

Ocena dostępności zieleni w miejscu zamieszkania w miastach z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza

*Assessment of the availability of greenery in the place of residence
in cities using NDVI and the Lorenz's concentration curve*

Krzysztof BĘDKOWSKI
Adam BIELECKI

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast i Turyzmu, Zakład Geoinformacji
ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź
krzysztof.bedkowski@geo.uni.lodz.pl
adam_biel@o2.pl

Streszczenie

Oficjalne statystyki terenów zieleni znajdujących się w miastach uwzględniają zespoły roślinności znajdujące się na gruntach, których głównym przeznaczeniem jest utrzymanie zieleni – parki, zieleńce, zieleń osiedlowa, ogrody zoologiczne, ogrody botaniczne, rezerваты przyrody, parki krajobrazowe, a także część zieleni ulicznej. Miernikiem wielkości zasobów zieleni jest powierzchnia tych gruntów. W raportach nie ujmuje się tej części zieleni, która znajduje się na innych obszarach. Tereny zabudowane, komunikacyjne, czasowo wyłączone z funkcji przemysłowych i in. również mogą mieć obfite zasoby zieleni, w postaci powierzchni trawiastych, pojedynczych krzewów i drzew oraz ich grup, które mają duże znaczenie dla kształtowania środowiska w mieście. Dla oceny warunków życia w miastach oraz umożliwienia porównywania miast pod względem zasobów zieleni niezbędne jest wypracowanie sposobu oceny całości posiadanej przez nie zieleni. Poznanie proporcji, jaka część ludności, do jakich zasobów zieleni w miejscu zamieszkania ma dostęp, może dużo powiedzieć o warunkach i jakości życia w poszczególnych miastach. W teledetekcji do analizy roślinności używany jest m.in. znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności NDVI, którego ważną cechą jest związek z „ilością” i „jakością” zieleni występującej na danym obszarze. W pracy przedstawiono, na przykładzie Łodzi, propozycję sposobu oceny dostępności zieleni dla mieszkańców miasta (w miejscach zamieszkania), z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. Obszar miasta podzielono na pola podstawowe o wymiarach 90×90 m. Na obszarze Łodzi zamieszkanym jest 14 568 pól podstawowych (40,25% powierzchni miasta). Tylko 1,72% mieszkańców Łodzi ma w miejscu zamieszkania zasoby zieleni o wysokiej wartości wskaźnika $NDVI \geq 0,4$ odpowiadającej terenom parkowym i zalesionym. Znaczna część mieszkańców miasta (54,02%) ma w miejscu zamieszkania NDVI w granicach od 0,2 do 0,3. Stwierdzono, że są to obszary miasta, w których zabudowie towarzyszy rozwinięta zieleń. Rejony, w których $NDVI \geq 0,2$ stanowią 85,96% powierzchni miasta, w której z kolei mieszka 72,99% ludności. Mieszkańcy miasta w różnym stopniu korzystają z zasobów zieleni, jakie posiadają w miejscach zamieszkania, bowiem wartość współczynnika koncentracji $K = 0,710$ jest stosunkowo wysoka i wskazuje na znaczną koncentrację ludności oraz NDVI. Około 80% mieszkańców ma w miejscu zamieszkania dostęp tylko do około 25% zasobów zieleni.

Abstract

The official statistics of the green areas in cities take into account the plants of vegetation located on the land, the main purpose of which is the maintenance of greenery – parks, lawns, estate greenery belts, zoological gardens, botanical gardens, nature reserves, landscape parks, and a part of the street greenery. The meter's size of green resources is the area of these lands. In the reports, the green in other areas is not recognised. Built-up areas, communication, areas temporarily excluded from industrial functions and others can also have abundant resources of greenery, in the form of grassland, individual shrubs and trees and their groups, which are of great importance for shaping the environment in cities. To assess urban living conditions and to allow cities to be compared in terms of green resources, it is necessary to develop a way of assessing the whole of their greenery.

Knowing the proportion of what part of the population has access to which greenery resources in the place of residence, can say a lot about the conditions and quality of life in cities. In remote sensing for the analysis of vegetation we mainly use a normalized differential vegetation index NDVI, which important feature is the relationship to the "quantity" and "quality" of greenery occurring in a given area. The paper presents, on the example of Łódź, a way of assessing the availability of greenery for the city's residents (in places of residence), using NDVI and the Lorenz's concentration curve. The area of the city is divided into fields measuring 90×90 m. 14 568 fields (40,25% of the city area) are inhabited in Łódź. Only 1.72% of inhabitants of Łódź have green areas with a high NDVI value ≥ 0.4 corresponding to park and wooded areas. A significant part of the city residents (54.02%) have NDVI in their place of residence ranging from 0.2 to 0.3. It was found that these are the areas of the city where the urban development is accompanied by well-developed greenery. Areas in which $NDVI \geq 0.2$ represent 85.96% of the city's area, in which 72.99% of the population lives. Inhabitants of the city use the greenery resources which they have in their places of residence to varying degrees. The value of the concentration coefficient $K = 0.710$ is relatively high and indicates a significant concentration of population and NDVI. About 80% of residents have access to only 25% of green resources in their place of residence.

Keywords: urban greenery, accessibility, remote sensing, vegetation indices, concentration of spatial phenomena.

Słowa kluczowe: zieleń miejska, dostępność, teledetekcja, wskaźniki wegetacyjne, koncentracja zjawisk przestrzennych.

Wprowadzenie

Terenami zieleni miejskiej są przestrzenie pokryte roślinnością na obszarach miast (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016), natomiast Böhm 1999 (cyt. wg Walkowicz 2002) pojęciem tym obejmuje „wszystkie tereny czynne biologicznie w obrębie miast, niezależnie od tego jak są użytkowane oraz kto jest ich właścicielem”.

Według oficjalnej definicji, zielenią miejską są te zespoły roślinności, które znajdują się na terenach zieleni urządzonej i pełnią funkcje publiczne, a więc: „parki, zieleńce, promenady, bulwary, ogrody botaniczne, zoologiczne, jordanowskie i zabytkowe, cmentarze, zieleń towarzysząca drogom na terenie zabudowy, placom, zabytkowym fortyfikacjom, budynkom, składowiskom, lotniskom, dworcom kolejowym oraz obiektom przemysłowym” (Ustawa 2004). We wcześniejszym akcie (Ustawa 1980, art. 42.2) wskazywano, że zieleń miejską stanowi zieleń na terenach przeznaczonych w planie zagospodarowania przestrzennego na cele wypoczynkowe, zdrowotne i estetyczne. Decydował zatem fakt przeznaczenia terenu oraz znajdującej się na nim roślinności. Do terenów zieleni według stanu geodezyjnego (Statystyka 2018) zalicza się także użytki rolne (w tym grunty orne, sady, łąki i pastwiska trwałe) oraz grunty leśne, zadrzewione i zakrzewione.

Roślinność jest ważnym elementem przestrzeni miejskiej, istotnie decydującym o warunkach i jakości życia mieszkańców. Pełni wiele ważnych funkcji (Białobok 1976): chroni przed kurzem, sadzą i trującymi substancjami lotnymi, zwiększa wilgotność powietrza, łagodzi różnice temperatur, osłania przed wiatrami,

poprawia bilans wodny, tłumi hałas i wibracje powietrza, jest źródłem wrażeń estetycznych, ma też znaczenie dydaktyczne i wychowawcze (kolekcje w ogrodach botanicznych). Respondenci licznych badań „wskazują zieleń jako czynnik jakości życia, jeden z najważniejszych elementów przy wyborze miejsca zamieszkania, najważniejszy element warunkujący ich szczęście i którego chcą w miastach więcej” (Durecka 2017). Bliskość terenów zieleni uważana jest za najważniejszy czynnik atrakcyjności osiedli mieszkaniowych (Mierzejewska 2001, Bułhak 2004).

Uważa się, że tereny zieleni powinny stanowić integralną część powierzchni miasta. Na przestrzeni dziesięcioleci opracowanych zostało wiele koncepcji oraz wskaźników dotyczących kształtowania zieleni na terenach miejskich. Wśród najbardziej znanych należy wymienić m.in. koncepcję miast-ogrodów, która w Polsce została zastosowana do kształtowania terenów zieleni m.in. w podwarszawskich miejscowościach, takich jak Milanówek, Podkowa Leśna, Brwinów itd. Rozwijane m.in. przez Ebenezer Howarda koncepcje miast-ogrodów zakładały duży udział terenów zieleni, np. w opracowanych z jego udziałem propozycjach dla podmiejskich gmin Krakowa określono, że stosunek powierzchni terenów zabudowanych do niezabudowanych powinien być jak 1 do 10. Jednak w Letchworth, mieście będącym sztandarowym przykładem zrealizowanej koncepcji miasta-ogrodu, stosunek ten wyniósł tylko 1:2 (Czyżewski 2001). Wodziczko (1937) pisze, że $\frac{1}{3}$ powierzchni miasta powinny stanowić obszary z roślinnością naturalną, bez upraw rolnych. Według zarządzenia Ministerstwa Budownictwa i Przemysłu

Materiałów Budowlanych (Zarządzenie 1964), norma tzw. zieleni wypoczynkowej wnosiła 8–15 m², a ogólnodostępnej 10,6 m² na 1 mieszkańca, w tym 1,5–2,5 m² parków osiedlowych o powierzchni min. 2 ha oraz 1,5–2,5 m² zieleńców. Ptaszycka (1950) podaje, że w zespołach mieszkaniowych powinno być co najmniej 15 m² terenów zieleni na 1 mieszkańca, natomiast Myczkowski (1976) szacuje, że „aby człowiek mógł mieć w środowisku miejskim odpowiednie warunki zdrowotne potrzeba mu 50 m² terenów zielonych”. Zieleńce i parki powinny być położone w odległości do ok. 500 m, co odpowiada 15 min spaceru (Czarnecki 1968, Orzeszek-Gajewska 1984, Czerwieniec i Lewińska 1996), a ich minimalna wielkość wynosić 0,55 ha (Alexander 2008), 2 ha (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016) lub nawet 5 ha (Czarnecki 1968). Wszystkie tereny zieleni powinny tworzyć układ powiązanych ze sobą przestrzennie elementów – tzw. system zieleni miejskiej – bowiem tylko w takich warunkach można zapewnić ich efektywność, zwiększyć odporność na liczne zagrożenia oraz sprawnie zarządzać (Bożetka 2008). W miastach dużą rolę pełnią również tereny zieleni w postaci parków dzielnicowych, parków centralnych lub lasów strefy podmiejskiej i in., z reguły odległe od miejsc zamieszkania, a akceptowany czas dojazdu do nich środkami komunikacji miejskiej wynosi 15–30 minut (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016).

W Polsce występuje bardzo duże zróżnicowanie wielkości terenów zieleni w miastach w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Bardzo zielonym miastem jest Pszczyna (ok. 600 m²), natomiast do najmniej zasobnych miast należy Kalisz (ok. 50 m²) (Mierzejewska 2002, 2004). Miejskie tereny zieleni w Łodzi tworzą parki, zieleńce, zieleń osiedlowa, ogrody zoologiczne, ogrody botaniczne, rezerваты przyrody, parki krajobrazowe i zieleń uliczna. Ich łączna powierzchnia w 2017 roku wynosiła 3 836,3 ha (13,08% powierzchni miasta, 54,7 m² na 1 mieszkańca) (Statystyka 2018). W Łodzi jest też 11 670 ha użytków rolnych i 2 489 ha gruntów leśnych, zadrzewionych i zakrzewionych, co stanowi odpowiednio 16,9 i 3,6% powierzchni miasta (154 i 36 m² na 1 mieszkańca). Średnia powierzchnia miejskich terenów zielonych w Polsce wynosi 21,6 m² na 1 mieszkańca miasta (Rocznik 2018).

Publikowane statystyki dotyczące zieleni opierają się na danych uwzględniających formalny status terenów, a podstawowym miernikiem jest ich powierzchnia. Nie ujmuje się tej części zieleni, która znajduje się na innych obszarach. A przecież także tereny zabudowane, komunikacyjne, czasowo wyłączone z funkcji przemysłowych itp. również mogą mieć obfite zasoby zieleni, w postaci powierzchni trawiastych, pojedynczych krzewów i drzew oraz ich grup. Każde z nich pełni te wszystkie funkcje, które wymieniono wcześniej.

Układy zieleni są zróżnicowane i miasta posiadające bardzo dużo zieleni na terenach nieuwzględnianych w statystykach, a jednocześnie z małą ilością parków, zieleńców, zieleni osiedlowej i in., mogą być paradoksalnie uznane za mało 'zielone' w porównaniu z tymi, w których obiekty oficjalnie uznawane za zieleń występują, lecz na małych powierzchniach. Dla umożliwienia porównywania miast niezbędne jest zatem wypracowanie

sposobu oceny ilości posiadanej przez nie zieleni, opracowanie mierników opartych nie na polu powierzchni danych kategorii użytkowania gruntów, lecz potencjale do pełnienia różnorodnych funkcji. Oczywiście jest, że inne znaczenie ma trawnik, jeszcze inne powierzchnia pokryta nieuporządkowaną spontaniczną roślinnością, grupy krzewów czy też drzewa. Inny jest ich „wkład” do ogólnego bilansu pełnionych przez roślinność usług ekosystemowych.

W miastach najczęściej mamy do czynienia z nierównomiernym przestrzennym rozłożeniem mieszkańców oraz zieleni – koncentracją ludności w śródmieściach, a zieleni na obrzeżach. Znaczna część mieszkańców ma w swoim najbliższym otoczeniu gęstą zabudowę, często bez najmniejszego nawet skrawka zieleni. Z drugiej strony na obrzeżach miast często występują lasy miejskie, które wprawdzie liczą się do ogólnego bilansu terenów zielonych, lecz jednocześnie na ich terenie mieszka niewiele osób. Poznanie proporcji, jaka część ludności, do jakich zasobów zieleni w miejscu zamieszkania ma dostęp, może dużo powiedzieć o warunkach i jakości życia w poszczególnych miastach.

Współczesne techniki geoinformatyczne umożliwiają szybkie uzyskiwanie stosunkowo precyzyjnych informacji o pokryciu terenu. Należą do nich np. wysokorozdzielcze zdjęcia lotnicze i zobrazowania satelitarne oraz dane skanowania laserowego LiDAR. Zdjęcia lotnicze są jednak kłopotliwe, gdyż dla uzyskania odpowiednich danych należy przetworzyć dużą ich liczbę, a najczęściej dostępny produkt przetworzenia – ortofotomapy – mają często zniekształcenia radiometryczne i geometryczne. Aby natomiast efektywnie przetwarzać dane skanowania laserowego LiDAR niezbędne jest posiadanie sprzętu spełniającego stosunkowo wysokie wymagania, aby podobał bardzo dużym zbiorom danych w realnym czasie. W kontraście do wymienionych, zobrazowania satelitarne mają pewne zalety – jedno zobrazowanie o dobrych parametrach geometrycznych (rzut zbliżony do ortogonalnego) obejmuje całe miasto, przetworzone do odpowiednich wskaźników wegetacyjnych zawiera informację o rozmieszczeniu, ilości i jakości zieleni w mieście. Piksele nie są zbyt małe, dzięki czemu obraz nie zawiera nadmiaru szczegółów, lecz uogólniają informację z pewnego wycinka obszaru.

Do analizy roślinności używanych jest wiele wskaźników spektralnych, wśród których ważne miejsce zajmuje znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności NDVI (Deering 1978, Jackson i Huete 1991). Stosowany jest do analizy zarówno zdjęć lotniczych, jak i obrazów z pułapu satelitarnego, w ocenie wielkości biomasy roślin – w różnych skalach przestrzennych – od pojedynczych pól uprawnych aż po globalne strefy roślinności (Tucker 1979), rozpoznawaniu roślinności (Wang i in. 2009) i jej kondycji (Lhermitte i in. 2010, Olpenda i Paringit 2011, Kopańczyk i Fitrzyk 2016), analizie dojrzałości upraw (Jackson i Huete 1991, Panda i in. 2010, Nasiłowska i Kubiak 2016), wielkości powierzchni projekcyjnej liści LAI – Leaf Area Index (Colombo i in. 2003), ilości promieniowania absorbowanego przez rośliny w procesie fotosyntezy (Badgley i in. 2017), biomasy (Wang i in. 2011), badaniach fenologicznych (Lüdecke i in. 1996, Zarzecki i Pasierbiński 2009, Yan i in. 2018) i wielu innych.

Ważną cechą NDVI jest jego związek z „ilością” i „jakością” zieleni występującej na danym obszarze (Jarocińska i Zagajewski 2008). Jeżeli w skład piksela obrazu wchodzi różne obiekty (np. budynki, jezdnia z nawierzchnią asfaltową lub betonową, korony drzew, ogrody oraz trawniki), wówczas NDVI jest wypadkową współczynników NDVI indywidualnych obiektów, ważoną ich udziałem w powierzchni piksela (Wirth i in. 1987). Do pewnego stopnia NDVI reaguje także na pionową budowę zespołów roślinnych – jest większy na obszarach, na których roślinność jest rozbudowana, wielopiętrowa.

W pracy przedstawiono, na przykładzie Łodzi, propozycję sposobu oceny dostępności zieleni dla mieszkańców miasta (w miejscach zamieszkania), z wykorzystaniem NDVI oraz krzywej koncentracji Lorenza. Zaproponowany sposób może być wykorzystany do porównywania warunków życia mieszkańców różnych miast.

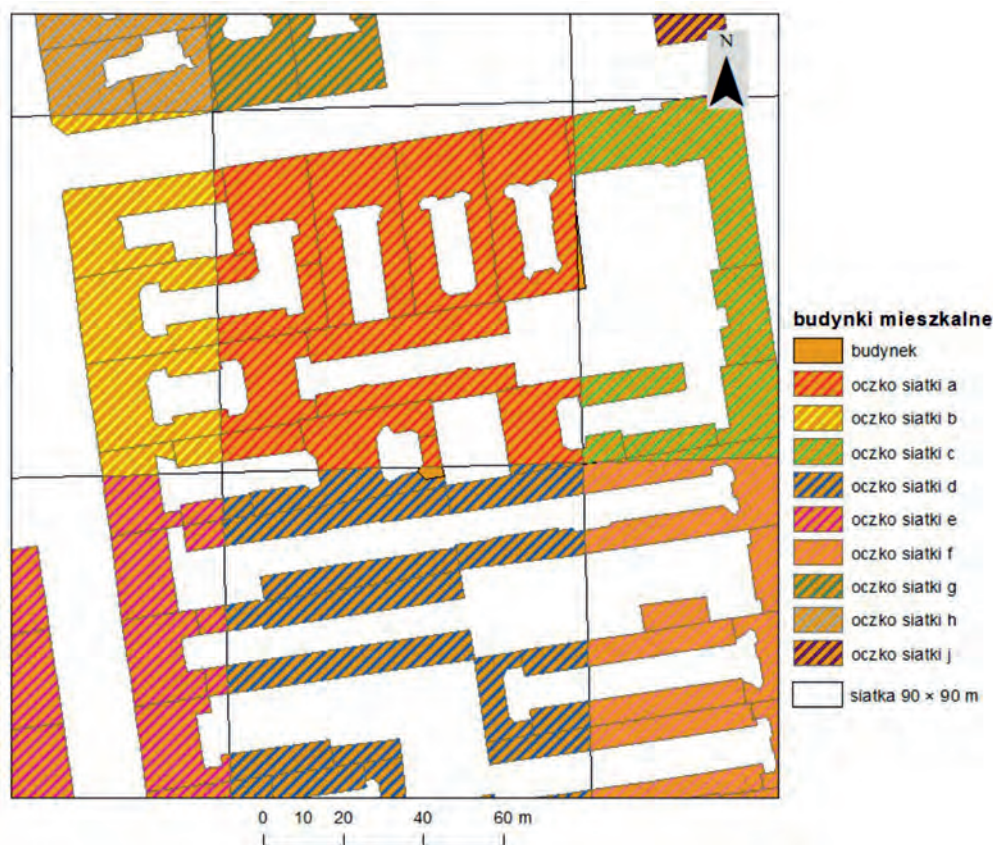
Materiały i metody

Rozmieszczenie ludności

Na potrzeby zaplanowanych analiz ustalono liczbę osób mieszkających w każdym z pól podstawowych kwadratowej siatki o wymiarach 90×90 m, odpowiadających wielkością oraz zasięgiem 9 pikselom obrazu satelitar-

nego. Siatka schematycznie dzieli przestrzeń miasta, w tym poszczególne osiedla i pojedyncze budynki, na mniejsze fragmenty. Przybliżoną liczbę mieszkańców w poszczególnych polach podstawowych obliczono w następujący sposób:

1. Ustalono liczbę mieszkańców w każdej z 36 administracyjnych jednostek pomocniczych miasta Łodzi. Niezbędne dane pochodziły z Łódzkiego Ośrodka Geodezji.
2. Na podstawie warstw wektorowych Ewidencji Gruntów i Budynków oraz informacji o powierzchni obrysów budynków i liczbie kondygnacji, ustalono całkowitą powierzchnię wszystkich kondygnacji każdego budynku mieszkalnego.
3. Obliczono wskaźnik powierzchni mieszkaniowej na 1 mieszkańca w poszczególnych administracyjnych jednostkach pomocniczych. Uzyskane wartości wahały się w granicach od $35,06 \text{ m}^2$ (osiedle Chojny-Dąbrowa) do $115,57 \text{ m}^2$ (osiedle nr 33)¹.
4. Na podstawie ustalonej w p. 2 powierzchni budynków oraz w p. 3 wartości wskaźnika, określono przybliżoną liczbę mieszkańców każdego budynku mieszkalnego.
5. Przypisania liczby mieszkańców do pól podstawowych dokonano uwzględniając zawarte w nich odpowiednie części budynków (ryc. 1).



Ryc. 1. Budynki i ich części w polach podstawowych 90×90 m
Fig. 1. Buildings and their parts within 90×90 m cells

¹ Dla porównania, w 2002 r. średnia powierzchnia mieszkania w Łodzi wynosiła $60,7 \text{ m}^2$ ($20,5 \text{ m}^2$ powierzchni użytkowej mieszkania na 1 osobę). Jedno mieszkanie było zamieszkiwane przez 2,95 osób, a jed-

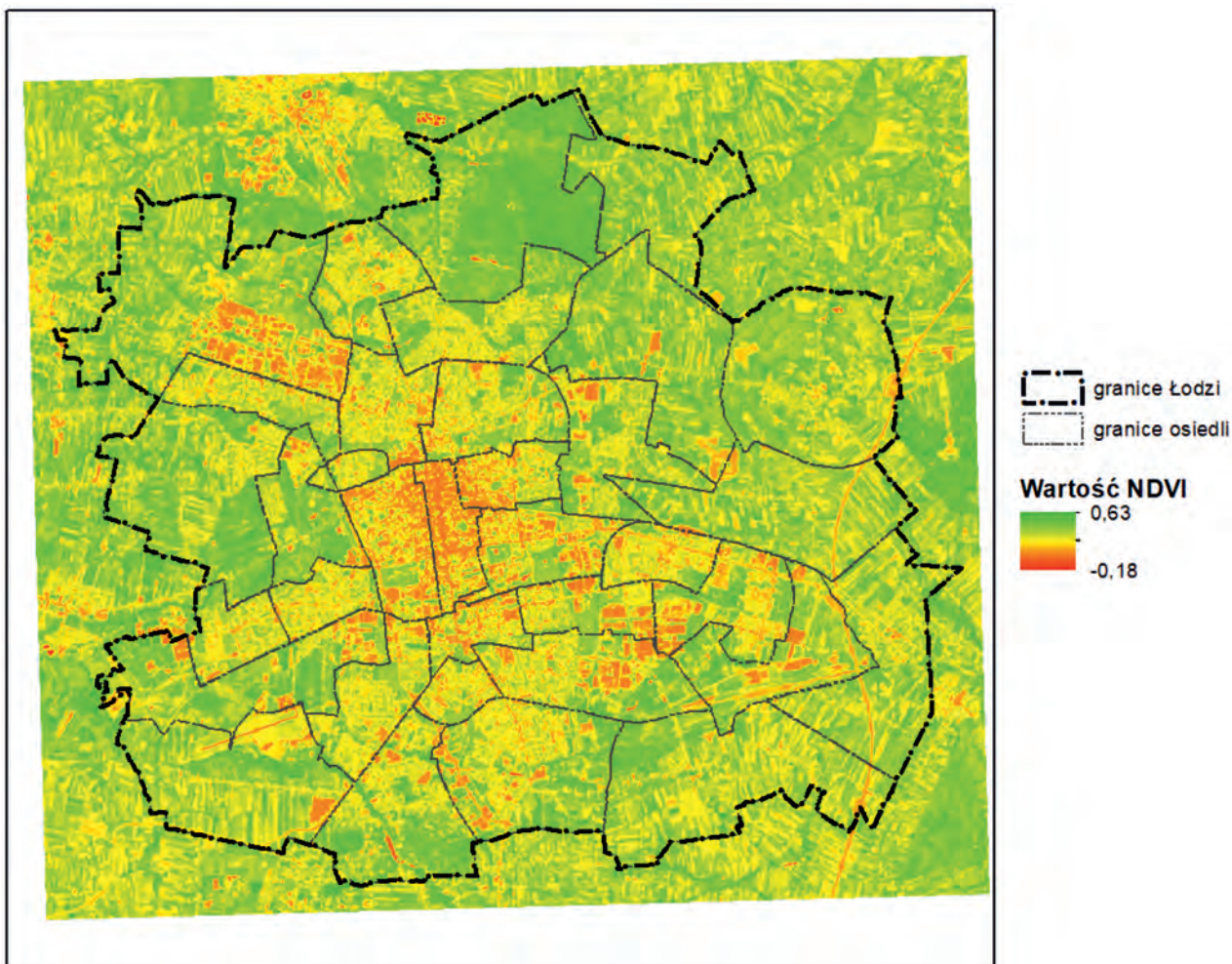
na izba przez 0,84 osób (Parysek 2004). Natomiast w latach 2011–2016 wg GUS (Rocznik 2015), średnia powierzchnia mieszkania w Łodzi wahała się w granicach $53\text{--}54 \text{ m}^2$, a na 1 osobę przypadło $27\text{--}28 \text{ m}^2$.

Rozmieszczenie zieleni w Łodzi

W pracy wykorzystano scenę satelitarną Landsat 8 z 3 lipca 2015 roku (ścieżka p189, wiersz r024), pozyskaną z US Geological Survey (EarthExplorer), która w momencie wykonywania badań była ostatnią dostępną sceną z okresu pełni sezonu wegetacyjnego oraz nie miała pokrywy chmur. Kanały 4 (zakres czerwieni, RED) i 5 (bliska podczerwień, NIR) wykorzystano do obliczenia wartości wskaźnika NDVI według klasycznego wzoru (Rouse i in. 1973):

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

Ponieważ obraz miasta Łodzi w całości mieścił się w zakresie jednej sceny satelitarnej i nie planowano porównań z innymi miastami, nie wykonywano korekty słonecznej oraz atmosferycznej zobrazowań. Wartości wskaźnika zawierały się w granicach od -0,18 do 0,63 (ryc. 2).



Ryc. 2. NDVI dla obszaru miasta Łodzi w rastrze 30 × 30 m

Fig. 2. NDVI of Łódź city area in cells 30 × 30 m

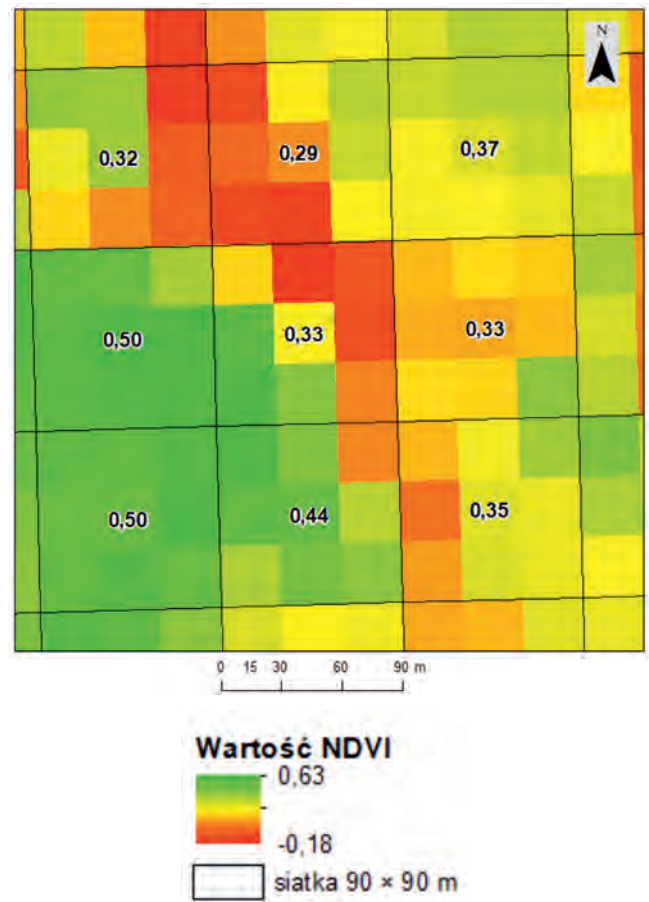
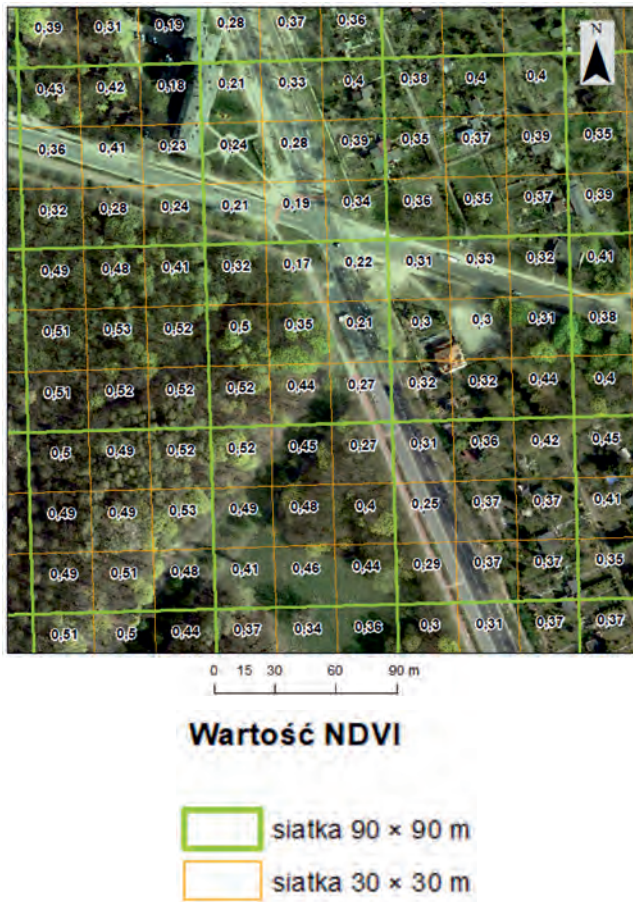
Na podstawie przestrzennego rozkładu wartości wskaźnika NDVI (ryc. 3) można wyraźnie wyodrębnić rejonów stosunkowo gęstej zabudowy mieszkaniowej, położone głównie w centralnej części miasta i zabudowy przemysłowej w części północno-zachodniej oraz południowo-wschodniej. W centrum miasta widoczne są lokalne wyspy podwyższonych wartości NDVI związane z parkami miejskimi, a na obrzeżach ze stosunkowo dużymi obszarami lasów, w tym Lasu Łągiewnickiego – jednego z większych lasów miejskich w Polsce – w północnej części miasta.

W celu ustalenia, do jakich zasobów zieleni mają dostęp mieszkańcy Łodzi w miejscach zamieszkania przyjęto, że o wielkości tych zasobów w każdym polu podsta-

wowym świadczy poziom wskaźnika NDVI, zaś suma wartości NDVI tych pól mówi o całkowitej ilości zieleni w zamieszkałych polach podstawowych w granicach miasta. Podstawową jednostką przestrzenną były oczka siatki kwadratów o wielkości 90 × 90 m, odpowiadające 9 pikselom obrazu satelitarnego o rozdzielczości 30 m. Przesłanką wyboru wielkości pola podstawowego była chęć uwzględnienia w badaniach stanu roślinności w miejscu zamieszkania oraz w jego najbliższym otoczeniu. Przyjęto, że najbliższym otoczeniem jest przestrzeń zawarta w promieniu około 50 m, a ta jest w przybliżeniu równoważna kwadratowi 90 × 90 m. W konsekwencji wyznaczone wartości NDVI należało przeliczyć, poprzez uśrednienie, z siatki pikseli na siatkę jednostek

podstawowych 90×90 m (ryc. 3). Operacja ta tylko nieznacznie zmieniła zakres wskaźnika na wartości od $-0,11$ do $0,60$). Dokonano podziału przestrzeni miasta na 7 swobodnie dobranych stref według wartości NDVI oraz ustalono liczbę mieszkańców tych stref

(tab. 1). Przy wyborze przedziałów dla NDVI uznano, że podział w odstopniowaniu $\Delta\text{NDVI} = 0,1$ jest odpowiedni, gdyż pozwala na pokazanie zróżnicowania stopnia zazielenienia miasta przy stosunkowo niedużej liczbie stref.



Ryc. 3. NDVI w kwadratach odpowiadających pikselom obrazu satelitarnego Landsat 8 o wielkości 30 m oraz jednostkom podstawowym 90×90 m

Fig. 3. NDVI in 30×30 m pixels of Landsat 8 image and in 90×90 m cells

Dostępność mieszkańców miasta do zieleni w miejscu zamieszkania wyrażono za pomocą **krzywej koncentracji Lorenza** (Luszniewicz 1980, Jażdżewska 2013). W tym celu dla każdego zamieszkanego pola podstawowego 90×90 m:

1. Zestawiono pary dwóch zmiennych – liczbę mieszkańców M_i oraz wartość NDVI_i , $i = \{1, 2, \dots, n\}$, $n = 14568$.
2. Obliczono wartość wskaźnika gęstości g_i :

$$g_i = \frac{\text{NDVI}_i}{M_i}$$

3. Ustalono kolejność pól podstawowych od najmniejszej do największej wartości wskaźnika gęstości. Pola te ponumerowano odpowiednio od $j = 1$ do $j = n$.
4. Zamieniono bezwzględne wartości liczby mieszkańców M_i oraz NDVI_i na wartości względne, które określają udział danej wartości w sumie zmiennej:

$$RM_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad RNDVI_i = \frac{\text{NDVI}_i}{\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}$$

5. Skumulowano wartości względne liczby mieszkańców oraz wartości NDVI, obliczając dla każdego j sumę wartości względnych:

$$KRM_j = \sum_{k=1}^j RM_k \quad KRNDVI_j = \sum_{k=1}^j RNDVI_k$$

Otrzymane w punkcie 5 wartości są współrzędnymi punktów (ryc. 4), które połączone ze sobą wyznaczają, wraz z przekątną, **pole koncentracji** P_k , w kształcie wieloboku. Im większe jest pole wieloboku tym większa jest koncentracja analizowanych zjawisk.

Ograniczenie wykonanych obliczeń wyłącznie do zamieszkanego pola podstawowego jest bardzo ważnym

założeniem metodycznym. W ten sposób, zgodnie z celem badań, uwzględniamy tylko zielen najbliższego otoczenia miejsca zamieszkania, natomiast pomijamy obszary niezamieszkałe – parki, lasy, cmentarze, uprawy rolne, ogrodnicze i in. – choć mogą mieć dobrze rozwiniętą roślinność i znajdować się w niedalekiej odległości.

Liczbowym wyrazem koncentracji jest **współczynnik koncentracji**, który obliczono według wzoru:

$$K = \frac{P_k}{0,5P}$$

gdzie:

P_k – pole powierzchni wieloboku koncentracji,

P – pole powierzchni całego wykresu ograniczone współzrzednymi czterech punktów: A, B, C, D.

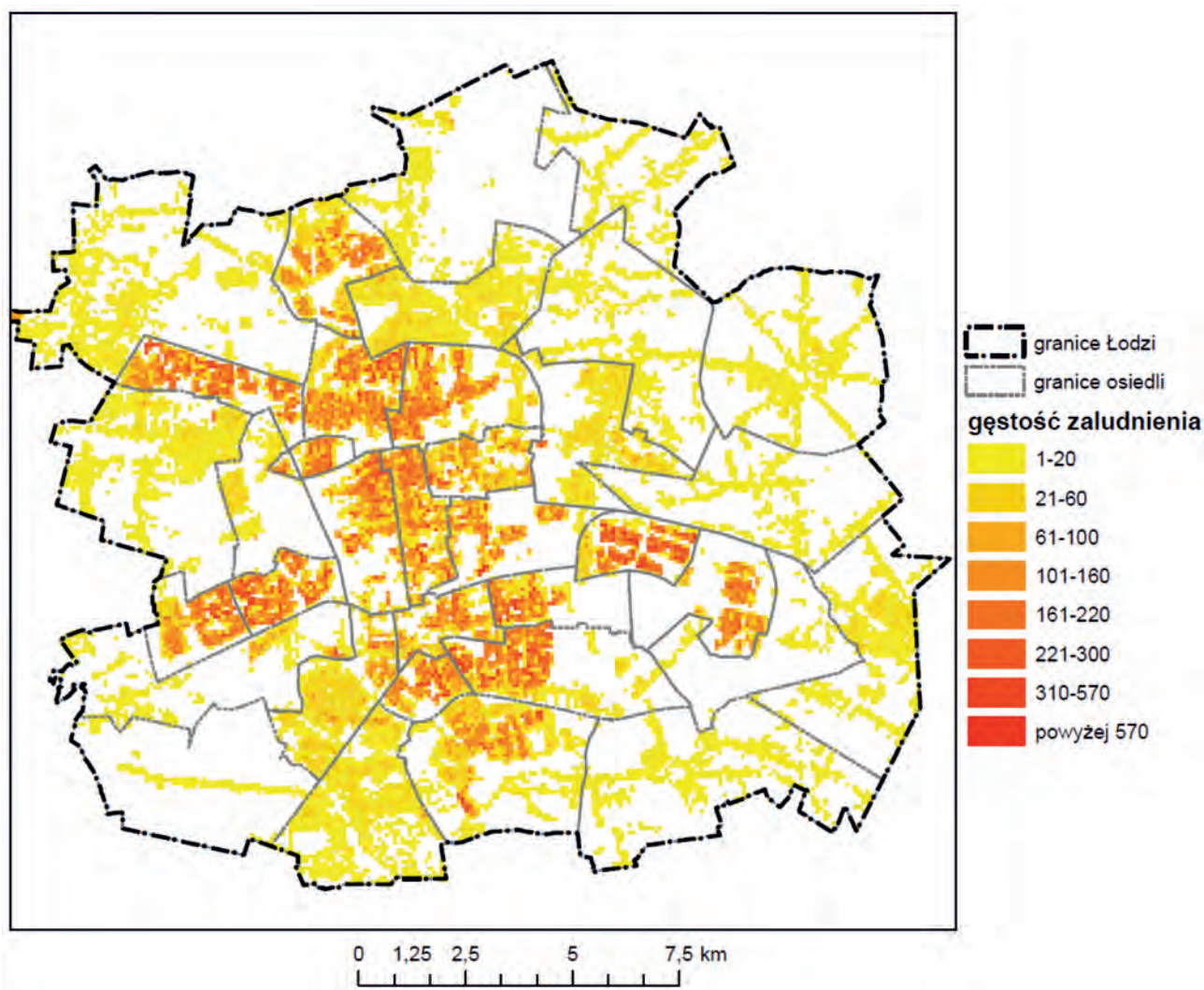
Pole P_k obliczono za pomocą stosowanego w geodezji wzoru wykorzystującego współzrzedne prostokątne wierzchołków wieloboku o ogólnej postaci:

$$P = 0,5 \sum_{i=1}^n Y_i (X_{i+1} - X_{i-1})$$

We wzorze tym P jest powierzchnią wieloboku, natomiast X oraz Y oznaczają współzrzedne prostokątne kolejnych wierzchołków wieloboku – tutaj były nimi skumulowane wartości względne liczby mieszkańców oraz skumulowane wartości względne NDVI.

Wyniki, dyskusja wyników i wnioski

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że na obszarze Łodzi zamieszkałych jest 14 568 pól podstawowych (ryc. 4), co stanowi 40,25% powierzchni miasta. Ludność koncentruje się w centrum, w którym największa gęstość zaludnienia wynosi 1 945 osób na jedno pole o powierzchni 8 100 m².



Ryc. 4. Obszary zamieszkałe w Łodzi i liczba mieszkańców (w polach podstawowych 90 × 90 m)

Fig. 4. Residential areas in Łódź and the number of inhabitants within 90 × 90 m cells

Ustalono, że NDVI na obszarze zieleńców, parków i lasów ma wartość powyżej 0,4. Warunki takie można by uznać za optymalne, jednak trudno oczekiwać, aby pole podstawowe 90×90 m pomieściło jednocześnie dużo zieleni i wielu mieszkańców, bowiem niezbudowana zabudowa wyklucza

obecność zieleni i odwrotnie. Stąd też tylko 1,72% mieszkańców Łodzi (tab. 1) ma w miejscu zamieszkania zasoby zieleni o tak wysokiej wartości wskaźnika. Ponad połowa mieszkańców miasta (dokładnie 54,02%) ma w miejscu zamieszkania NDVI w granicach od 0,2 do 0,3.

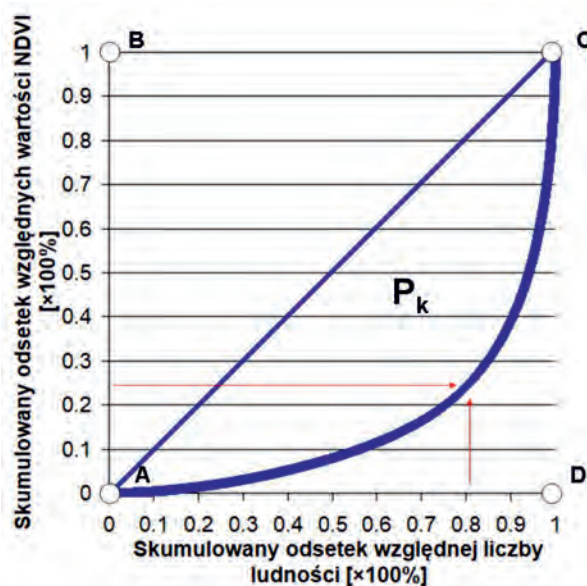
Tabela 1. Strefy NDVI w Łodzi oraz ich mieszkańcy
Table 1. NDVI zones in Łódź and their inhabitants

| Strefa NDVI NDVI zone | Zakres NDVI NDVI range | Powierzchnia strefy Area | | Mieszkańcy strefy Inhabitants | | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------|---|--------|------------------------------|
| | | [km ²] | [%] | Liczba osób Number of inhabitants | [%] | % skumulowany % cumulated |
| 0 | -0,11 ÷ 0,0 | 0,02 | 0,01 | 0 | 0 | |
| 1 | 0,0 ÷ 0,1 | 11,19 | 3,82 | 43941 | 6,74 | |
| 2 | 0,1 ÷ 0,2 | 29,95 | 10,22 | 132173 | 20,27 | 98,28 |
| 3 | 0,2 ÷ 0,3 | 74,09 | 25,27 | 352265 | 54,02 | |
| 4 | 0,3 ÷ 0,4 | 93,27 | 31,81 | 112484 | 17,25 | |
| 5 | 0,4 ÷ 0,5 | 68,83 | 23,48 | 10958 | 1,68 | |
| 6 | 0,5 ÷ 1,0 | 15,84 | 5,39 | 242 | 0,04 | 1,72 |
| Razem | | 293,19 | 100,00 | 652063 | 100,00 | 100,00 |

Ponieważ wartość $NDVI \leq 0,3$ może wydawać się stosunkowo małą, a dotyczy dużej liczby mieszkańców, postanowiono sprawdzić, w jakich rejonach miasta występuje oraz jaki jest w nich udział i sposób rozmieszczenia zieleni. Na podstawie obrazów lotniczych stwierdzono, że są to obszary miasta, w których zabudowie towarzyszy rozwinięta zieleń. Można przyjąć, że zieleń tych terenów jest ukształtowana na poziomie akceptowanym przez mieszkańców i nie ma możliwości jej dalszego zwiększania. Natomiast w polach podstawowych obszarów o $NDVI \leq 0,2$ powierzchnia zabudowy przeważa nad powierzchnią zajęta przez zieleń. Rejonami, które mają stosunkowo dobrze rozwiniętą zieleń można

uznać zatem te, w których $NDVI \geq 0,2$. Według danych tab. 1 stanowią one 85,96% powierzchni miasta, na której mieszka 72,99% ludności.

Mieszkańcy miasta w różnym stopniu korzystają z tych zasobów zieleni, jakie posiadają w miejscach zamieszkania. Wyznaczone wielkości powierzchni pola wieloboku koncentracji oraz współczynnika koncentracji (ryc. 5) wyniosły odpowiednio $P_k = 0,355$, $K = 0,710$. Wartość współczynnika koncentracji K jest zatem stosunkowo wysoka i wskazuje na znaczną koncentrację ludności oraz NDVI. Według ryc. 5 około 80% mieszkańców ma dostęp w miejscu zamieszkania tylko do około 25% zasobów zieleni.



Ryc. 5. Wielobok koncentracji wyznaczony za pomocą skumulowanej względnej wartości NDVI oraz skumulowanej względnej liczby mieszkańców. Z uwagi na dużą liczbę punktów reprezentujących pola podstawowe ($n = 14568$) nie widać połączeń pomiędzy nimi. Pole koncentracji P_k zawarte jest między przekątną AC oraz linią krzywą utworzoną przez te punkty. Około 80% ludności miasta korzysta tylko z ok. 25% zieleni znajdującej się na terenach zamieszkałych

Fig. 5. The concentration polygon determined by means of the cumulative relative NDVI value (vertical axis) and the cumulative relative number of inhabitants (horizontal axis). Due to the large number of points representing the primary fields ($n = 14568$) you can't see connections between them. The concentration field P_k is contained between the diagonal AC and the curve line created by these points. About 80% of the city's population uses only about 25% of greenery located in inhabited areas

Dla poprawnej interpretacji wskaźnika koncentracji wyznaczonego w badaniach należy pamiętać, że dotyczy on tylko tej zieleni, która znajduje się w zamieszkałych polach podstawowych. Nie uwzględniono zieleni znajdującej się w kwadratach przyległych, a więc w odległości ok. 50 m lub maks. 64 m (połowa przekątnej kwadratu 90×90 m) od punktu reprezentującego miejsce zamieszkania, ani też możliwości wynikających z mobilności mieszkańców, którzy według znanych badań (Czarnecki 1968, Orzeszek-Gajewska 1984, Czerwieniec i Lewińska 1996) są skłonni poszukiwać atrakcyjnych obiektów lub terenów, poruszając się pieszo w obszarze o promieniu ok. 500 m, poświęcając na to ok. $10 \div 15$ minut. Część mieszkańców może podejmować jeszcze dalsze wyprawy (dojazd w czasie 15–30 min) w poszukiwaniu terenów zieleni, korzystając z komunikacji publicznej lub własnych środków transportu (Łukasiewicz A. i Łukasiewicz S. 2016). Wprawdzie zielenią ta jest odległa, lecz także wpływa na warunki i jakość życia.

Zaproponowana metoda oceny dostępności zieleni nie pozwala określić dokładnie, w liczbach bezwzględnych i w tradycyjnie w tym celu stosowanych jednostkach miary (liczba mieszkańców na 1 m^2 lub 1 m^3 zieleni), do jakiej ilości zieleni – w miejscu zamieszkania – mają dostęp mieszkańcy miasta. Pozwala jednak na ocenę, w jakim stopniu korzystają oni z tej części zieleni miejskiej, która znajduje się łącznie we wszystkich zamieszkałych polach podstawowych. Pod pojęciem „korzystania z zieleni” należy rozumieć wszelkie formy użytkowania zieleni przez mieszkańców, a więc samo przebywanie w otoczeniu drzew (aspekt estetyczny), modyfikacja temperatury i wilgotności powietrza, zmniejszenie hałasu, oczyszczanie powietrza i wzbogacanie jego składu poprzez substancje wydzielane przez rośliny i in. „Stopień korzystania” rozumiemy natomiast jako określenie z jakiego ułamka ogólnej ilości zieleni (sumy zieleni z zamieszkałych pól podstawowych) korzystają mieszkańcy każdego pola podstawowego. Jak wykazano w Łodzi są rejony, w których mieszka wiele osób i jednocześnie są one w niewielkim stopniu zazielenione, natomiast obszary najbardziej zazielenione są zamieszkałe w niewielkim stopniu.

Zielenią, która najbardziej wpływa na jakość życia mieszkańców to ta, która znajduje się w miejscu zamieszkania. Ponieważ jednak trudno oczekiwać, aby w danym polu podstawowym znalazło się miejsce zarówno dla zieleni, jak i dużej liczby mieszkańców (postulaty te wykluczają się), znaczenia nabiera zielenią okoliczna. Przestrzeń miast powinna być kształtowana pasmowo: zabudowa – zielenią – zabudowa – itd. Nieduże jednostki zabudowy powinny być oddzielone od innych strefami zieleni, którymi mogą być zadrzewienia dróg, wewnątrzsiedlowe zieleńce, małe parki, zielenią towarzyszącą ciekom wodnym itp.

Na podstawie analizowanego materiału można wysunąć także wnioski, że na zróżnicowanie wielkości NDVI wpływa rodzaj zabudowy. Wiek zabudowy istotnie wpływa na relacje przestrzenne pomiędzy zielenią i zabudową. Tereny centrum miasta, z ciasno zabudowanymi ulicami i wąskimi podwórkami, mają najmniej zieleni. Osiedla złożone z budynków wielorodzinnych,

które powstawały jeszcze przed II wojną światową, a nawet tzw. blokowiska z okresu PRL, mają większy udział terenów zieleni. Tereny te są już ukształtowane, osiągnęły poziom wypełnienia zielenią, który jest akceptowany przez mieszkańców. Nie można w zasadzie oczekiwać, że ich zazielenienie można zwiększyć, gdyż oznaczałoby to utratę niezbędnych przestrzeni otwartych – istotnych ze względu na potrzebę zapewnienia dostępu światła słonecznego, osi widokowych, placów zabaw, a nawet komunikacji (pieszej i kołowej). To z nimi związany jest, jak zauważyliśmy w pracy, NDVI na poziomie ok. $0,2 \div 0,3$. Podkreślimy, że warunki takie (w zasadzie dobre) ma w miejscu zamieszkania znaczna liczba Łódzian (54,02%).

W dalszych badaniach warto zapewne zwrócić uwagę na kształtowanie zieleni (i wartość wskaźnika NDVI) na terenach zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej oraz wielorodzinnej. Na podstawie wizualnej analizy danych można stwierdzić, że tereny te mogą mieć podobne wartości NDVI. Zabudowa wielorodzinna oznacza jednak większe zagęszczenie ludności, czyli dany fragment zieleni świadczy usługi środowiskotwórcze dla większej liczby osób.

Czynnikiem bardzo pozytywnym jest to, że proponowana metoda oceny dostępności do zieleni uwzględnia jej wszelkie rodzaje, niezależnie od formalnych zapisów klasyfikacji terenów. W tym kontekście może być używana do obiektywnego porównywania dostępności zieleni w różnych miastach. Warunkiem koniecznym jest jednak zapewnienie jednorodności danych obrazowych, a więc pozyskanie ich w tym samym okresie sezonu wegetacyjnego oraz odpowiednia korekcja atmosferyczna i słoneczna. Niezbędne byłoby także odpowiednie uwzględnienie różnic sum NDVI w miejscach zamieszkania w poszczególnych miastach.

Mapy rozkładu wartości NDVI mogą być wykorzystane w studiach nad systemem przyrodniczym miasta, bowiem pozwalają na stosunkowo łatwe wskazanie powiązań przestrzennych wszystkich obszarów, które pełnią stale lub czasowo ważne funkcje środowiskotwórcze.

Bibliografia

- Alexander C., 2008, Język wzorców. Miasta, budynki, konstrukcja, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk.
- Badgley G., Field C.B., Berry J.A., 2017, Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis, *Science Advances* 3, 1–5.
- Białobok S., 1976, Ochrona zadrzewień i roślin w najbliższym otoczeniu człowieka, [w:] Michajłow W. i in. (red.), Ochrona przyrodniczego środowiska człowieka, PWN, Warszawa, 223–245.
- Bożętka B., 2008, Systemy zieleni miejskiej w Polsce – ewaluacja i problemy kształtowania, *Problemy Ekologii Krajobrazu* 22, 49–63.
- Bulhak M., 2004, Atrakcyjność toruńskiego osiedla Kaszczorek jako miejsca zamieszkania, [w:] Jażdżewska I. (red.), XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście, Łódź.
- Colombo R., Bellingeri D., Pasolini D., Marino C.M., 2003, Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment* 86, 120–131.

- Czarnecki W., 1968, Planowanie miast i osiedli, t. 3: Tereny zielone, PWN, Warszawa–Poznań.
- Czerwień M., Lewińska J., 1996, Zielień w mieście, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa.
- Czyżewski A., 2001, Trzewia Lewiatana. Antropologiczna interpretacja utopii miasta-ogrodu, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Deering D.W., 1978, Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station.
- Durecka I., 2017, Parki jako element struktury przestrzennej miast Łódzkiego Obszaru Metropolitalnego, Instytut Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki (praca doktorska – maszynopis).
- Jackson R.D., Huete A.R., 1991, Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine* 11, 185–200.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008, Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki, *Teledetekcja Środowiska* 40, 100–124.
- Jażdżewska I., 2013, *Statystyka dla geografów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kopańczyk K., Fitrzyk M., 2016, Satellite imagery for the improvement of SOZO database – the case study in Central and High Sudetes, *Acta Scientiarum Polonorum Geodesia et Descriptio Terrarum* 15(1–4), 5–18.
- Lhermitte S., Verbesselt J., Verstraeten W.W., Coppin P., 2010, A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 76(6), 673–682.
- Luszniewicz A., 1980, *Statystyka ogólna*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Lüdecke M.K.B., Ränge P.H., Kohlmaier G.H., 1996, The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: Application to the Frankfurt Biosphere model, *Ecological Modelling* 91, 255–270.
- Łukasiewicz A., Łukasiewicz S., 2016, Rola i kształtowanie zieleni miejskiej, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Mierzejewska L., 2001, Tereny zielone w strukturze przestrzennej Poznania, Wydawnictwo Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Poznań.
- Mierzejewska L., 2002, Tereny zielone w wybranych miastach Polski, [w:] Słodczyk J. (red.), *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Opolskiego, Opole.
- Mierzejewska L., 2004, Tereny zielone jako wyznacznik warunków życia w mieście (na przykładzie Poznania), [w:] XVII Konwersatorium wiedzy o mieście, Uniwersytet Łódzki, Łódź.
- Myczkowski S., 1976, *Człowiek, przyroda, cywilizacja*, PWN, Warszawa.
- Nasiłowska S.A., Kubiak K., 2016, Zmienność wskaźników NDVI oraz NDMI na przykładzie analizy uprawy kukurydzy w Etiopii, *Teledetekcja Środowiska* 55, 15–26.
- Olpanda A.S., Paringit E.C., 2011, Utilizing spectra reflectance and vegetation indices of *Bougainvillea spectabilis* for monitoring particulate air pollution in Metro Manila, *Proc. 32nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2011): Sensing for Green Asia*, October 3–7, 2011, Taipei Int'l Convention Center, Taipei, Taiwan.
- Orzeszek-Gajewska B., 1984, *Kształtowanie terenów zieleni w miastach*, PWN, Warszawa.
- Panda S.S., Ames D.P., Panigrahi S., 2010, Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques, *Remote Sensing* 2, 673–696.
- Parysek J.J., 2004, Warunki życia w miastach polskich w okresie transformacji, [w:] Jażdżewska I. (red.), *Zróźnicowanie warunków życia ludności w mieście*, XVII Konwersatorium Wiedzy o Mieście, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 55–66.
- Ptaszycka A., 1950, *Przestrzeń zielona w miastach*, Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza, Poznań.
- Rocznik 2015: *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2015*, GUS, Warszawa.
- Rocznik 2018: *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2018*, GUS, Warszawa.
- Rouse J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., 1973, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *Progress Report RSC 1978–2*, Texas A&M University, USA.
- Statystyka 2018: *Statystyka Łodzi 2018*, Wojewódzki Urząd Statystyczny w Łodzi, Łódź.
- Tucker C.J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment* 8, 127–150.
- Ustawa 1980: *Ustawa z 31 stycznia 1980 r. o ochronie i kształtowaniu środowiska*, Dz.U. nr 3, poz. 6.
- Ustawa 2004: *Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody* (tekst jednolity Dz.U. z 20 października 2015 r., poz. 1651).
- Walkowicz T., 2002, Społeczne i ekologiczne aspekty tworzenia i utrzymania terenów zieleni w miastach, [w:] Słodczyk J. (red.), *Przemiany bazy ekonomicznej i struktury przestrzennej miast*, Uniwersytet Opolski, Opole, 347–358.
- Wang L., Hunt J.E.R., Qu J.J., Hao X., Daughtry C.S.T., 2011, Towards estimation of canopy foliar biomass with spectral reflectance measurements, *Remote Sensing of Environment* 115(3), 836–840.
- Wang T., Skidmore A.K., Toxopeus A.G., Lin X., 2009, Understorey bamboo discrimination using a winter image, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75(1), 37–47.
- Wirth H., Schilbach G., Wirth A., 1987, Beitrag zur Analyse von Fernerkundungsdaten im SUB-PIXEL-Bereich, *Vermessungstechnik* 33(2), 56–59.
- Wodziczko A., 1937, *Planowanie kraju drogą do utrzymania równowagi w przyrodzie*, Ochrona Przyrody 17, Kraków.
- Yan J., Zhou W., Han L., Qian Y., 2018, Mapping vegetation functional types in urban areas with WorldView-2 imagery: Integrating object-based classification with phenology, *Urban Forestry & Urban Greening* 31, 230–240.
- Zarzecki M., Pasierbiński A., 2009, Zastosowanie GIS i teledetekcji w badaniach szaty roślinnej, *Wiadomości Botaniczne* 53(3/4), 53–66.
- Zarządzenie 1964: *Zarządzenie nr 118 Ministerstwa Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych z 15 czerwca 1964 r. w sprawie wskaźników wykorzystania terenów zainwestowania miejskiego*, *Dziennik Budownictwa* nr 14.