

DELIMITACJA OBSZARÓW ZABUDOWY W CELU ADAPTACJI MIAST DO ZMIAN KLIMATU

Magdalena Głogowska

Wprowadzenie

Rozwój urbanizacji w połączeniu z wyzwaniami związanymi ze zmianami klimatu, w tym także rosnącym prawdopodobieństwem wystąpienia ekstremalnych zjawisk pogodowych wymusza wdrażanie przemyślanej i spójnej polityki przestrzennej. Powinna ona uwzględniać potrzebę adaptacji miast do zmian klimatu oraz dostosowywać planowanie przestrzenne do zmieniających się warunków środowiskowych. Jednym z kluczowych aspektów działań podejmowanych w tym kierunku jest analiza zmian stopnia uszczelnienia powierzchni. Ma on bezpośredni wpływ na zjawiska, takie jak: lokalne podtopienia, zmniejszenie naturalnej retencji terenu czy efekt miejskiej wyspy ciepła (MWC). W tym kontekście, jak najdokładniejsza delimitacja obszarów zabudowy, jej aktualność, a także zmienność w czasie, staje się kluczowa w podejmowaniu właściwych decyzji planistycznych wspierających adaptację.

Cel pracy

Celem analizy jest identyfikacja ogólnodostępnych oraz wiarygodnych źródeł i serwisów internetowych oferujących gotowe dane rastrowe lub wektorowe obrazujące obszary zabudowane. Drugim aspektem pracy jest przedstawienie źródeł danych pozwalających na pozyskanie obrazów optycznych wymagających zastosowania bardziej zaawansowanych analiz przestrzennych, w tym technik teledetekcyjnych. W uzupełnieniu zostały przedstawione wyniki zastosowania przykładowych technik teledetekcyjnych oraz narzędzia stosowane

w delimitacji obszarów zabudowanych. Omówiono także jakość i użyteczność przedstawionych danych w diagnozowaniu stanu środowiska, zwłaszcza w kontekście miejskiej wyspy ciepła i adaptacji do zmian klimatu.

Metody i kluczowe źródła

W analizie zastosowano otwarto-źródłowe narzędzia i dane przestrzenne. Kluczowe narzędzia, metody i źródła danych obejmują:

- Wskazanie i omówienie najważniejszych serwisów krajowych, europejskich i amerykańskich gromadzących i zarządzających źródłami danych oraz innych platform oferujących dane do analiz np. teledetekcyjnych w celu zaprezentowania najbardziej wiarygodnych zasobów. Przedstawienie tych źródeł pozwala na zwiększenie przejrzystości opisów zamieszczonych w rozdziale i zapewnienie solidnych podstaw do przeprowadzonych rozważań. Pozwala także na praktyczne wykorzystanie zgromadzonej wiedzy osobom zapoznającym się z poruszaną w opracowaniu tematyką.
- Charakterystykę otwartych danych wektorowych i rastrowych o pokryciu terenu (np. Copernicus Urban Atlas, Corine Land Cover, Imperviousness Density, dane BDOT10k) w celu wskazania ich ograniczeń i możliwości użycia w analizach przestrzennych dedykowanych głównie adaptacji miast do zmian klimatu oraz związanymi z nimi problemami środowiskowymi. Dane te stanowią ważne źródło informacji na potrzeby wykonywania tego rodzaju analiz. Każde z tych zbiorów danych charakteryzuje się unikalnymi cechami, takimi jak np. skala, dokładność, aktualność. Cechy te warunkują ich przydatność w analizach środowiskowych czy urbanistycznych.
- Krótkie omówienie możliwości narzędzi otwarto-źródłowych GIS (np. QGIS, Saga GIS) stosowanych do przetwarzania i obróbki danych przestrzennych oraz wizualizacji wyników. Narzędzia te zostały zaprezentowane pod kątem wykorzystania ich do analiz teledetekcyjnych związanych z uszczelnieniem terenu zaprezentowanych w rozdziale.
- Metodę obliczania oraz wynik analizy identyfikacji powierzchni uszczelnionych z wykorzystaniem wskaźnika spektralnego NDBI (Normalized Difference Built-up Index). Wskaźnik ten oparty jest na danych satelitarnych Landsat 8 i służy do klasyfikacji pokrycia terenu.
- Wynik klasyfikacji pokrycia terenu oraz identyfikacji powierzchni uszczelnionych uzyskanych poprzez segmentację rastra, a następnie jego klasyfikację z wykorzystaniem metody uczenia maszynowego. Analiza obrazów optycznych została przeprowadzona na danych ortofotomapy.

Przedstawione źródła, narzędzia oraz sposoby delimitacji mogą wspierać działania samorządów i planistów w szerokim zakresie zarządzania przestrzenią miejską. Analiza różnorodnych źródeł danych i wykorzystanie narzędzi GIS, w tym także teledetekcji pozwala na opracowanie wiarygodnych map obszarów zabudowy oraz ich zmian w czasie, stanowiących podstawę do dalszych działań np. z zakresu adaptacji do zmian klimatu.

Skutki środowiskowe i klimatyczne związane z uszczelnianiem tkanki miejskiej

W skupiskach miejskich województwa śląskiego, szczególnie w obrębie konurbacji górnośląskiej, obserwuje się stały rozwój infrastruktury [Gorgoń 2019]. Jest to związane z rozrostem tych miast, a więc także zwiększaniem powierzchni terenów zabudowanych. Szczególnie jest to widoczne na obszarach podmiejskich, gdzie tereny rolne są zastępowane przez obszary zabudowy jednorodzinnej i wielorodzinnej. Na tego rodzaju terenach, w pierwszej kolejności obszary zielone są rozparcelowywane i sukcesywnie zmniejszana jest ich powierzchnia. Prowadzi to do ich powolnej degradacji, aż w końcu całkowicie zanikają. Jednocześnie na obszarach już zabudowywanych postępuje rozwój gleb uszczelnionych. Wiąże się to z presją mieszkańców na wyższą jakość warunków zamieszkania. Te trwające od lat procesy przyspieszają spadek bioróżnorodności i produktywności ekologicznej w tych regionach.

Z doświadczenia IETU, który uczestniczyło w projektach: „Opracowanie planów adaptacji do zmian klimatu w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców” (44 MPA)²¹ i „Doradztwo strategiczne w ramach projektu Miasto z Klimatem – etap II” (MzK)²² wynika, że liczne problemy, także te związane ze zmianami klimatu, występują na terenach uszczelnionych (tj. zabudowanych, zajętych przez infrastrukturę i drogi) o znacznej intensywności zabudowy. Na tego rodzaju obszarach, tj. mocno zurbanizowanych gdzie miało miejsce wylesianie, uszczelnianie powierzchni, redukcja obszarów zielonych i podmokłych oraz regulacja rzek następują zmiany stosunków wodnych, opadów atmosferycznych, obniża się także wilgotność powietrza [Field *et al.* 2012]. Na obszarach gdzie następuje zagęszczanie tkanki miejskiej mają więc miejsce liczne zagrożenia środowiskowe i klimatyczne. Jednym z takich zagrożeń jest efekt miejskiej wyspy ciepła (MWC). Jest on ściśle związany z gęstością tkanki miejskiej czy zastosowanymi na tych obszarach materiałami budowlanymi. Dowodzą temu liczne badania, które wskazują na istotne powiązanie tego zjawiska z budynkami, ich wysokością oraz występowanie gruntów nieprzepuszczalnych [Chun, Guldmann 2014; van Hove *et al.* 2015; Gorgoń 2019; Lauwaet *et al.* 2024).

W ostatnich dekadach obserwuje się także stopniowy rozwój wielkopowierzchniowych obiektów handlowych. Budowane centra handlowe mają wpływ na strukturę urbanistyczną miast, zarówno w trakcie ich powstawania, jak i w wyniku dalszych przekształceń, które

²¹ W latach 2017–2019 został zrealizowany projekt dotyczący opracowania miejskich planów adaptacji do zmian klimatu dla największych polskich miast (44MPA). W projekcie uczestniczyły 44 największe miasta polskie, w tym także 16 miast z województwa śląskiego. Ich celem było przygotowanie obszarów miejskich na potencjalne zagrożenia związane ze zmianami klimatu.

²² Etap II projektu realizowano od 1 kwietnia 2022 do końca września 2023. Celem projektu było wsparcie 15 miast w przyspieszeniu ich transformacji w kierunku neutralności i odporności klimatycznej. Oprócz wsparcia eksperckiego miasta otrzymały dokument: Mapę drogową transformacji miasta w kierunku neutralności i odporności klimatycznej (MDT).

zachodzą w ich otoczeniu. Powstawanie centrów handlowych wiąże się z pewnymi zmianami w kształtowaniu ich najbliższego otoczenia, co z kolei oddziałuje istotnie na środowisko przyrodnicze. Badania pokazują, że w miarę powstawania tego typu centrów, czasem związanych z wylesieniem tych obszarów, dochodzi do trwałego wzrostu lokalnej temperatury [Norwine 1973; Martin, Evans 1975; Heffner, Twardzik 2015]. Zatem, rozwój centrów handlowych łączy się (podobnie jak w przypadku rozwoju tkanki miejskiej) ze spotęgowaniem efektu miejskiej wyspy ciepła.

Rola obszarów zielonych w kontekście łagodzenia skutków miejskiej wyspy ciepła

Prowadzone od lat badania m.in. w IETU wykazały, że utrata terenów zielonych na rzecz infrastruktury miejskiej przyczynia się do wzrostu temperatury otoczenia [Starzewska-Sikorska 2021]. Ma to związek z zanikiem funkcji, jakie pełnią tereny zielone w obszarze miejskim oraz w jego otoczeniu. Funkcje te, zwane usługami ekosystemowymi są niezwykle istotne i często niedoceniane. Badania w kontekście powiązania obszarów nieuszczelnionych z łagodzeniem efektu MWC były prowadzone przez Fokaides *et al.* [2016]. Wykazały one, że wraz ze wzrostem powierzchni nieuszczelnionych następuje odpowiedni spadek temperatury zarówno na poziomie gruntu, jak i dachów. Wnioski sugerują, że zwiększenie pokrycia roślinnością może skutecznie zmniejszyć intensywność zjawiska MWC. Podsumowując, postępujące uszczelnienie gruntu ma wpływ na powstawanie i potęgowanie efektu miejskiej wyspy ciepła. Jest ona narastającym problemem na obszarach zabudowanych, prowadzącym do wzrostu temperatury, zanieczyszczenia powietrza i zużycia energii. Z kolei tereny zielone to źródło naturalnych procesów zachodzących w przyrodzie oraz zasobów, takich jak np. woda użytkowa czy żywność. Odgrywają one bardzo ważną rolę regulacyjną np. regulacja klimatu (w tym ograniczenie efektu MWC) czy łagodzenie ekstremów pogodowych. Ponadto tereny te spełniają zadania kulturowe, jak: rekreacja czy turystyka.

Rola wskaźników opartych na analizach przestrzennych w planowaniu przestrzennym i adaptacji do zmian klimatu

Delimitacja obszarów zabudowy jest niezwykle ważnym elementem diagnozy stanu miasta i jest powiązana pod wieloma względami z zarządzaniem obszarem miejskim oraz ryzykiem narażenia mieszkańców na zagrożenia klimatyczne. W planowaniu przestrzennym np. stosuje się wskaźniki urbanistyczne, które odgrywają rolę mierników planistycznych i służą do określenia zasad zagospodarowania terenu [Błazy, Łabuz 2023]. Stosuje się je w miejskich planach zagospodarowania przestrzennego. Mierniki te służą równoważeniu zabudowy w stosunku do terenów zieleni. Innym dokumentem, gdzie zasięg zabudowy

ma bezpośrednie przełożenie na podejmowane działania są Miejskie Plany Adaptacji. W odniesieniu do obszaru zurbanizowanego wyznaczana jest nie tylko MWC oraz związane z nią zagrożenia, ale liczone są inne, nie mniej istotne wskaźniki związane z zielenią czy wodą w mieście. Część z nich została zaproponowana jako Przyrodniczo-klimatyczne wskaźniki zrównoważonego rozwoju miasta w wydany przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska przewodniku dla miast [Banaszak *et al.* 2022]. Przewodnik został opracowany w celu wsparcia samorządów w podejmowaniu decyzji o charakterze strategicznym, planistycznym i inwestycyjnym.

Serwisy gromadzące i zarządzające źródłami danych

W poniższym opisie zostały wybrane serwisy, które udostępniają dane lub informacje związane z delimitacją obszarów zurbanizowanych. Są one wiarygodnymi źródłami informacyjnymi do celów zarządzania środowiskiem w kontekście zarówno adaptacji do zmian klimatu (w tym także tematyką związaną z miejską wyspą ciepła), jak i planowania przestrzennego.

• Serwisy krajowe

Jednym z podstawowych serwisów krajowych jest strona geoportalu [www.geoportal.gov.pl]. Wydawcą serwisu jest Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Portal działa jako centralny węzeł infrastruktury informacji przestrzennych i zapewnia dostęp do danych przestrzennych i powiązanych usług [geoportal.gov.pl]. Serwis powstał w 2005 r. i jest sukcesywnie rozwijany. Część materiałów centralnego zasobu geodezyjnego i kartograficznego udostępniana jest nieodpłatnie w zakładce dane do pobrania. Są to m.in. Ortofotomapy (ORTO) czy Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k).

Narodowy System Informacji Satelitarnej (NSIS) umożliwia odbiór, przechowywanie, przetwarzanie i udostępnianie danych satelitarnych. Serwis nadzorowany jest przez Polską Agencję Kosmiczną (POLSA) (Statute NSIS). Portal NSIS to narzędzie do wykonywania podstawowych analiz przestrzennych na podstawie produktów satelitarnych. System wspiera infrastruktura, której głównym celem jest dostarczanie serwisów monitorujących, produktów satelitarnych, narzędzi analitycznych oraz usług opartych na danych satelitarnych [Ruszył Narodowy System... 2023]. Zadaniem serwisu jest wsparcie dla administracji publicznej w realizacji zadań, podejmowaniu decyzji, optymalnym wykorzystaniu dostępnych zasobów oraz infrastruktury teleinformatycznej. Wśród zasobów tematycznych dostępnych na stronie jest mapa pokrycia terenu w formie rastrowej. Ponadto na stronie dostępne są mapy temperatury oraz intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła dla 28 miast Polski oraz dla Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii.

• Serwis europejski Copernicus

Program Copernicus to unijny program obserwacji Ziemi, którego celem jest monitorowanie planety oraz jej środowiska, a także analiza uzyskanych wyników. Program udostępnia usługi informacyjne oparte na danych uzyskanych z satelitów oraz informacje *in situ* (Informacje o Programie Copernicus | Copernicus). Program jest koordynowany

i zarządzany przez Komisję Europejską we współpracy z państwami członkowskimi, Europejską Agencją Kosmiczną (ESA), Europejską Organizacją Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (EUMETSAT), Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), agencjami UE i instytutem badawczym Mercator Océan. Użytkownicy mają otwarto-źródłowy i nieodpłatny dostęp do usług informacyjnych.

Serwis Copernicus jest rozbudowaną platformą, z której można pozyskać różnego rodzaju dane rastrowe lub wektorowe. Są to dane związane z atmosferą, morzem, ziemią, zmianami klimatu, bezpieczeństwem czy stanami wyjątkowymi. W obszarze monitorowania łądów (CLMS) dostarczane są dane geograficzne dotyczące pokrycia terenu oraz jego zmian, użytkowania gruntów, stanu roślinności, cyklu hydrologicznego i zmieniających energii na powierzchni ziemi. Platforma ponadto jest dostawcą usług związanych ze zdjęciami satelitarnymi. W tym zakresie Copernicus dostarcza danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego na poziomie globalnym (About Copernicus | Copernicus). Zasoby te mogą być również wykorzystywane na potrzeby analiz przestrzennych wykonywanych na poziomie lokalnym i regionalnym.

Nie wszystkie dane dostępne za pomocą serwisu są aktualne tak jak dane satelitarne. Część danych dostępnych w obszarze monitorowania łądów może być starsza, ponieważ aktualizacja odbywa się, w zależności od zasobu, nawet co kilka lat. Jeżeli chodzi o dane związane z obszarami zabudowanymi to wymienić należy przede wszystkim: Pasma satelit Sentinel wraz z analizami tych pasm, Urban Atlas (UA), Urban Atlas Change (UAC), CORINE Land Cover (CLC), warstwy o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów (Imperviousness Density).

● Serwisy amerykańskie

Kolejnym źródłem są dane gromadzonych w ramach amerykańskiego programu Landsat prowadzonego przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (National Aeronautics and Space Administration, akronim NASA) i Amerykańską Służbę Geologiczną (United States Geological Survey, akronim USGS). Zdjęcia satelitarne Landsat można pozyskać poprzez serwis EarthExplorer (EE) (EarthExplorer). Jest to wyszukiwarka internetowa. Pozwala na przeglądanie, pobieranie danych dotyczących nauk o Ziemi z archiwów U.S. Geological Survey (USGS) wraz z eksportem metadanych. Dane te są aktualizowane na bieżąco.

Podstawowe informacje o źródłach danych

Dane wymienione w opisanych powyżej podrozdziałach są nieodpłatnie i dostępne na zasadzie otwartej licencji. Oferowane obrazy optyczne (pasma satelit) dają pewną swobodę doboru rozdzielczości oraz okresu, w jakim zostały pozyskane w porównaniu z przetworzonymi obrazami lub danymi wektorowymi. W tab. 9 zestawiono podstawowe informacje nt. danych pomocnych w analizach związanych z obszarami zabudowanymi wraz ze wskazaniem linków, pod którymi są udostępniane.

Tabela 9. Zestawienie omawianych w pracy dostępnych zasobów w kontekście obszarów zabudowanych

Zasób/skrót	Link do zasobu	Format danych	Aktualność danych*
Ortofotomapy/ORTO	https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/ortofotomapa-orto/	raster	2024 ^{23, 24}
Baza Danych Obiektów Topograficznych/BDOT10k	https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-obiektow-topograficznych-bdot10k/	wektor	2024
Mapy pokrycia terenu	https://nsisplatforma.polsa.gov.pl/portal?compositionId=329	raster	2024
Mapy temperatury	j. w.	raster	2024
Mapy intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła	j. w.	raster	2024
Pasma satelit Sentinel wraz z produktami będącymi wynikiem analiz pasm	https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=U2FsdGVkX1%2BKORokUqKAhKxTcYmJh0ASIP%2F6HWqwPjM4lzl8oKzu8x89RpYdwgGEXLU Gujyny4WgJHMTThscQ3aw3NQiwGiYv2370ZhyEgnyZtFVC8n2m5VEcfTxrTpW&datasetId=S2_L2A_CDAS&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE	raster	2025
Urban Atlas/UA	https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas/urban-atlas-2018	wektor	2018
Urban Atlas Change/UAC	https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas/urban-atlas-change-2012-2018	wektor	2012–2018
Corine Land Cover/CLC	https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover	raster/wektor	2018
Warstwy o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów/Imperviousness Density	https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-imperviousness/imperviousness-density-2018	raster	2018
Obrazy satelitarne Landsat/USGS	https://earthexplorer.usgs.gov/	raster	2025

* w kolumnie w przypadku serii map podano datę ostatniej aktualizacji

Źródło: opracowanie własne na bazie danych BDOT10k.

²³ Aktualizacja na podstawie *Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z 27 lipca 2021 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych (Rozporządzenie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii z 27 Lipca 2021 r. w sprawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych oraz Bazy Danych Obiektów Ogólnogeograficznych, a także Standardowych Opracowań Kartograficznych, n.d.)*

²⁴ Ortofotomapy dostępne są dla części miast Polski głównie znajdujących się w zachodnich województwach.

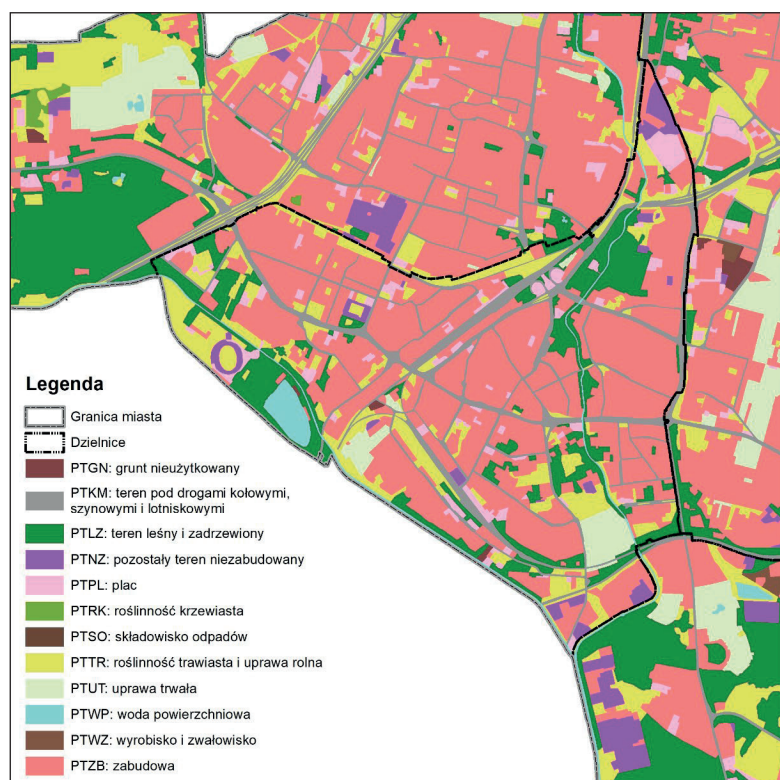
Źródła danych w formie wektorowej

• Baza Danych Obiektów Topograficznych

Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) jest dostępna w formie wektorowej dla całej powierzchni Polski. Dane są aktualizowane na bieżąco. BDOT10 jest podobny do standardowej mapy topograficznej w skali 1:10 000 pod względem zawartych treści oraz szczegółów (Baza Danych Obiektów Topograficznych – BDOT10k – Otwarte Dane). Zasób zawiera lokalizację przestrzenną i podstawową charakterystykę opisową obiektów topograficznych.

Jest to zbiór obiektów sklasyfikowanych na trzech poziomach szczegółowości. Zakres tematyczny obejmuje 267 rodzajów obiektów zgrupowanych w 73 klasach i 10 kategoriach klas tych obiektów. Treść mapy to informacje m.in. o sieci wodnej, sieci komunikacyjnej, sieci uzbrojenia terenu, pokryciu terenu, budynkach, budowlach i urządzeniach, kompleksach użytkowania terenu, terenach chronionych, jednostkach podziału terytorialnego.

W ramach zasobu BDOT10k na szczególną uwagę, ze względu na delimitację obszarów zurbanizowanych, zasługują dane związane z pokryciem terenu (ryc. 28). Dane z tego



Źródło: opracowanie własne na bazie danych BDOT10k.

Ryc. 28. Pokrycie terenu z BDOT10k – fragment miasta Sosnowca

zasobu są często wykorzystywane w analizach przestrzennych związanych z adaptacją do zmian klimatu, w tym w dokumentach: Miejskie Plany Adaptacji miast do zmian klimatu. Poza tym jest to zestaw danych, który jest najchętniej stosowany z analizach związanych ze stanem przestrzeni miejskiej ze względu na swoją aktualność i dostępność dla użytkowników. Omawiany zasób danych, BDOT10k, pochodzi z oficjalnego zasobu państwowego, a jego wydawcą jest Główny Urząd Geodezji i Kartografii, co daje gwarancję jakości i pewności źródła danych.

Ministerstwo Klimatu i Środowiska w wydanym w 2022 r. Przewodniku *Przyrodniczo-klimatyczne wskaźniki zrównoważonego rozwoju miast. Przewodnik dla miast* [Banaszak *et al.* 2022] proponuje wskaźniki, z których znaczna część bazuje na danych pokrycia terenu BDOT10k. Jeżeli chodzi o wskaźniki dotyczące zabudowy to są one składową wskaźników z grupy dotyczącej: powierzchni nieprzepuszczalnych (zabetonowanych). Inne z kolei dane związane z zielenią są składową wskaźników z grupy: zieleń i retencja miejska.

- **Urban Atlas**

Urban Atlas (UA) to dane wektorowe odnoszące się do pokrycia terenu i użytkowania gruntów w 788 funkcjonalnych obszarach miejskich (FUA, od ang. *functional urban areas*) w 38 krajach Europejskiego Obszaru Gospodarczego (EOG, ang. European Economic Area, EEA) i Wielkiej Brytanii [*Urban Atlas...* 2018]. Ostatnia aktualizacja była wykonana na rok referencyjny 2018.

Zbiór zawiera informacje dotyczące pokrycia terenu i użytkowania gruntów dla 17 klas miejskich o minimalnej jednostce mapowania (MMU) 0,25 ha i dla 10 klas większych z MMU 1 ha (ryc. 29). Zasób zawiera ponadto zintegrowane szacunki populacji.

Urban Atlas był wykorzystany m.in. przez IETU w analizach przestrzennych miast m.in. w ramach projektu MPA 44 oraz w usłudze doradztwa w ramach projektu MzK. Stanowi istotny zasób związanych z przestrzenią funkcjonalną miast i stosowany jest w analizach przestrzennych miasta w ramach dokumentów MPA. W porównaniu z danymi CORINE Land Cover (CLC) jest on zasobem dokładniejszym, ale zawężonym jedynie do największych miast Europy.

- **Urban Atlas Change**

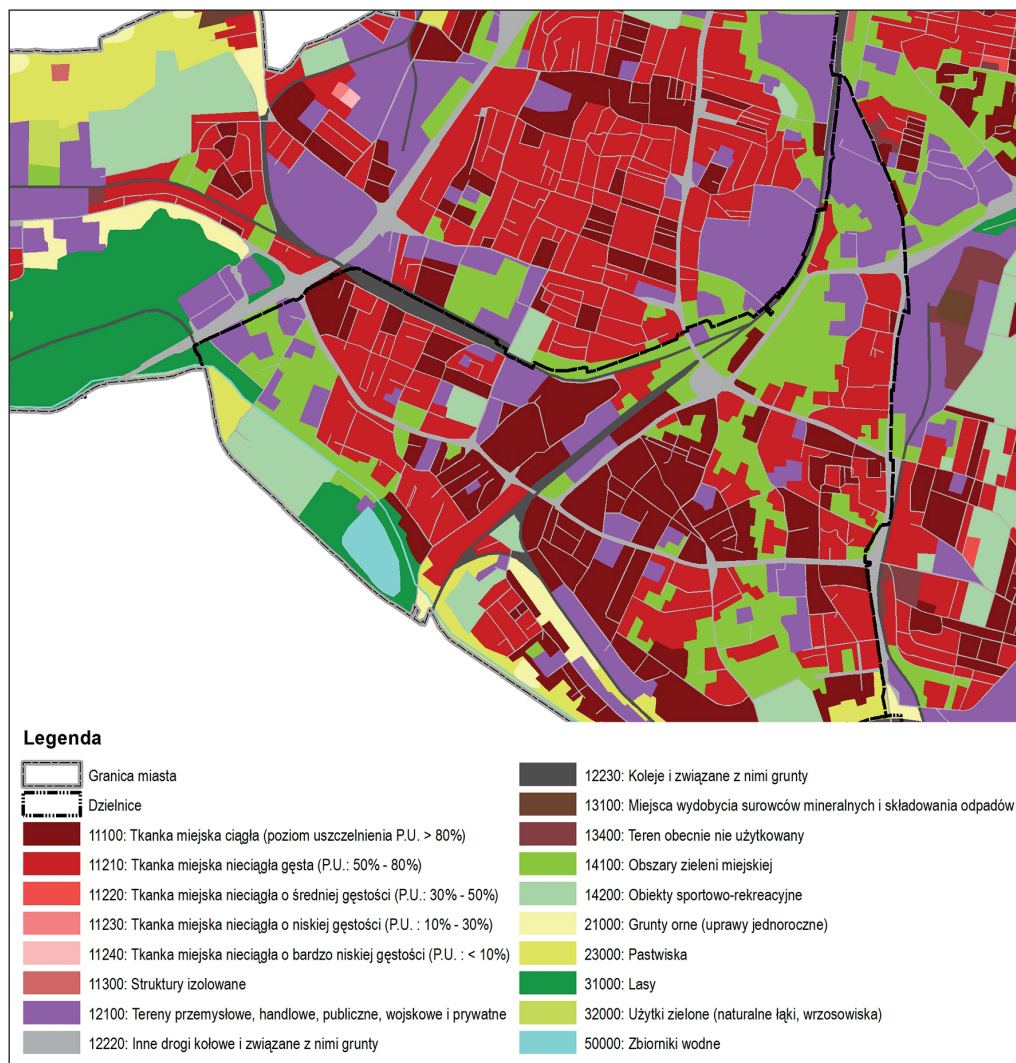
Urban Atlas Land Cover/Land Use Change 2012–2018 wydawany w formie wektorowej [Urban Atlas Land Cover/Land Use 2018 (Vector), Europe, 6-Yearly, Jul. 2021].

Dostarcza danych dotyczących pokrycia terenu i zmian użytkowania gruntów między warstwami Urban Atlas z 2012 i 2018 r. dla FUA obecnych w obu warstwach atlasów. MMU waha się od 0,1 ha do 0,25 ha w zależności od klasy. Minimalna szerokość mapowania (MMW) wynosi 10 m.

Zasób ma ograniczone zastosowanie, jedynie do analiz porównawczych związanych ze zmianami użytkowania ziemi.

- **Corine Land Cover**

Dane wektorowe związane z pokryciem terenu CORINE Land Cover (CLC) z 2018 r. są częścią ogólnoeuropejskiego komponentu: Copernicus Land Monitoring Service



Źródło: opracowanie własne na bazie danych [UA 2018].

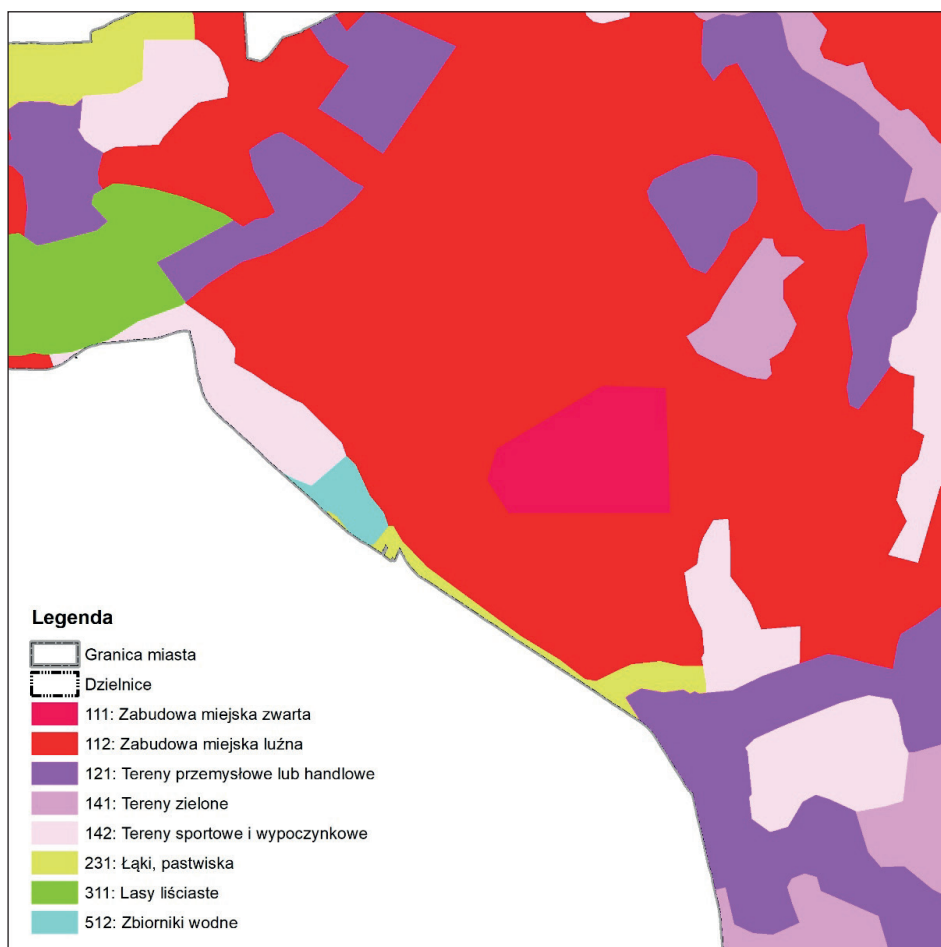
Ryc. 29. Pokrycie terenu według Urban Atlas – fragment miasta Sosnowca

(About Copernicus |Copernicus). Źródłem danych o pokryciu terenu CLC są zdjęcia satelitarne. Interpretacją zdjęć i klasyfikacją zajmują się krajowe zespoły poszczególnych członków i krajów współpracujących EOG. Wyniki dostarczone przez poszczególne zespoły są integrowane i ujednolicane na poziomie europejskim.

Standardowa metodyka tworzenia map CLC, na którą składa się hierarchiczny, 3-poziomowy sposób porządkowania klas pozwala uzyskać jednolite wyniki dla całej strefy EOG. Pierwszy poziom, najbardziej ogólny wyróżnia pięć podstawowych rodzajów

pokrycia Ziemi: tereny antropogeniczne, obszary rolnicze, lasy i ekosystemy seminaturalne, obszary podmokłe oraz wody. Drugi poziom, bardziej szczegółowy, rozróżnia 15 klas pokrycia terenu. Ten poziom klasyfikacji można zobrazować na mapach w skalach od 1:500 000 do 1:1 000 000. Ostatni poziom, trzeci, rozróżnia aż 44 klasy. Co ciekawe, w Polsce wyróżnić można 31 klas z trzeciego poziomu. Podkreślić należy, że CLC ma duży stopień generalizacji przestrzennej [Kozak *et al.* 2014] (ryc. 30). Minimalna jednostka mapowania dla warstw wynosi 25 hektarów. Minimalna szerokość elementów liniowych wynosi 100 metrów.

Celem usługi CLC jest wsparcie we wdrażaniu działań związanych z obszarami priorytetowymi w ramach programów Unii Europejskiej dotyczących środowiska, w tym: ochrony ekosystemów, zachowania różnorodności biologicznej, monitorowania skutków



Źródło: opracowanie własne na bazie danych CLC 2018.

Ryc. 30. Pokrycie terenu według Corine Land Cover – fragment miasta Sosnowca

zmian klimatycznych, rozwoju obszarów miejskich, oceny stanu rolnictwa lub wdrażania dyrektyw dotyczących zasobów wodnych. Dane z tego zasobu są proponowane w Przewodniku *Przyrodniczo-klimatyczne wskaźniki zrównoważonego rozwoju miast. Przewodnik dla miast* [Banaszak *et al.* 2022] do obliczenia m.in. wskaźników związanych z występowaniem MWC.

Źródła danych w formie rastrowej

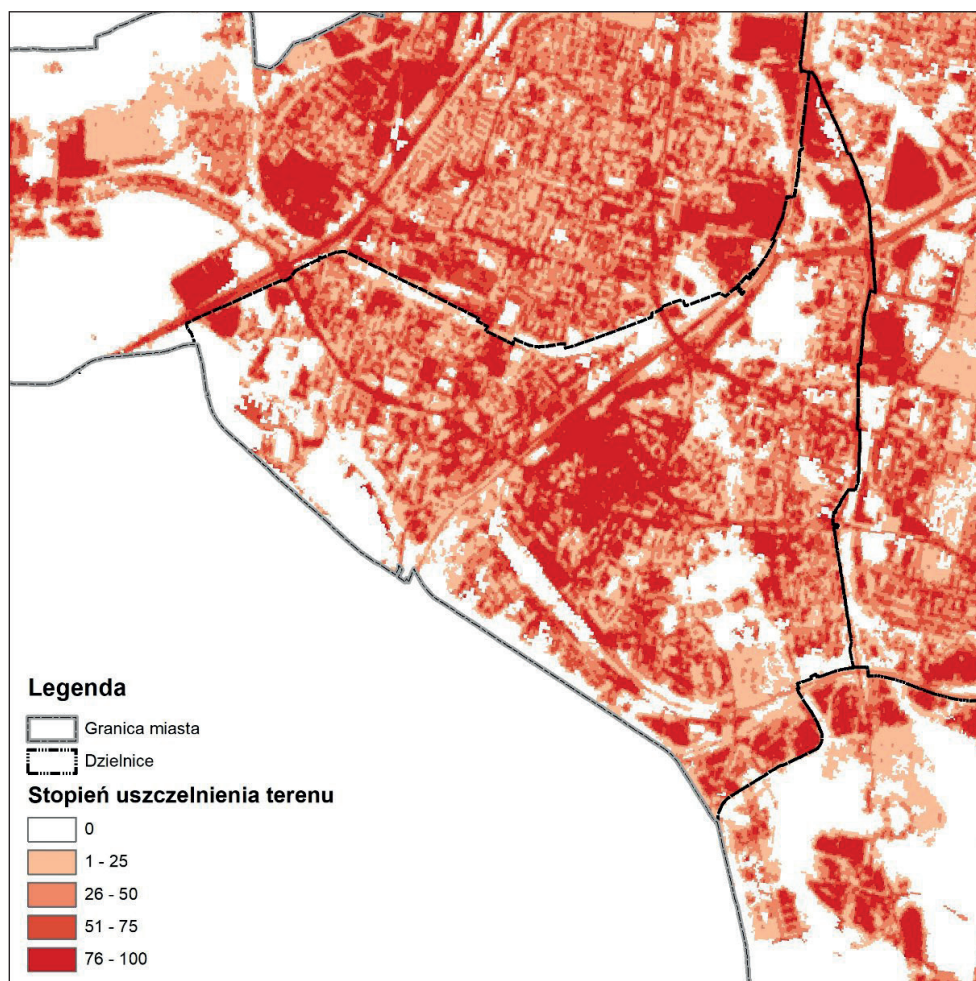
• Warstwy o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów

Działalność człowieka związana z poprawą jakości życia rozumianej jako rozwój obszarów zabudowanych i związanej z nimi infrastruktury skutkuje kurczeniem się terenów, na których woda może swobodnie infiltrować w głąb [Łachowski 2020]. Obszary takie charakteryzują się zastąpieniem pierwotnej (częściowo) naturalnej pokrywy terenu lub powierzchni wody sztuczną, często nieprzepuszczalną pokrywą [*Imperviousness Density* 2018 (Raster 10 m and 100 m), Europe, 3-Yearly, n.d.]. Te sztuczne powierzchnie są zwykle trwałe lub utrzymywane przez dłuższy czas. Do materiałów nieprzepuszczalnych zalicza się m.in. asfalt czy beton, czyli podstawowy budulec miast.

Unijny Program Copernicus publikuje na stronie: Copernicus Land Monitoring Service m.in. warstwy o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów (high-resolution layer imperviousness density, HRL IMD). Dotychczasowy 3-letni harmonogram aktualizacji warstw był akceptowalny w kontekście wykorzystania tych danych w analizach przestrzennych w celach diagnozy stanu miasta. Od 2006 r. zostało opublikowanych 5 warstw (dla lat referencyjnych 2006, 2009, 2012, 2015 i 2018). Niestety po 2018 r. nie pojawiła się już żadna aktualizacja.

Warstwa o wysokiej rozdzielczości z 2018 r. to produkt tematyczny przedstawiający gęstość uszczelnienia w zakresie 0–100% [Strand 2022]. Rozdzielczość to 10 m. Dla 2018 r. (w tym zawarte są dane z lat 2017–2019) dla obszaru EOG i Wielkiej Brytanii. Seria zestawów danych, dotyczących stopnia nieprzepuszczalności o wysokiej rozdzielczości, została utworzona na podstawie skalibrowanego, liczonego automatycznie za pomocą znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [Strand 2022]. Wartości szacowane są jako stopień nieprzepuszczalności (0–100%) w obrębie danego piksela. Z upływem czasu i w związku z brakiem aktualizacji warstwa z 2018 r. będzie możliwa do wykorzystania jedynie w kontekście analiz historycznych tkanki miejskiej.

Warstwa o wysokiej rozdzielczości dotycząca stopnia nieprzepuszczalności terenów była wykorzystywana m.in. przez IETU w analizach przestrzennych miast m.in. w ramach projektu MPA 44 oraz w projekcie MzK (ryc. 31), także tych dotyczących ryzyka narażenia mieszkańców na występowanie MWC. Stanowi ona istotny zasób danych na temat uszczelnienia miasta, jest niezwykle przydatna do analiz porównawczych miast. Brak



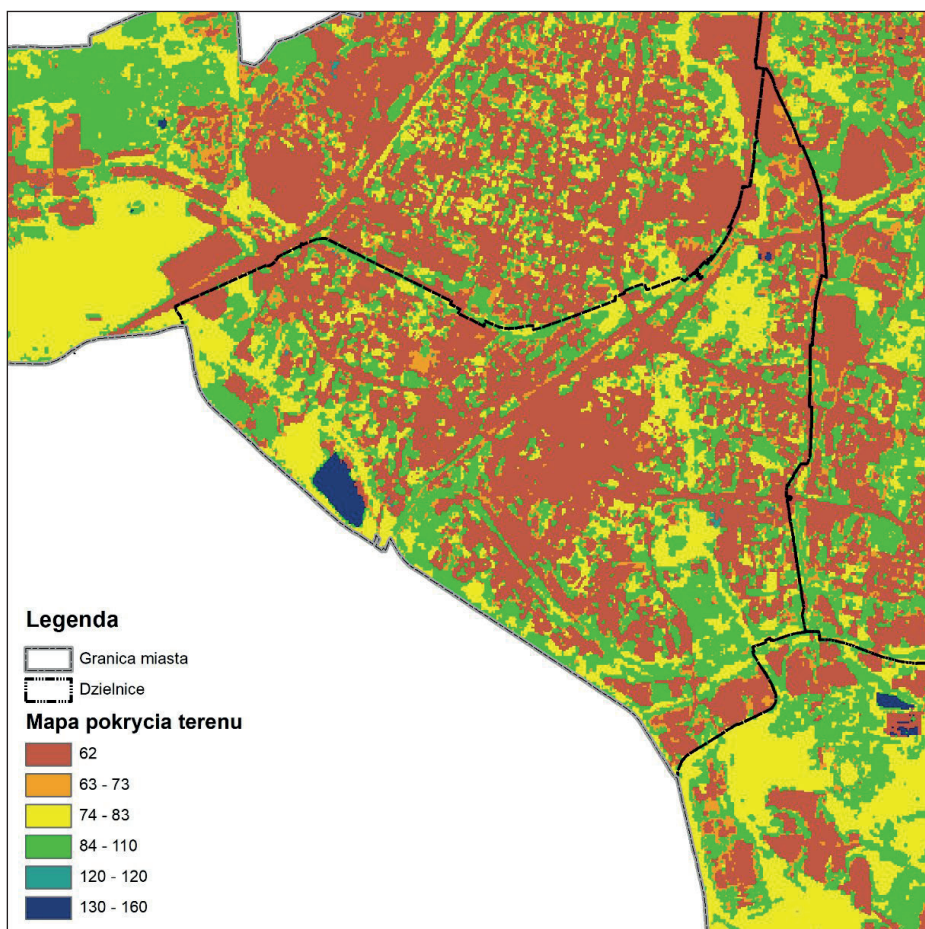
Źródło: opracowanie własne na bazie danych [Imperviousness Density 2018].

Ryc. 31. Warstwa o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów – fragment miasta Sosnowca

aktualizacji od 2018 r. powoduje, że zasób ten ma coraz mniejsze znaczenie w analizach przestrzennych odnoszących się do stanu aktualnego miasta.

• Mapy pokrycia terenu – platforma NSIS

Mapa pokrycia terenu dostępna na platformie NSIS publikowana jest w rocznych odstępach i obejmuje okres od 2019 do 2024 (ryc. 32). Mapy wykonano na bazie satelitów Landsat-8 i Landsat-9 oraz danych nieprzepuszczalności powierzchni, meteorologii, gęstości zaludnienia oraz wskaźnika kondycji roślinności NDVI, czy mapy pokrycia terenu [Monitoring satelitarny dla klimatu... 2023].



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pobranych z platformy NSIS.

Ryc. 32. Mapa pokrycia terenu – fragment miasta Sosnowca

Obecnie mapy nie mają szerokiego zastosowania w dokumentach, jednak może to być związane z tym, że platforma jest relatywnie nowa i nie jest znana zbyt wielu użytkownikom.

Źródła danych zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz analizy teledetekcyjne

Teledetekcja to metoda pozyskiwania informacji o obiektach znajdujących się na/lub w pobliżu powierzchni Ziemi i atmosfery na podstawie promieniowania odbitego lub emitowanego przez te obiekty [Read, Torrado 2009]. Informacje te są zazwyczaj przechwytywane z odległości z góry w postaci danych obrazowych. Teledetekcja to także metoda

pozyskiwania danych o zjawiskach i procesach zachodzących na powierzchni Ziemi, a ponadto przetwarzania pozyskanych danych na użyteczne informacje, charakteryzujące te obiekty, zjawiska oraz procesy [Ciołkosz 2005].

- **Ortofotomapy**

Ortofotomapy to rastrowy obraz powierzchni terenu. Są one publikowane i udostępniane w formie nieodpłatnej na stronie geoportalu, w cyklu dwuletnim od 2021 r. Wspomniane dane mają rozdzielczość piksela 25 cm [Izdebski, Seremet 2020]. Ponadto także w cyklu dwuletnim dla miast powiatowych dostępne są w rozdzielczości 5/10 cm, ale z rocznym przesunięciem. Oznacza to, że dla miast powiatowych aktualizacja wykonywana jest co roku raz w rozdzielczości 25 cm i raz w rozdzielczości 5/10 cm.

- **Obrazy satelitarne Landsat i Sentinel-2**

Obrazy satelitarne to kolejne źródło danych. W otwarto-źródłowym dostępie są m.in. pasma z satelity Landsat 7 i 8 oraz Sentinel-2.

Dane Landsat 7 obsługiwana przez United States Geological Survey (USGS) są dostępne od 1999 r. (Landsat 7 |Landsat Science). Jednak w 2003 r. nastąpiła awaria korektora SLC (Scan Line Corrector) i zobrażenia dostępne po tym czasie mają luki w danych [Landsat ... 2011]. Można te błędy usunąć poprzez nałożenie odpowiedniej maski na raster. Satelita powtarza nalot co 16 dni. Od 2013 r. działa nowy Landsat 8 gromadząc i archiwizując dane termiczne i wielospektralne, zapewniając jednocześnie spójność z poprzednimi danymi misji Landsat. Powtarzanie pokrycia obszaru przez tego satelitę odbywa się co 8 dni. Rozdzielczość większości pasm obu tych satelit to 30 m.

Sentinel-2 pozyskuje wysokorozdzielcze i wielospektralne obrazy optyczne (S2 Mission, n.d.; Sentinel-2 Overview). Misja Sentinel-2 składa się z dwóch identycznych satelitów działających razem, Sentinel-2B (wystartowany w 2017 r.) i Sentinel-2C (wystartowany w 2024 r.). Satelita Sentinel-2A (wystartowany w 2015 r.) zbliża się do końca okresu eksploatacji, stąd w celu kontynuacji misji gromadzenia danych programu Copernicus wystartowano satelitę Sentinel-2C. Bliźniacze satelity poruszają się po tej samej orbicie z przesunięciem o 180°. Częstotliwość rewizyt wypada co 10 dni na równiku z jednym satelitą i 5 dni z dwoma satelitami w warunkach bezchmurnych, co może dawać 2–3 dni na średnich szerokościach geograficznych [Delwart 2015]. Optyczny skaner wielospektralny (MSI) tych satelit zbiera 13 pasm spektralnych: cztery pasma o rozdzielczości przestrzennej 10 m, sześć pasm o 20 m i trzy pasma o 60 m.

Przykłady map obszarów zabudowanych opracowanych za pomocą metod teledetekcyjnych

- **Znormalizowany wskaźnik zabudowy – NDBI**

Znormalizowany wskaźnik zabudowy (Normalized Difference Built-up Index – NDBI) został opracowany w celu „mapowania” obszarów zabudowanych, zaproponowany przez

Zha *et al.* [2003]. Mapowane jest zautomatyzowane, bazuje na pasmach spektralnych, pozyskanych z satelit poprzez ich arytmetyczną manipulację. Wskaźnik liczony jest ze wzoru:

$$NDBI = (SWIR - NIR)/(SWIR + NIR)$$

gdzie:

SWIR – absorbcja w paśmie podczerwieni,

NIR – odbicie w paśmie podczerwieni.

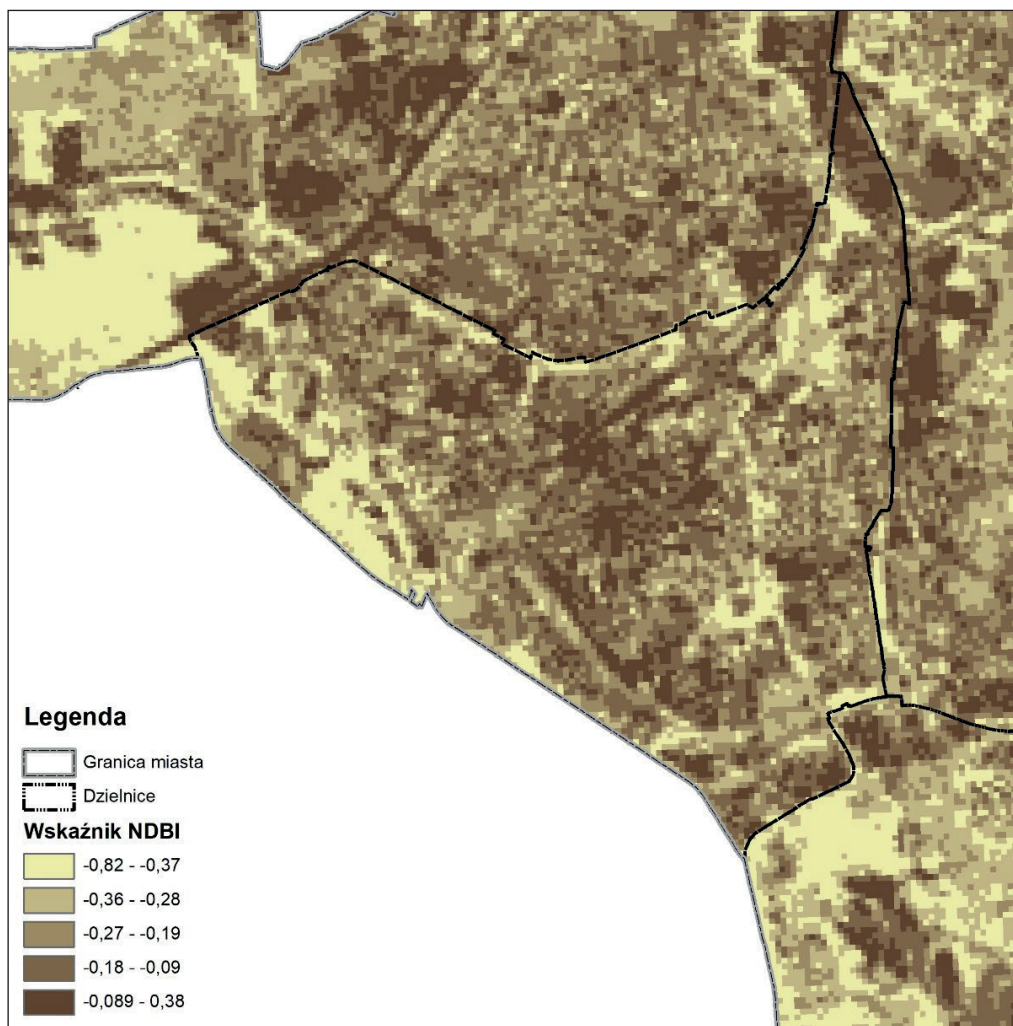
Wskaźnik NDBI nie jest tak rozpowszechniony jak wskaźnik kondycji roślinności NDVI, niemniej jednak jest stosowany w analizach związanych z diagnozą stanu miasta. Przybiera wartości od –1 do 1.

Metoda liczenia wskaźnika nie jest podatna na sezonowość, jak w przypadku wskaźnika NDVI. Jednak ogólnie zaleca się stosowanie wskaźnika liczonego na bazie zdjęć z okresu, gdy np. defoliacja jest minimalna lub nie występuje [Zha *et al.* 2003]. Trudność stosowania wskaźnika ponadto wynika z tego, że nie rozróżnia on obszarów zabudowanych od obszarów gleb odkrytych. Ogólnie zaleca się stosowanie zdjęć, gdy pokrywa roślinna jest maksymalna. Jednak w wielu przypadkach nie jest możliwe uniknięcie tego rodzaju błędów.

Jeżeli chodzi o wskaźniki z Przewodnika dla miast, to jest on rekomendowany jako składowa wskaźników z grupy dotyczącej powierzchni nieprzepuszczalnych (zabetonowanych). Wskaźnik jest stosowany jako informacja pomocnicza w diagnozowaniu stanu miasta oraz zagrożeń związanych z uszczelnieniem gruntu np. tych odnoszących się do efektu MWC (ryc. 33).

- **Narzędzia do przetwarzania, obróbki i analiz obrazów optycznych wraz z przykładowym zastosowaniem techniki teledetekcyjnej**

Do opracowania map obszarów zabudowanych można wykorzystać otwarto-źródłowe programy, takie jak Saga GiS czy QGiS. Za ich pomocą można osiągnąć dobre rezultaty obróbki zdjęć satelitarnych i lotniczych. Programy te oferują różne narzędzia związane z obróbką rastrów. Pierwszy ze wspomnianych programów daje możliwość segmentacji i klasyfikacji rastra za pomocą obiektowej analizy obrazu (ang. Object Based Image Analysis, akronim OBIA), jest to wiele połączonych narzędzi do wyodrębniania obiektów geograficznych jako poligonów [Conrad *et al.* 2015]. Narzędzie powstało z myślą obróbki zdjęć satelitarnych. Analiza OBIA wymaga zaawansowanej wiedzy z zakresu teledetekcji. Jednak jej stosowanie pozwala na dokładniejsze analizy dotyczące zmian pokrycia terenu. Ze względu na dostępność obrazów optycznych może dotyczyć różnych okresów rozwoju miasta. Ponadto w ostatnich latach w zawrotnym tempie rośnie ilość narzędzi oferowanych w ramach otwarto-źródłowych programów, co pozwala na coraz szersze stosowanie metod związanych z teledetekcją.

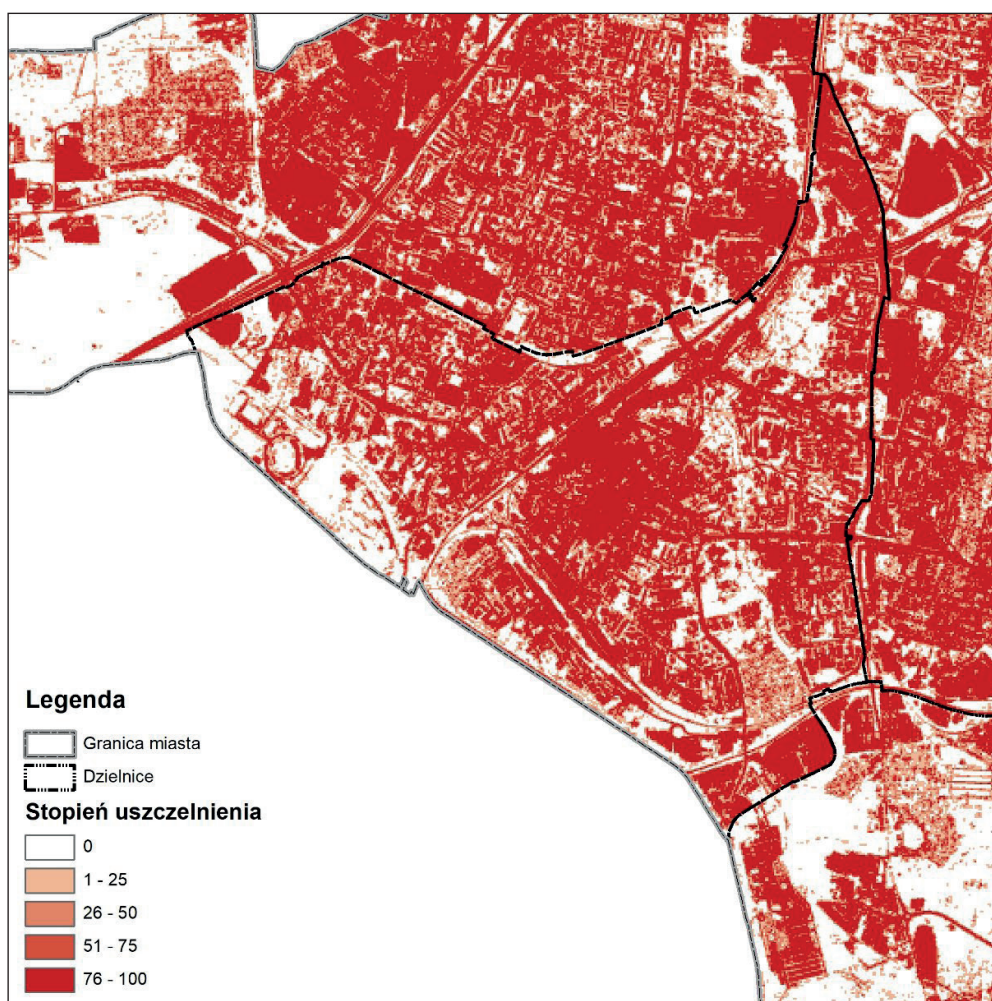


Źródło: opracowanie własne na bazie danych Satelity Landsat 8 z 31 sierpnia 2019.

Ryc. 33. Wskaźnik NDBI – fragment miasta Sosnowca

Innym sposobem wyodrębniania obiektów geograficznych z obrazów optycznych jest segmentacja, a następnie klasyfikacja rastra z wykorzystaniem np. uczenia maszynowego. W tym zakresie jest dostępnych wiele narzędzi, jak np. SNAP lub wtyczki do programu QGIS: Classification tool czy Orfeo Toolbox (OTB) [Hejmanowska, Wężyk 2020]. Otwarto-źródłowy projekt OTB daje szerokie możliwości przetwarzania obrazów optycznych multispektralnych i radarowych o wysokiej rozdzielczości [Christophe *et al.* 2008].

Zastosowanie tych metod także wymaga doświadczenia i umiejętności w zakresie teledetekcji. Poza tym może być ograniczona ze względu na wymagania sprzętowe. Niemniej jednak jest to dość obiecująca i rozwijająca się gałąź teledetekcji. Zastosowanie metod może być bardzo szerokie. W kontekście efektu MWC za pomocą wspomnianych narzędzi można w sposób dość precyzyjny wskazać obszary o znacznym stopniu uszczelnienia w mieście. Dane pozyskane ze zdjęć satelitarnych do analiz są najbardziej aktualne, więc wynik dający informacje o uszczelnieniu obszaru oraz zagrożeniach z tym związanych będzie również przystawał do rzeczywistości oraz będzie się charakteryzował znaczną precyzją (ryc. 34).



Źródło: opracowanie własne na bazie danych Ortofotomapa z 20.

Ryc. 34. Stopień uszczelnienia terenu w 10 m rozdzielczości – fragment miasta Sosnowca

Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono źródła danych i serwisów, które mogą być wykorzystane do delimitacji obszarów zabudowanych. W uzupełnieniu przedstawiono także otwarto-źródłowe narzędzia do obróbki, przetwarzania i analiz obrazów optycznych wraz przykładami zastosowania technik teledetekcyjnych.

Nie wyczerpuje to jednak tematu, ponieważ w ostatnich latach obserwuje się rozwój serwisów (oferujących darmowe dane), jak też narzędzi i metod związanych z mapowaniem obszarów zabudowanych. Omówione źródła danych wektorowych, takie jak BDOT10k, CLC, UA czy UAC, dają liczne możliwości ich zastosowania w analizach przestrzennych miasta. W kontekście badań związanych z MWC najczęściej stosowany jest zasób BDOT10k ze względu na relatywnie dobrą dokładność (w porównaniu np. z danymi CLC) oraz aktualność danych. Podkreślić należy, że Przewodnik dla miast *Przyrodniczo-klimatyczne wskaźniki zrównoważonego rozwoju miast*, który może odgrywać rolę istotnego wsparcia dla samorządów, zaleca stosowanie CLC w kontekście wskaźników dotyczących MWC. Chociaż wybór tego źródła zapewne ma uzasadnienie, to należy pamiętać, że ma on wysoki poziom zgeneralizowania, dużo wyższy niż BDOT10k i jego ostatnia aktualizacja była w 2018 r.

Dane rastrowe oferowane np. w ramach platformy Copernicus, tj. warstwa o wysokiej rozdzielczości dotyczące stopnia nieprzepuszczalności terenów jest dobrym źródłem, nieestety podobnie jak CLC jej ostatnia aktualizacja była w 2018 r. Obiecującym zasobem, ale relatywnie nowym i mało powszechnym w użyciu jest platforma NSIS, która dostarcza wielu danych o użytkowaniu terenu.

Najbardziej aktualnym źródłem do wykonywania analiz przestrzennych związanych z delimitacją obszarów zabudowy mogą być obrazy optyczne. Dane z poszczególnych pasm wielospektralnych satelit dostarczane są na bieżąco w różnej rozdzielczości od 30 m do 10 m dla powierzchni lądowej całej Ziemi. Innym, równie aktualnym źródłem są ortofotomapy, które powinny być publikowane na przemian, w rocznych odstępach, o rozdzielczości 25 cm lub 5 cm dla miast powiatowych Polski. Wykorzystanie danych optycznych wymaga zastosowania mniej lub bardziej zaawansowanych technik teledetekcyjnych. Pomocne w tym mogą być liczne serwisy, narzędzia i metody. Przeszkodą w ich stosowaniu może być jednak ograniczenie sprzętowe lub brak odpowiednich umiejętności technicznych i wiedzy.