

Ocena obrazowych danych teledetekcyjnych do identyfikacji obiektów w zielonej i błękitnej infrastrukturze

*Assessment of remote sensing image data to identify objects
in green and blue infrastructure*

 Joanna PLUTO-KOSSAKOWSKA

Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii
Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej
Pl. Politechniki 1
00-661 Warszawa
joanna.kossakowska@pw.edu.pl

 Monika WŁADYKA

 Weronika TULKOWSKA

monika-wladyka@wp.pl
weronika.tulkowska@gmail.com

Streszczenie

W ostatnich latach koncepcja zielonej i błękitnej infrastruktury zdobywa coraz większe uznanie i coraz częściej jest wdrażana również w polskich miastach i gminach. Pełni wiele ważnych funkcji, począwszy od aspektu rekreacyjnego, ekologicznego i ekonomicznego aż po gospodarczy. Koncepcja ta przywiązuje szczególną wagę do elementów środowiska przyrodniczego przy podejmowaniu decyzji dotyczących głównie zagospodarowania przestrzennego, ale też do aspektów jego monitorowania i zarządzania. Aby sprostać temu zadaniu niezbędne jest odwołanie się do aktualnych danych przestrzennych. Można z powodzeniem wykorzystać istniejące bazy danych przestrzennych, jak np. BDOT10k, Natura 2000 czy inne tematyczne powstające w urzędach miast, np. w biurach ochrony środowiska. Wymagają one jednak ustawicznej aktualizacji i tu w sukurs przychodzą zdjęcia wielospektralne, które mogą znacznie przyspieszyć i zautomatyzować proces aktualizacji bazy danych przestrzennych. W zależności od potrzeb i szczegółowości bazy danych można do tego celu wykorzystać dane optyczne z pułapu lotniczego lub satelitarnego. Celem przeprowadzonych badań jest analiza możliwości wykorzystania ortofotomapy lotniczej oraz zdjęcia satelitarnego Sentinel-2 pozyskanych dla dwóch różnych obszarów badawczych. Do eksperymentów zostały wybrane obszary testowe odmienne pod względem charakterystyki pokrycia terenu, stopnia zainwestowania i krajobrazu. Była to gmina miejsko-wiejska o krajobrazie rolniczym oraz centralna dzielnica miasta wojewódzkiego o wysokim wskaźniku zurbanizowania. Opracowano i przetestowano metodykę przetwarzania ortofotomapy i zdjęcia satelitarnego w celu ekstrakcji informacji o obiektach topograficznych reprezentujących roślinność oraz wody będącymi integralną częścią bazy danych „błękitnej i zielonej infrastruktury”. Przeprowadzone badania i analizy porównawcze wskazały na potencjał i ograniczenia obu źródeł danych teledetekcyjnych.

Abstract

In recent years, the concept of green and blue infrastructure has been earning recognition and is increasingly being implemented in Polish cities and municipalities. It serves many important functions, ranging from recreational, ecological aspects to economic ones. This concept attaches particular attention to elements of the natural environment when making decisions regarding mainly spatial development, but also to aspects of its monitoring and management. To meet this task, it is necessary to refer to current spatial data. It is possible to successfully use existing spatial databases such as BDOT10k, Natura 2000 or other thematic created in city offices, e.g. in environmental protection offices. However, they require constant updating and here remote sensing data comes in, which speeds up the database update process. Depending on the needs and detail of the database, you can obtain data for this purpose from both the air and satellite altitude. The purpose of the research was to analyze the possibilities of using an aerial orthophotomap and a Sentinel-2 satellite image obtained for two different research areas. Test areas that were different in terms of land cover and local government units were selected for the experiments. It was an urban-rural commune with an agricultural landscape and the central district of a selected provincial city with a high urban index. The methodology of orthophotomap and satellite image processing and extraction of information about topographic objects related to vegetation and waters being an integral part of the „blue and green infrastructure” database was developed and tested. The conducted research and comparative analyzes indicated the potential and limitations of both sources of remote sensing data.

Keywords: aerial orthophotomap, Sentinel-2, NDVI, BDOT10k.

Słowa kluczowe: ortofotomapa lotnicza, Sentinel-2, NDVI, BDOT10k.

Wprowadzenie

Zielona infrastruktura jest to bardzo szerokie i wieloznaczne pojęcie. Funkcjonuje w wielu dziedzinach nauki oraz dotyka różnych aspektów życia, stąd pojęcie to ma wiele definicji w zależności od podejścia i przyjętych założeń. Najbardziej adekwatną do rozważań w niniejszym artykule definicję zielonej i błękitnej infrastruktury przedstawiono w komunikacie Komisji Europejskiej z dnia 6 maja 2013 roku pt. *Zielona infrastruktura — zwiększanie kapitału naturalnego Europy*. Według KE, zielona infrastruktura to „strategicznie zaplanowana sieć obszarów naturalnych i półnaturalnych z innymi cechami środowiskowymi, zaprojektowana i zarządzana w sposób mający zapewnić szeroką gamę usług ekosystemowych. Obejmuje ona obszary zielone (lub niebieskie w przypadku ekosystemów wodnych) oraz inne cechy fizyczne obszarów lądowych (w tym przybrzeżnych) oraz morskich. Na lądzie zielona infrastruktura jest obecna na obszarach wiejskich i w środowisku miejskim” (Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, 2013). Można zatem przyjąć, że błękitna i zielona infrastruktura to połączone elementy roślinne i wodne środowiska naturalnego oraz antropogenicznego, zapewniające szereg korzyści społecznych i środowiskowych. Pojęcie to obejmuje również świadome planowanie i zarządzanie tymi zasobami.

Idea zielonej i błękitnej infrastruktury (ZBI) została zapoczątkowana w latach 90. XX wieku w Stanach Zjednoczonych. Była jednym z najważniejszych kierunków prowadzących do poprawy jakości zarządzania krajobrazem i środowiskiem przyrodniczym (Szulczewska i in. 2012).

W ostatnich latach koncepcja zielonej i błękitnej infrastruktury zdobywa coraz większe uznanie i coraz częściej jest wdrażana i rozwijana również w polskich miastach i gminach. Koncepcja ta opiera się na zasadzie zrównoważonego rozwoju wszystkich elementów natu-

ralnych składających się na tę infrastrukturę (Szulczewska 2018). Elementy zielonej infrastruktury to zarówno wielkoobszarowe obszary chronione (parki narodowe, rezerwy przyrody, obszary Natura 2000), większe ekosystemy, takie jak lasy naturalne czy obszary przybrzeżne, mniejsze elementy zielone np. ekodukty, zielone mosty (ryc. 1), ogrody wertykalne czy ogrody deszczowe, drobne elementy krajobrazu, np. drzewa, żywopłoty, klomby, trawniki, a także porośnięte trawą elementy infrastruktury miejskiej (tzw. szarej), takie jak torowiska tramwajowe (ryc. 2), mury czy dachy. Elementy błękitnej infrastruktury to m.in. rzeki i strumienie, kanały, rowy melioracyjne, oczka wodne w parkach i ogrodach prywatnych, jeziora i stawy, zbiorniki retencyjne, tereny podmokłe, ale także fontanny w strefach zabudowanych.

Idea ZBI przywiązuje szczególną wagę do elementów środowiska przyrodniczego przy podejmowaniu decyzji dotyczących głównie zagospodarowania przestrzennego, ale też do aspektów jej monitorowania i zarządzania. Aby sprostać temu zadaniu niezbędne jest odwołanie się do aktualnych danych przestrzennych w postaci bazy danych, jak np. Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) lub danych teledetekcyjnych.

Obrazowe dane teledetekcyjne, takie jak zdjęcia satelitarne czy lotnicze stają się coraz tańszym i łatwiej dostępnym źródłem informacji przestrzennej. Pozwalają w skali globalnej określić charakter i klasy pokrycia terenu. W skali szczegółowej umożliwiają identyfikację i charakterystykę wielu obiektów topograficznych, w tym zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych. Istotną rolę w wykorzystaniu zobrazowań satelitarnych odgrywa ich zautomatyzowane przetwarzanie. Jednak potencjał ten nie jest wciąż odpowiednio wykorzystywany. Wynika to głównie ze słabego zainteresowania danymi ze strony administracji publicznej (Zagajewski 2013). Może to zmienić otwarty dostęp do danych satelitarnych w programie Copernicus (systemy Sentinel) oraz dostęp do platform np. DIAS, gdzie znajdują się repo-



Ryc. 1. Zielony most w Holandii

Fig. 1. Green bridge in the Netherlands (www.care2.com)

zytoria danych, ale także przestrzeń obliczeniowa czy narzędzia do przetwarzania, jak np. Google Engine. Natomiast zdjęcia lotnicze oraz ortofotomapy są udostępniane przez Państwowy Zasób Geodezyjno-Kartograficzny (PZGK). Wiele miast w Polsce zamawia ortofotomapę co najmniej raz w roku do zadań własnych (np. inwentaryzacji i monitoringu roślinności w mieście, detekcji nowopowstałych budynków, planowania nowych inwestycji czy do opracowania Miejscowych Planów Zagospodarowania Przestrzennego) o bardzo dużej rozdzielczości, GSD = 0.05 m lub podobnej, najczęściej jako materiał podkładowy do prezentacji i wizualizacji lub prac fotointerpretacyjnych, rzadziej do dalszego przetwarzania i analiz w celu pozyskania informacji tematycznej. Dlatego ważne jest prowadzenie badań w kierunku oceny możliwości wykorzystania obrazowych danych teledetekcyjnych wraz z metodami ich automatycznego przetwarzania.

Cel i zakres badań

Głównym celem podjętych badań była analiza możliwości wykorzystania obrazowych danych teledetekcyjnych do identyfikacji obiektów zielonej i błękitnej infrastruktury (ZBI), a w dalszym procesie do aktualizacji bazy danych przestrzennych ZBI. W ramach prac koncepcyjno-eksperymentalnych opracowano metodykę identyfikacji obiektów typu roślinność oraz woda zgodnie z przyjętą definicją tych grup klas w Bazie Danych Obiektów Topograficznych BDOT10k. Jako efektywne źródło do aktualizacji wykorzystano zdjęcia satelitarne Sentinel-2 dla obszarów wiejskich i lotnicze ortofotomapy dla obszarów miejskich. Pozyskane obrazy w zakresie promieniowania czerwonego (R) i bliskiej podczerwieni (NIR) przetworzono niezależnie w dwóch wariantach: do rozpoznania elementów zielonej i błękitnej infrastruktury. Obie kategorie obiektów poddano identyfikacji na dwóch różnych obszarach testowych i ocenie dokładności. Założeniem projektowanych przetworzeń jest ich szybkość i prostota tak, aby uniknąć długich obliczeń



Ryc. 2. Torowisko tramwajowe w Dreźnie

Fig. 2. Tram track in Dresden (www.infotram.pl)

oraz ułatwić interpretację otrzymanych wyników. Tym samym metodyka może przyczynić się do upowszechnienia wykorzystania tych zasobów danych optycznych m.in. w administracji samorządowej.

Obszarami badawczymi były: dzielnica Śródmieście w Łodzi o intensywnie zagospodarowanym terenie oraz miejsko-wiejska podwarszawska gmina Brwinów. Dzielnica Łódź–Śródmieście położona jest w centralnej części Łodzi i stanowi jedną z pięciu dzielnic miasta. Stopień zurbanizowania dzielnicy jest najwyższy spośród wszystkich dzielnic miasta. Ze względu na gęstą zabudowę, dzielnica ta charakteryzuje się niedostatkiem zieleni. Niemniej jednak, każdego roku prowadzone są inwestycje w celu jej zazielenienia. Drugi obszar badawczy to gmina miejsko-wiejska położona w powiecie pruszkowskim w województwie mazowieckim. Jest to gmina składająca się z miasta Brwinowa, będącego siedzibą gminy oraz 15 okolicznych sołectw. Gmina zajmuje obszar o powierzchni 69,3 km². Gęstość zaludnienia, według danych z 2017 roku, to 372 os/km². Znaczną część gminy zajmują użytki rolne. Tereny leśne stanowią 9% powierzchni gminy, czyli 625 ha, z czego lasy państwowe zajmują 365 ha (*Projekt programu ochrony środowiska dla gminy Brwinów...* 2012).

Do wykonania eksperymentów użyto oprogramowanie ArcGIS wersja 10.5 firmy ESRI. Podobne narzędzia przetwarzania i analizy obrazów można spotkać w wielu innych oprogramowaniach o otwartym dostępie, np. QGIS czy SAGA.

Metodyka badań

Punktem wyjścia do zaplanowania prac badawczych było określenie elementów ZBI w postaci fizycznych obiektów występujących w terenie. Wykorzystano do tego Bazę Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). Zielona i błękitna infrastruktura to odrębne kategorie obiektów topograficznych występujących w BDOT10k jako obiekty powierzchniowe, liniowe lub punktowe zapisane w formacie wektorowym. Dla roślinności są

to klasy obiektów, takie jak: teren leśny i zadrzewiony (PTLZ), obiekt przyrodniczy (OIPR), roślinność krzewiasta (PTRK), roślinność trawiasta i uprawa rolna (PTTR), plac (PTPL), uprawa trwała (PTUT), kompleks sportowy i rekreacyjny (KUSK), budowla cementarna (BUCM), obszar Natura 2000 (TCON), park narodowy (TCPN), park krajobrazowy (TCPK), rezerwat (TCRZ), budowla sportowa (BUSP) i szuwary (OISZ). Dla elementów błękitnej infrastruktury są to klasy: woda powierzchniowa (PTWP), rzeka i strumień (SWRS), kanał (SWKN), rów melioracyjny (SWRM), mokradło (OIMK) i obiekty o znaczeniu orientacyjnym w terenie (OIOR). W procesie definiowania i wydzielenia obszarów zielonych i wody posłużono się właśnie tymi klasami obiektów.

Dane teledetekcyjne

Do zbadania potencjału danych teledetekcyjnych w automatycznej identyfikacji obszarów zielonej i błękitnej infrastruktury wykorzystano dane z dwóch różnych źródeł. Wynikało to z różnic w zagospodarowaniu terenu i zagęszczeniu obiektów dla każdego z obszarów opracowania. Dla obszaru Łodzi–Śródmieście, ze względu na duży stopień zurbanizowania, a tym samym występowanie często niewielkich powierzchniowo obszarów zielonych, postanowiono pozyskać najbardziej aktualne arkusze ortofotomapy z kanałem bliskiej podczerwieni (CIR) o terenowej wielkości piksela wynoszącej 0,25 m. Stopień aktualności oraz terenowej wielkości piksela najnowszych ortofotomap jest zróżnicowany na terenie całego kraju (GUGiK 2018). Aktualność tej ortofotomapy jest datowana na rok 2015. Natomiast dla gminy Brwinów, charakteryzującej się występowaniem wielkopowierzchniowych terenów zielonych i wodnych, postanowiono sprawdzić potencjał satelitarnych danych Sentinel-2 udostępnianych nieodpłatnie w ramach programu Copernicus. Satelita Sentinel-2A jest wyposażony w skaner wielospektralny rejestrujący dane w 13 kanałach promieniowania elektromagnetycznego. W zależności od kanału, pozyskuje obrazy o rozdzielczości przestrzennej 10 m (4 kanały), 20 m (6 kanałów) i 60 m (3 kanały) z wysokości 786 km. W badaniach uwzględniono najbardziej aktualną z dostępnych scenę Sentinel-2 z dnia 7 czerwca 2018 r. Dodatkowo, dla obydwu obszarów opracowania pozyskano także najbardziej aktualne arkusze ortofotomapy w barwach rzeczywistych (RGB) w formacie cyfrowym. Posłużyły do fotointerpretacji obiektów testowych i przygotowania danych kontrolnych dla obszarów zielonych i wód.

Identyfikacja terenów zielonych za pomocą NDVI

NDVI jest to znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*). Jest jednym ze wskaźników roślinności, które służą do określania zawartości biomasy w organizmach roślinnych, a tym samym do określania stanu oraz kondycji roślinności. Wskaźnik NDVI otrzymywany jest w wyniku przetwarzania wielospektralnych obrazów satelitarnych lub lotniczych z dwóch różnych zakresów promieniowania elektromagnetycznego. Wskaźnik NDVI obliczany jest ze wzoru Rouse (1974) za: Jones, Vaughan (2010):

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

gdzie:

NIR – odbicie w paśmie podczerwieni,

RED – odbicie w paśmie czerwieni.

Do obliczenia wartości wskaźnika wykorzystuje się kanał z zakresu czerwonego (RED) oraz z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR). Promieniowanie elektromagnetyczne charakteryzuje się największym odbiciem od roślinności w kanale NIR, natomiast najmniejsze odbicie promieniowania dla roślinności zachodzi w kanale RED, dlatego też między tymi kanałami obserwuje się największy kontrast. NDVI przyjmuje wartości z przedziału (−1, 1). Wysokie wartości wskaźnika (0,5–0,8) świadczą o dużym odbiciu w zakresie podczerwieni i mniejszym w zakresie czerwieni. Oznacza to, że w danym miejscu znajduje się więcej biomasy, co świadczy o obecności bujnej, żywej roślinności w dobrej kondycji. Natomiast niższe, dodatnie wartości najczęściej odpowiadają roślinności suchej, uszkodzonej lub słabej. Wartości bliskie zeru wskazują na obszary pozbawione roślinności. Ujemne, zbliżone do 0 identyfikują wody, natomiast dodatnie, zbliżone do 0 to najczęściej odkryta gleba (Jones, Vaughan 2010).

Identyfikacja obszarów wód z wykorzystaniem obrazów w kanale bliskiej podczerwieni

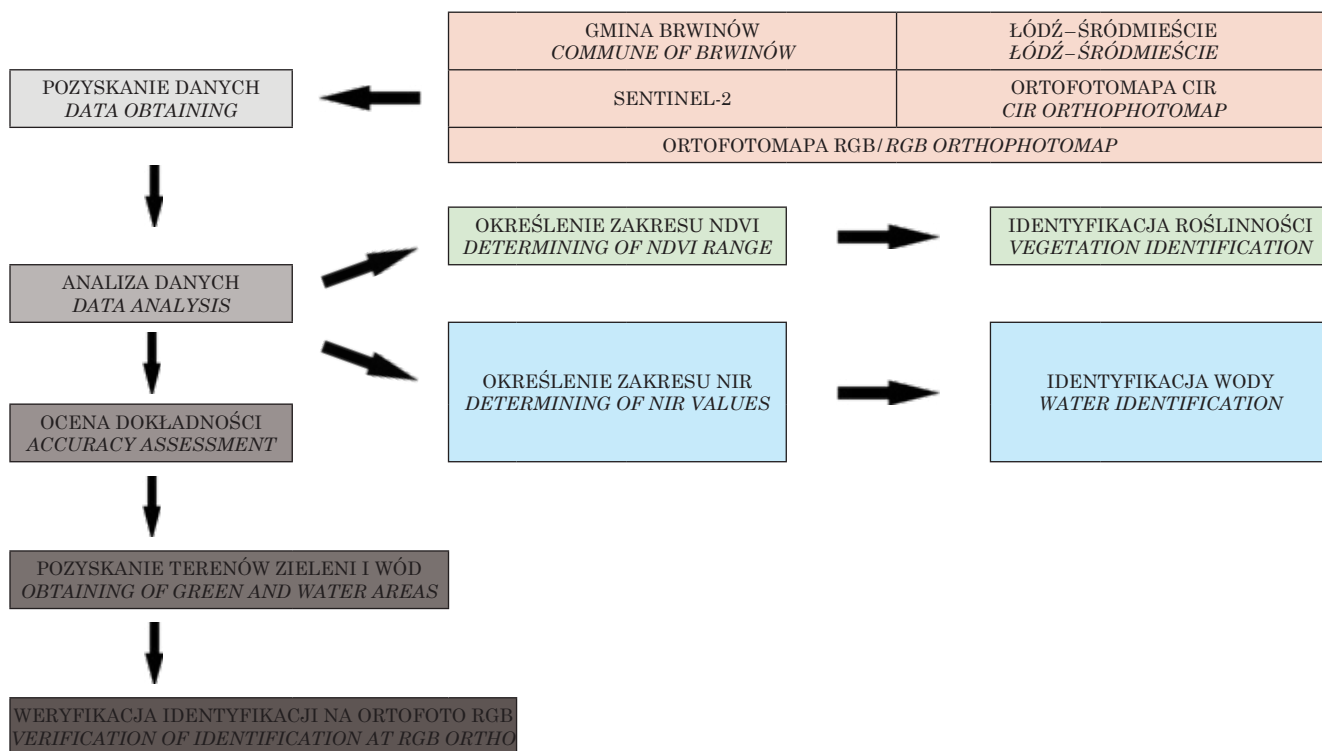
Detekcja obiektów na zdjęciach satelitarnych lub lotniczych opiera się na pomiarach odbitego przez nie promieniowania elektromagnetycznego. Krzywa odbicia spektralnego dla wody charakteryzuje się małymi wartościami (bliskimi 0) w zakresie promieniowania w bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni, natomiast nieco większymi wartościami w zakresie promieniowania światła widzialnego. Dzięki takim unikalnym właściwościom, zbiorniki wodne można wykryć na zdjęciach satelitarnych lub lotniczych wykonanych w zakresie podczerwieni. Stąd uwzględniono zakres bliskiej podczerwieni i metodą progowania wyznaczono obiekty zdefiniowane jako wody powierzchniowe. Jest to szybka i prosta do automatyzacji metoda wykrycia wody, ale ma też swoje ograniczenia. Po pierwsze podobne wartości odbicia spektralnego w bliskiej podczerwieni mają cień, a po drugie zbiorniki wodne muszą być wypełnione wodą (np. nieczynna wybetonowana fontanna nie będzie zidentyfikowana na zdjęciu jako woda). O tych ograniczeniach więcej w podsumowaniu.

Koncepcja prac eksperymentalnych

Proces identyfikacji zarówno obszarów zielonych, jak i obszarów wód został podzielony na dwa etapy (ryc. 3). Pierwszy z nich to testy, które polegały na określeniu, dla roślinności – odpowiedniego zakresu wskaźnika NDVI, natomiast dla wód – optymalnego zakresu wartości pikseli dla kanału NIR. Natomiast drugi etap polegał na zbadaniu dokładności dobranych zakresów wartości i ich weryfikacji. Oba etapy analizy przeprowadzono oddzielnie dla obu obszarów badawczych, tj. dla Łodzi na

ortofotomapie CIR, dla Brwinowa na zdjęciu satelitarnym Sentinel 2. Na wybranych polach testowych porównano z warstwą referencyjną zawierającą zwektoryzowane tereny zielone oraz wody zidentyfikowane na podstawie fotointerpretacji ortofotomapy. W oparciu o analizę porównawczą wskazano na optymalny zakres wartości wskaźnika NDVI do identyfikacji roślinności oraz wartości kanału NIR dla wód. Drugi etap procesu identyfikacji

polegał na określeniu dokładności identyfikacji obiektów dla określonych zakresów wartości wskaźnika NDVI (dla roślinności) oraz NIR (dla wód). W tym celu wybrano po 10 pól kontrolnych przedstawiających tereny o różnym stopniu pokrycia, o różnym rodzaju i stanie kondycyjnym roślinności oraz wód powierzchniowych. Wskazano, które tereny zostały błędnie zakwalifikowane, a które prawidłowo i określono błąd nadmiaru i niedoszacowania.



Ryc. 3. Etapy realizacji prac eksperymentalnych

Fig. 3. Stages of the experimental works

Rezultaty

Dobór wartości NDVI dla ortofotomapy CIR

Do testów wybrano kilka obszarów charakteryzujących się różnym stopniem pokrycia roślinnością, jej różnym rodzajem oraz zróżnicowanym stanem rozwoju. Przy-

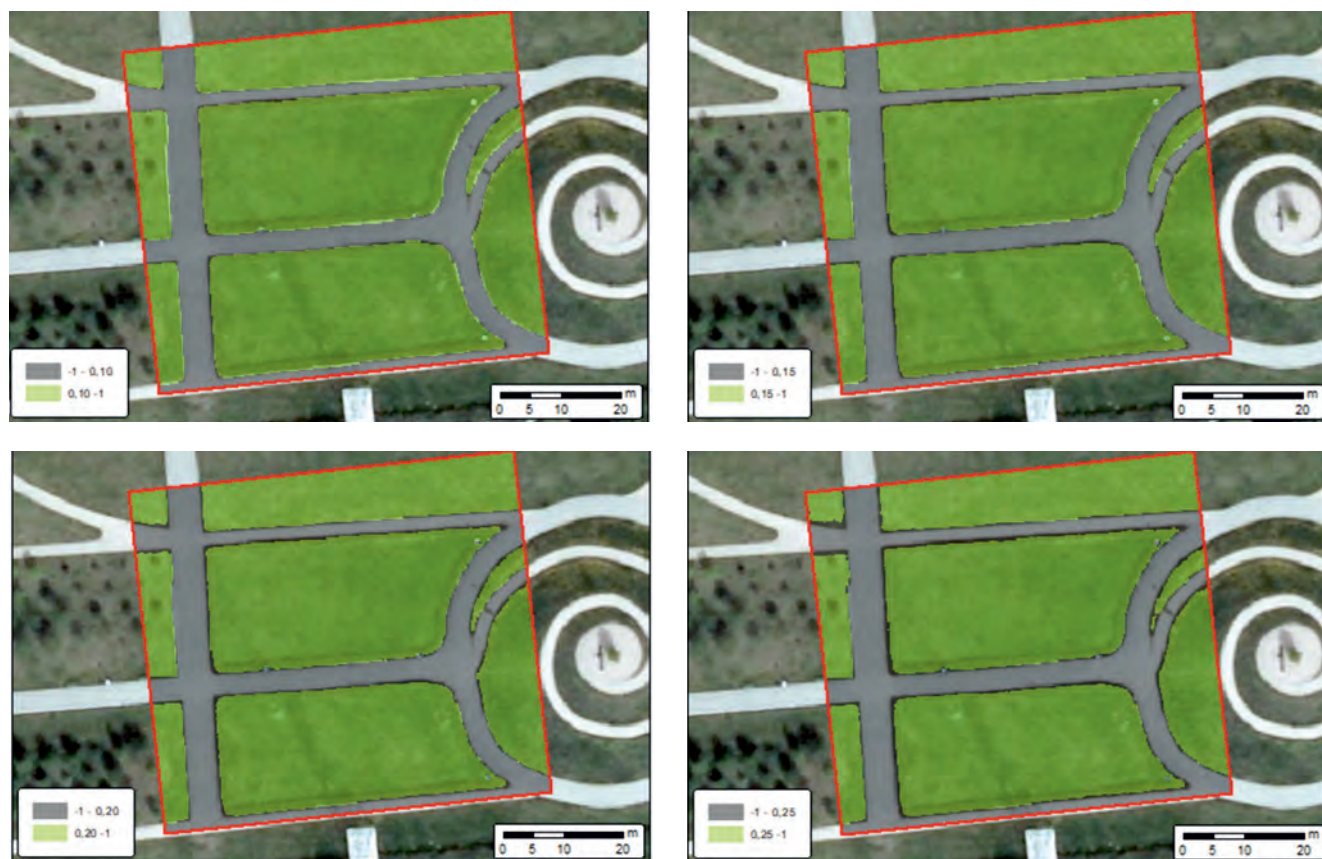
jęta początkowa wartość progowa wskaźnika NDVI to 0,10 i była zmieniana o 0,05 do momentu zauważenia istotnego pogorszenia wyników. Na poniższych rycinach (ryc. 4) zaprezentowano wyniki dla przykładowego obszaru testowego na podkładzie ortofotomapy lotniczej. Kolorem zielonym zostały oznaczone obszary sklasyfikowane jako roślinność, a szarym pozostałe.



Obszar pola kontrolnego/Control field area



Roślinność – obszar referencyjny/Reference area – vegetation



Ryc. 4. Obszar testowy nr 1 – rozkład wskaźnika NDVI dla różnych przedziałów wartości (patrz tabela 1)

Fig. 4. Test area No. 1 – NDVI distribution for different ranges of values (see Table 1)

Tabela 1. Obszar testowy nr 1 – zestawienie nadmiaru i niedomiaru powierzchni zajmowanej przez roślinność

Table 1. Test area No. 1 – a summary of commission and omission area of vegetation

No	Zakres wartości wskaźnika NDVI NDVI ranges	Nadmiar Commission [m ²]	Niedmiar Omission [m ²]
1	0,10 – 1	125,44	1,06
2	0,15 – 1	89,38	7,25
3	0,20 – 1	35,62	20,75
4	0,25 – 1	13,94	56,94

Analiza wyników dla wszystkich obszarów testowych wykazała, że optymalnym przedziałem wartości NDVI jest przedział $<0,20; 1>$. Dla takiego zakresu wartości wskaźnika NDVI, największa liczba pikseli reprezentujących zielen pokryła się z warstwą referencyjną zawierającą zwektoryzowane nawierzchnie trawników (wyniki dla obszaru testowego nr 1 przedstawia tab. 1). W przypadku przyjęcia zakresów o niższych wartościach granic dolnych zaobserwowano

zakwalifikowanie do roślinności pikseli, które w rzeczywistości jej nie przedstawiają. W celu oceny dokładności metody identyfikacji roślinności wytypowano 10 pól kontrolnych charakteryzujących się zróżnicowanym pokryciem terenu – o różnym udziale roślinności, o jej różnym rodzaju i kondycji. Na ryc. 5 przedstawiono przykładowe rezultaty identyfikacji roślinności, a w tabeli 2 wyniki dla wszystkich pól kontrolnych.



Pole kontrolne nr 1 trawnik przecięty ścieżką – roślinność z fotointerpretacji

Control field No. 1 lawn cut by a path – vegetation from interpretation



Pole kontrolne nr 1 trawnik przecięty ścieżką – roślinność z NDVI z błędami nadmiaru

Control field No. 1 lawn cut by a path – vegetation from NDVI with commission errors



Pole kontrolne nr 2 trawnik częściowo w cieniu – roślinność z fotointerpretacji

Control field No. 2 lawn partially in a shadow – vegetation from interpretation



Pole kontrolne nr 2 trawnik częściowo w cieniu – roślinność z NDVI z błędami pominięcia

Control field No. 2 lawn partially in a shadow – vegetation from NDVI with omission errors

Ryc. 5. Porównanie referencji i detekcji roślinności z przyjętej wartości NDVI

Fig. 5. Comparison of references and detected vegetation from NDVI

Tabela 2. Dokładność identyfikacji roślinności ze wskaźnika NDVI na zdjęciu lotniczym
Table 2. Accuracy of vegetation identified by NDVI in aerial orthophoto

Nr pola kontrolnego <i>Control field No</i>	Dokładność producenta [%] <i>Producer's accuracy [%]</i>
1	91,61
2	44,89
3	100,00
4	100,00
5	100,00
6	47,00
7	37,92
8	97,31
9	86,79
10	100,00
Średnia/ <i>Mean</i>	80,55

Średnia dokładność wyznaczenia obszarów zielonych dla wszystkich pól kontrolnych wyniosła 80,55%. Najśłabsze rezultaty osiągnięto w miejscach zacienionych i w miejscach o słabej kondycji roślinności (poniżej 50% dokładności), a najlepsze dla odkrytych obszarów trawników i łąk (od 86% do 100% dokładności).

Dobór wartości NDVI dla zdjęcia satelitarnego Sentinel-2

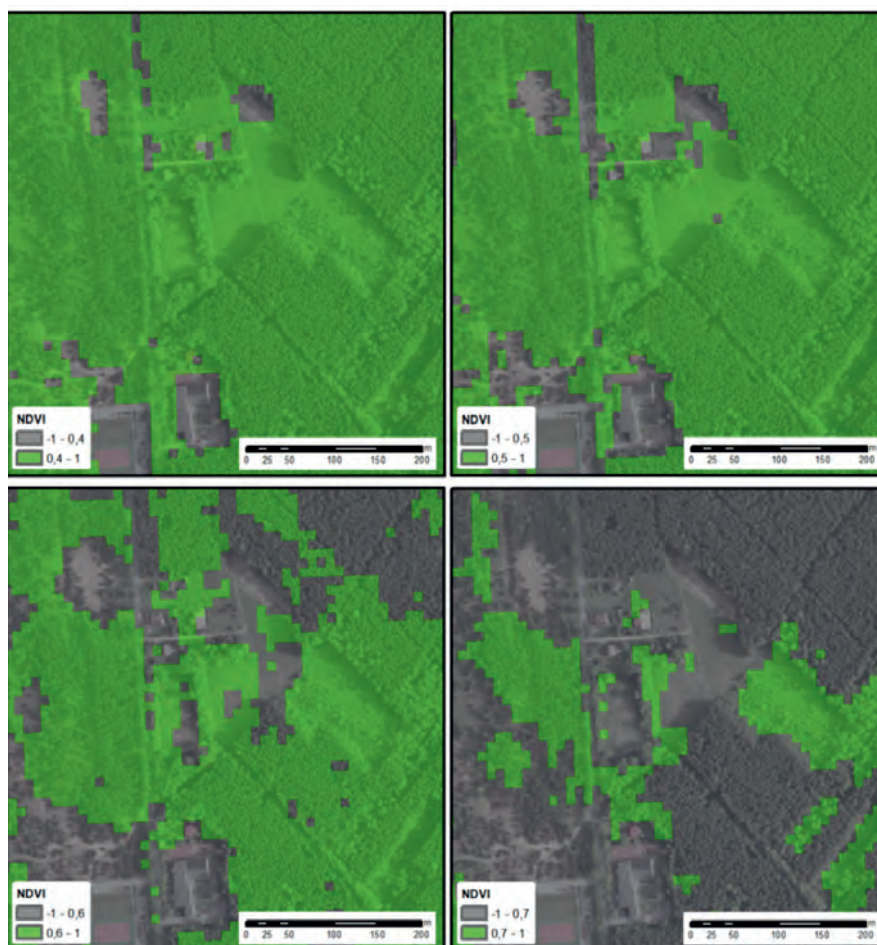
Do wyznaczenia referencji w procesie fotointerpretacji wykorzystano ortofotomapę lotniczą o rozdzielczości przestrzennej 0,25 m, a zdjęcie satelitarne Sentinel-2 o rozdzielczości przestrzennej 10 m do określenia wartości NDVI. Jako początkową wartość progową przyjęto NDVI = 0,4, a następnie kolejno 0,5; 0,6; 0,7 (ryc. 6).



Obszar testowy
Test area



Roślinność – wynik fotointerpretacji
Vegetation – photointerpretation



Ryc. 6. Obraz wartości NDVI w wybranych przedziałach
Fig. 6. NDVI in different ranges of values

Na podstawie wizualnej analizy porównawczej (ryc. 6) oraz statystycznej zidentyfikowanej powierzchni stwierdzono, że najlepszym przedziałem wartości NDVI jest przedział ($<0,5; 1$).

Do zbadania dokładności wykorzystano 10 pól kontrolnych. Największą dokładność odnotowano dla dużych, jednorodnych obszarów. Tam, gdzie badany teren w całości pokryty był przez zieloną lub szarą infrastrukturę, dokładność wynosiła 100%. Natomiast dla obszarów bardziej zróżnicowanych dokładność detekcji roślinności spadała. Największe problemy pojawiały się tam, gdzie roślinność występuje wspólnie

z budynkami czy drogami. Drobnymi elementami zielonymi często nie zostały wykryte lub zostały wykryte razem z sąsiednimi obiektami (ryc. 7, 8). Obraz NDVI utworzony ze zdjęć satelitarnych Sentinel-2, dużo lepiej sprawdza się przy wykrywaniu roślinności na większych obszarach, np. lasy, grupy drzew (ryc. 9, 10), natomiast słabiej przy pojedynczych, mniejszych obiektach zielonych. Wynika to głównie z rozdzielczości przestrzennej zdjęcia (GSD = 10 m). Przy takim rozmiarze piksela trudno poprawnie wykryć roślinność o mniejszej powierzchni, położonej w terenie zabudowanym między budynkami.



Ryc. 7. Pole kontrolne nr 1 – roślinność w niskiej zabudowie
Fig. 7. Control field No. 1 – vegetation within low buildings



Ryc. 8. Pole kontrolne nr 1 – roślinność z NDVI
Fig. 8. Control field No. 1 – vegetation from NDVI



Ryc. 9. Pole kontrolne nr 7 – roślinność śródpolna
Fig. 9. Control field No. 7 – mid-field vegetation



Rys. 10. Pole kontrolne nr 7 – roślinność z NDVI
Fig. 10. Control field No. 7 – vegetation from NDVI

Dokładność wykrycia roślinności na NDVI ze zdjęcia satelitarnego w przyjętym zakresie wahała się od 65% do 100%. Średnia dokładność identyfikacji zieleni

tą metodą wyniosła 91% i jest większa niż dla ortofotomapy lotniczej (tab. 3).

Tabela 3. Ocena dokładności identyfikacji roślinności z NDVI na zdjęciu lotniczym
 Table 3. Accuracy assessment of vegetation identified by NDVI in aerial orthophoto

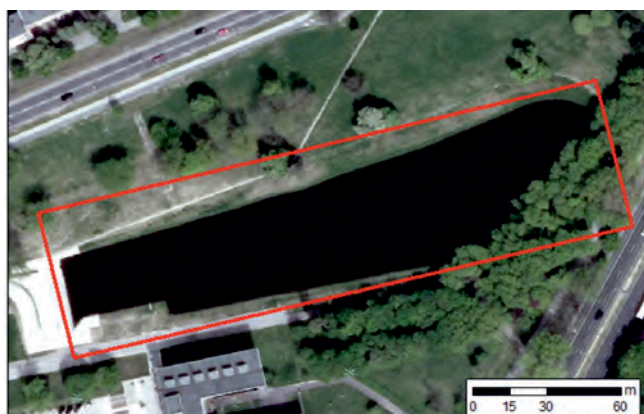
Nr pola kontrolnego <i>Control field No</i>	Dokładność producenta [%] <i>Producer's accuracy [%]</i>
1	85,46
2	99,22
3	100,00
4	64,52
5	83,33
6	95,04
7	100,00
8	98,35
9	93,55
10	91,89
Średnia/ <i>Mean</i>	91,14

Dobór wartości NIR dla ortofotomapy

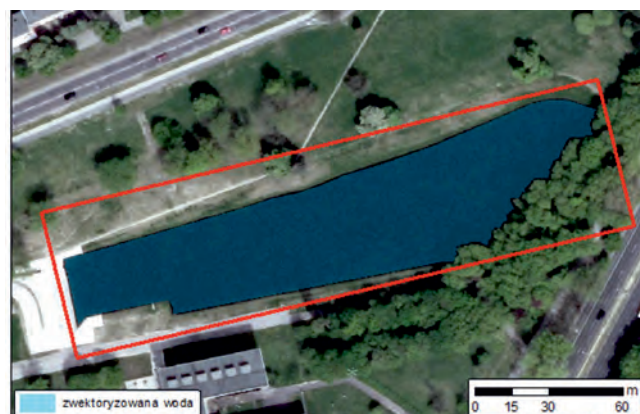
Testy postanowiono przeprowadzić dla czterech zakresów wartości pikseli kanału NIR, które potencjalnie miały reprezentować wodę: <0; 30>, <0; 25>, <0; 20> oraz <0; 15>. W kanale NIR duża część pikseli przedstawiających obszary zacienione charakteryzuje się takimi samymi wartościami jak woda. W związku z tym, niniejsze badania postanowiono przeprowadzić nie tylko na podstawie zbiorników wodnych o różnej wielkości, głębokości i mętności wody, ale również na podstawie rezultatów otrzymanych dla obszarów zacienionych. Na ryc. 11 zaprezentowano warstwę referencyjną zawierającą zwektoryzowany w procesie fotointerpretacji zasięg wody. Liniami koloru czerwonego przedstawiono granice obszaru opracowania, natomiast kolorem błękitnym obiekt powierzchniowy – woda. Wyniki otrzymane dla tego obszaru przedstawiono w formie graficznej (ryc. 11).

Najlepsze wyniki otrzymano dla zakresu <0; 30>. Dokładność identyfikacji wody wyniosła ponad 98%. Niewiele gorszy rezultat otrzymano dla zakresu <0; 25> ponad 96%, a dla przedziału <0; 20> na poziomie 87%. Najslabszym rezultatem jest otrzymany dla zakresu

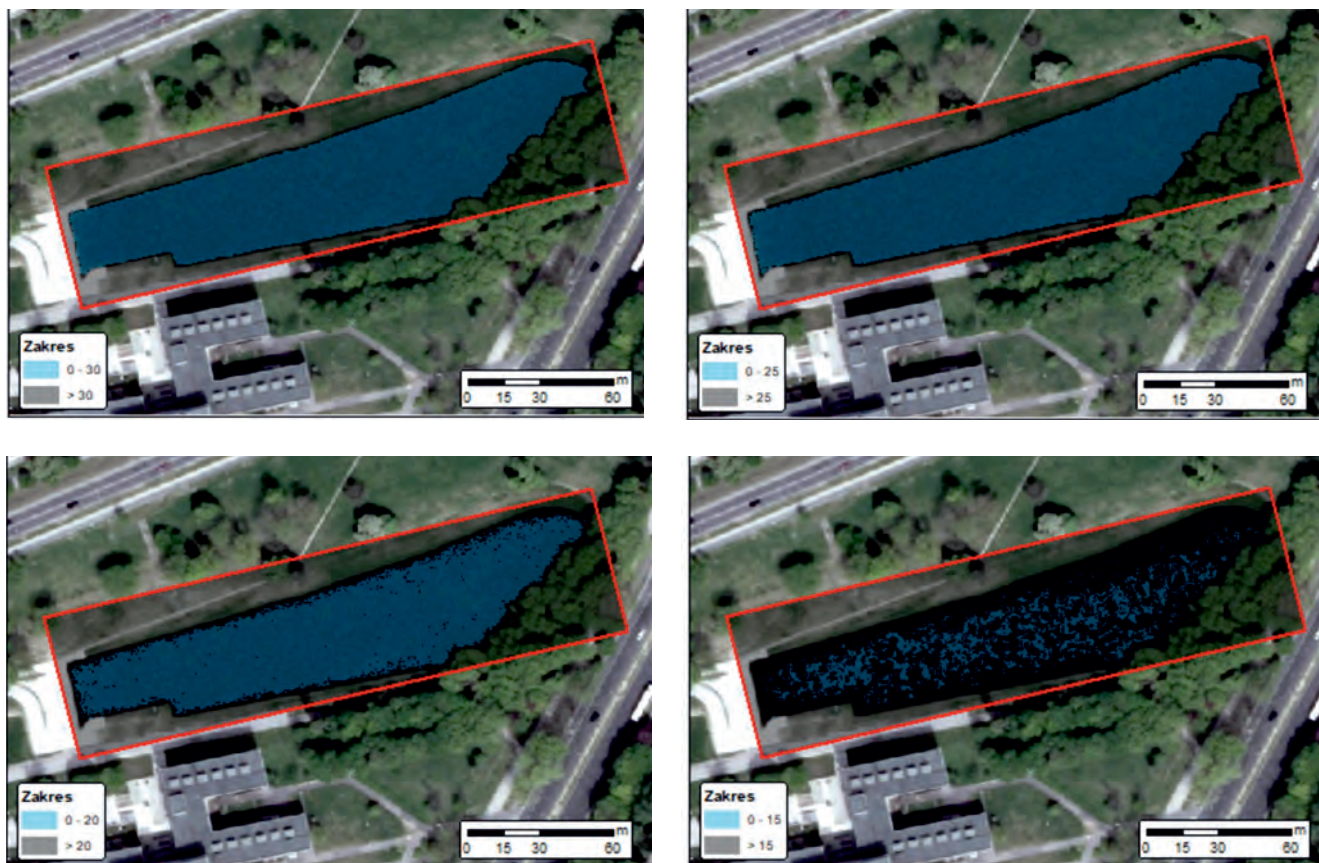
<0; 15>, dla którego dokładność identyfikacji wody wyniosła 22%. W podobny sposób przebadano pozostałe obszary testowe, zarówno te zawierające wodę, jak i te zacienione. Stwierdzono, że w przypadku głębokich zbiorników wodnych zakres wartości <0; 20> jest optymalny do wyznaczania obszarów zajętych przez wody, przy równoczesnym niewielkim lub zerowym błędnym sklasyfikowaniu cieni. Niemniej jednak, w przypadku płytkich zbiorników wodnych, które charakteryzują się większą wartością odbicia spektralnego, wspomniany zakres jest niekorzystny. Możliwym do rozważenia przedziałem wartości do identyfikacji takich wód to przedział <0; 25>. Jednak daje to z kolei bardzo niekorzystne rezultaty dla obszarów zacienionych. Przyjęcie go, jako optymalnego dla obszaru silnie zurbanizowanego, skutkowałoby błędnym sklasyfikowaniem znaczącej liczby pikseli. Z jednej strony występowanie licznych cieni, z drugiej obecność płytkich zbiorników wodnych, których na obszarach silnie zabudowanych jest zdecydowanie więcej niż tych głębokich. Niemniej jednak uznano, że korzystniejsze będzie wytypowanie, jako najbardziej optymalnego zakresu <0; 20>, licząc się z tym, że nie wszystkie płytkie zbiorniki wodne mogą zostać poprawnie wykryte.



Obszar testowy nr 1 – zbiornik wodny
 Test area No 1 – water body



Obszar testowy nr 1 – fotointerpretacja wody
 Test area No 1 – water interpretation



Ryc. 11. Obszar testowy nr 1 – zakresy wartości NIR

Fig. 11. Test area No 1 – NIR value ranges

W celu analizy dokładności identyfikacji obszarów wód bazującej na rekłasyfikacji obrazu kanału NIR ortofotomapy, wytypowane zostały pola kontrolne charakteryzujące się występowaniem w ich granicach zbiorników głębokich, płytkich, o przejrzystej lub mętnej wodzie, jak i również obszarów zacienionych. Badania przeprowadzono dla 10 pól kontrolnych. Przykładowe 2 obszary badawcze przedstawiono na ryc. 12–15.

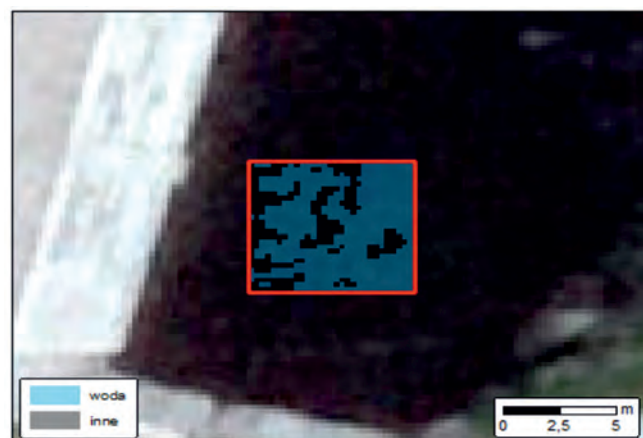
Średnia dokładność przyjętej metody dla wszystkich pól kontrolnych wyniosła 52,57% i oscylowała od warto-

ści 0 do 100% dokładności (tab. 4). Zatem metoda prognozowania kanału NIR ortofotomapy lotniczej dla obszaru zurbanizowanego nie może zostać uznana w takim zastosowaniu za właściwą. Poprawnie zostały zidentyfikowane jedynie tafle większych i głębszych zbiorników wodnych. Natomiast przy równoczesnym prawidłowym zaklasyfikowaniu obszarów zacienionych, żaden z płytszych zbiorników wodnych nie został zidentyfikowany poprawnie.



Ryc. 12. Pole kontrolne nr 1 – głęboki zbiornik z przejrzystą wodą

Fig. 12. Control field No 1 – deep clear water



Ryc. 13. Pole kontrolne nr 1 – detekcja wody na obrazie NIR

Fig. 13. Control field No 1 – water detection in NIR image



Ryc. 14. Pole kontrolne nr 2 – płytki zbiornik z mętną wodą i widocznym dnem

Fig. 14. Control field No 2 – shallow and dirty water



Ryc. 15. Pole kontrolne nr 2 – detekcja wody na obrazie NIR

Fig. 15. Control field No 2 – water detection in NIR image

Tabela 4. Ocena dokładności detekcji wody na obrazie ortofotomapy lotniczej w kanale NIR

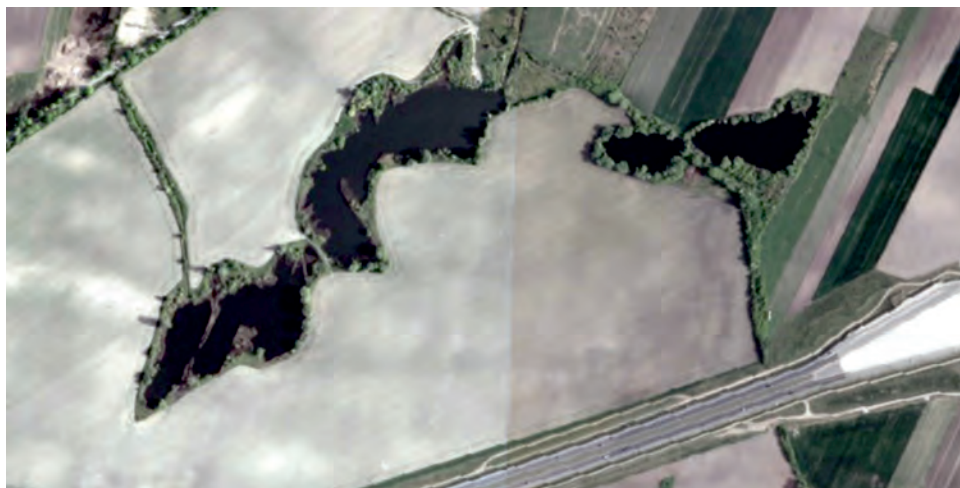
Table 4. Accuracy assessment of water identification in NIR of aerial orthophoto

Nr pola kontrolnego <i>Control field No</i>	Dokładność producenta [%] <i>Producer's accuracy [%]</i>
1	71,00
2	9,08
3	95,64
4	97,36
5	0,15
6	0,00
7	43,53
8	35,80
9	73,17
10	100,00
Średnia/ <i>Mean</i>	52,57

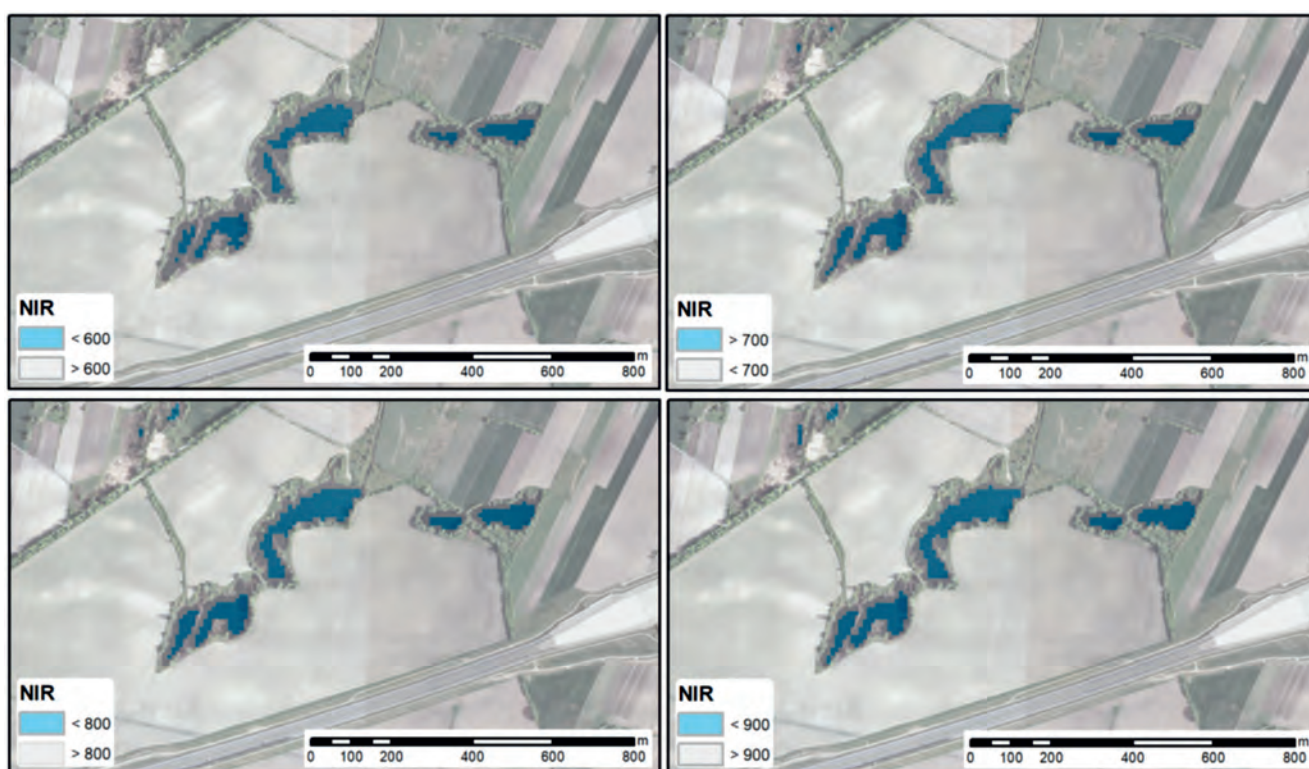
Dobór wartości NIR dla Sentinel-2

Do wskazania obszarów referencyjnych wykorzystano ortofotomapę lotniczą o rozdzielczości przestrzennej 0,25 m oraz zdjęcie satelitarne Sentinel-2 o rozdzielczości przestrzennej 10 m do określenia wartości progowej NIR i oceny dokładności. Kanał bliskiej podczerwieni zdjęcia satelitarnego Sentinel-2 przyjmował wartości z przedziału $\langle 0; 8209 \rangle$. Wyznaczenie wartości progowej do detekcji wody rozpoczęto od wartości 600. Na jednym z wybranych do badań obszarów znajdowało się kilka

śródpolnych oczek wodnych i pola uprawne. Wykonano reklasyfikację kanału NIR, przyjmując kolejno wartości graniczne 600, 700, 800 i 900. Na podstawie wizualnej analizy porównawczej (ryc. 16) oraz statystycznej stwierdzono, że dla wartości progowych 700 i 800 obszary wodne zostały wykryte najbardziej poprawnie. Podobne analizy wykonano dla pozostałych obszarów testowych. Najlepszym przedziałem do detekcji wody ze zdjęcia satelitarnego Sentinel-2 wykonanego w zakresie bliskiej podczerwieni jest przedział $\langle 0; 800 \rangle$.



Śródpolne oczka wodne wybrane do badań kanału NIR (Sentinel-2)
Mid-field ponds selected for the test in NIR (Sentinel-2)



Ryc. 16. Detekcja obszarów wód w kanale NIR z Sentinel-2

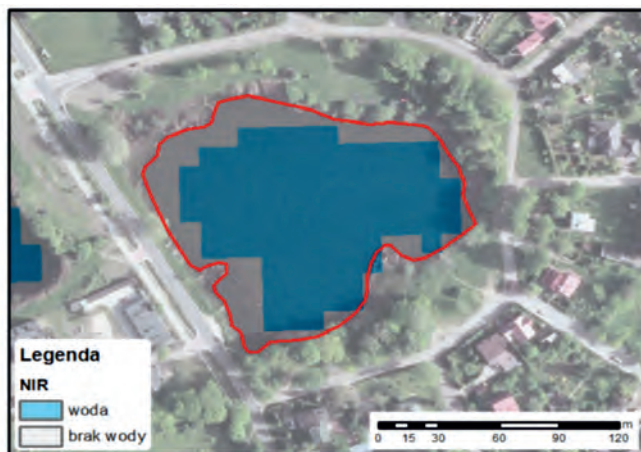
Fig. 16. Ponds detection in NIR band from Sentinel-2

Do zbadania poprawności wykorzystano 10 pól kontrolnych. Przykładowe dwa obszary kontrolne przedstawiono na ryc. 17–20. Analizując dokładność wykrycia obszarów wodnych na polach kontrolnych (tab. 5) można zauważyć, że wyniki były bardzo zróżnicowane. Na niektórych polach kontrolnych dokładność dochodziła do 90%, a na innych wynosiła 0%. Tak duże różnice wynikały przede wszystkim z wielkości, kształtu i głębokości zbiorników. Najlepiej na zdjęciu satelitarzym

wykryto duże i głębokie zbiorniki wodne. Natomiast wąskie rzeki czy małe stawy przeważnie nie zostały wykryte, podobnie jak zarośnięte czy płytkie zbiorniki. Dokładność wykrycia obszarów wodnych wyniosła średnio niecałe 63%. Opracowana w ten sposób klasa obiektów będzie przedstawiała obszary największych wód, jednak wiele drobnych oczek wodnych, stawów czy rzek o wąskim korycie nie zostanie na niej uwzględniona.



Ryc. 17. Pole kontrolne nr 1 – zbiornik wodny z BDOT10k
 Fig. 17. Control field No 1 – water body from BDOT10k



Ryc. 18. Pole kontrolne nr 1 – wody pozyskane z kanału NIR (Sentinel-2)
 Fig. 18. Control field No 1 – water body from NIR band (Sentinel-2)



Ryc. 19. Pole kontrolne nr 2 – zbiorniki wodne z BDOT10k
 Fig. 19. Control field No 2 – water bodies from BDOT10k



Ryc. 20. Pole kontrolne nr 2 – wody pozyskane z kanału NIR (Sentinel-2)
 Fig. 20. Control field No 1 – water bodies from NIR (Sentinel-2)

Tabela 5. Ocena dokładności detekcji wody na obrazie w kanale NIR (Sentinel-2)
 Table 5. Accuracy assessment of water detection in NIR (Sentinel-2)

Nr pola kontrolnego <i>Control field No</i>	Dokładność producenta [%] <i>Producer's accuracy [%]</i>
1	69,72
2	8,70
3	0,00
4	66,16
5	89,80
6	89,22
7	61,00
8	66,88
9	92,01
10	83,12
Średnia/ <i>Mean</i>	62,66

Wnioski i podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach dokładność identyfikacji elementów zielonej infrastruktury na ortofotomapie wskaźnikiem NDVI w terenie zurbanizowanym została oceniona na ponad 80%. Niemniej jednak klasyczna ortofotomapa lotnicza ma również swoje ograniczenia. Jednym z nich jest występowanie cieni, natomiast drugim tzw. martwych pól na skutek przysłonięcia terenów zielonych przez wysokie obiekty np. budynki. W takich sytuacjach zieleni nie jest identyfikowana poprawnie. Pozbawiona tej wady jest tzw. *true ortho*. Jednak, w stosunku do klasycznej ortofotomapy, jej opracowanie jest dużo bardziej kosztowne ze względu na złożoność i czasochłonność procesu jej wytwarzania (Kurczyński 2014). Możliwe, że w przyszłości będzie można zastąpić ją obecnie funkcjonującą ortofotomapę i uwzględnić w procesie automatycznej identyfikacji roślinności. Innym wartym rozważenia rozwiązaniem jest wykorzystanie zdjęć satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości VHR (GSD < 1 m). Kolejnym ograniczeniem ortofotomapy jest fakt, że powinna być opracowana na podstawie zdjęć pochodzących z nalotu wykonanego w czasie kiedy roślinność jest w pełni sezonu wegetacyjnego. W związku z tym nie zawsze będzie możliwe wykorzystanie najbardziej aktualnych danych do automatycznego wykrycia elementów ZI metodą wskaźników NDVI.

W przypadku wykrywania elementów błękitnej infrastruktury, przy równoczesnym prawidłowym zaklasyfikowaniu obszarów zacienionych, poprawnie zostały zidentyfikowane jedynie tafle większych, a zarazem głębszych zbiorników wodnych. Żaden z występujących na obszarach zurbanizowanych zbiorników wodnych płytszych lub/i charakteryzujących się mętną wodą nie został zidentyfikowany poprawnie. Wynika to z faktu, że piksele takich wód oraz obszarów zacienionych charakteryzują się podobnymi wartościami odbicia spektralnego. W związku z tym niemożliwym okazało się dobranie takiego zakresu wartości pikseli kanału NIR, by prawidłowo były identyfikowane płytkie zbiorniki wodne. Należy podkreślić, że ocena była prowadzona na małej próbie i bez rozróżnienia rodzajów wód. W związku z tym wyniki można traktować jako pilotażowe do szerzej zakrojonych badań.

Zdjęcia Sentinel-2 okazały się przydatne zarówno do detekcji jednorodnych, wielkopowierzchniowych obszarów ZBI. Wskaźniki NDVI umożliwiają wykrycie lasów i obszarów zadrzewień z dokładnością na poziomie blisko 100%. Metoda progowania NIR umożliwia wykrycie zbiorników wodnych jak stawy i jeziora ze średnią dokładnością 90%. Problem pojawiał się przy pojedynczych, mniejszych obiektach, takich jak drzewo, krzew czy oczko wodne, a także przy wąskich, wydłużonych obiektach sąsiadujących z terenami o innym rodzaju pokrycia terenu, np. pas drzew przy drodze lub stru-

mien (wąska rzeka) wśród zakrzewień. Zobrazowania te przy swojej rozdzielczości nie nadają się do detekcji obiektów o niewielkim rozmiarze w skali szczegółowej.

Przy analizach o szczegółowości odpowiadającej skali 1:10000 szybkie i proste metody wskaźnikowe NDVI oraz progowania NIR mogą posłużyć do detekcji elementów zielonej infrastruktury na poziomie dokładności ponad 90% i błękitnej infrastruktury na poziomie dokładności nieco ponad 60%, co należy uznać za satysfakcjonujący rezultat przy jednoczesnych niskich kosztach pozyskania danych i wykonania analiz. Wyniki osiągnięte dla zobrazowania Sentinel-2 w stosunku do ortofotomapy są miłym zaskoczeniem i mogą wyznaczyć trend korzystania w szerszym zakresie z tego źródła danych używając bardziej zaawansowanych metod przetwarzania, jak np. uczenie maszynowe.

Bibliografia

- Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w likwidacji, Ortofotomapa, <http://www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/ortofotomapa.html> (dostęp: 18.08.2018).
- Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE) (Dz.U. nr L108/1).
- Główny Urząd Statystyczny Biuro Spisów, Instrukcja metodologiczna do Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań w 2002 r., <https://stat.gov.pl/metainformacje/> (dostęp: 03.07.2018).
- GUGiK, geoportal.gov.pl (dostęp online: 03.07.2018).
- Jones H.G., Vaughan R.A., 2010, Remote sensing of vegetation. Principles, techniques and applications, Oxford University Press, Oxford.
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, 2013, Zielona infrastruktura – zwiększanie kapitału naturalnego Europy, COM/2013/0249 final (dostęp online: 5.09.2018).
- Kurczyński Z., 2014, Fotogrametria, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Szulczewska B., 2018, Zielona infrastruktura – czy to koniec historii? Warszawa, Studia PAN – Komitet Przestrzennego Zagospodarowania Kraju, Tom CLXXXIX, Warszawa.
- Szulczewska B., Giedych R., Maksymiuk G., 2012, Problemy zarządzania zieloną infrastrukturą miasta na przykładzie Warszawy, Problemy Ekologii Krajobrazu 33, 203–213.
- Walkowiak K., Grabowska-Szaniec A., Smakulski J., 2012, Projekt programu ochrony środowiska dla gminy Brwinów na lata 2013–2016 z perspektywą do 2020 roku (aktualizacja), <https://brwinow.pl> (dostęp: 2.09.2018).
- Wiśniewska E., 2016, Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych [online], <http://www.geomatyka.lasy.gov.pl> (dostęp: 12.08.2018).
- Zagajewski B., 2013, Zastosowanie teledetekcji do oceny stanu zagospodarowania przestrzennego w Polsce (dostęp online: 14.06.2018).