów referencyjnych, za pomocą macierzy błędów i zawartych w niej współczynników. Macierz wyliczono dla poziomu klas pokrycia terenu, czyli składowych ZI (tab. 2).

### Składowe ZI wyznaczone na podstawie pokrycia terenu

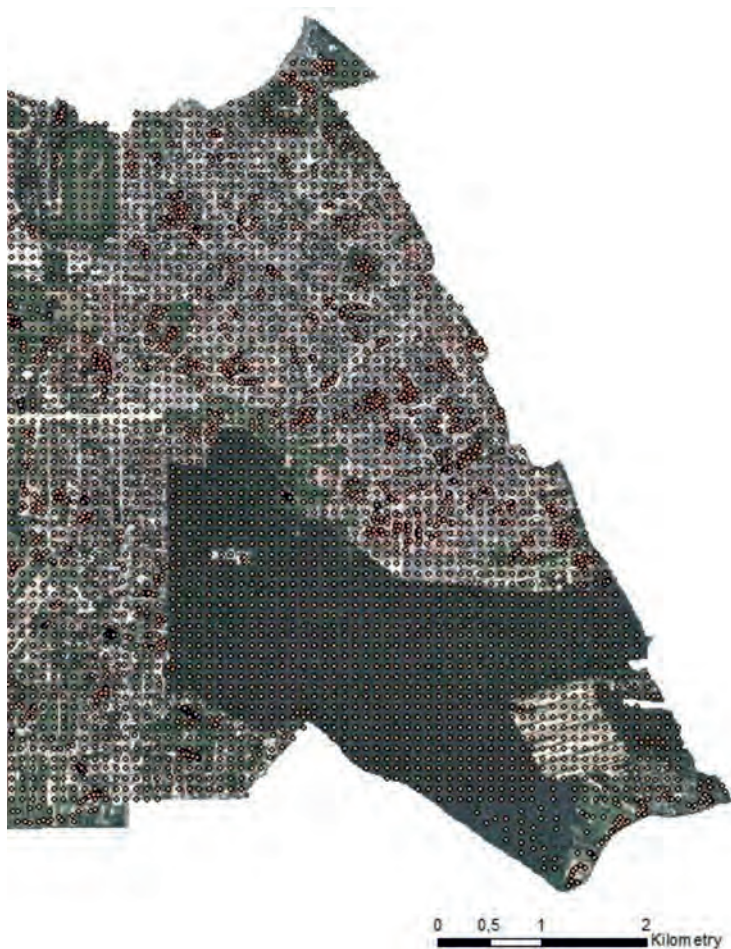
Tereny pokryte lasami i zadrzewieniami, z uwagi na powierzchnię występowania na terenie badawczym, stanowiły klasę najbardziej reprezentowaną w punktach referencyjnych. Dokładność producenta w klasyfikacji wyniosła 83%. Największej liczbie błędnie sklasyfikowanych

obiektów, które powinny należeć do tej klasy, przypisano klasę niskiej roślinności trawiastej.

Tereny pokryte roślinnością trawiastą zostały sklasyfikowane poprawnie w 71%. Niedokładność wyników najbardziej widać wzdłuż ciągów komunikacyjnych, gdzie trawniki zostały przyporządkowane do terenów odsłoniętych gleb. Prawdopodobnym powodem jest występujące w tych miejscach wyraźne przerzedzenie roślinności (ryc. 9).

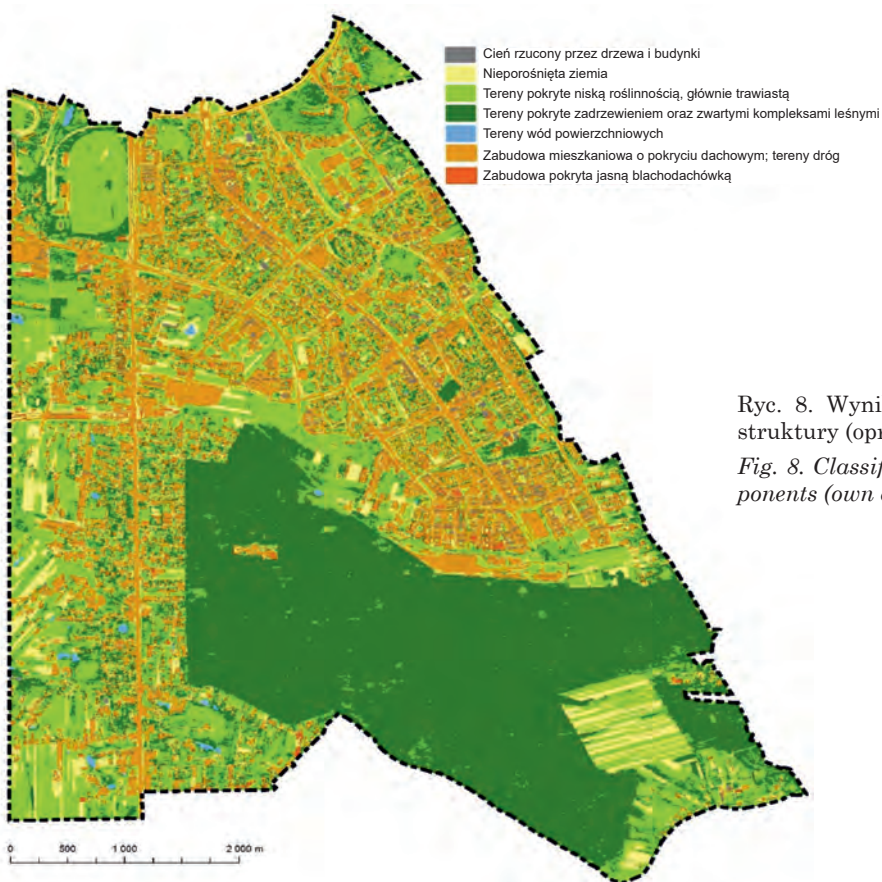
Błędy klasyfikacji są najbardziej widoczne przy klasie cieni rzucanych przez objekty terenowe, wyodrębnionych jako osobny rodzaj obiektu, ze względu na swoją problematyczność. Poprawnie sklasyfikowane objekty stanowią jedynie 50%. Największa liczba obiektów, które powinny być cieniem została sklasyfikowana jako tereny zabudowane, zwłaszcza przy wysokiej zabudowie (ryc. 10).





Ryc. 7. Wizualizacja przestrzennej dystrybucji punktów referencyjnych na badanym obszarze (opr. własne)

Fig. 7. Visualization of spatial distribution of reference points in the studied area (own study)



Ryc. 8. Wyniki klasyfikacji: składowe Zielonej Infrastruktury (opr. własne)

Fig. 8. Classification results: Green Infrastructure components (own elaboration)



Tabela 2. Macierz błęd klasyfikacji obiektowej klas pokrycia terenu (opr. własne)  
 Table 2. Error matrix for object-oriented classification of land cover classes (own elaboration)

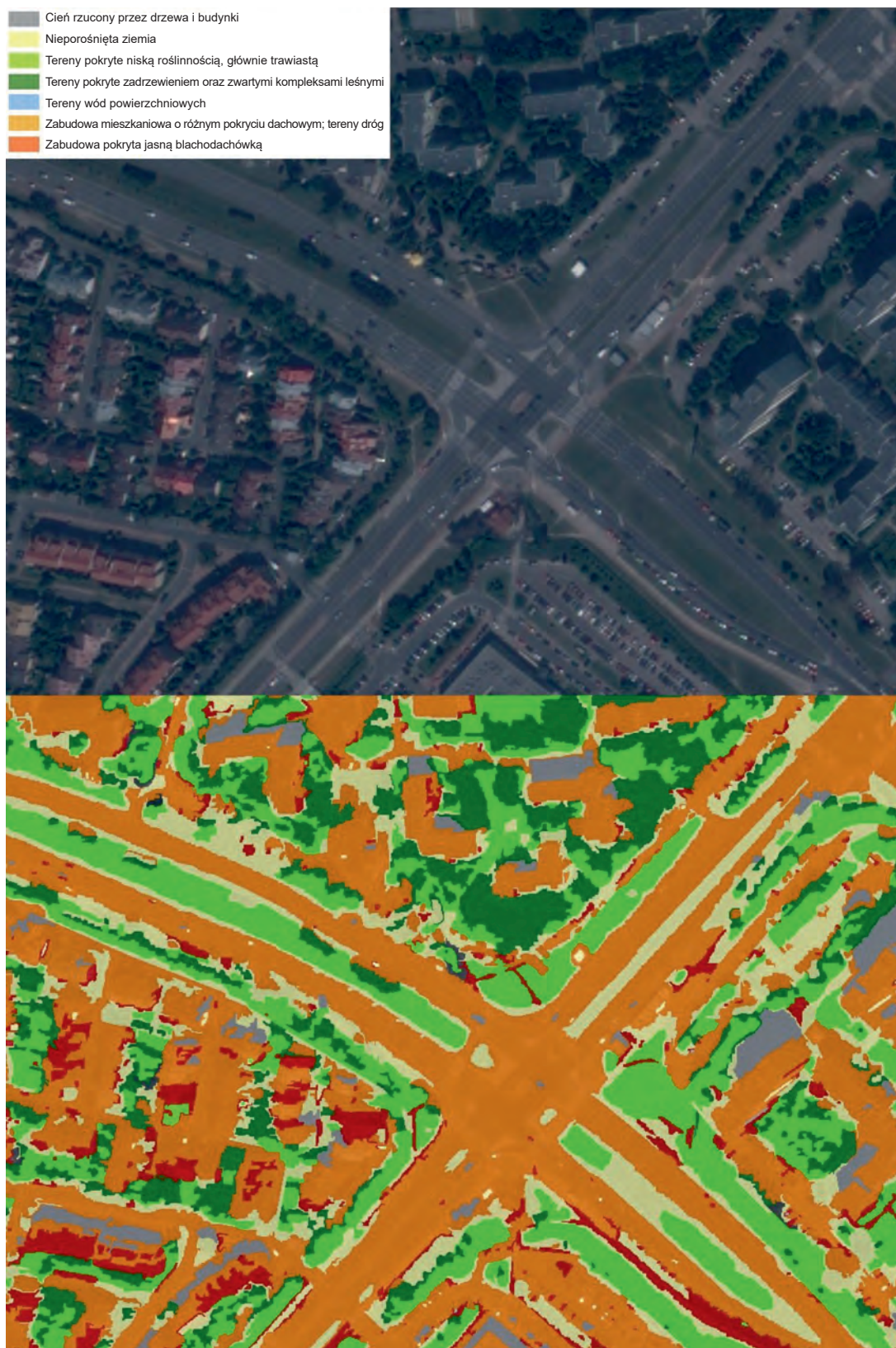
		Dane referencyjne								
		Tereny dróg i zabudowa mieszkaniowa (pokryte blachodachówką ciemną i jasną, pokrycie azbestowe lub betonowe)	Tereny pokryte niską roślinnością trawiastą	Tereny gleb, nieporośnięte roślinnością	Tereny pokryte zadrzewieniami, zwartymi komplekami leśnymi	Tereny wód powierzchniowych	Cień rzucony przez budynki i drzewa	Suma pikseli Wyników Klasyfikacji Obiektowej	Dokładność użytkownika	Błąd przeszacowania
Wynik klasyfikacji obiektowej	Tereny dróg i zabudowa mieszkaniowa (pokryte blachodachówką ciemną i jasną, pokrycie azbestowe lub betonowe)	936	55	14	15	1	96	1117	0,84	0,16
	Tereny pokryte niską roślinnością trawiastą	56	746	28	229	0	5	1064	0,70	0,30
	Tereny gleb, nieporośnięte roślinnością	135	180	76	12	0	2	405	0,19	0,81
	Tereny pokryte zadrzewieniami, zwartymi komplekami leśnymi	29	62	3	1230	7	29	1360	0,90	0,10
	Tereny wód powierzchniowych	0	0	0	0	90	10	100	0,90	0,10
	Cień rzucony przez budynki i drzewa	35	10	7	0	7	144	203	0,71	0,29
	Suma pikseli i Klas Danych Referencyjnych	1191	1053	128	1486	105	286	4249		
	Dokładność producenta	0,79	0,71	0,59	0,83	0,86	0,50		Dokładność całkowita	Współczynnik Kappa
	Błąd niedoszacowania	0,18	0,29	0,41	0,17	0,14	0,50		0,76	0,68

Duży udział błędów widoczny jest również w wynikach klasyfikacji terenów niepokrytych roślinnością. Poprawna klasyfikacja wyniosła tu tylko 59%. Jest to klasa, która pośród wszystkich klas została najbardziej przeszacowana. Nieporośnięta gleba występuje prawie trzykrotnie częściej niż powinna, zwłaszcza w miejscu niskiej roślinności czy terenów zabudowanych. Niektóre z materiałów, z których zrobione są chodniki, posiadają podobne charakterystyki spektralne, co odsłonięta ziemia. Istnieje możliwość, że z uwagi na bliskość do większych terenów niskiej roślinności, algorytm przyporządkował do tej klasy tereny z istotnie przerzedzoną roślinnością.

Większość zbiorników wodnych występujących w obrębie terenu badawczego została odpowiednio sklasyfikowana, jako teren wód powierzchniowych. Skuteczność klasyfikacji w tym przypadku wyniosła 86%. Błędy w klasyfikacji wyrażały się głównie poprzez przyporządkowanie terenom wód powierzchniowych klas cieni

lub zadrzewienia. Przykładem błędnego przypisania wodom klasy cienie są Jeziorka Południowe (ryc. 11). Przyczyną jest niestandardowa wartość odbitego promieniowania elektromagnetycznego w stosunku do innych segmentów reprezentujących tereny wód powierzchniowych. Może to być związane z niskim poziomem wody w tym zbiorniku lub jego wysoką eutrofizacją.

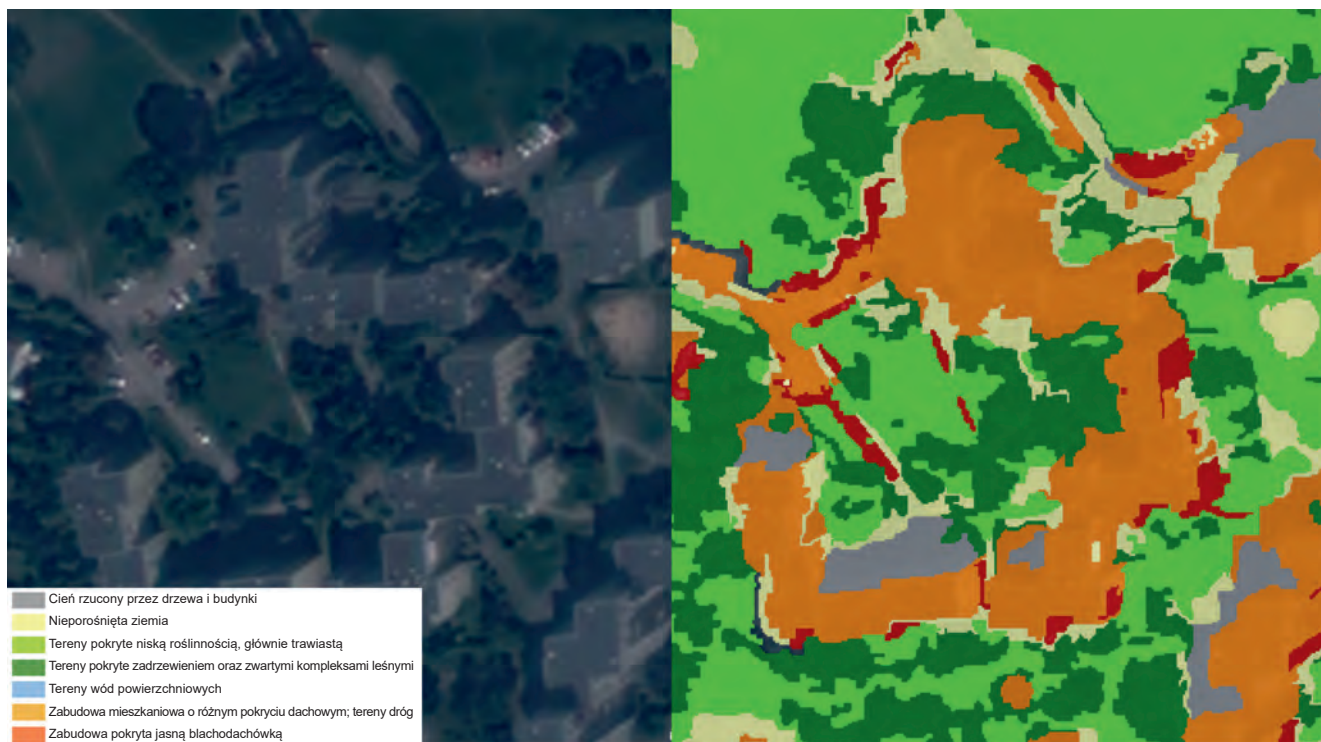
Wykrywalność terenów zabudowanych wyniosła 79%. Największe niedoszacowanie tej klasy wiąże się z mylnym sklasyfikowaniem zabudowy, jako obszaru gleb pozbawionych roślinności. Taki wynik ma wytłumaczenie w porównywalności niektórych materiałów terenów zabudowanych, jak np. chodniki, które mogą mieć podobne cechy, co tereny nieporośniętych gleb. Część terenów zabudowy została mylnie sklasyfikowana, jako cień, wynika z podobnych wartości spektralnych cieni i znajdujących się w sąsiedztwie dachów wysokiej zabudowy.



Ryc. 9. Niedokładność klasyfikacji terenów niskiej roślinności w okolicy skrzyżowania ulic Pileckiego i Roentgena (opr. własne)

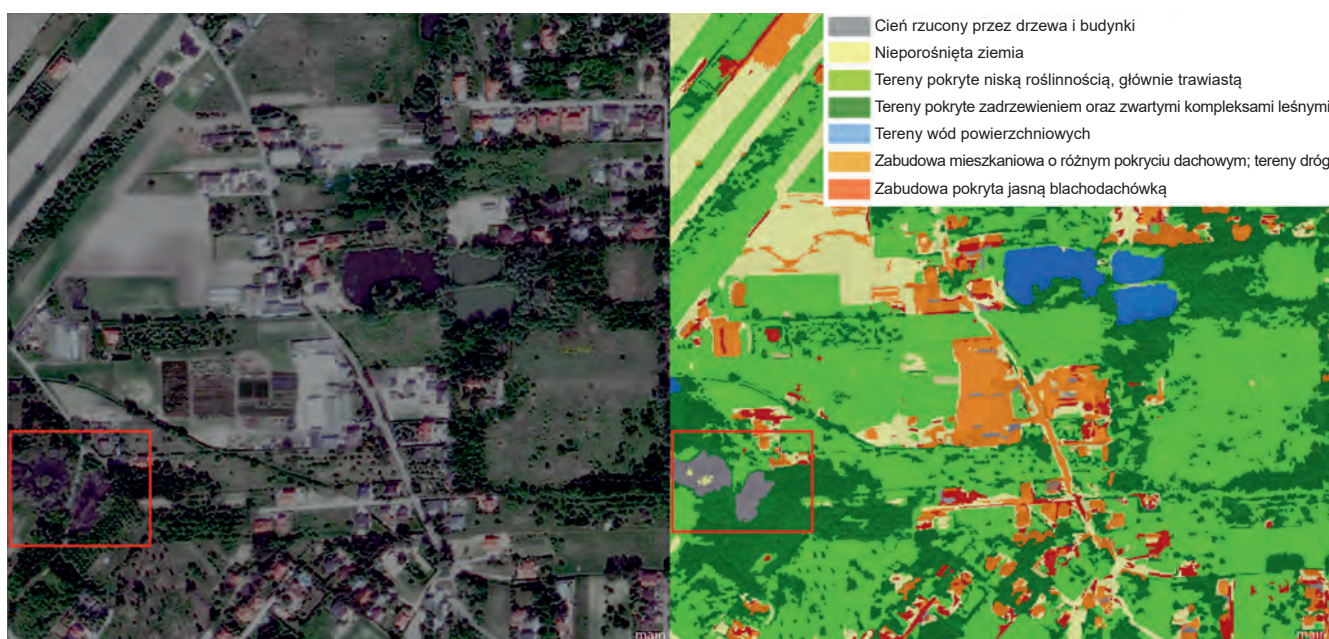
Fig. 9. Inaccurate classification of low vegetation areas near the intersection of Pilecki and Roentgen streets (own elaboration)





Ryc. 10. Klasyfikacja cieni przy wysokiej zabudowie (opr. własne)

Fig. 10. Classification of shadows near high-rise buildings (own elaboration)



Ryc. 11. Wynik klasyfikacji obiektowej w okolicy Jeziorka Południowego (opr. własne)

Fig. 11. Results of object-oriented classification near South Lake (own elaboration)

### Składowe ZI wyznaczone na podstawie użytkowania terenu

Wyznaczenie klas użytkowania terenu zgodnych z założeniami ZI (BAiPP 2016), które nie zawsze jest możliwe do odczytania ze zobrazenia satelitarnego, było

wspomagane danymi pozyskanymi z OSM. Konieczność ta szczególnie dotyczyła obiektów związanych ze specyficznym użytkowaniem terenu: terenów cmentarzy, ogrodów działkowych, terenów obiektów kulturowych (fort Służew), czy terenów objętych formą ochrony przyrody, jak Las Kabacki i okolice Jeziorka Imielińskiego.



Dla wielu obiektów dane OSM zawierały rzetelną treść. Jednak dane te nie są również wolne od błędów, wynikających z częściowego braku kontroli nad jakością danych edytowanych przez wielu użytkowników. Konsekwencją są sytuacje, gdzie klasy pokrycia lub użytkowania są błędnie przyporządkowane w stosunku do faktycznego stanu. Takie przypadki występują dla terenów parków i zieleńców, np. na obszarze znajdującego się w okolicy parku imienia Cichociemnych Spadochroniarzy AK oraz otuliny Lasu Kabackiego (ryc. 12). Teren ten został w bazie OSM i występuje jako tereny zieleni urządzonej, a powinien być terenem zieleni nieurządzonej.

W przypadku danych dotyczących terenów zabudowy mieszkaniowej czy usług sportu i rekreacji, do których zaliczane są również tereny SGGW, reprezentowane powierzchnie prawidłowo wyznaczają zasięg tych obiektów. Należało jednak zwrócić uwagę, że niektóre tereny usług sportu i rekreacji w danych OSM reprezentują kompleksy boisk, które nie zawsze posiadają nawierzchnię, którą można uznać za powierzchnię biologicznie czynną, np. występuje na nich sztuczna murawa. Powodowało to wyłączenie tych obiektów z Zielonej Infrastruktury.



Ryc. 12. Błędnie sklasyfikowane obszary zieleni urządzonej w okolicy parku im. Cichociemnych Spadochroniarzy AK (opr. własne)

*Fig. 12. Incorrectly classified green spaces nearby the Cichociemni Paratroopers AK park (own study)*

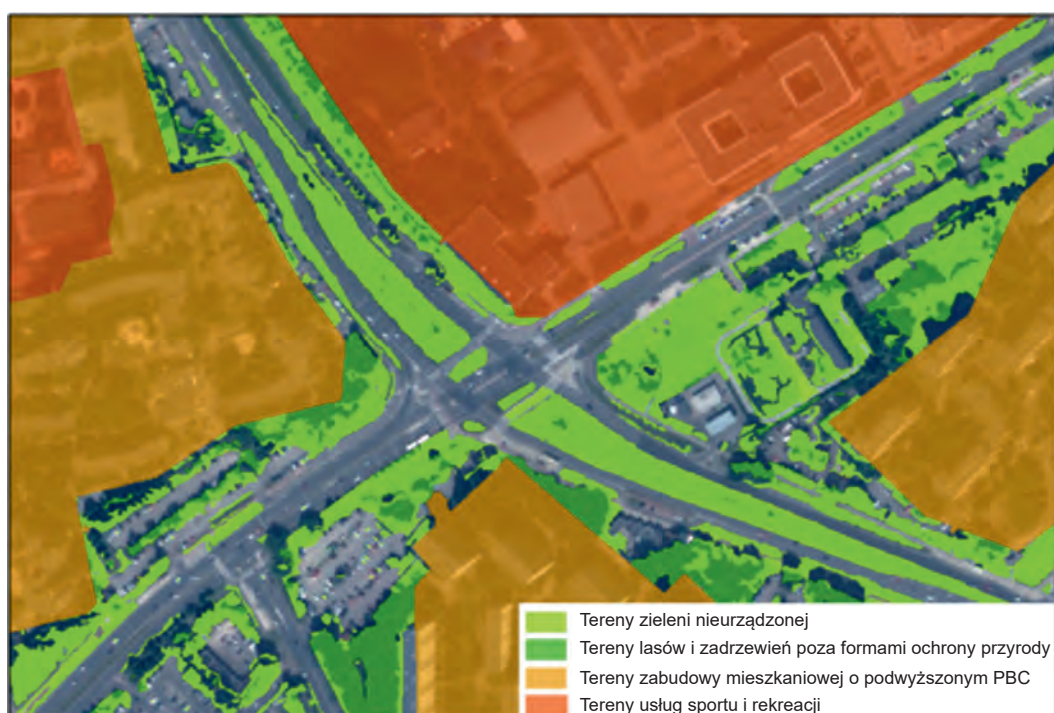
Tereny wód powierzchniowych, z uwagi na wysoką dokładność klasyfikacji, zostały bezpośrednio przeniesione do poziomu dzielnicowego, bez użycia dodatkowych danych (ryc. 13). Przykład przedstawia Jezioro Wąsł i Staw Pozytywka.

Przy grupowaniu danych o terenach zieleni nieurządzonej należało zwrócić uwagę, że trafiły do niej wszystkie tereny porośnięte niską roślinnością oraz odkryta gleba. Wystąpiły przy tym pewne niedokładności,

które w konsekwencji zostały przeniesione do poziomu dzielnicowego obiektów ZI. Zieleń przydrożna, która znajdowała się poza warstwą sieci drogowej, sklasyfikowana została jako zieleń nieurządzona, która w bazie danych ZI występuje w innych klasach (ryc. 14). Podobny przypadek występuje na granicach terenów mieszkaniowych lub terenów innych, na przykład na terenie Centrum Onkologii (ryc. 15).



Ryc. 13. Tereny wód powierzchniowych w okolicy Stawu Pozytywka i Jeziorka Wąsal (opr. własne)  
 Fig. 13. Surface water areas near Pozytywka Pond and Wąsal Lake (own elaboration).



Ryc. 14. Zieleń nieurządzona na skrzyżowaniu ulic Rosoła i Ciszewskiego (opr. własne)  
 Fig. 14. Green spaces at the intersection of Rosoła and Ciszewski streets (own elaboration)





Ryc. 15. Klasyfikacja zieleni nieurządzonej w okolicy Centrum Onkologii (opr. własne)

Fig. 15. Classification of green spaces in the vicinity of the Oncology Centre (own study)

### Obiekty ZI na poziomie dzielnicowym

Składowe wyznaczone na podstawie pokrycia i użytkowania terenu zostały przypisane do obiektów na poziomie dzielnicowym (ryc. 16), według zasad podanych na schemacie kryteriów klasyfikacji (ryc. 6).

Do obiektów ochrony dziedzictwa przyrodniczego i kulturowego zostały przypisane: Las Kabacki, teren użytku ekologicznego Jezioro Imielińskie oraz obszar Fortu Służew. Do terenów usług o podwyższonym udziale PBC (powierzchnie biologicznie czynne) zaklasyfikowano teren Wyścigów Konnych Służewiec i teren Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Dla terenów otwartych właściwe były obszary lasów, tereny ementarzy i tereny ogrodów działkowych. Tereny parków i zieleńców zostały częściowo dobrze wyodrębnione, a na powstałe błędy miała wpływ dokładność tematyczna danych pochodzących z OSM. Tereny wód zostały sklasyfikowane poprawnie. Jednak kwestią dyskusyjną jest obszar obudowy biologicznej wokół zbiorników. Porównując ich zasięg wyznaczony w bazie danych ZI wykazano liczne niedokładności związane z wcześniej opisanymi błędami w wyznaczeniu terenów odkrytej ziemi, trawiastych oraz zakrzewień.

### Dyskusja

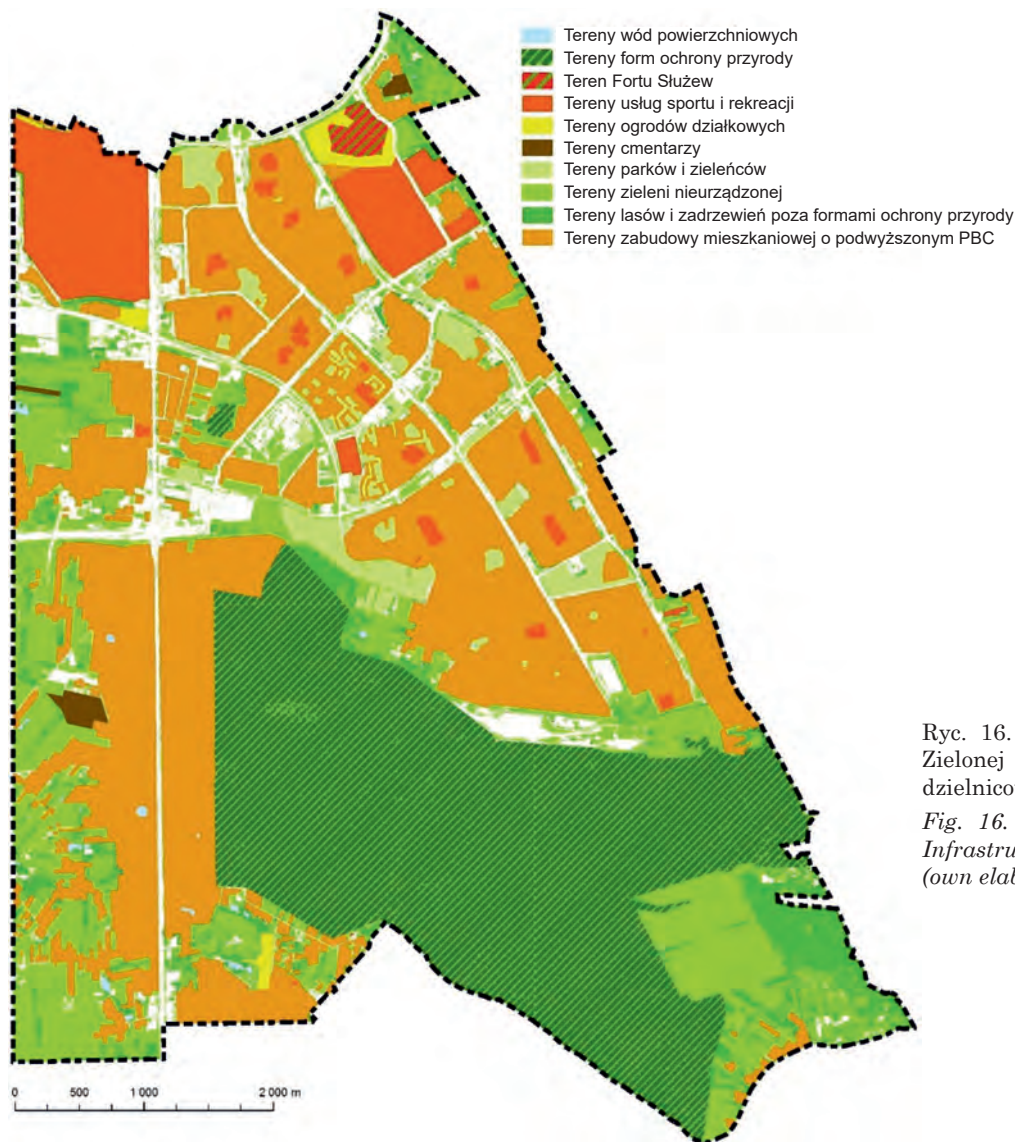
Poza wymienionymi zaletami klasyfikacji obiektowej, metoda ta posiada wady. Badacze podkreślają brak jednoznacznie obiektowej metody sprawdzania jakości klasyfikacji. Klasyczne metody używane przy klasyfi-

kacji bazującej na pikselach, jak błąd przeszacowania i niedoszacowania, czy wskaźnik Kappa, są niewystarczające. W związku z tym ocena prowadzona jest metodą wizualną, która z założenia jest subiektywna.

Istotnym problemem jest błąd wynikający z charakterystyki danych wejściowych. Obiekty widoczne na obrazowaniu satelitarnym zostały przetworzone do nowego położenia na ortoobrazie, z wykorzystaniem Numerycznego Modelu Terenu, w procesie ortorektifikacji. O ile ta metoda jest w zasadzie wystarczająca dla klasyfikacji obszarów słabo zurbanizowanych lub posiadających niższą zabudowę (zachodni Ursynów), to dla terenów bardziej zurbanizowanych i posiadających wyższą zabudowę, ze względu na widoczne zjawisko rzutu środkowego, jest ona niewystarczająca. Wielu autorów dla takich terenów radzi użycie zobrazowań poddanych ortorektyfikacji przy pomocy Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu, tworząc w ten sposób prawdziwą ortofotomapę (*trueortho*) (Adamczyk 2013). Jednak takie opracowania nadal nie są powszechnie dostępne, ze względu na wyższe koszty ich wytworzenia.

Utrudnieniem w klasyfikacji jest również efekt cienia rzuconego przez obiekty terenowe, będące wysoką zabudową i drzewami (ryc. 17). W zależności od miejsca wystąpienia i kąta padania promieni słonecznych problem przybiera różny rozmiar, rzutujący na dokładność klasyfikacji. Zaciemniony obszar nie może być jednoznacznie sklasyfikowany jako interesująca użytkownika klasa, ze względu na zaburzenie informacji spektralnej. Problem można zmniejszyć poświęcając więcej czasu na końcową poprawę wyników klasyfikacji poprzez ręczne uzupełnienie brakującej informacji.





Ryc. 16. Wyniki klasyfikacji: obiekty Zielonej Infrastruktury na poziomie dzielnicowym (opr. własne)

Fig. 16. Classification results: Green Infrastructure objects on a district level (own elaboration)

Niektóre klasy pokrycia terenu posiadają zbliżone charakterystyki spektralne w zobrazeniach wielospektralnych czterokanałowych, przez co trudno je rozróżnić metodami zautomatyzowanej klasyfikacji. Dla poprawy wyników dla terenu pokrytego roślinnością oraz wysoką zabudową można wykorzystać numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), przygotowany z danych lotniczego skaningu laserowego (ALS, LiDAR). Dane wysokościowe pozwalają na odróżnienie wysokości wyodrębnianych obiektów, może to znacznie poprawić wyniki, przykładowo dla niskiej i wysokiej roślinności (Wężyk i in. 2012). Potencjalnie, wykorzystanie danych o większej liczbie kanałów spektralnych, o węższym zakresie spektralnym (np. hiperspektralnych), pozwoliłoby na wyodrębnienie większej liczby klas przy początkowej klasyfikacji pokrycia terenu. Dotyczy to szczególnie obiektów o bardzo zbliżonych właściwościach spektralnych, do których można zaliczyć elementy zabudowy miejskiej czy niektóre gatunki roślin (Heiden i in. 2005).

Tereny wód zostały w niniejszej pracy sklasyfikowane poprawnie, pod warunkiem, że dla całej powierzchni posiadały one standardowe charakterystyki spektralne. W przypadku niestandardowych wartości, powiązanych z niskim poziomem wody i eutrofizacją wód, dokładność klasyfikacji spadła. Prawdopodobnie wyniki dla tych zbiorników można by było poprawić przy wykorzystaniu wskaźnika spektralnego NDWI (Gao 1996). Wymaga to jednak zastosowania kanału średniej podczerwieni (SWIR), który nie jest dostępny w danych pochodzących z satelity Pleiades.

Wykorzystanie danych pochodzących z OSM do zdefiniowania klasy obiektów użytkowania terenu znacznie ułatwia przetworzenia i zwiększa szybkość całego procesu. Jednak z uwagi na otwartość danych i możliwość dokonywania zmian przez wielu użytkowników, należy dokładnie sprawdzać dane pod względem ich dokładności tematycznej i aktualności. Ze względu na sposób zbierania danych, przy wykorzystaniu danych OSM należy też pamiętać o zróżnicowanym poziomie wypełnienia mapy treścią. Jednak, w opinii autorów, zjawisko to nie występuje dla terenów Ursynowa.



Ryc. 17. Widoczne na ortofotomapie odchylenie wysokich budynków, efekt braku korekcji tych obiektów (opr. własne)

*Fig. 17. Deviation of tall buildings visible on the orthophotomap, the effect of lack of correction of these objects (own elaboration)*

## Wnioski

Zobrazowania satelitarne są bardzo dobrym źródłem informacji przestrzennej. Korzyści płynące z możliwości przetwarzania informacji w nich zawartych, dostarczają osobom odpowiedzialnym za aspekt planowania przestrzennego istotne narzędzie do podejmowania decyzji, które są bardziej trafne i pozytywnie rzutujące na przyszłość. Dla terenów miejskich szczególnie istotne jest użycie zobrazowań o wysokiej jakości: pozbawionych błędów wcześniejszych przetworzeń cyfrowych, wykonanych w dogodnych warunkach oświetleniowych i, dodatkowo, o możliwie najlepiej usuniętych efektach geometrycznych, do których należy rzut środkowy.

Wykonanie analizy zdjęć satelitarnych tą metodą daje potencjalnemu użytkownikowi sprawne narzędzie do zautomatyzowanego i szybkiego otrzymania wyników dotyczących aktualnego pokrycia i użytkowania terenu dla danego obszaru, wraz z możliwością szybkiego zaadaptowania tych wyników do bardziej złożonych obiektów, np. na poziomie dzielnicowym Zielonej Infrastruktury.

Otwarte dane pochodzące z OSM, pomimo wad dotyczących dokładności, stanowią użyteczną pomoc przy wyznaczaniu obiektów użytkowania terenu. Dokładając starań przy weryfikacji można większość błędów wyeliminować.

Jak wskazują autorzy koncepcji Zielonej Infrastruktury, ciągły monitoring oraz rozwój koncepcji wymaga

szukania nowatorskich narzędzi do osiągnięcia tego celu. Niewątpliwie klasyfikacja zorientowana obiektowo zobrazowań satelitarnych odpowiada na tą potrzebę, nie tylko z uwagi na szybkość otrzymania wyników, ale również jej dokładność oraz elastyczność w dopasowaniu się do założeń wyznaczania obiektów ZI, przy jej ewentualnych zmianach. Optymalizuje się tym samym koszty aktualizacji danych, która musi być przeprowadzana cyklicznie.

Obecnie coraz częściej odchodzi się od wykorzystania klasyfikacji treści zobrazowań bazujących wyłącznie na informacjach zawartych w pikselu na rzecz metody GEOBIA. Jest to widoczne poprzez coraz liczniejsze publikacje z jej użyciem, których autorzy podkreślają dużą uniwersalność i potencjał metody. W trendzie rozwoju GEOBIA widoczne są również liczne próby opracowań ilościowych i znacznie bardziej wiarygodnych metod weryfikacji wyników klasyfikacji. Dzięki temu można mieć nadzieję, że wkrótce najistotniejsza słaba strona tej metody zostanie wyeliminowana.

## Bibliografia

- Adamczyk J., 2013, Wpływ własności ortofotomapy cyfrowej na wyniki klasyfikacji obiektowej pokrycia terenu, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25.
- Adamczyk J., Będkowski K., 2007, *Metody cyfrowe w teledetekcji*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.



- Adamczyk J., Będkowski K., 2014, Klasyfikacja obiektowa, Skrypty do przedmiotu Teledetekcja (Materiały niepublikowane).
- Ajuntament de Barcelona, 2013, Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020, Ajuntament de Barcelona, Barcelona.
- Andrzejewski R., 1985, Ekologia a planowanie przestrzenne, *Wiadomości Ekologiczne*, 31(3).
- Astri Polska, 2013, <https://astripolska.pl/>.
- Baatz M., Schäpe A., 2000, Multiresolution segmentation an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation, [w:] XII Angewandte geographische Informationsverarbeitung, Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- BAiPP, 2016, Potencjał do kształtowania Zielonej Infrastruktury Warszawy, Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu M. St. Warszawy, Warszawa.
- Blaschke T., Lang S., Hay G.J., 2008, Object-Based Image Analysis – Spatial Concepts for Knowledge-Driven, Springer, Berlin.
- Blaschke T., Strobl J., 2001, What's wrong with pixels? Some recent developments, *GeoBIT/GIS*.
- Burnett C., Blaschke T., 2003, A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis, *Ecological Modelling*, 3, 168.
- Carleer A.P., Debeir O., Wolff E., 2005, Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(11).
- Castilla G., Hay G.J., 2008, Geographic Object-Based Image Analysis, [w:] Blaschke T. Lang S., Hay G.J. (red.), *Object-Based Image Analysis – Spatial Concepts for Knowledge-Driven*, Springer, Berlin.
- CIT 2009. California Institute of Technology, Jet Propulsion, 2009, ASTER Spectral Library, [w:] Zagajewski B. (red.), *Biblioteka spektralna gatunków zielnych Ogrodu Botanicznego Uniwersytetu Warszawskiego, Teledetekcja Środowiska*, Warszawa.
- CNES 2012, Centre National d'Etudes Spatiales, [http://smc.cnes.fr/PLEIADES/GP\\_satellite.htm](http://smc.cnes.fr/PLEIADES/GP_satellite.htm) (dostęp: 30.10.2017).
- EADS, 2013, European Aeronautic Defence and Space, (obecnie Airbus), <https://www.airbus.com/>.
- EEA, 2011, Green Infrastructure and territorial cohesion, European Environmental Agency, Copenhagen.
- Forman R.T.T., Godron M., 1986, *Landscape ecology*, John Wiley & Sons, New York.
- Gao B., 1996, NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
- GUS, 2019, Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2018 roku, Tab. 21: Powierzchnia, ludność oraz lokaty według gmin, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/powierzchnia-i-ludnosc-w-przekroju-terytorialnym-w-2019-roku,7,16.html>.
- Harlick R., 1979, Statistical and structural approaches to texture, *Proceedings of the IEEE*, 67.
- Heiden U., Segl K., Roessner S., Kaufmann H., 2005, Determination and verification of robust spectral features for an automated classification of sealed urban surfaces, [w:] Zagajewski B., Sobczak M. (red.), *Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies*, EARSeL & University of Warsaw, Warszawa.
- Heute A.R., 1988, A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Krawczyk J., 2001, *Ursynów wczoraj i dziś*, Wydawnictwo Pagina, Warszawa.
- Królikowski L., 2014, *Ursynów wczoraj, dziś, jutro*, Wydawnictwo Pagina, Warszawa.
- Labib S.M., Harris A., 2018, The potentials of Sentinel-2 and LandSat-8 data in green infrastructure extraction, using object based image analysis (OBIA) method, *European Journal of Remote Sensing*, 51(1).
- Lackner M., Conway T.M., 2008, Determining land-use information from land cover through an object-oriented classification of IKONOS imagery, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(2).
- Lewiński S., 2007, Obiektowa klasyfikacja zdjęć satelitarnych jako metoda pozyskiwania informacji o pokryciu i użytkowaniu ziemi, *Instytut Geodezji i Kartografii*.
- Lewiński S., Bochenek Z., 2008, Zastosowanie metody parametrycznej w klasyfikacji obiektowej obrazu satelitarnego SPOT, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18.
- Mayor of London, 2012, *Green Infrastructure and open environments, The All London Green Grid*, London.
- Mieszkowska K., 2005, Ogólnomiejski System Terenów Aktywnych Biologicznie (OSTAB) w Gdańsku jako jeden ze sposobów wdrażania rewitalizacji przyrodniczej w miastach, *Teka Komisji Architektury Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych – Oddział w Lublinie PAN*.
- Schiewe J., 2002, Segmentation of high-resolution remotely sensed data – concepts, applications and problems, *Joint ISPRS Commission IV Symposium: Geospatial Theory, Processing and Applications*.
- Su W., Li J., Chen Y., Liu Z., Zhang J., Low T.M., Suppiah I., Hadhim S.A.M., 2008, Textural and local spatial statistics for the object oriented classification of urban areas using high resolution imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 29(11).
- SUiKZP Gdańsk, 2007, *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Gdańska, Urząd Miasta Gdańska, Gdańsk*.
- Sukopp H., Werner P., 1982, *Nature in cities*, Rada Europe, Strasburg.
- Sulma S., Yulianto F., Nugroho J.T., Sofan P., 2016, A support vector machine object based image analysis approach on urban green space extraction using Pleiades-1A imagery, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2).
- Szulczewska B., 2009, Plan zielonej infrastruktury – nowa moda czy rzeczywistość potrzeba? [w:] Markowski T., Drzazga D. (red.), *System przyrodniczy w zarządzaniu rozwojem obszarów metropolitalnych*, Warszawa.
- Szulczewska B., Kaliszuk E., 2005, *Koncepcja systemu przyrodniczego miasta, geneza, ewolucja i znaczenie praktyczne*, Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych – Oddział w Lublinie PAN, Polska Akademia Nauk, Warszawa.
- Tang B.S., Wong S.W., Lee A.K.W., 2007, Green belt in a compact city: A zone for conservation or transition?, *Landscape and Urban Planning*, 79(3–4).
- Thomas N., Hendrix C., Congalton R.G., 2003, A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(9).
- Trisakti B., 2017, Vegetation type classification and vegetation cover percentage estimation in urban green zone using pleiades imagery, [w:] *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1), IOP Publishing.

UE, 2013, Zielona Infrastruktura – zwiększenie kapitału naturalnego Europy, Bruksela.

Wężyk P., Wójtowicz-Nowakowska A., Pierzchalski M., Mlost J., Szwed P., 2012, Klasyfikacja pokrycia terenu metodą OBIA z wykorzystaniem zobrażeń satelitar-

nych Rapideye, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 23.

Zagajewski B., 2010, Metody i techniki badań geoinformacyjnych, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.

#### Podziękowania

Autorzy niniejszej pracy dziękują firmom Astri Polska (Astri Polska, 2013) oraz EADS Astrium/Spot Image (EADS, 2013) za udostępnienie danych wykorzystanych w niniejszej pracy.