



Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego
Polska Akademia Nauk

Marek Degórski, Jacek Wolski, Andrzej Affek, Bożena Degórska,
Anna Kowalska, Edyta Regulska, Jerzy Solon

Raport

Opracowanie studium przypadku istotnych usług ekosystemów zurbanizowanych w skali regionalnej oraz lokalnej

Raport sporządzony dla Koordynatora Projektu – Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu



Usługi świadczone przez główne typy ekosystemów w Polsce – Podejście Stosowane
Projekt finansowany ze środków Mechanizmu Finansowego EOG 2014-2021

Warszawa, 31.12.2021

1. WSTĘP	3
2. ŚWIADCZENIA REGULACYJNE	5
2.1. OCZYSZCZANIE POWIETRZA Z PYŁÓW	5
2.2. ZMNIEJSZANIE EROZJI PRZEZ ROŚLINNOŚĆ	8
2.3. PRZECIWDZIAŁANIE PODTOPIENIOM I POWODZIOM MIEJSKIM	13
2.4. REGULACJA SKŁADU CHEMICZNEGO ATMOSFERY	17
2.5. REGULACJA TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI POWIETRZA	22
3. ŚWIADCZENIA KULTUROWE	31
3.1. MOŻLIWOŚĆ REKREACJI I ODPOCZYNKU NA ŁONIE NATURY	31
3.1.1. NIEZASPOKOJONE ZAPOTRZEBOWANIE MIESZKAŃCÓW MIASTA NA REKREACJĘ I ODPOCZYNEK NA ŁONIE PRZYRODY	31
3.1.2. WYKORZYSTANIE BŁĘKITNO-ZIELONEJ INFRASTRUKTURY DO REKREACJI ROWEROWEJ	34
3.1.3. WYKORZYSTANIE/POTENCJAŁ BŁĘKITNO-ZIELONEJ INFRASTRUKTURY DO REKREACJI	39
3.2. EDUKACJA EKOLOGICZNA NA ŁONIE PRZYRODY	45
LITERATURA	48

1. WSTĘP

Problem jakości życia w miastach i próbę jej poprawy poprzez wykorzystanie usług ekosystemowych podnoszą liczne prace badawcze, których wyniki są obecnie przedstawiane w literaturze światowej dla różnych regionów geograficznych (Balzan i in., 2021; Klimanova i in., 2021; Stange i in., 2022; Vidal i in., 2022). Również w Polsce w ostatniej dekadzie wzrosło zainteresowanie usługami ekosystemowymi w miastach (Kronenberg, 2012; Degórski, 2017; Zwierzchowska i Mizgajski, 2019), jakkolwiek prac z tego zakresu jest jeszcze stosunkowo niewiele w porównaniu z literaturą zagraniczną. Szczególnie istotne z punktu widzenia aplikacyjnego jest wykorzystywanie wyników przestrzennego zróżnicowania świadczeń ekosystemowych w obszarach miejskich dla planowania przestrzennego i gospodarowania gruntami, których nadrzędnym efektem ma być osiąganie dobrostanu mieszkańców.

Celem trzeciego etapu realizowanego zadania dotyczącego ekosystemów obszarów zurbanizowanych w ramach projektu „Usługi świadczone przez główne typy ekosystemów w Polsce – podejście stosowane”, którego dotyczy ten raport, było opracowanie studium przypadku istotnych usług ekosystemów zurbanizowanych w skali regionalnej oraz lokalnej. Obiektem analizy przestrzennej była Warszawa. Wskaźniki usług ekosystemowych zostały wybrane z zaproponowanego przez Zespół zestawu 78 indykatorów opisanych w pierwszym etapie projektu oraz uzupełnione nowymi propozycjami, których realizacja stała się możliwa z uwagi na aktualną dostępność danych. Stanowią one zatem oryginalne i nowatorskie podejście w ocenie świadczeń ekosystemów miasta, jak również są rozszerzeniem zakresu wskaźników opracowanych przez I. Zwierzchowską i A. Mizgajskiego (2019), związanych z zasobnością i rozkładem przestrzennym zielonej infrastruktury w największych miastach naszego kraju, odnoszących się do świadczeń: regulacja klimatu lokalnego, wykorzystanie zielonej infrastruktury dla rekreacji, przechwytywanie wód opadowych, czy też przeciwdziałanie powodzi przez zdolność do retencji dolinowej.

Opracowane przez nas w tym etapie realizacji projektu wskaźniki (10) obejmują – istotne z punktu widzenia roli błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) w systemie miejskim – usługi regulacyjne (przeciwdziałanie podtopieniom i powodziom miejskim; regulacja składu chemicznego atmosfery; oczyszczanie powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka; zmniejszanie powierzchniowej erozji wodnej) i kulturowe (możliwość rekreacji i odpoczynku oraz edukacji ekologicznej na łonie natury). Wybór usług i opisujących je wskaźników opierał się na analizie istotności zjawisk i procesów zachodzących w przestrzeni miasta z punktu widzenia dobrostanu mieszkańców. Wskaźniki odnoszą się do potencjału, wykorzystania lub niezaspokojonego zapotrzebowania. W przypadku kilku analizowanych usług, zaproponowane wskaźniki charakteryzują się wysoką koincydencją z innymi świadczeniami, tworząc tzw. „wiązki” ściśle ze sobą powiązanych świadczeń.

Wskaźniki zostały policzone dla wszystkich 18 dzielnic Warszawy i/lub dla 143 obszarów Miejskiego Systemu Informacji (dalej jako obszary MSI) (ryc. 1), jak i jednostek struktury funkcjonalnej miasta.



Ryc. 1. Dzielnice i obszary Miejskiego Systemu Informacji (MSI) w Warszawie

2. ŚWIADCZENIA REGULACYJNE

2.1. Oczyszczanie powietrza z pyłów

Usługa należy do sekcji REGULACJA I UTRZYMANIE, działu PRZEKSZTAŁCANIE BIOCHEMICZNYCH LUB FIZYCZNYCH CZYNNIKÓW WPROWADZANYCH DO EKOSYSTEMÓW wg CICES V5.1 (tab. 1). Polega ona na przechwytywaniu i akumulacji aerozoli atmosferycznych (pyłu zawieszonego, w tym PM2.5 i PM10) przez roślinność, co w efekcie łagodzi szkodliwe dla zdrowia skutki i zmniejsza koszty unieszkodliwiania pyłów innymi sposobami. Przedmiotem pomiaru jest wykorzystanie drzew do oczyszczania powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka w mieście, a wskaźnikiem korzystania z tej usługi jest liczba drzew przypadająca na jedną osobę, w przeliczeniu na dzielnice i typy zabudowy.

Tabela 1. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Liczba drzew na osobę

Świadczenie ekosystemowe		Oczyszczanie powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka
CICES 5.1	Sekcja	Regulacja i utrzymanie
	Dział	Przekształcanie biochemicznych lub fizycznych czynników wprowadzanych do ekosystemów
	Grupa	Łagodzenie oddziaływania odpadów lub substancji toksycznych pochodzenia antropogenicznego przez procesy biologiczne
	Klasa	Filtracja/sekwestracja/magazynowanie/akumulacja przez mikroorganizmy, glony, rośliny i zwierzęta
	Kod	2.1.1.2
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Wykorzystanie drzew do oczyszczania powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka w mieście
Wskaźnik		Liczba drzew na osobę
Akronim		DRZEWA
Potencjał/wykorzystanie/zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Wykorzystanie
Konstrukcja wskaźnika		Stosunek powierzchni pokrytej drzewami (w rzucie pionowym) z pól podstawowych 10 × 10 m dzielony przez przeciętną wielkość korony (powierzchnia w rzucie pionowym) do liczby ludności w dzielnicy miasta / w różnych typach zabudowy miejskiej
Pośredni/bezpośredni		Bezpośredni
Prosty/złożony		Złożony
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0-∞
Jednostka miary		–
Jednostka przestrzenna odniesienia		Dzielnica, typ zabudowy miejskiej
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne

Dane źródłowe	Opis danych	1. Wysokorozdzielcza warstwa „gęstość pokrywy drzew” (Tree Cover Density 2018), 2. Urban Atlas 2018 (rozmieszczenie ludności), 3. mapa dzielnic i obszarów MSI (liczba mieszkańców)
	Dysponent danych	1-2. Europejska Agencja Środowiska (EEA), 3. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
	Link do bazy danych	https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density/status-maps/tree-cover-density-2018 https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	Komórka rastra 10 × 10 m
	Format danych	1. Dane rastrowe (GeoTIFF), 2-3. wektorowe (shapefile) i tabelaryczne (Excel)
	Pokrycie kraju	Warszawa
	Aktualność danych	1-2. 2018 (aktualizowane co 6 lat); dane ludnościowe z 2015 r. z pomiarów telemetrycznych
	Dostępność danych	1-2. Dane ogólnodostępne, 3. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

Założenia teoretyczne

Metropolie są obszarami, na których notuje się najwyższe wartości zanieczyszczeń atmosferycznych ze źródeł antropogenicznych, zarówno mobilnych, jak i stacjonarnych (Livesley i in., 2016). Stężenie zanieczyszczeń, w tym pyłu zawieszonego, z reguły wzrasta wraz z gęstością zaludnienia (Borck i Schrauth, 2021). Zanieczyszczenie atmosfery stanowi poważny problem z perspektywy zdrowia ludzkiego.

Przechwytywanie zanieczyszczeń i w efekcie zmniejszanie ich stężenia w powietrzu jest od dawna uznawane za jedną z najważniejszych korzyści dla zdrowia ludzkiego, jakie mogą zapewnić drzewa (McDonald i in., 2016; Nowak i in., 2018). Dojrzałe drzewo może przechwycić do 23 kg cząstek stałych rocznie (Dwyer i in., 1992). Większa liczba drzew skuteczniej redukuje ilość pyłu zawieszonego w powietrzu, w efekcie zmniejszając zachorowalność i śmiertelność w wyniku chorób cywilizacyjnych, w szczególności chorób układu oddechowego (Turner-Skoff i Cavender, 2019).

Usługa oczyszczania przez drzewa powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka tworzy wiązkę z kilkoma pokrewnymi usługami świadczonymi przez drzewa, przede wszystkim z usługą regulacji chemicznego stanu wód słodkich przez procesy biologiczne, ale także z usługami kulturowymi (cechy systemów biologicznych umożliwiające działania wspierające zdrowie, regenerację sił albo rozrywkę poprzez interakcje aktywne lub angażujące).

Metodyka uzyskania wyników

Po przeanalizowaniu różnego typu materiałów źródłowych pokazujących powierzchnię pokrytą drzewami (dane satelitarne, kartograficzne i statystyczne) uznano, że najbardziej aktualnym, wiarygodnym i szczegółowym źródłem informacji będzie wysokorozdzielcza warstwa „gęstość pokrywy drzew” (*tree cover density*), opracowana na bazie zobrażeń satelitarnych satelity Sentinel-2 przez Europejską Agencję Środowiska. Dane dla wszystkich krajów Unii Europejskiej są w formacie rastrowym o rozdzielczości 10 × 10 m, aktualne na

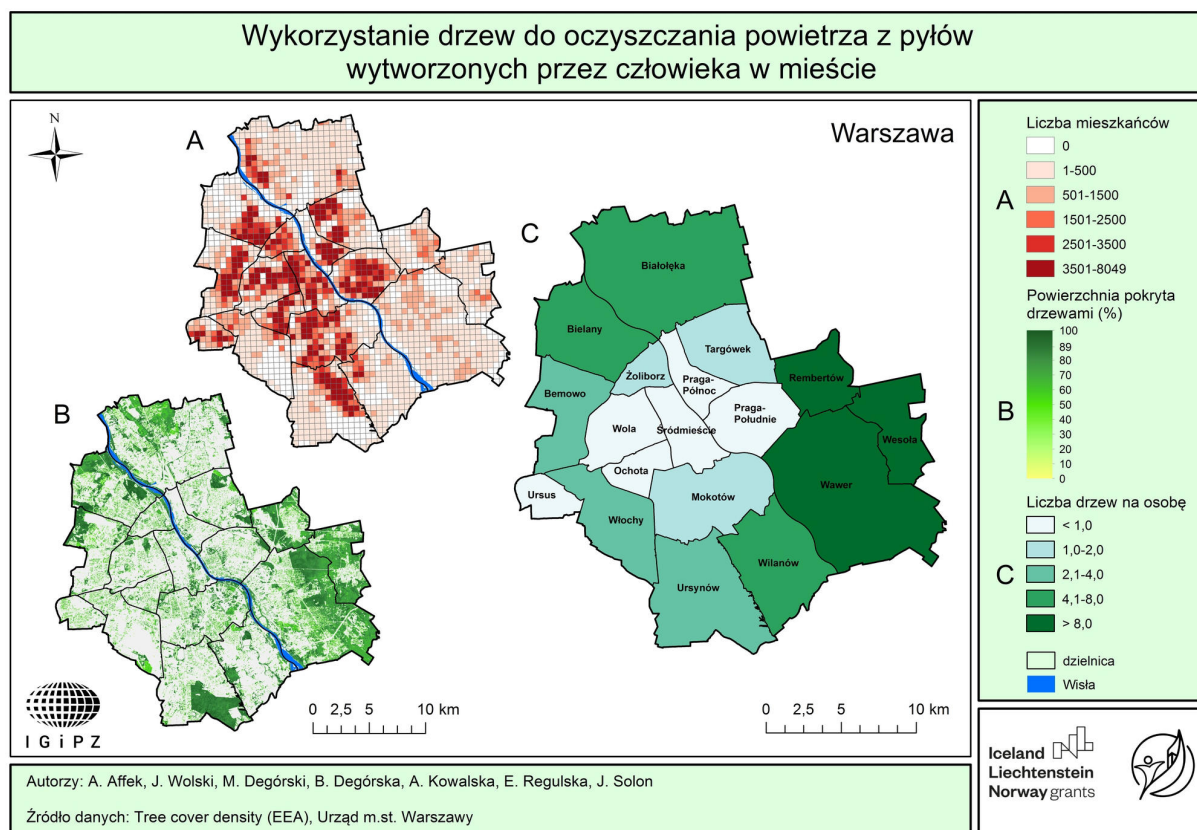
rok 2018. Każda komórka rastra zawiera informację o procentowym pokryciu koronami drzew powierzchni Ziemi (w rzucie pionowym). Wartości procentowego pokrycia dla przestrzennych jednostek odniesienia (dzielnic i typów zabudowy terenów mieszkaniowych), uzyskano obliczając średnią ze wszystkich komórek w danej jednostce stosując funkcję *Zonal Statistics as Table* w oprogramowaniu ArcGIS 10.2.

Do transformacji powierzchni pokrytej drzewami na liczbę drzew wykorzystano dane z Mapy Koron Drzew dla Warszawy (<http://zzw.waw.pl/2021/02/26/miliony-warszawskich-drzew-na-jednej-mapie/>), wykonanej w 2021 r. Średnia wielkość korony (rzut pionowy) dla Warszawy wyniosła ok. 23,2 m² (165 km²/7 121 197 drzew). Ze względu na inne dane źródłowe i w efekcie odmienne wartości powierzchni pokrytej drzewami w Warszawie otrzymane z Mapy Koron Drzew i z wysokorozdzielczej warstwy „Gęstość pokrywy drzew” (32% vs 26%) z proporcji wyliczono uśrednioną wielkość korony równą 18,8 m², którą przyjęto do transformacji powierzchni pokrytej drzewami wygenerowanej z warstwy „Gęstość pokrywy drzew” na liczbę drzew. Następnie tak otrzymaną liczbę drzew w jednostce odniesienia podzielono przez liczbę ludności. Liczbę ludności dla dzielnic otrzymano agregując dane o liczbie mieszkańców z obszarów MSI. Dane te pochodzą z pomiarów telemetrycznych wykonanych w 2015 r. i pokazują rzeczywistą liczbę osób przebywających w nocy od poniedziałku do piątku w danej dzielnicy/obszarze MSI. Rozmieszczenie mieszkańców wg typu zabudowy terenów mieszkaniowych (zabudowa wielorodzinna, wielorodzinna o podwyższonym udziale zieleni osiedlowej, jednorodzinna, jednorodzinna na terenach leśnych) uzyskano zestawiając rozmieszczenie mieszkańców z Urban Atlas z 2018 r. z mapą terenów mieszkaniowych pozyskaną z Urzędu m.st. Warszawy. Otrzymane liczby mieszkańców przeważono w ten sposób, aby suma dla Warszawy zgadzała się z ogólną liczbą mieszkańców z danych telemetrycznych.

Wartości wskaźnika

Wskaźnik wykorzystania drzew do oczyszczania powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka, pokazujący liczbę drzew na osobę w dzielnicach Warszawy, przyjmuje wartości od 0,8 (Ursus) do 22,7 (Wesoła). Liczba drzew na osobę jest wyraźnie niższa w dzielnicach centralnych i wyższa w dzielnicach peryferyjnych (wyjątkiem jest Ursus). Wyraźnie więcej drzew na osobę przypada w dzielnicach południowo-wschodnich, gdzie dominuje zabudowa jednorodzinna (często na terenach leśnych) i występują duże kompleksy leśne (ryc. 2). W skali całej Warszawy średnia liczba drzew na osobę w obrębie zabudowy jednorodzinnej wynosi 1,1, a w przypadku zabudowy na terenach leśnych aż 6,2. Tereny mieszkaniowe z zabudową wielorodzinną wyróżniają się niską liczbą drzew na osobę (jedynie 0,1). Nieco lepiej wygląda sytuacja na osiedlach o podwyższonym udziale zieleni (0,3).

Transformując wartości procentowe do pięciostopniowej skali wykorzystania tej usługi na terenie Warszawy przyjęto następujące przedziały (<1 → 1; 1-2 → 2; 2-4 → 3; 4-8 → 4; >8 → 5).



Ryc. 2. Wykorzystanie drzew do oczyszczanie powietrza z pyłów wytworzonych przez człowieka

2.2. Zmniejszanie erozji przez roślinność

Usługa należy do sekcji REGULACJA I UTRZYMANIE, działu REGULACJA WARUNKÓW FIZYCZNYCH, CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH wg CICES V5.1 (tab. 2). Polega ona m.in. na mechanicznej ochronie powierzchni gleby przed fizyczną siłą wody, zmniejszaniu spływu powierzchniowego, zwiększaniu możliwości wsiąkania wody w glebę oraz na utrzymywaniu zwężności powierzchni gleby przez systemy korzeniowe. Wszystko to wpływa na zmniejszenie erozji powierzchniowej w porównaniu z analogicznym terenem niepokrytym roślinnością. Przedmiotem pomiaru jest wpływ roślinności w mieście na zmniejszanie erozji wodnej na gruntach o różnym nachyleniu, a wskaźnikiem tego świadczenia jest ważony przez powierzchnię średni współczynnik redukcji erozji powierzchniowej przez roślinność.

Tabela 2. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Ważony przez powierzchnię średni współczynnik redukcji erozji powierzchniowej przez roślinność

Świadczenie ekosystemowe		Szata roślinna jako regulator intensywności erozji
CICES 5.1	Sekcja	Regulacja i utrzymanie
	Dział	Regulacja warunków fizycznych, chemicznych i biologicznych
	Grupa	Regulacja przepływów bazowych (progowych) i zjawisk ekstremalnych
	Klasa	Przeciwdziałanie erozji
	Kod	2.2.1.1
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Zmniejszanie erozji przez roślinność
Wskaźnik		Ważony przez powierzchnię średni współczynnik redukcji erozji

		powierzchniowej przez roślinność
Akronim		EROZJA
Potencjał/wykorzystanie/ zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Wykorzystanie
Konstrukcja wskaźnika		(1) Wyróżnienie 5 klas nachylenia stoków; (2) Określenie podatności gruntów na erozję; (3) Identyfikacja obszarów reprezentujących 5 klas erozji potencjalnej; (4) Określenie współczynnika redukcji erozji dla różnych typów zbiorowisk roślinnych; (5) Obliczenie współczynnika redukcji erozji na obszarach reprezentujących łącznie 2, 3, 4 i 5 klasę erozji potencjalnej
Pośredni/bezpośredni		Pośredni
Prosty/złożony		Złożony
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0-1
Jednostka miary		–
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane źródłowe	Opis danych	1. Rastrowy numeryczny model terenu o rozdzielczości 1 × 1 m, przetworzony do rozdzielczości 2 × 2 m, 2. mapa utworów powierzchniowych opracowana na podstawie mapy glebowo-rolniczej, 3. mapa roślinności rzeczywistej, 4. mapa dzielnic i obszarów MSI
	Dysponent danych	1. Główny Urząd Geodezji i Kartografii (Geoportal); 2-4. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
	Link do bazy danych	https://mapy.geoportal.gov.pl
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	Komórka rastra 1 × 1 m
	Format danych	1. Rastrowe (asc), 2-4. wektorowe (shapefile)
	Pokrycie kraju	1. Cały kraj, 2-4. Warszawa w granicach administracyjnych
	Aktualność danych	1-4. 2018
	Dostępność danych	1. Dane ogólnodostępne, 2-4. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

Założenia teoretyczne

Erozja wodna (w szczególności powierzchniowa) jest jedną z głównych przyczyn degradacji gleb w Europie. Dla Polski średnia strata gleby w wyniku erozji wodnej jest szacowana na ponad $70 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Józefaciuk i Józefaciuk, 1995), przy czym w skali lokalnej, w zależności od warunków abiotycznych i sposobu użytkowania ziemi może przekraczać $250 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Maruszczak, 1991), co stanowi poważny problem gospodarczy i środowiskowy.

W ocenie zagrożenia erozyjnego gleb stosowane są pojęcia erozji potencjalnej i aktualnej. Erozja potencjalna opisuje sytuację, jaka wystąpiłaby przy braku pokrywy roślinnej (tzw. czarny ugór) i niestosowaniu zabiegów przeciwerozyjnych. Pojęcie erozji aktualnej odnosi się do oceny ilości gleby erodowanej z jednostki powierzchni, z uwzględnieniem

aktualnego sposobu pokrycia i użytkowania terenu (w tym rodzaju uprawy) oraz zabiegów przeciwoerozyjnych stosowanych na danym obszarze (Wawer i in., 2011).

W Polsce, dla oceny i modelowania zagrożenia gleb erozją wodną, stosuje się podejścia jakościowe i ilościowe. Pierwsze z nich polega na określeniu klas zagrożenia erozją, zarówno potencjalną (Józefaciuk i Józefaciuk, 1992), jak i aktualną (Jadczyszyn i in., 2003). Najpopularniejsze ujęcia ilościowe bazują na modelu (R)USLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier i Smith, 1978; Renard i in., 1997). Model (R)USLE jest empirycznym równaniem matematycznym, w którym średni roczny ubytek gleby szacowany jest na podstawie równania:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

gdzie: E – masa gleby erodowanej z jednostki powierzchni w określonym czasie, R – współczynnik erozji powodowanej przez deszcz, K – współczynnik podatności gleby na erozję wodną, L – współczynnik długości stoku, S – współczynnik nachylenia stoku, C – współczynnik ochronnej roli pokrywy roślinnej, P – współczynnik zabiegów przeciwdziałających erozji.

Współczynnik C można zdefiniować jako stosunek ilości gleby wyerodowanej z pola o pokryciu określoną roślinnością do ilości gleby wyerodowanej z identycznego pod względem litologii i topografii poletka wzorcowego będącego w tzw. czarnym ugorze. Roślinność przechwytuje deszcz, zmniejszając jego energię i zapobiegając erozji rozbryzgowej. Spowalnia również spływanie wody oraz stabilizuje glebę dzięki systemowi korzeniowemu. W sumie erozja powierzchniowa jest ograniczana przez roślinność na skutek zmian szorstkości powierzchni, infiltracji i przechwytywania opadów. Współczynnik redukcji erozji przez roślinność (pomierzony eksperymentalnie lub wyliczony na podstawie wartości przybliżonych lub oszacowanych) jest pośrednim wskaźnikiem usługi ekosystemowej, określanej jako przeciwdziałanie erozji.

Usługa przeciwdziałania erozji tworzy wiązkę z innymi usługami regulacyjnymi, należącymi do działu Regulacja warunków fizycznych, chemicznych i biologicznych, takimi jak: Buforowanie i ograniczanie ruchów masowych (2.2.1.2) i Regulacja cyklu hydrologicznego i przepływu wody (wraz z ochroną przeciwpowodziową i ochroną wybrzeży) (2.2.1.3) z grupy Regulacja przepływów bazowych (progowych) i zjawisk ekstremalnych oraz Procesy wietrzenia oraz ich wpływ na jakość gleb (2.2.4.1) i Procesy rozkładu i wiązania oraz ich wpływ na jakość gleb (2.2.4.2) z grupy Regulacja jakości gleby. We wszystkich przytoczonych przykładach wskaźnik może mieć zastosowanie do przybliżonego pokazania stopnia wykorzystania potencjału środowiska przyrodniczego do realizacji usług.

Metodyka uzyskania wyników

Procedura obejmowała następujące etapy:

1. Utworzenie mapy spadków na podstawie cyfrowego modelu terenu oraz wyróżnienie pięciu klas nachylenia stoków zgodnie z rekomendacjami przedstawionymi w tabeli 3.
2. Określenie podatności gruntów na erozję (w czterech grupach) na podstawie litologii i wskaźników literaturowych (tab. 3), a następnie reklasyfikacja mapy utworów powierzchniowych.
3. Identyfikacja obszarów reprezentujących pięć klas nasilenia erozji potencjalnej. Do dalszych analiz wybrano jedynie obszary reprezentujące 2, 3, 4 i 5 klasę erozji potencjalnej.

Tabela 3. Zasady określania stopnia nasilenia erozji potencjalnej (Józefaciuk i Józefaciuk, 1996)

Utwory powierzchniowe	Klasy nachylenia terenu				
	<3°	3-6°	6-10°	10-15°	>15°
	Stopnie nasilenia erozji potencjalnej				
Gлина ciężka (gc), ił (i), ił pylasty (ip), mułowo-torfowe (mt), torf niski (n)	0	1	2	3	4
Gлина lekka (gl), glina lekka pylasta (glp), glina średnia (gs), glina średnia pylasta (gsp)	0	1	2	3	4
Piaszek gliniasty lekki (pgl), piaszek gliniasty lekki pylasty (pglp), piaszek gliniasty mocny (pgm), piaszek gliniasty mocny pylasty (pgmp), piaszek słabogliniasty (ps), piaszek słabogliniasty pylasty (psp), żwir piaszczysty (zp)	1	2	3	4	5
Piaszek luźny (pl), piaszek luźny ilasty (pli), piaszek luźny pylasty (plp), pył zwykły (plz)	1	2	3	4	5

4. Określenie współczynnika redukcji erozji dla różnych typów zbiorowisk roślinnych (wg Gassman i in., 2007; Benavidez i in., 2018), zaznaczonych na mapie roślinności Warszawy. Ze względu na duży rozrzut podawanych wartości współczynnika, do dalszych obliczeń przyjęto wartość uśrednioną i zaokrągloną do pierwszej cyfry znaczącej (tab. 4).

Tabela 4. Współczynniki redukcji erozji przypisane poszczególnym typom roślinności

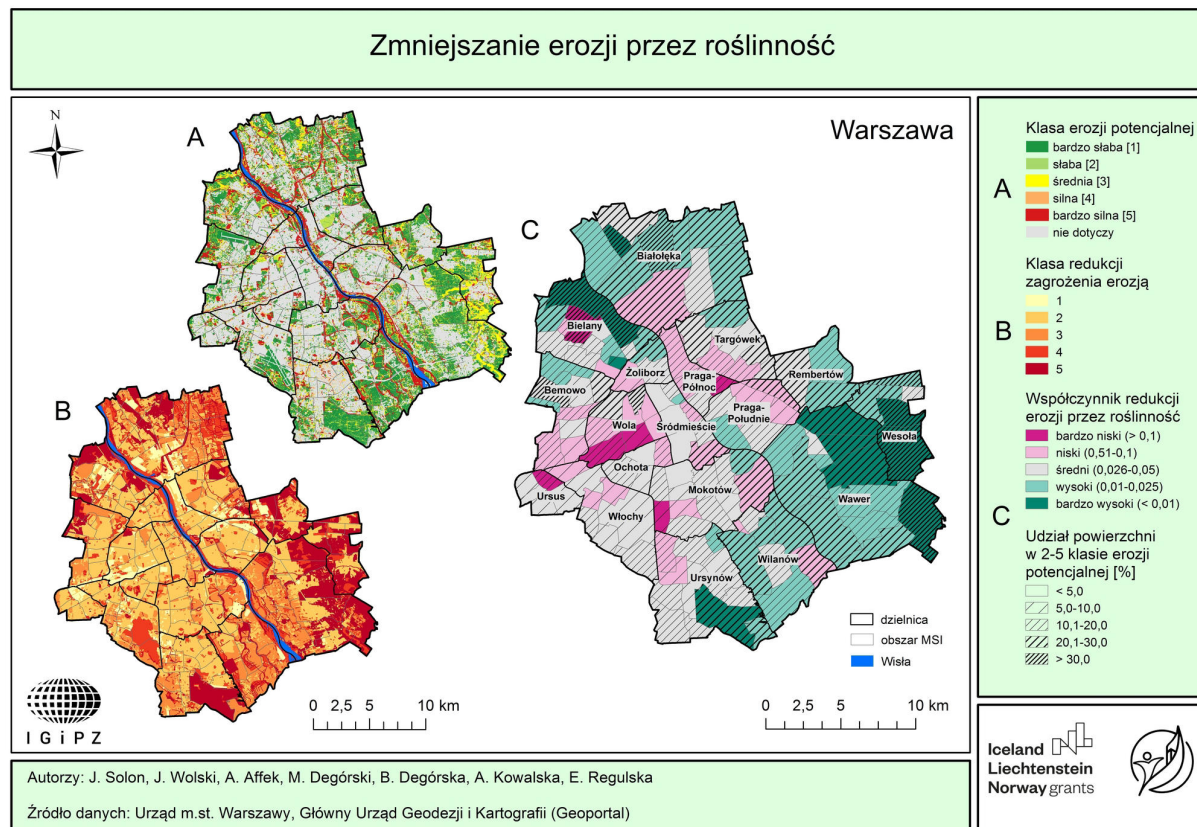
Typ roślinności	Współczynnik redukcji erozji	Klasa redukcji zagrożenia erozją
Roślinność parków, zieleńców, cmentarzy i ogródków działkowych	0,05	3
Roślinność towarzysząca zabudowie mieszkaniowej i usługowej	0,07	2
Roślinność urządzona i spontaniczna terenów sportowych i rekreacyjnych	0,05	2
Roślinność urządzona towarzysząca drogom	0,05	2
Spontaniczne zbiorowiska synantropijne nieużytków oraz terenów przemysłowych i kolejowych	0,1	1
Spontaniczne zbiorowiska synantropijne terenów porolnych oraz towarzyszące uprawom rolnym i ogrodnictwom	0,05	3
Wody oraz zbiorowiska wód stojących i wolno płynących, namulisk, muraw zalewanych, szuwarów trzcinowych i mozgowych, wysokich turzyc i torfowisk przejściowych oraz nadrzecznych ziołorośli, zakrzaceń, zarośli i zadrzewień	0	5
Zbiorowiska łąk i pastwisk wilgotnych i świeżych	0,05	4
Zbiorowiska leśne i zaroślowe borów sosnowych wilgotnych i bagiennych	0,001	5
Zbiorowiska leśne i zaroślowe boru mieszanego	0,001	5
Zbiorowiska leśne i zaroślowe boru sosnowego świeżego	0,002	4
Zbiorowiska leśne i zaroślowe na siedliskach żyznego olsu	0,001	5
Zbiorowiska leśne i zaroślowe na siedliskach łągu topolowego i wierzbowego	0,001	5
Zbiorowiska leśne i zaroślowe na siedliskach łągu wiązowo-jesionowego i jesionowo-olszowego	0,001	5
Zbiorowiska leśne i zaroślowe na siedliskach świetlistej dąbrowy	0,002	4
Zbiorowiska leśne i zaroślowe na siedliskach grądu	0,001	5
Zbiorowiska muraw napiaskowych, psiar i wrzosowisk	0,04	3
Zdegradowane lasy i zarośla z udziałem gatunków obcych	0,005	4

5. Obliczenie ważonego przez powierzchnię zajętą przez poszczególne typy zbiorowisk roślinnych, uśrednionego dla MSI współczynnika redukcji erozji na obszarach reprezentujących łącznie 2, 3, 4 i 5 klasę erozji potencjalnej.

Wartości wskaźnika

Uśrednione wartości współczynnika redukcji erozji wykazują stosunkowo duży rozrzut: od 0,0039 (największa redukcja erozji potencjalnej) w Lesie Kabackim na Ursynowie do 0,182 na obszarze MSI Szamoty (Ursus). Generalnie tereny z najsilniejszą redukcją erozji występują na peryferiach miasta – dotyczy to szczególnie Starej Miłosnej (0,0081), Groszówki (0,0068), Aleksandrowa (0,0056) w części wschodniej Warszawy oraz Młocin (0,0065), Lasu Bielańskiego (0,0076) i Dąbrówki Szlacheckiej (0,0096) w części północno-zachodniej (ryc. 3). Są to jednocześnie obszary MSI o najwyższym udziale powierzchni w 2-5 klasie erozji potencjalnej (powyżej 38%).

Obszary z najniższym pozytywnym wpływem na zahamowanie erozji (relatywnie najwyższe wartości wskaźnika) to przede wszystkim rejon przemysłowe lub cechujące się dużym udziałem powierzchniowej infrastruktury komunikacyjnej. Są to m.in. Czyste i Odolany na Woli, Służewiec na Mokotowie, Huta na Bielanych i Szmulowizna na Pradze-Północ. Należy jednak zauważyć, że udział gruntów w 2-5 klasie narażenia na erozję jest tam niski i mieści się w przedziale 6-18%, a jedynie na obszarze Huta niska wartość świadczenia ekosystemowego jest istotna, gdyż udział gruntów w 2-5 klasie narażenia na erozję przekracza 30%.



Ryc. 3. Zmniejszanie wodnej erozji powierzchniowej przez roślinność

2.3. Przeciwdziałanie podtopieniom i powodziom miejskim

Usługa należy do sekcji REGULACJA I PODTRZYMYWANIE, działu REGULACJA WARUNKÓW FIZYCZNYCH, CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH (tab. 5). Wymiarem ekologicznym świadczenia jest regulacja obiegu wody w warunkach jej nadmiaru z wykorzystaniem właściwości gleb i koron drzew, a użytkowym – łagodzenie lub zapobieganie potencjalnym szkodom dla zdrowia i bezpieczeństwa ludzi oraz dla gospodarki i infrastruktury. Świadczenie może być realizowane przede wszystkim przez niezasklepienie gleby umożliwiające infiltrację nadmiaru wód związanych z nawałnym lub długotrwałym deszczem bądź nagłymi i obfitymi roztopami, jak i dzięki koronom drzew warunkującym m.in. procesy intercepcji. Przedmiotem pomiaru jest zatem zdolność podłoża i koron drzew do regulacji warunków wodnych, a wskaźnikiem średnia wartość współczynnika infiltracyjno-intercepcyjnego.

Tabela 5. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Średnia wartość współczynnika infiltracyjno-intercepcyjnego

Świadczenie ekosystemowe		Przeciwdziałanie podtopieniom i powodziom miejskim
CICES 5.1	Sekcja	Regulacja i podtrzymywanie (biotyczne)
	Dział	Regulacja warunków fizycznych, chemicznych i biologicznych
	Grupa	Regulacja przepływów bazowych (progowych) i zjawisk ekstremalnych
	Klasa	Regulacja cyklu hydrologicznego i przepływu wody (wraz z ochroną przeciwpowodziową i ochroną wybrzeży)
	Kod	2.2.1.3
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Zdolność podłoża i koron drzew do regulacji warunków wodnych
Wskaźnik		Średnia wartość współczynnika infiltracyjno-intercepcyjnego
Akronim		WPII
Potencjał/wykorzystanie/zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Potencjał
Konstrukcja wskaźnika		$(A \times B) + (C \times D)$, gdzie: A – wagi przepuszczalności nadane typom gleb, B – stopień przepuszczalności gruntu, C – stopień zwarcia koron drzew, D – wagi typu ulistnienia drzew
Pośredni/bezpośredni		Pośredni
Prosty/złożony		Złożony
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Przedziałowa
Teoretyczny zakres wartości		0-1
Jednostka miary		–
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI, dzielnica
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane	Opis danych	1. Tree Cover Density 2018, 2. Imperviousness Density 2018, 3. Dominant Leaf Type 2018, 4. mapa utworów powierzchniowych opracowana na podstawie mapy glebowo-rolniczej, 5. mapa dzielnic i obszarów MSI, 6. mapa struktury funkcjonalnej miasta

Dysponent danych	1-3. Europejska Agencja Środowiska (EEA), 4-6. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
Link do bazy danych	1. https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density/status-maps/tree-cover-density-2018 ; 2. https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/status-maps/imperviousness-density-2018 ; 3. https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/dominant-leaf-type/status-maps/dominant-leaf-type-2018
Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	Komórka rastra 10 × 10 m
Format danych	1-3. Rastrowe (GeoTIFF), 4-6. wektorowe (shapefile)
Pokrycie kraju	1-3. Cały kraj, 4-6. Warszawa w granicach administracyjnych
Aktualność danych	1-3. 2018, 4. 1998, 5. 2018 (aktualizowane po zmianach granic), 6. 2021 (aktualizowane na bieżąco)
Dostępność danych	1-3. Dane ogólnodostępne, 4-6. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

Założenia teoretyczne

Rozwój miast powoduje zwiększanie udziału powierzchni nieprzepuszczalnych, zazwyczaj przy jednoczesnym zmniejszaniu areału terenów biologicznie czynnych, co prowadzi do zasklepienia gleb, określanego również jako uszczelnienie gleb lub gruntów. Efektem tych zmian jest pogorszenie właściwości infiltracyjnych podłoża, a tym samym intensyfikacja spływu powierzchniowego wód opadowych, co oprócz większego zagrożenia powodzią miejską i podtopieniami prowadzi do pogorszenia jakości wody i stosunków wodnych (Tu i in., 2007; Livesley, 2016), a także do gwałtownych i ekstremalnych wahań przepływu w strumieniach, powodujących erozję kanałów i degradację siedlisk wodnych (Paul i Meyer, 2001; Schoonover i in., 2006), a na niektórych obszarach również do erozji gleb i ruchów masowych. Uszczelnienie powierzchni ma zatem znaczący wpływ na przepływy wody i cały miejski bilans wodny (Haase i Nuissl, 2007).

W hydrologii zlewni miejskiej drugim elementem składowym istotnym dla opisywanego świadczenia są drzewa. Charakterystyki korony drzewa (gęstość i powierzchnia liści, struktura korony), obok cech opadu (wielkość, intensywność i czas trwania) oraz pogody poprzedzającej opad, są zaliczane do kluczowych czynników cyklu hydrologicznego w miastach (Crockford i Richardson, 2000). Korony drzew skutecznie ograniczają spływ wód opadowych dzięki procesom intercepcji polegającym na częściowym zatrzymywaniu i magazynowaniu opadu atmosferycznego na powierzchni liści, do momentu usunięcia wody wskutek parowania. Mimo że korony drzew ograniczają opad bezpośrednio pod nimi, to jednak oddziaływanie tego procesu ma dużo większy zasięg przestrzenny (Wang i in., 2008). Pozytywna rola drzew wiąże się także ze spływem wód po pniu wprost do niezasklepionej gleby wokół drzewa (Armson i in., 2013). Ponadto korzenie penetrując zagęszczoną glebę zwiększają współczynnik infiltracji (Puchalski i Prusinkiewicz, 1990; Bartens i in., 2008, 2009), co jest ważne zwłaszcza w przypadku urbanoziemów występujących powszechnie w gęstej zabudowie miejskiej.

Odpowiedzialne zagospodarowanie miast z zachowaniem adekwatnych terenów biologicznie czynnych, umożliwiających infiltrację nadmiaru wód, a także drzew (zwłaszcza

lasów miejskich, parków i innych powierzchni zadrzewionych) stanowi jedno z najważniejszych wskazań w zakresie ograniczania podtopień i powodzi miejskich oraz przeciwdziałania i łagodzenia negatywnego wpływu urbanizacji na hydrologię obszarów miejskich. Na świecie wdrażane są systemy zarządzania wodami polegające na tzw. zrównoważonym systemie odwadniającym, które w szerszym wymiarze uwzględniają powierzchnie przepuszczalne i większe wykorzystanie roślinności (O'Sullivan i in., 2011; Armson i in., 2013), a przede wszystkim drzew (Bartens i in., 2009).

Metodyka uzyskania wyników

W celu zobrazowania świadczenia Przeciwdziałanie podtopieniom i powodziom miejskim, wykorzystano wskaźnik uwzględniający właściwości infiltracyjne materiału litologicznego i retencyjne gleb, stopień przepuszczalności gruntu (udział powierzchni niezasklepionych) oraz stopień zwarcia koron drzew jako potencjalną powierzchnię intercepcji, z podziałem na drzewa liściaste i iglaste. Do analiz wykorzystano mapę utworów powierzchniowych opracowaną na podstawie map glebowo-rolniczych, pozyskaną z Biura Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy oraz wysokorozdzielcze warstwy rastrowe, opracowane przez Europejską Agencję Środowiska w ramach programu monitoringu Ziemi Copernicus na podstawie zobrazowań satelitarnych satelity Sentinel-2. Warstwy rastrowe mają rozdzielczość 10×10 m i prezentują dane z 2018 r.

Wzorem matematycznym współczynnika WPPII jest wyrażenie:

$$WPPII = (A \times B) + (C \times D)$$

gdzie:

A – wagi właściwości infiltracyjnych materiału litologicznego określone na podstawie: (1) klasyfikacji przepuszczalności materiału litologicznego (Pazdro i Kozerski, 1990) – od skał nieprzepuszczalnych (iły, gliny ilaste, margle) do dobrze i bardzo dobrze przepuszczalnych (piaski różnoziarniste, średnioziarniste, luźne i słabogliniaste) oraz (2) powiązania skał jako substratu gleb z Systematyką gleb Polski (PTG, 2019) – od czarnych ziem wykształconych w ciężkich iłach (waga 0,1) do gleb bielicowych wykształconych w luźnych piaskach różnoziarnistych lub słabogliniastych (waga 0,8);

B (*Imperviousness Density 2018*) – powierzchnia niezasklepiona wyrażona stopniem przepuszczalności gruntu (wartości 0,0-1,0 odpowiadające odwróconej skali procentowej udziału powierzchni całkowicie nieprzepuszczalnej, od 100 do 0%);

C (*Tree Cover Density 2018*) – potencjalna powierzchnia intercepcji wyrażona stopniem zwarcia koron drzew (wartości 0,0-1,0 odpowiadające skali procentowej udziału powierzchni gruntu zakrytej przez korony drzew w rzucie pionowym, od 0 do 100%);

D (*Dominant Leaf Type 2018*) – typ ulistnienia drzew. Z uwagi na wielkość intercepcji średnią wartość 10% (waga 0,1) redukcji opadu przypisano drzewom iglastym, zaś 20% (waga 0,2) drzewom liściastym (Puchalski i Prusinkiewicz, 1990; Wagner i in., 2013).

Wartości wskaźnika WPPII obliczono wykorzystując algebrę rastrów (po uprzedniej rasteryzacji wektorowej mapy utworów powierzchniowych do rozdzielczości 10×10 m), a następnie wyliczając średnią ze wszystkich komórek w danej przestrzennej jednostce odniesienia za pomocą funkcji *Zonal Statistics as Table* (ArcGIS 10.2).

Wartości wskaźnika

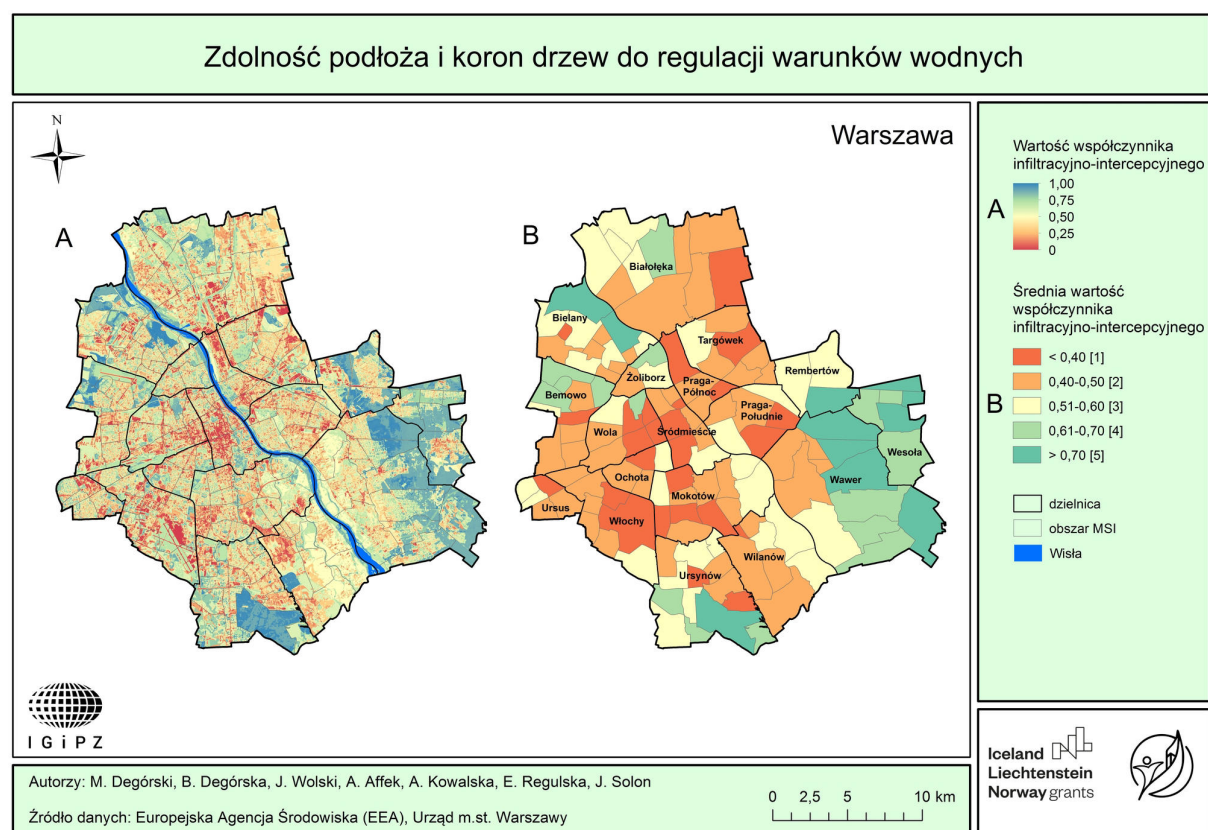
Średnia wartość współczynnika infiltracyjno-intercepcyjnego w poszczególnych jednostkach terytorialnych waha się od poniżej 0,40 w gęsto zaludnionych obszarach Śródmieścia, Ochoty, Woli do ponad 0,70 w dzielnicach Wawer (m.in. Anin, Międzyziesie, Miedzeszyn, Aleksandrów), Mokotów (Powsin) czy Bielany (Las Bielański, Młociny). Generalnie najniższe wartości charakteryzują przede wszystkim śródmiejską część miasta o dużym zasklepieniu gleb (min. 0,23 – Mirów na Woli), zaś najwyższe – tereny peryferyjne, o luźnej zabudowie domów jednorodzinnych, a przede wszystkim obszary leśne cechujące się najlepszą przepuszczalnością podłoża (gleby bielicowe wykształcone w luźnych i różnoziarnistych piaskach) i znaczącą intercepcją zwartych koron drzew. Należą do nich: Las Kabacki (maks. 0,93), Las Bielański, czy rozległe kompleksy leśne Mazowieckiego Parku Krajobrazowego, którego część znajduje się w granicach administracyjnych Warszawy (południowo-wschodnia część miasta). Transformując otrzymane wartości do pięciostopniowej skali potencjału omawianej usługi w mieście przyjęto następujące przedziały ($<0,40 \rightarrow 1$; $0,40-0,50 \rightarrow 2$; $0,51-0,60 \rightarrow 3$; $0,61-0,70 \rightarrow 4$; $>0,70 \rightarrow 5$) (ryc. 4).

Z przedstawionym zróżnicowaniem przestrzennym wskaźnika w obrębie jednostek terytorialnych silnie korespondują jego wartości w poszczególnych klasach struktury funkcjonalnej miasta. Niskie wartości wskaźnika notuje się na obszarach zajętych przez wielkopowierzchniowe obiekty handlowe (0,09), zaś najwyższe charakteryzują tereny leśne (0,84), a w dalszej kolejności tereny zieleni nieurządzonej z dominacją zadrzewień (0,71) i zieleni urządzonej (0,69) (tab. 6).

Tabela 6. Średnia wartość współczynnika infiltracyjno-intercepcyjnego jako wskaźnik zdolności podłoża i koron drzew do regulacji warunków wodnych. W nawiasach wielkość potencjału w skali od 1 do 5

Funkcja terenu	Wartość wskaźnika
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna	0,30 [1]
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna (osiedla o podwyższonym udziale zieleni)	0,51 [3]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna	0,47 [2]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna (na terenach leśnych)	0,65 [4]
Usługi handlu wielkopowierzchniowego	0,09 [1]
Usługi o charakterze społecznym (oświata)	0,42 [2]
Usługi o charakterze społecznym (nauka)	0,46 [2]
Usługi o charakterze społecznym (kultura)	0,36 [1]
Usługi o charakterze społecznym (zdrowie)	0,42 [2]
Usługi inne (administracja publiczna)	0,43 [2]
Usługi inne (handel)	0,25 [1]
Usługi inne (kult religijny)	0,39 [1]
Usługi inne (biura)	0,26 [1]
Usługi inne (turystyka/hotele)	0,28 [1]
Usługi sportowe (z kubaturą)	0,35 [1]
Sport i rekreacja (boiska/place zabaw)	0,58 [3]
Tereny produkcyjno-usługowe, magazynowe, poprodukcyjne	0,26 [1]
Las	0,84 [5]
Zieleń urządzona	0,69 [4]
Zieleń nieurządzona z dominacją zadrzewień	0,71 [5]
Zieleń inna, obszary niezabudowane i niezagospodarowane	0,55 [3]
Ogrody działkowe	0,59 [3]

Cmentarze	0,63 [4]
Obszary użytkowane rolniczo i porolne	0,52 [3]
Infrastruktura techniczna	0,39 [1]
Zajezdnie, obiekty i urządzenia obsługi transportu zbiorowego	0,21 [1]
Obiekty i urządzenia obsługi komunikacji drogowej	0,30 [1]
Lotniska	0,48 [2]
Obiekty i urządzenia transportu kolejowego	0,50 [2]
Drogi	0,37 [1]



Ryc. 4. Zdolność podłoża i koron drzew do regulacji warunków wodnych

2.4. Regulacja składu chemicznego atmosfery

Usługa należy do sekcji REGULACJA I UTRZYMANIE, działu REGULACJA WARUNKÓW FIZYCZNYCH, CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH wg CICES V5.1 (tab. 7). Polega ona na regulacji stężeń gazów w atmosferze, w tym głównie dwutlenku węgla, które wpływają na globalny klimat. Przedmiotem pomiaru jest wykorzystanie roślinności w mieście do regulacji składu chemicznego atmosfery, a wskaźnikiem korzystania z tej usługi jest średnia produkcja pierwotna brutto w ciągu roku.

Tabela 7. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Średnia produkcja pierwotna brutto w ciągu roku

Świadczenie ekosystemowe	Regulacja składu chemicznego atmosfery
CICES	Sekcja
5.1	Dział
	Regulacja i utrzymanie
	Regulacja warunków fizycznych, chemicznych i biologicznych

	Grupa	Skład atmosfery i warunki atmosferyczne
	Klasa	Regulacja składu chemicznego atmosfery i oceanów
	Kod	2.2.6.1
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Wykorzystanie roślinności w mieście do regulacji składu chemicznego atmosfery
Wskaźnik		Średnia produkcja pierwotna brutto w ciągu roku
Akronim		PROD
Potencjał/wykorzystanie/ zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Wykorzystanie
Konstrukcja wskaźnika		Obliczenie średniej produkcji pierwotnej brutto w ciągu roku z pól podstawowych 10 × 10 m
Pośredni/bezpośredni		Pośredni
Prosty/złożony		Prosty
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0-∞
Jednostka miary		PPI (plant phenology index) × dzień
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane źródłowe	Opis danych	1. Wysokorozdzielcza warstwa rastrowa przedstawiająca całkowitą produkcję pierwotną brutto w roku 2020 (Season 1 + Season 2 Total Productivity) o komórce rastra 10 × 10 m, 2. mapa dzielnic i obszarów MSI, 3. mapa struktury funkcjonalnej miasta
	Dysponent danych	1. Europejska Agencja Środowiska (EEA), 2, 3. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
	Link do bazy danych	https://land.copernicus.eu/pan-european/biophysical-parameters/high-resolution-vegetation-phenology-and-productivity/data-access-hr-vpp
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	Komórka rastra 10 × 10 m
	Format danych	1. Rastrowe (GeoTIFF), 2-3. wektorowe (shapefile)
	Pokrycie kraju	1. Cały kraj, 2-3. Warszawa w granicach administracyjnych
	Aktualność danych	1. 2020 (aktualizowane co rok), 2. 2018 (aktualizowane po zmianach granic), 3. 2021 (aktualizowane na bieżąco)
	Dostępność danych	1. Dane ogólnodostępne, 2-3. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

Założenia teoretyczne

Atmosfera determinuje warunki życia na Ziemi. Chroni świat organizmów żywych przed wpływem szkodliwego promieniowania kosmicznego i pełni funkcję dwukierunkowego transmittera cząsteczek między oceanami a lądem, odpowiadając tym samym za przebieg cykli biogeochemicznych w obrębie całej ekosfery. Skład tej gazowej powłoki, ewoluując przez miliardy lat wraz z kształtowaniem się naszej planety, długo zmieniał się wyłącznie pod wpływem czynników naturalnych. Wraz z pojawieniem się człowieka zostały zainicjowane

także wpływy kulturowe, ale do gwałtownych zmian antropogenicznych doszło dopiero w ostatnich 200 latach.

Obecnie największym środowiskowym zagrożeniem zdrowia w skali globalnej jest szeroko rozumiane zanieczyszczenie atmosfery (Gakidou i in., 2017). Szczególnie trudna sytuacja ma miejsce w miastach. Blisko 80% ludności miejskiej w krajach Unii Europejskiej narażona jest na co dzień na stężenia szkodliwych substancji przekraczające normy jakości powietrza określone przez Światową Organizację Zdrowia (EEA, 2019). Coraz mniejsza ilość „powietrza w powietrzu” prowadzi m.in. do powstawania smogu i kwaśnych deszczów, ubożenia warstwy ozonowej w stratosferze, zmian bilansu promieniowania (tzw. dodatnie wymuszanie radiacyjne), a w konsekwencji przyczynia się do globalnego ocieplenia.

Najważniejszym składnikiem mieszanki antropogenicznych gazów cieplarnianych jest dwutlenek węgla (Garnaut, 2008). Związana głównie z nim mitygacja zmian klimatycznych obejmuje zarówno przyczyny (np. rozwój niskoemisyjnych źródeł energii, dekarbonizację gospodarki), jak i skutki (wychwytywanie, transport i składowanie CO₂). Kosztochłonność i liczne bariery technologiczne, prawne i środowiskowe powodują jednak, że żadne z dotychczasowych rozwiązań z zakresu geoinżynierii klimatu nie weszło do powszechnego użycia, ani nie stało się ogólnosiwiatowym standardem.

Najtańszym, najmniej konfliktogennym i do tego niosącym liczne dodatkowe korzyści rozwiązaniem w ekosystemach zurbanizowanych jest biosekwestracja węgla, czyli wykorzystanie naturalnej zdolności wszelkich roślin lądowych do wiązania CO₂ z atmosfery w procesie fotosyntezy. Średnia produkcja pierwotna brutto w ciągu roku (w tym zwłaszcza w czasie zasadniczego sezonu wegetacyjnego) może być pośrednim wskaźnikiem zarówno wielkości biosekwestracji, jak i jej zróżnicowania między poszczególnymi jednostkami terytorialnymi miasta.

Usługa regulacji składu chemicznego atmosfery tworzy wiązkę z innymi usługami regulacyjnymi (procesy rozkładu i wiązania oraz ich wpływ na jakość gleb oraz filtracja /sekwestracja /magazynowanie /akumulacja przez mikroorganizmy, glony, rośliny i zwierzęta) oraz z usługami zaopatrzeniowymi z działu 1.1 CICES V5.1 (biomasa). Wskaźnik może mieć zastosowanie do pokazania korzystania z wymienionych usług regulacyjnych oraz stopnia wykorzystania potencjału środowiska przyrodniczego do produkcji biomasy z możliwym przeznaczeniem na konsumpcję, wytworzenie materiałów lub energii.

Metodyka uzyskania wyników

Do zaprezentowania w sposób pośredni możliwości wiązania dwutlenku węgla z atmosfery w procesie fotosyntezy wykorzystano wysokorozdzielcze warstwy rastrowe przedstawiające całkowitą produkcję pierwotną brutto w ciągu roku (*Total productivity – season 1, season 2*), opracowane przez Europejską Agencję Środowiska w ramach programu monitoringu Ziemi Copernicus na podstawie zobrażeń satelitarnych satelity Sentinel-2. Przedmiotowe warstwy mają rozdzielczość 10 × 10 m i prezentują dane z 2020 r. Ze względu na nierównomierny (zróżnicowany w czasie) przyrost biomasy roślinnej w różnych ekosystemach, parametry fenologiczne rejestrowane są dla dwóch sezonów w ciągu roku. Każda komórka rastra zawiera informację o całkowitej produkcji pierwotnej brutto w danym sezonie, wyrażonej w bezwymiarowych jednostkach PPI × dzień, gdzie PPI oznacza wartość wskaźnika fenologii

roślin (*plant phenology index*) (Jin i Eklundh, 2014) związanego z krzywą wzrostu sezonowego. Wielkość produkcji pierwotnej brutto dla całego roku uzyskano sumując wartości z dwóch sezonów, a następnie obliczając średnią ze wszystkich komórek w danej przestrzennej jednostce odniesienia za pomocą funkcji *Zonal Statistics as Table* (ArcGIS 10.2).

Wartości wskaźnika

Wskaźnik wykorzystania roślinności do regulacji składu chemicznego atmosfery, pokazujący średnią produkcję pierwotną brutto w ciągu roku w poszczególnych jednostkach odniesienia, przyjmuje wartości od 270 (obszar Mirów w dzielnicy Wola) do 1554 (tzw. królewska część dzielnicy Wilanów). Generalnie najniższe wartości charakteryzują przede wszystkim śródmiejską część miasta, zaś najwyższe: niemal cały Wilanów, obszary na styku Mokotowa i Wawra oraz wschodnią część Białołęki (ryc. 5). Związane jest to przede wszystkim z dużymi powierzchniami zajęтыми przez obszary niezabudowane i tereny porolne (np. „dzika” dolina Wisły), rozległy kompleks leśny (Las Kabacki) czy zabudowę wiejską z łąkami (Augustówka, Zawady, peryferia Białołęki). Wysoką produkcją wyróżniają się także lotniska z terenami przyległymi objętymi restrykcjami zabudowy (Okęcie, Bemowo), stare nekropolie (Powązki) czy zwarte i zarazem izolowane kompleksy leśne (Las Bielański). Transformując wartości procentowe do pięciostopniowej skali wykorzystania tej usługi w mieście przyjęto następujące przedziały (<500 → 1; 500-700 → 2; 700-900 → 3; 900-1100 → 4; >1100 → 5).

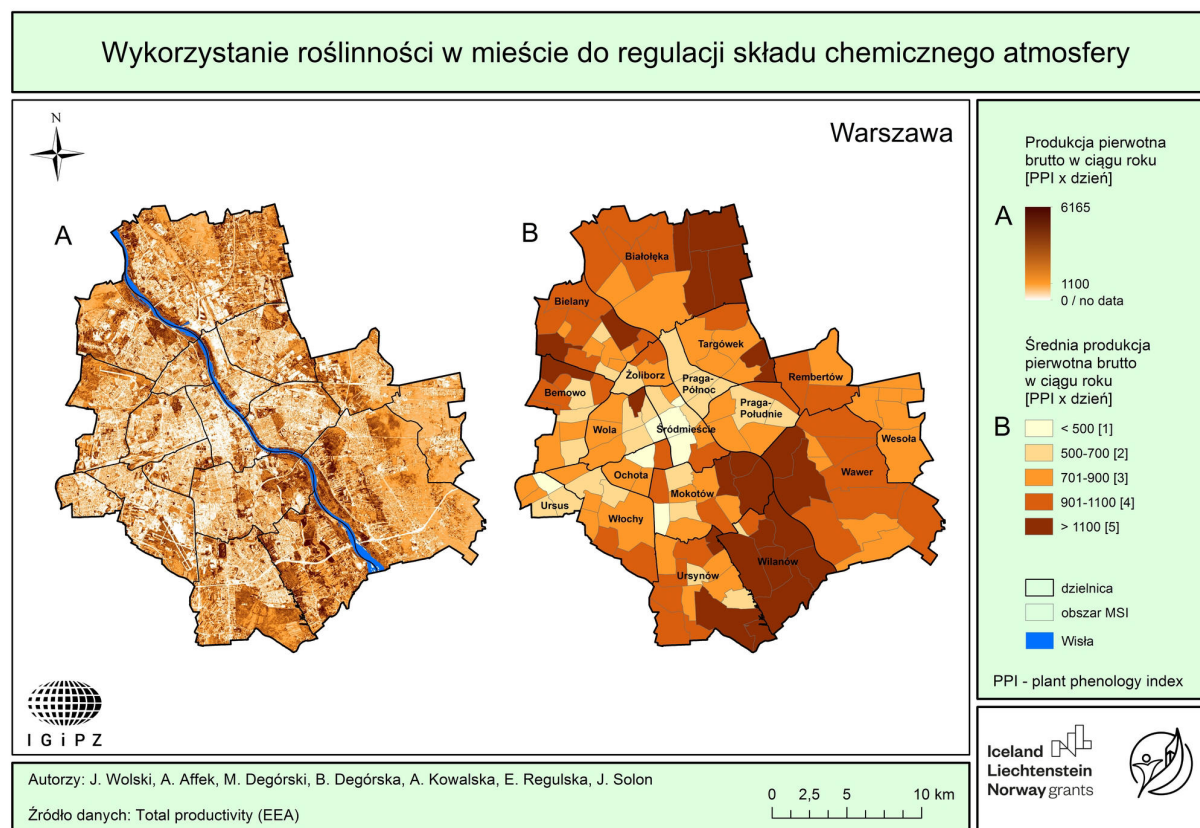
Z przedstawionym zróżnicowaniem przestrzennym wskaźnika w obrębie jednostek terytorialnych silnie korespondują jego wartości w poszczególnych klasach struktury funkcjonalnej miasta (tab. 8). Niskie wartości wskaźnika notuje się na obszarach zajętych przez obiekty handlowe, biura, zakłady produkcyjne, magazyny, infrastrukturę transportową, ale także przez zwartą zabudowę wielorodzinną. Obszarami o najwyższych wartościach produkcji pierwotnej brutto są natomiast tereny związane z rolnictwem, zielenią „dziką” i urządzoną, a także ogródki działkowe i zielone obiekty sportowo-rekreacyjne, a dopiero w następnej kolejności lasy. Relatywnie wysokie wartości dla dróg i wód powierzchniowych tłumaczyć należy specyfiką analiz obrazów rastrowych, a co za tym idzie – zaliczeniem do wspomnianych klas pasów zieleni między jezdniami oraz roślinności rosnącej w skrajni dróg i nad brzegami akwenów.

Tabela 8. Średnia produkcja pierwotna brutto w ciągu roku jako wskaźnik wykorzystania roślinności w mieście do regulacji składu chemicznego atmosfery. W nawiasach wykorzystanie w skali od 1 do 5

Funkcja terenu	Wartość wskaźnika [PPI × dzień]
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna	433,1 [1]
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna (osiedla o podwyższonym udziale zieleni)	790,6 [3]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna	768,4 [3]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna (na terenach leśnych)	865,1 [3]
Usługi handlu wielkopowierzchniowego	200,5 [1]
Usługi o charakterze społecznym (oświata)	640,4 [2]
Usługi o charakterze społecznym (nauka)	722,0 [3]
Usługi o charakterze społecznym (kultura)	509,0 [2]
Usługi o charakterze społecznym (zdrowie)	616,3 [2]
Usługi inne (administracja publiczna)	633,8 [2]

Usługi inne (handel)	360,0 [1]
Usługi inne (kult religijny)	644,8 [2]
Usługi inne (biura)	384,4 [1]
Usługi inne (turystyka/hotele)	427,9 [1]
Usługi sportowe (z kubaturą)	747,7 [3]
Sport i rekreacja (boiska/place zabaw)	1271,8 [5]
Tereny produkcyjno-usługowe, magazynowe, poprodukcyjne	401,5 [1]
Las	1156,4 [5]
Zieleń urządzona	1481,4 [5]
Zieleń nieurzadzona z dominacją zadrzewień	1503,3 [5]
Zieleń inna, obszary niezabudowane i niezagospodarowane	1261,1 [5]
Ogrody działkowe	1293,7 [5]
Cmentarze	971,8 [4]
Obszary użytkowane rolniczo i porolne	1509,5 [5]
Wody powierzchniowe	491,6 [1]
Wody powierzchniowe (na terenach parków)	724,4 [3]
Infrastruktura techniczna	749,7 [3]
Zajezdnie, obiekty i urządzenia obsługi transportu zbiorowego	361,0 [1]
Obiekty i urządzenia obsługi komunikacji drogowej	493,9 [1]
Lotniska	964,4 [4]
Obiekty i urządzenia transportu kolejowego	700,3 [3]
Drogi	560,4 [2]

PPI – Plant Phenology Index (Jin i Eklundh, 2014)



Ryc. 5. Wykorzystanie roślinności w mieście do regulacji składu chemicznego atmosfery

2.5. Regulacja temperatury i wilgotności powietrza

Usługa należy do sekcji REGULACJA I UTRZYMANIE, działu REGULACJA WARUNKÓW FIZYCZNYCH, CHEMICZNYCH I BIOLOGICZNYCH wg CICES V5.1 (tab. 9). Polega ona na modyfikacji warunków atmosferycznych otoczenia (w tym mikro- i mezoskalowych), w szczególności na obniżaniu temperatury latem i podnoszeniu wilgotności powietrza, poprzez obecność roślin, co w efekcie poprawia warunki życia ludzi. Przedmiotem pomiaru jest niezaspokojone zapotrzebowanie na redukcję miejskiej wyspy ciepła, a wskaźnikiem zapotrzebowania na tę usługę jest różnica temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej.

Tabela 9. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Różnica temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej

Świadczenie ekosystemowe		Regulacja składu chemicznego atmosfery
CICES 5.1	Sekcja	Regulacja i utrzymanie
	Dział	Regulacja warunków fizycznych, chemicznych i biologicznych
	Grupa	Skład atmosfery i warunki atmosferyczne
	Klasa	Regulacja temperatury i wilgotności, w tym przewietrzania i transpiracji
	Kod	2.2.6.2
Przedmiot pomiaru (Indicatum)		Niezaspokojone zapotrzebowanie na redukcję miejskiej wyspy ciepła
Wskaźnik		Różnica temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej
Akronim		TEMP
Potencjał/wykorzystanie/zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Niezaspokojone zapotrzebowanie
Konstrukcja wskaźnika		Obliczenie temperatury powierzchni terenu w upalnym dniu w szczycie sezonu wegetacyjnego z kanałów spektralnych Landsat 8 i odjęcie wartości referencyjnej (odnotowanej wewnątrz dużych obszarów pokrytych roślinnością w obrębie miasta)
Pośredni/bezpośredni		Bezpośredni
Prosty/złożony		Prosty
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		$-\infty - \infty$
Jednostka miary		Stopnie Celsjusza [°C]
Jednostka przestrzenna odniesienia		Dzielnica, obszar MSI, funkcja terenu
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane źródłowe	Opis danych	Jedna scena 170 × 185 km. Zestaw 11 geokodowanych plików rastrowych odpowiadających 11 kanałom spektralnym (B1-B11) z dołączonymi metadanymi tekstowymi
	Dysponent danych	United States Geological Survey (USGS)
	Link do bazy danych	https://earthexplorer.usgs.gov
	Minimalna jednostka	Komórka rastra 30 × 30 m

mapowania/rozdzielczość	
Format danych	Dane rastrowe (GeoTIFF)
Pokrycie kraju	Cały kraj
Aktualność danych	20.06.2013 r. (wytypowana scena)
Dostępność danych	Dane ogólnodostępne, darmowe

Założenia teoretyczne

Z punktu widzenia jakości życia w mieście szczególnie niebezpieczne są wysokie temperatury powietrza. Na obszarze Polski do końca XXI w. prognozuje się następujące zmiany klimatu w zakresie temperatur wysokich: (1) rosnącą tendencję zmian z wyraźnym przyspieszeniem w ostatnim trzydziestoleciu; (2) większy wzrost w lecie, zwłaszcza w południowo-wschodniej Polsce; (3) wzrost liczby dni gorących ($t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$), dni upalnych ($t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) oraz fal upałów (ciągi przynajmniej 3 kolejnych dni upalnych); (4) wydłużenie okresów występowania fal gorąca i upałów (KLIMADA, 2013).

Na obszarach zurbanizowanych globalny wzrost temperatury powietrza jest dodatkowo wzmacniany efektem miejskiej wyspy ciepła (MWC). MWC definiuje się jako *zjawisko klimatyczne polegające na występowaniu podwyższonej temperatury powietrza w mieście w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych* (Błażejczyk i in., 2014, s. 9). Zjawisko należy do bardzo złożonych, ponieważ generuje je wiele czynników, a głównie: (1) nagromadzenie powierzchni, które pochłaniają więcej promieni słonecznych niż odbijają, a następnie tę energię oddają otoczeniu (materiałów budowlanych wykorzystanych do wzniesienia budynków, zwłaszcza wysokich, pokrytych ciemnymi dachami, powierzchni wybrukowanych i asfaltowych); (2) intensywność zabudowy i jej struktura z charakterystycznymi głównie dla starszej zabudowy śródmiejskiej wąskimi, niejednokrotnie głębokimi, kanionami ulicznymi; (3) niewielki udział błękitnej i zielonej infrastruktury, a zwłaszcza drzew ważnych z punktu widzenia schładzania miast przez zacienienie i ewapotranspirację; (4) dodatkowa emisja ciepła antropogenicznego, m.in. przez silniki samochodowe, przemysł, a w okresie letnim przez klimatyzatory i inne urządzenia chłodnicze; (5) wpływ efektu cieplarnianego. Intensywność MWC jest łączona z wielkością miast (duże miasta generują większą intensywność MWC), jak i z ich położeniem (wpływ warunków klimatycznych i topografii) (EEA, 2012).

W okresie występowania wysokich temperatur powietrza MWC wykazuje obciążający wpływ na funkcjonowanie organizmu (Kuchcik, 2001, 2006, 2013, 2017; Kuchcik i Błażejczyk, 2001; Kozłowska-Szczęsna i in., 2004; Pałczyński i in., 2012). Zwiększa stres cieplny, który kształtuje się następująco: $>46^{\circ}\text{C}$ – nieznosny stres ciepła; $38,1\text{--}46,0^{\circ}\text{C}$ – bardzo silny stres; $32,1\text{--}38,0^{\circ}\text{C}$ – silny stres; $26,1\text{--}32,0^{\circ}\text{C}$ – umiarkowany stres (wg uniwersalnego wskaźnika obciążeń cieplnych organizmu UTCI – Błażejczyk i in., 2014). Natomiast temperatury w przedziale $18,1\text{--}26,0^{\circ}\text{C}$ należą do strefy komfortu termicznego (IUPS, 2003). Na komfort termiczny i zdrowie mieszkańców obciążający wpływ mają zarówno dni gorące i upalne, jak i noce bardzo ciepłe ($t_{\min} > 18^{\circ}\text{C}$) i gorące ($t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$), a przede wszystkim utrzymujące się fale upałów przy braku chłodzącego efektu nocy. Z uwagi na wiek najbardziej narażeni są ludzie starsi (>65 lat) i małe dzieci (Kuchcik, 2006, 2013, 2017), a pod względem koncentracji ludności – głównie mieszkańcy dużych miast (Degórska,

2014). W grupie wiekowej powyżej 65 roku życia wykazano znaczący wzrost zgonów związanych z falami upałów (przykładowo w Warszawie w związku z falą upałów z lipca 1994 r. z temperaturą $>36^{\circ}\text{C}$ w przypadku osób z chorobami układu krążenia wzrost ten wyniósł aż 37% – Kuchcik, 2006, 2013). Oprócz skutków zdrowotnych MWC zwiększa zapotrzebowanie na energię w okresie letnim, koszty klimatyzacji, zanieczyszczenie powietrza i emisję gazów cieplarnianych oraz wpływa na obniżenie jakości wody.

Błażejczyk (2002) badając rozkład przestrzenny MWC w Warszawie wykazał, że z największym nasileniem występuje w obszarach o warunkach sprzyjających jej tworzeniu, czyli w strefach bardzo intensywnej zabudowy, rejonach przemysłowo-składowych, dużych zakładach przemysłowych i elektrociepłowni. Niska zabudowa na relatywnie dużych działkach wpływa tylko w nieznacznym zakresie na rozwój MWC, podczas gdy zwiększanie intensywności zabudowy, zwłaszcza wielokondygnacyjnej w połączeniu z bardzo niskim udziałem terenów biologicznie czynnych, powoduje wzrost intensywności MWC. W Warszawie w początkach XXI w. zidentyfikowano znaczny ubytek terenów biologicznie czynnych – w strefie śródmiejskiej głównie zieleni parkowej, osiedlowej i ulicznej (Degórska, 2008, 2012) oraz postępującą zabudowę części systemu wentylacji miasta, którego korytarze powinny umożliwiać wnikanie schłodzonego powietrza do stref intensywnej zabudowy. Stwierdzono rozwój MWC, której zasięg i intensywność w 2011 i 2012 r. były już znacznie większe niż w 2001 i 2002 r. (Błażejczyk i in., 2014).

MWC określana jest na podstawie dwóch charakterystyk: (1) temperatury powietrza (atmosferyczna MWC) lub (2) temperatury powierzchni (powierzchniowa MWC). Różnicuje je zarówno intensywność przestrzenna, jak i czas występowania. Powierzchniowa MWC jest bardziej intensywna latem niż zimą oraz w dzień niż w nocy. Odmiennie, atmosferyczna MWC jest silniejsza w zimie i najbardziej intensywna nocą lub o świcie (Akbari i in., 2008; Błażejczyk i in., 2014). Prezentowany wskaźnik odnosi się do powierzchniowej MWC (tab. 9). Różnice termiczne pomiędzy różnymi formami użytkowania ziemi i miejscami o różnym stopniu zacienienia w przypadku powierzchniowej MWC są bardziej znaczące od atmosferycznej. Przykład z badań prowadzonych w miastach amerykańskich wskazuje, że w gorący, słoneczny, letni dzień słońce może ogrzać suche, odsłonięte powierzchnie miejskie, takie jak dachy i chodniki, do temperatury od 27 do 50°C wyższej niż powietrze, podczas gdy powierzchnie zacienione lub wilgotne, często w bardziej wiejskim otoczeniu, utrzymują temperaturę zbliżoną do temperatury powietrza (EPA, 2008). Natomiast różnica w temperaturze powierzchni ziemi w ciągu dnia pomiędzy obszarami zabudowanymi i wiejskimi wynosi średnio od 10 do 15°C , a w nocy jest zazwyczaj mniejsza i wynosi od 5 do 10°C (EPA, 2008).

Obszary biologicznie czynne poprzez zacienienie, ewapotranspirację i intercepcję przyczyniają się zatem do zmniejszania temperatury powietrza w mieście. Oprócz roli drzew, zapewniających najwięcej cienia oraz zieleni urządzonej i nieurządzonej, ostatnio coraz większe znaczenie przypisuje się zielonym dachom i ścianom, w sposób naturalny obniżającym temperaturę wewnątrz mieszkań i w otoczeniu budynków, a także wodzie w mieście. Mając na celu redukcję MWC, jako kluczową usługę świadczoną przez ekosystemy na obszarach miejskich należy wskazać schładzanie miast przez błękitną i zieloną infrastrukturę.

Metodyka uzyskania wyników

Do zaprezentowania w sposób bezpośredni niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła, czyli obniżenia temperatury w obszarach zurbanizowanych, wykorzystano zobrazenia multispektralne zarejestrowane przez satelitę Landsat 8. Do obliczenia temperatury powierzchni terenu (ang. *Land Surface Temperature*, LST) wykorzystano przede wszystkim kanał termalny B10, oryginalnie rejestrowany w rozdzielczości 100×100 m oraz pomocniczo kanały B4 i B5 w rozdzielczości 30×30 m do wprowadzenia korekty uwzględniającej zróżnicowaną emisyjność podłoża.

Aby najlepiej uchwycić efekt powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i jego zróżnicowanie przestrzenne oraz zapotrzebowanie na redukcję temperatury możliwe do zaspokojenia przez ekosystemy (w tym głównie roślinność) przyjęto następujące założenia co do warunków w momencie rejestracji zobrazenia satelitarnego:

- godziny południowe (11.00-13.00),
- szczyt sezonu wegetacyjnego (optymalnie czerwiec),
- brak opadów (także w ciągu 3 dni przed rejestracją sceny),
- brak chmur,
- temperatura powietrza $>26^{\circ}\text{C}$,
- prędkość wiatru <5 m/s,
- promieniowanie słoneczne nadążne (na płaszczyznę, na którą składowa bezpośrednia promieniowania pada prostopadle) >900 W/m².

Do analizy wybrano jedną, prawie bezchmurną (0,84% chmur) scenę zarejestrowaną o 11:34 czasu lokalnego w dniu 20.06.2013 r. (ID sceny: LC81880242013171LGN01). Wysokość słońca nad horyzontem w momencie rejestracji sceny wynosiła 59° . Scena ta jako jedyna z lat 2013-2021 spełnia wszystkie przyjęte wcześniej warunki. Dane meteorologiczne z pomiarów naziemnych na stacjach w Ursusie ($52^{\circ}10'53''\text{N}$, $20^{\circ}52'13''\text{E}$) i SGGW na Ursynowie ($52^{\circ}09'37,4''\text{N}$, $21^{\circ}03'11,9''\text{E}$) wskazywały, że w momencie pomiaru temperatura powietrza wynosiła 27°C , wilgotność względna – 40%, ciśnienie – 1005 hPa, prędkość wiatru – 4 m/s z kierunku 135° , promieniowanie słoneczne nadążne – 920 W/m². Do pomiarów natężenia całkowitego napromienienia słonecznego wykorzystano pyranometry firmy Kipp&Zonnen zamontowane na obrotnicy na kampusie SGGW na Ursynowie. Stanowisko to obsługiwane jest przez Zakład Gospodarki Energetycznej Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW. W dniu pomiaru opadów nie było, ostatni opad odnotowano 14.06 (0,2 mm), zaś ostatni większy opad wystąpił w dniu 10.06 (11 mm). Historyczne, naziemne dane meteorologiczne pozyskano ze strony <https://www.meteo.waw.pl/>.

Scena swym zasięgiem w pełni obejmuje Warszawę w jej granicach administracyjnych. Dane pochodzą z Kolekcji 2 Landsat poziomu 1 (Landsat Collection 2 Level-1). W tej kolekcji znajdują się produkty w odwzorowaniu UTM o najwyższej jakości geometrycznej i radiometrycznej (przeszły najbardziej zaawansowany proces przetwarzania). Warstwa prezentująca dane z kanału termalnego B10 została już w preprocesingu przepróbkowana do rozdzielczości 30×30 m i tak przygotowaną warstwę razem z pozostałymi 10 pozyskano z bazy USGS za pomocą aplikacji EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (ID produktu: LC08_L1TP_188024_20130620_20200912_02_T1).

Do obliczeń LST wykorzystano zmodyfikowany tzw. jednokanałowy algorytm opracowany przez Jimenez-Munoz i in. (2009), który daje wielkość błędu (*Root Mean Square Error*) 1°C w porównaniu z danymi z pomiarów terenowych. Niezbędne wartości parametrów i opis poszczególnych kroków zaczerpnięto z publikacji (Sobrino i in., 2004; Weng i in., 2004; Wang i in., 2015; Avdan i Jovanovska, 2016), a także ze stron USGS (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>) i GISCrack (<https://giscrack.com/how-to-calculate-land-surface-temperature-with-landsat-8-images/>).

Algorytm zaprezentowano schematycznie na ryc. 6. Obliczenia LST prowadzono w oprogramowaniu ArcGIS, przede wszystkim korzystając z funkcji kalkulatora obrazu rastrowego (ang. *raster calculator*), po uprzednim docięciu wszystkich warstw do granic administracyjnych Warszawy. Algorytm składa się z następujących kroków:

Krok 1. Obliczenie radiancji spektralnej na górnej granicy atmosfery (L).

W celu obliczenia TOA (L) korzysta się ze wzoru:

$$L = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (1),$$

gdzie M_L reprezentuje multiplikatywny współczynnik przeskalowania specyficzny dla pasma 10, zapisany w metadanych (RADIANCE_MULT_BAND_x, gdzie x to numer pasma), Q_{cal} jest wartością piksela dla pasma 10, a A_L jest addytywnym współczynnikiem przeskalowania specyficznym dla pasma, także zapisanym w metadanych (RADIANCE_ADD_BAND_x, gdzie x to numer pasma). W przypadku analizowanej sceny wzór przyjmuje postać $L = 0,0003342 \cdot Q_{cal} + 0,1$.

Krok 2. Konwersja radiancji spektralnej na temperaturę przy sensorze (BT).

Wykorzystując stałe fizyczne konwertuje się radiancję na tzw. temperaturę jasnościową (BT) z wykorzystaniem wzoru:

$$BT = (K_2 / \ln ((K_1 / L) + 1)) - 273,15 \quad (2),$$

gdzie K_1 i K_2 oznaczają stałe termiczne konwersji specyficzne dla pasma zawarte w metadanych (K1_CONSTANT_BAND_x oraz K2_CONSTANT_BAND_x, gdzie x to numer pasma termalnego, w tym przypadku 10). Aby otrzymać wyniki w stopniach Celsjusza, temperaturę jasnościową koryguje się przez dodanie zera bezwzględnego (-273,15°C). Wzór po wstawieniu stałych przyjmuje postać $BT = (1321,0789 / \ln ((774,8853 / L) + 1)) - 273,15$.

Krok 3. Obliczenie znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji (NDVI – *Normal Difference Vegetation Index*).

Do zastosowania algorytmu jednokanałowego i uwzględnienia korekty na emisyjność podłoża niezbędne jest obliczenie NDVI, ponieważ następnie należy obliczyć proporcję roślinności (P_v), która jest silnie związana z NDVI, oraz emisyjność (ϵ), która jest z kolei powiązana z P_v . NDVI oblicza się wykorzystując pasma widzialne (kanał B4) i bliskiej podczerwieni (kanał B5) wg wzoru:

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4) \quad (3),$$

Krok 4. Obliczenie proporcji roślinności (P_v).

Do obliczenia proporcji roślinności wykorzystano metodę Wang i in. (2015) stosując wzór:

$$P_v = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2 \quad (4),$$

gdzie $NDVI_{min}$ i $NDVI_{max}$ to minimalne i maksymalne wartości odnotowane w rastrze NDVI.

Krok 5. Obliczenie emisyjności powierzchni terenu (ϵ).

Emisyjność powierzchni terenu ϵ jest współczynnikiem proporcjonalności, który skaluje promieniowanie ciała doskonale czarnego w celu przewidzenia emitowanego promieniowania (prawo Plancka) i oznacza wydajność przesyłania energii cieplnej z powierzchni Ziemi do atmosfery. Emisyjność terenu obliczono zgodnie z propozycją Sobrino i in. (2004) wg wzoru:

$$\epsilon = m \cdot P_v + n \quad (5),$$

gdzie m i n to złożone parametry zależne od wartości emisyjności roślinności i gleby. Za Sobrino i in. (2004) przyjęto, że emisyjność roślinności wynosi 0,99, a gleby 0,97. Przy tak określonych wartościach emisyjności wzór ostatecznie przyjmuje postać $\epsilon = 0,004 \cdot P_v + 0,986$.

Krok 6. Obliczenie temperatury powierzchni terenu (LST).

W ostatnim kroku temperatura powierzchni terenu skorygowana o emisyjność podłoża obliczana jest wg wzoru (za Weng i in., 2004):

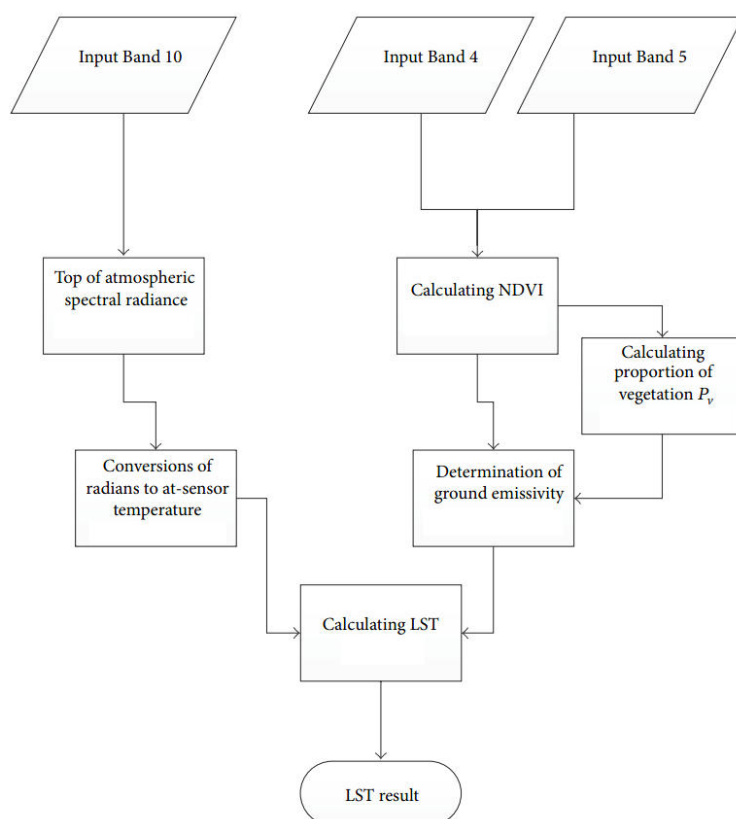
$$LST = (BT / (1 + (\lambda \cdot BT / \rho) \cdot \ln(\epsilon))) \quad (6),$$

gdzie LST – temperatura powierzchni terenu w stopniach Celsjusza, BT – temperatura jasnościowa przy sensorze (w stopniach Celsjusza), λ – średnia długość fali emitowanego promieniowania, ϵ – emisyjność podłoża, a $\rho = hc/\sigma$, gdzie h – stała Plancka, c – prędkość światła, σ – stała Boltzmanna. Po podstawieniu do wzoru stałych ($\lambda = 11,5 \mu m$ oraz $\rho = 1,438 \cdot 10^{-2} m \cdot K$) oraz ich redukcji ostateczne równanie przybiera postać $LST = (BT / (1 + (0,00115 \cdot BT / 1,4388) \cdot \ln(\epsilon)))$.

W wyniku zastosowania powyższego algorytmu powstała mapa temperatury powierzchni terenu o rozdzielczości $30 \times 30 m$. Należy przy tym zaznaczyć, że nie jest ona równa temperaturze powietrza.

Na podstawie analizy histogramu i przestrzennej zmienności temperatury powierzchni terenu w Warszawie przyjęto za wartość referencyjną $22,8^\circ C$. Jest to minimalna temperatura powierzchni terenu osiągnięta w momencie pomiaru na obszarze Warszawy, z wyłączeniem obszarów wodnych o niższej temperaturze, w tym przede wszystkim rzeki Wisły i jeziora Wilanowskiego. Temperaturę w granicach $22,8-23,5^\circ C$ odnotowano na większości obszarów pokrytych roślinnością, w tym w lasach i na terenach otwartych (wnętrza większych obszarów uzyskały temperaturę w przedziale $22,8-23,0^\circ C$). Uznano, że temperatura powierzchni w kotlinie Warszawskiej w chwili pomiaru oscylowałaby w okolicy $23^\circ C$, gdyby nie antropogeniczne przekształcenie powierzchni Ziemi i powiązany z nim efekt miejskiej wyspy ciepła.

Ostateczną wartość wskaźnika, czyli różnicę (*de facto* naddatek) temperatury względem temperatury referencyjnej $22,8^\circ C$ dla dzielnic, obszarów MSI oraz funkcji terenu uzyskano za pomocą narzędzia *Zonal Statistics as Table* w oprogramowaniu ArcGIS 10.2.



Ryc. 6. Schemat wyliczenia temperatury powierzchni terenu z danych Landsat 8
Źródło: Avdan i Jovanovska (2016)

Wartości wskaźnika

Wskaźnik niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła przez ekosystemy, pokazujący różnicę temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej pokrytej roślinnością przyjmuje wartości od $-2,1^{\circ}\text{C}$ dla środkowego nurtu rzeki Wisły do $19,7^{\circ}\text{C}$ dla dachów Centrum Handlowego Wola Park (ryc. 7). Drugim najgorętszym obszarem (do $19,5^{\circ}\text{C}$ nadmiaru temperatury) były zabudowania i hale dawnej fabryki samochodów FSO na Żeraniu. Transformując wartości nadmiaru temperatury do pięciostopniowej skali niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła przez ekosystemy przyjęto następujące przedziały ($>8 \rightarrow 1$; $6-8 \rightarrow 2$; $4-6 \rightarrow 3$; $2-4 \rightarrow 4$; $<2 \rightarrow 5$), przy czym 1 oznacza największe zapotrzebowanie, a 5 najmniejsze zapotrzebowanie.

Na poziomie obszarów MSI najsilniejszy efekt miejskiej wyspy ciepła odnotowano na osiedlu Szamoty obejmującym tereny dawnej fabryki traktorów Ursus ($10,4^{\circ}\text{C}$) oraz na Służewcu ($8,8^{\circ}\text{C}$). Nadatek powyżej 8°C wykazano także dla Rakowa w dzielnicy Włochy, Mirowa na Woli, Szmulowizny na Pradze-Północ oraz Gocławka na Pradze-Południe. Z kolei najslabszy efekt miejskiej wyspy ciepła zaobserwowano na terenie Lasu Kabackiego ($0,8^{\circ}\text{C}$) i Lasu Bielańskiego ($2,4^{\circ}\text{C}$). Biorąc pod uwagę średni nadatek temperatury powierzchni terenu na poziomie dzielnic, należy stwierdzić, że Wawer i Wesoła wyróżniają się najslabszym efektem miejskiej wyspy ciepła (poniżej 4°C), natomiast Ursus, jako jedyna dzielnica charakteryzuje się średnim nadatkiem temperatury powyżej 7°C ($7,4^{\circ}\text{C}$) (tab. 10).

Jeśli podzielimy Warszawę na tereny pełniące określone funkcje, to zdecydowanie najsilniejszy efekt miejskiej wyspy ciepła występuje na obszarach o funkcji handlowej, w

szczegółności dotyczy to handlu wielkopowierzchniowego (10,5°C) (tab. 11). Poza wspomnianym wyżej Centrum Wola Park, bardzo wysoki wkład w zwiększanie efektu miejskiej wyspy ciepła mają także Kompleks Handlowy Marywilska, Galeria Górczewska, Centrum Handlowe Fort Wola czy Centrum Handlowe Gocław. Bardzo wysoki poziom niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła (średni naddatek temperatury 9,3°C) odnotowano także na obszarach zajezdni i innych obiektów obsługi transportu zbiorowego (w tym na stacji końcowej metra na Kabatach) oraz na terenach o funkcji produkcyjno-usługowej, magazynowej i poprodukcyjnej (8,4°C). Najniższym zapotrzebowaniem na redukcję temperatury charakteryzują się wody powierzchniowe (0,5°C) i lasy (2,1°C), a także zieleń nieurządzona z dominacją zadrzewień (2,9°C) oraz wody powierzchniowe na terenach parków (3,3°C). Tak niskie wartości wskazują, że wymienione tereny nie tyle mają zapotrzebowanie na redukcję wyspy ciepła, co w rzeczywistości same przyczyniają się do redukcji tego efektu na sąsiadujących obszarach zabudowanych.

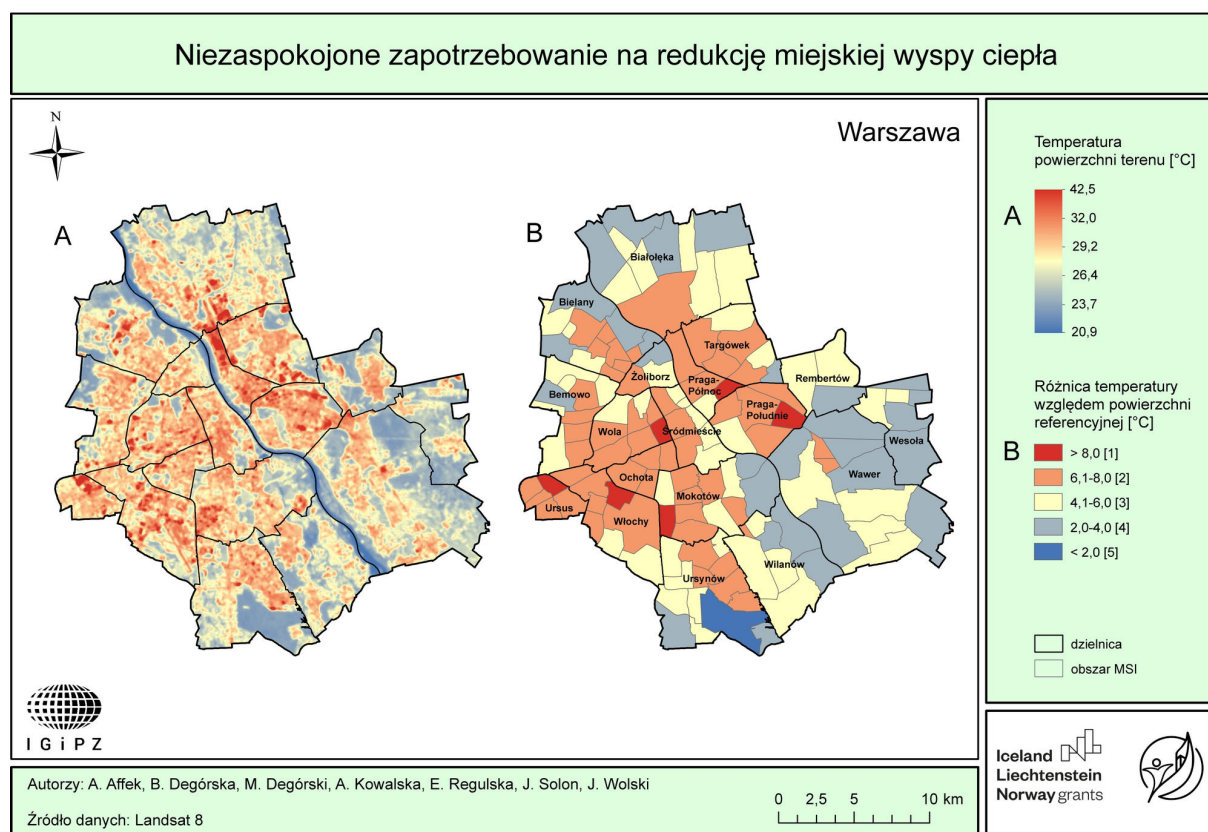
Tabela 10. Średnia różnica temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej jako wskaźnik niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła na poziomie dzielnic. W nawiasach zapotrzebowanie w skali od 1 do 5, przy czym 1 oznacza największe zapotrzebowanie, a 5 najmniejsze zapotrzebowanie

Dzielnica	Wartość wskaźnika [°C]
Bemowo	5,43 [3]
Białołęka	4,71 [3]
Bielany	4,54 [3]
Mokotów	5,64 [3]
Ochota	6,73 [2]
Praga-Południe	6,70 [2]
Praga-Północ	6,62 [2]
Rembertów	4,41 [3]
Śródmieście	6,33 [2]
Targówek	6,21 [2]
Ursus	7,38 [2]
Ursynów	4,64 [3]
Wawer	3,91 [4]
Wesoła	3,49 [4]
Wilanów	4,19 [3]
Włochy	6,69 [2]
Wola	6,92 [2]
Żoliborz	5,35 [3]

Tabela 11. Średnia różnica temperatury powierzchni terenu względem powierzchni referencyjnej jako wskaźnik niezaspokojonego zapotrzebowania na redukcję miejskiej wyspy ciepła wg funkcji terenu. W nawiasach zapotrzebowanie w skali od 1 do 5, przy czym 1 oznacza największe zapotrzebowanie, a 5 najmniejsze zapotrzebowanie

Funkcja terenu	Wartość wskaźnika [°C]
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna	7,03 [2]
Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna (osiedla o podwyższonym udziale zieleni)	6,76 [2]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna	5,98 [3]
Zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna (na terenach leśnych)	3,67 [4]
Usługi handlu wielkopowierzchniowego	10,53 [1]
Usługi o charakterze społecznym (oświata)	7,20 [2]
Usługi o charakterze społecznym (nauka)	6,94 [2]
Usługi o charakterze społecznym (kultura)	6,81 [2]

Usługi o charakterze społecznym (zdrowie)	7,18 [2]
Usługi inne (administracja publiczna)	6,97 [2]
Usługi inne (handel)	7,58 [2]
Usługi inne (kult religijny)	6,83 [2]
Usługi inne (biura)	7,65 [2]
Usługi inne (turystyka/hotele)	6,93 [2]
Usługi sportowe (z kubaturą)	6,75 [2]
Sport i rekreacja (boiska/place zabaw)	5,30 [3]
Tereny produkcyjno-usługowe, magazynowe, poprodukcyjne	8,44 [1]
Las	2,06 [4]
Zieleń urządzona	4,44 [3]
Zieleń nieurzadzona z dominacją zadrzewień	2,94 [4]
Zieleń inna, obszary niezabudowane i niezagospodarowane	5,74 [3]
Ogrody działkowe	4,32 [3]
Cmentarze	4,48 [3]
Obszary użytkowane rolniczo i porolne	3,89 [4]
Wody powierzchniowe	0,52 [5]
Wody powierzchniowe (na terenach parków)	3,25 [4]
Infrastruktura techniczna	6,52 [2]
Zajezdnie, obiekty i urządzenia obsługi transportu zbiorowego	9,32 [1]
Obiekty i urządzenia obsługi komunikacji drogowej	7,27 [2]
Lotniska	6,83 [2]
Obiekty i urządzenia transportu kolejowego	7,06 [2]
Drogi	6,58 [2]



Ryc. 7. Niezaspokojone zapotrzebowanie na redukcję miejskiej wyspy ciepła

3. ŚWIADCZENIA KULTUROWE

3.1. Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie natury

Usługa należy w CICES V5.1 do sekcji KULTUROWE, działu BEZPOŚREDNIE INTERAKCJE, IN SITU I W TERENIE, Z SYSTEMAMI BIOLOGICZNYMI, ZALEŻNE OD ICH OBECNOŚCI W WARUNKACH NATURALNYCH. Polega ona na fizycznych i doświadczalnych interakcjach ze środowiskiem przyrodniczym, które prowadzą do poprawy stanu zdrowia, regeneracji sił i umożliwiają rozrywkę na łonie przyrody. Dla tej usługi opracowano cztery wskaźniki: dwa bazujące na analizie eksperckiej, w tym jeden dotyczy niezaspokojonego zapotrzebowania na rekreację na łonie przyrody (tab. 12), a drugi wykorzystania błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) do rekreacji rowerowej (tab. 13) oraz dwa wskaźniki wykorzystujące ocenę społeczną (metodę partycypacyjną), wśród których jeden dotyczy potencjału, a drugi rzeczywistego wykorzystania badanej usługi ekosystemowej (tab. 15).

3.1.1. Niezaspokojone zapotrzebowanie mieszkańców miasta na rekreację i odpoczynek na łonie przyrody

Przedmiotem pomiaru jest niezaspokojone zapotrzebowanie na rekreację na łonie przyrody na obszarze Warszawy, a wskaźnikiem udział procentowy ludności mieszkającej poza buforem 300/1000 m od terenów przeznaczonych do rekreacji na łonie przyrody (tab. 12).

Tabela 12. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Udział procentowy ludności mieszkającej poza buforem 300/1000 m od terenów przeznaczonych do rekreacji na łonie przyrody

Świadczenie ekosystemowe		Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie natury
CICES 5.1	Sekcja	Kulturowe
	Dział	Bezpośrednie interakcje, in situ i w terenie, z systemami biologicznymi, zależne od ich obecności w warunkach naturalnych
	Grupa	Fizyczne i doświadczalne interakcje ze środowiskiem przyrodniczym
	Klasa	Cechy systemów biologicznych umożliwiające działania wspierające zdrowie, regenerację sił albo rozrywkę poprzez interakcje aktywne lub angażujące /pasywne lub obserwujące
	Kod	3.1.1.1/3.1.1.2
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Niezaspokojone zapotrzebowanie mieszkańców miasta na rekreację na łonie przyrody
Wskaźnik		Udział procentowy ludności mieszkającej poza buforem 300/1000 m od terenów przeznaczonych do rekreacji na łonie przyrody
Akronim		REK_NZ
Potencjał/wykorzystanie/ zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Niezaspokojone zapotrzebowanie
Konstrukcja wskaźnika		Udział procentowy ludności mieszkającej poza buforem (300/1000 m) od wybranych kategorii BZI (lasów, zieleni urządzonej, zieleni nieurządzonej z

		dominacją zadrzewień, zieleni innej, wód powierzchniowych, terenów z przeznaczeniem sportowym i rekreacyjnym) w obszarze MSI
Pośredni/bezpośredni		Bezpośredni
Prosty/złożony		Prosty
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0-100%
Jednostka miary		–
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane źródłowe	Opis danych	1. mapa struktury funkcjonalnej miasta, 2. mapa dzielnic i obszarów MSI (w tym liczba mieszkańców), 3. Urban Atlas 2018 (rozmieszczenie ludności)
	Dysponent danych	1-2. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy, 3. Europejska Agencja Środowiska (EEA)
	Link do bazy danych	https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	0,25 ha
	Format danych	Dane wektorowe (shapefile)
	Pokrycie kraju	Warszawa
	Aktualność danych	1. 2021 (aktualizowane na bieżąco), 2. 2018 (aktualizowane po zmianach granic), 3. 2017-2019
	Dostępność danych	1-2. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne, 3. ogólnodostępne

Założenia teoretyczne

Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie przyrody ma ogromną wartość dla fizycznego dobrostanu i zdrowia psychicznego mieszkańców miast (Geary i in., 2021; Weinbrenner i in., 2021). Zapewniają ją zielone przestrzenie miejskie, które są coraz bardziej cenione (zwiększają atrakcyjność miejsca zamieszkania) i czasami chronione, ale często przegrywają konkurencję z innymi typami użytkowania ziemi, ponieważ stale rośnie odsetek ludności mieszkającej na terenach miejskich. Poza funkcją rekreacyjną tereny zieleni dostarczają równolegle wiele innych korzyści dla mieszkańców: ograniczają zanieczyszczenie powietrza i wody oraz hałas, poprawiają warunki klimatyczne, chronią przed powodzią, suszami i falami upałów. Istotny jest nie tylko udział powierzchniowy terenów zieleni, ale również rozmieszczenie w mieście warunkujące ich dostępność dla mieszkańców (Nielsen i Hansen, 2007). Decydujące znaczenie wydaje się mieć odległość między miejscem zamieszkania i publicznymi terenami zielonymi (Grahn i Stigsdotter, 2003) w powiązaniu z ich walorami rekreacyjnymi i estetycznymi (Kothencz i in., 2017).

Metodyka uzyskania wyników

Po szczegółowej analizie bazy danych ze strukturą funkcjonalną miasta, udostępnionej przez Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy, wytypowano

siedem klas (lasy, zieleni urządzoną, zieleni nieurządzoną z dominacją zadrzewień, zieleni inną, wody powierzchniowe i wody powierzchniowe na terenach parków, tereny z przeznaczeniem sportowym i rekreacyjnym), które uznano za priorytetowe jeśli chodzi o dostarczanie warunków do interakcji ze środowiskiem przyrodniczym i oferujące możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie przyrody w mieście.

Dostępność do ekosystemów oferujących możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie przyrody określano w dwóch skalach: lokalnej i ponadlokalnej. Dla skali lokalnej przyjęto odległość 300 m, mierzoną w linii prostej od terenów zieleni i odpowiadającą 5-6 min. marszu i minimalną powierzchnię = 1 ha¹, zaś dla skali ponadlokalnej odległość 1000 m i minimalną powierzchnię = 2 ha² (por. Zwierzchowska i Mizgajski, 2019; *Studium uwarunkowań...*, 2020). Zapotrzebowanie na świadczenia rekreacyjne określono na podstawie liczby ludności zamieszkującej poszczególne obszary MSI. Dane te pochodzą z pomiarów telemetrycznych wykonanych w 2015 r. i pokazują rzeczywistą liczbę osób przebywających w nocy od poniedziałku do piątku w danej jednostce MSI. Rozmieszczenie mieszkańców wg typu zabudowy terenów mieszkaniowych (zabudowa wielorodzinna, wielorodzinna o podwyższonym udziale zieleni osiedlowej, jednorodzinna, jednorodzinna na terenach leśnych) uzyskano zestawiając rozmieszczenie mieszkańców z Urban Atlas z roku 2018 z mapą terenów mieszkaniowych z Urzędu m.st. Warszawy. Otrzymane liczby mieszkańców przeważono tak, aby suma dla Warszawy zgadzała się z ogólną liczbą mieszkańców z danych telemetrycznych. Po wyodrębnieniu zabudowy znajdującej się w zasięgu buforów 300 i 1000 m od terenów zieleni obliczono udział procentowy ludności mieszkającej poza buforem 300/1000 m od terenów przeznaczonych do rekreacji w obszarze MSI jako miarę niezaspokojonego zapotrzebowania mieszkańców miasta na rekreację na łonie przyrody. Ze względu na zasięg wykorzystanych danych przestrzennych teren analiz ograniczono do obszaru miasta – nie uwzględniano terenów zieleni znajdujących się poza granicami Warszawy.

Wartości wskaźnika

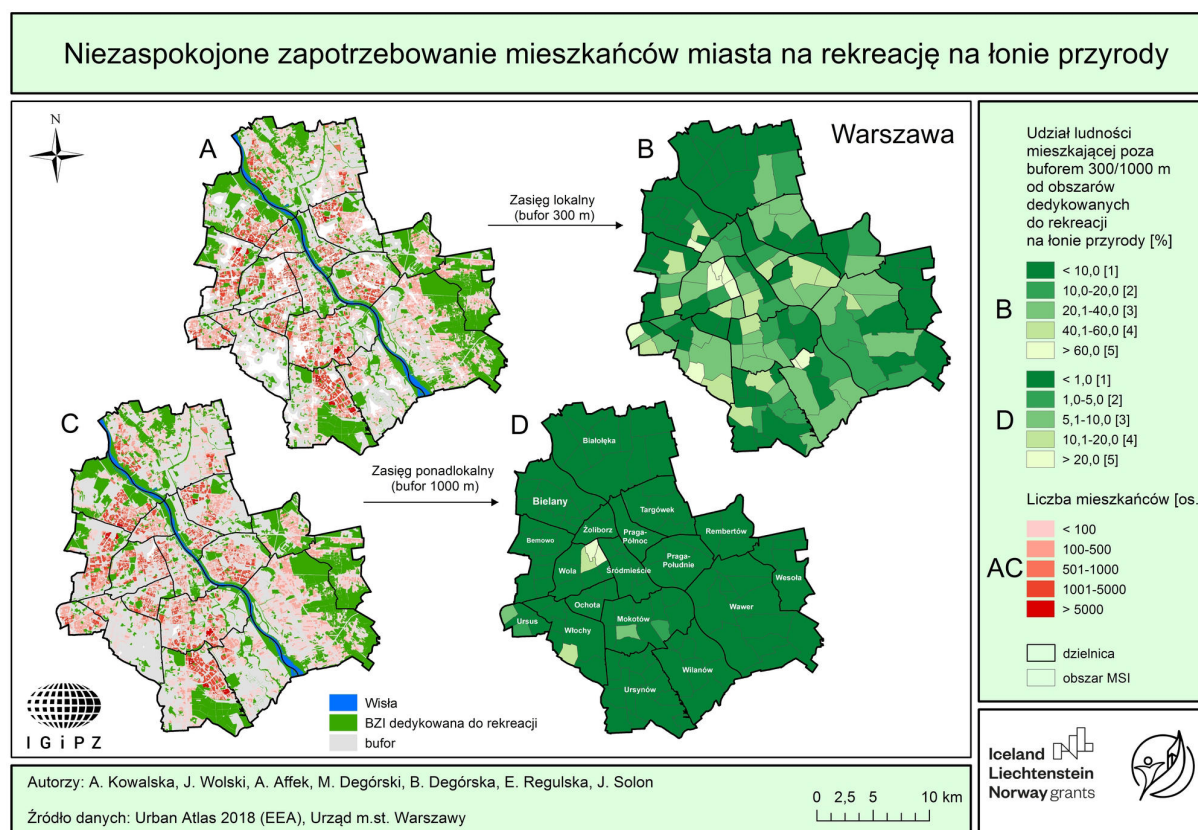
Wskaźnik udziału procentowego ludności mieszkającej poza buforem 300 m od terenów zieleni przeznaczonych do rekreacji przyjmuje wartości w przedziale 0-94%. Najwyższe wartości odnotowano w centralnej części Warszawy, w dzielnicy Wola, w obszarach MSI: Mirów (90%) i Powązki (94%), zaś w 20 innych jednostkach MSI wskaźnik przyjmuje wartości powyżej 40% (ryc. 8). W przypadku tego wskaźnika, wysokie wartości pokazują wysoki poziom niezaspokojonego zapotrzebowania na kontakt z przyrodą związany z niskim udziałem terenów zieleni przeznaczonych do rekreacji i ich małą dostępnością w odległości 300 m od miejsc zamieszkania. W rzeczywistości wszystkie wartości powyżej 0 oznaczają stan niekorzystny, bowiem świadczą o niezaspokojonych potrzebach nawet niewielkiej grupy mieszkańców. Wartość wskaźnika wynosi 0 tylko w 29 z 143 obszarów MSI, przede wszystkim na terenie dzielnic: Bielany, Wesoła, Targówek, Białołęka, Ursynów oraz części Śródmieścia sąsiadujących z doliną Wisły. Ich mieszkańcy stanowią 4,5% ludności

¹ Z danych literaturowych wynika, że dopiero w parkach o powierzchni co najmniej 1 ha poprawa warunków klimatycznych odczuwalna jest w istotny sposób (Kuttler, 1993 za Zwierzchowska i Mizgajski, 2019).

² Według badań Coles i Bussey (2000) 2 ha to minimalna powierzchnia terenów leśnych, która sprawia, że są one regularnie odwiedzane.

Warszawy. W skali całego miasta 26% mieszkańców nie ma dostępu do BZI dedykowanej do rekreacji w odległości 300 m od miejsca zamieszkania.

Korzystniejsze warunki dotyczące dostępności BZI obserwowane są w przypadku skali ponadlokalnej (bufor 1000 m). Wartość wskaźnika powyżej 0 odnotowano tylko w ośmiu obszarach MSI: w centralnej części miasta na Woli (Nowolipki, Powązki, Młynów), na Mokotowie (Ksawerów, Sadyba), w Ursusie (Gołębki, Czechowice) oraz we Włochach (Żałuski) – ryc. 8.



Ryc. 8. Niezaspokojone zapotrzebowanie mieszkańców Warszawy na rekreację na łonie przyrody

3.1.2. Wykorzystanie błękitno-zielonej infrastruktury do rekreacji rowerowej

Przedmiotem pomiaru jest wykorzystanie błękitno-zielonej infrastruktury do rekreacji rowerowej, a wskaźnikiem korzystania z tej usługi jest gęstość szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie BZI (tab. 13)

Tabela 13. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Gęstość szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie BZI

Świadczenie ekosystemowe		Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie natury
CICES 5.1	Sekcja	Kulturowe
	Dział	Bezpośrednie interakcje, in situ i w terenie, z systemami biologicznymi, zależne od ich obecności w warunkach naturalnych
	Grupa	Fizyczne i doświadczalne interakcje ze środowiskiem przyrodniczym

	Klasa	Cechy systemów biologicznych umożliwiające działania wspierające zdrowie, regenerację sił albo rozrywkę poprzez interakcje aktywne lub angażujące
	Kod	3.1.1.1
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Wykorzystanie BZI do rekreacji rowerowej
Wskaźnik		Gęstość szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie BZI
Akronim		CYCLE
Potencjał/wykorzystanie/ zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Wykorzystanie
Konstrukcja wskaźnika		Gęstość szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie wybranych kategorii BZI (sport i rekreacja, las, zieleń urządzona/nieurzadzona z dominacją zadrzewień/ inna, obszary użytkowane rolniczo i porolne, wody powierzchniowe), które łącznie stanowią $\geq 75\%$ powierzchni bufora 50/50 m wyznaczonego wzdłuż wszystkich dróg i ścieżek przeznaczonych dla ruchu rowerowego (wyłączonego lub współdzielonego)
Pośredni/bezpośredni		Bezpośredni
Prosty/złożony		Prosty
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0- ∞
Jednostka miary		km/km ²
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI
Odniesienie do poziomu planowania		Regionalne
Dane źródłowe	Opis danych	1. mapa OSM (obiekty liniowe), 2. mapa dróg i ścieżek rowerowych, 3. mapa dzielnic i obszarów MSI, 4. mapa struktury funkcjonalnej miasta
	Dysponent danych	1. OpenStreetMap, 2-4. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
	Link do bazy danych	https://extract.bbbike.org
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	nie dotyczy
	Format danych	Dane wektorowe (shapefile, xml w formacie osm)
	Pokrycie kraju	1. Cały kraj, 2-4. Warszawa w granicach administracyjnych
	Aktualność danych	1. 2021 (aktualizowane co kilka dni), 2. 2021 (aktualizowane na bieżąco), 3. 2018 (aktualizowane po zmianach granic), 4. 2021 (aktualizowane na bieżąco)
	Dostępność danych	1. Dane ogólnodostępne, 2-4. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE

Wielu ludzi wybiera rower jako zdrową, taną i przyjazną środowisku formę transportu. Takie działania w skali lokalnej mają znaczenie również w skali globalnej, gdyż korzyści z jazdy na rowerze pojawiają się w dziedzinach takich jak efektywny transport, polityka ochrony środowiska, polityka przemysłowa, turystyka, zdrowie publiczne i sprawy społeczne (ECF, 2018). Zamiana transportu samochodowego na rowerowy pomaga w redukcji emisji CO₂, zanieczyszczenia powietrza, gleby i wody, a także hałasu (Barwaldt i in., 2014; Cui i in., 2014).

Ponadto przyczynia się do zmniejszenia poziomu zatłoczenia dróg, poprawy dostępności, łączności i multimodalności transportowej oraz mobilności rodzinnej (ECF, 2018). Wśród dobroczynnych aspektów zdrowotnych regularnej jazdy na rowerze wymieniane są m.in. zmniejszenie ryzyka wystąpienia poważnych chorób, poprawa zdrowia psychicznego i samopoczucia oraz zwiększenie szansy na dłuższe życie (Oja i in., 2011; Pucher i Buehler, 2012). Nieocenioną zaletą miejskich podróży rowerowych jest również możliwość bezpośredniego kontaktu z przyrodą i multisensorycznej percepcji jej walorów.

Aby promować jazdę na rowerze w miastach, ważne jest, aby zidentyfikować powody, dla których ludzie jeżdżą na rowerze (Hull i O'Holleran, 2014; Mertens i in., 2014) oraz czynniki wpływające na wybór trasy. Generalnie, zieleń miejska pozytywnie wpływa na zwiększoną aktywność fizyczną (Hartig i in., 2014; James i in., 2015), jednakże wpływ BZI na atrakcyjność dla ruchu rowerowego jest w literaturze naukowej słabo rozpoznany. Nieliczne badania dowodzą, że rowerzyści preferują trasy w sąsiedztwie drzew (Ghekiere i in., 2015; Mertens i in., 2016), jak również ze znacznym udziałem zieleni miejskiej i jej zróżnicowanymi formami (Nawrath i in., 2019), unikają zaś głównych dróg i skrzyżowań (Winters i Teschke, 2010; Krenn i in., 2014; Mertens i in., 2016). Wskazuje to na powiązania między urbanistycznym planowaniem zieleni a przyjazną dla środowiska polityką mobilności i zachęca do ujmowania zielonych ulic jako wielofunkcyjnych elementów BZI. Dlatego bardzo istotne jest, aby przy projektowaniu tras rowerowych zostały uwzględnione elementy BZI, które ze względu na swój zróżnicowany charakter mogą świadczyć wiele usług, w tym m.in. zmniejszać stres cieplny, redukować zanieczyszczenia, chronić przed wiatrem, ograniczać emisję hałasu i odoru, wydzielać substancje antybiotyczne czy dostarczać wrażeń estetycznych i duchowych.

Metodyka uzyskania wyników

Do prezentacji wykorzystania BZI do rekreacji rowerowej wykorzystano dwa zasoby informacyjne. Komponentem bazowym pierwszego zasobu była wektorowa mapa warszawskich szlaków rowerowych (847 km), pozyskana z Biura Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy. Mapa, aktualizowana na bieżąco przez Zarząd Dróg Miejskich (ZDM), zawiera informacje o wszystkich kategoriach dróg i ścieżek przeznaczonych dla wyłącznego lub współdzielonego ruchu rowerowego (ciągi pieszo-rowerowe, drogi dla rowerów, pasy, kontrapasy i kontraruch), których władzami są m.in. urzędy dzielnic, ZDM, Główna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Zarząd Terenów Publicznych i Zarząd Zieleni m.st. Warszawy. Wykorzystując ortofotomapę o rozdzielczości 10 cm (GUGiK/usługa WMS) zweryfikowano wszystkie problematyczne fragmenty (w tym inwestycje planowane i będące w budowie) w celu uzyskania rzeczywistego obrazu sieci rowerowej według stanu na grudzień 2021 r., a następnie manualnie usunięto większość krótkich odcinków mogących generować zbędny szum informacyjny podczas analiz (zjazdy „donikąd”, przejazdy przez jezdnię, łączniki itp.). Istotnym komponentem, który wzbogacił mapę ZDM, była sieć szlaków rowerowych OpenStreetMap (<https://extract.bbbike.org>)³. Z pozyskanej bazy danych wszystkich obiektów liniowych dla

³ Dane OSM w postaci gotowych plików .shp zawierają bardzo okrojone informacje atrybutowe. Do opisywanych analiz zaleca się wykorzystywanie wyłącznie danych w natywnym formacie .osm z kompletnym zestawem deskryptorów.

Warszawy wyekstrahowano w pierwszej fazie obiekty z deskryptorami *bicycle* i *cycleway*, a następnie zawężano kryteria wyszukiwania wybierając deskryptory (lub ich zestawy) jednoznacznie identyfikujące drogę jako przeznaczoną lub dopuszczoną do ruchu rowerowego (szczegóły: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Bicycle>). W ostatnim kroku porównano obie bazy i usunięto wszystkie dublujące się odcinki, przy czym za priorytetową uznano mapę ZDM. Opracowana w ten sposób kompilacja zawierała 922 km szlaków rowerowych.

Drugi zasób informacji stanowiła wektorowa mapa struktury funkcjonalnej miasta, którą pozyskano z Biura Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy. Wybrano z niej osiem priorytetowych dla analizowanego świadczenia klas, które uznano za BZI: lasy, zieleń urządzoną, zieleń nieurządzoną z dominacją zadrzewień, zieleń inną (w tym obszary niezabudowane i niezagospodarowane), obszary użytkowane rolniczo i porolne, wody powierzchniowe i wody powierzchniowe na terenach parków, tereny z przeznaczeniem sportowym i rekreacyjnym.

W celu obliczenia gęstości i udziału szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie BZI wykorzystano analizę buforową. Przyjęto następujące założenia wstępne:

1. Szerokość dwustronnego (L i P) bufora wyznaczonego wzdłuż wszystkich szlaków rowerowych – 50/50 m. Na podstawie analizy eksperckiej taką szerokość BZI uznano za optymalne minimum z punktu widzenia rowerzysty, którego celem jest czynna rekreacja na łonie natury.
2. Jednostkowe odcinki pomiarowe – 10 m długości. Próby segmentacji wykonane dla dłuższych odcinków wykazały, że w analizie buforowej liczne elementy BZI postrzegane przez rowerzystę w przestrzeni miejskiej są pomijane, zaś pomiary na krótszych odcinkach prowadzą do redundancji informacji bez znaczącego wpływu na ostateczny wynik analizy.

Procedura analityczna składała się z następujących kroków: (1) agregacja danych (ArcGIS => *dissolve*), (2) podział sieci szlaków rowerowych na równe odcinki o długości 10 m (QGIS => Podziel linie wg maksymalnej długości), (3) stworzenie buforów odcinkowych dla lewej (L) i prawej (P) strony szlaków rowerowych (ArcGIS => *buffer*), a następnie ich przecięcie z BZI (ArcGIS => *intersect*), (4) agregacja pofragmentowanych elementów BZI w celu przypisania ich do odpowiednich buforów odcinkowych (ArcGIS => *dissolve*). Dany fragment szlaku rowerowego uznano za predestynowany do rekreacji na łonie natury, jeśli udział BZI w buforze odcinkowym wynosił $\geq 75\%$ jego powierzchni. Na tej podstawie wydzielono ostatecznie 3 klasy szlaków rowerowych: 0 – brak BZI lub jej udział powierzchniowy $< 75\%$, 1 – udział $\geq 75\%$ po jednej stronie szlaku (L/P), 2 – udział $\geq 75\%$ po obu stronach szlaku (L+P).

Wartości wskaźnika

Powyższe analizy wykazały, że 343 km (37,3%) z 922 km szlaków rowerowych w Warszawie to odcinki predestynowane do rekreacji na łonie natury, w tym L+P – 150 km (16,3%) i L/P – 193 km (21%). Zdecydowana większość szlaków biegnących w sąsiedztwie BZI to drogi dla rowerów, ciągi pieszo-rowerowe i drogi tzw. inne, do których zalicza się szlaki rekreacyjne, drogi serwisowe i ulice o ruchu uspokojonym (wg mapy ZDM) oraz *cycleway*, *path*, *route*, *track* i *footway* (wg OpenStreetMap). Drastycznie „niedoinwestowane” pod względem obecności BZI są natomiast szlaki współdzielone z ruchem samochodowym, czyli poprowadzone jezdniami (tzw. pasy, kontrapasy, kontraruch). Ich udział to odpowiednio 1 km (L+P) i 11 km (L/P), co łącznie stanowi zaledwie 3,5%.

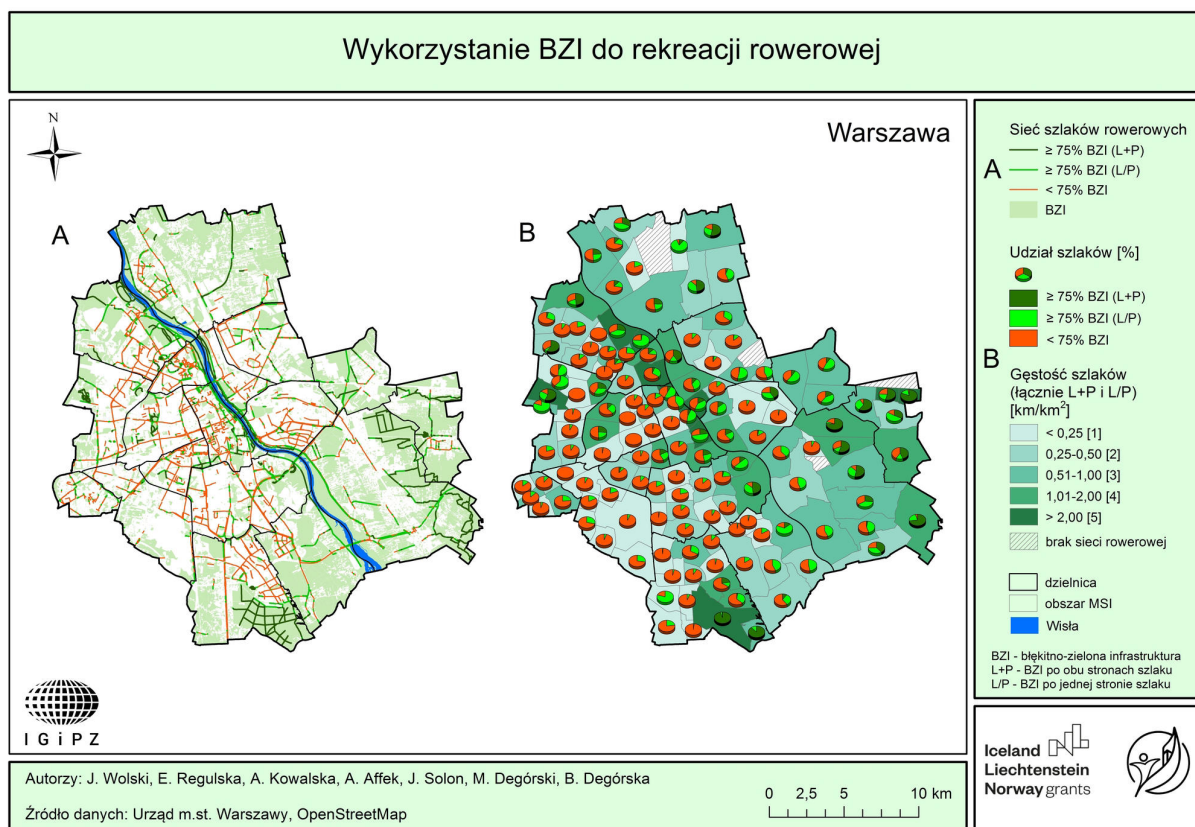
Prymat najbardziej błękitno-zielonych dzielnic z punktu widzenia rowerzystów dzielą: pod względem gęstości szlaków biegnących w sąsiedztwie BZI – Praga Północ (1,54 km/km²), zaś pod względem ich udziału w długości całej sieci – Wesoła (70,8%). Na przeciwległym biegunie znajdują się Włochy, w których gęstość szlaków sprzyjających czynnej rekreacji na łonie natury nie przekracza 0,1 km/km², zaś ich udział wynosi zaledwie 10% (tab. 14).

Podział Warszawy na obszary MSI (ryc. 9) pozwala wyodrębnić wyraźny korytarz sprzyjający rekreacji rowerowej na łonie natury, który tworzy Wisła wraz z terenami przyległymi – głównie dzięki Nadwiślańskiej ścieżce rekreacyjnej i Szlakowi Słonecznemu oraz Nadwiślańskiemu Szlakowi Rowerowemu, stanowiącemu fragment tworzonej trasy EuroVelo R-2 (WRR, 2020). Wisła wyznacza ponadto specyficzną granicę dwóch rowerowych światów, bowiem na jej prawym brzegu gęstość szlaków przebiegających w sąsiedztwie BZI wynosi 0,74 km/km² (47% udziału w sieci), zaś na lewym – 0,66 km/km² (27%), przy czym sytuacja przy całkowitej gęstości sieci jest odwrotna (1,4 i 2,2 km/km²). Na wyróżnienie zasługują ponadto południowe rubieże Warszawy, w tym tereny Mazowieckiego Parku Krajobrazowego w dzielnicach Wawer i Wesoła oraz Las Kabacki na Ursynowie. Duży potencjał rekreacyjny Białołęki nie jest natomiast należycie wykorzystany ze względu na niewielką gęstość sieci szlaków rowerowych. Transformując otrzymane wartości do pięciostopniowej skali wykorzystania opisywanej usługi w mieście przyjęto następujące przedziały (<0,25 → 1; 0,25-0,50 → 2; 0,51-1,00 → 3; 1,01-2,00 → 4; >2,00 → 5).

Tabela 14. Gęstość szlaków rowerowych biegnących w sąsiedztwie BZI jako wskaźnik wykorzystania BZI do rekreacji rowerowej. W nawiasach wykorzystanie w skali od 1 do 5

Dzielnica	Powierzchnia [km ²]	Gęstość całkowita [km/km ²]	Długość szlaków* [km]			Udział szlaków* [%]			Gęstość (L+P i L/P) [km/km ²]
			bez BZI	L/P	L+P	bez BZI	L/P	L+P	
Bemowo	24,92	1,90	32,66	8,16	6,66	68,80	17,18	14,02	0,59 [3]
Białołęka	72,93	0,89	33,45	16,44	15,07	51,50	25,31	23,20	0,43 [2]
Bielany	32,31	2,45	46,40	17,53	15,25	58,60	22,14	19,26	1,01 [4]
Mokotów	35,39	2,13	56,84	13,61	5,01	75,32	18,04	6,64	0,53 [3]
Ochota	9,71	3,80	30,33	4,34	2,26	82,13	11,75	6,12	0,68 [3]
Praga-Południe	22,36	2,67	46,92	8,70	4,18	78,45	14,55	6,99	0,58 [3]
Praga-Północ	11,30	3,25	19,22	9,96	7,50	52,41	27,14	20,45	1,54 [4]
Rembertów	19,28	0,98	7,64	9,07	2,26	40,28	47,81	11,91	0,59 [3]
Śródmieście	15,56	4,41	45,97	17,20	5,48	66,96	25,06	7,99	1,46 [4]
Targówek	24,31	1,72	33,34	7,89	0,47	79,95	18,92	1,13	0,34 [2]
Ursus	9,35	2,12	16,69	3,09	0,03	84,24	15,60	0,15	0,33 [2]
Ursynów	43,75	2,09	51,93	11,37	28,04	56,85	12,45	30,70	0,90 [3]
Wawer	79,64	1,31	37,01	31,32	35,71	35,57	30,10	34,33	0,84 [3]
Wesoła	22,92	1,25	8,38	5,96	14,37	29,20	20,76	50,04	0,87 [3]
Wilanów	36,69	1,15	27,32	13,08	1,68	64,92	31,09	3,99	0,40 [2]
Włochy	28,60	0,89	22,76	2,60	0,06	89,53	10,24	0,24	0,09 [1]
Wola	19,24	2,14	32,82	5,24	3,06	79,82	12,74	7,44	0,43 [2]
Żoliborz	8,46	4,76	29,92	7,84	2,51	74,31	19,46	6,23	1,22 [4]

* bez BZI – brak BZI lub jej udział powierzchniowy <75%, L/P – udział ≥75% po jednej stronie szlaku, L+P – udział ≥75% po obu stronach szlaku



Ryc. 9. Wykorzystanie BZI do rekreacji rowerowej

3.1.3. Wykorzystanie/potencjał błękitno-zielonej infrastruktury do rekreacji

Przedmiotem pomiaru są potencjał oraz wykorzystanie błękitno-zielonej infrastruktury do rekreacji, a wskaźnikami: 1) ocena elementów BZI w Google Maps oraz 2) liczba ocen elementów BZI (tab. 15).

Tabela 15. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźników (1) Ocena elementów BZI w Google Maps oraz (2) Liczba ocen elementów BZI

Świadczenie ekosystemowe		Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie natury	
CICES 5.1	Sekcja	Kulturowe	
	Dział	Bezpośrednie interakcje, in situ i w terenie, z systemami biologicznymi, zależne od ich obecności w warunkach naturalnych	
	Grupa	Fizyczne i doświadczalne interakcje ze środowiskiem przyrodniczym	
	Klasa	Cechy systemów biologicznych umożliwiające działania wspierające zdrowie, regenerację sił albo rozrywkę poprzez interakcje: 1. aktywne lub angażujące; 2. pasywne lub obserwujące	
	Kod	3.1.1.1; 3.1.1.2	
Przedmiot pomiaru (Indicatum)		Potencjał BZI do rekreacji	Wykorzystanie BZI do rekreacji
Wskaźnik		Ocena w Google Maps	Liczba ocen w Google Maps
Akronim		REK_P	REK_W

Potencjał/wykorzystanie/ zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie	Potencjał	Wykorzystanie
Konstrukcja wskaźnika	Ocena elementów BZI (parków, skwerów, jezior, terenów spacerowych i in.) w Google Maps będąca średnią z min. 50 ocen indywidualnych użytkowników	Liczba indywidualnych ocen elementów BZI (parków, skwerów, jezior, terenów spacerowych i in.) w Google Maps
Pośredni/bezpośredni	Pośredni	
Prosty/złożony	Prosty	
Wyliczony/oszacowany	Wyliczony	
Skala pomiaru	Rangowa	Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości	1-5	0-∞
Jednostka miary	—	
Jednostka przestrzenna odniesienia	Element BZI, dzielnica miasta	
Odniesienie do poziomu planowania	Regionalne	
Dane źródłowe	Opis danych	Oceny użytkowników w Google Maps
	Dysponent danych	Google
	Link do bazy danych	https://www.google.pl/maps
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	Element BZI
	Format danych	Dane GIS: serwis mapowy www (Google); shapefile (baza autorska)
	Pokrycie kraju	Cały kraj
	Aktualność danych	17.12.2021 (aktualizowane na bieżąco)
	Dostępność danych	Dane ogólnodostępne

Założenia teoretyczne

Możliwość rekreacji i odpoczynku na łonie natury ma kluczowe znaczenie dla fizycznego dobrostanu i zdrowia psychicznego mieszkańców miast (MEA, 2005; Geary i in., 2021). Tereny zielone (parki, lasy, skwery, ogrody) oraz tzw. błękitna infrastruktura (jeziora, stawy, glinianki, naturalne plaże) współtworzą sieć błękitno-zielonej infrastruktury (BZI) w tkance miejskiej (Mazza i in., 2011). Wielofunkcyjny charakter BZI oznacza, że świadczy ona wiele usług zaspokajających zróżnicowane potrzeby mieszkańców miast. Szybkie tempo życia w mieście powoduje niekorzystne napięcie i stres, które można obniżyć relaksując się w otoczeniu zieleni. Liczne badania dowodzą, że kontakt z przyrodą, w tym w szczególności aktywność fizyczna na łonie natury, ma istotny wpływ na ogólny stan zdrowia, ale także redukuje stres, zmniejsza zmęczenie psychiczne i poprawia koncentrację (Kosmala i Błaszczuk, 2012; Ward Thompson i in., 2012). Obcowanie z przyrodą ma również znaczenie dla kształtowania się procesów poznawczych (Nęcka i Żbikowski, 2005) oraz ludzkich potrzeb i pragnień (Toczek-Werner, 2004). Zielone przestrzenie miejskie są coraz bardziej doceniane (zwiększają atrakcyjność miejsca zamieszkania), ale mimo to nieustannie się

kurczą w wyniku silnej presji osadniczej (stale rośnie odsetek ludności mieszkającej na terenach miejskich). Dlatego ważną rolę odgrywają plany zagospodarowania przestrzennego uwzględniające zieleń jako ważną przestrzeń publiczną i zachowujące odpowiednie proporcje między obszarami zainwestowanymi i przyrodniczo cennymi.

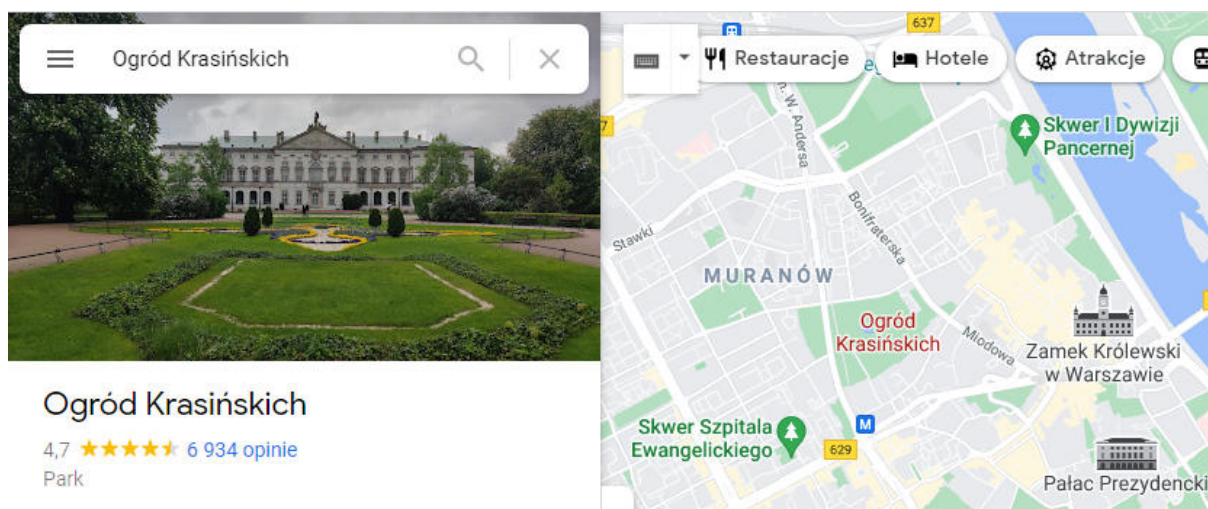
Szczególnie istotne w tym względzie jest pozyskanie wiedzy na temat tego, jak ludzie wartościują i jak wykorzystują miejskie tereny zielone dla rekreacji i interakcji społecznych. W podejściu tym na ogół celem jest niemonetarna ocena preferencji ludzi w odniesieniu do poszczególnych usług ekosystemowych. Do najczęściej stosowanych metod społeczno-kulturowych zaliczyć można ocenę preferencji, ocenę wykorzystania czasu czy mapowanie wartości krajobrazu z wykorzystaniem tzw. partycypacyjnych systemów informacji geograficznej – PGIS (ang. *Participatory Geographical Information Systems*) (Cheng i in., 2019). Jednym z wyzwań związanych z mapowaniem świadczeń kulturowych jest trudność w powiązaniu ludzkich doświadczeń z konkretnym obszarem (Burkhard i Maes, 2017). Mapowanie partycypacyjne jest szczególnie przydatne do określania świadczeń i korzyści kulturowych, które są oparte na osobistych doświadczeniach (Brown i in., 2012, 2015; Fagerholm i in., 2012). Pozwala ono ocenić rozkład przestrzenny usług ekosystemowych w oparciu o lokalną wiedzę, preferencje lub postrzeganie i ułatwia integrację z istniejącymi danymi środowiskowymi w ramach systemów wspomagania decyzji opartych na GIS (Strickland-Munro i in., 2016; Heikinheimo i in., 2020). Za pomocą narzędzi PGIS użytkownicy mogą zaznaczyć na mapie punkt lub obszar i wypełnić kwestionariusz dotyczący jednej lub więcej usług ekosystemowych lub też, jak w przypadku Google Maps, zamieścić swoją opinię i ocenić konkretny obiekt na mapie.

Metodyka uzyskania wyników

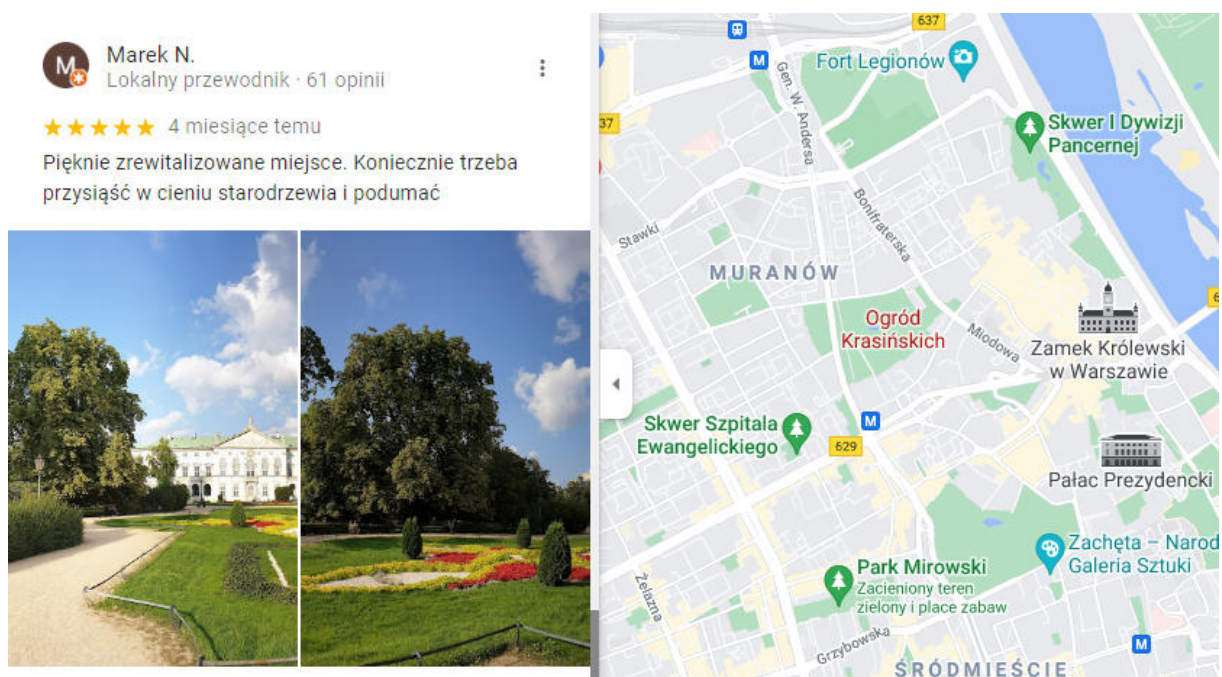
W Google Maps każdy zalogowany użytkownik może ocenić i wyrazić swoją opinię na temat dowolnego obiektu zlokalizowanego w przestrzeni, jak również wprowadzić nowy obiekt. Oceny dokonuje się poprzez przyznanie punktów (gwiazdek) w skali 1-5 (ryc. 10). Jest też możliwość pozostawienia komentarza/opinii i załączenia własnych zdjęć (ryc. 11).

W celu obliczenia wartości wskaźników dla Warszawy przeprowadzono szczegółową analizę zawartości Google Maps w granicach administracyjnych miasta w zakresie kategorii obiektów Aktywność na świeżym powietrzu (ang. *Outdoor & Recreation*) domyślnie oznaczonych w Google Maps sygnaturą zielonego drzewka. Do tej kategorii należą m.in. takie podkategorie jak Park (*Park*), Teren spacerowy (*Hiking area*), Ogród (*Garden*), Obiekt historyczny (*Historical landmark*), Muzeum (*Museum*), Atrakcja turystyczna (*Tourist attraction*), Jezioro (*Lake*). Uwzględniano jedynie te obiekty, które miały co najmniej 50 opinii indywidualnych użytkowników (reprezentatywność) i te opinie w większości odnosiły się do walorów rekreacyjnych wynikających z obecności błękitnej lub zielonej infrastruktury (trafność). Obiekty w kategorii Aktywność na świeżym powietrzu w zdecydowanej większości były oceniane właśnie pod tym względem, choć zdarzały się wyjątki (np. muzea plenerowe, place zabaw, ogrody jordanowskie, ogrody światła itp.). Należy mieć na względzie, że baza obiektów w Google Maps jest w większości tworzona przez zwykłych użytkowników, a więc kategorie obiektów czy ich nazwy nie zawsze są stosowane konsekwentnie. Są też takie obiekty, które pełnią różne funkcje, są z natury złożone i pasują

do różnych kategorii. Tego typu obiekty wymagały większej uwagi. Dopiero na podstawie przeglądu opinii i rozpoznania materiałów pomocniczych (m.in. ortofotomapa, Wikipedia) podejmowano decyzję, czy dyskusyjny obiekt stanowi element BZI i czy gros opinii związanych jest z rekreacją na łonie natury. Przyjęto także założenie, że w analizie uwzględnione zostaną jedynie obiekty o dostępie nieograniczonym (nieogrodzone parki, zieleńce, bulwary, lasy miejskie, tereny spacerowe itd.) oraz o dostępie ograniczonym czasowo i często płatnym wejściu (np. parki zamykane na noc, ogrody botaniczne i zoologiczne). Odrzucono natomiast tereny niedostępne dla ogółu społeczeństwa, w tym ogrody działkowe i zamkniętą zieleń prywatną. Nie rozpatrywano także cmentarzy, które, mimo że często wliczane do BZI, to jednak w Google Maps były w zdecydowanej większości oceniane pod innym kątem niż przydatność do rekreacji na łonie przyrody.



Ryc. 10. Ocena, liczba ocen i kategoria przypisana elementowi BZI w Google Maps



Ryc. 11. Komentarz wraz ze zdjęciami użytkownika przypisany do elementu BZI w Google Maps

Z wytypowanych 207 obiektów spełniających powyższe kryteria (elementów BZI w granicach Warszawy z liczbą ocen powyżej 50) stworzono bazę przestrzenną w formacie punktowym shapefile (shp). Następnie wprowadzono do tabeli atrybutów liczbę opinii, średnią ocenę i kategorię dla każdego elementu BZI. Wskaźnik zarówno potencjału (średnia ocena), jak i wykorzystania (liczba ocen) ma odniesienie do poszczególnego elementu BZI, ale także został zgeneralizowany do poziomu dzielnicy. Na poziomie dzielnicy ocena zbiorcza BZI stanowi zwykłą średnią ze wszystkich ocen indywidualnych użytkowników przypisanych obiektom spełniającym kryteria. Liczba ocen jest natomiast sumą zwykłą liczby wszystkich tych ocen.

Wartości wskaźników

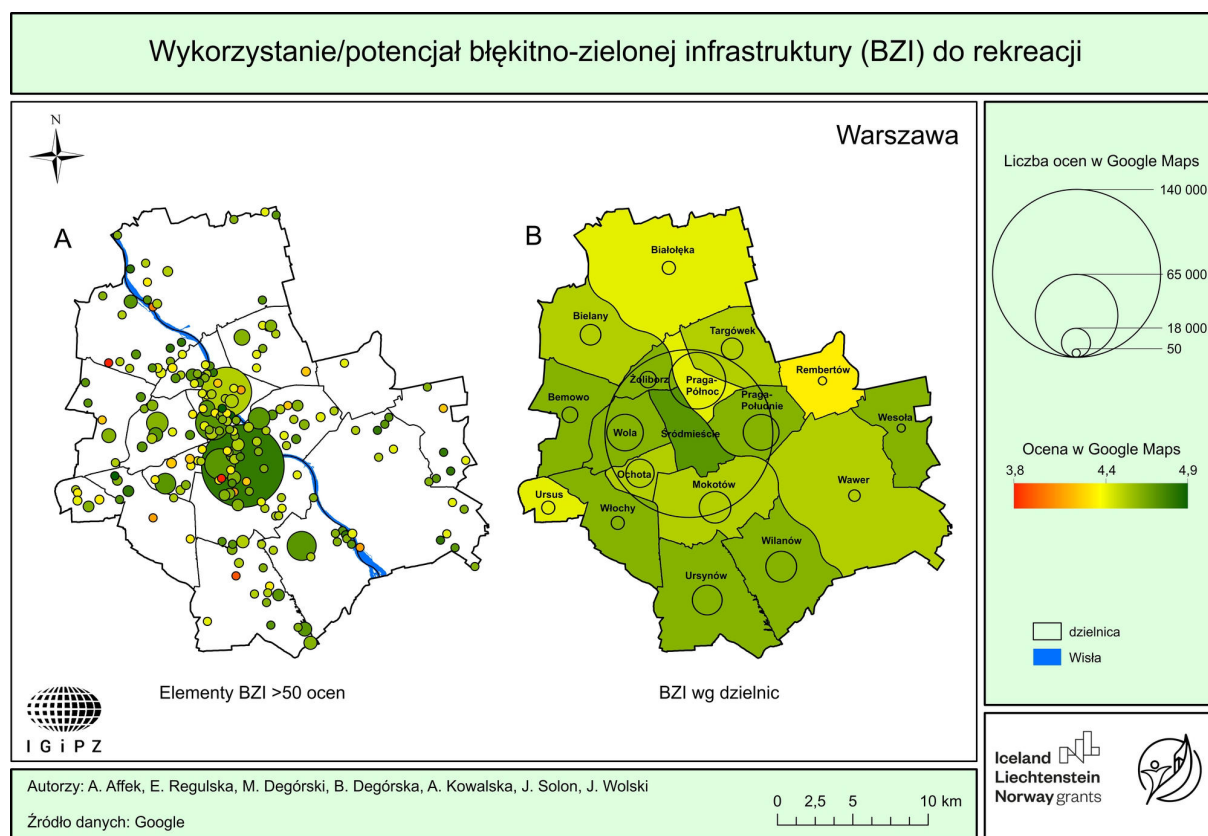
Wskaźnik wykorzystania BZI do rekreacji w Warszawie, pokazujący liczbę ocen w Google Maps, przyjmuje wartości od 50 (ustalona z góry wartość progowa) do blisko 65 000 (Łazienki Królewskie) (ryc. 12). Kolejne pozycje pod względem wykorzystania zajmuje Miejski Ogród Zoologiczny (36 000) i Ogród Saski (23 000). Na poziomie dzielnic Warszawy błękitno-zielona infrastruktura cieszy się największym wykorzystaniem w Śródmieściu (prawie 142 000 opinii) i na Pradze-Północ (42 000), najmniejszym zaś w Wesołej (650) i Rembertowie (52) (tab. 16, ryc. 12). Transformując wartości bezwzględne wskaźnika do pięciostopniowej skali wykorzystania tej usługi w Warszawie przyjęto następujące przedziały dla elementów BZI (50-2500 → 1; 2501-5000 → 2; 5001-10000 → 3; 10001-20000 → 4; >20000 → 5) i dla dzielnic (50-5000 → 1; 5001-10000 → 2; 10 001-20 000 → 3; 20 001-40 000 → 4; >40 000 → 5).

Wskaźnik potencjału BZI do rekreacji w Warszawie, pokazujący średnią ocenę użytkowników w Google Maps, przyjmuje na poziomie poszczególnego elementu BZI wartości od 3,8 (m.in. Skwer Słoweński na Mokotowie) do 4,9 (Ogród Biblioteki Uniwersyteckiej, Ogrody Zamku Królewskiego oraz Park Kozioróżca w dzielnicy Włochy) (ryc. 12). Na poziomie dzielnic Warszawy BZI cieszy się największym potencjałem do rekreacji ponownie w Śródmieściu (średnia ocen 4,73) oraz na Wilanowie (4,7), najmniejszym zaś w Ursusie (4,47) i Rembertowie (4,4) (tab. 16, ryc. 12). Transformując wartości bezwzględne wskaźnika do pięciostopniowej skali wykorzystania tej usługi w Warszawie przyjęto następujące przedziały dla elementów BZI ($\leq 4,2 \rightarrow 1$; 4,3-4,4 → 2; 4,5-4,6 → 3; 4,7-4,8 → 4; $\geq 4,9 \rightarrow 5$) i dla dzielnic ($\leq 4,40 \rightarrow 1$; 4,41-4,50 → 2; 4,51-4,60 → 3; 4,61-4,70 → 4; $> 4,70 \rightarrow 5$)

Tabela 16. Suma liczby ocen i średnia ocena elementów BZI w Google Maps jako wskaźniki odpowiednio wykorzystania i potencjału BZI do rekreacji w dzielnicach Warszawy

Dzielnica	Liczba elementów BZI >50 ocen	Wskaźnik wykorzystania Suma liczby ocen	Wskaźnik potencjału Średnia ocena
Bemowo	6	7153 [2]	4,61 [4]
Białołęka	12	5009 [2]	4,48 [2]
Bielany	14	11 583 [3]	4,59 [3]
Mokotów	23	20 936 [4]	4,56 [3]
Ochota	10	17 673 [3]	4,57 [3]
Praga-Południe	15	24 227 [4]	4,63 [4]

Praga-Północ	8	42 233 [5]	4,50 [3]
Rembertów	1	52 [1]	4,40 [1]
Śródmieście	31	141 761 [5]	4,73 [5]
Targówek	9	11 950 [3]	4,56 [3]
Ursus	5	5084 [2]	4,47 [2]
Ursynów	14	19 420 [3]	4,63 [4]
Wawer	15	3309 [1]	4,52 [3]
Wesoła	6	654 [1]	4,61 [4]
Wilanów	11	19 619 [3]	4,70 [4]
Włochy	7	5032 [2]	4,67 [4]
Wola	9	24 838 [4]	4,62 [4]
Żoliborz	11	7933 [2]	4,62 [4]



Ryc. 12. Potencjał/wykorzystanie błękitno-zielonej infrastruktury Warszawy do rekreacji. Potencjał wyrażony średnią oceną w Google, a wykorzystanie – liczbą ocen w Google. A: Rozmieszczenie elementów BZI z liczbą ocen >50 (sygnatura kołowa o promieniu proporcjonalnym do liczby ocen), B: Średnia ze wszystkich ocen (kartodiagram) i łączna liczba ocen (sygnatura kołowa) elementów BZI >50 ocen według dzielnic

3.2. Edukacja ekologiczna na łonie przyrody

Usługa należy w CICES V5.1 do sekcji KULTUROWE, działu BEZPOŚREDNIE INTERAKCJE, IN SITU I W TERENIE, Z SYSTEMAMI BIOLOGICZNYMI, ZALEŻNE OD ICH OBECNOŚCI W WARUNKACH NATURALNYCH. Polega ona na intelektualnych i tożsamościowych interakcjach ze środowiskiem przyrodniczym, które służą działaniom edukacyjnym oraz szkoleniowym na łonie przyrody. Przedmiotem pomiaru jest możliwość prowadzenia edukacji ekologicznej dzieci i młodzieży na łonie przyrody na obszarze Warszawy, a wskaźnikiem udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od terenów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody (tab. 17).

Tabela 17. Usługa ekosystemowa wg CICES V5.1 i metadane wskaźnika Udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od obszarów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody

Świadczenie ekosystemowe		Edukacja ekologiczna na łonie przyrody
CICES 5.1	Sekcja	Kulturowe
	Dział	Bezpośrednie interakcje, in situ i w terenie, z systemami biologicznymi, zależne od ich obecności w warunkach naturalnych
	Grupa	Intelektualne i tożsamościowe interakcje ze środowiskiem przyrodniczym
	Klasa	Cechy systemów biologicznych, które umożliwiają działania edukacyjne oraz szkoleniowe
	Kod	3.1.2.2
Przedmiot pomiaru (<i>Indicatum</i>)		Możliwość prowadzenia edukacji ekologicznej dzieci i młodzieży na łonie przyrody
Wskaźnik		Udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od terenów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody
Akronim		EDU
Potencjał/wykorzystanie/zapotrzebowanie/niezaspokojone zapotrzebowanie		Potencjał
Konstrukcja wskaźnika		Udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od wybranych kategorii BZI (lasów, zieleni urządzonej, zieleni nieurządzonej z dominacją zadrzewień, zieleni innej, wód powierzchniowych) w obszarze MSI
Pośredni/bezpośredni		Pośredni
Prosty/złożony		Prosty
Wyliczony/oszacowany		Wyliczony
Skala pomiaru		Ilorazowa
Teoretyczny zakres wartości		0-100%
Jednostka miary		–
Jednostka przestrzenna odniesienia		Obszar MSI
Odniesienie do poziomu		Regionalne

planowania		
Dane źródłowe	Opis danych	1. mapa struktury funkcjonalnej miasta, 2. mapa dzielnic i obszarów MSI
	Dysponent danych	Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy
	Link do bazy danych	–
	Minimalna jednostka mapowania/rozdzielczość	–
	Format danych	Dane wektorowe (shapefile)
	Pokrycie kraju	Warszawa
	Aktualność danych	1. 2018 (aktualizowane po zmianach granic), 2. 2021 (aktualizowane na bieżąco)
	Dostępność danych	1-2. na wniosek do Urzędu m.st. Warszawy, nieodpłatne

Założenia teoretyczne

Edukacja ekologiczna obejmuje wszelkie formy działalności skierowanej do społeczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem dzieci i młodzieży, które mają na celu wpływanie na poziom świadomości ekologicznej, propagowanie konkretnych zachowań korzystnych dla środowiska naturalnego, upowszechnianie wiedzy o przyrodzie. Działania te prowadzone są przez różne placówki edukacyjne m.in. szkoły i przedszkola, ponieważ są częścią formalnego systemu kształcenia. Wiele dotychczasowych badań (Affek i Kowalska, 2017; Hutcheson i in., 2018; Torkar i Krašovec, 2019) pokazało, że świadomość zachodzących procesów ekologicznych i korzyści płynących z przyrody wzrasta wraz z częstością bezpośrednich interakcji ze środowiskiem przyrodniczym, dlatego edukacja ekologiczna na łonie przyrody ma szczególne znaczenie dla promowania zasad zrównoważonego rozwoju w społeczeństwie.

Do oceny edukacyjnych świadczeń ekosystemowych, w zależności od przyjętych założeń i kryteriów, stosuje się różne wskaźniki (por. Mocior i Kruse, 2016). Przykładem mogą być badania Wolsinka (2016), prowadzone w Amsterdamie, w których świadczenia edukacyjne BZI były szacowane poprzez liczbę wycieczek organizowanych przez nauczycieli. Biorąc pod uwagę wyniki tych analiz wskazujące na silne zależności między liczbą wycieczek a odległością (bliskością) do terenów zieleni miejskiej, świadczenie – edukacja ekologiczna na łonie przyrody – przedstawiono za pomocą wskaźnika udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od terenów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody, pokazującego potencjał do prowadzenia takiej edukacji wśród dzieci i młodzieży.

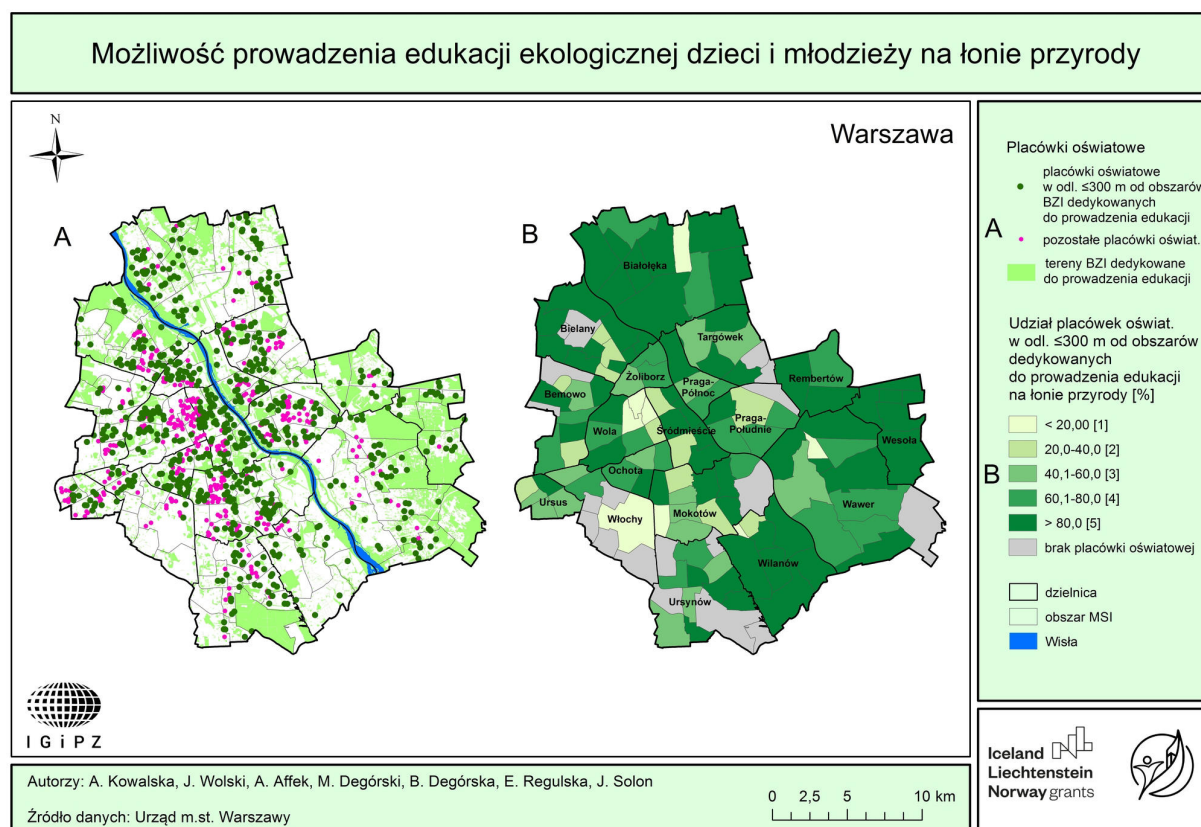
Metodyka uzyskania wyników

Po szczegółowej analizie bazy danych ze strukturą funkcjonalną miasta, udostępnionej przez Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego Urzędu m.st. Warszawy, wytypowano sześć klas (lasy, zieleń urządzoną, zieleń nieurządzoną z dominacją zadrzewień, zieleń inną, wody powierzchniowe i wody powierzchniowe na terenach parków), które uznano za priorytetowe jeśli chodzi o dostarczanie warunków do interakcji ze środowiskiem przyrodniczym i oferujące możliwość prowadzenia edukacji ekologicznej dzieci i młodzieży na łonie przyrody w mieście. Wybrano tereny o powierzchni ≥ 2 ha (patrz przypisy^{2,3}).

Dostępność do terenów oferujących możliwość edukacji na łonie przyrody badano przez wyodrębnienie placówek oświatowych (zlokalizowanych na podstawie bazy danych ze strukturą funkcjonalną miasta) znajdujących się w zasięgu buforu 300 m od terenów zieleni. Przyjęta odległość odpowiada 5-6 min. marszu, co uznano za maksymalny czas, który można poświęcić na przemieszczanie się podczas typowej 45-minutowej lekcji. Obliczono udział procentowy placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od terenów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody w obszarach MSI. Ze względu na zasięg wykorzystanych danych przestrzennych teren analiz ograniczono do obszaru miasta – nie uwzględniano terenów zieleni znajdujących się poza granicami Warszawy.

Wartości wskaźnika

Wskaźnik udziału procentowego placówek oświatowych znajdujących się w odległości ≤ 300 m od terenów przeznaczonych do prowadzenia edukacji na łonie przyrody w obszarze MSI przyjmuje wartości w przedziale 0-100%. Na terenie 19 obszarów MSI nie ma placówek oświatowych. Najniższe wartości wskaźnika ($< 20\%$) odnotowano w ośmiu jednostkach MSI na terenie dzielnic: Wola, Mokotów, Wilanów, Włochy, Białołęka i Wawer, natomiast najwyższe ($> 80\%$) w 62, zlokalizowanych głównie w dzielnicach peryferyjnych i sąsiadujących z doliną Wisły (ryc. 13).



Ryc. 13. Możliwość prowadzenia edukacji ekologicznej dzieci i młodzieży na łonie przyrody na obszarze Warszawy

LITERATURA

- Alkbari, H., Bell, R., Brazel, T., Cole, D., Estes, M., Heisler, G., Hitchcock, D., Johnson, B., Lewis, M., McPherson, G., Oke, T., Parker, D., Perrin, A., Rosenthal, J., Sailor, D., Samenow, J., Taha, H., Voogt, J.A., Winne, D., Wolf, K., Zalph, B., 2008. *Urban Heat Island Basics. W: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- Affek, A.N., Kowalska, A., 2017. *Ecosystem potentials to provide services in the view of direct users*. *Ecosystem Services*, 26: 183-196.
- Armson, D., Stringer P., Ennos, A.R., 2013. *The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12: 282-286.
- Avdan, U., Jovanovska, G., 2016. *Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data*. *Journal of Sensors*, 2016: 1480307.
- Balzan, M., Zulianb, G., Maes, J., Borg, M., 2021. *Assessing urban ecosystem services to prioritise nature-based solutions in a high-density urban area*. *Nature-Based Solutions*, 1: 100007.
- Bartens, J., Day, S.D., Harris, J.R., Dove, J.E., Wynn, T.M., 2008. *Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils for stormwater management?* *Journal of Environmental Quality*, 37: 2048-2057.
- Bartens, J., Day, S.D., Harris, J.R., Wynn, T.M., Dove, J.E., 2009. *Transpiration and root development of urban trees in structural soil stormwater reservoirs*. *Environmental Management*, 44: 646-657.
- Barwaldt, M., Franzin, R., Casarin, V., Santos, A., 2014. *Using the theory of graphs on the implementation of bike lane in small towns*. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 162: 350-358.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., Norton, K., 2018. *A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R/USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 6059-6086.
- Błażejczyk, K., 2002. *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej*. Dokumentacja Geograficzna, 26, Warszawa: IGiPZ PAN.
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Milewski, P., Dudek, W., Kręcisz, B., Błażejczyk, A., Szmyd, J., Degórska, B., Pałczyński, C., 2014. *Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*. Warszawa: Wydawnictwo Akademickie Sedno.
- Borck, R., Schrauth, P., 2021. *Population density and urban air quality*. *Regional Science and Urban Economics*, 86: 103596.
- Brown, G., Fagerholm, N., 2015. *Empirical PPGIS/PGIS mapping of ecosystem services: A review and evaluation*. *Ecosystem Services*, 13: 119-133.
- Brown, G., Montag, J.M., Lyon K., 2012. *Public participation GIS: a method for identifying ecosystem services*. *Society and Natural Resources*, 25: 633-651.
- Burkhard, B., Maes, J. (red.), 2017. *Mapping Ecosystem Services*. Sofia: Pensoft Publishers.
- Cheng, X., Van Damme, S., Li, L., Uyttenhove, P., 2019. *Evaluation of cultural ecosystem services: A review of methods*. *Ecosystem Services*, 37: 100925.
- Coles, R.W., Bussey, S.C., 2000. *Urban forest landscape in the UK – progressing the social agenda*. *Landscape and Urban Planning*, 52: 181-188.
- Crockford, R.H., Richardson, D.P., 2000. *Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate*. *Hydrological Processes*, 14: 2903-2920.
- Cui, Y., Mishra, S., Welch, T., 2014. *Land use effects on bicycle ridership: a framework for state planning agencies*. *Journal of Transport Geography*, 41: 220-228.
- Degórska, B., 2008. *Prawidłowości zróżnicowania przestrzennego i zmian struktury poziomej krajobrazu obszaru metropolitalnego Warszawy na przełomie XX i XXI wieku*. W: B. Degórska, A. Deręgowska (red.), *Atlas Warszawy, Zmiany krajobrazu obszaru metropolitalnego Warszawy na przełomie XX i XXI wieku*, 10, Warszawa: IGiPZ PAN.

- Degórska, B., 2012. *Spatial growth of urbanised land within the Warsaw Metropolitan Area in the first decade of the 21st century*. *Geographia Polonica*, 85: 77-96.
- Degórska, B., 2014. *Wrażliwość i adaptacja dużych miast do zmian klimatu w kontekście wzrostu temperatury powietrza*. *Biuletyn Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN*, 254: 27-46.
- Degórski, M., 2017. *Jakość życia a potencjał środowiska i świadczenia ekosystemów*. W: W. Okrasa (red.), *Jakość Życia i Spójność Przestrzenna – interakcje rozwoju i dobrostanu w kontekście lokalnym* (s. 225-240), Warszawa: Wydawnictwo UKSW.
- Dwyer, J.F., McPherson, E.G., Schroeder, H.W., Rowntree, R.A., 1992. *Assessing the benefits and costs of the urban forest*. *Journal of Arboriculture*, 18: 227-234.
- ECF, 2018. *The benefits of cycling. Unlocking their potential for Europe*. European Commission.
- EEA, 2012. *Urban adaptation to climate change in Europe: Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. EEA Report No 2/2012. https://orca.cardiff.ac.uk/64905/1/EEA-Report-2-2012_Urban_adaptation_to_climate_change.pdf
- EEA, 2019. *Air quality in Europe – 2019 report*. Copenhagen: European Environment Agency.
- EPA, 2008. *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. Draft. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- Fagerholm, N., Käyhkö, N., Ndumbaro, F., Khamis, M., 2012. *Community stakeholders' knowledge in landscape assessments—mapping indicators for landscape services*. *Ecological Indicators*, 18: 421-433.
- Gakidou, E., Afshin, A., Abajobir, A.A., i in., 2017. *Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016*. *Lancet*, 390: 1345-1422.
- Garnaut, R., 2008. *The Garnaut Climate Change Review. Final Report*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. *The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions*. *Transactions of the ASABE*, 50: 1211-1250.
- Geary, R.S., Wheeler, B., Lovell, R., Jepson, R., Hunter, R., Rodgers, S., 2021. *A call to action: Improving urban green spaces to reduce health inequalities exacerbated by COVID-19*. *Preventive Medicine*, 145: 106425.
- Ghekiere, A., Deforche, B., Mertens, L., De Bourdeaudhuij, I., Clarys, P., De Geus, B., Cardon, G., Nasar, J., Salmon, J., Van Cauwenberg, J., 2015. *Creating cycling-friendly environments for children: Which micro-scale factors are most important? An experimental study using manipulated photographs*. *PLoS ONE*, 10: 1-18.
- Grahn, P., Stigsdotter, U.A., 2003. *Landscape planning and stress*. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2: 1-18.
- Haase, D., Nuissl, H., 2007. *Does urban sprawl drive changes in the water balance and policy? The case of Leipzig (Germany) 1870-2003*. *Landscape and Urban Planning*, 80: 1-13.
- Hartig, T., Mitchell, R., Vries, S., Frumkin, H., 2014. *Nature and health*. *The Annual Review of Public Health*, 35: 207-228.
- Heikinheimo, V., Tenkanen, H., Bergroth, C., Järv, O., Hiippala, T., Toivonen, T., 2020. *Understanding the use of urban green spaces from user-generated geographic information*. *Landscape and Urban Planning*, 201: 103845.
- Hull, A., O'Holleran, C., 2014. *Bicycle infrastructure: can good design encourage cycling?* *Urban, Planning and Transport Research*, 2: 369-406.
- Hutcheson, W., Hoagland, P., Jin, D., 2018. *Valuing environmental education as a cultural ecosystem service at Hudson River Park*. *Ecosystem Services*, 31: 387-394.
- IUPS, 2003. *Glossary of terms for thermal physiology*. *Journal of Thermal Biology*, 28: 75-106.
- Jadczyzyn, J., Stuczyński, T., Szabelak P., Wawer R., Zieliński, M., 2003. *History and Current Status of Research and Policies Regarding Soil Erosion in Poland*. W: K. Parris (red.) *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis*.

- Proceedings from an OECD Expert Meeting on Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators* (s. 201-210), Rome: Istituto Sperimentale per la Nutrizione delle Piante.
- James, P., Banay, R.F., Hart, J.E., Laden, F., 2015. *A review of the health benefits of greenness*. Current Epidemiology Reports, 2: 131-142.
- Jimenez-Munoz, J.C., Cristobal, J., Sobrino, J.A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X., 2009. *Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47: 339-349.
- Jin, H., Eklundh, L., 2014. *A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology*. Remote Sensing of Environment, 152: 512-525.
- Józefaciuk, C., Józefaciuk, A., 1995. *Erozja agroekosystemów*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska.
- Józefaciuk C., Józefaciuk A., 1996. *Mechanizmy i wskazówki metodyczne badania procesów erozji*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska.
- Józefaciuk, A., Józefaciuk, C., 1992. *Struktura zagrożenia erozją wodną fizjograficznych krain Polski*. Pamiętnik Puławski, 101: 23-49.
- KLIMADA, 2013. *Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu, Etap III, Adaptacja wrażliwych sektorów i obszarów Polski do zmian klimatu do roku 2070*. Warszawa: Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy.
- Klimanova, O., Illarionova, O., Grunewald, K., Bukvareva, E., 2021. *Green infrastructure, urbanization, and ecosystem services: the Main challenges for Russia's largest cities*. Land, 10: 1292.
- Kosmala, M., Błaszczak, M., 2012. *Społeczny wymiar zieleni i jej wpływ na jakość życia mieszkańców miast*. Przegląd Komunalny, 8: 251.
- Kothencz, G., Kolcsár, R., Cabrera-Barona, P., Szilassi, P., 2017. *Urban Green Space Perception and Its Contribution to Well-being*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14: 766.
- Kozłowska-Szczęsna, T., Krawczyk, B., Kuchcik, M., 2004. *Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka*. Monografie IGIPZ PAN, 4, Warszawa: IGIPZ PAN.
- Krenn, P.J., Oja, P., Titze, S., 2014. *Route choices of transport bicyclists: a comparison of actually used and shortest routes*. International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 11: 31.
- Kronenberg, J., 2012. *Usługi ekosystemów w miastach*. Zrównoważony Rozwój, Zastosowania, 3: 14-28.
- Kuchcik, M., 2001. *Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy*. Prace i Studia Geograficzne, 28: 233-243.
- Kuchcik, M., 2006. *Fale upałów w Polsce w latach 1993-2002*. Przegląd Geograficzny, 78: 397-412.
- Kuchcik, M., 2013. *The attempt to validate the applicability of two climate models for the evaluation of heat wave related mortality in Warsaw in the 21st century*. Geographia Polonica, 86: 295-311.
- Kuchcik, M., 2017. *Warunki termiczne w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na umieralność*. Prace Geograficzne, 263, Warszawa: IGIPZ PAN.
- Kuchcik, M., Błażejczyk, K., 2001. *Wpływ warunków pogodowych na zachorowalność i umieralność mieszkańców Warszawy*. W: B. Krawczyk, G. Węclawowicz (red.), *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej*. Prace Geograficzne, 180: 71-87.
- Kuttler, W., 1993. *Stadtklima*. W: H. Sukopp, R. Wittig (red.), *Stadtökologie*. Stuttgart: Fischer Verlag.
- Livesley, S.J., McPherson, G.M., Calfapietra, C., 2016. *The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale*. Journal of Environmental Quality, 45: 119-124.
- Maruszczak, H., 1991. *Denudacja chemiczna*. W: L. Starkel (red.), *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze* (s. 413-416). Warszawa: PWN.
- Mazza, L., Bennett, G., De Nocker, L., Gantioler, S., Losarcos, L., Margerison, C., Kaphengst, T., McConville, A., Rayment, M., ten Brink, P., Tucker, G., van Diggelen, R., 2011. *Green Infrastructure Implementation and Efficiency. Final report for the European Commission, DG*

- Environment on Contract ENV.B.2/SER/2010/0059*. Brussels–London: Institute for European Environmental Policy.
- McDonald, R., Kroeger, T., Boucher, T., Longzhu, W., Salem, R., 2016. *Planting healthy air: a global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat*. Arlington: The Nature Conservancy.
- MEA, 2005. *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human wellbeing* (Vol. 5). Washington, DC: Island Press.
- Mertens, L., Van Cauwenberg, J., Ghekiere, A., De Bourdeaudhuij, I., Deforche, B., Van De Weghe, N., Van Dyck, D., 2016. *Differences in environmental preferences towards cycling for transport among adults: A latent class analysis*. BMC Public Health, 16: 1-10.
- Mertens, L., Van Holle, V., De Bourdeaudhuij, I., Deforche, B., Salmon, J., Nasar, J., Van de Weghe, N., Van Dyck, D., Van Cauwenberg, J., 2014. *The effect of changing micro-scale physical environmental factors on an environment's invitingness for transportation cycling in adults: An exploratory study using manipulated photographs*. The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 11: 88.
- Mocior, E., Kruse, M., 2016. *Educational values and services of ecosystems and landscapes – An overview*. Ecological Indicators, 60: 137-151.
- Nawrath, M., Kowarik, I., Fischer, L.K., 2019. *The influence of green streets on cycling behaviour in European cities*. Landscape and Urban Planning, 190: 103598.
- Nęcka, D., Żbikowski, J., 2005. Tendencje organizacyjne i programowe w rekreacji ruchowej. W: Z. Kubińska, B. Bergier (red.), *Rekreacja ruchowa w teorii i praktyce* (s. 253-269). Biała Podlaska: PWSZ.
- Nielsen, T.S., Hansen, K.B., 2007. *Do green areas affect health? Results from a Danish survey on the use of green areas and health indicators*. Health & Place, 13: 839-850.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., Pasher, J., 2018. *Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health*. Urban Forestry and Urban Greening, 29: 40-48.
- Oja, P., Titze, S., Bauman, A., de Geus, B., Krenn, P., Reger-Nash, B., Kohlberger, T., 2011. *Health benefits of cycling: a systematic review*. Scandinavian Journal of Science and Medicine in Sport, 21: 496-509.
- O'Sullivan, J.J., Bruen, M., Purcell, P.J., Gebre, F., 2011. *Urban drainage in Ireland – embracing sustainable systems*. Water and Environment Journal, 26: 241-251.
- Pałczyński, C., Dudek, W., Kręcisz, B., 2012. *Zmiany klimatu, miejska wyspa ciepła i choroby alergiczne*. Alergia, 4: 26-28.
- Paul, M.J., Meyer, J.L., 2001. *Streams in the urban landscape*. Annual Review of Ecology and Systematics, 32: 333-365.
- Pazdro, Z., Kozerski, B., 1990. *Hydrogeologia ogólna*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- PTG, 2019. *Systematyka gleb Polski*. Wrocław–Warszawa: Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Puchalski, T., Prusinkiewicz, Z., 1990. *Ekologiczne podstawy siedliskoznawstwa leśnego*. Warszawa: PWRiL.
- Pucher, J., Buehler, R. (red.), 2012. *City Cycling*. Cambridge: MIT Press.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 703.
- Schoonover, J.E., Lockaby, B.G., Helms, B.S., 2006. *Impacts of land cover on stream hydrology in the west Georgia piedmont, USA*. Journal of Environmental Quality, 35: 2123-2131.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L., 2004. *Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5*. Remote Sensing of Environment, 90: 434-440.

- Stange, E., Barton, D., Andersson, E., Haase, D., 2022. *Comparing the implicit valuation of ecosystem services from nature-based solutions in performance-based green area indicators across three European cities*. *Landscape and Urban Planning*, 219: 104310.
- Strickland-Munro, J., Kobryn, H., Brown, G., Moore, S.A., 2016. *Marine spatial planning for the future: Using Public Participation GIS (PPGIS) to inform the human dimension for large marine parks*. *Marine Policy*, 73: 15-26.
- Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego m.st. Warszawy. Uwarunkowania. Miejska Pracownia Planowania Przestrzennego i Strategii Rozwoju. Warszawa, 2020, maszynopis.
- Toczek-Werner, S., 2004. Trendy obserwowane w rekreacji na świeżym powietrzu. W: J. Wyrzykowski, K. Klementowski (red.), *Współczesne tendencje w turystyce i rekreacji* (s. 105-111). Wrocław: AWF.
- Torkar, G., Krašovec, U., 2019. *Students' attitudes toward forest ecosystem services, knowledge about ecology, and direct experience with forests*. *Ecosystem Services*, 37: 100916.
- Tu, J., Xia, Z.-G., Clarke, K.C., Frei, A., 2007. *Impact of urban sprawl on water quality in Eastern Massachusetts, USA*. *Environmental Management*, 40: 183-200.
- Turner-Skoff, J.B., Cavender, N., 2019. *The benefits of trees for livable and sustainable communities*. *Plants People Planet*, 1: 323-335.
- Vidal, D.G., Dias, R.C., Oliveira, G.M., Dinis, M.A.P., Filho, W.L., Fernandes, C.O., Barros, N., Maia, R.L., 2022. A Review on the Cultural Ecosystem Services Provision of Urban Green Spaces: Perception, Use and Health Benefits. W: W.L. Filho, D.G. Vidal, M.A.P. Dinis, R.C. Dias (red.), *Sustainable Policies and Practices in Energy, Environment and Health Research* (s. 287-331). Cham: Springer.
- Wagner, I., Krauze, K., Zalewski, M., 2013. *Błękitne aspekty zielonej infrastruktury*. *Zrównowazony Rozwój, Zastosowania*, 4: 145-155.
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., Zhao, S., 2015. *An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data*. *Remote Sensing*, 7: 4268-4289.
- Wang, J., Endreny, T.A., Nowak, D.J., 2008. *Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model*. *Journal of The American Water Resources Association*, 44: 75.
- Ward Thompson, C., Roe, J., Aspinall, P., Mitchell, R., Clow, A., Miller, D., 2012. *More green space is linked to less stress in deprived communities: Evidence from salivary cortisol patterns*. *Landscape and Urban Planning*, 105: 221-229.
- Wawer, R., Nowocien, E., Podolski, B., 2011. *Aktualne zagrożenie erozją wodną powierzchniową gleb w województwach w latach 2000-2006*. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 27: 129-135.
- Weinbrenner, H., Breithut, J., Hebermehl, W., Kaufmann, A., Klinger, T., Palm, T., Wirth, K., 2021. *"The Forest Has Become Our New Living Room" – The Critical Importance of Urban Forests During the COVID-19 Pandemic*. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4: 672909.
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J., 2004. *Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies*. *Remote Sensing of Environment*, 89: 467-483.
- Winters, M., Teschke, K., 2010. *Route preferences among adults in the near market for bicycling: findings of the cycling in cities study*. *American Journal of Health Promotion*, 25: 40-47.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. *Agriculture Handbook*, 537. Washington: Science and Education Administration, USDA.
- Wolsink, M., 2016. *'Sustainable City' requires 'recognition' the example of environmental education under pressure from the compact city*. *Land Use Policy*, 52: 174-180.
- WRR, 2020. *Warszawski Raport Rowerowy 2020*. Warszawa: Zarząd Dróg Miejskich.
- Zwierzchowska, I., Mizgajski, A., 2019. *Potencjał zielonej infrastruktury w dużych polskich miastach do świadczenia usług ekosystemowych*. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 47: 21-37.