

#suburbanizacja,
#powierzchnie
nieprzepuszczalne,
#Landsat, #Poznań

URBAN ISSUES


Analiza zmian powierzchni nieprzepuszczalnych w badaniu suburbanizacji na przykładzie Poznania

45

Wojciech Łachowski

Instytut Rozwoju Miast i Regionów

e-mail: wlachowski@irmir.pl

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6868-8727>

Abstrakt

Tereny nieprzepuszczalne to miejsca powstałe głównie w wyniku działalności człowieka, w które nie może infiltrować woda. Do materiałów nieprzepuszczalnych zalicza się m.in. asfalt czy beton, czyli podstawowy budulec miast. W zależności od udziału terenów nieprzepuszczalnych zdefiniować można klasy gęstości tkanki miejskiej. Przykładowo, wartość wskaźnika w przedziale 10–30% świadczy o niskiej gęstości i jest charakterystyczna dla zabudowy jednorodzinnej rozproszonej. Zastosowanie metody analizy zmian tego wskaźnika może być pomocne w określeniu zasięgu suburbanizacji. Aby ocenić przydatność wspomnianej metody, przeanalizowałem zmiany w udziale powierzchni nieprzepuszczalnych dla strefy demograficznej suburbanizacji Poznania w latach 1992–2018. W tym celu wykorzystałem otwarte dane satelitarne Landsat. Pobrane zdjęcia poddałem klasyfikacji pikselowej pozwalającej na stworzenie mapy obszarów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych. W pierwszym kroku wyłączyłem z analizy obszary wodne, roślinność oraz większość gleb, używając metody progowania wskaźników spektralnych NDVI (pokazujących kondycję roślinności), NDWI (pozwalających na detekcję obiektów wodnych) oraz DBSI (pozwalających na odróżnienie gleb od powierzchni nieprzepuszczalnych). Pozostałe obszary poddałem klasyfikacji z wykorzystaniem algorytmu maszyny wektorów nośnych (SVM). Wyniki zostały zagregowane do siatki 25 ha heksagonów. Porównanie rezultatów dla dwóch okresów pozwoliło na wskazanie, w których miejscach poziom zainwestowania rósł najszybciej. W tych obszarach występowała suburbanizacja. Dla Poznania powierzchnie nieprzepuszczalne przyrastały najintensywniej na obszarze znajdującym się za jego zachodnią granicą. Przedstawiona metoda okazała się przydatna w określeniu zasięgu występowania procesów suburbanizacyjnych. Wskaźnik nieprzepuszczalności nie może być jednak stosowany jako samodzielny wskaźnik rozlewania się miast, gdyż pokazuje tylko jeden z wymiarów tego zjawiska.

©2020 Wojciech Łachowski. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).

W artykule zaprezentowano wyniki badań naukowych realizowanych w ramach projektu pn. *Nowy model urbanizacji w Polsce – praktyczne wdrożenie zasad odpowiedzialnej urbanizacji oraz miasta zwarte* (Gospostrateg 1/384689/20/NCBR/2019), współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG.



Wstęp

Zdjęcia satelitarne od wielu lat dostarczają nam informacji o zjawiskach i procesach zachodzących w środowisku. Jednym z ich głównych zastosowań jest monitoring zmian pokrycia terenu oraz jego zagospodarowania. W samych obrazach satelitarnych zapisane są jedynie wartości promieniowania elektromagnetycznego odbitego od powierzchni Ziemi, lecz ich odpowiednia interpretacja może stać się nieocenionym źródłem wiedzy (Longley, Mesev 2000). Dzięki wysokiej rozdzielczości przestrzennej ogólnodostępnych zdjęć satelitarnych (lepszej niż 30 m) możemy pozyskiwać informacje o dużym poziomie szczegółowości, nierzadko większym niż w przypadku rejestrów państwowych i gminnych. Dodatkową zaletą danych teledetekcyjnych jest ich obiektywność, ponieważ prezentują obraz rzeczywistości nieobarczony błędem związanym z pozyskiwaniem danych przez człowieka. Wadą danych teledetekcyjnych jest natomiast to, że wykorzystywane mogą być głównie do monitorowania procesów widocznych z satelity. Z tego względu, w przypadku niektórych zjawisk, możliwa jest obserwacja tylko części ich aspektów. Jednym ze wspomnianych procesów może być suburbanizacja, a szczególnie jej wymiar infrastrukturalny.

Dlaczego suburbanizacja wydaje się tak interesującym procesem do analizy z wykorzystaniem teledetekcji? Po pierwsze, jest to proces dynamiczny, powszechnie występujący w polskich miastach (Lisowski, Grochowski 2008). Z tego względu wymaga prowadzenia stałego monitoringu, a dane satelitarne np. Landsat czy Sentinel taki monitoring umożliwiają. Wykorzystanie danych Landsat pozwala także na analizę zmian w czasie. Po drugie, zdjęcia optyczne są dużo bardziej szczegółowe niż rejestry zazwyczaj prowadzone na poziomie całej gminy. Dzięki temu wyniki analiz teledetekcyjnych są doskonałym uzupełnieniem wielowymiarowych badań rozlewania się miast opracowanych na podstawie statystyki publicznej. Po trzecie, suburbanizacja jest procesem, który zawsze przejawia się budową nowych inwestycji infrastrukturalnych (Burgess 1967), a wykorzystanie teledetekcji pozwala je dostrzec. Wykorzystanie danych Landsat nie pozwoliło na wykonanie dokładnej klasyfikacji typów miejskiego pokrycia terenu, np. rozróżnienie dróg od budynków. Możliwa była jednakże detekcja obszarów nieprzepuszczalnych, czyli wszystkich terenów powstałych w wyniku działalności człowieka, w które nie może wchłonąć woda (Arnold, Gibbons 1996). Odpowiednia analiza i interpretacja wyników tej klasyfikacji pozwoliły na wskazanie miejsc w strefie oddziaływania Poznania, w których poziom zainwestowania w ciągu ostatnich lat rósł najszybciej, tym samym przyczyniając się do postępującej urbanizacji na obszarach wcześniej niezago-

spodarowanych lub zagospodarowanych w niewielkim stopniu. Celem badań było zatem przeanalizowanie zmian wartości wskaźnika nieprzepuszczalności w latach 1991–2018 oraz rozmieszczenia wyznaczonych na jego podstawie klas gęstości tkanki miejskiej wraz z precyzyjnym wskazaniem obszarów, na których występowały procesy suburbanizacyjne.

Badania procesów suburbanizacji

Suburbanizacja badana na świecie od ponad pół wieku doczekała się wielu definicji. Jedną z pierwszych z nich dotyczy jej przestrzennego wymiaru, określając suburbanizację jako kontynuację procesów urbanizacji miasta mających wyraz w poszerzaniu granic administracyjnych i wchłanianiu obszarów nowej zabudowy (Burgess 1967). Suburbanizacja silnie kształtująca zagospodarowanie przestrzenne strefy podmiejskiej jest również wynikiem szybkiego rozwoju miasta rdzeniowego. Rosnące ceny gruntów w centrum zmuszają inwestorów do lokowania zabudowy mieszkaniowej poza miastem (Guest 1984). Suburbia są zatem obszarem silnie zespolonym funkcjonalnie z miastem centralnym (Lisowski, Grochowski 2008). Nowa tkanka podmiejska charakteryzuje się monofunkcyjnością i niewielką gęstością (Flynn 2006). Pojęciem zbliżonym (często traktowanym w sposób tożsamy) do suburbanizacji jest tzw. rozlewanie się miasta (*urban sprawl*). Obszary objęte tym procesem cechują się w aspekcie przestrzennym przede wszystkim niską gęstością zabudowy oraz wykluczeniem i zamknięciem względem znajdujących się w sąsiedztwie osiedli podupadającego miasta (Yang, Jargowsky 2006). Dodatkowo w obszarach rozlewania się miasta zaobserwować można planowanie ulic i lokowanie zabudowy w sposób uniemożliwiający lub silnie utrudniający korzystanie z transportu publicznego, a nawet przemieszczanie się rowerem lub pieszo (Beim 2009).

Jednym z przykładowych ośrodków miejskich w Polsce, w których występują silne procesy suburbanizacyjne, jest Poznań. Jeszcze w pierwszej połowie lat 90. XX w. nowa zabudowa koncentrowała się w centrum miasta i opierała się na dogęszczaniu istniejącej zabudowy kamienicznej. Po 1995 r. nowe inwestycje mieszkaniowe lokowane były dalej od historycznego centrum, szczególnie w okolicach istniejących osiedli z wielkiej płyty posiadających jeszcze niezagospodarowane przestrzenie, np. na osiedlach: Piątków, Rataj czy Winograd. Po 1995 r. zaobserwować można rozpoczęcie działań deweloperskich, przez które powstały nowe osiedla mieszkaniowe na tzw. Łacinie – w Strzeszynie Greckim czy na osiedlu Naramowice (Beim 2009). Poza obszarem Poznania dominowała zabudowa jednorodzinna wolnostojąca oraz osiedla o zabudowie jedno-

rodzinnej szeregowej. Osiedla blokowe poza Poznaniem do 2005 r. koncentrowały się głównie w sąsiedztwie istniejącej zabudowy, w pobliżu granic miasta (Jabkowska 2007; Beim 2009). Obecnie nowe zabudowania mieszkaniowe lokowane są w coraz większej odległości od miasta rdzennego, co powoduje, że strefa podmiejska Poznania objęta jest procesem niekontrolowanej suburbanizacji. Charakteryzuje się ona nadmiernym rozpraszaniem zabudowy, której układ jest niejednolity i nieciągły. Suburbia Poznania ponadto cechują się niską jakością przestrzeni publicznej oraz brakami infrastruktury technicznej i społecznej (Kaczmarek, Mikuła 2016). Podobny charakter mają wszystkie obszary strefy podmiejskiej Poznania z uwagi na fakt, że były to (i w dużej mierze dalej są) tereny wiejskie. Do wyjątków zaliczyć można miasteczka Swarzędz oraz Luboń (Idczak, Mroziak 2016). Zjawisko rozlewania się miasta postępowało tak dynamicznie z kilku powodów, m.in. braku skoordynowanej polityki przestrzennej w gminach oraz dążenia deweloperów do zaspokajania potrzeb mieszkaniowych społeczeństwa na terenach tańszych i łatwiej dostępnych (Mikuła 2016).

Analiza obszarów nieprzepuszczalnych w pomiarze suburbanizacji

Suburbanizacji towarzyszą ciągle zmiany pokrycia terenu i sposobu użytkowania ziemi (*LULC – Land Use and Land Cover*). W związku z tym podejmowano różne próby mapowania i analizy tego procesu. Podczas takiego badania należy wziąć pod uwagę szereg czynników, m.in. zmianę typów LULC czy strukturę przestrzenną krajobrazu. Przykładowo, obszary przedmieść charakteryzują się dużym stopniem rozproszenia obszarów leśnych (Radeloff, Hammer, Stewart 2005). C. Liang i in. (2015) wykazali natomiast zmniejszanie się powierzchni i większe rozdrobnienie gruntów rolnych w obszarach urbanizujących się. Najistotniejsze jednak w badaniach rozlewania się miast jest pojawianie się nowych terenów zabudowy na obszarach leśnych i rolniczych oraz użytkach zielonych (Tian 2020).

Rzetelnym źródłem informacji do badania suburbanizacji z wykorzystaniem analizy zmian LULC są dane teledetekcyjne. B. Bhatta (2010) przedstawił kilka najczęściej stosowanych metod pomiaru i analizy suburbanizacji, w których możliwe jest wykorzystanie zdjęć satelitarnych. Są to m.in.:

- macierz zmian – detekcja suburbanizacji poprzez ocenę zmian wybranych typów pokrycia terenu (Batisani, Yarnal 2009),
- metryki przestrzenne – analiza procesów suburbanizacji poprzez ocenę wskaźników struktury przestrzennej krajobrazu (McGarigal 2008).

B. Bhatta (2010) przedstawił również szereg podejść związanych z monitoringiem zasięgu rozlewania się miasta. Wśród nich wyróżnić można m.in.:

- nakładanie obrazów – metoda polegająca na wizualnej interpretacji zdjęć satelitarnych lub ortoobrazów (Hardin, Jackson, Otterstrom 2007);
- różnicowanie obrazów – wyznaczanie obszarów suburbanizacji dzięki wykorzystaniu algebry map. Obrazy rastrowe z przyporządkowanymi klasami pokrycia terenu odejmuje się od siebie, dzięki czemu wyznaczyć można obszary o największym wzroście powierzchni zabudowy (Bhatta 2010),
- klasyfikacja obrazów i zestawienie jej wyników – klasyfikacja obrazów satelitarnych jest procesem przyporządkowywania do pikseli lub grup pikseli nowych wartości reprezentujących klasy pokrycia terenu (lub zjawiska występujące w przestrzeni). Drugim etapem takiej analizy jest zestawienie ze sobą warstw z już wykonaną klasyfikacją w celu detekcji zmian. Jest to najpopularniejsza metoda analizy zmian LULC (Bhatta 2010).

Jak wspomniałem, zabudowa jest typem pokrycia terenu, którego przyrost powierzchniowy poza centrum miasta świadczyć może o suburbanizacji. W przypadku zdjęć satelitarnych o średniej rozdzielczości przestrzennej ekstrakcja budynków jest niemożliwa (Bhatta 2010). Z tego względu badacze monitorują możliwe do wyodrębnienia typy pokrycia terenu, które zawierają w sobie budynki, np. powierzchnie nieprzepuszczalne (Yu i in. 2016).

Detekcja obszarów nieprzepuszczalnych

Obecność powierzchni nieprzepuszczalnych (PN) świadczy o działalności człowieka (Arnold, Gibbons 1996). Do PN zalicza się wszystkie obszary, w które nie może infiltrować woda. Wśród nich znajdują się materiały budowlane miast, np. asfalt, beton, cegła, stal, aluminium itp. (Jensen i in. 2005). Wzrost udziału PN oznacza, że teren staje się coraz bardziej zurbanizowany. Wynikać to może m.in. z pojawiania się nowego osadnictwa, rozwoju handlu czy przemysłu (Weng 2015). Wskazanie przyrostu terenów nieprzepuszczalnych w stosunku do przepuszczalnych pozwala wyznaczyć kierunki przestrzennej ekspansji człowieka (Jat, Garg, Khare 2008). Analiza rozwoju powierzchniowego infrastruktury miejskiej z wykorzystaniem pomiaru PN była z powodzeniem przeprowadzona dla kilku studiów przypadku. Dla Bombaju próbowano wyznaczyć zmiany powierzchniowe i rozrost megamiasta. Analizę przeprowadzono dla lat 1973–2015 na podstawie danych satelitarnych Landsat (Yu i in. 2016). Dane Landsat i analizy teledetekcyjne wykorzystano również w analizie zmian PN obszaru metropolitalnego New Okhla Industrial Development

Authority w odniesieniu do jego rozwoju i planowania gospodarki wodnej (Sarkar Chaudhuri, Singh, Rai 2017). Proces rozrostu tkanki miejskiej (w tym suburbiów) na podstawie teledetekcyjnej analizy PN analizowano również dla północnych Stanów Zjednoczonych (Torbick, Corbiere 2015) oraz odrębnie dla Waszyngtonu (Masek, Lindsay, Goward 2000). W obu tych przypadkach wykorzystano dane Landsat. H. Xu (2010) opracował natomiast wskaźnik NDISI (*Normalized Difference Impervious Surface Index*) dla celów określenia zasięgu występowania miejskich wysp ciepła. Wskaźnik ten obliczony został na podstawie kanałów z zakresu pasma widzialnego zielonego oraz bliskiej, średniej i termalnej podczerwieni sensora ETM+ satelity Landsat. Indeks ten ulegał późniejszym modyfikacjom, których celem był wzrost dokładności klasyfikacji. Z. Wang i in. (2015) opracowali natomiast wskaźnik NDII (*Normalized Difference Impervious Index*) dla celów ekstrakcji PN w mieście Nanjing w Chinach.

Metody

W pracy wykorzystano szereg metod związanych z klasyfikacją zdjęć satelitarnych. Zaliczyć można do nich m.in. progowanie wskaźników spektralnych czy algorytm maszyny wektorów nośnych. Otrzymana mapa powierzchni nieprzepuszczalnych poddana została dalszym przetworzeniom mającym na celu odpowiednią analizę i interpretację. Opis danych, obszaru badań oraz ścieżki postępowania znajduje się w dalszej części rozdziału „Metody”.

Dane

Podstawowym źródłem danych dla moich badań były otwarte dane satelitarne Landsat 5 i 8 udostępniane przez *United States Geological Survey* (USGS). W badaniach przygotowano analizę dla dwóch momentów czasowych, tj. 1992 oraz 2018 r. W obu przypadkach dane charakteryzowały się taką samą rozdzielczością przestrzenną wynoszącą 30 m dla kanałów z zakresu światła widzialnego, bliskiej i krótkofalowej podczerwieni. Dla wybranego obszaru badań konieczne było pozyskanie kilku zdjęć satelitarnych dla każdego okresu czasowego. W przypadku roku 1992 wybrano dwa zobrazowania z dnia 1 lipca, dla drugiego momentu czasowego – dwa zdjęcia z 7 czerwca. Użyto zdjęć z okresu letniego, ponieważ najbardziej odpowiednio do detekcji obszarów nieprzepuszczalnych są zobrazowania pozyskane w czasie wzmożonej wegetacji (Sun i in. 2017). W analizie pomocne były również dane pozyskane z programu Copernicus. Do wygenerowania wzorca klasyfikacyjnego algorytmu maszyny wektorów nośnych (*Support Vector Machine – SVM*) wykorzystałem zasoby High Resolution Layers Imperviousness.

Obszar badań

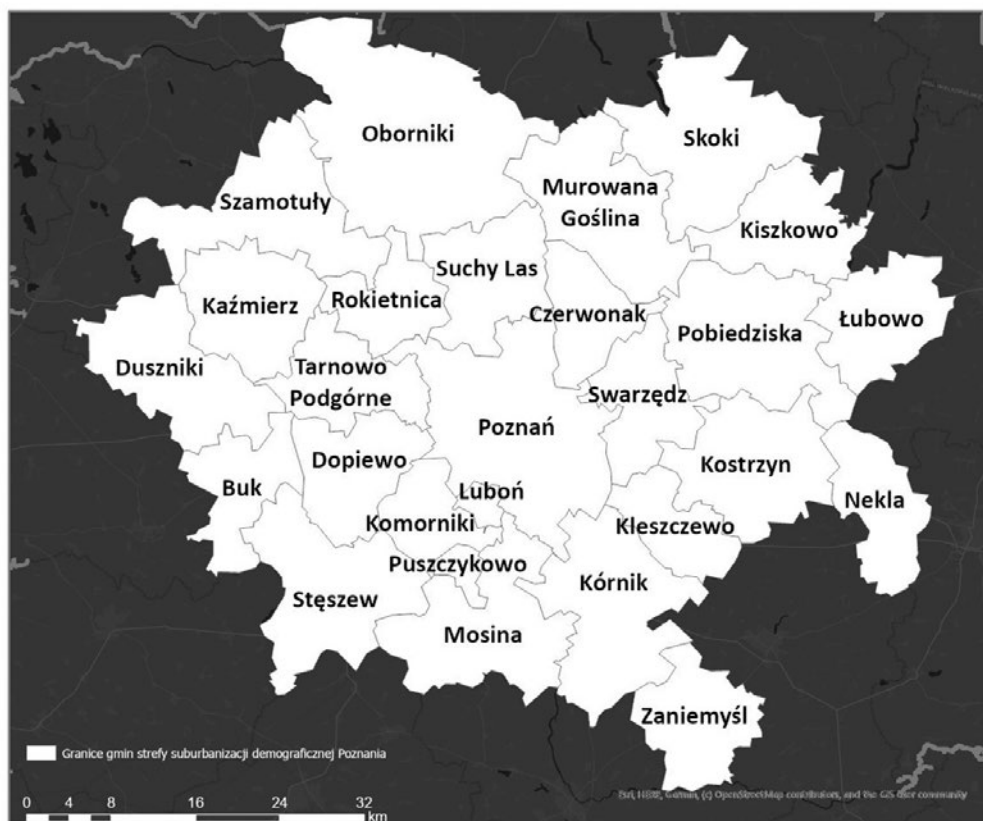
Obszarem badań była strefa suburbanizacji demograficznej Poznania wyznaczona przez Zespół Instytutu Rozwoju Miast i Regionów w ramach projektu NewUrbPact będącego częścią programu GOSPOSTRATEG (Ryc. 1.). Suburbanizacja demograficzna przejawia się wzrostem liczby i koncentracji ludności w obszarze strefy podmiejskiej (Maik 1997). Najczęściej przedstawiana jest zmianą liczby ludności w obszarach napływowych i odpływowych (Masik 2018).

Zasięg strefy wyznaczono na poziomie gmin w oparciu o wskaźnik liczby zarejestrowanych zameldowań na pobyt stały w latach 2002–2017 w przeliczeniu na 1000 mieszkańców. Zespół IRMiR wykorzystał istniejącą metodologię (Ministerstwo Rozwoju Regionalnego 2013; Śleszyński 2013) i dla celów analizy przyjął wartość progową wskaźnika na poziomie średniorocznej liczby nowych zameldowań większej lub równej 3 osobom. W skład strefy wchodzi 27 jednostek samorządu terytorialnego: 1) miasto rdzeniowe – Poznań, 2) gminy miejskie – Luboń, Puszczykowo; 3) gminy miejsko-wiejskie – Stęszew, Murowana Goślina, Mosina, Buk, Swarzędz, Pobiedziska, Kostrzyn, Kórnik, Szamotuły, Skoki, Nekla, Oborniki; 4) gminy wiejskie – Kleszczewo, Dopiewo, Czerwonak, Tarnowo Podgórne, Komorniki, Duszniki, Rokietnica, Suchy Las, Kaźmierz, Zaniemyśl, Kiszkowo, Łubowo. Powierzchnia strefy suburbanizacji demograficznej Poznania wynosi prawie 3600 km².

Metoda klasyfikacji obszarów nieprzepuszczalnych

Metodę klasyfikacji zdjęć satelitarnych można podzielić na kilka etapów. Pierwszym z nich był preprocessing danych. W ramach tego etapu wyczyszczono dane z defektów atmosferycznych poprzez usunięcie z analizy obszarów pokrytych chmurami. Kolejnym krokiem była normalizacja danych polegająca na przetworzeniu zdjęć do postaci 16-bitowych rastrów. Wykonanie tej operacji pozwoliło na redukcję odchyłań wynikających z penetracji atmosfery przez promieniowanie elektromagnetyczne (Ban 2016). Ostatnim elementem preprocessingu było przygotowanie 4-kanałowych kompozytów (3 kanały światła widzialnego RGB + bliska podczerwień), które w następnym etapie zostały poddane działaniu algorytmu SVM.

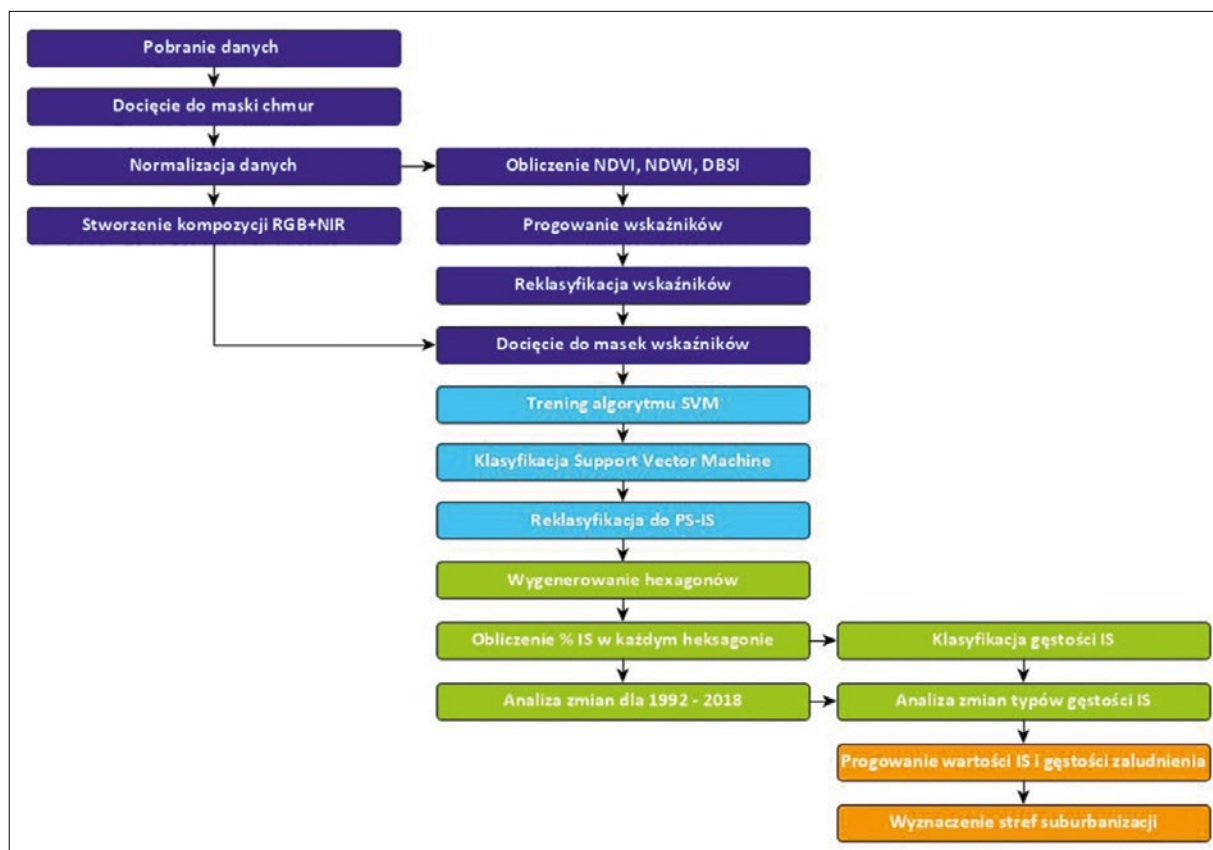
Drugim etapem ekstrakcji PN było obliczenie wskaźników spektralnych i wykluczenie na ich podstawie obszarów, które z wysokim prawdopodobieństwem można uznać za przepuszczalne (Ryc. 2.). W pierwszej kolejności obliczono wskaźnik wegetacyjny *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Friedl i in. 1995), dzięki któremu wykluczono tereny będące biologicznie czynnymi. W kolejnym kroku dokonano obliczenia i progowania wskaźnika *Normalized Difference Water Index* (NDWI).



Ryc. 1.

Strefa suburbanizacji demograficznej Poznania

Źródło: Badania IRMiR w ramach projektu NewUrbPact programu GOSPOSTRATEG



Ryc. 2.

Ścieżka postępowania ekstrakcji i analizy powierzchni nieprzepuszczalnych

Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik ten umożliwia ekstrakcje i wyeliminowanie z analizy obiektów wodnych (Gao 1996). Ostatnim obliczonym wskaźnikiem był *Dry Bare-Soil Index* (DBSI), który umożliwił wykluczenie z analizy znacznych obszarów odsłoniętych gleb (Rasul i in. 2018). Dla klas obszarów wyłączonych z dalszych analiz, tj. tereny biologicznie czynne, obiekty wodne, odsłonięte gleby uzyskałem 100% dokładności klasyfikacji, tzn. że każdy piksel sklasyfikowany jako jedna z powyższych klas został oznaczony prawidłowo.

Celem trzeciej części metody klasyfikacji zdjęć było oddzielenie powierzchni przepuszczalnych (PP) od PN. W pracy testowałem kilka algorytmów klasyfikacyjnych, ale najlepszymi rezultatami charakteryzował się SVM. Algorytm SVM zalicza się do grupy klasyfikacji nadzorowanej, dlatego też wymagał wcześniej przygotowanych wzorców (Mitra, Uma Shankar, Pal 2004; Kranjčić i in. 2019). Dla wszystkich scen przygotowałem po 300 próbek każdej z klas. Zastosowany algorytm pozwolił na wyznaczenie następujących klas: 1) PN, 2) pola uprawne, 3) łąki i inna roślinność, 4) odsłonięte gleby. Klasy takie jak lasy oraz obiekty wodne udało się całkowicie wyeliminować we wcześniejszym etapie analizy. Wyznaczone obszary zagregowałem do dwóch głównych klas, tworząc końcową mapę PN/PP.

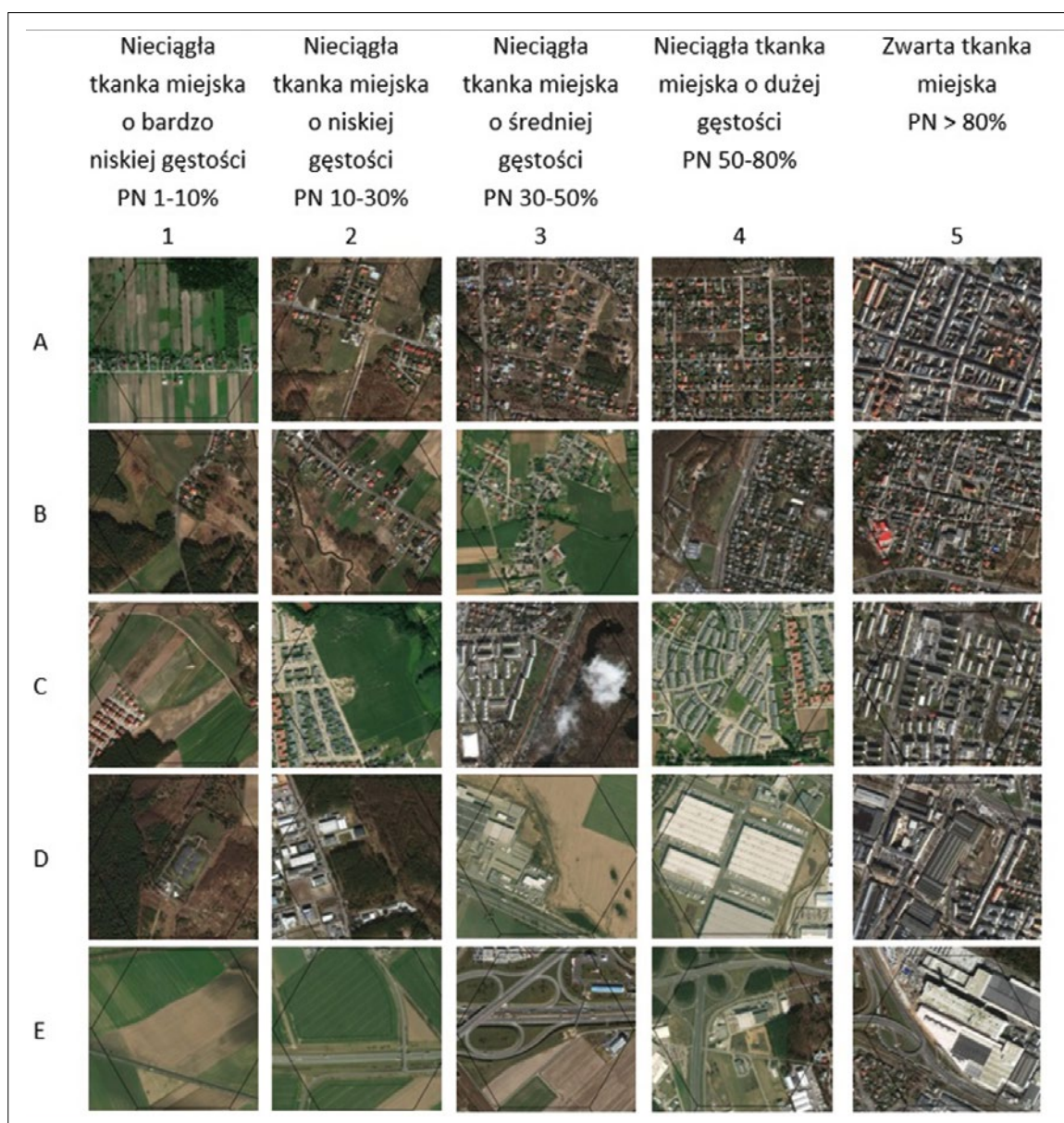
Otrzymana mapa PN/PP poddana została dalszej analizie. W pierwszej kolejności zagregowałem dane do siatki heksagonalnej o wielkości pola podstawowego równego 25 ha. Celem tej operacji było obliczenie powierzchni oraz udziału procentowego PN w każdej jednostce, tym samym uzyskałem wartości wskaźnika nieprzepuszczalności obszaru. Agregacja do 25 ha była konieczna ze względu na minimalizację błędów klasyfikacji. Jednostka o wielkości 25 ha jest optymalna, ponieważ przy większym polu podstawowym utrata informacji może być zbyt duża, przy mniejszym natomiast błędy wynikające z precyzji klasyfikacji nie zostają uśrednione. Uzyskane wyniki mogłyby się zatem różnić w zależności od kształtu i wielkości przyjętej jednostki agregacji, co nazywamy tzw. problemem MAUP (Nalej 2019).

Metoda analizy i interpretacji wyników

Kolejnym krokiem analizy i interpretacji wartości wskaźnika PN dla obu okresów czasowych była klasyfikacja gęstości powierzchni nieprzepuszczalnych. W oparciu o metodologię opracowaną w ramach programu Copernicus dla projektu Urban Atlas (Mapping Guide for a European Urban Atlas 2016) wyznaczyłem 5 klas gęstości tkanki miejskiej (Ryc. 3.). Pierwsza z nich reprezentuje powierzchnie zwartej tkanki miejskiej (*continuous urban fabric*), gdzie wskaźnik nieprzepusz-

czalności wynosi powyżej 80%. Do takich obszarów zaliczyć można m.in. zabudowania mieszkaniowe zarówno jednorodzinne (Ryc. 3., rysunek 5B) (znajdujące się w bardzo bliskim sąsiedztwie), jak i wielorodzinne blokowe (Ryc. 3., rysunek 5C). Do drugiej klasy terenów nieciągłej tkanki miejskiej o dużej gęstości (*discontinuous dense urban fabric*) zaliczyłem obszary o wartościach wskaźnika PN między 50% a 80%. Wśród nich znalazły się m.in. zabudowa mieszkaniowa blokowa z niewielkim udziałem PP (Ryc. 3., rysunek 4C), zwarta zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna w sąsiedztwie PP (Ryc. 3., rysunek 4B) oraz zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna o dużej gęstości (Ryc. 3., rysunek 4A). Kolejną wyznaczoną klasą to obszary nieciągłej tkanki miejskiej o średniej gęstości (*discontinuous medium density urban fabric*), gdzie wartości udziału PN znajdują się pomiędzy 30% a 50%. W tej klasie znalazły się m.in. tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej o umiarkowanej gęstości (Ryc. 3., rysunek 3A), tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej o układzie ulicowym, ale stosunkowo dużym zagęszczeniu (Ryc. 3., rysunek 3B), tereny zabudowy wielorodzinnej (Ryc. 3., rysunek 3C) o znacznym udziale (lub w sąsiedztwie) dużych PN. Kolejną wyznaczoną klasą były tereny nieciągłej tkanki miejskiej o niskiej gęstości (*discontinuous low density urban fabric*), gdzie wartość wskaźnika PN osiągnęła wartości 10–30%. W klasie tej znalazły się m.in. tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej rozmieszczonej w niewielkich skupiskach kilku budynków (Ryc. 3., rysunek 2A) czy tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej usytuowanej wzdłuż drogi (po obu jej stronach). Ostatnią wyznaczoną klasą były tereny nieciągłej tkanki miejskiej o bardzo niskiej gęstości (*discontinuous very low density urban fabric*), dla których wartość udziału PN wyniosła 1–10%. Do tej klasy zaliczono m.in. obszary zabudowy jednorodzinnej rozmieszczonej wzdłuż ulic (o małym zagęszczeniu, np. tylko po jednej stronie) (Ryc. 3., rysunek 1A) czy obszary zabudowy jednorodzinnej o bardzo niewielkiej gęstości (Ryc. 3., rysunek 1B).

W ostatnim etapie analizy zestawiono ze sobą wyniki prezentujące udział PN dla dwóch okresów czasowych, dzięki czemu przygotowano mapę zmian wartości wskaźnika. Obszary o najwyższym wzroście w punktach procentowych to tereny, gdzie odnotować można największe powierzchnie terenów z nowymi inwestycjami. Nowe inwestycje mieszkaniowe i infrastrukturalne mogą być natomiast przejawem występowania procesów suburbanizacyjnych (Guest 1984). Drugim elementem analizy czasowej było prześledzenie zmian wśród klas gęstości tkanki miejskiej. Dzięki obserwacji tych zmian możliwe



Ryc. 3.

Przykładowe typy powierzchni nieprzepuszczalnych przyporządkowane do klas gęstości tkanki miejskiej

Źródło: opracowanie własne na podstawie metodologii Urban Atlas (Mapping Guide for a European Urban Atlas 2016)

było wskazanie, w jakim etapie urbanizacji znajdują się obszary reprezentowane przez przyjęte w pracy jednostki odniesienia.

Wyniki i dyskusja

Całkowita powierzchnia obszarów nieprzepuszczalnych wyniosła w 2018 r. 27,4 tys. ha, co stanowiło 7,6% powierzchni obszaru badań. W 1992 r. udział PN był natomiast o 1,4 pp. niższy i wyniósł 6,2% (22,4 tys. ha). Biorąc pod uwagę przyrost bezwzględny PN w podziale na obszar miasta rdzeniowego i jego strefę suburbanizacji demograficznej, zaobserwowałem, że obszar poza granicami miasta rozwija się dużo bardziej dynamicznie. PN w mieście rdzeniowym wzrosło o 1,1 tys. ha (11,5%). Dla porównania powierzchnia PN

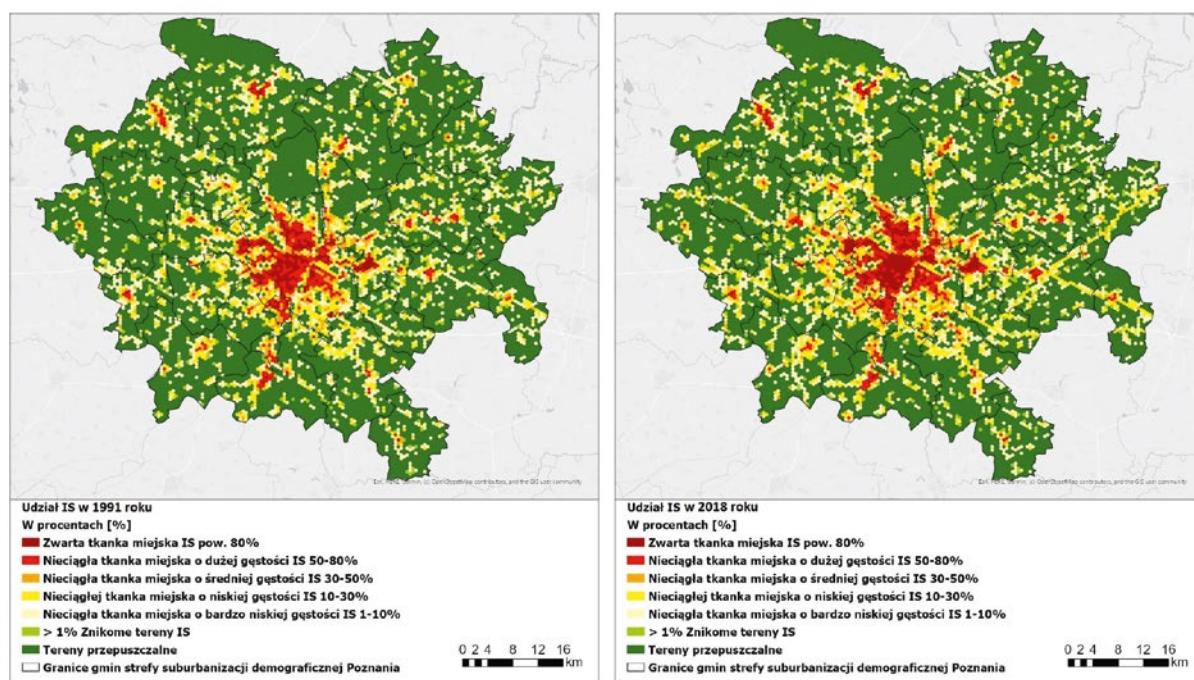
poza Poznaniem wzrosła aż o 3,5 tys. ha, czyli 29,5%. Na tak duży wzrost wpłynęły dwa główne czynniki: 1) budowa infrastruktury drogowej, 2) suburbanizacja przejawiająca się nowymi inwestycjami mieszkaniowymi, magazynowymi, przemysłowymi i handlowymi. Największym przyrostem wartości wskaźnika PN charakteryzowały się następujące gminy: Poznań (4,06 pp., +1060 ha), Luboń (4,63 pp., +63 ha), Tarnowo Podgórne (5,11 pp., +520 ha), Dopiewo (3,43 pp., +370 ha) oraz Komorniki (3,96 pp., +260 ha). Obszary wzrostu wartości wskaźnika PN pokrywają się z miejscami, które podlegają suburbanizacji, np. gminy znajdujące się na zachód od Poznania (Jabkowska 2007; Idczak, Mrozik 2016). Niniejsza analiza jest jednakże dużo bardziej szczegółowa, ponieważ pozwala ocenić wzrost poziomu za-

inwestowania obszaru z dużo większą dokładnością niż na poziomie gmin (Ryc. 4).

Opracowanie danych w siatce heksagonalnej pozwoliło na dostarczenie i zwizualizowanie kilku istotnych informacji. Pierwszą z nich jest wzrost powierzchni zainwestowanych wynikający z infrastruktury drogowej. W obszarach, przez które przebiegają nowe ciągi komunikacyjne, wynosi on nie więcej niż 16 pp. (Ryc. 5). Na częściowe wyeliminowanie efektu przyrostu PN przez drogi pozwoliła mi analiza zmian z podziałem na poszczególne klasy gęstości tkanki miejskiej (Ryc. 6).

Jak widać (Ryc. 6.), infrastruktura drogowa koncentruje się w miejscach, które w 1992 r. były przepuszczalne lub gęstość tkanki miejskiej była bardzo niewielka. Spojrzenie na pierwszy i drugi moment czasowy (Ryc. 5.) oraz mapę wzrostu wskaźnika PN (Ryc. 6.) pozwala wyciągnąć wniosek, że na obszarze strefy suburbanizacji demograficznej Poznania następuje przede wszystkim dogęszczanie istniejącej zabudowy oraz tworzenie nowej w jej bliskim sąsiedztwie, wpływając na efekt rozlewania się miasta. Świadczą o tym przede wszystkim wysokie wartości przyrostu wskaźnika PN w Poznaniu oraz w gminach ościennych. Wzrost PN na obrzeżach Poznania, lecz jeszcze w granicach miasta świadczy o występującej tam suburbanizacji wewnętrznej (Lisowski, Grochowski 2008). Wzrost wartości wskaźnika nieprzepuszczalności w bliskim sąsiedztwie Poznania dowodzić może natomiast występowania suburbanizacji

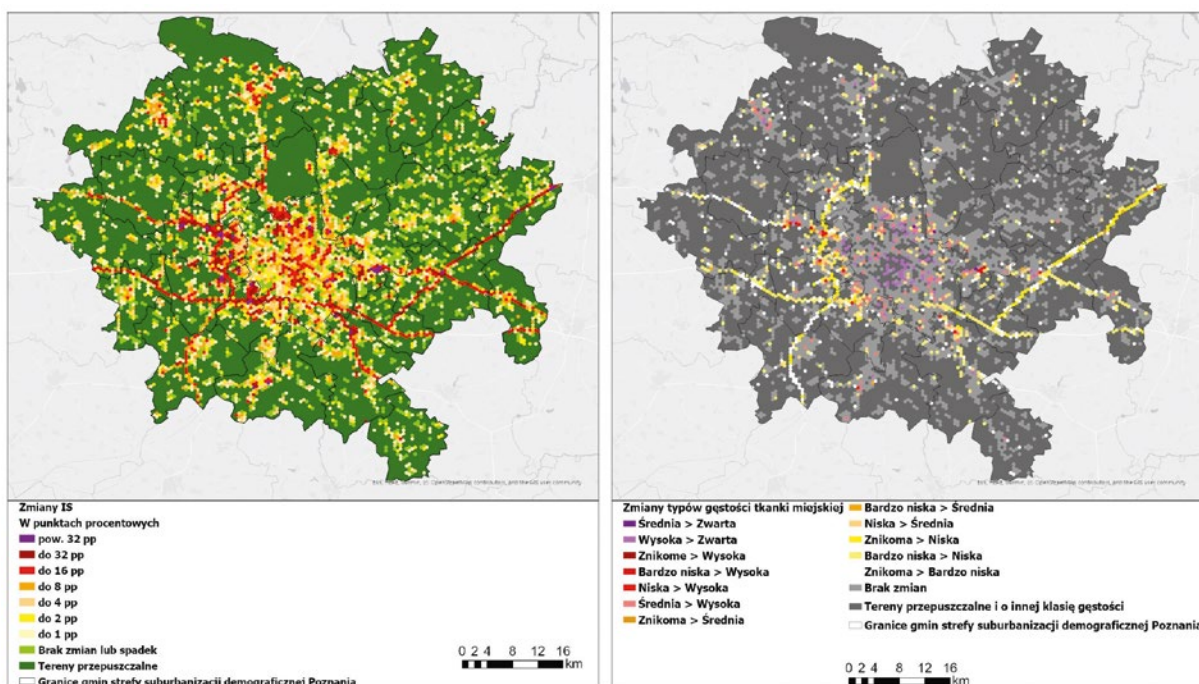
w obrębie bliższej strefy podmiejskiej (Lisowski, Grochowski 2008). Pod kątem przyrostu liczby ludności oraz nowych mieszkań oddanych do użytku na 1000 osób w ostatnich latach szczególnie wyróżniają się gminny ościenne takie jak np. Komorniki czy Tarnowo Podgórne (Jancz 2016). Dodatkowym potwierdzeniem tezy o rozlewaniu się miasta w obrębie bliskiej strefy podmiejskiej jest rozkład przestrzenny zmian struktury tkanki miejskiej na obszarach, które w 1992 r. charakteryzowały się niską lub średnią gęstością (Ryc. 6.). Zmiany klasy ze średniej na wysoką gęstość lub zwartą strukturę skoncentrowane były przede wszystkim w odległości nie większej niż 10 km od granicy miasta w kierunku jego wnętrza i 15 km na zewnątrz. Gminy znajdujące się w tym promieniu określane były również jako najlepiej rozwinięte pod kątem zaopatrzenia w infrastrukturę techniczną, np. Rokietnica oraz Luboń (Jancz 2016). W przypadku zmian klas z niskiej gęstości na średnią lub wysoką obszar ten rozszerza się o kolejne 15 km na zewnątrz, co może świadczyć o występowaniu suburbanizacji również w obrębie dalszej strefy podmiejskiej (Lisowski, Grochowski 2008). Niezwykle istotne wydaje się w tym momencie wskazanie, że suburbanizacja nie jest procesem obejmującym całe gminy, lecz tylko jej części, czego przykładem może być właśnie rozkład zmian PN. W przypadku zmian gęstości tkanki miejskiej z bardzo niskiej na klasy wyższej gęstości zauważyłem przede wszystkim wpływ obecności dróg na zmiany w zakresie pojawiania się nowych obszarów o ni-



Ryc. 4.

Udział PN w strefie suburbanizacji demograficznej Poznania w 1992 r. (rys. pierwszy od lewej) i w 2018 r. (rys. drugi od lewej)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych satelitarnych Landsat



Ryc. 5.

Zmiany wskaźnika PN oraz klas gęstości tkanki miejskiej

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych satelitarnych Landsat

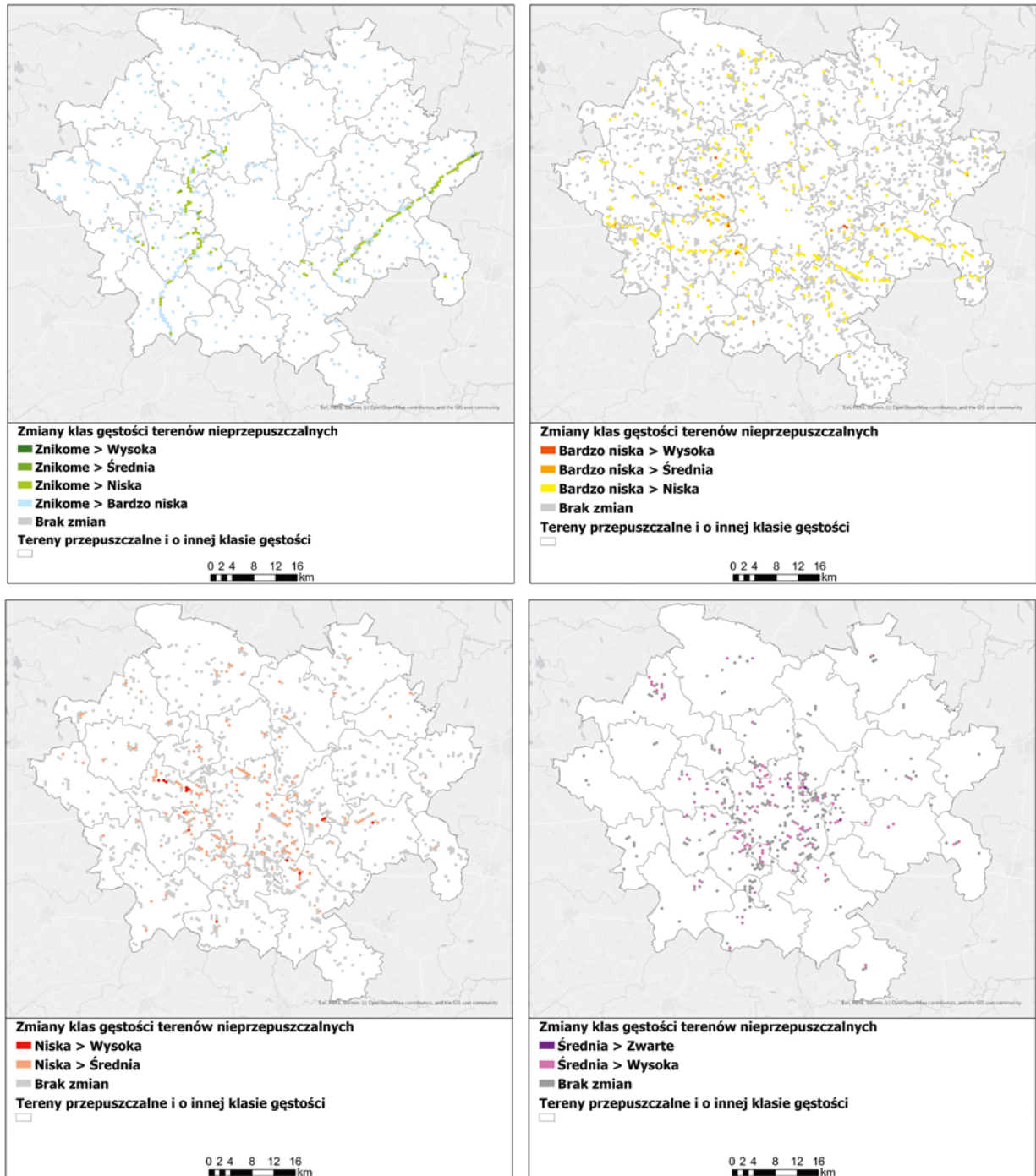
skiej gęstości tkanki miejskiej. Wyłączając te tereny, rozkład przestrzenny zmian jest dużo bardziej rozproszony z kilkoma miejscami koncentracji znajdującymi się m.in. w gminach Rokietnica, Tarnowo Podgórne, Dopiewo, Komorniki, we wschodniej części Suchego Lasu, zachodniej stronie Oborników, północy Kórnik oraz w Nekli. We wspomnianych lokalizacjach zaobserwowano wcześnie stadia suburbanizacji lub nie była ona intensywna. Wynika to z faktu, że tereny o niewielkim poziomie zainwestowania zaczynały być silniej zabudowywane, lecz udział wskaźnika PN nie przekroczył 30%. Biorąc pod uwagę zmiany gęstości tkanki miejskiej w większym zakresie, zaobserwować można jedynie punktowe obszary wzrostu znajdujące się w gminach sąsiadujących z Poznaniem. Podobnie wygląda rozkład klas gęstości PN na obszarach, w których w 1992 r. odnotowano brak (lub znikome powierzchnie) terenów nieprzepuszczalnych. Nowe obszary o klasie nieprzepuszczalności 1–10% pojawiały się w dużym rozproszeniu niemal równomiernie na obszarze całej strefy suburbanizacji demograficznej. Wyjątkiem są tereny infrastruktury drogowej.

Badanie przyrostu powierzchni w poszczególnych klasach gęstości tkanki miejskiej w gminach wraz ze wskazaniem lokalizacji oraz przyczyn ich występowania pozwoliło mi na wskazanie, w których częściach obszaru badań występować mogą procesy suburbanizacyjne. Analiza zmian wartości wskaźnika nieprzepuszczalności umożliwia dodatkowo ocenę natężenia tych procesów. Poniższe wyniki uwzględniają wszystkie zmiany między klasami.

Przykładowo w Dopiewie odnotowałem znaczny przyrost nowych terenów o klasie bardzo niskiej gęstości, natomiast jeszcze więcej z nich uległo przekształceniu do klas wyższego rzędu. Oznacza to, że pojawiały się nowe tereny nieprzepuszczalne, których udział w przyjętej jednostce agregacji okazał się mniejszy niż 10%. Było ich jednakże mniej niż obszarów, na których tkanka miejska uległa dogęszczeniu, czyli w 2018 r. została zaklasyfikowana do terenów o niskiej, średniej lub wysokiej gęstości. Pod względem przyrostu całkowitego w klasie bardzo niskiej gęstości tkanki miejskiej najwięcej powierzchni przybyło w gminach:

- 1) Stęszew – głównie w wyniku budowy drogi ekspresowej S5,
- 2) Skoki – indywidualne inwestycje mieszkaniowe,
- 3) Szamotuły – indywidualne inwestycje mieszkaniowe i przemysłowe.

Uwzględniając powierzchnię terenów przekształconych do postaci obszarów o bardzo niewielkiej gęstości tkanki miejskiej, stwierdzam, że przyrost ten jest rozproszony z miejscami koncentracji w gminach Dopiewo (fragmenty inwestycji infrastrukturalnych, indywidualne budownictwo mieszkaniowe), Rokietnica (fragmenty inwestycji infrastrukturalnych i mieszkaniowych deweloperskich, indywidualne budownictwo mieszkaniowe) i Kleszczewo (fragmenty inwestycji infrastrukturalnych, indywidualne budownictwo mieszkaniowe). Największym przyrostem bezwzględnym liczby terenów o niskiej gęstości tkanki miejskiej charakteryzowały się gminy Kostrzyn (droga S5, nowe zabudowa-



Ryc. 6.

Zmiany gęstości tkanki miejskiej w rozróżnieniu na klasy przyporządkowane dla pierwszego okresu czasowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych satelitarnych Landsat

nia mieszkaniowe jednorodzinne oraz przemysłowe), Dopiewo (autostrada A2, droga S5, indywidualne budownictwo mieszkaniowe), Kleszczewo (autostrada A2, droga S5, indywidualne budownictwo mieszkaniowe) oraz Rokietnica (droga S11, indywidualne budownictwo mieszkaniowe w miejscowości Cerekwice, fragmenty osiedla deweloperskiego domków jednorodzinnych w Krzyszkowie). Innymi lokalizacjami nowych inwestycji odznaczających się niską gęstością tkanki miejskiej są m.in. fragmenty osiedli zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej przy ulicy Poznańskiej w Kórniku, frag-

menty nowego osiedla zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej przy ulicy Berdychowo w Obornikach czy indywidualne domy jednorodzinne przy ulicy Wiejskiej w Mosinie. W zakresie przyrostu bezwzględnego liczby jednostek w klasie średniej gęstości tkanki miejskiej wyróżniłem gminy Tarnowo Podgórne (np. osiedle domków jednorodzinnych przy ulicy Jarząbkowej i Przepiórczej, ulicy 27 Grudnia oraz w miejscowości Chyby), Dopiewo (domy jednorodzinne przy ulicy Piaskowej), Kórnik (fragmenty zabudowy przemysłowej i magazynowej przy węźle autostrady A2 i drogi ekspresowej S7) oraz

Komorniki (zabudowania mieszkaniowe oraz przemysłowe przy autostradzie A2). Należy również zwrócić uwagę na zmianę gęstości tkanki miejskiej do klas wyższego rzędu w obszarze Poznania. Przykładem mogą być okolice ulicy Czesława Miłosza, gdzie powstały nowe domy jednorodzinne. Najwyższym bezwzględny przyrostem tkanki miejskiej o wysokiej gęstości charakteryzowały się m.in. Swarzędz (zabudowania handlowe i magazynowe przy ulicy Poznańskiej, mieszkaniowe przy ulicy Kórnickiej), Tarnowo Podgórne (hipermarket Lidl oraz centrum Amazon przy ulicy Poznańskiej, osiedla zabudowy wielorodzinnej przy ulicy Spółdzielczej), Komorniki (osiedla zabudowy wielorodzinnej przy ulicach Szkolnej i Kolejowej, Grunwaldzkiej, zabudowa przemysłowa i magazynowa Grupy Volkswagen oraz inwestycji towarzyszących), Dopiewo (tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej i wielorodzinnej przy ulicy Poznańskiej), Szamotuły (zabudowa przemysłowa Royal Brinkers, tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej przy ulicy Chrobrego) oraz Kórnik (zabudowa przemysłowa i magazynowa przy węźle autostrady A2 i drodze S7). Największy przyrost zabudowy zwartej odnotowany został w Poznaniu. Nowe obszary zwartej PN zaobserwowano również w Tarnowie Podgórny (dogęszczanie zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej w okolicach ulicy Rynkowej oraz nowa zabudowa handlowo-przemysłowa przy ulicy Bukowskiej), Suchym Lesie (osiedle Poziomkowe, zabudowa jednorodzinna przy ulicy Jodłowej oraz zabudowa handlowo-usługowa w okolicach ulicy Sucholeskiej) oraz Obornikach (zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna oraz magazynowa w okolicach ulicy Mostowej, zabudowa handlowo-usługowa w okolicach ulicy Sucholeskiej, osiedle domków jednorodzinnych w okolicach ulicy Andersa).

Jedną z pierwszych konkluzji niniejszej pracy jest potwierdzenie faktu rozlewania się Poznania poprzez analizę wymiaru infrastrukturalnego zjawiska. Rozkład przestrzenny wartości przyrostu terenów nieprzepuszczalnych o niskiej i bardzo niskiej gęstości rozproszony jest stosunkowo równomiernie na całym obszarze badań. Mogą to być zarówno inwestycje, które funkcjonalnie są powiązane z Poznaniem, jak i takie, które powstały zupełnie niezależnie od miasta rdzeniowego. O rozlewaniu miasta świadczy wzrost udziału powierzchni nieprzepuszczalnych (oraz pojawianie się klas o gęstościach średniej i wysokiej) przy granicy Poznania oraz w odległości do ok. 30 km od niego, co zaobserwować można na Ryc. 6. Co więcej, im dalej od miasta rdzeniowego, tym rozproszenie obszarów, których nieprzepuszczalność rośnie, jest większe. Wartością dodaną niniejszej analizy jest niewątpliwie możliwość precyzyjnego wskazania obszarów suburbanizacji. Przykładowo gminy o silnym

natężeniu zjawiska jak Tarnowo Podgórne czy Dopiewo dużo słabiej rozrastają się w swoich zachodnich częściach, podobnie jak południowy obszar gminy Komorniki. Są to części gmin, które nie sąsiadują z miastem rdzeniowym. Rozkład przestrzenny wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych pokazuje, że suburbanizacja Poznania postępuje także w sposób węzłowy, a nie tylko w najbliższym sąsiedztwie. Oznacza to, że wyróżnić możemy obszary wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych na terenach powiązanych funkcjonalnie z Poznaniem, które nie są kontynuacją jego ciągłej tkanki przedmiejskiej. Zaliczają się do nich np. Szamotuły, Oborniki, Nekla czy Skoki.

Wskazane w analizie obszary wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych oraz zmiany klas gęstości tkanki miejskiej posiadały cechy charakterystyczne dla suburbanizacji. Zaliczyć do nich można m.in. zagospodarowanie przestrzenne w postaci stref monofunkcyjnych (przykład osiedli mieszkaniowych w Dopiewie) czy znaczną skalę zabudowy (wielkopowierzchniowe centrum logistyczne w Tarnowie Podgórny) (CEMAT 2007). Ponadto lokalizacja obszarów o wroście nieprzepuszczalności wskazuje na występowanie zjawiska rozlewania się miasta, w którym to rozwija się przede wszystkim strefa podmiejska przypominająca w niektórych aspektach amerykańskie suburbia (Yang i Jargowsky 2006). W obszarze strefy suburbanizacji Poznania zjawisko to jest znacznie mniej rozległe. Dodatkowo w odróżnieniu od suburbanizacji w USA obserwujemy dużo większy udział zabudowy wielorodzinnej (Beim 2009). Suburbanizacja o podobnym charakterze występuje również we Wrocławiu, gdzie rozwijają się przedmieścia oraz obszary oddalone od miasta rdzeniowego nawet do 100 km, ale z dobrym połączeniem komunikacyjnym (Ciok 2014). Odmienny charakter ma suburbanizacja Warszawy, w której to dynamicznie rozwijała się przede wszystkim zabudowa wielorodzinna w miastach satelickich (Degórska 2007). Duża koncentracja nowych terenów nieprzepuszczalnych w sąsiedztwie Poznania była ułatwiona również ze względu na mniejsze niż np. w Krakowie rozdrobnienie struktury własnościowej gruntów (Zborowski 2004). Inwestorom łatwiej było pozyskać nieruchomości dla celów tworzenia nowych inwestycji.

Zaimplementowana na przykładzie Poznania metodologia posiada szereg zalet. Jedną z nich jest możliwość dokładnej obserwacji suburbanizacji w jej infrastrukturalnym wymiarze. Wyróżnia ją to na tle innych metod i wskaźników wykorzystujących statystykę publiczną do delimitacji stref suburbanizacji w oparciu o np. migracje ludności liczone na podstawie zmiany adresów zameldowania na pobyt stały (Śleszyński 2018) czy liczbę wydanych decyzji o warunkach zabudowy (Śleszyński i in. 2017). Podejście przedstawione w niniejszej pracy nie zastąpi wskazanych powyżej metod, może być jed-

nak ich uzupełnieniem np. poprzez opracowanie metody wyznaczania stref suburbanizacji niezależnych od granic administracyjnych gmin. Wadą niniejszego podejścia jest silny wpływ obecności dróg na uzyskane wyniki, szczególnie w przypadku agregacji danych do poziomu gmin, jednakże wiedza o tym, gdzie powstały nowe drogi krajowe w latach 1992–2018 w przyszłości może umożliwić przeprowadzenie bardziej precyzyjnej analizy. Dodatkową wartością do niniejszej pracy wniosłaby również analiza dla większej liczby okresów czasowych, np. jak w badaniach przeprowadzonych dla miast azjatyckich (Sarkar Chaudhuri i in. 2017) i amerykańskich (Masek i in. 2000). Umożliwiłoby to uchwycenie dynamiki zmian. W przyszłości zastosowanie danych satelitarnych lepszej rozdzielczości (np. Sentinel 2) pozwoliłoby także zwiększyć całkowitą dokładność klasyfikacji, która w przypadku wykorzystania zdjęć Landsat wyniosła 72%.

Wnioski

Wyniki, które uzyskano, potwierdzają wniośki z prowadzonych wcześniej badań mówiące

o koncentracji nowopowstałych zabudowań głównie w sąsiedztwie Poznania, przyczyniając się tym samym do występowania zjawiska rozlewania się miasta. Wyznaczone obszary wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych oraz charakterystyka zmian gęstości tkanki miejskiej wskazują na występowanie w obszarze badań trzech typów suburbanizacji, tj. 1) wewnętrznej, 2) w strefie bliskiego przedmieścia, 3) w strefie dalekiego przedmieścia. Im większa odległość od miasta rdzeniowego, tym zjawiska te są mniej nasilone, z wyjątkiem miejsc posiadających dogodne połączenie komunikacyjne z miastem rdzeniowym. Proces rozlewania się miasta nie obejmuje całej powierzchni strefy suburbanizacji demograficznej, lecz występuje jedynie w częściach gmin. Wyniki niniejszej pracy potwierdziły wcześniejsze badania związane z procesami suburbanizacji w Poznaniu. Fakt ten, a także możliwość wykorzystania otwartych danych satelitarnych, powoduje, że opracowana metodologia może być z powodzeniem stosowana na innych obszarach badań.

LITERATURA

- Arnold C.L., Gibbons C.J., 1996, *Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator*, Journal of the American Planning Association, 62(2), 243–258.
- Ban Y., 2016, *Multitemporal Remote Sensing: methods and applications*, Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5>.
- Batisani N., Yarnal B., 2009, *Urban expansion in Centre County, Pennsylvania: Spatial dynamics and landscape transformations*, Applied Geography, 29(2), 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.08.007>
- Beim M., 2009, *Modelowanie procesu suburbanizacji w aglomeracji poznańskiej*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Bhatta B., 2010, *Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data*, Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05299-6>.
- Burgess E.W., 1967, *The growth of the city: An introduction to a research project*, [w:] R.E. Park, E.W. Burgess (red.), *The city*, University of Chicago Press, Chicago, 47–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_5
- CEMAT, 2007, *European Conference of Ministers responsible for Regional / Spatial Planning (CEMAT)*, Strasburg.
- Ciok S., 2014, *Budownictwo mieszkaniowe w strefie podmiejskiej Wrocławia*, Space – Society – Economy, 13, 127–147.
- Degórska B., 2007, *Spontaniczny rozwój zabudowy mieszkaniowej na obszarze metropolitalnym Warszawy jako przykład istotnego problemu planowania przestrzennego*, [w:] S. Kozłowski, P. Legutko-Kobus (red.), *Planowanie przestrzenne – szanse i zagrożenia środowiskowe*, KUL, Lublin, 292–311.
- European Commission, 20016, *Mapping Guide for a European Urban Atlas*, European Commission. Dostępne na: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban-atlas-mapping-guide> [data dostępu: 01.06.2020].
- Flynn M.S., 2006, *Suburban Typologies Historical Examples and Alternatives*, Library and Archives Canada.
- Friedl M.A., Davis F.W., Michaelsen J., Moritz M.A., 1995, *Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: An analysis using a scene simulation model and data from FIFE*, Remote Sensing of Environment, 54(3), 233–246. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00156-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00156-5)
- Gao B.C., 1996, *NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*, Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Guest A.M., 1984, *The city*, [w:] M. Micklin, H.M. Choldin (red.), *Sociological human ecology*, Routledge, Nowy Jork, 277–322.
- Hardin P.J., Jackson M.W., Otterstrom S.M., 2007, *Mapping, measuring, and modeling Urban growth*, [w:] R.R. Jensen, J.D. Gatrell, D. McLean (red.), *Geo-Spatial Technologies in Urban Environments (Second Edition): Policy, Practice, and Pixels*, Springer Berlin Heidelberg, 141–176. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69417-5_8.
- Idczak P., Mroziak K., 2016, *Peryurbanizacja w Poznańskim Obszarze Metropolitalnym*, Studia i Prace WNEiZ, 46 (February 2017), 243–254. DOI: <https://doi.org/10.18276/sip.2016.46/2-21>.
- Jabkowska A., 2007, *Wielorodzinne budownictwo mieszkaniowe w Poznaniu po 1989 roku*, Instytut Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej UAM Poznań.
- Jancz A., 2016, *Suburbanizacja a sytuacja mieszkaniowa w aglomeracji poznańskiej*, Świat Nieruchomości, 95, 53–60.
- Jat M.K., Garg P.K., Khare D., 2008, *Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10(1), 26–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.04.002>.
- Jensen J.R., Hodgson M.E., Tullis J.A., Raber G.T., 2005, *Remote sensing of impervious surfaces and building infrastructure*, [w:] R.R. Jensen, J.D. Gatrell, D. McLean (red.), *Geo-Spatial Technologies in Urban Environments*, Springer Berlin Heidelberg, 5–21. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-26676-3_2.
- Kaczmarek T., Mikuła Ł., 2016, *Koncepcja Kierunków Rozwoju Przestrzennego Metropolii Poznań*, CBM, Poznań.
- Kranjčić N., Medak D., Župan R., Rezo M., 2019, *Support Vector Machine Accuracy Assessment for Extracting Green Urban Areas in Towns*, Remote Sensing. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11060655>.

- Liang C., Penghui J., Wei C., Manchun L., Liyan W., Yuan G., Yuzhe P., Nan X., Yuewei D., Qiuhaoh H., 2015, *Farmland protection policies and rapid urbanization in China: A case study for Changzhou City*, Land Use Policy, 48, 552–566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.06.014>.
- Lisowski M., Grochowski A., 2008, *Procesy suburbanizacji. Uwarunkowania, formy i konsekwencje*, [w:] K. Saganowski, M. Zarzejevska-Fiedorowicz, P. Żuber (red.), *Ekspertyzy do Koncepcji Zagospodarowania Przestrzennego Kraju*, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Warszawa.
- Longley P.A., Mesev V., 2000, *Measuring Urban Morphology Using Remotely-Sensed Imagery*, [w:] J.-P. Donnay, M.J. Barnsley, P.A. Longley (red.), *Remote Sensing and Urban Analysis: GISDATA 9*, Taylor & Francis, London, 163–190.
- Maik W., 1997, *Podstawy geografii miast*, UMK, Toruń. Dostępne na: <https://fbc.pionier.net.pl/details/nnz1fWS> [data dostępu: 01.06.2020].
- Masek J.G., Lindsay F.E., Goward S.N., 2000, *Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations*, International Journal of Remote Sensing, 21 (18), 3473–3486. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311600750037507>.
- Masik G., 2018, *Suburbanizacja demograficzna i przestrzenna na Obszarze Metropolitalnym Gdańsk-Gdynia-Sopot*, Studia Obszarów Wiejskich, 50 (January 2018), 155–170. DOI: <https://doi.org/10.7163/sow.50.9>
- McGarigal K., 2008, *Fragstat – Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*, 97331. DOI: <https://doi.org/DOI:10.1016/B978-008045405-4.00218-4>.
- Mikuła Ł., 2016, *Rozwój funkcji mieszkaniowej w aglomeracji poznańskiej w świetle polityki przestrzennej samorządów lokalnych*, UAM, Poznań, 91–112.
- Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, 2013, *Kryteria delimitacji miejskich obszarów funkcjonalnych ośrodków wojewódzkich*, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Warszawa.
- Mitra P., Uma Shankar B., Pal S.K., 2004, *Segmentation of multi-spectral remote sensing images using active support vector machines*, Pattern Recognition Letters, 25(9), 1067–1074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.03.004>.
- Nalej M., 2019, *Problem zmiennych jednostek odniesienia (MAUP) w badaniach pokrycia terenu. Przykład Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego*, Uniwersytet Łódzki, Łódź.
- Radeloff V.C., Hammer R.B., Stewart S.I., 2005, *Rural and suburban sprawl in the U.S. Midwest from 1940 to 2000 and its relation to forest fragmentation*, Conservation Biology, 19(3), 793–805. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00387.x>.
- Rasul A., Balzter H., Ibrahim G.R.F., Hameed H.M., Wheeler J., Adamu B., Ibrahim S., Najmaddin P.M., 2018, *Applying built-up and bare-soil indices from Landsat 8 to cities in dry climates*, Land, 7(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/land7030081>.
- Sarkar Chaudhuri A., Singh P., Rai S.C., 2017, *Assessment of impervious surface growth in urban environment through remote sensing estimates*, Environmental Earth Sciences, 76(15). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6877-1>.
- Śleszyński P., 2013, *Delimitacja miejskich obszarów funkcjonalnych stolic województw*, Przegląd Geograficzny, 85(2), 173–197. DOI: <https://doi.org/10.7163/PrzG.2013.2.2>.
- Śleszyński P., 2018, *Migracje wewnętrzne*, [w:] A. Potrykowska (red.), *Sytuacja demograficzna Polski. Raport 2017–2018*, Rządowa Rada Ludnościowa, Warszawa, 154–195.
- Śleszyński P., Deręgowska A., Kubiak Ł., Sudra P., Zielińska B., 2017, *Analiza stanu i uwarunkowań prac planistycznych w gminach w 2017 roku*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk, Warszawa.
- Sun Z., Wang C., Guo H., Shang R., 2017, *A modified normalized difference impervious surface index (MNDISI) for automatic urban mapping from landsat imagery*, Remote Sensing, 9(9), 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9090942>.
- Tian Y., 2020, *Mapping Suburbs Based on Spatial Interactions and Effect Analysis on Ecological Landscape Change: A Case Study of Jiangsu Province from 1998 to 2018, Eastern China*, Land, 9(5), 159. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9050159>.
- Torbick N., Corbiere M., 2015, *Mapping urban sprawl and impervious surfaces in the northeast United States for the past four decades*, GIScience and Remote Sensing, 52(6), 746–764. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1076561>.
- Wang Z., Gang C., Li X., Chen Y., Li J., 2015, *Application of a normalized difference impervious index (NDII) to extract urban impervious surface features based on Landsat TM images*, International Journal of Remote Sensing, 36(4), 1055–1069. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1007250>
- Weng Q., 2015, *Remote Sensing Applications for the Urban Environment*, Taylor & Francis, London. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18555>.
- Xu H., 2010, *Analysis of impervious surface and its impact on Urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI)*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 76(5), 557–565. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.76.5.557>.
- Yang R., Jargowsky P.A., 2006, *Suburban Development and Economic Segregation in the 1990s*, Journal of Urban Affairs, 28(3), 253–273. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9906.2006.00291.x>.
- Yu S.S., Sun Z., Sun L., Wu M.F., 2016, *Extraction and Analysis of Mega Cities' Impervious Surface on Pixel-based and Object-oriented Support Vector Machine Classification Technology: A case of Bombay*, Journal of Physics: Conference Series, 755(1), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>.
- Zborowski A., 2004, *Podejście funkcjonalno-strukturalne w badaniach delimitacji obszarów metropolitalnych w Polsce (przykład Krakowa)*, [w:] J. Słodczyk (red.), *Przemiany struktury przestrzennej miast w sferze funkcjonalnej i społecznej*, Uniwersytet Opolski, Opole, 25–39.

Analysis of impervious surface changes in suburbanization research. The case study of Poznań

#suburbanization, #impervious surface, #Landsat, #Poznań

Abstract

Impervious surfaces are structures created mainly as a result of human activity, made of water-resistant materials such as asphalt or concrete which is one of the most frequently used building materials for cities. Depending on the share of impermeable areas, urban fabric density classes can be determined. For example, the indicator value in the range of 10-30 percent indicates low density and is characteristic of single-family, dispersed housing. Applying the change analysis method can help determine the extent of suburbanization. To assess the usefulness of this method, I analyzed the changes in the share of impervious surfaces in the demographic suburbanization zone of Poznań, in the years 1992–2018. To this end, Landsat's open satellite data was used. The downloaded imageries were subjected to pixel-based classification, allowing a map of pervious and impervious areas to be created. In the first step, water areas, vegetation, and most of the soils were excluded from the analysis using the NDVI spectral indexing method (measuring the state of plant health), NDWI (allowing detection of water bodies), and DBSI (allowing differentiation of soil from impervious surfaces). The remaining areas were classified using the Support Vector Machines algorithm (SVMs). The results were aggregated into a grid of 25 ha hexagons. The comparison of the results for two periods of time allowed to indicate in which places the level of investment grew the fastest – there was suburbanization in these areas. In the case of Poznań, the increase in impervious surfaces was the most intense in the area beyond its western border. The presented method is very helpful in determining the extent of the occurrence of suburbanization processes. The impervious surface index cannot, however, be used as an independent indicator of urban sprawl because it only shows one dimension of this phenomenon.