

## PORÓWNANIE METOD OCENY STOPNIA USZCZELNIENIA TERENU NA PODSTAWIE ORTOFOTOMAPY ORAZ DANYCH LIDAROWYCH

Natalia Borowiec<sup>1</sup>, Adam Hamerla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: nboro@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Główny Instytut Górnictwa – Zakład Ochrony Wód, e-mail: ahamerla@gig.eu

### Streszczenie

W niniejszym artykule porównano metody wyznaczania stopnia uszczelnienia zlewni oraz wyniki otrzymane w związku z ich zastosowaniem. Przedstawiono doświadczenie, w którym jako materiał wejściowy do analiz wykorzystano ortofotomapę oraz chmurę punktów pochodzącą z lotniczego skaningu laserowego. W artykule, poza zestawieniem i porównaniem otrzymanych wyników, wyszczególniono problemy i ograniczenia wynikające z zastosowania poszczególnych metod badawczych.

### Słowa kluczowe

uszczelnienie zlewni; klasyfikacja obrazów; ortofotomapa; lotniczy skaning laserowy; użytkowanie terenu

### 1. WPROWADZENIE

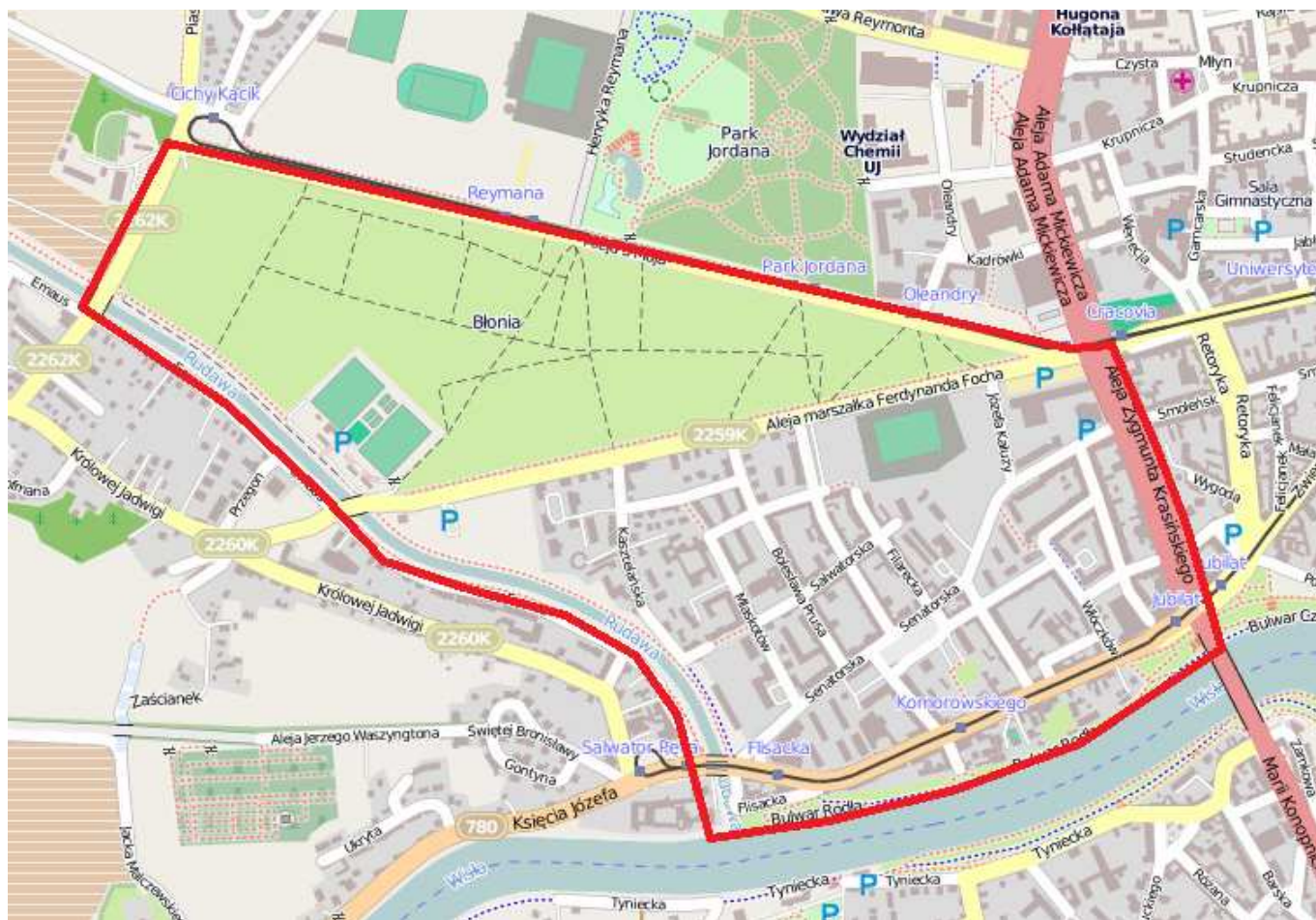
Stopień uszczelnienia zlewni, określający udział powierzchni nieprzepuszczalnej w całkowitej powierzchni zlewni, jest podstawowym parametrem decydującym o strukturze i czasie odpływu ze zlewni. Parametr ten jest szczególnie ważny w zlewniach miejskich o niskim odsetku powierzchni biologicznie czynnej. Działania powodujące zwiększanie powierzchni uszczelnionych, skutkują mniejszą infiltracją wody w głąb gleby i większym jej odpływem z danego terenu. Wzrost terenów uszczelnionych, nieprawidłowe odprowadzanie i gospodarowanie wodami opadowymi, niedrożna lub niedostosowana do spływu powierzchniowego kanalizacja odwodnieniowa, zaniedbania w zakresie eksploatacji i inwestycji urządzeń odwodnieniowych, to czynniki, które są przyczyną wielu podtopień, powodujących znaczne straty na terenach zurbanizowanych (Bzymek, Jarosińska 2012). Stopień uszczelnienia zlewni ma również wpływ na wyniki obliczeń odpływu wód ze zlewni oraz kształt modeli zlewni kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych (Skotnicki, Sowiński 2011). Określenie odpływu wód ze zlewni wymaga oceny stopnia uszczelnienia dla wszystkich analizowanych podzlewni, a dla przeprowadzenia szczegółowych obliczeń i stworzenie modeli matematycznych, niezbędne jest podanie informacji na temat struktury powierzchni uszczelnionych. Prawidłowe wyznaczenie wartości stopnia uszczelnienia zlewni jest kluczowym elementem podczas projektowania sieci kanalizacyjnych, oczyszczalni ścieków, przelewów burzowych czy rewitalizacji cieków miejskich (Zawilski, Wierzbicki 2005). Ponadto wskaźnik ten powinien stanowić ważny element zarządzania przestrzenią miast podczas ustalania planów zagospodarowania przestrzennego i ochrony przeciwpowodziowej. Jego określenie jest także niezbędne podczas realizacji systemów zarządzania infrastrukturą kanalizacyjną (z ang. *Real Time Control*).

Określenie stopnia uszczelnienia zlewni nie jest zadaniem łatwym, szczególnie w obszarach miejskich. Polega głównie na odpowiedniej klasyfikacji materiału źródłowego (mapy, zdjęcia, chmury punktów). W literaturze opisuje się wiele metod klasyfikacji przy użyciu szerokiego spektrum technologii przetwarzania obrazów, a także statystycznych metod klasyfikacji – klasyfikację obrazów satelitarnych i zdjęć lotniczych, segmentację obszarów z wykorzystaniem metody momentów chromatycznych, klasyfikację tekstur z użyciem metody losowych pól Markowa czy klasyfikację obszarów na zdjęciach lotniczych za pomocą sieci neuronowych (Kubik i in. 2008).

Obecnie najpowszechniej wykorzystywanym materiałem służącym do analizy pokrycia terenu i określania stopnia uszczelnienia zlewni jest ortofotomapa. Należy jednak pamiętać, że do końca roku 2014 udostępnione zostaną dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego przeprowadzonego nad ponad 60% powierzchni Polski, obejmujące ponad 200 miast zrzeszonych w Projekcie ISOK. Ze względu na łatwy dostęp do danych (wojewódzkie zasoby geodezyjno-kartograficzne) oraz stosunkowo niewielkie koszty ich pozyskania porównano wyniki klasyfikacji dokonanej na podstawie ortofotomapy oraz chmury punktów otrzymanej za sprawą lotniczego skaningu laserowego.

### 2. METODY BADAWCZE

Doświadczenie zostało przeprowadzone dla części miasta Kraków o łącznej powierzchni 1,2 km<sup>2</sup> w rejonie ujścia rzeki Rudawy do Wisły (rys. 1). Obszar ten obejmuje tereny silnie zurbanizowane o dużej gęstości zabudowy (teren pomiędzy Wisłą i Rudawą, a Aleją Zygmunta Krasińskiego i Aleją Focha) z elementami zieleni (stadion, skwerki, bulwary rzeki Wisła), a także dużą przestrzenią zieloną (krakowskie Błonia). Wybór obszaru był podyktowany różnorodnością jego zagospodarowania, a także brakiem znaczących zmian w za-



Źródło: Open Street Map

Rys. 1. Obszar, dla którego przeprowadzono ocenę uszczelnienia zlewni

budowie terenu w okresie między czasem przeprowadzenia eksperymentu a momentem wykonania skaningu lotniczego i zdjęć lotniczych, które mogłyby fałszować wyniki i utrudniać ich interpretację.

Ocenę stopnia uszczelnienia zlewni wykonano w oparciu o klasyfikację nienadzorowaną i nadzorowaną rastra (ortofotomapy) oraz klasyfikację chmury punktów, otrzymanej w wyniku lotniczego skaningu laserowego.

W doświadczeniu wykorzystano ortofotomapę (model RGB) w skali 1:10 000, wykonaną na podstawie zdjęć lotniczych w roku 2009, której terenowa rozdzielczość piksela wynosi 0,25 m. Do przeprowadzenia klasyfikacji nienadzorowanej i nadzorowanej użyto darmowego oprogramowania MicroDEM (w wersji 16.0).

Chmura punktów, otrzymana w wyniku lotniczego skaningu laserowego, została udostępniona przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Kraków. Badanie zostało wykonane w roku 2006. Wykorzystano do niego śmigłowiec z systemem pomiarowym Fli-Map 400; średnia wysokość trajektorii lotu wynosiła 350 m. Gęstość punktów analizowanej chmury jest zmienna i waha się w przedziale od 11 do 30 punktów na m<sup>2</sup>, w sumie cała chmura liczy prawie 20 mln punktów. Dane przekazane zostały w formacie ASCII, co oznacza, że w poszczególnych wierszach zapisane są współrzędne punktów (kolejno: X, Y, Z). Dostarczona

chmura punktów przedstawiona jest w krakowskim układzie lokalnych współrzędnych prostokątnych płaskich (KUL).

Do obróbki danych lidarowych wykorzystano komercyjne oprogramowanie fińskiej firmy TerraSolid Ltd., działające jako aplikacja MDL pod MicroStation.

W pierwszej kolejności na analizowanym obszarze wykonano klasyfikację użytkowania gruntów z wykorzystaniem trzech metod: nienadzorowanej klasyfikacji rastra, nadzorowanej klasyfikacji rastra oraz klasyfikacji chmury punktów. Wyznaczono cztery klasy użytkowania gruntów:

- budynki (dachy),
- drogi bitumiczne,
- powierzchnie niebrukowane,
- parki, ogrody, zieleńce.

### 3. WYNIKI

#### 3.1. Klasyfikacja nienadzorowana

Klasyfikację nienadzorowaną wykonywano kilkakrotnie, zwiększając każdorazowo liczbę klas i porównując wyniki z ortofotomapą. Różnorodne pokrycie dachów spowodowało, że dopiero przy podziale na dwanaście klas, uzyskano zadowalające efekty, przy czym: cztery klasy zakwalifikowano jako zieleń, dwie – jako drogi bitumiczne, jedną – jako powierzchnie niebrukowane oraz aż pięć – jako dachy. Na ry-

sunku 2 przedstawiono efekt klasyfikacji, uzyskany przed agregacją klas i po jej dokonaniu.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki, jakie otrzymano dla poszczególnych klas użytkowania gruntu w związku z przeprowadzeniem klasyfikacji nienadzorowanej.

Tabela 1. Użytkowanie gruntów – wyniki klasyfikacji nienadzorowanej

Rodzaj użytkowania	Udział, %	Powierzchnia, km <sup>2</sup>
Drogi bitumiczne	12,7	0,15
Budynki	18,1	0,22
Powierzchnie niebrukowane	8,9	0,11
Tereny zielone	60,3	0,72

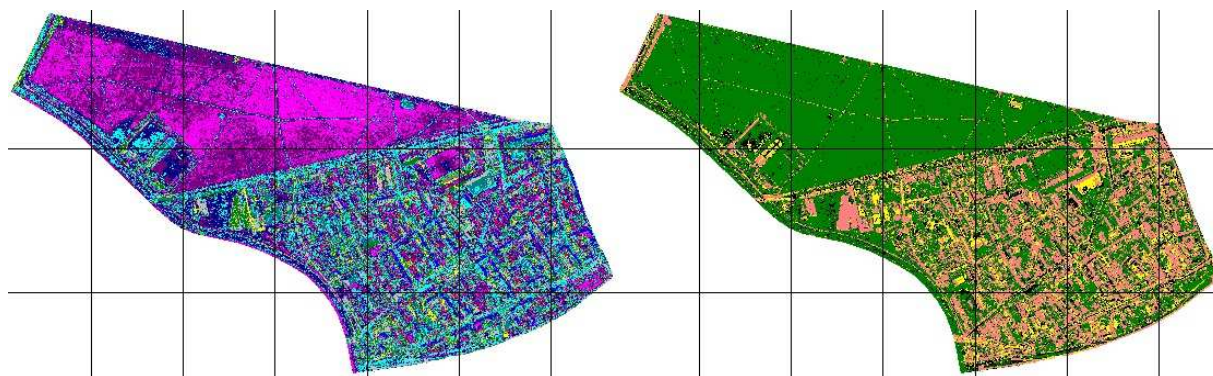
### 3.2. Klasyfikacja nadzorowana

Klasyfikacja nadzorowana została przeprowadzona w oparciu o wskazane w programie wzorce, tzw. pola treningowe, według których program dokonuje klasyfikacji powierzchni rastra (rys. 3).

Wyniki otrzymane w wyniku klasyfikacji nadzorowanej przedstawiono w tabeli 2.

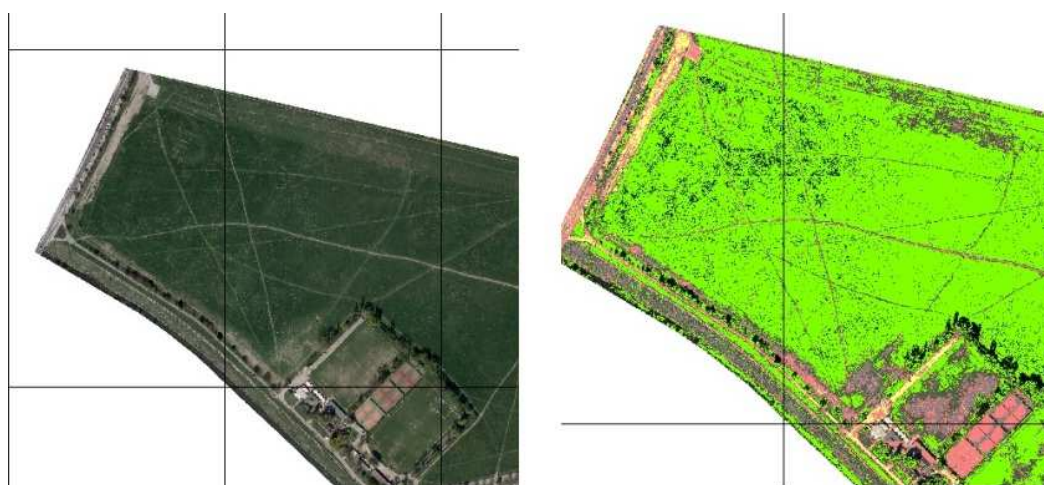
Tabela 2. Użytkowanie gruntów – wyniki klasyfikacji nadzorowanej

Rodzaj użytkowania	Udział, %	Powierzchnia, km <sup>2</sup>
Budynki	14,4	0,17
Drogi bitumiczne	22,7	0,27
Powierzchnie niebrukowane	6,6	0,08
Tereny zielone	56,3	0,68



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 2. Klasyfikacja nadzorowana przed agregacją klas i po jej dokonaniu



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 3. Klasyfikacja nadzorowana – niezabudowany fragment obszaru

### 3.3. Filtracja i klasyfikacja chmury punktów

Grupowanie punktów w odpowiednie warstwy, takie jak teren, roślinność, budynki – składa się z dwóch etapów: filtracji i klasyfikacji. Pierwszy proces, czyli filtracja danych lidarowych, polega na znalezieniu punktów odbitych tylko i wyłącznie od terenu. W procesie tym budowany jest Numeryczny Model Terenu (NMT), który jest niezbędny do przeprowadzenia klasyfikacji chmury punktów. Klasyfikacja dzieli dane lidarowe na warstwy uzależnione od wysokości, którym w sposób automatyczny można przyporządkować punkty odbite np. od roślinności i budynków. W badaniach wykorzystano filtrację opartą na algorytmie aktywnego mo-

delu TIN (z ang. *Triangulated Irregular Network*) (Axelsson 2000). Idea filtracji opiera się na wygenerowaniu wstępnej powierzchni przebiegającej poniżej wszystkich punktów pomiarowych, a następnie na połączeniu tej powierzchni z punktami terenowymi za pomocą tzw. punktów łączących, spełniających określone warunki – odległość iteracyjną oraz kąt iteracyjny. Odległość iteracyjna jest to odległość pomiędzy kandydatem na punkt łączący, a płaszczyzną trójkąta w danym kroku operacji, natomiast kąt iteracyjny to maksymalny kąt powstały między prostą przechodzącą przez punkt łączący i punkt będący kandydatem na punkt łączący, a rzutem tej prostej na płaszczyznę trójkąta. Mając wyłonione

z całej chmury punktów punkty terenowe, można klasyfikować pozostałe punkty względem wysokości. W klasyfikacji tej dla terenu przyjmowana jest wysokość 0, względem której można pogrupować resztę punktów wedle ustalonych warunków. W badaniach przyjęto następujące zakresy wysokości: 0–1,0 m – roślinność niska, 1,0–3,0 m – roślinność średnia, > 3,0 m – roślinność wysoka. W kolejnym kroku szukane są punkty odbite od dachów budynków. W tym przypadku algorytm wyszukuje punkty z warstwy „wysoka roślinność” i wybiera te, pod którymi brak jest punktów terenowych. Wyłonienie ww. warstw odbywa się w sposób automatyczny. Problem pojawia się w momencie wyekstrahowania dróg bitumicznych i powierzchni niebrukowanych. O ile w pierwszym przypadku można znaleźć punkty w sposób półautomatyczny, wykorzystując informację na temat intensywności lub echa odbicia impulsu, to powierzchnie niebrukowane wyłaniane są ręcznie. W przeprowadzonych badaniach, z braku dodatkowych informacji zapisanych w chmurze, w obu przypadkach punkty zostały wybrane manualnie w oparciu o mapę wektorową ulic oraz ortofotomapę (rys. 4).

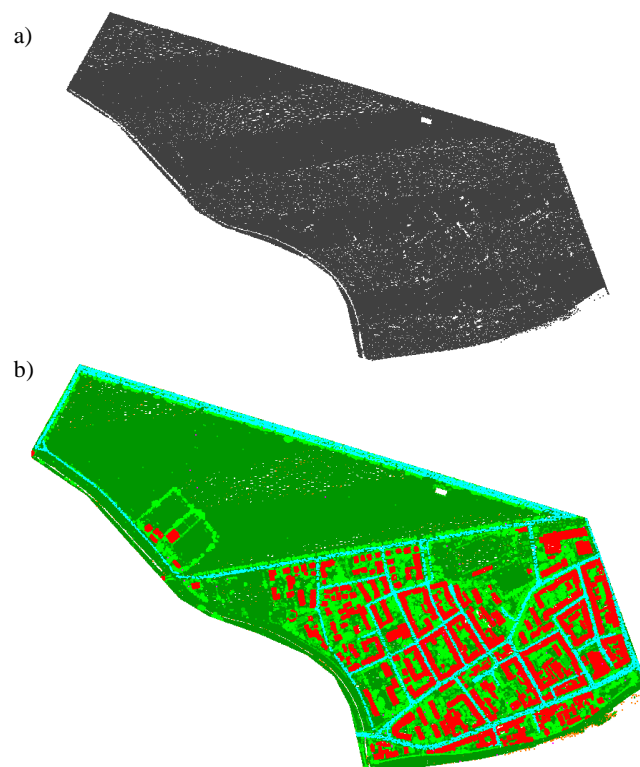
W tabeli 3 zestawiono wyniki końcowe klasyfikacji dokonanej na podstawie chmury punktów.

Tabela 3. Użytkowanie gruntów – wyniki klasyfikacji chmury punktów

Rodzaj użytkowania	Udział, %	Powierzchnia, km <sup>2</sup>
Budynki	15,8	0,19
Drogi bitumiczne	19,2	0,23
Powierzchnie niebrukowane	7,5	0,09
Tereny zielone	57,5	0,69

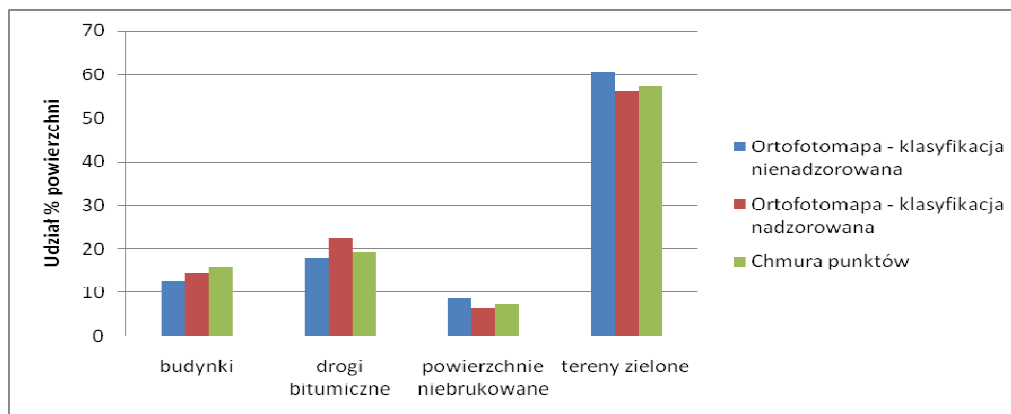
Wyniki otrzymane na podstawie ortofotomapy zarówno w ramach klasyfikacji nadzorowanej, jak i nienadzorowanej oraz chmury punktów – w bardzo niewielkim stopniu różnią

się od siebie. Dotyczy to wyników i dla obszarów zielonych, i dla poszczególnych kategorii terenów uszczelnionych (rys. 5).



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 4. Klasyfikacja chmury punktów: a – surowa chmura punktów, b – sklasyfikowana chmura punktów



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 5. Porównanie wyników otrzymanych za pomocą trzech metod

## 4. PROBLEMY ZIDENTYFIKOWANE PODCZAS KLASYFIKACJI

### 4.1. Ortofotomapa

Podczas klasyfikacji pokrycia terenu na podstawie ortofotomapy, dokonanej przy użyciu zarówno klasyfikacji nadzorowanej, jak i nienadzorowanej, zidentyfikowano trzy zasadnicze problemy:

- zakłócenia związane z cieniami widocznymi na ortofotomapie,
- trudności z identyfikacją budynków z czarnymi dachami,
- przysłonięcie terenu przez korony drzew.

Najważniejszym spośród zidentyfikowanych problemów okazuje się być ten związany z cieniami widocznymi na ortofotomapie. Cienie te szczególnie mocno zakłócają klasyfikację nienadzorowaną. Klasyfikowane są jako osobna kategoria, a jednocześnie zakrywają właściwe użytkowanie terenu (rys. 6).

Dwa pozostałe problemy – związane z koronami drzew oraz czarnymi dachami – dotyczą w podobnym stopniu klasyfikacji nadzorowanej, jak i nienadzorowanej.

Problem związany z przysłonięciem powierzchni terenu przez drzewa jest szczególnie dokuczliwy w przypadku

szpalerów drzew zlokalizowanych wzdłuż dróg – korony powodują przypisywanie zbyt dużego udziału powierzchni zielonych w stosunku do ogółu powierzchni oraz utrudniają identyfikację głównych kierunków odpływu wód ze zlewni miejskiej.

Z kolei w przypadku dachów o czarnej strukturze przeszkodą dla właściwej klasyfikacji stanowi fakt, że dachy te często bywają identyfikowane jako powierzchnie zielone. Sytuacja taka miała miejsce również w przeprowadzonym doświadczeniu (rys. 7).

#### 4.2. Chmura punktów

W celu poprawnego sklasyfikowania danych lidarowych konieczne jest wykonanie prawidłowej filtracji, czyli zbudowanie poprawnego NMT. Samo szukanie punktów odbitych od terenu odbywa się w sposób automatyczny, niemniej czasami konieczna jest ręczna korekta modelu terenu. Najwięk-

szym ryzykiem błędów obarczone są z reguły dane opisujące punkty, które budują model terenu, a leżą znacznie poniżej niego. Takie przypadki zdarzają się najczęściej w okolicach zabudowy (rys. 8).

W oparciu o poprawiony Numeryczny Model Terenu wykonywana jest klasyfikacja pod względem wysokości. W przeprowadzonych badaniach nie było konieczne zbudowanie warstw niskiej, średniej i wysokiej roślinności, ale zrobiono to w celu wyłonienia punktów identyfikujących budynki. Szukając budynków w warstwie „wysoka roślinność”, zmniejsza się zakres poszukiwań, dzięki czemu algorytm działa szybciej i sprawniej. Problem prawidłowego sklasyfikowania budynku w sposób automatyczny pojawia się w momencie, gdy w jego pobliżu rosną wysokie drzewa (rys. 9). W takich przypadkach konieczne było ręczne przeklasyfikowanie punktów.



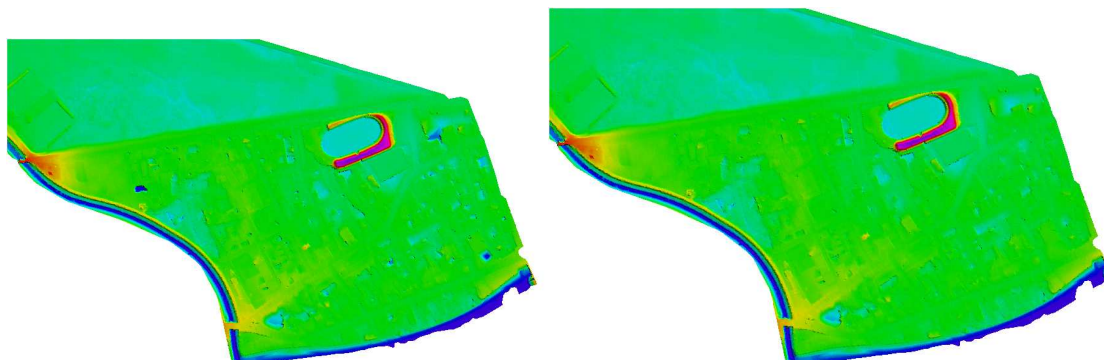
Źródło: Opracowanie własne

Rys. 6. Klasyfikowanie „cieni” jako osobnej klasy pokrycia terenu



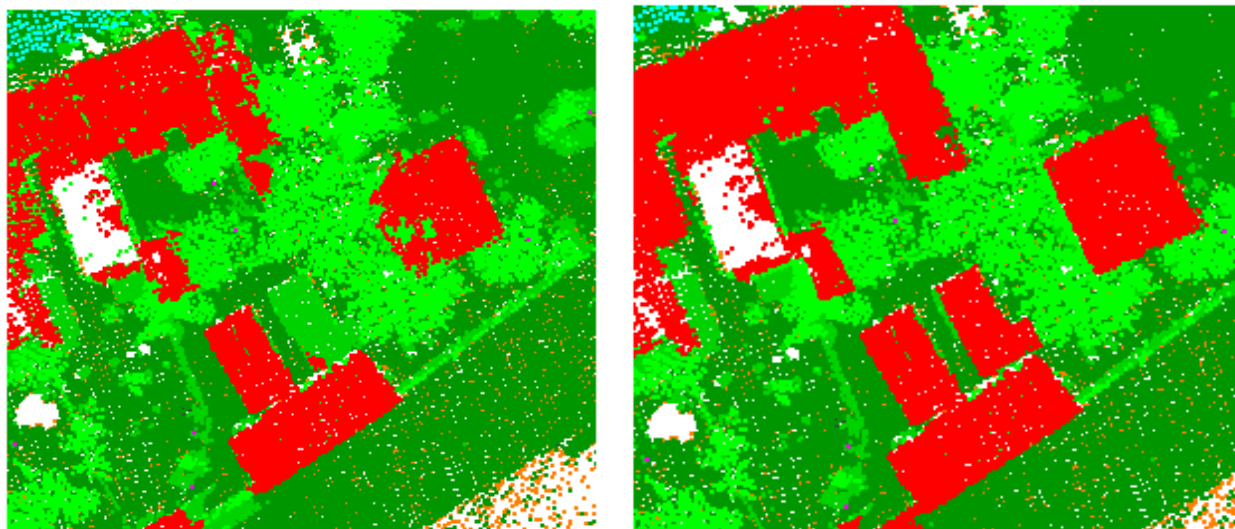
Źródło: Opracowanie własne

Rys. 7. Problemy interpretacyjne związane z przysłonięciem terenu przez korony drzew oraz czarnym kolorem dachów



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 8. Fragment NMT przed manualną klasyfikacją punktów (po lewej) oraz po jej dokonaniu (po prawej)



Źródło: Opracowanie własne

Rys. 9. Fragmenty obrazów przedstawiające budynki wykryte w sposób automatyczny (po lewej) oraz po manualnej korekcie (po prawej)

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Doświadczenie związane z oceną stopnia uszczelnienia zlewni przeprowadzone na podstawie ortofotomapy oraz chmury punktów, pochodzącej z lotniczego skaningu laserowego, wykazało przydatność przyjętych metod i ich wiarygodność ograniczoną w niewielkim jedynie stopniu, co wynika z szeregu problemów, jakie powstają podczas klasyfikacji. Zastosowane w doświadczeniu metody różnią się między sobą stopniem złożoności, a co z tym się wiąże – również ilością czasu potrzebną do ich użycia. Pomimo zdarzających się błędów wszystkie analizowane metody mogą być wykorzystywane w praktyce inżynierskiej – w pracach koncepcyjnych i projektowych.

Warto podkreślić, że zrealizowany eksperyment stanowił pierwszą próbę wykorzystania danych lidarowych do obliczenia uszczelnienia zlewni. W celu wyciągnięcia obszerniejszych wniosków podobna analiza porównawcza powinna być przeprowadzona również dla innego obszaru. Zdaniem autorów wiarygodność otrzymanych wyników należy potwierdzić, wykorzystując w pierwszej kolejności chmurę punktów z zapisaną intensywnością oraz echem, a następnie, porównując otrzymane dane z wynikami otrzymanymi przy użyciu innych metod klasyfikacji, np. obiektową analizą obrazu (OBIA).

Z przeprowadzonego i opisanego powyżej doświadczenia polegającego na porównaniu wyników oceny stopnia uszczelnienia zlewni na podstawie różnych materiałów źródłowych wynika, że:

czelnienia zlewni na podstawie różnych materiałów źródłowych wynika, że:

- wyniki oceny stopnia uszczelnienia zlewni zarówno na podstawie ortofotomapy, jak i chmury punktów tylko nieznacznie różnią się od siebie,
- najszybszą metodą uzyskania wiarygodnych wyników jest klasyfikacja nadzorowana ortofotomapy – klasyfikacja nienadzorowana wymaga dostosowywania liczby przyjętych klas do osiągnięcia zadowalającego wyniku,
- ocena stopnia uszczelnienia zlewni na podstawie chmury punktów z niezapisaną intensywnością oraz echem odbicia dla powierzchni płaskich (drogi bitumiczne, powierzchnie nieutwardzone) wymaga użycia dodatkowych danych,
- największy problem podczas klasyfikacji ortofotomapy stanowią cienie rzucone przez budynki i wysokie drzewa,
- dodatkową trudnością związaną z klasyfikacją ortofotomapy jest identyfikacja budynków z czarnymi dachami, często mylonymi z powierzchniami dróg oraz przysłonięcie części terenu przez korony drzew – szczególnie uciążliwe wzdłuż dróg,
- wszystkie trzy metody oceny nadają się do wykorzystania w praktyce inżynierskiej.

**Literatura**

1. Axelsson P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII/4B, s. 110–117.
2. Bzymek B., Jarosińska E. (2012): Wpływ powierzchni uszczelnienia zlewni na odpływ wód deszczowych. *Środowisko – Czasopismo Techniczne* R. 109, z. 4.
3. Kubik T. i inni (2008): Klasyfikacja obrazów rastrowych z wykorzystaniem sieci neuronowych i statystycznych metod klasyfikacji. Wrocław, Wydaw. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
4. Skotnicki M., Sowiński M. (2011): Dokładność odwzorowania stopnia uszczelnienia zlewni cząstkowych w modelowaniu odpływu ze zlewni miejskiej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, lipiec-sierpień.
5. Zawilski M., Wierzbicki P. (2005): Rola GIS w modelowaniu i monitoringu systemów kanalizacyjnych. Konferencja: GIS – modelowanie i monitoring w zarządzaniu wodociągami. Warszawa, Wydaw. Zarządu Głównego PZliTS.