

RAPORT

**Opracowanie dotyczące występowania powierzchniowej miejskiej
wyspy ciepła dla obszaru miasta Wrocław**



„Opracowanie dotyczące występowania powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła dla obszaru miasta Wrocław”

Data raportu: 22.11.2021 r.

Zlecniodawca: Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych
ul. Kossutha 6, 40-844 Katowice

Numer i data zlecenia/umowy: ZP/9/2021/WWE

Zespół autorski

Lp.	Stopień i tytuł naukowy	Imię i nazwisko	Autorstwo rozdziałów
1	dr	Joachim Bronder	1, 3, 4, 5, 7
2	dr inż. arch.	Justyna Gorgoń	6
3	mgr inż.	Marian Cenowski	2

Kierownik projektu / opracowania
dr Joachim Bronder
stopień, tytuł naukowy, imię i nazwisko

.....
podpis

Charakter pracy: (zaznaczyć x)

Naukowo-badawczy	Inny x
------------------	-----------

Sposób udostępnienia pracy: (zaznaczyć x)

Za zgodą Zlecniodawcy x	Za zgodą Dyrektora x	Ogólnodostępna
----------------------------	-------------------------	----------------

Zatwierdzam

Zastępca Dyrektora
dr. Elżbieta Adamczuk

.....
Dyrektor IETU

mgr Elżbieta Adamczuk

Rozdzielnik:

Zlecniodawca - 3 egz.

Autor opracowania/Kierownik projektu -

Biblioteka Naukowa IETU (elektroniczne repozytorium prac) - plik pdf

Archiwum (wersja elektroniczna) plik pdf

SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW I DEFINICJI ZASTOSOWANYCH W PRACY.....	3
1 CEL I ZAKRES PRACY	4
2 OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW TERMICZNYCH WROCŁAWIA	5
3 METODYKA OPRACOWANIA MAPY PMWC I MAPY RYZYKA TERMICZNEGO DLA MIESZKAŃCÓW WROCŁAWIA.....	8
3.1 ZARYS METODY WYZNACZANIA PMWC DLA WROCŁAWIA	8
3.2 SZCZEGÓŁOWY OPIS METODY TWORZENIA MAPY ZASIĘGU PMWC	8
3.2.1 <i>Utworzenie serii map temperatury powierzchni terenu</i>	9
3.2.2 <i>Utworzenie map temperatury powierzchni ziemi (TPZ)</i>	11
3.2.3 <i>Utworzenie mapy zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła</i>	12
3.3 METODYKA OPRACOWANIA MAPY RYZYKA TERMICZNEGO DLA MIESZKAŃCÓW WROCŁAWIA	15
3.3.1 <i>Opracowanie modelu rozkładu przestrzennego gęstości zaludnienia</i>	15
3.3.2 <i>Oszacowanie liczby mieszkańców znajdujących się w zasięgu PMWC</i>	16
3.3.3 <i>Klasyfikacja obszaru zamieszkałego pod kątem ryzyka termicznego</i>	17
4 CHARAKTERYSTYKA TERMICZNA POWIERZCHNI WROCŁAWIA NA PODSTAWIE MAPY TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI	19
4.1 ROZKŁAD PARAMETRÓW STATYSTYCZNYCH TPZ WEDŁUG KLAS POKRYCIA TERENU.....	20
4.1.1 <i>Parametry statystyczne TPZ wg klasa pokrycia terenu na podstawie BDOT10k</i>	20
4.1.2 <i>Parametry statystyczne TPZ na podstawie podklas w obrębie zabudowy mieszkaniowej wg BDOT10k</i>	22
4.1.3 <i>Parametry statystyczne TPZ na podstawie klas pokrycia terenu wg Urban Atlas</i>	23
4.1.4 <i>Opracowanie profili temperatury powierzchni ziemi w odniesieniu dla klas pokrycia terenu Corine Land Cover</i>	25
4.2 PARAMETRY STATYSTYCZNE TPZ WEDŁUG KIERUNKÓW NACHYLENIA TERENU.....	27
4.3 STOPIEŃ I INTENSYWNOŚĆ USZCZELNIENIA GLEB WROCŁAWIA	29
4.3.1 <i>Relacja pomiędzy temperaturą powierzchni ziemi a poziomem intensywności uszczelnienia gleb</i> 29	
4.3.2 <i>Rozkład parametrów statystycznych uszczelnienia gleb w podziale na osiedla Wrocławia</i>	31
4.3.3 <i>Zmiany poziomu uszczelnienia gleb Wrocławia w latach 2006-2018</i>	33
5 WYNIKI OCENY RYZYKA TERMICZNEGO DLA WROCŁAWIA.....	35
5.1 ROZKŁAD PARAMETRÓW STATYSTYCZNYCH TPZ W PODZIELNE NA OSIEDLA WROCŁAWIA	35
5.2 POWIERZCHNIA KLAS RYZYKA W PODZIALE NA OSIEDLA WROCŁAWIA.....	37
5.3 SZACUNEK LICZBY MIESZKAŃCÓW W KLASACH RYZYKA TERMICZNEGO	39
5.4 RANKING OSIEDLI WROCŁAWIA ZE WZGLĘDU NA ZAGROŻENIE TERMICZNE WYNIKAJĄCE Z ISTNIENIA PMWC.....	41
6 PROPOZYCJE DZIAŁAŃ OGRANICZAJĄCYCH NEGATYWNE SKUTKI MWC WE WROCŁAWIU	45
7 WNIOSKI	49
8 LITERATURA.....	52

SPIS TABEL

TABELA 1. WYKAZ SCEN SATELITARNYCH ORAZ PODSTAWOWE STATYSTYKI TPT WROCŁAWIA	9
TABELA 2. ZESTAWIENIE STATYSTYK OPISOWYCH DLA TEMPERATURY POWIERZCHNI WROCŁAWIA	19
TABELA 3. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ PO KLASACH POKRYCIA TERENU WG BDOT10K W °C	20
TABELA 4. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ WEDŁUG KLAS ZABUDOWY MIESZKANIOWEJ WG BDOT10K W °C	22
TABELA 5. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ NA PODSTAWIE KLAS POKRYCIA TERENU WG URBAN ATLAS W °C	24
TABELA 6. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ NA PODSTAWIE KLAS POKRYCIA TERENU CLC W °C	26
TABELA 7. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ NA PODSTAWIE KIERUNKÓW NACHYLENIA TERENU W °C	28
TABELA 8. ŚREDNI POZIOM INTENSYWNOŚCI USZCZELNIENIA I ŚREDNIE TEMPERATURY NA PODSTAWIE KLAS USZCZELNIENIA GLEB	29
TABELA 9. STOPIEŃ USZCZELNIENIA GLEB OSIEDLI WROCŁAWIA	31
TABELA 10. ZMIANY USZCZELNIENIA GLEB WROCŁAWIA W LATACH 2006-2018	34
TABELA 11. ZESTAWIENIE STATYSTYCZNE WARTOŚCI TPZ DLA OSIEDLI WROCŁAWIA W °C	35
TABELA 12. ZESTAWIENIE POWIERZCHNI PMWC I 100M BUFORA WOKÓŁ PMWC DLA OSIEDLI WROCŁAWIA	37
TABELA 13. ZESTAWIENIE WYNIKÓW OCENY RYZYKA TERMICZNEGO DLA MIESZKAŃCÓW WROCŁAWIA	39
TABELA 14. KRYTERIA ZASTOSOWANE W RANKINGU OSIEDLI WROCŁAWIA	42
TABELA 15. RANKING OSIEDLI WROCŁAWIA W OPARCIU O PRZYJĘTE KRYTERIA	42
TABELA 16. PROPOZYCJE DZIAŁAŃ OGRANICZAJĄCYCH RYZYKO WYWOŁANE ODDZIAŁYWANIEM MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W ZALEŻNOŚCI OD POZIOMU RYZYKA I KIERUNKU UŻYTKOWANIA TERENU	47

SPIS ILUSTRACJI

RYS. 1. MAPA TEMPERATURY POWIERZCHNI TERENU WROCŁAWIA NA TLE DANYCH CZUJNIKA TERMICZNEGO SATELITY LANDSAT 8 ...	10
RYS. 2. MAPA TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI (TPZ) WROCŁAWIA	12
RYS. 3. HISTOGRAM TEMPERATURY POWIERZCHNI OBSZARU MIASTA WROCŁAWIA	13
RYS. 4. WYKRES DYSTRYBUANTY TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI OBSZARU MIASTA WROCŁAWIA	13
RYS. 5. MAPA ARCHIPELAGU POWIERZCHNIOWYCH MIEJSKICH WYSP CIEPŁA I POZORNÝCH WYSP CIEPŁA	14
RYS. 6. MAPA USZCZELNIENIA GLEB WROCŁAWIA	15
RYS. 7. MODEL GĘSTOŚCI ZALUDNIENIA WROCŁAWIA	16
RYS. 8. MODEL GĘSTOŚCI ZALUDNIENIA WROCŁAWIA Z NAŁOŻONYM ZASIĘGIEM POWIERZCHNIOWEJ MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA I ZASIĘGIEM 100 METROWEGO BUFORA WOKÓŁ PMWC	17
RYS. 9. MAPA POZIOMÓW RYZYKA OBSZARÓW ZAMIESZKAŁYCH WROCŁAWIA	18
RYS. 10. MAPA POKRYCIA TERENU WROCŁAWIA WEDŁUG KLASYFIKACJI BDOT10K	20
RYS. 11. MAPA POKRYCIA TERENU WROCŁAWIA WEDŁUG KLASYFIKACJI URBAN ATLAS	23
RYS. 12. MAPA POKRYCIA TERENU WROCŁAWIA WEDŁUG KLASYFIKACJI CLC Z ZAZNACZONYMI TRANSEKTAMI	25
RYS. 13. PROFIL TEMPERATURY WZDŁUŻ TRANSEKTU NS	26
RYS. 14. PROFIL TEMPERATURY WZDŁUŻ TRANSEKTU WE	27
RYS. 15. NUMERYCZNY MODEL WYSOKOŚCI TERENU WROCŁAWIA O ROZDZIELCZOŚCI 100M	27
RYS. 16. NUMERYCZNY MODEL KIERUNKÓW NACHYLENIA TERENU WROCŁAWIA O ROZDZIELCZOŚCI 100M	29
RYS. 17. REGRESJA LINIOWA ZALEŻNOŚCI TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI OD INTENSYWNOŚCI USZCZELNIENIA GLEB (PIUG)	30
RYS. 18. MAPA KWANTYLI ŚREDNIEGO POZIOMU USZCZELNIENIA GLEB OSIEDLI WROCŁAWIA	33
RYS. 19. MAPA KWANTYLI ŚREDNIEJ TEMPERATURY POWIERZCHNI OBLICZONE DLA OSIEDLI WROCŁAWIA	37
RYS. 20. MAPA ROZMIARU POWIERZCHNI PMWC I 100M BUFORA WOKÓŁ PMWC W PODZIALE NA OSIEDLA WROCŁAWIA	39
RYS. 21. MAPA OCENY RYZYKA TERMICZNEGO MIESZKAŃCÓW MIASTA WROCŁAW W PODZIALE NA OSIEDLA	41
RYS. 22. MAPA RANKINGU POZIOMU RYZYKA TERMICZNEGO MIESZKAŃCÓW MIASTA WROCŁAW W PODZIALE NA OSIEDLA	44

WYKAZ SKRÓTÓW I DEFINICJI ZASTOSOWANYCH W PRACY

Skrót	Objaśnienie skrótu	Definicja
MWC	Miejska wyspa ciepła	Zjawisko anomalii temperaturowej polegającej na tym, iż temperatura powietrza atmosferycznego nad danym obszarem zurbanizowanym jest istotnie wyższa w stosunku do temperatury powietrza nad pozamiejskim otoczeniem
PMWC	Powierzchniowa miejska wyspa ciepła	Zjawisko anomalii temperaturowej polegającej na tym, iż temperatura powierzchni danego obszaru zurbanizowanego jest istotnie wyższa w stosunku do temperatury powierzchni obszaru niezurbanizowanego w szczególności w stosunku do terenów leśnych, podmokłych, pokrytych wodami, terenów zieleni miejskiej i terenów tzw. błękitno-zielonej infrastruktury
PWC	Pozorna wyspa ciepła	Anomalia temperaturowa polegającej na tym, iż temperatura powierzchni danego obszaru nieuszczelnionego jest istotnie wyższa w stosunku do temperatury powierzchni jego otoczenia
POPT	Powierzchnia o podwyższonej temperaturze	Obszar o niskim uszczelnieniu gleb cechujący się podwyższoną temperaturą powierzchni ziemi w stosunku do otoczenia
TPT	Temperatura powierzchni terenu	Temperatura powierzchni ziemi, budynków, budowli obliczona na podstawie pojedynczej sceny satelitarnej
TPZ	Temperatura powierzchni ziemi (temp. powierzchni)	Temperatura powierzchni ziemi, budynków, budowli obliczona na podstawie serii TPT jako wartość statystyki uwzględniająca miarę położenia centralnego jak i miarę rozproszenia
AGPU	Asymetryczny górny przedział ufności	Wartość statystyki zastosowana w obliczeniach temperatury powierzchni ziemi reprezentująca dla danej lokalizacji 95% wartości próby
MAD	Mediana bezwzględnego odchylenia	Miara rozproszenia dla serii danych o rozkładzie innym niż normalny. Mediana absolutnych różnic pomiędzy daną obserwacją a medianą
IQR	Rozstęp międzykwantylowy (rozstęp ćwiartkowy)	Miara rozproszenia dla serii danych o rozkładzie innym niż normalny. Różnica pomiędzy wartością trzeciego i pierwszego kwantyla
CODGIK	Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej	Dysponent danych przestrzennych, w tym BDOT10k. Dane bez opłat są udostępniane przez stronę internetową: geoportal.gov.pl
PUG	Poziom uszczelnienia gleb	Odnosi się do terenów o zakresie uszczelnienia gleb od 0 do 100%
PIUG	Poziom intensywności uszczelnienia gleb	Odnosi się do terenów o zakresie uszczelnienia gleb od 1 do 100%
BDOT10k	Bank danych obiektów topograficznych w skali 1:10000	Dane wektorowe zorganizowane w grupy tematyczne takie jak: sieć wodna, sieć komunikacyjna, sieć uzbrojenia terenu, pokrycie terenu, budowle i urządzenia, kompleksy użytkowania terenu, jednostki podziału terytorialnego i obiekty inne
UA	Urban Atlas	Dane wektorowe w skali 1:10 000 na temat pokrycia terenu opracowane w ramach programu Copernicus dla aglomeracji europejskich
CLC	Corine Land Cover	Dane wektorowe na temat pokrycia terenu opracowane w ramach programu Copernicus, Dane te są uzyskane z danych rastrowych o rozdzielczości 100m

1 CEL I ZAKRES PRACY

Zgodnie z umową pomiędzy Gminą Wrocław a Instytutem Ekologii terenów Uprzemysłowionych z dnia 1 września 2021 roku, celem pracy jest **wykonanie opracowania dotyczącego występowania powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła dla obszaru miasta Wrocław**. Zgodnie z powyższą umową zakres wykonanych prac objął:

1. Opracowanie dokumentacji rozkładu przestrzennego terenów o podwyższonej temperaturze w obrębie miasta Wrocław tworzących miejską wyspę ciepła, w oparciu o analizy przestrzenne i statystyczne wieloletnich serii zdjęć satelitarnych o rozdzielczości przynajmniej 100m, w tym:
 - serię map temperatury powierzchni terenu (TPT);
 - mapę temperatury powierzchni ziemi reprezentującą asymetryczny górny przedział ufności temperatury (TPZ_{AGPU}) opracowaną na podstawie kilkunastu pojedynczych map TPT;
 - mapę zasięgu i intensywności miejskich wysp ciepła, w szczególności mapę zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC) oraz zasięgu pozornej wyspy ciepła (PWC);
 - opracowanie modelu gęstości zaludnienia;
 - mapę ryzyka termicznego dla mieszkańców Wrocławia;
 - mapę uszczelnienia gleb oraz
 - mapy pokrycia powierzchni terenu według klasyfikacji CODGIK oraz Urban Atlas.
2. Opracowanie wniosków wynikających z wykonanych analiz, wymienionych w punkcie 1 obejmujących:
 - charakterystykę termiczną powierzchni miasta Wrocławia,
 - charakterystykę ryzyka termicznego dla mieszkańców miasta,
 - propozycję działań ograniczających negatywne skutki MWC we Wrocławiu.

2 OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW TERMICZNYCH WROCŁAWIA

Wrocław jest położony w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego. Klimat ten charakteryzuje się dużą zmiennością pogody, wskutek stykania się napływających mas powietrza wilgotnego oceanicznego oraz suchego kontynentalnego. Położenie geograficzne miasta w centralnej części Niziny Śląskiej, na przedpolu Sudetów, przyczynia się do jego uprzywilejowania termicznego [7]. Jest to efekt ogrzewania się mas powietrza osiadających po zawiętrznej stronie masywu górskiego Sudetów, co skutkuje występowaniem tzw. wiatru fenowego, który pojawia się średnio około 71 dni w ciągu roku [10]. Położenie Wrocławia w dolinie Odry w przypadku występowania sytuacji wyżowych (antycyklonalnych) sprzyja słabemu przewietrzaniu oraz tworzeniu się zamgleń i znacznej wilgotności powietrza. Wrocław położony jest w jednym z najcieplejszych regionów w Polsce, w tzw. „wrocławsko-opolskim obszarze ciepła”. Stosunkowo mało jest we Wrocławiu dni pogodnych (przeciętnie 27 dni), natomiast liczba dni pochmurnych wynosi około 200 dni w roku [7]. Roczna suma usłonecznienia, określana jako czas, w którym do powierzchni ziemi bezpośrednio dociera promieniowanie słoneczne, wynosi w ciągu roku średnio około 1500 godzin, ale podlega dużym wahaniom.

Szczegółowa analiza parametrów termicznych dla Wrocławia została przygotowana na potrzeby Planu adaptacji Miasta Wrocław do zmian klimatu do roku 2030 [14]. Średnia roczna temperatura powietrza we Wrocławiu wynosi $9,1^{\circ}\text{C}$ (1981-2010). Najcieplejszym miesiącem jest lipiec ($T_{\text{SR}}=19,0^{\circ}\text{C}$), a najchłodniejszym styczeń ($T_{\text{SR}}= -0,7^{\circ}\text{C}$). Największą zmiennością temperatury powietrza charakteryzują się miesiące zimowe, w styczniu zakres zmian wynosi od $-9,4^{\circ}\text{C}$ (1987 rok) do $+4,8^{\circ}\text{C}$ (2007 rok), a w najcieplejszym miesiącu roku tj. lipcu od $23,2^{\circ}\text{C}$ (2006 rok) do $15,7^{\circ}\text{C}$ (1984 rok). Najwyższa temperatura powietrza zmierzona w wieloleciu 1981-2015 wynosiła $37,9^{\circ}\text{C}$ (08.08.2015 roku), a najniższa $-30,0^{\circ}\text{C}$ (08.01.1985 roku). We Wrocławiu średnio w ciągu roku występują 24 dni mroźne ($T_{\text{MAX}} < 0^{\circ}\text{C}$), które mogą występować od listopada do kwietnia, z największą frekwencją w styczniu (9 dni) i lutym (8 dni). Dni bardzo mroźnych ($T_{\text{MIN}} < -10^{\circ}\text{C}$) jest średnio w roku 14, mogą występować od listopada do marca z największą częstością w styczniu, jednak nie są notowane w każdym sezonie zimowym. Dni gorące ($T_{\text{MAX}} > 25^{\circ}\text{C}$) we Wrocławiu mogą występować od kwietnia do października, z maksimum częstości w lipcu i sierpniu (średnio 15 dni). Średnio w roku dni gorących jest ok. 46. Dni upalne ($T_{\text{MAX}} > 30^{\circ}\text{C}$) występują średnio 8 razy w roku. Mogą pojawiać się od maja do września, a najczęściej w lipcu (średnio 5 dni). Wysokie wartości temperatury maksymalnej powietrza, utrzymujące się przez kolejne dni (fale upałów, tj. ciągi przynajmniej 3 kolejnych dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C) we Wrocławiu mogą występować od I dekady czerwca do pierwszych dni września. Najdłuższa fala upałów trwała 16 dni, wystąpiła od 22 lipca do 6 sierpnia 1994 roku, w tym okresie średnia temperatura maksymalna wyniosła $33,5^{\circ}\text{C}$, a najwyższa osiągnęła $37,4^{\circ}\text{C}$. Najwięcej okresów upalnych, bo aż 5 wystąpiło w roku 2015.

Średnia roczna temperatura miesiąca najzimniejszego (stycznia) wynosi $-0,4^{\circ}\text{C}$, a najcieplejszego (lipca) $18,8^{\circ}\text{C}$ [7]. Amplituda roczna temperatury, będąca miarą stopnia kontynentalizmu klimatu, wynosi $19,2^{\circ}\text{C}$. Stawia to Wrocław wśród obszarów nizinnej części Polski, odznaczających się najniższymi wielkościami tego wskaźnika. 20-lecie 1981-2000 należało do najcieplejszych w ciągu ostatnich 100 lat, a średnia temperatura wyniosła $8,5^{\circ}\text{C}$. Do najcieplejszych należał rok 2000 ze średnią roczną temperaturą powietrza $10,4^{\circ}\text{C}$. W najchłodniejszych latach - 1940 i 1956 średnia roczna temperatura wyniosła $6,6^{\circ}\text{C}$. Największą zmiennością temperatury cechują się miesiące zimowe, od $+4,4^{\circ}\text{C}$ (I 1921 r.), do $-11,2^{\circ}\text{C}$ (I 1940 r.). Mniejsza była zmienność temperatury w miesiącach letnich. Najcieplejszy był lipiec 1994 r. ze średnią temperaturą $22,1^{\circ}\text{C}$, zaś najchłodniejszy, lipiec 1997 r. z temperaturą średnią $15,7^{\circ}\text{C}$. We Wrocławiu zima termiczna rozpoczyna się przeciętnie 19 XII i trwa 65 dni; przedwiośnie - 22 II (34 dni); wiosna - 28 III (65 dni); lato - 1 VI i jest najdłuższą termiczną porą roku (92 dni); jesień rozpoczyna się 1 IX (68 dni), a przedzimie - 8 XI (41 dni). Okres wegetacyjny trwa przeciętnie 226 dni i należy do najdłuższych w Polsce.

Najbardziej charakterystyczną cechą klimatu miasta jest występowanie wyższych wartości temperatury powietrza w centrum w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych. Zjawisko to znane jest jako miejska wyspa ciepła (MWC). MWC jest modyfikacją klimatu lokalnego powszechnie występującą w obszarach miejskich w następstwie urbanizacji. Badania MWC we Wrocławiu przeprowadzono w okresie 1997-2000 [7], bazując na wynikach 4 stacji stacjonarnych oraz stacji mobilnych. Jedna ze stacji stacjonarnych zlokalizowana została poza terenem zabudowanym i pełniła funkcję stacji peryferyjnej, a trzy pozostałe na obszarach zabudowanych o różnym typie zabudowy. Intensywność wyspy ciepła została określona jako różnica temperatury powietrza [$^{\circ}\text{C}$] pomiędzy obszarami zabudowanymi (stacje II, III, IV) a stacją peryferyjną (stacja I). MWC została stwierdzona w ciągu całego roku, jednak jej intensywność zmieniała się w cyklu dobowym i rocznym. MWC o największej intensywności wykształcała się w sytuacjach antycyklonalnych (układy wyżowe).

Średnie roczne natężenie MWC w najcieplejszym, centralnym obszarze miasta wynosiło $1,0^{\circ}\text{C}$ i zmieniało się od $0,5^{\circ}\text{C}$ w dzień do $1,6^{\circ}\text{C}$ w nocy. W zabudowie wysokiej i willowej średnie wielkości wynosiły odpowiednio $0,7^{\circ}\text{C}$ i $0,3^{\circ}\text{C}$. Wyspy ciepła o największej intensywności stwierdzono podczas letnich nocy: od $2,3^{\circ}\text{C}$ w centrum, przez $1,6^{\circ}\text{C}$ w zabudowie wysokiej do $0,6^{\circ}\text{C}$ w zabudowie jednorodzinnej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że natężenie MWC we Wrocławiu może sięgać $9,0^{\circ}\text{C}$ i może wystąpić nocą praktycznie w każdej porze roku. Sytuacje, w których obszar miasta jest chłodniejszy niż tereny niezabudowane (tzw. jezioro chłodu) też się zdarzają, najczęściej tuż po wschodzie słońca, kiedy to tereny pozamiejskie ogrzewają się szybciej od osłoniętych terenów zabudowanych. Występowanie „jeziora chłodu” może się też wiązać z napływem mas powietrza o odmiennej charakterystyce termicznej (adwekcja).

Analiza występowania MWC na obszarze Wrocławia prowadzi do wniosku o termicznym uprzywilejowaniu obszarów intensywnej zabudowy w sezonie letnim. O tej porze roku, odznaczającej się niższymi prędkościami wiatru i mniejszym zachmurzeniem, dominującą rolę pełni możliwość akumulacji i wymiany energii pomiędzy elementami zabudowy miasta i atmosferą. Zimą, przy mniej korzystnych w porównaniu z latem warunkach meteorologicznych, o poziomie MWC na tych obszarach decyduje emisja ciepła antropogenicznego.

Analiza przebiegu dobowego intensywności MWC umożliwiła określenie przeciętnych terminów jej pojawiania się i zaniku oraz tempa nagrzewania się i wychładzania miasta w stosunku do terenów niezabudowanych. Dobowa zmienność intensywności wyspy ciepła jest zauważalna w skali całego roku. W porze ciepłej szybki wzrost jej intensywności występował od godz. 18 do 21, a maksimum wynosiło przeciętnie ponad 2°C i przypadało między godz. 22 a 24. Najwyższe wielkości MWC notowane były w maju w godzinach nocnych (między 23 a 24), osiągając przeciętnie $2,6^{\circ}\text{C}$. Wyraźny spadek intensywności MWC występował pomiędzy godz. 6 a godz. 9, kiedy uprzywilejowanie termiczne miasta było małe (do $0,4^{\circ}\text{C}$). Czasami dochodziło do wytworzenia się tzw. „jeziora chłodu”, szczególnie w lipcu i sierpniu, pomiędzy godz. 8 a 11. W sezonie chłodnym MWC była słabiej zaznaczona. Pojawiała się między godzinami 16 a 18, osiągając największą intensywność pomiędzy godz. 19 a 7. W ciągu godzin nocnych centrum miasta było przeciętnie cieplejsze o $1,2^{\circ}\text{C}$, zaś w godzinach południowych różnica temperatury wynosiła średnio $0,4^{\circ}\text{C}$. Mniejszą amplitudę dobową MWC o tej porze roku, pomimo większej emisji ciepła antropogenicznego, kształtują głównie warunki meteorologiczne - większa prędkość wiatru i duże zachmurzenie.

O intensywności i dynamice MWC w cyklu dobowym, obok takich czynników, jak charakter podłoża i struktura zabudowy oraz odległość od centrum miasta, decydują warunki pogodowe - zachmurzenie i prędkość wiatru. Największa intensywność MWC ($>3,0^{\circ}\text{C}$) występowała w warunkach małego zachmurzenia (poniżej 3/8) i małej prędkości wiatru (poniżej 2 m/s). Wzrost prędkości wiatru powyżej 5 m/s, bez względu na stopień zachmurzenia, powodował zanik lub znaczną redukcję intensywności MWC. Wyspa ciepła o średniej intensywności ($>1,0^{\circ}\text{C}$) utrzymywała się nawet przy całkowitym zachmurzeniu, jeśli prędkość wiatru nie przekraczała 1 m/s.

Najwyższe średnie natężenie MWC we Wrocławiu stwierdzono dla centrum miasta, na obszarze zwartej zabudowy o liczbie kondygnacji dochodzącej do 5. Nieco niższe wartości odnotowano na obszarach zabudowy wysokiej (około 10 kondygnacji), a także terenach związanych z przemysłem i transportem. Jeszcze niższe wartości są na obszarach zabudowy niskiej rozproszonej. Najmniejsze wartości MWC wystąpiły na terenach niezabudowanych, takich jak lasy, parki i tereny rolnicze.

3 METODYKA OPRACOWANIA MAPY PMWC I MAPY RYZYKA TERMICZNEGO DLA MIESZKAŃCÓW WROCŁAWIA

3.1 ZARYS METODY WYZNACZANIA PMWC DLA WROCŁAWIA

U podstaw metody wyznaczania zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC) leży sama definicja miejskiej wyspy ciepła (MWC). Miejska wyspa ciepła, lub archipelag miejskich wysp ciepła to zjawisko anomalii temperaturowej polegające na tym iż dany obszar zurbanizowany cechuje się cieplejszym powietrzem w stosunku do chłodniejszego otoczenia pozamiejskiego. Stanowi on swoistą wyspę cieplejszego powietrza otoczonego morzem powietrza chłodniejszego. Zatem, tak jak rzeczywista wyspa posiada linię brzegową, tak w zastosowanej metodzie badawczej, celem jest określenie położenia linii brzegowej, reprezentowanej przez temperaturę graniczną, powyżej której obserwujemy obecność miejskiej wyspy ciepła. Obszar miejskiej wyspy ciepła dotyczy terenu zurbanizowanego. Jeżeli wyższe temperatury pojawiają się poza tego typu terenem, na przykład na obszarze użytków lub nieużytków rolnych, wówczas mamy do czynienia z pozorną wyspą ciepła.

W charakterystyce temperatury powierzchni ziemi stosuje się: pomiary prowadzone na stacjach meteorologicznych oraz wyniki zobrazowań termalnych otrzymanych ze zdjęć lotniczych lub/i z obrazów satelitarnych. Wyniki tych pierwszych pozwalają na wyznaczenie średniego poziomu temperatury na większym obszarze (reprezentowanym przez stację) oraz wyznaczenie trendów zmian w temperaturze. Pomiary temperatury na stacjach meteorologicznych cechuje duża rozdzielczość czasowa, niewielka rozdzielczość przestrzenna i ograniczony zasięg przestrzenny. Z kolei wyniki zdjęć satelitarnych charakteryzują się niewielką rozdzielczością czasową (dla satelity Landsat 8 - 1 pomiar na 16 dni), stosunkowo wysoką rozdzielczością przestrzenną (Landsat 8 - 30m) i dużym zasięgiem przestrzennym pomiaru (37 tys.¹ km²) [8]. Powyższe cechy zdjęć satelitarnych sprawiają, iż są one szczególnie użyteczne w badaniach nad zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła. Miasto Wrocław jest pokryte 325 245 punktami jednoczesnego pomiaru temperatury powierzchni uzyskanymi przez satelitę Landsat 8. Ze względu na fakt, iż sensor satelity dostarcza informację, na podstawie której oblicza się temperaturę powierzchni terenu (gruntu, budowli itp.), wyznaczoną MWC nazywamy powierzchnią miejską wyspą ciepła.

3.2 SZCZEGÓŁOWY OPIS METODY TWORZENIA MAPY ZASIĘGU PMWC

Ze względów praktycznych, w niniejszym opracowaniu, mapę temperatury powierzchni (gruntu, budowli, itd.) utworzoną na podstawie obliczeń wykonanych dla pojedynczej sceny satelitarnej nazwano mapą temperatury powierzchni terenu (TPT), natomiast mapę zastosowaną do wyznaczania zasięgu PMWC a wykonaną na podstawie serii map TPT nazwano mapą temperatury powierzchni ziemi (TPZ).

¹ Sceny rzędu 024 i ścieżki 190 satelity LANDSAT 8 obejmują obszar 36 672km²

3.2.1 Utworzenie serii map temperatury powierzchni terenu

Tworzenie mapy PMWC danego obszaru przebiega kilku etapowo. W pierwszym etapie tworzone są pojedyncze mapy temperatury powierzchni terenu (TPT). W pracy zastosowano sceny satelity Landsat 8 położone na ścieżce 190 w rzędzie 024, które pokrywają całkowicie obszar Wrocławia. W obliczeniach temperatury powierzchni ziemi zastosowano pasma sceny reprezentujące długości fali elektromagnetycznej charakterystycznej dla czerwieni (B4), bliskiej podczerwieni (B5) oraz pasmo odczytane z sensora TIRS (z ang. *Thermal Infrared Sensor*) reprezentujące temperaturę (B10). Sceny te wykonano w latach 2017-2021. Przyjęto, iż sceny satelitarne stosowane w tworzeniu map TPT muszą spełniać następujące warunki:

- obszar analizy znajdujący się w zasięgu scen satelitarnych musi być wolny od zachmurzenia ponieważ zachmurzenie zniekształca obraz termiki powierzchni terenu;
- czas wykonania danej sceny satelitarnej powinien reprezentować ciepły okres roku, w tym przypadku przyjęto okres od równonocy wiosennej do równonocy jesiennej;
- sceny satelitarnej powinny być w miarę aktualne, do analiz wybiera się sceny najnowsze i uzupełnia się coraz starszymi;
- średnie temperatury powierzchni terenu obliczone na podstawie scen satelitarnych powinny tworzyć zbiór charakteryzujący się rozkładem normalnym;
- w określeniu temperatury powierzchni ziemi (TPZ) powinno się użyć co najmniej 5 zdjęć.

Poniżej w tabeli przedstawiono listę scen satelitarnych spełniających powyższe warunki (Tabela 1). Sceny te zostały zastosowane do utworzenia map temperatury powierzchni terenu (TPT). Tabela 1 zawiera zestawienie wybranych parametrów scen satelitarnych, a także średnich temperatur powierzchni ziemi na obszarze Wrocławia i odchyłeń standardowych.

Tabela 1. Wykaz scen satelitarnych oraz podstawowe statystyki TPT Wrocławia

Nr	Data	Godzina	Wysokość słońca [°]	Azymut słońca [°]	Zakres TPT (max-min) [°C]	Średnia TPT [°C]	Odchylenie Stand. TPT [°C]
1	2017-04-10	09:43:54	44,23	156,31	18,736	23,511	1,520
2	2017-05-28	09:43:59	57,41	151,85	21,222	30,192	3,074
3	2018-04-29	09:43:35	50,65	155,08	21,177	26,608	2,502
4	2018-08-19	09:43:52	48,56	153,76	16,799	28,156	2,164
5	2018-09-20	09:44:03	37,82	161,05	14,015	27,107	1,567
6	2019-04-16	09:43:52	46,25	156,04	17,255	19,525	1,774
7	2019-05-18	09:44:00	55,58	153,30	23,095	24,583	2,547
8	2019-06-03	09:44:09	58,10	151,10	21,188	30,495	2,777
9	2019-06-19	09:44:15	58,92	149,10	22,044	30,174	2,535
10	2020-04-18	09:43:59	47,23	155,92	21,359	24,141	2,556
11	2020-08-08	09:44:22	51,54	151,78	17,195	29,209	2,215
12	2020-09-09	09:44:37	41,59	158,92	14,326	23,597	1,650
13	2021-06-08	09:44:12	58,57	150,33	20,652	29,841	3,066

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8

Poszczególne mapy TPT utworzono na podstawie wzorów zawartych w podręczniku Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, USGS, April 2019 [11]. Zgodnie z instrukcją pierwszym krokiem jest obliczenie widmowej luminancji (ang. *spectral radiance*) - L_λ , gdzie wartości zmierzone przez czujnik satelity (DN) przelicza się według wzoru:

$$L_\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (1)$$

gdzie:

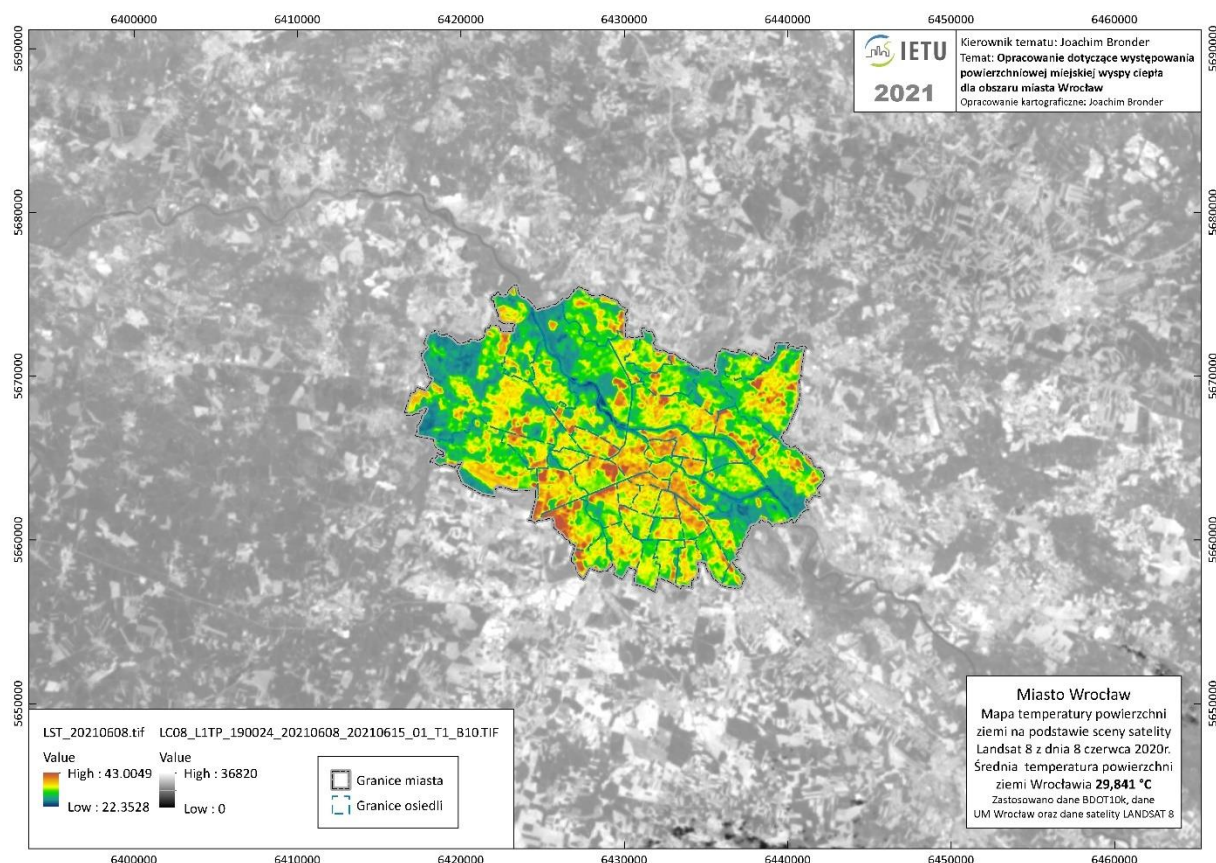
- L_λ - widmowa luminancja (Waty/(m² * sr * μm))
- ML - współczynnik przeskalowania specyficzny dla wybranego pasma
- AL - dodatkowy współczynnik przeskalowania specyficzny dla pasma
- Q_{cal} - wartości pikseli (DN)

W drugim kroku, na podstawie wartości widmowej luminancji oblicza się temperaturę jasności górnej atmosfery (ang. *top of atmosphere brightness temperature*) - T według wzoru:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

gdzie:

- T - temperatura jasności górnej atmosfery (°K)
- L_λ - widmowa luminancja (Waty/(m² * sr * μm))
- K_1 and K_2 - wartość stałych K_1 and K_2 dla Landsat 8



Rys. 1. Mapa temperatury powierzchni terenu Wrocławia na tle danych czujnika termicznego satelity Landsat 8

W kroku trzecim, w celu obliczenia powierzchniowej temperatury (temperatury kinetycznej) - LST (*land surface temperature*) zastosowano równanie Stefana-Boltzmann'a uwzględniające współczynnik emisyjności (ϵ) który obliczono na podstawie współczynnika NDVI (*ang. Normalized Difference Vegetation Index*). W ramach pracy utworzono 23 mapy temperatury powierzchni terenu (TPT), z pośród których do dalszych obliczeń i analiz wybrano 13 (Tabela 1). Mapa powyżej obrazuje istotę przekształcenia danych zawartych na obrazie satelitarnym na mapę temperaturę powierzchni terenu (TPT) Wrocławia (Rys. 1).

3.2.2 Utworzenie map temperatury powierzchni ziemi (TPZ)

Wartości temperatur powierzchni terenu dla każdego piksela tworzą próbę statystyczną, dla której oblicza się estymatory położenia (średnią) i rozproszenia (odchylenie standardowe). Na tej podstawie, uwzględniając wartość statystyki t-Studenta i wielkość próby (w tym przypadku 13), oblicza się asymetryczny górny przedział ufności temperatury. Reprezentuje on wartość temperatury poniżej której, znajduje się 95 procent przypadków temperatury dla danej próby. Tą wartość przyjmuje się jako temperaturę powierzchni ziemi (TPZ), którą stosuje się do wyznaczenia zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła. W obliczeniach TPZ stosuje się następujący wzór:

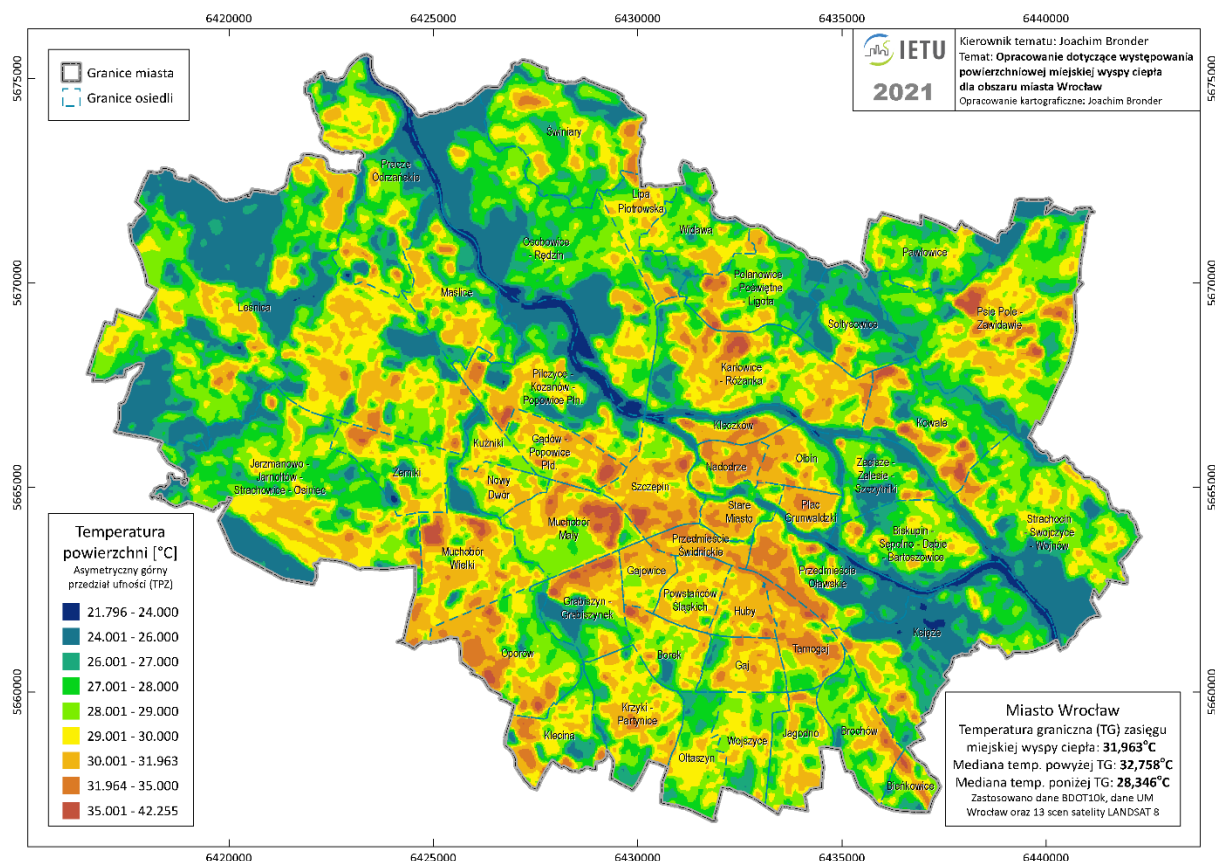
$$TPZ = T_{AGPU} = \bar{x} + \frac{t_{\alpha, n-1} * S_x}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

gdzie:

- T_{AGPU} - asymetryczny górny przedział ufności temperatury powierzchni ziemi
- $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna temperatury obliczona na podstawie n-map
- S_x - odchylenie standardowe temperatury średniej
- $T_{\alpha, n-1}$ - wartość statystyki t-Studenta dla $\alpha = 0,05$ i $n-1$ stopniami swobody
- n - wielkość próby, liczba map TPT zastosowana w obliczeniach.

Zastosowanie powyższego wzoru do wszystkich pikseli temperatury powierzchni terenu (TPT) prowadzi do utworzenia mapy temperatury powierzchni ziemi - TPZ (Rys. 2).

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń uzyskanych w trakcie realizacji projektu 44MPA i innych stwierdzono, iż z punktu widzenia oceny ryzyka termicznego, wartość asymetrycznego górnego przedziału ufności (T_{AGPU}) jest bardziej odpowiednia w stosunku do wartości średniej. Wynika to z faktu, iż wartość ta wierniej oddaje (w stosunku do średniej) zjawisko postępującej urbanizacji środowiska miejskiego. W tym przypadku unika się swoistego „rozmycia” obrazu temperatury powierzchni, które zachodzi w przypadku zastosowania wartości średniej. Stosowanie pojedynczej mapy TPT reprezentującej jeden pomiar obarczone może być błędem wynikającym z przypadkowości uzyskanego wyniku.

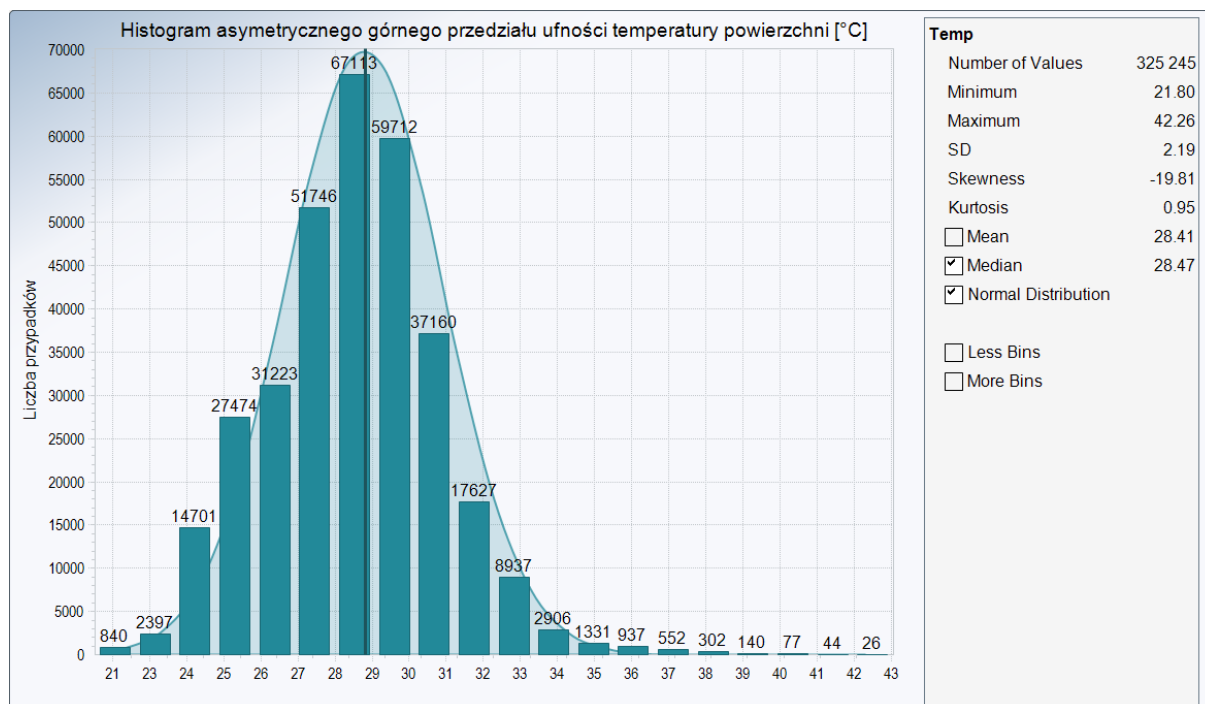


Rys. 2. Mapa temperatury powierzchni ziemi (TPZ) Wrocławia

3.2.3 Utworzenie mapy zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła

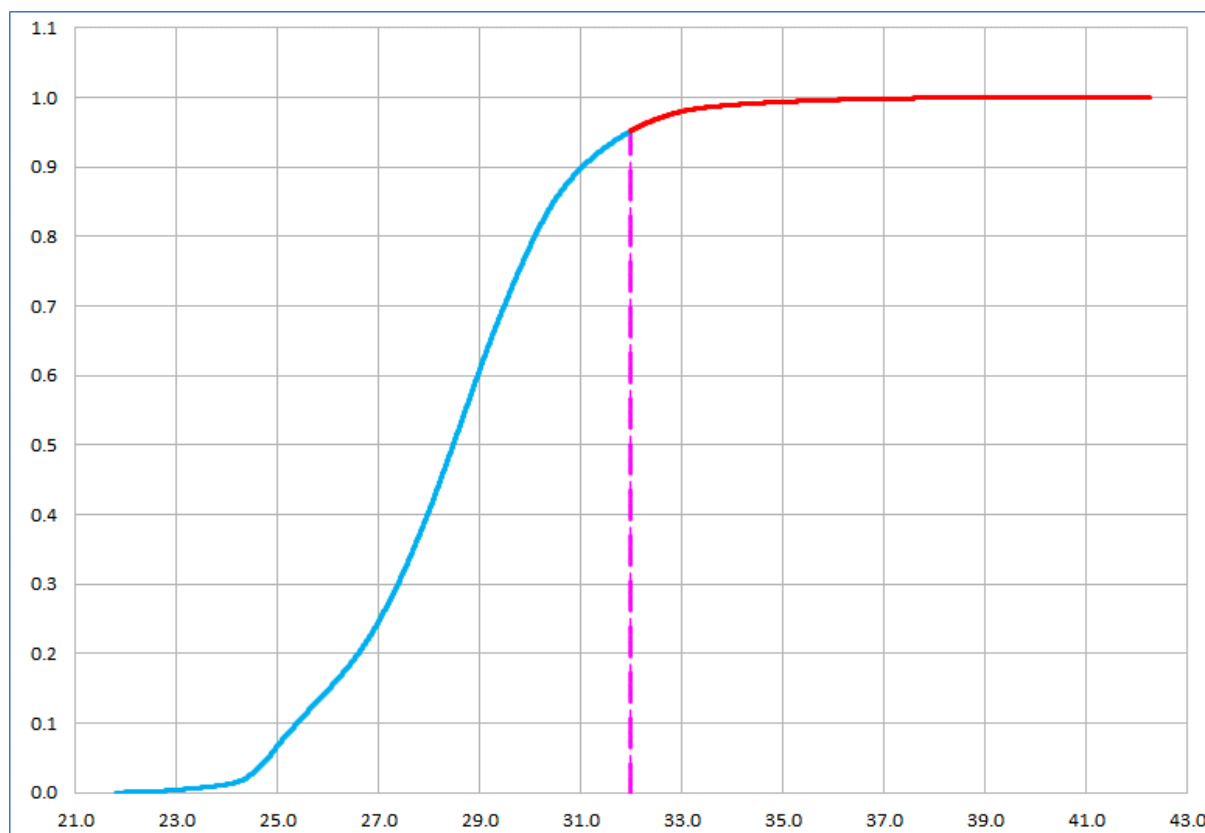
W celu wyznaczenia zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła koniecznym jest znalezienie izotermi granicznej, czyli temperatury, która oddziela obszar PMWC od obszaru „tła termicznego”. Obszar z temperaturami wyższymi od temperatury granicznej znajduje się w zasięgu PMWC lub w zasięgu pozornej wyspy ciepła.

Istnienie powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła odzwierciedla się w histogramie obliczonej temperatury powierzchni. Na histogramach temperatury obszarów ze zjawiskiem PMWC widoczna jest asymetria w postaci wyciągnięcia histogramu w kierunku wartości wysokich (Rys. 3). Asymetria odwrotna (wyciągnięcie wykresu w kierunku wartości niskich) jest typowa dla obszarów gmin wiejskich i miejsko-wiejskich, gdzie mamy do czynienia z tzw. powierzchniami o podwyższonej temperaturze (POPT), a nie z rzeczywistymi wyspami ciepła [3]. Dla wyznaczenia wartości temperatury granicznej stosuje się dystrybuantę zestandaryzowanej temperatury powierzchni ziemi. Istotą metody jest wyznaczenie na wykresie dystrybuanty temperatury punktu przegięcia powyższej funkcji (punktu granicznego). Powyżej tego punktu przyrost zestandaryzowanej temperatury powierzchni zaczyna dominować nad przyrostem wartości dystrybuanty, co się wyraża wydłużeniem funkcji w kierunku wyższych temperatur [4]. Punkt graniczny wyznacza się na podstawie statystyki serii punktów położonych na odcinku funkcji dystrybuanty temperatury, który jest nachylony pod kątem 45 stopni do osi poziomej. Dla wartości tej statystyki (np. mediany) odczytuje się wartość temperatury powierzchni ziemi.



Rys. 3. Histogram temperatury powierzchni obszaru miasta Wrocławia

Wykres poniżej przedstawia funkcję dystrybuanty temperatury z wyznaczonym punktem granicznym (Rys. 4). Punkt graniczny stanowi granicę pomiędzy dwoma obszarami.



Rys. 4. Wykres dystrybuanty temperatury powierzchni ziemi obszaru miasta Wrocławia

Temperatura graniczna i jej izoterma determinują przestrzenny rozkład archipelagu powierzchniowych miejskich wysp ciepła niezależnie od tego, czy są to rzeczywiste czy pozorne wyspy ciepła (obszary z wysokimi temperaturami położone poza tkanką miejską). Aby wyodrębnić oba rodzaje obszarów zastosowano mapę uszczelnienia gleb według stanu na rok 2018 (Rys. 6) [6] oraz ortofotomapę Wrocławia z roku 2020.

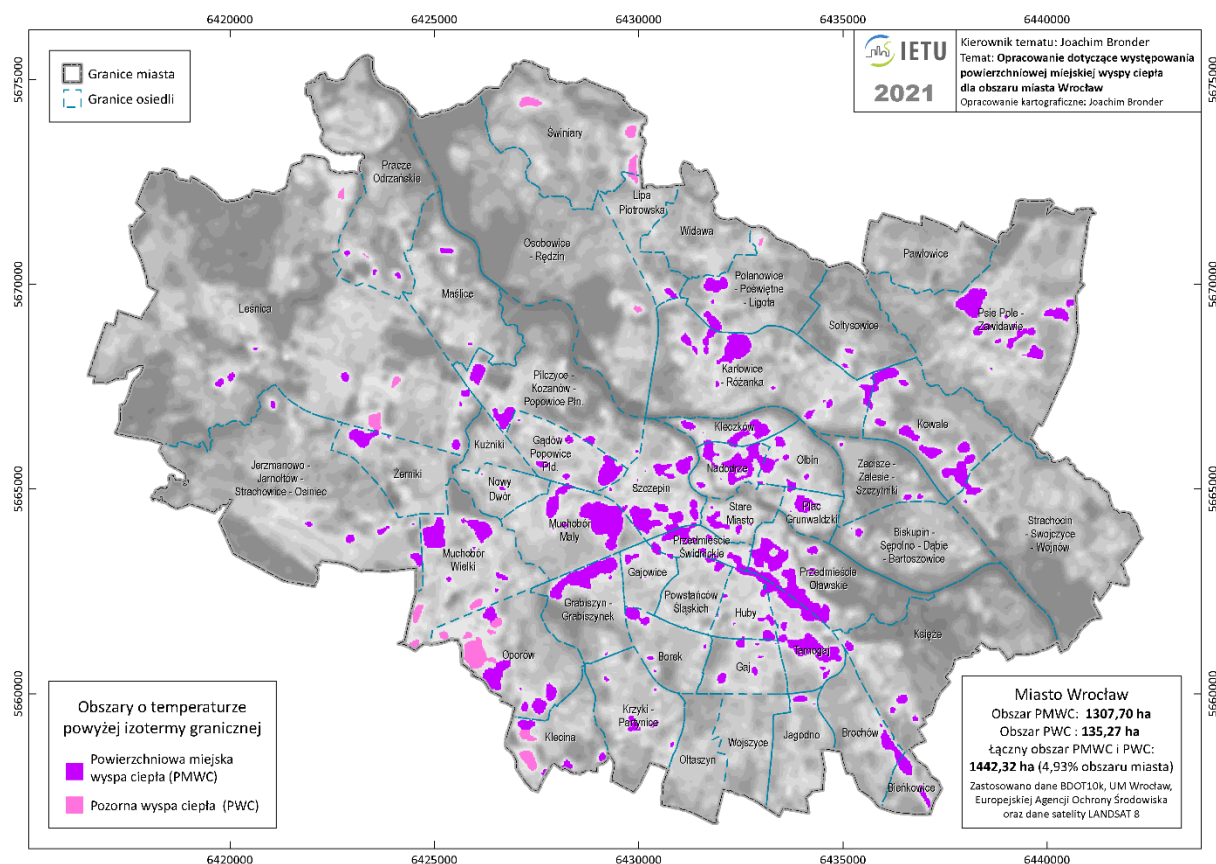
Tereny z poziomem uszczelnienia równym zero, w tym tereny, które według obrazu ortofotomapy są wolne od zabudowy, jeżeli cechowały się temperaturami powyżej temperatury granicznej zaklasyfikowano jako obszar pozornej wyspy ciepła (Rys. 5).

W celu weryfikacji występowania na danym obszarze PMWC, stosuje się również wskaźnik symetrii rozkładu temperatury (WS), który oblicza się według wzoru:

$$WS = \frac{P_{99\%} - P_{50\%}}{P_{50\%} - P_{01\%}} * \frac{P_{95\%} - P_{50\%}}{P_{50\%} - P_{05\%}} \quad (4)$$

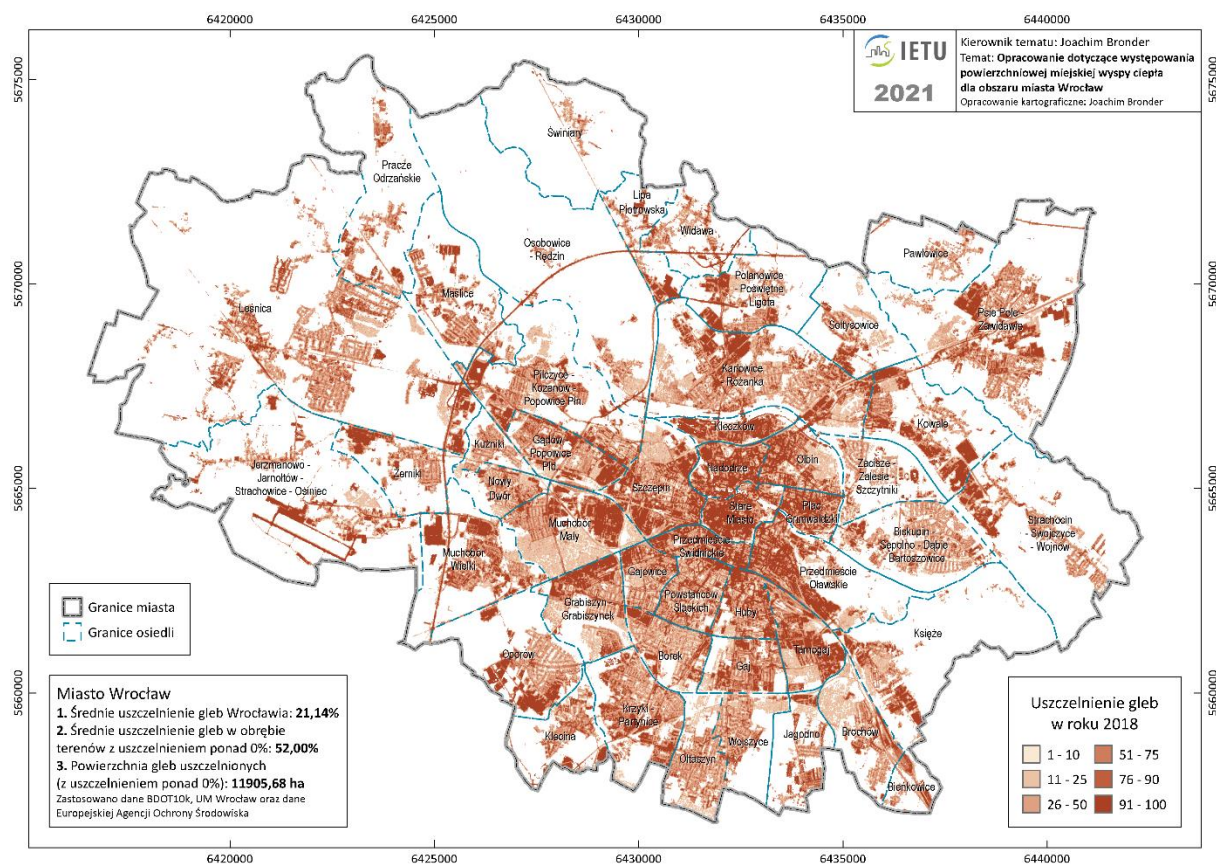
gdzie $P_{01\%} \dots P_{99\%}$ to odpowiednie wartości percentyla temperatury powierzchni.

Wartości wskaźnika > 1 wskazują na wykształcenie się rzeczywistej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, natomiast wskaźnik < 1 wskazuje, iż mamy do czynienia, z powierzchnią o podwyższonej temperaturze (POPT). Wskaźnik WS powyżej 1 jest charakterystyczny dla powiatów grodzkich i gmin miejskich. Wskaźnik WS dla Wrocławia wynosi **1,17**. Zatem kształt histogramu temperatury powierzchni oraz wartość wskaźnika WS pozwalają na weryfikację istnienia PMWC.



Rys. 5. Mapa archipelagu powierzchniowych miejskich wysp ciepła i pozornych wysp ciepła

W ocenie występowania PMWC przydatna jest wartość intensywności uszczelnienia czyli średniego uszczelnienia w obrębie obszaru z uszczelnieniem co najmniej jednoprocentowym. Gdy wartość ta dla danego obszaru przekracza 50% mamy do czynienia z obszarem, na którym kształtuje się PMWC. Wartość ta dla Wrocławia wynosi 52%, co wskazuje, że na terenie miasta powstaje PMWC (Rys. 6).



Rys. 6. Mapa uszczelnienia gleb Wrocławia

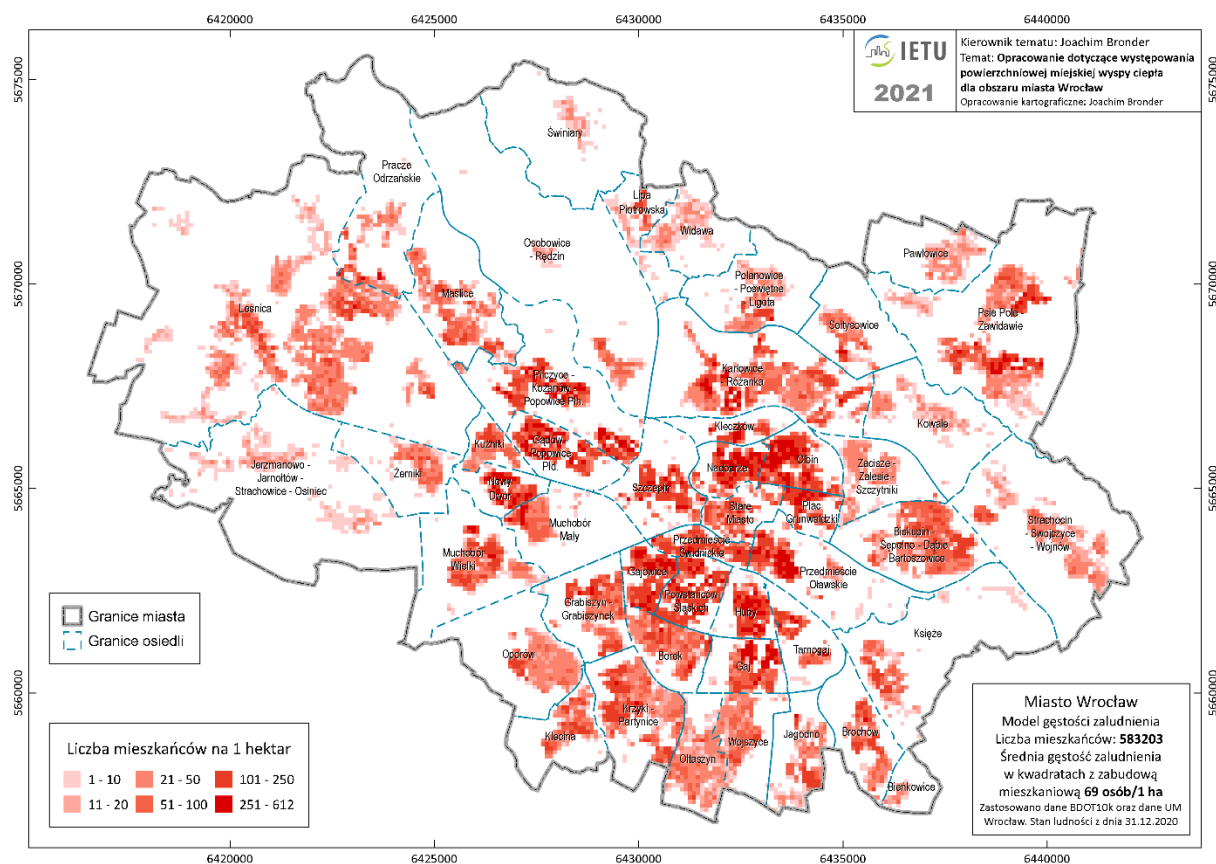
3.3 METODYKA OPRACOWANIA MAPY RYZYKA TERMICZNEGO DLA MIESZKAŃCÓW WROCŁAWIA

Zastosowana w pracy metodyka bazowała na rozwiązaniu metodycznym wypracowanym w projekcie „MPA 44 - Opracowanie planów adaptacji do zmian klimatu w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców”.

3.3.1 OPRACOWANIE MODELU ROZKŁADU PRZESTRZENNEGO GĘSTOŚCI ZALUDNIENIA

W opracowaniu modelu gęstości zaludnienia mieszkańców Wrocławia zastosowano dane przestrzenne Urzędu Miasta Wrocławia, w szczególności mapę granic rejonów statystycznych zawierającą w tabeli atrybutów dane o liczbie mieszkańców według stanu na 31 grudnia 2020 roku oraz dane przestrzenne banku danych obiektów topograficznych w skali 1:10000, (BDOT10k) pobrane z serwisu geoportal.gov.pl zawierające numeryczną mapę budynków. Opracowany model gęstości zaludnienia przedstawia liczbę mieszkańców przypadających na jednostkę powierzchni reprezentującą kwadrat o boku 100m (Rys. 7).

Pierwszym etapem tworzenia modelu gęstości zaludnienia jest przestrzenne rozrzucenie mieszkańców po budynkach mieszkalnych znajdujących się w danym rejonie statystycznym. Uwzględniono przy tym powierzchnię rzutu budynku, ilość pięter mieszkalnych oraz liczbę mieszkańców zameldowanych w rejonie. Tym sposobem obliczono liczbę mieszkańców przypisaną do każdego budynku o funkcji mieszkalnej.



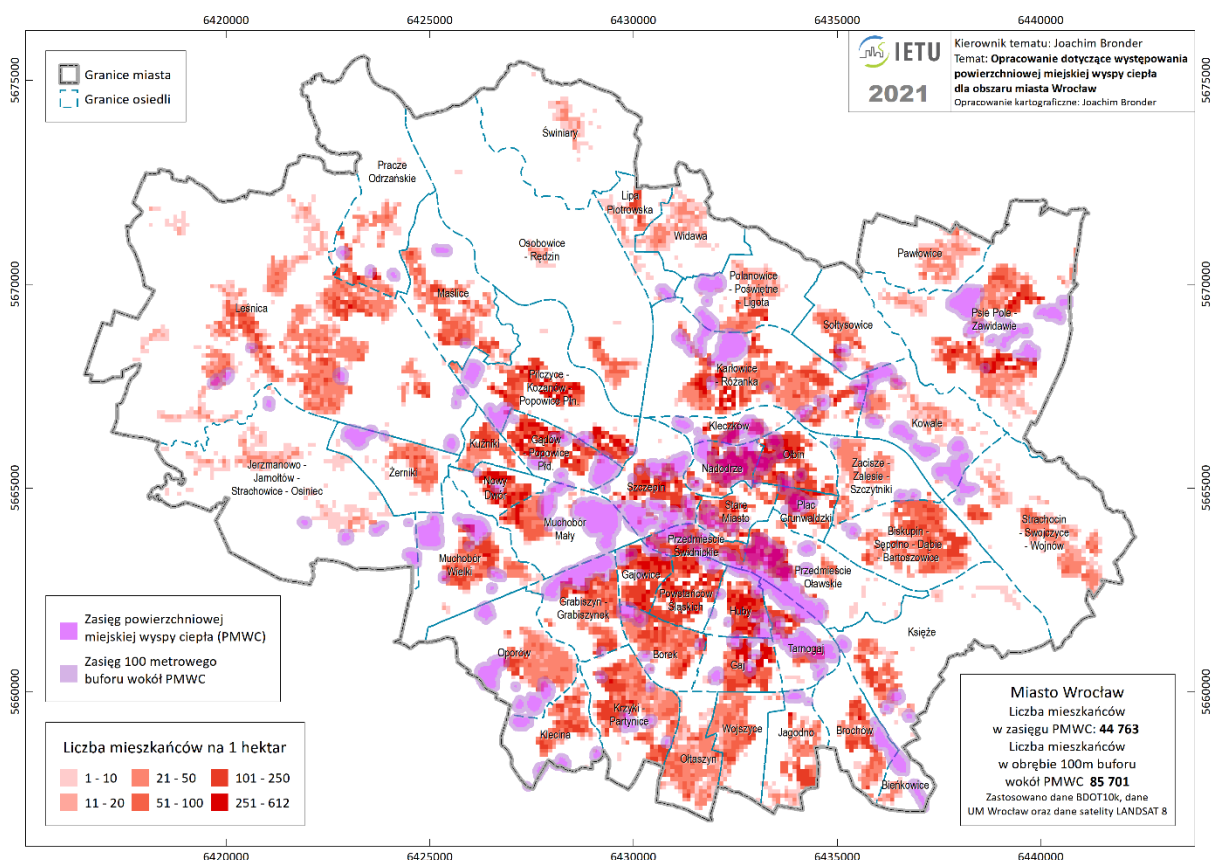
Rys. 7. Model gęstości zaludnienia Wrocławia

Następnie na tej podstawie, w granicach wieloboku stanowiącego rzut danego budynku utworzono punktową mapę numeryczną, w której punkty symbolizują mieszkańców budynku. Liczba punktów numerycznej mapy populacji Wrocławia jest równa liczbie zameldowanych mieszkańców miasta i wynosi 583203. W kolejnym kroku na mapę punktową nałożono sieć kwadratów o boku 100m i dokonano agregacji punktów w tychże kwadratach. Tym sposobem utworzono model gęstości zaludnienia mieszkańców Wrocławia, który przedstawia ilość mieszkańców na 1 ha (Rys. 7). Oszacowano, iż średnia gęstość zaludnienia w kwadratach o powierzchni 1 ha wynosi 69 osób. Według modelu maksymalna gęstość wynosi 612 osób. Ilość jednohektarowych „zamieszkałych” kwadratów wynosi 8486.

3.3.2 OSZACOWANIE LICZBY MIESZKAŃCÓW ZNAJDUJĄCYCH SIĘ W ZASIĘGU PMWC

Na podstawie punktowej mapy populacyjnej oraz mapy archipelagu powierzchniowych miejskich wysp ciepła oszacowano wielkości populacji znajdującej się w zasięgu PMWC oraz wielkość populacji znajdująca się w 100m buforze wokół PMWC (Rys. 8). Bufor reprezentuje strefę przejściową pomiędzy rdzeniem PMWC, a pozostałym obszarem.

Jest to obszar w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia PMWC i stanowi on strefę przejściową, w której najprawdopodobniej obserwuje się wpływ PMWC. W wyniku analizy przestrzennej oszacowano, iż całkowita liczba mieszkańców znajdująca się w zasięgu PMWC i 100 metrowego buforu wokół PMWC wynosi 130464 (co stanowi 22,37% ogółu mieszkańców Wrocławia), przy czym w zasięgu samej PMWC 44763 (7,68% ogółu mieszkańców), a w zasięgu 100 metrowego buforu 85701 (14,69% ogółu mieszkańców). Wykonana analiza przestrzenna pozwoliła także wykazać, iż w obrębie pozornej wyspy ciepła (PWC) i 100 m buforu wokół PWC nie stwierdzono występowania budynków mieszkalnych i tym samym mieszkańców. Zatem jedynie PMWC stanowi źródło ryzyka termicznego dla mieszkańców miasta.



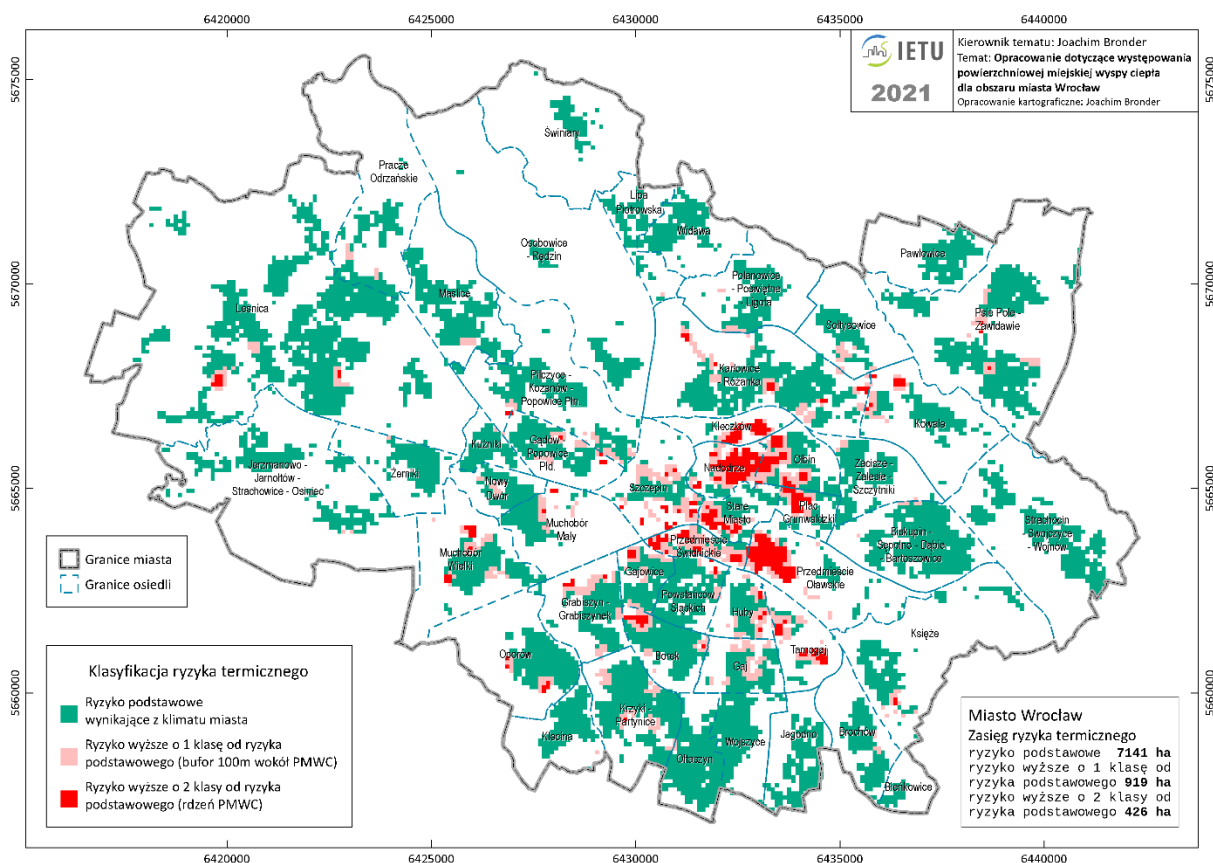
Rys. 8. Model gęstości zaludnienia Wrocławia z nałożonym zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i zasięgiem 100 metrowego buforu wokół PMWC

3.3.3 KLASYFIKACJA OBSZARU ZAMIESZKAŁEGO POD KĄTEM RYZYKA TERMICZNEGO

W celu utworzenia mapy ryzyka termicznego zastosowano punktową mapę populacyjną oraz kwadraty mapy gęstości zaludnienia o boku 100m. W klasyfikacji przyjęto, iż:

- Kwadraty/obszary, poza 100 metrowym buforem wokół PMWC i poza PMWC sklasyfikowano jako obszary o ryzyku podstawowym;
- Kwadraty/obszary z mieszkańcami znajdującymi się w 100 metrowym buforze wokół PMWC sklasyfikowano jako obszary o ryzyku wyższym o 1 klasę od podstawowego;
- Kwadraty/obszary z mieszkańcami znajdującymi się w zasięgu PMWC sklasyfikowano jako obszary o ryzyku wyższym o 2 klasy od podstawowego.

W kontekście przestrzennym, jeżeli przyjmiemy jednohektarową rozdzielczość przestrzeni miasta, można stwierdzić iż 15,85% jego powierzchni stanowią obszary o ryzyku termicznym podwyższonym, z czego około 5% stanowią obszary o ryzyku termicznym podwyższonym dwie klasy.



Rys. 9. Mapa poziomów ryzyka obszarów zamieszkałych Wrocławia

4 CHARAKTERYSTYKA TERMICZNA POWIERZCHNI WROCŁAWIA NA PODSTAWIE MAPY TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI

W charakterystyce termicznej powierzchni ziemi Wrocławia zastosowano parametry statystyczne temperatury obliczone dla klas pokrycia powierzchni terenu w trzech wariantach, dla podklas zabudowy mieszkaniowej i dla kierunków nachylenia terenu. Dokonano także próby powiązania temperatury (TPZ) ze stopniem uszczelnienia gleb. Utworzona w ramach pracy warstwa informacyjna temperatury powierzchni ziemi (TPZ) cechuje się następującymi statystykami (Rys. 2, Rys. 3, Rys. 4, Tabela 1).

Tabela 2. Zestawienie statystyk opisowych dla temperatury powierzchni Wrocławia

temperatura minimalna	21,796°C
temperatura maksymalna	42,255°C
zakres temperatur	20,459°C
temperatura średnia	28,413°C
odchylenie standardowe temperatury	2,190°C
mediana temperatury	28,467°C
mediana odchylenia bezwzględnego (MAD) temperatury	2,024°C
temperatura środkowa	32,026°C
temperatura graniczna	31,963°C
mediana temperatury poniżej temperatury granicznej	28,346°C
mediana temperatury powyżej temperatury granicznej	32,758°C

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych UM Wrocław

Powyższe statystyki stanowią bazę odniesienia do wyników analiz statystycznych temperatury powierzchni przedstawionych w kolejnych częściach pracy.

Mediana temperatury strefy poniżej temperatury granicznej (leżącej poza PMWC) jest o około 4,4°C niższa w stosunku do mediany strefy powyżej lub równej temperaturze granicznej, czyli obszaru PMWC (Tabela 1).

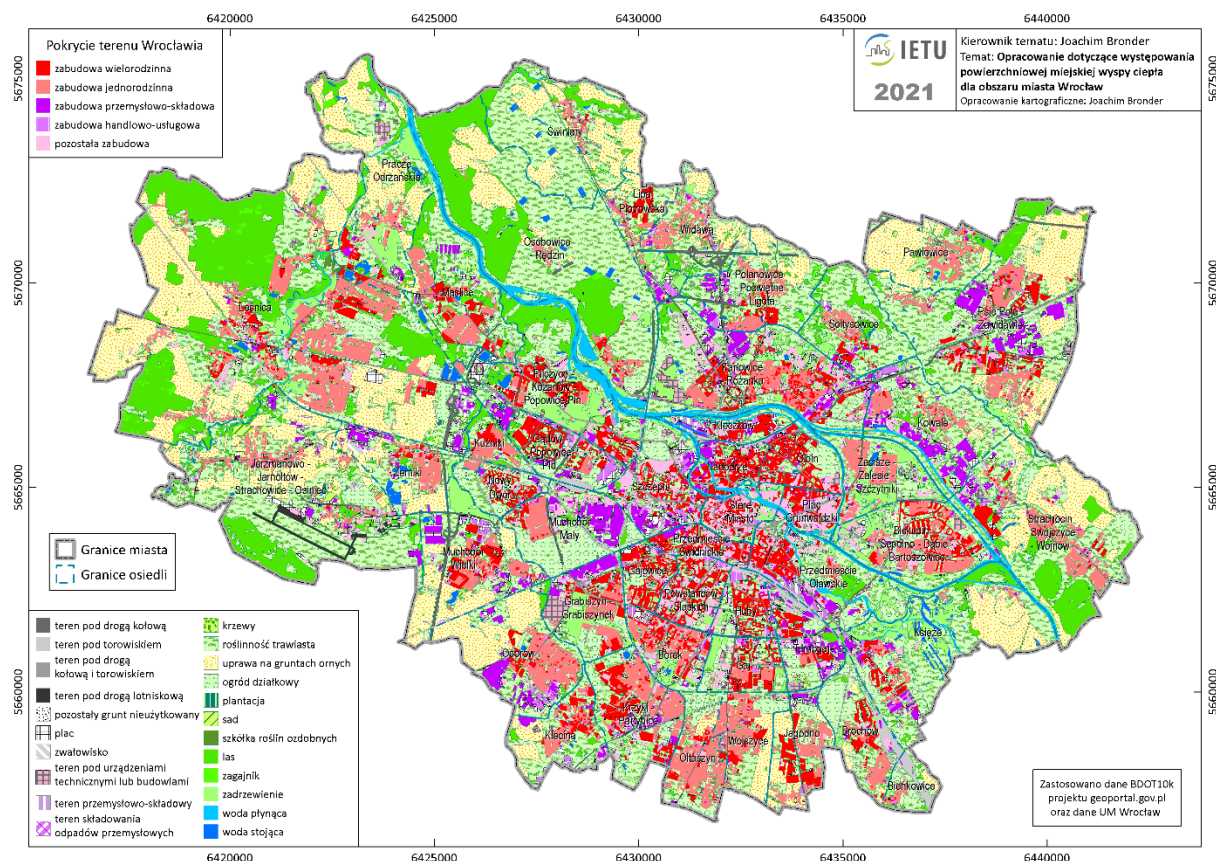
Na uwagę zasługuje wartość zakresu temperatur (różnica pomiędzy temperaturą maksymalną a minimalną) wynosząca dla całego Wrocławia około 20,5°C. Dla Lubelskiego Obszaru Metropolitalnego zakres temperatury obliczony podobną metodą wyniósł 20,5°C [3], dla Tarnowskich Gór około 15,9°C [13], a dla 27 gmin centralnej części woj. śląskiego zakres temperatur wyniósł 22,5°C. Zakres temperatur wzrasta, gdy w obszarze objętym analizą występują jednocześnie tereny podmokłe i pokryte wodami oraz tereny pokryte wielohektarowymi halami i placami obiektów przemysłowych, logistycznych (magazynowych) oraz handlowych [9].

Na uwagę zasługuje także fakt, iż temperatura graniczna odbiega od miar centralnych (średniej i mediany) od których jest wyższa. Z drugiej strony jest ona zbliżona do wartości temperatury środkowej tj. wartości temperatury znajdującej się w jednakowej odległości od wartości minimalnej i od wartości maksymalnej.

4.1 ROZKŁAD PARAMETRÓW STATYSTYCZNYCH TPZ WEDŁUG KLAS POKRYCIA TERENU

4.1.1 PARAMETRY STATYSTYCZNE TPZ WG KLAS POKRYCIA TERENU NA PODSTAWIE BDOT10K

W pierwszym kroku przeprowadzono próbę wyjaśnienia przyczyn występowania podwyższonych temperatur powierzchni na obszarze miasta Wrocławia. W tym celu na mapę temperatury powierzchni nałożono mapę pokrycia terenu BDOT10k (Rys. 10). Tym sposobem na obszarze Wrocławia wyróżniono 27 klas pokrycia terenu wg powyższej klasyfikacji (Rys. 10).



Rys. 10. Mapa pokrycia terenu Wrocławia według klasyfikacji BDOT10k

Otrzymano tablicę zawierającą statystyki opisowe temperatury TPZ po klasach pokrycia terenu według klasyfikacji BDOT10k (Tabela 3). Wartości średniej temperatury TPZ poszczególnych klas pokrycia terenu tworzą serię danych, która charakteryzuje się rozkładem normalnym. Kolorem zaznaczono wartości średnich TPZ klas pokrycia terenu (Tabela 3).

Tabela 3. Zestawienie statystyczne wartości TPZ po klasach pokrycia terenu wg BDOT10k w °C

Kod	Nazwa klasy pokrycia terenu	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
PTZB01	zabudowa wielorodzinna	25,249	35,378	10,129	30,069	1,177
PTZB02	zabudowa jednorodzinna	24,141	34,327	10,186	29,104	0,912
PTZB03	zabudowa przemysłowo-składowa	24,502	42,094	17,592	32,407	2,537
PTZB04	zabudowa handlowo-usługowa	26,448	42,255	15,808	31,908	2,478
PTZB05	pozostała zabudowa	23,759	38,711	14,952	30,286	1,569
PTKM01	teren pod drogą kołową	25,129	35,969	10,840	29,587	1,236
PTKM02	teren pod torowiskiem	24,725	35,547	10,821	30,187	1,945
PTKM03	teren pod drogą kołową i torowiskiem	25,338	35,314	9,976	30,107	1,490

Kod	Nazwa klasy pokrycia terenu	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
PTKM04	teren pod drogą lotniskową	28,755	33,400	4,645	30,906	0,638
PTGN04	pozostały grunt nieużytkowany	27,791	28,295	0,504	27,963	0,174
PTPL01	plac	23,397	39,357	15,960	30,690	1,796
PTWZ02	zwałowisko	28,763	32,398	3,635	30,333	0,742
PTNZ01	teren pod urządzeniami technicznymi lub bud.	23,803	35,705	11,902	27,981	1,943
PTNZ02	teren przemysłowo-składowy	24,847	36,334	11,487	30,133	1,776
PTS002	teren składowania odpadów przemysłowych	28,655	31,951	3,296	31,303	0,688
PTRK02	krzewy	23,609	30,509	6,900	27,029	1,244
PTTR01	roślinność trawiasta	22,666	37,333	14,666	28,121	1,668
PTTR02	uprawa na gruntach ornych	24,471	34,277	9,807	28,701	1,452
PTUT01	ogród działkowy	24,062	34,706	10,644	28,253	0,958
PTUT02	plantacja	26,352	28,883	2,531	27,840	0,686
PTUT03	sad	25,134	31,912	6,778	27,979	1,124
PTUT05	szkółka roślin ozdobnych	25,702	29,845	4,143	27,838	0,908
PTLZ01	las	22,353	35,587	13,234	25,560	1,154
PTLZ02	zagajnik	24,070	28,498	4,428	25,853	0,893
PTLZ03	zadrzewienie	22,802	34,480	11,678	26,454	1,506
PTWP02	woda płynąca	21,796	31,257	9,460	24,687	1,618
PTWP03	woda stojąca	23,169	34,771	11,603	26,270	1,685

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych BDOT10k

OS - odchylenie standardowe

Najwyższą średnią temperaturą powierzchni ziemi (TPZ) charakteryzują się tereny zabudowy przemysłowo-składowej (32,407°C). Stosunkowo wysokimi średnimi wartościami TPZ cechują się także tereny zabudowy handlowo-usługowej, tereny składowania odpadów przemysłowych, tereny pod drogą lotniskową, tereny placów oraz tereny pod zwałowiskami (średnia arytmetyczna ze średnich w/w 6 klas wynosi 31,258°C). Najniższymi temperaturami charakteryzują się tereny wód płynących (24,687°C). Relatywnie niskimi średnimi TPZ charakteryzują się także tereny pokryte krzewami, tereny zadrzewione, tereny pokryte wodami stojącymi oraz tereny zagajników i lasów (średnia arytmetyczna ze średnich w/w 6 klas wynosi 25,976°C). Średnie TPZ terenów zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej i wielorodzinnej są wyższe od średniej TPZ dla wszystkich wyróżnionych klas pokrycia terenu.

Tereny zabudowy jednorodzinnej, ze względu na średnią TPZ, są pierwszą klasą pokrycia terenu powyżej wartości centralnej (medianie lub średniej). Z kolei zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej są klasą trzecią powyżej wartości środkowej na 13 klas pokrycia terenu, których wartości są wyższe od wartości centralnej. Można zatem stwierdzić, iż pod względem średniej wartości TPZ tereny zabudowy mieszkaniowej są średnio narażone na podwyższone temperatury biorąc pod uwagę wszystkie klasy pokrycia terenu wg klasyfikacji BDOT10k.

4.1.2 PARAMETRY STATYSTYCZNE TPZ NA PODSTAWIE PODKLAS W OBRĘBIE ZABUDOWY MIESZKANIOWEJ WG BDOT10k

Mapa pokrycia terenu BDOT10k systematyzuje tereny zabudowy mieszkaniowej na podklasy według 3 atrybutów. Pierwszy z nich to **rodzaj** zabudowy, który dzieli zabudowę na jednorodziną i wielorodziną (tj. 2 podklasy). Kolejny atrybut to **charakter** zabudowy, w obrębie którego wyróżnia się zabudowę: luźną, gęstą i zwartą (3 podklasy). Ostatni atrybut to **roślinność**, systematyzujący zabudowę ze względu na pokrycie roślinnością przestrzeni pomiędzy budynkami. W ramach tego atrybutu wyróżniono tereny bez roślinności (brak roślinności, brak roślinności i plac twardy) oraz pokryte roślinnością tj. pokryte drzewami, pokryte sadami i pokryte trawą (łącznie 5 podklas). Kombinacja wartości powyższych atrybutów tworzy na terenie miasta 21 przypadków. Dla tychże przypadków wykonano obliczenia statystyk TPZ. Wartości średniej temperatury poszczególnych podklas terenów zabudowy mieszkaniowej tworzą serię danych, która charakteryzuje się rozkładem normalnym. Podobnie jak w przypadku poprzednich analiz średnich, kolorem zaznaczono wartości średnich TPZ dla poszczególnych podklas zabudowy mieszkaniowej (Tabela 4).

Tabela 4. Zestawienie statystyczne wartości TPZ według klas zabudowy mieszkaniowej wg BDOT10k w °C

Rodzaj	Charakter	Roślinność	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
jednorodzinna	gęsta	brak	25,552	34,327	8,775	29,158	0,891
jednorodzinna	gęsta	brak, plac twardy	27,510	32,775	5,265	28,936	0,968
jednorodzinna	gęsta	drzewa	27,288	32,019	4,731	29,086	0,705
jednorodzinna	gęsta	sad	27,592	30,851	3,259	29,008	0,598
jednorodzinna	gęsta	trawa	25,584	31,541	5,956	29,091	0,897
jednorodzinna	luźna	brak	24,906	31,491	6,586	28,429	0,913
jednorodzinna	luźna	brak, plac twardy	27,676	29,219	1,543	28,650	0,516
jednorodzinna	luźna	drzewa	24,740	28,268	3,528	26,048	1,357
jednorodzinna	luźna	sad	27,792	29,767	1,976	29,199	0,720
jednorodzinna	luźna	trawa	24,141	29,987	5,846	27,336	1,183
wielorodzinna	gęsta	brak	25,249	35,378	10,129	30,000	1,115
wielorodzinna	gęsta	brak, plac twardy	26,791	34,085	7,294	29,945	1,194
wielorodzinna	gęsta	drzewa	27,134	30,147	3,013	28,897	0,550
wielorodzinna	gęsta	sad	28,793	31,889	3,097	30,100	1,299
wielorodzinna	gęsta	trawa	26,797	34,787	7,989	29,783	1,100
wielorodzinna	luźna	brak	26,172	33,541	7,369	29,273	1,263
wielorodzinna	luźna	brak, plac twardy	28,212	31,697	3,485	29,525	1,027
wielorodzinna	luźna	drzewa	29,686	30,763	1,077	30,375	0,437
wielorodzinna	luźna	trawa	28,159	30,265	2,106	29,574	0,604
wielorodzinna	zwarta	brak	27,586	33,457	5,871	31,155	0,938
wielorodzinna	zwarta	brak, plac twardy	29,118	33,338	4,219	32,088	0,601

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych BDOT10k

OS - odchylenie standardowe

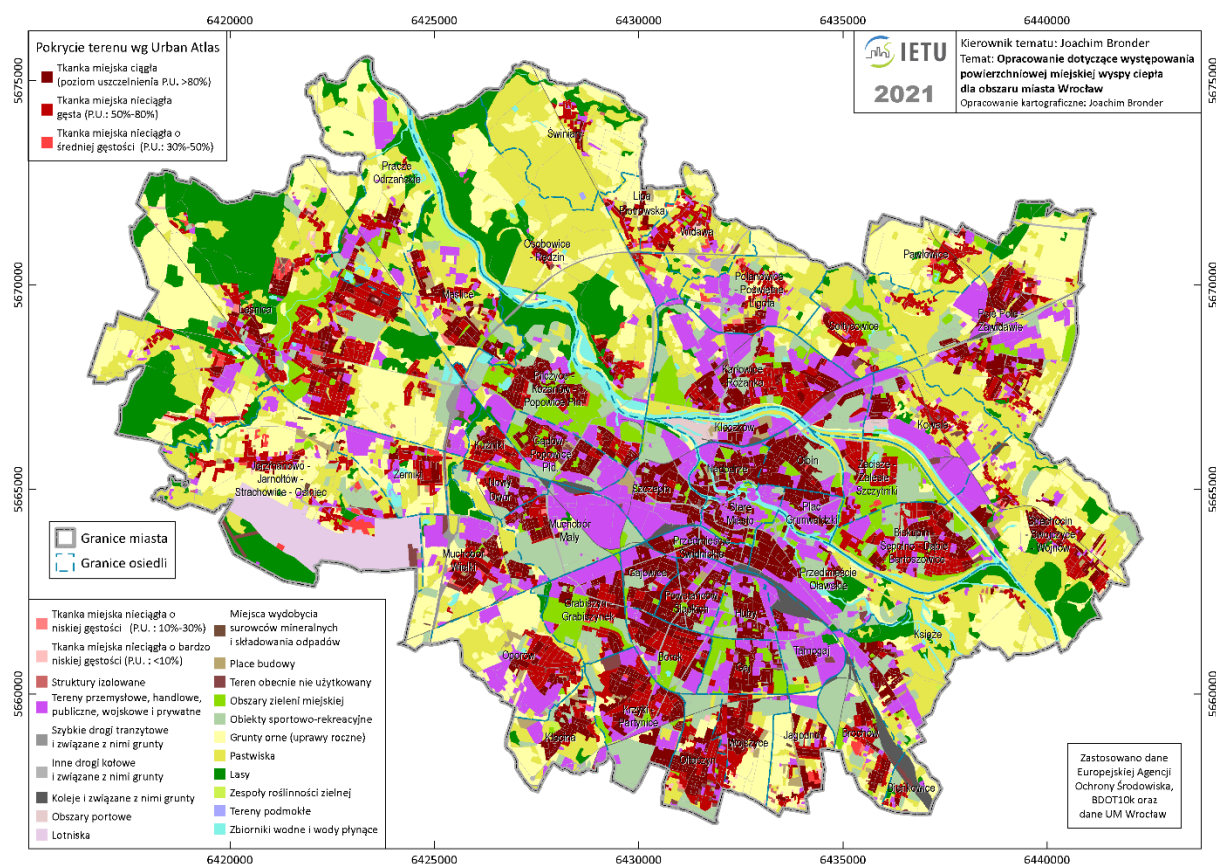
Analizując tabelę powyżej można stwierdzić, iż najwyższą średnią TPZ charakteryzują się pozbawione roślinności tereny zabudowy wielorodzinnej o charakterze zwartym. Z kolei najniższymi wartościami TPZ charakteryzują się obszary zabudowy jednorodzinnej o charakterze luźnym pokryte roślinnością w postaci drzew oraz sadów.

Porównując rodzaje zabudowy mieszkaniowej pod względem średniej temperatury powierzchni można stwierdzić, iż tereny zabudowy wielorodzinnej cechują się statystycznie istotną wyższą temperaturą w stosunku do terenów zabudowy jednorodzinnej. Różnica średnich TPZ pomiędzy obu podklasami wynosi $1,58^{\circ}\text{C}$. Podobnie istotne statystycznie różnice występują pomiędzy zabudową o charakterze gęstym łącznie z zabudową zwartą a zabudową o charakterze luźnym. Obszar zabudowy mieszkaniowej zwartej i gęstej jest średnio o $1,06^{\circ}\text{C}$ wyższy od obszaru zabudowy luźnej. Tereny zabudowy mieszkaniowej zawierające roślinność są średnio chłodniejsze od terenów bez roślinności o $0,77^{\circ}\text{C}$, różnica ta nie jest jednak statystycznie istotna. Powierzchniową miejską wyspę ciepła obserwuje się w obrębie 9 podklas zabudowy mieszkaniowej, gdzie maksymalna TPZ przekracza temperaturę graniczną.

4.1.3 PARAMETRY STATYSTYCZNE TPZ NA PODSTAWIE KLAS POKRYCIA TERENU WG URBAN ATLAS

Istotnym źródłem informacji o pokryciu powierzchni terenu wybranych aglomeracji europejskich jest realizowany w ramach programu Copernicus Urban Atlas (Atlas Miejski). Aglomeracja wrocławska objęta jest zasięgiem Atlasu Miejskiego (Rys. 11). W obrębie Wrocławia wyodrębnia się 23 klasy pokrycia terenu według klasyfikacji Urban Atlas.

Mapa pokrycia terenu według Urban Atlas została przecięta mapą temperatury przez co uzyskano statystyki temperatur TPZ dla klas pokrycia terenu (Tabela 5). Wartości średnich TPZ poszczególnych klas pokrycia terenu tworzą serię danych o rozkładzie normalnym.



Rys. 11. Mapa pokrycia terenu Wrocławia według klasyfikacji Urban Atlas

Tabela 5. Zestawienie statystyczne wartości TPZ na podstawie klas pokrycia terenu wg Urban Atlas w °C

Kod	Nazwa klasy pokrycia terenu	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
11100	Tkanka miejska ciągła (poziom uszczelnienia P.U. >80%)	25,013	34,887	9,874	30,052	1,094
11210	Tkanka miejska nieciągła gęsta (P.U.: 50%-80%)	25,142	32,617	7,474	28,890	0,898
11220	Tkanka miejska nieciągła o średniej gęstości (P.U.: 30%-50%)	25,055	31,857	6,802	28,390	1,258
11230	Tkanka miejska nieciągła o niskiej gęstości (P.U.: 10%-30%)	24,707	32,095	7,388	29,197	1,228
11240	Tkanka miejska nieciągła o bardzo niskiej gęstości (P.U. : <10%)	25,524	30,707	5,183	28,323	0,890
11300	Struktury izolowane	23,863	30,633	6,770	27,444	1,201
12100	Tereny przemysłowe, handlowe, publiczne, wojskowe i prywatne	22,882	42,255	19,373	30,879	2,241
12210	Szybkie drogi tranzytowe i związane z nimi grunty	24,081	31,624	7,543	29,306	1,239
12220	Inne drogi kołowe i związane z nimi grunty	23,793	37,303	13,511	29,451	1,571
12230	Koleje i związane z nimi grunty	24,088	37,034	12,947	30,506	2,083
12300	Obszary portowe	23,548	35,388	11,840	30,316	2,140
12400	Lotniska	25,651	33,803	8,152	29,608	1,151
13100	Miejsca wydobywania surowców mineralnych i skład. odpadów	27,854	31,166	3,312	29,117	0,686
13300	Place budowy	26,360	35,110	8,750	29,715	1,317
13400	Teren obecnie nie użytkowany	24,781	34,157	9,376	29,373	1,767
14100	Obszary zieleni miejskiej	23,180	35,222	12,042	27,094	1,692
14200	Obiekty sportowo-rekreacyjne	23,450	35,454	12,004	28,337	1,214
21000	Grunty orne (uprawy roczne)	22,515	37,860	15,346	28,363	1,530
23000	Pastwiska	22,608	33,569	10,961	27,616	1,496
31000	Lasy	22,287	32,983	10,696	25,337	0,937
32000	Zespoły roślinności zielonej	23,574	33,696	10,122	27,763	1,678
40000	Tereny podmokłe	24,362	28,090	3,728	26,750	1,327
50000	Zbiorniki wodne i ciek	21,796	33,011	11,215	24,937	1,761

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych Urban Atlas

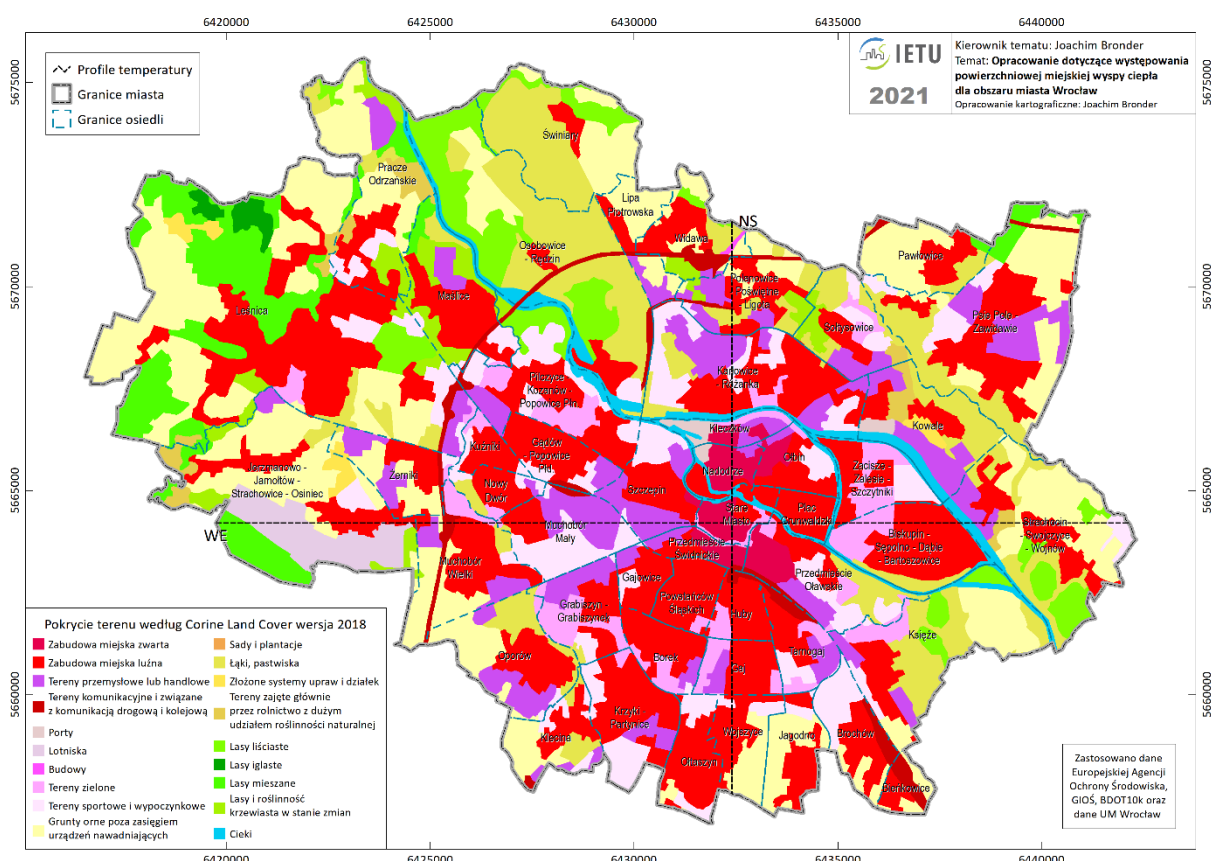
OS - odchylenie standardowe

Analiza tabeli powyżej wskazuje, iż tereny o najwyższych temperaturach powierzchni (powyżej 30°C) to tereny przemysłowe, handlowe, publiczne, wojskowe i prywatne. Następnie są to tereny zajęte przez koleje i związane z nimi grunty, obszary portowe oraz tereny zabudowy mieszkaniowej reprezentowane przez tkankę miejską ciągłą o poziomie uszczelnienia powyżej 80%. Średnia TPZ dla tych czterech klas wynosi 30,44°C. Tereny podmokłe, lasy oraz tereny zajęte pod zbiorniki wodne i ciek charakteryzują się najniższymi temperaturami powierzchni (TPZ poniżej 27°C).

Na uwagę zasługują tereny zieleni miejskiej, które charakteryzują się czwartą najniższą wartością TPZ (27,09°C). Obie powyższe mapy pokrycia terenu (BDOT10k i Urban Atlas) wyróżniają obszary zawierające budynki mieszkalne (zabudowę mieszkaniową). Istnieją różnice w definicjach klas pokrycia terenu. Przykładowo klasyfikacja BDOT10k wyróżnia klasę zabudowy wielorodzinnej, która na obszarze Wrocławia zajmuje 1903,5ha. Z kolei Urban Atlas wyodrębnia klasę tkanki miejskiej ciągłej (o stopniu uszczelnienia ponad 80%), która na obszarze analizowanego miasta zajmuje 2821,4ha. Ich część wspólna zajmuje obszar 1048,4ha. Obie klasy pokrycia terenu cechują się zbliżoną wartością TPZ; różnica między nimi wynosi 0,017°C. Jednak należy zauważyć, iż klasa tkanki miejskiej ciągłej obejmuje obszar zawierający również budynki o funkcji innej niż mieszkalna.

4.1.4 OPRACOWANIE PROFILI TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI W ODNIESIENIU DLA KLAS POKRYCIA TERENU CORINE LAND COVER

Jednym ze sposobów przedstawienia zmian temperatury w przestrzeni jest opracowanie profili temperatury wzdłuż wybranych transektów. Na profilach zmiana temperatury powiązana jest zwykle ze sposobem użytkowania ziemi. W pracy ze względu na zbyt dużą szczegółowość danych BDOT10k i Urban Atlas zastosowano mapę pokrycia terenu według Corine Land Cover (CLC). Wybrano dwa transekty, które przechodzą przez centralną część Wrocławia. Pierwszy biegnie z południa na północ, drugi z zachodu na wschód. W obrębie Wrocławia przy pomocy CLC można wyodrębnić 19 form pokrycia terenu (Rys. 12).



Rys. 12. Mapa pokrycia terenu Wrocławia według klasyfikacji CLC z zaznaczonymi transektami

Mapa pokrycia terenu według CLC została przecięta mapą temperatury powierzchni przez co uzyskano statystyki temperatur dla poszczególnych klas pokrycia terenu (Tabela 5).

Wartości średnich TPZ klas pokrycia terenu we Wrocławiu tworzą serię danych o rozkładzie normalnym. Najwyższymi średnimi TPZ cechują się tereny zabudowy miejskiej zwartej i tereny przemysłowe lub handlowe. Średnia TPZ tych klas pokrycia terenu przekracza 31°C. Średnimi TPZ powyżej 30°C cechują się tereny komunikacyjne i tereny związane z komunikacją drogową i kolejową oraz porty. Z terenów sztucznych średnimi temperaturami powyżej 29°C cechują się jeszcze lotniska i zabudowa miejska luźna.

Tereny zielone (zieleń miejska) cechują się jednymi z niższych temperatur (poniżej 27°C). Obszary leśne i ciek cechują się najniższymi średnimi temperaturami TPZ (poniżej 26°C).

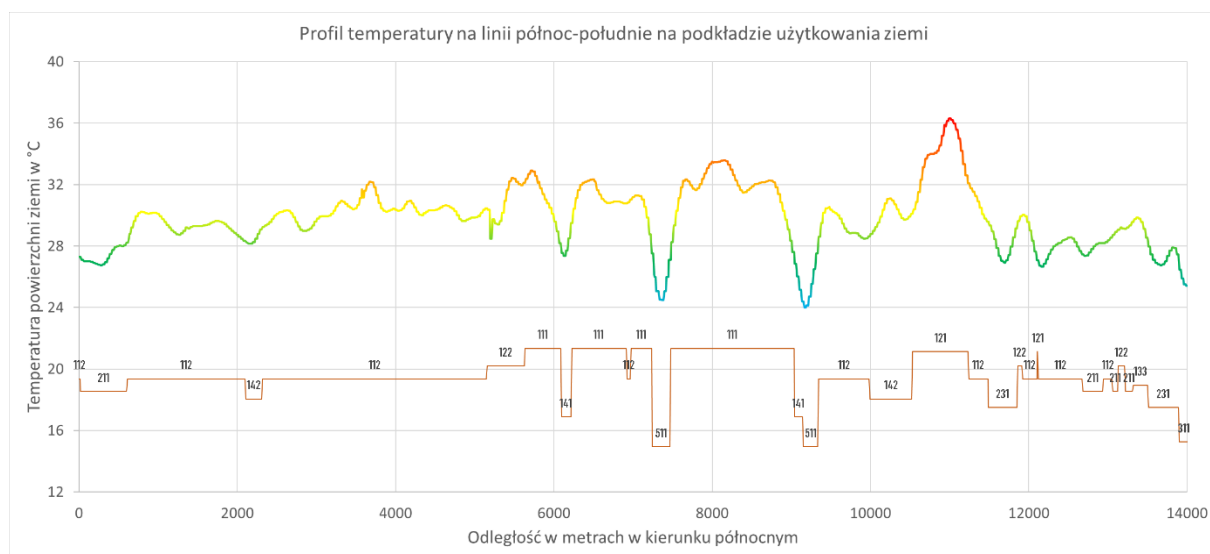
Tabela 6. Zestawienie statystyczne wartości TPZ na podstawie klas pokrycia terenu CLC w °C

Kod	Nazwa klasy pokrycia terenu wg CLC	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
111	Zabudowa miejska zwarta	25,841	34,835	8,994	31,343	1,180
112	Zabudowa miejska luźna	22,936	38,987	16,052	29,346	1,338
121	Tereny przemysłowe lub handlowe	23,182	42,255	19,073	31,122	2,420
122	Tereny komunikacyjne i związane z komunikacją drogową i kolejową	23,763	37,034	13,271	30,195	1,903
123	Porty	23,844	35,388	11,545	30,322	2,234
124	Lotniska	26,926	33,803	6,877	29,862	0,925
133	Budowy	27,310	29,858	2,548	28,942	0,756
141	Tereny zielone	23,804	34,035	10,231	26,874	1,633
142	Tereny sportowe i wypoczynkowe	22,984	35,454	12,470	28,042	1,376
211	Grunty orne poza zasięgiem urządzeń nawadniających	24,218	35,110	10,892	28,535	1,444
222	Sady i plantacje	26,235	30,516	4,281	29,390	1,348
231	Łąki, pastwiska	23,083	33,569	10,486	27,482	1,476
242	Złożone systemy upraw i działek	25,032	29,702	4,669	27,307	1,035
243	Tereny zajęte głównie przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej	23,680	29,973	6,293	26,624	1,100
311	Lasy liściaste	22,493	29,918	7,424	25,252	0,981
312	Lasy iglaste	24,431	28,270	3,838	25,070	0,555
313	Lasy mieszane	23,024	30,433	7,410	25,402	0,857
324	Lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian	22,560	33,435	10,876	26,969	1,490
511	Cieki	25,841	33,879	12,083	24,935	1,820

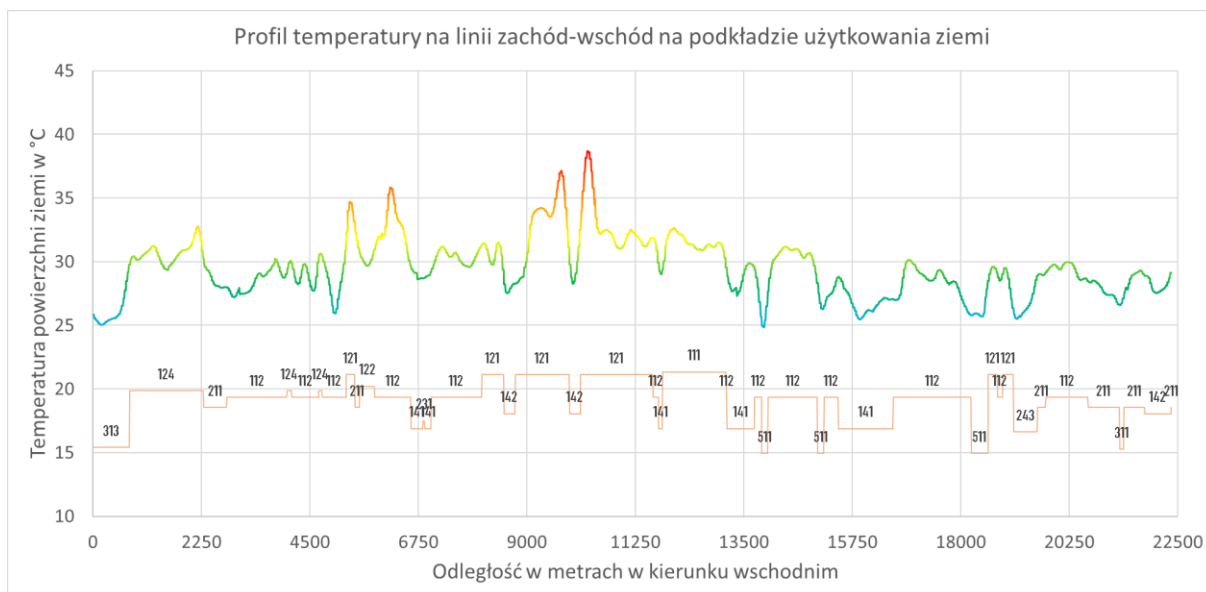
Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8, GIOŚ i EEA

OS - odchylenie standardowe

Na wykresach przedstawiono profile temperatury wzdłuż transektów (Rys. 13, Rys. 14). Poniżej wykresu temperatury znajduje się wykres klas pokrycia terenu według CLC. Klasa została opisana trzycyfrowym kodem (Tabela 6), wysokość linii obrazującej daną klasę pokrycia terenu jest proporcjonalna do średniej temperatury powierzchni (Rys. 13, Rys. 14).



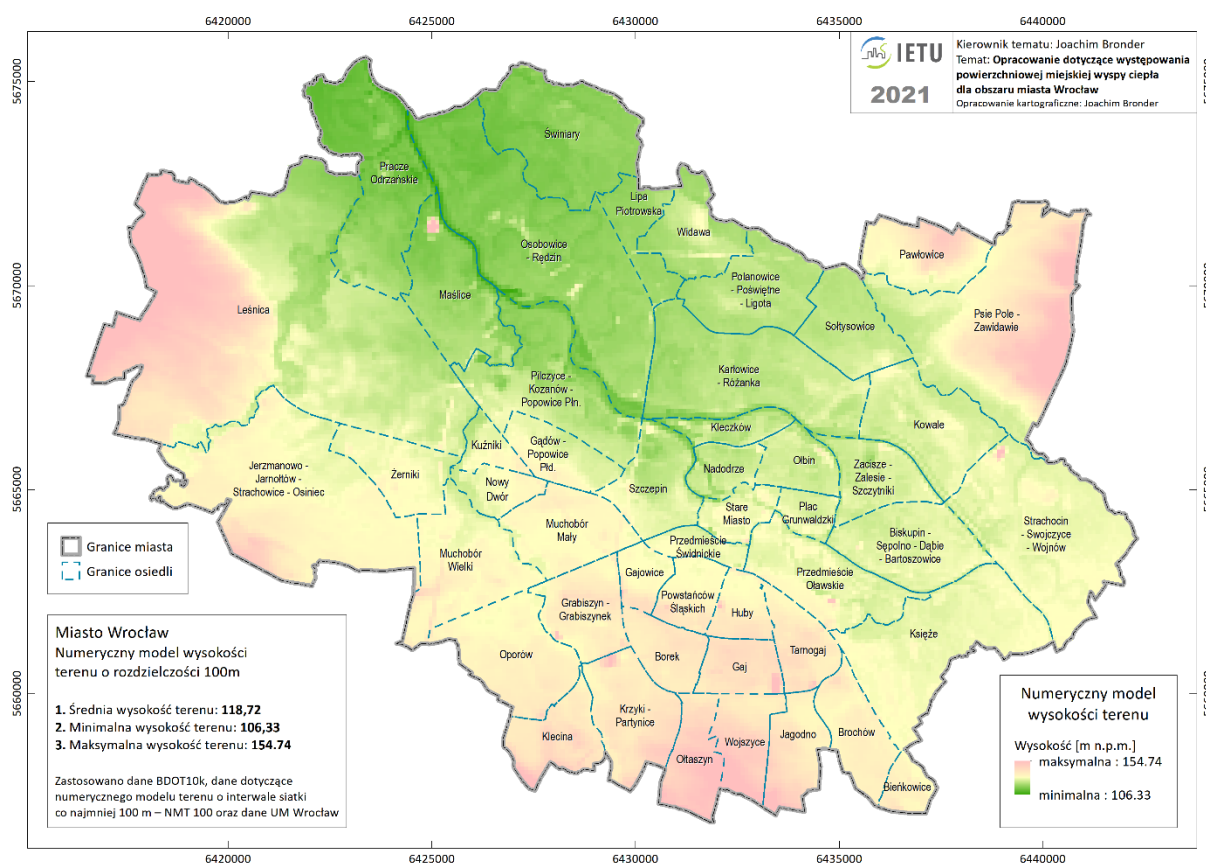
Rys. 13. Profil temperatury wzdłuż transektu NS



Rys. 14. Profil temperatury wzdłuż transektu WE

4.2 PARAMETRY STATYSTYCZNE TPZ WEDŁUG KIERUNKÓW NACHYLENIA TERENU

Kierunek nachylenia terenu ma wpływ na temperaturę powierzchni ziemi. Zjawisko to jest dobrze widoczne na niezabudowanych obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu. Teren Wrocławia jest słabo urozmaicony orograficznie. Stosując dane dotyczące numerycznego modelu terenu o interwale siatki 100 m utworzono model wysokościowy terenu (Rys. 15).



Rys. 15. Numeryczny model wysokości terenu Wrocławia o rozdzielczości 100m

Według tegoż modelu minimalna wysokość Wrocławia wynosi 106,33 m n.p.m., maksymalna (Wzgórze Maślickie) 154,74 m n.p.m., a średnia 118,72 m n.p.m. Najniższe wysokości związane są z Pradolina Wrocławską, najwyższe z Równinami Wrocławską i Oleśnicką (Rys. 15). Na bazie modelu wysokości terenu utworzono numeryczny model kierunków nachylenia (ekspozycji) terenu (Rys. 16). Numeryczny model ekspozycji nałożono na mapę TPZ i obliczono statystyki temperatur dla kierunków nachylenia (Tabela 7).

Ze względu na czas i położenie satelity Landsat 8 w trakcie przelotu nad Wrocławiem, tereny o nachyleniach w kierunkach E, SE, S i SW winny cechować się wyższymi temperaturami (sektor „ciepły”) w stosunku do terenów o nachyleniach terenu w kierunkach W, NW, N i NE (sektor „chłodny”). We Wrocławiu nie obserwuje się statystycznie istotnych różnic w temperaturze powierzchni ziemi pomiędzy wyżej wyszczególnionymi sektorami.

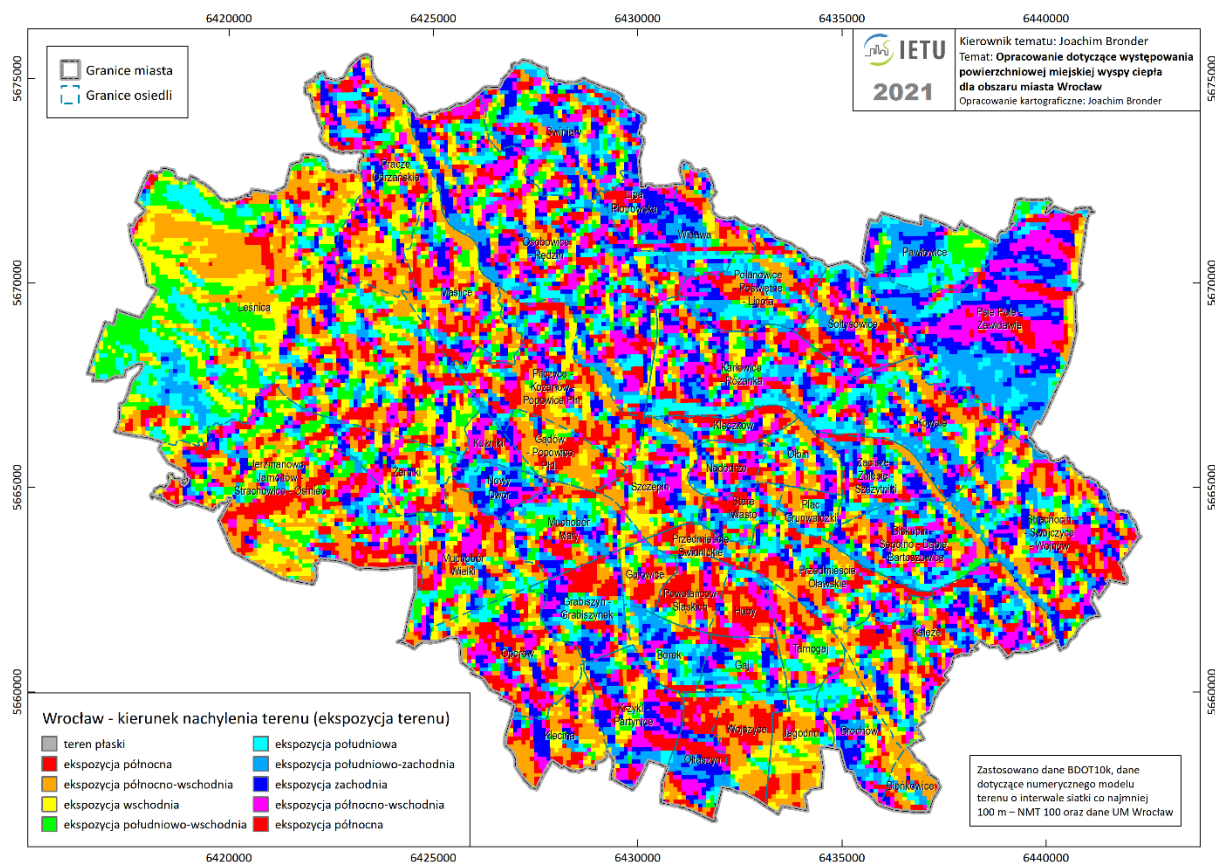
Tabela 7. Zestawienie statystyczne wartości TPZ na podstawie kierunków nachylenia terenu w °C

Skrót	Kierunek nachylenia terenu (w nawiasie zakres kątowy)	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
N	północna (337,5-0; 0-22,5)	21,941	39,998	18,057	28,598	2,242
NE	północno-wschodnia (22,5-67,5)	21,971	38,361	16,390	28,336	2,231
E	wschodnia (67,5-112,5)	22,005	40,350	18,346	28,292	2,256
SE	południowo-wschodnia (112,5-157,5)	21,999	42,255	20,257	28,417	2,163
S	południowa (157,5-202,5)	22,166	39,937	17,771	28,309	2,196
SW	południowo-zachodnia (202,5-247,5)	22,322	39,258	16,936	28,325	2,108
W	zachodnia (247,5-292,5)	22,676	41,464	18,788	28,479	2,106
NW	północno-zachodnia (292,5-337,5)	22,080	41,378	19,298	28,522	2,147

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych CODGiK

OS - odchylenie standardowe

Oznacza to, iż na terenie Wrocławia pokrycie powierzchni ziemi, a nie kierunek nachylenia terenu, odgrywa decydującą rolę w rozkładzie temperatury powierzchni miasta. Jedynym wyjątkiem od tej reguły jest zrekultywowane składowisko odpadów komunalnych - Wzgórze Maślickie, gdzie stok o ekspozycji południowej cechuje się temperaturą wyższą o 4 stopnie Celsjusza od stoku o ekspozycji północnej.



Rys. 16. Numeryczny model kierunków nachylenia terenu Wrocławia o rozdzielczości 100m

4.3 STOPIEŃ I INTENSYWNOŚĆ USZCZELNIENIA GLEB WROCŁAWIA

Uszczelnienie lub nieprzepuszczalność gleb lub gruntów jest jednym z czynników wpływających na kształtowanie się miejskiej wyspy ciepła. Dlatego temu zagadnieniu w niniejszym opracowaniu poświęcono osobny podrozdział.

4.3.1 RELACJA POMIĘDZY TEMPERATURĄ POWIERZCHNI ZIEMI A POZIOMĄ INTENSYWNOŚCIĄ USZCZELNIENIA GLEB

W pierwszym kroku analizy dotyczącej uszczelnienia gleb mapę poziomu intensywności uszczelnienia gleb (PIUG) podzielono na 20 klas o szerokości 5% (1%-5%, 6%-10% ... 96%-100%). Następnie mapę 5-cio stopniowych klas przecięto mapą intensywności uszczelnienia gleb i mapą temperatury powierzchni ziemi TPZ. Dla wszystkich 20 klas obliczono średni ważony poziom intensywności uszczelnienia gleb i średnią ważoną temperaturę powierzchni. Wagę była liczba komórek o określonym poziomie uszczelnienia, który zawiera się w danym przedziale. Wynik powyższych obliczeń przedstawiono w tabeli poniżej (Tabela 8).

Tabela 8. Średni poziom intensywności uszczelnienia i średnie temperatury na podstawie klas uszczelnienia gleb

Nr klasy	Minimum PIUG [%]	Maksimum PIUG [%]	Średni PIUG [%]	Średnia temperatura TPZ [°C]
1	1	5	2,831	28,483
2	6	10	8,377	28,666
3	11	15	12,558	28,710
4	16	20	17,987	28,924
5	21	25	22,459	29,094
6	26	30	27,962	29,326

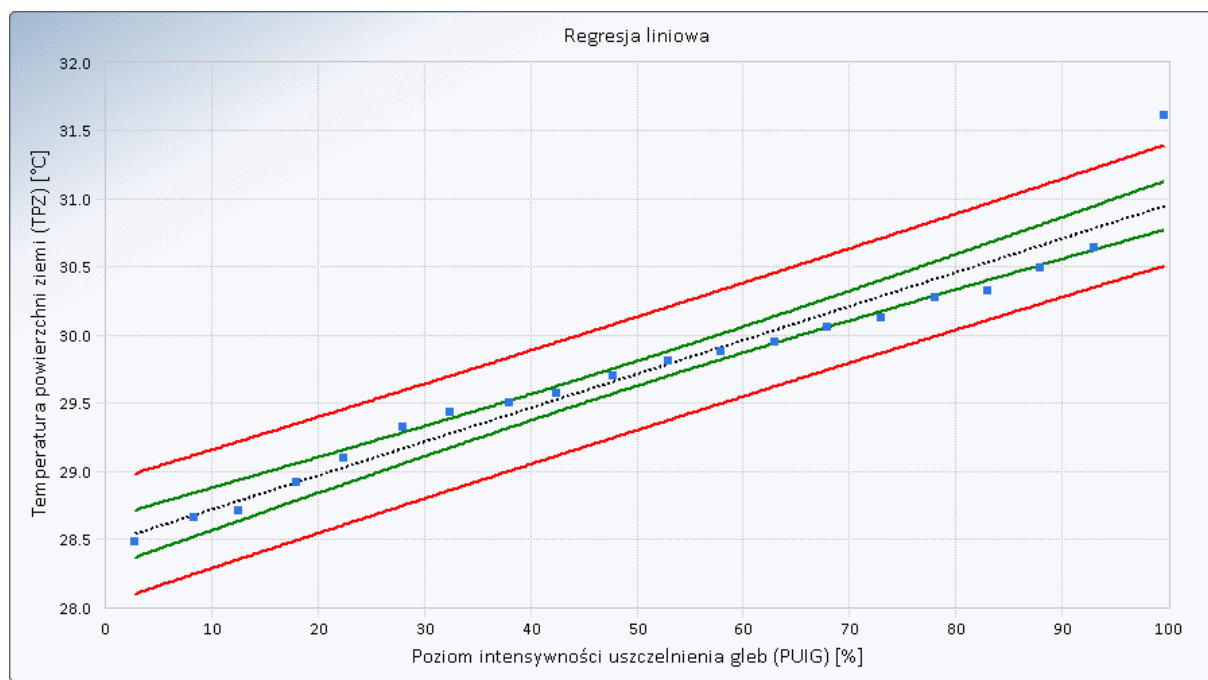
Nr klasy	Minimum PIUG [%]	Maksimum PIUG [%]	Średni PIUG [%]	Średnia temperatura TPZ [°C]
7	31	35	32,476	29,434
8	36	40	37,992	29,501
9	41	45	42,497	29,576
10	46	50	47,761	29,705
11	51	55	52,962	29,808
12	56	60	57,971	29,884
13	61	65	62,991	29,954
14	66	70	67,962	30,061
15	71	75	72,959	30,127
16	76	80	78,035	30,272
17	81	85	82,988	30,327
18	86	90	87,989	30,497
19	91	95	92,983	30,643
20	96	100	99,674	31,617

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska i satelity Landsat 8

Pomiędzy obliczonymi średnimi PIUG i TPZ zachodzi silny związek statystyczny. Współczynnik korelacji pomiędzy obu zmiennymi wynosi 0,9693. Ich relację można przedstawić w postaci funkcji regresji liniowej (Rys. 17). Funkcja regresji liniowej ma postać:

$$y = 0,0249x + 28,4759$$

Przy czym y oznacza temperaturę TPZ, a x poziom uszczelnienia PIUG. Wszystkie parametry równania są statystycznie istotne, a współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,9395.



Rys. 17. Regresja liniowa zależności temperatury powierzchni ziemi od intensywności uszczelnienia gleb (PIUG)

Można zatem stwierdzić, iż na terenie Wrocławia poziom intensywności uszczelnienia gleb jest proporcjonalny do poziomowi temperatury powierzchni. Uzasadnione jest więc jego uwzględnienie w decyzjach związanych z kształtowaniem przestrzeni miejskiej w kontekście ograniczania warunków sprzyjających powstawaniu miejskiej wyspy ciepła.

Glebami uszczelnionymi cechują się obszary powierzchni sztucznych takie jak tkanka miejska, tereny przemysłowe, handlowe, transportowe, natomiast glebami nieuszczelnionymi cechują się tereny rolnicze, obszary leśne i półnaturalne, tereny podmokłe oraz obszary wód śródlądowych².

4.3.2 ROZKŁAD PARAMETRÓW STATYSTYCZNYCH USZCZELNIENIA GLEB W PODZIALE NA OSIEDLA WROCŁAWIA

W kolejnym kroku analizy, na mapę stopnia uszczelnienia gleb nałożono mapę granic osiedli i obliczono statystyki uszczelnienia gleb dla poszczególnych osiedli (Tabela 9). Wartości średnich poziomów uszczelnienia poszczególnych osiedli Wrocławia przedstawiono także w postaci kartograficznej (Rys. 18). Obliczenia te wykonano w 2 wariantach.

W wariantcie pierwszym uwzględniono obszary bez uszczelnienia (minimalne uszczelnienie równe 0). Zatem w obliczeniach uwzględniono całkowity obszar danego osiedla. W wariantcie drugim uwzględniono jedynie obszary z minimalnym uszczelnieniem równym 1%. Zatem, w obliczeniach nie uwzględniono całkowitej powierzchni poszczególnych osiedli. Poziom uszczelnienia obliczony w wariantcie drugim można nazwać poziomem intensywności uszczelnienia (PIUG). Z jednej strony wskazuje on, na intensywność zasklepienia gleb w terenie już uszczelnionym, z drugiej zaś, wskazuje na wolne zasoby przestrzeni gleb nieuszczelnionych, które teoretycznie (i praktycznie) można uszczelnić (zabudować), szczególnie jeżeli celem jest zahamowanie ekspansji zabudowy na tereny nieuszczelnione.

Tabela 9 przedstawia miary centralne (średnie i mediany) poziomów uszczelnienia (PUG) i poziomów intensywności uszczelnienia gleb (PIUG), a także średnie temperatury powierzchni ziemi poszczególnych osiedli Wrocławia.

Tabela 9. Stopień uszczelnienia gleb osiedli Wrocławia

Nr	Nazwa osiedla	Średnia PUG 1 [%]	Mediana PUG 1 [%]	Średnia PIUG 2 [%]	Mediana PIUG 2 [%]	Średnia TPZ [°C]
1	Stare Miasto	67,739	87	74,211	95	29,565
2	Przedmieście Świdnickie	70,858	84	71,821	85	31,297
3	Szczepin	51,986	47	57,417	55	30,446
4	Nadodrze	70,178	85	74,727	89	30,864
5	Kleczków	51,952	55	72,632	85	29,181
6	Ołbin	48,457	42	55,329	53	29,454
7	Plac Grunwaldzki	65,910	78	71,839	83	30,128
8	Zacisze - Zalesie - Szczytniki	16,397	0	39,516	33	27,301
9	Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice	22,232	12	39,080	34	27,694
10	Przedmieście Oławskie	35,156	17	63,758	70	28,477
11	Tarnogaj	53,839	52	58,997	61	30,767
12	Huby	57,106	58	61,766	64	30,520
13	Powstańców Śląskich	49,408	43	51,249	46	29,921

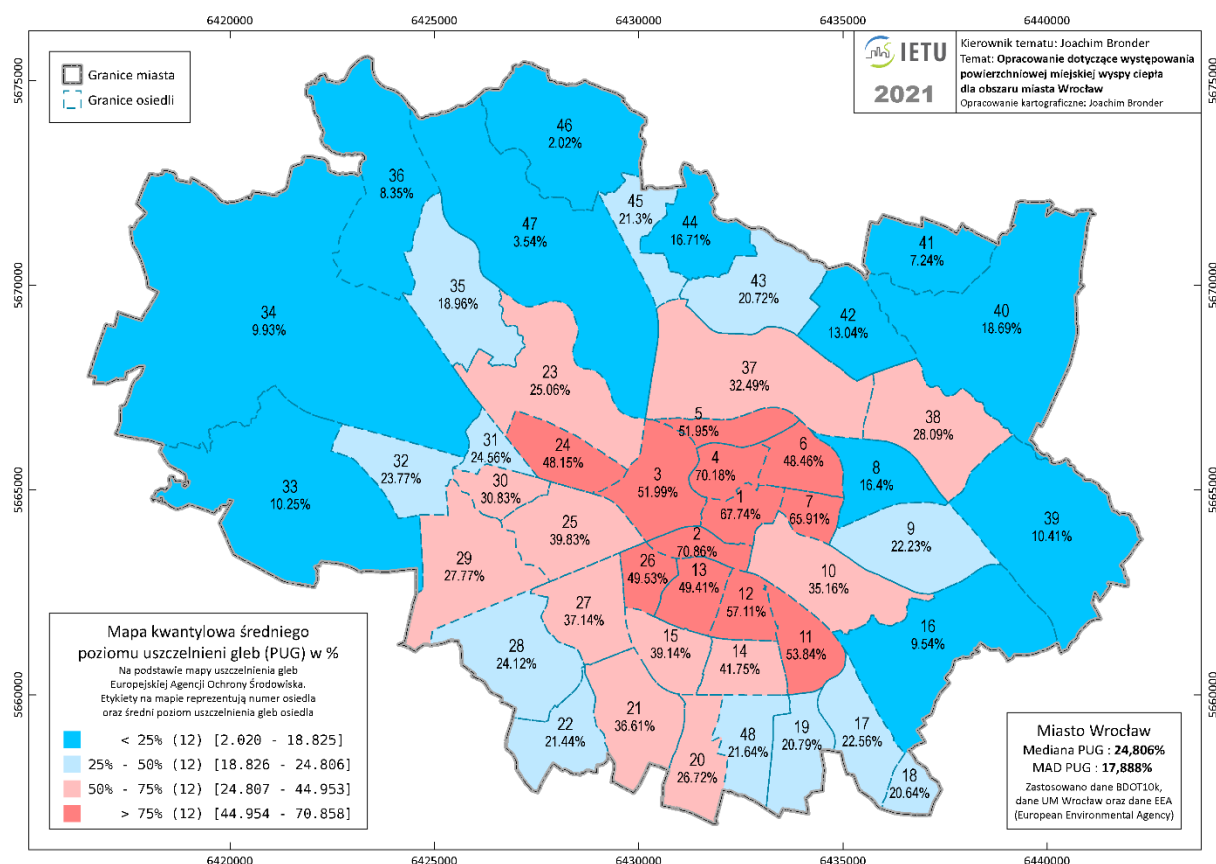
² Nazewnictwo zgodnie z terminologią stosowaną w klasyfikacji klas pokrycia terenu Corine Land Cover

Nr	Nazwa osiedla	Średnia PUG 1 [%]	Mediana PUG 1 [%]	Średnia PIUG 2 [%]	Mediana PIUG 2 [%]	Średnia TPZ [°C]
14	Gaj	41,752	36	53,764	51	29,595
15	Borek	39,136	32	45,654	39	29,246
16	Księżę	9,544	0	48,742	40	26,901
17	Brochów	22,558	14	36,154	27	28,806
18	Bieńkowice	20,639	0	52,400	47	29,194
19	Jagodno	20,794	0	49,527	46	29,083
20	Ołtaszyn	26,715	19	38,596	34	28,421
21	Krzyki - Partynice	36,608	29	51,932	47	29,108
22	Klecina	21,436	0	51,125	46	29,251
23	Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn.	25,056	0	50,759	44	27,632
24	Gądów - Popowice Płd.	48,153	43	54,775	50	30,399
25	Muchobór Mały	39,834	24	45,060	31	30,343
26	Gajowice	49,532	44	51,092	46	30,183
27	Grabiszyn - Grabiszyniek	37,135	26	50,644	44	29,075
28	Oporów	24,124	0	56,256	51	29,928
29	Muchobór Wielki	27,774	0	58,386	57	30,023
30	Nowy Dwór	30,834	21	43,914	38	29,406
31	Kuźniki	24,556	18	39,813	37	28,751
32	Żerniki	23,770	0	55,556	50	28,998
33	Jerzmanowo - Jarnołtów - Strachowice - Osiniec	10,250	0	52,999	46	28,083
34	Leśnica	9,929	0	47,284	42	27,736
35	Maślice	18,961	0	52,194	47	28,101
36	Pracze Odrzańskie	8,352	0	49,056	43	27,701
37	Karłowice - Różanka	32,489	22	47,440	40	29,167
38	Kowale	28,092	0	61,085	60	28,989
39	Strachocin - Swojczyce - Wojnów	10,410	0	51,270	46	27,556
40	Psie Pole - Zawidawie	18,688	0	51,942	46	28,562
41	Pawłowice	7,239	0	39,818	37	27,886
42	Sołtysowice	13,040	0	42,738	33	27,188
43	Polanowice - Poświętne - Ligota	20,723	0	53,315	47	28,397
44	Widawa	16,707	0	52,820	47	28,398
45	Lipa Piotrowska	21,295	0	61,142	60	28,967
46	Świniary	2,020	0	37,773	34	28,238
47	Osobowice - Rędzin	3,540	0	44,331	37	26,830
48	Wojszyce	21,638	10	40,421	34	28,698

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska i danych UM Wrocław

Spośród obliczonych estymatorów miar centralnych jedynie średni poziom intensywności uszczelnienia cechuje się rozkładem normalnym. Obserwuje się również wysoką (na poziomie 0,84) i istotną statystycznie korelację między średnią temperaturą powierzchni osiedli Wrocławia, a ich średnim poziomem uszczelnienia gleb (PUG).

Osiedla, które cechują się najwyższymi średnimi poziomami uszczelnienia gleb przekraczającymi 65% to (od najwyższego do najniższego): Przedmieście Świdnickie, Nadodrze, Stare Miasto i Plac Grunwaldzki (Rys. 18).



Rys. 18. Mapa kwantyli średniego poziomu uszczelnienia gleb osiedli Wrocławia

Średnimi wartościami PUG powyżej III kwantyla cechują się jeszcze następujące osiedla: Huby, Tarnogaj, Szczepin, Kleczków, Gajowice, Powstańców Śląskich, Ołbin, Gądów - Popowice Płd. W aspekcie przestrzennym widoczna jest koncentryczność średniego poziomu uszczelnienia gleb wokół centrum, które reprezentuje najstarsze części miasta (Rys. 18).

4.3.3 ZMIANY POZIOMU USZCZELNIENIA GLEB WROCŁAWIA W LATACH 2006-2018

W ciągu ostatnich lat obserwuje się zjawisko *Urban Sprawl* tj. rozlewanie się miast na obszary nie- lub mniej zurbanizowane. W przypadku Wrocławia zjawisko to można prześledzić analizując zmiany w średnim poziomie uszczelnienia gleb i w wielkości obszaru o glebach z uszczelnieniem większym niż 0% [5] [6]. (Tabela 10).

Analizując tabelę poniżej można dokonać następujących obserwacji:

- Średnia arytmetyczna poziomu uszczelnienia gleb cechuje się tendencją rosnącą. Tendencja ta jest istotna statystycznie. W ciągu 12 lat poziom uszczelnienia gleb wzrósł w mieście średnio o 4,7%.
- Nie obserwuje się istotnych statystycznie zmian w średniej arytmetycznej poziomie intensywności uszczelnienia gleb.

- Nie obserwuje się istotnych statystycznie zmian w medianie poziomu intensywności uszczelnienia gleb.
- Obserwuje się istotny statystycznie wzrost obszaru z glebami uszczelnionymi. W ciągu okresu 2006 - 2018 obszar ten wzrósł o 2645 hektarów, co oznacza wzrost o 28,6% w stosunku do roku bazowego 2006.

Z punktu widzenia tworzenia się PMWC najważniejszym parametrem jest poziom intensywności uszczelnienia gleb. Średni PIUG w ciągu analizowanego okresu nie uległ większej zmianie. Można zatem wysunąć tezę, iż zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na obszarze Wrocławia także nie uległ w tym okresie większym zmianom.

Tabela 10. Zmiany uszczelnienia gleb Wrocławia w latach 2006-2018

Nr	Rok	Średnia arytmetyczna PUG [%]	Średnia arytmetyczna PIUG [%]	Mediana PUIG [%]	Obszar gleb uszczelnionych >0 % [ha]
1	2006	16,46	52,04	51	9261
2	2009	17,21	51,49	51	9788
3	2012	19,74	53,46	51	10811
4	2015	20,18	53,47	51	11049
5	2018	21,14	52,00	46	11906
	Różnica 2018 - 2006	4,68	-0,04	-5	2645

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska i danych UM Wrocław

5 WYNIKI OCENY RYZYKA TERMICZNEGO DLA WROCŁAWIA

Ocenę ryzyka termicznego wynikającego z wpływu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na mieszkańców Wrocławia odniesiono do 48 jednostek przestrzennych zwanymi osiedlami.

5.1 ROZKŁAD PARAMETRÓW STATYSTYCZNYCH TPZ W PODZIELNE NA OSIEDLA WROCŁAWIA

W pierwszym kroku analizy dokonano obliczeń statystyk opisowych temperatury po wszystkich 48 osiedlach miasta Wrocławia (Tabela 11). W przypadku wartości średniej kolorem zaznaczono wartości temperatur; czerwień oznacza wyższe, a zieleń niższe temperatury. Wartości średniej TPZ powyżej górnego kwantyla ($>29,76^{\circ}\text{C}$) obliczono dla osiedli (w porządku od najwyższej do najniższej): Przedmieście Świdnickie, Nadodrze, Tarnogaj, Huby, Szczepin, Gądów - Popowice Płd., Muchobór Mały, Gajowice, Plac Grunwaldzki, Muchobór Wielki, Oporów oraz Powstańców Śląskich. Z kolei najwyższe wartości maksymalne, powyżej 40°C zaobserwowano dla osiedli: Gądów - Popowice Płd., Kowale, Psie Pole - Zawidawie i Muchobór Wielki. Wartości maksymalne TPZ poniżej temperatury granicznej (definiującej zasięg PMWC lub PWC) obliczono dla osiedli: Kuźniki, Wojszyce, Ołtaszyn, Widawa oraz Pawłowice. Te osiedla są wolne od powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła. Najniższe temperatury minimalne, poniżej 23°C obliczono dla osiedli: Maślice, Strachocin - Swojczyce - Wojnów, Karłowice - Różanka, Szczepin, Kleczków, Pracze Odrzańskie, Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn., Księżę, Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice, Osobowice - Rędzin.

Tabela 11. Zestawienie statystyczne wartości TPZ dla osiedli Wrocławia w $^{\circ}\text{C}$

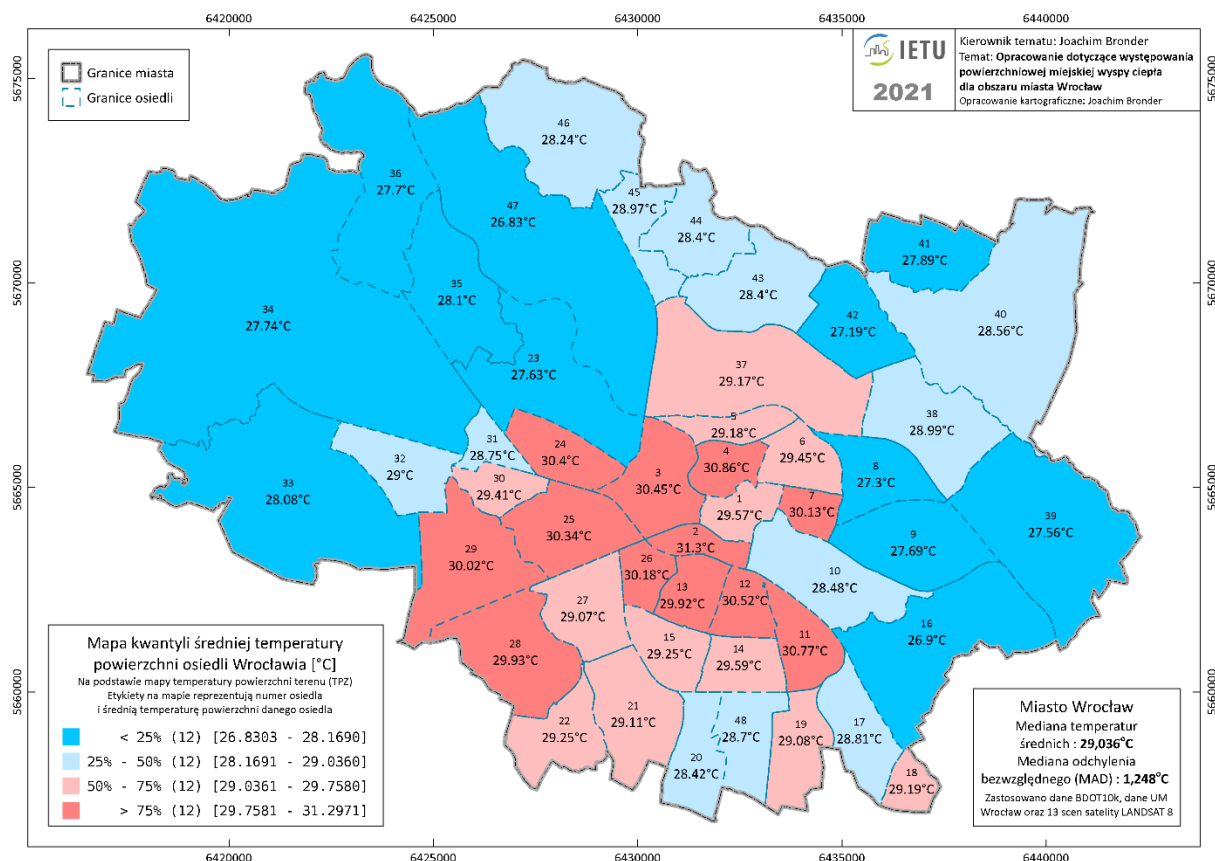
Nr	Nazwa osiedla	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
1	Stare Miasto	24,003	32,833	8,830	29,565	1,997
2	Przedmieście Świdnickie	27,486	34,140	6,655	31,297	1,087
3	Szczepin	22,436	39,572	17,135	30,446	2,271
4	Nadodrze	24,356	33,891	9,535	30,864	1,847
5	Kleczków	22,427	37,467	15,040	29,181	2,934
6	Ołbin	23,603	33,269	9,665	29,454	2,037
7	Plac Grunwaldzki	23,851	36,107	12,256	30,128	2,084
8	Zacisze - Zalesie - Szczytniki	23,522	34,230	10,708	27,301	1,671
9	Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice	21,822	34,035	12,213	27,694	1,624
10	Przedmieście Oławskie	23,190	36,083	12,893	28,477	2,971
11	Tarnogaj	26,544	37,034	10,490	30,767	1,858
12	Huby	26,613	35,442	8,829	30,520	1,285
13	Powstańców Śląskich	26,719	33,908	7,189	29,921	0,965
14	Gaj	25,660	33,767	8,108	29,595	1,563
15	Borek	24,568	38,987	14,419	29,246	1,740
16	Księżę	21,853	35,663	13,811	26,901	2,018

Nr	Nazwa osiedla	Minimum	Maksimum	Zakres	Średnia	OS
17	Brochów	25,293	35,843	10,550	28,806	1,500
18	Bieńkowice	25,608	35,547	9,939	29,194	2,113
19	Jagodno	26,410	33,868	7,458	29,083	1,112
20	Ołtaszyn	25,740	30,921	5,181	28,421	1,090
21	Krzyki - Partynice	25,593	34,688	9,095	29,108	1,406
22	Klecina	25,227	38,043	12,817	29,251	1,910
23	Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn.	21,905	38,859	16,955	27,632	2,638
24	Gądów - Popowice Płd.	26,061	42,255	16,194	30,399	2,000
25	Muchobór Mały	26,329	38,324	11,995	30,343	2,344
26	Gajowice	27,890	33,005	5,114	30,183	0,986
27	Grabiszyn - Grabiszyniek	24,927	38,483	13,555	29,075	2,688
28	Oporów	24,847	38,397	13,550	29,928	2,051
29	Muchobór Wielki	24,854	40,408	15,554	30,023	2,179
30	Nowy Dwór	25,972	32,465	6,493	29,406	1,159
31	Kuźniki	24,525	31,008	6,483	28,751	1,347
32	Żerniki	23,182	36,004	12,821	28,998	1,693
33	Jerzmanowo - Jarnołów - Strachowice - Osiniec	24,024	34,533	10,509	28,083	1,701
34	Leśnica	23,766	35,373	11,607	27,736	1,986
35	Maślice	22,615	32,760	10,145	28,101	1,811
36	Pracze Odrzańskie	22,068	33,275	11,207	27,701	1,905
37	Karłowice - Różanka	22,451	37,765	15,315	29,167	2,028
38	Kowale	25,051	42,094	17,043	28,989	2,569
39	Strachocin - Swojczyce - Wojnów	22,478	33,200	10,722	27,556	1,850
40	Psie Pole - Zawidawie	23,644	41,609	17,965	28,562	2,089
41	Pawłowice	24,295	30,678	6,384	27,886	1,133
42	Sołtysowice	24,498	32,837	8,339	27,188	1,576
43	Polanowice - Poświętne - Ligota	24,485	37,368	12,883	28,397	1,977
44	Widawa	25,118	31,674	6,555	28,398	1,224
45	Lipa Piotrowska	25,782	33,396	7,614	28,967	1,391
46	Świniary	24,178	33,357	9,179	28,238	1,575
47	Osobowice - Rędzin	21,796	32,640	10,843	26,830	1,883
48	Wojszyce	25,999	30,716	4,717	28,698	0,975

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych UM Wrocław

OS - odchylenie standardowe

Przestrzenny rozkład średnich temperatur powierzchni ziemi poszczególnych osiedli przedstawiono w postaci mapy skrzynkowej (Rys. 19), na której rozkład przestrzenny odzwierciedlony jest w układzie kwantyli. Mapa skrzynkowa dzieli zbiór średnich temperatur powierzchni osiedli Wrocławia na 4 podzbiory po 12 o temperaturach od najmniejszej (poniżej I kwantyla) do największej (powyżej III kwantyla). Nie stwierdzono występowania w zbiorze temperatur średnich wartości odstających.



Rys. 19. Mapa kwantyli średniej temperatury powierzchni obliczone dla osiedli Wrocławia

5.2 POWIERZCHNIA KLAS RYZYKA W PODZIALE NA OSIEDLA WROCŁAWIA

Tabela 12 przedstawia zestawienie wielkości obszarów PMWC oraz 100 metrowego bufora wokół PMWC dla poszczególnych osiedli Wrocławia. Obszary PMWC reprezentują strefę o ryzyku podwyższonym o 2 klasy od ryzyka podstawowego. Z kolei obszary 100m buforów wokół PMWC reprezentują strefę o ryzyku wyższym o 1 klasę od ryzyka podstawowego. Analiza poniższej tabeli wskazuje, iż osiedla - Przedmieście Oławskie, Muchobór Mały, Tarnogaj, Psie Pole - Zawidawie, Szczepin i Kowale cechują się największym obszarem PMWC przekraczającym każdorazowo 80 ha. Osiedla Psie Pole - Zawidawie, Szczepin, Kowale, Karłowice - Różanka, Przedmieście Oławskie i Muchobór Mały cechują się największym łącznym obszarem PMWC i 100m buforu wokół PMWC, przekraczającym 190 ha. Największym odsetkiem (powyżej 50%) powierzchni z podwyższonym ryzykiem termicznym (PMWC i 100m bufor) cechują się osiedla Przedmieście Świdnickie, Nadodrże i Tarnogaj.

Tabela 12. Zestawienie powierzchni PMWC i 100m bufora wokół PMWC dla osiedli Wrocławia

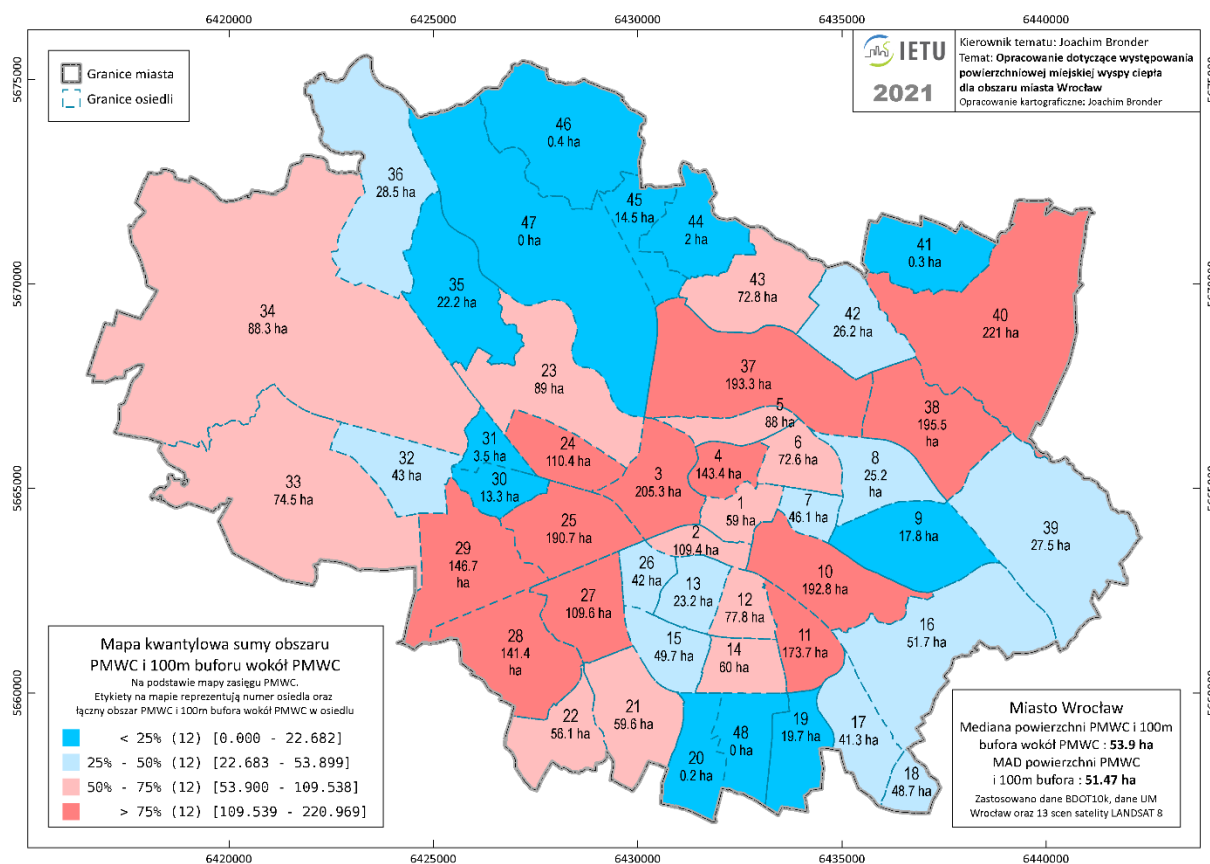
Nr	Nazwa osiedla	PMWC [ha]	Bufor 100m [ha]	Razem [ha]	PMWC [%]	Bufor 100m [%]	Razem [%]
1	Stare Miasto	15,18	43,79	58,96	7,58	21,87	29,46
2	Przedmieście Świdnickie	40,14	69,30	109,45	26,64	45,99	72,64
3	Szczepin	82,28	123,05	205,33	18,70	27,97	46,67
4	Nadodrże	63,33	80,04	143,38	31,89	40,30	72,19
5	Kleczków	32,56	55,44	88,00	17,31	29,47	46,77

Nr	Nazwa osiedla	PMWC [ha]	Bufor 100m [ha]	Razem [ha]	PMWC [%]	Bufor 100m [%]	Razem [%]
6	Ołbin	21,89	50,73	72,62	8,38	19,43	27,81
7	Plac Grunwaldzki	17,34	28,71	46,05	12,00	19,87	31,87
8	Zacisze - Zalesie - Szczytniki	4,32	20,85	25,17	1,18	5,68	6,86
9	Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice	3,06	14,76	17,82	0,52	2,50	3,02
10	Przedmieście Oławskie	106,57	86,26	192,82	17,86	14,46	32,32
11	Tarnogaj	85,84	87,86	173,70	29,13	29,82	58,95
12	Huby	24,11	53,69	77,81	11,67	25,99	37,67
13	Powstańców Śląskich	6,62	16,58	23,20	2,79	6,99	9,77
14	Gaj	12,52	47,47	59,99	4,84	18,34	23,18
15	Borek	15,13	34,53	49,66	5,47	12,49	17,97
16	Księżę	11,70	40,03	51,73	1,10	3,77	4,88
17	Brochów	16,11	25,22	41,33	4,31	6,75	11,06
18	Bieńkowice	18,68	30,02	48,71	13,04	20,95	33,98
19	Jagodno	4,50	15,23	19,73	1,31	4,44	5,76
20	Ołtaszyn	0,00	0,18	0,18	0,00	0,05	0,05
21	Krzyki - Partynice	12,24	47,38	59,62	2,33	9,02	11,35
22	Klecina	18,29	37,78	56,07	4,86	10,04	14,89
23	Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn.	34,54	54,48	89,02	4,05	6,38	10,43
24	Gądów - Popowice Płd.	38,93	71,49	110,41	12,42	22,81	35,22
25	Muchobór Mały	95,00	95,72	190,72	19,11	19,25	38,36
26	Gajowice	7,93	34,09	42,02	4,65	19,98	24,62
27	Grabiszyn - Grabiszyniek	58,34	51,29	109,63	14,22	12,50	26,73
28	Oporów	58,67	82,77	141,44	9,08	12,81	21,89
29	Muchobór Wielki	57,28	89,45	146,73	8,33	13,00	21,33
30	Nowy Dwór	1,26	12,00	13,26	0,66	6,29	6,95
31	Kuźniki	0,00	3,54	3,54	0,00	2,42	2,42
32	Żerniki	19,21	23,80	43,01	4,92	6,09	11,00
33	Jerzmanowo - Jarnołów - Strachowice - Osiniec	16,97	57,54	74,51	0,98	3,34	4,33
34	Leśnica	18,68	69,59	88,26	0,46	1,70	2,15
35	Maślice	4,23	17,93	22,16	0,64	2,71	3,35
36	Pracze Odrzańskie	4,14	24,32	28,46	0,41	2,43	2,84
37	Karłowice - Różanka	71,57	121,77	193,34	6,45	10,97	17,41
38	Kowale	80,74	114,71	195,45	12,56	17,84	30,40
39	Strachocin - Swojczyce - Wojnów	7,96	19,56	27,52	0,64	1,57	2,20
40	Psie Pole - Zawidawie	82,77	138,20	220,97	5,03	8,40	13,43
41	Pawłowice	0,00	0,26	0,26	0,00	0,06	0,06
42	Sołtysowice	3,45	22,71	26,15	0,76	4,99	5,75
43	Polanowice - Poświętne - Ligota	28,63	44,12	72,75	5,07	7,81	12,88
44	Widawa	0,00	1,98	1,98	0,00	0,48	0,48
45	Lipa Piotrowska	4,48	10,03	14,51	1,55	3,48	5,03

Nr	Nazwa osiedla	PMWC [ha]	Bufor 100m [ha]	Razem [ha]	PMWC [%]	Bufor 100m [%]	Razem [%]
46	Świniary	0,00	0,42	0,42	0,00	0,05	0,05
47	Osobowice - Rędzin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	Wojszyce	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych UM Wrocław

Rozkład przestrzenny osiedli z największą powierzchnią PMWC i 100m buforu wokół PMWC tworzy strefę przecinającą miasto Wrocław od północnego wschodu przez centrum do krańców południowo-zachodnich (Rys. 20).



Rys. 20. Mapa rozmiaru powierzchni PMWC i 100m bufora wokół PMWC w podziale na osiedla Wrocławia

5.3 SZACUNEK LICZBY MIESZKAŃCÓW W KLASACH RYZYKA TERMICZNEGO

Ocenę ryzyka termicznego dla mieszkańców Wrocławia wynikającego z obecności i bezpośredniego sąsiedztwa powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła wykonano zgodnie z zapisami zawartymi w podrozdziale 3.3. Punktową mapę mieszkańców z przypisaną klasą ryzyka nałożono na mapę granic osiedli. Tabela 13 przedstawia liczbę mieszkańców poszczególnych osiedli w trzech klasach ryzyka, sumę mieszkańców w strefie podwyższonego ryzyka oraz procentowy udział liczby mieszkańców w klasach z podwyższonym ryzykiem.

Tabela 13. Zestawienie wyników oceny ryzyka termicznego dla mieszkańców Wrocławia

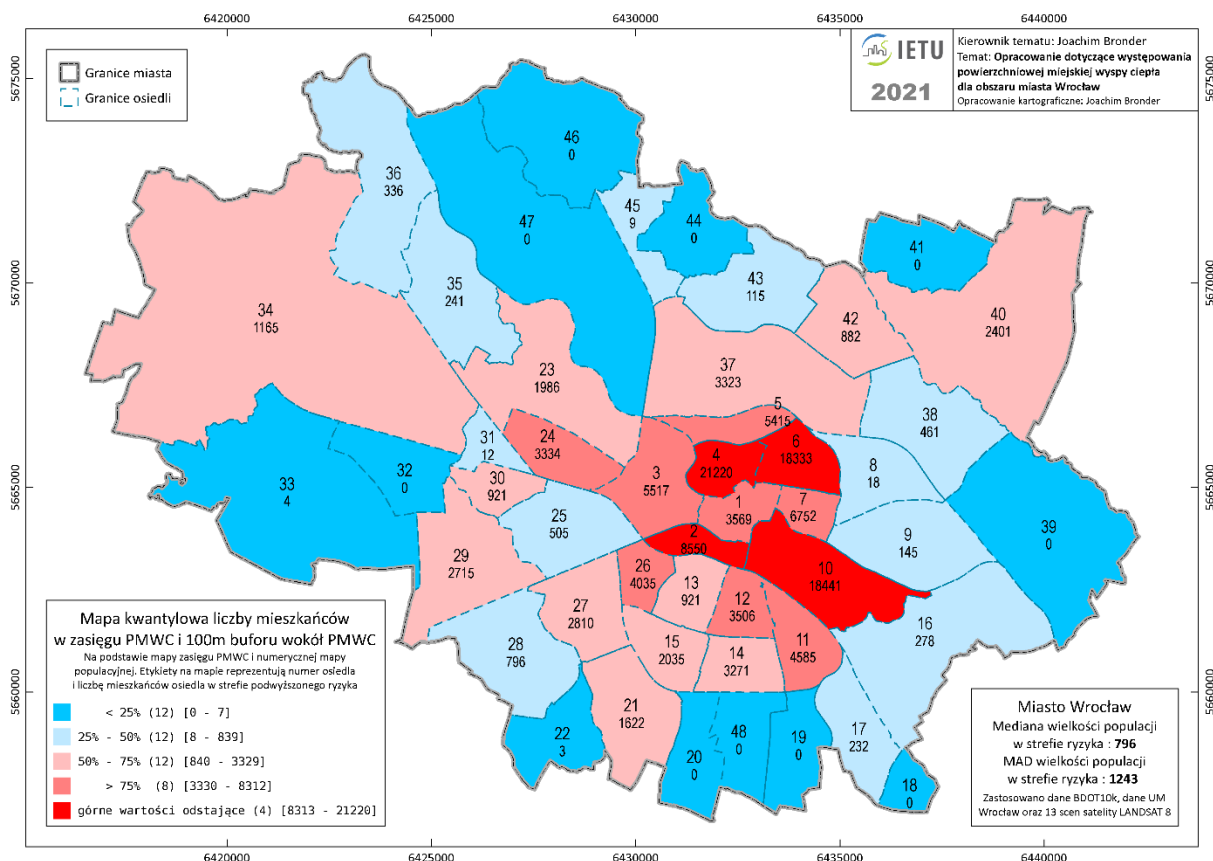
Nr	Nazwa osiedla	RP	R1K	R2K	R12K	R12K [%]
1	Stare Miasto	5239	2632	937	3569	40,52%
2	Przedmieście Świdnickie	5069	6817	1733	8550	62,78%
3	Szczepin	12999	5026	491	5517	29,80%

Nr	Nazwa osiedla	RP	R1K	R2K	R12K	R12K [%]
4	Nadodrże	1783	8334	12886	21220	92,25%
5	Kleczków	1198	2289	3126	5415	81,88%
6	Ołbin	13015	11966	6367	18333	58,48%
7	Plac Grunwaldzki	5047	3580	3172	6752	57,23%
8	Zacisze - Zalesie - Szczytniki	3530	18	0	18	0,51%
9	Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice	19174	145	0	145	0,75%
10	Przedmieście Oławskie	1756	6320	12121	18441	91,31%
11	Tarnogaj	3309	3033	1552	4585	58,08%
12	Huby	15595	3437	69	3506	18,36%
13	Powstańców Śląskich	23682	899	22	921	3,74%
14	Gaj	15559	3271	0	3271	17,37%
15	Borek	10228	1831	204	2035	16,59%
16	Księżę	5824	261	17	278	4,56%
17	Brochów	7320	232	0	232	3,07%
18	Bieńkowice	478	0	0	0	0,00%
19	Jagodno	7140	0	0	0	0,00%
20	Ołtaszyn	6657	0	0	0	0,00%
21	Krzyki - Partynice	18148	1613	9	1622	8,20%
22	Klecina	6856	3	0	3	0,04%
23	Piłczyce - Kozanów - Popowice Płn.	29349	1896	90	1986	6,34%
24	Gądów - Popowice Płd.	21310	3304	30	3334	13,53%
25	Muchobór Mały	7346	486	19	505	6,43%
26	Gajowice	18325	3663	372	4035	18,05%
27	Grabiszyn - Grabiszyniek	10178	2489	321	2810	21,64%
28	Oporów	6216	731	65	796	11,35%
29	Muchobór Wielki	9596	2116	599	2715	22,05%
30	Nowy Dwór	14331	921	0	921	6,04%
31	Kuźniki	5673	12	0	12	0,21%
32	Żerniki	3860	0	0	0	0,00%
33	Jerzmanowo - Jarnołtów - Strachowice - Osiniec	2120	4	0	4	0,19%
34	Leśnica	29167	1023	142	1165	3,84%
35	Maślice	11092	241	0	241	2,13%
36	Pracze Odrzańskie	5175	336	0	336	6,10%
37	Karłowice - Różanka	28232	3032	291	3323	10,53%
38	Kowale	1891	374	87	461	19,60%
39	Strachocin - Swojczyce - Wojnów	7208	0	0	0	0,00%
40	Psie Pole - Zawidawie	26221	2360	41	2401	8,39%
41	Pawłowice	2239	0	0	0	0,00%
42	Sołtysowice	3568	882	0	882	19,82%
43	Polanowice - Poświętne - Ligota	5247	115	0	115	2,14%
44	Widawa	1766	0	0	0	0,00%
45	Lipa Piotrowska	2854	9	0	9	0,31%
46	Świniary	711	0	0	0	0,00%
47	Osobowice - Rędzin	2949	0	0	0	0,00%
48	Wojszyce	6509	0	0	0	0,00%

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych UM Wrocław

RP - ryzyko podstawowe; R1K - ryzyko wyższe o 1 klasę od RP; R2K - ryzyko wyższe o 2 klasy od RP; R12K - ryzyko wyższe o 1 i 2 klasy od RP

Pod względem liczby narażonych na ryzyko mieszkańców osiedla Nadodrze, Przedmieście Oławskie i Ołbin cechują się największą liczbą narażonych mieszkańców w stosunku do pozostałych osiedli Wrocławia. Łącznie w obrębie tych osiedli około 58 tysięcy mieszkańców jest narażonych na podwyższone ryzyko termiczne. Wysoką liczbą narażonych mieszkańców cechują się jeszcze Przedmieście Świdnickie, Plac Grunwaldzki, Szczepin, Kleczków, Tarnogaj oraz Gajowice gdzie liczba narażonych mieszkańców osiedla przekracza 4000. Z drugiej strony w obszarze 15 osiedli liczba narażonych osób nie przekracza 20 osób (Tabela 12). Osiedla o podwyższonej liczbie narażonych mieszkańców tworzą skupienie w centralnej części miasta. Mapa poniżej przedstawia wynik klasyfikacji ryzyka dla mieszkańców Wrocławia w podziale na osiedla (Rys. 21).



Rys. 21. Mapa oceny ryzyka termicznego mieszkańców miasta Wrocław w podziale na osiedla

5.4 RANKING OSIEDLI WROCŁAWIA ZE WZGLĘDU NA ZAGROŻENIE TERMICZNE WYNIKAJĄCE Z ISTNIENIA PMWC

Ranking osiedli Wrocławia ze względu na ryzyko termiczne jego mieszkańców wykonano na bazie kryteriów uwzględniających wyniki wcześniej wykonanych analiz. Są to kryteria uwzględniające liczbę mieszkańców w strefach ryzyka, wielkość obszaru stref ryzyka oraz poziom średniej intensywności uszczelnienia gleb, która odzwierciedla charakter pokrycia terenu. Kryteriom tym, stosując metodę procesu hierarchii analitycznej, przypisano wagi w taki sposób, że ich suma wynosi 1 [12]. Kryteria zastosowane w rankingu osiedli i wagi przypisane tym kryteriom przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 14. Kryteria zastosowane w rankingu osiedli Wrocławia

Nr	Definicja kryterium	Waga ³
K1	Iloczyn średniej temperatury receptorów ⁴ i liczby receptorów w zasięgu PMWC	0,50
K2	Iloczyn średniej temperatury receptorów i liczby receptorów w zasięgu 100m bufora wokół PMWC	0,21
K3	Powierzchnia PMWC w m ²	0,14
K4	Powierzchnia 100 m bufora wokół PMWC w m ²	0,09
K5	Średnia intensywność uszczelnienia gleb osiedla [%] (P.U. >0%)	0,06

Kryteria dobrano od najważniejszego do najmniej ważnego. Przyjęto, iż iloczyn liczby mieszkańców osiedla w strefie ryzyka podwyższonego o dwie klasy i średniej temperatury, na którą eksponowani są w/w mieszkańcy osiedla stanowi najważniejsze kryterium w rankingu.

Do raportu dołączono arkusz kalkulacyjny, który może być zastosowany do samodzielnego wykonania rankingu osiedli w oparciu o własne preferencje.

Tabela 15 przedstawia obliczone sumy zestandaryzowanych i zważonych wartości kryterialnych dla wszystkich 48 osiedli Wrocławia. Kolorami zaznaczono pozycję w rankingu. Głębsza czerwień oznacza wyższą pozycję, głębsza zieleń oznacza niższą pozycję w rankingu.

Tabela 15. Ranking osiedli Wrocławia w oparciu o przyjęte kryteria

Nr osiedla	Nazwa osiedla	SUMA K1 ... K5	RANGA
1	Stare Miasto	0,1863	14
2	Przedmieście Świdnickie	0,3326	4
3	Szczepin	0,3170	5
4	Nadodrże	0,8367	1
5	Kleczków	0,2870	7
6	Ołbin	0,5409	3
7	Plac Grunwaldzki	0,2730	8
8	Zacisze - Zalesie - Szczytniki	0,0241	40
9	Biskupin - Sępolno - Dąbie - Bartoszowice	0,0215	41
10	Przedmieście Oławskie	0,8126	2
11	Tarnogaj	0,3114	6
12	Huby	0,1594	18
13	Powstańców Śląskich	0,0512	31
14	Gaj	0,1235	21
15	Borek	0,0915	23
16	Księżę	0,0566	30
17	Brochów	0,0413	32
18	Bieńkowice	0,0602	28
19	Jagodno	0,0312	39
20	Ołtaszyn	0,0059	47
21	Krzyki - Partynice	0,0910	24
22	Klecina	0,0638	27

³ W obliczeniach wag zastosowano proces porównania parami

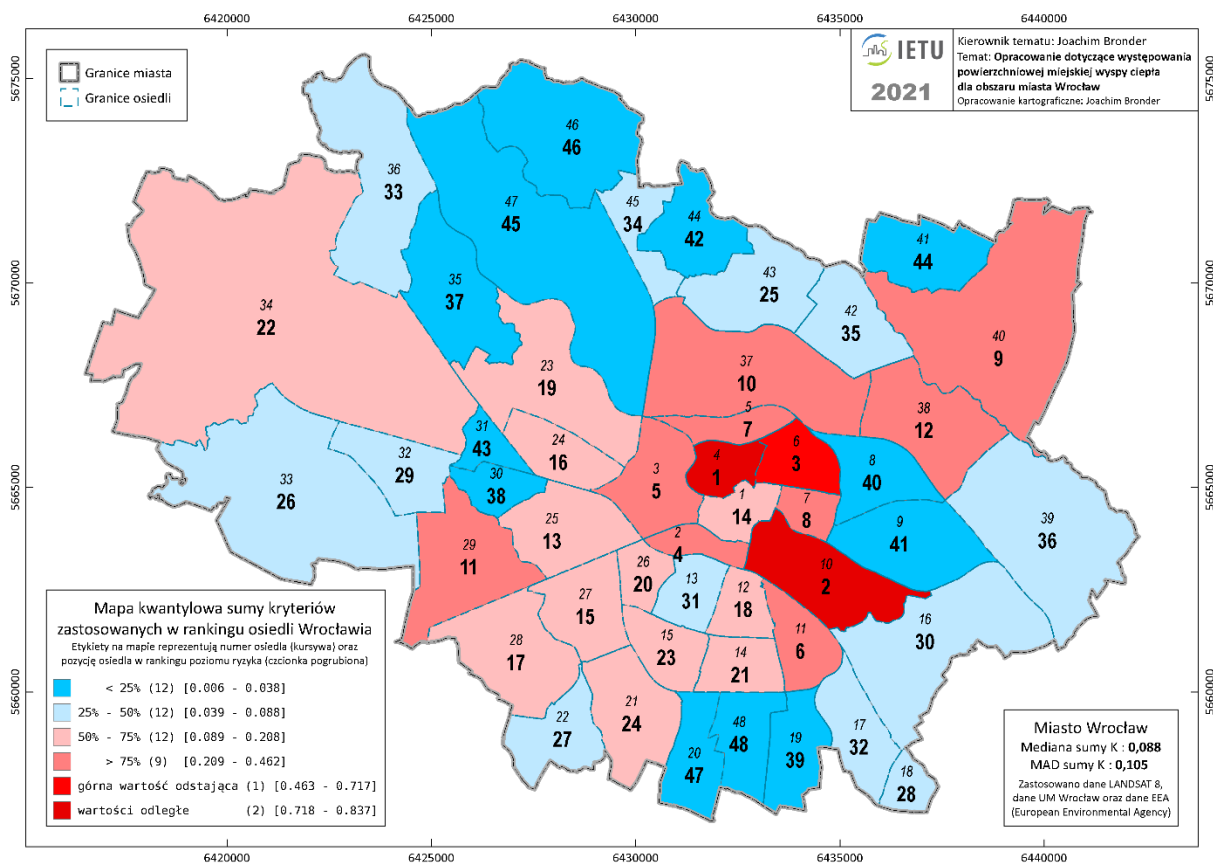
⁴ Receptor w tym przypadku oznacza punkt na mapie reprezentujący pojedynczego mieszkańca

Nr osiedla	Nazwa osiedla	SUMA K1 ... K5	RANGA
23	Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn.	0,1304	19
24	Gądów - Popowice Płd.	0,1743	16
25	Muchobór Mały	0,1989	13
26	Gajowice	0,1265	20
27	Grabiszyn - Grabiszyniek	0,1796	15
28	Oporów	0,1651	17
29	Muchobór Wielki	0,2176	11
30	Nowy Dwór	0,0342	38
31	Kuźniki	0,0106	43
32	Żerniki	0,0594	29
33	Jerzmanowo - Jarnołów - Strachowice - Osiniec	0,0746	26
34	Leśnica	0,1045	22
35	Maślice	0,0376	37
36	Pracze Odrzańskie	0,0397	33
37	Karłowice - Różanka	0,2469	10
38	Kowale	0,2165	12
39	Strachocin - Swojczyce - Wojnów	0,0385	36
40	Psie Pole - Zawidawie	0,2544	9
41	Pawłowice	0,0084	44
42	Sołtysowice	0,0394	35
43	Polanowice - Poświętne - Ligota	0,0843	25
44	Widawa	0,0177	42
45	Lipa Piotrowska	0,0395	34
46	Świniary	0,0060	46
47	Osobowice - Rędzin	0,0082	45
48	Wojszyce	0,0057	48

Źródło: Obliczenia własne na podstawie danych satelity Landsat 8 i danych UM Wrocław i EEA

Celem rankingu jest uszeregowanie i sklasyfikowanie osiedli Wrocławia pod kątem pilności działań adaptacyjnych.

Biorąc pod uwagę wyniki sumowania wartości kryterialnych i wynik rankingu można stwierdzić, iż osiedlami, w których działania adaptacyjne, czy też inne działania łagodzące wpływ wysokich temperatur na mieszkańców są najbardziej pilne to: Nadodrze i Przedmieście Oławskie. Stosunkowo dużą pilnością konieczności działań adaptacyjnych cechuje się trzecie w rankingu osiedle Ołbin. Mapa poniżej przedstawia wynik przeprowadzonej analizy wielokryterialnej (Rys. 22). Widoczna jest silna pozycja w rankingu trzech pierwszych osiedli, których sumy standaryzowanych i ważonych wartości kryterialnych odstają od sum pozostałych osiedli.



Rys. 22. Mapa rankingu poziomu ryzyka termicznego mieszkańców miasta Wrocław w podziale na osiedla

Sumami wartości kryterialnych wyższymi od III kwantyla cechują się także (w kolejności od najwyższej do najniższej) następujące osiedla: Przedmieście Świdnickie, Szczepin, Tarnogaj, Kleczków, Plac Grunwaldzki, Psie Pole - Zawidawie, Karłowice - Różanka, Muchobór Wielki, oraz Kowale.

6 PROPOZYCJE DZIAŁAŃ OGRANICZAJĄCYCH NEGATYWNE SKUTKI MWC WE WROCŁAWIU

Minimalizowanie skutków wysokich temperatur oraz ograniczanie wpływu MWC na jakość życia mieszkańców zostało zapisane w przyjętym przez Radę Miejską Wrocławia we wrześniu 2019 Miejskim Planie Adaptacji do zmian Klimatu. Wprowadzone w dokumencie zapisy postulowały między innymi wdrożenie rozwiązań technicznych obniżających intensywność nagrzewania się powierzchni (budynków, parkingów, placów itp.). Sygnalizowały również potrzebę poszukiwania rozwiązań systemowych ograniczających efekt Miejskiej Wyspy Ciepła. Przeprowadzone w niniejszej pracy analizy i obliczenia wskazały na zróżnicowanie oddziaływania MWC w zależności od typu zabudowy, rozwiązań materiałowych stosowanych w przestrzeniach publicznych i obiektach oraz od koncentracji zabudowy i liczby ludności. Uszeregowanie zabudowy wg. przyjętych w pracy kryteriów pozwoliło na stworzenie mapy ryzyka termicznego dla mieszkańców miasta oraz sklasyfikowało osiedla Wrocławia pod kątem konieczności działań adaptacyjnych. Działania ograniczające MWC będą się różniły z uwagi na typologię zabudowy oraz lokalizację na wskazanej wyżej mapie ryzyka termicznego (Rys. 22). Będą obejmowały zarówno nowe rozwiązania projektowe jak i rewitalizację istniejących fragmentów miasta, obiektów i przestrzeni publicznych.

W przestrzeniach publicznych ograniczanie MWC ukierunkowane jest na eliminację powierzchni zwiększających absorpcję energii słonecznej (asfalt, beton), zastosowanie materiałów o wyższym albedo- głównie jaśniejszych oraz wprowadzenie zieleni i wody jako regulatorów temperatury i wilgotności. Wskazane jest stosowanie nawierzchni zastępujących beton, asfalt lub bruk. Nawierzchnie utwardzane przepuszczalne mogą mieć zastosowanie na placach, parkingach, drogach dojazdowych, ciągach pieszo-jezdnych, ścieżkach oraz w parkach i na skwerach miejskich. Wprowadzanie zieleni w przestrzeniach publicznych jest zabiegiem nie tylko skutecznym, wpływającym na obniżenie temperatury i wzrost wilgotności w danej przestrzeni lecz również absorbującym pyły i inne zanieczyszczenia miejskie.

Katalog rozwiązań urbanistycznych i architektonicznych wykorzystujących zieleni jest bardzo obszerny, a większość rozwiązań ukierunkowanych na wykorzystanie zieleni w zagospodarowaniu wód opadowych ma również zastosowanie w ograniczaniu negatywnych skutków MWC.

Jednym ze sposobów systemowego wprowadzania zieleni w przestrzeń o wysokim ryzyku termicznym jest zastosowanie metody Zielonej Akupunktury Miejskiej.⁵ Punktowa „perforacja” silnie zurbanizowanej tkanki miejskiej niewielkimi przestrzeniami zielonymi-skwerami, ogrodami deszczowymi, zielonymi podwórkami, ale również zielonymi dachami i ścianami, stanowi jedno z proponowanych rozwiązań możliwych do wprowadzenia w obszarach miasta wskazanych w rankingu na najwyższych pozycjach (Tabela 15).

⁵ Metoda stosowana w projektach urbanistycznych oraz środowiskowych np. w Projekcie Interreg CE Salute4 CE

Celem tej metody jest introdukcja zieleni w sposób rozproszony, co umożliwia jej lepszy rozkład przestrzenny, a tym samym skuteczniejsze działanie regulacyjne.

W łagodzeniu skutków ekstremalnych temperatur w przestrzeni miejskiej proponuje się rozwiązania z zakresu małej architektury, również takie które zawierają elementy roślinne. Stanowią je różnego typu detale architektoniczne - osłony, wiaty, zadaszenia, ekrany, łamacze promieni słonecznych (*brise soleil*), pergole. Ich zadaniem jest chronić budynki, przestrzenie miejskie oraz przebywających w nich ludzi przed nadmiernym nasłonecznieniem i nagrzewaniem oraz skutkami MWC.

Rozwiązania adresowane do zabudowy mieszkaniowej ukierunkowane są na właściwy dobór materiałów i kolorystykę, zapewniające mniejsze nagrzewanie i kumulację ciepła. W rozwiązaniach architektonicznych coraz częściej mają zastosowanie zielone dachy - ekstensywne oraz intensywne a także zielone ściany.

Ważnym sposobem ograniczania skutków MWC jest rozszczelnienie powierzchni nieprzepuszczalnych i stosowanie rozwiązań z użyciem zieleni i wody. Szczególnie zalecane jest to w przestrzeniach międzyblokowych, ale równie dobrze sprawdza się we wnętrzach kwaterałów i podwórkach miejskich.

Wrocław, ma bogate doświadczenia w systemowym kształtowaniu zieleni miejskiej, konsekwentne działania w tym kierunku pozwolą na kompleksowe rozwiązywanie problemów wynikających zarówno z oddziaływania MWC jak i innych zagrożeń miejskich będących konsekwencjami zmian klimatu.

Poniżej w tabeli przedstawiono proponowane działania adaptacyjne miasta w zależności od kierunków użytkowania ziemi (Tabela 16). Przykłady działań obejmują tworzenie infrastruktury błękitno zielonej jak na przykład tworzenie stawów retencyjnych, tworzenie niecek bioretencyjnych [1], [2], a także pewne drobne działania jak np. instalację kurtyn wodnych czy też podlewanie ulic. Niektóre działania można odnieść do różnych poziomów ryzyka oraz do różnych kierunków użytkowania terenu.

Interesującym rozwiązaniem przeciwdziałającym skutkom istnienia miejskiej wyspy ciepła (lub fali upałów) może być budowa tężni solankowych. Tego typu inwestycje stają się coraz bardziej popularne nawet w samych centrach miast, jak to ma miejsce w Chorzowie.

Poniższe zestawienie nie wyczerpuje całego wachlarza działań mających na celu przeciwdziałanie oddziaływaniu miejskiej wyspy ciepła.

Tabela 16. Propozycje działań ograniczających ryzyko wywołane oddziaływaniem miejskiej wyspy ciepła w zależności od poziomu ryzyka i kierunku użytkowania terenu

Rodzaj terenu	Poziom ryzyka		
	Ryzyko podstawowe (RP)	Ryzyko wyższe o 1 klasę od RP	Ryzyko wyższe o 2 klasy od RP
Mieszkaniowy	- utrzymania dotychczasowej dyspozycji zagospodarowania terenów zielonych w obszarach zabudowy mieszkaniowej - oraz - stawy retencyjne - niecki bioretencyjne - zielone fasady i ściany - sztuczne mokradła miejskie - deszczowe place zabaw - zielone korytarze przewietrzające - renaturyzacja rzek	- utrzymania dotychczasowej dyspozycji zagospodarowania terenów zielonych w obszarach zabudowy mieszkaniowej z rekomendacjami zwiększenia udziału terenów biologicznie czynnych - w przypadku realizacji nowej zabudowy wskazanie doboru materiałów zapewniających mniejsze nagrzewanie budynków i kumulację ciepła - zielone fasady i ściany - ogrody deszczowe - zielone dachy - niecki bioretencyjne - tężnie solankowe - klimatyzowane pomieszczenia (urzędy, sklepy, itd.) - kurtyny wodne - podlewanie ulic, chodników i placów - deszczowe place zabaw - zielone korytarze przewietrzające - renaturyzacja rzek	- zastosowanie metody zielonej akupunktury miejskiej do lokalizacji obszarów interwencji punktowej z doбором rozwiązań podnoszących udział zieleni i rozwiązań mikro retencji miejskiej tam, gdzie warunki na to pozwalają – np. propozycja stosowania rozwiązań ogrodów deszczowych w przestrzeniach międzyblokowych i zabudowie kwartałowej - rekomendacje wprowadzania „zielonych parkingów” zagospodarowanie przestrzeni publicznych i zieleńców miejskich łakami kwiatnymi, - właściwy dobór materiałów i kolorystyki, zapewniających mniejsze nagrzewanie budynków i kumulację ciepła - stosowanie tam gdzie warunki techniczne pozwalają – zielonych ścian i dachów - ogrody deszczowe - tężnie solankowe - klimatyzowane pomieszczenia (urzędy, sklepy, itd.) - kurtyny wodne - podlewanie ulic, chodników i placów - zielone korytarze przewietrzające - renaturyzacja rzek
Przemysłowy	- kontrolowanie/ procesów sukcesji naturalnej na terenach post- industrialnych - Jasne dachy o wysokim albedo - stawy retencyjne - niecki i rowy bioretencyjne - nawierzchnie przepuszczalne	- kontrolowanie procesów sukcesji naturalnej na terenach post- industrialnych, - rozszerzenie nawierzchni terenów (place, tereny składowania – tam gdzie jest to możliwe) - jasne dachy o wysokim albedo - stawy retencyjne - niecki i rowy bioretencyjne	- kontrolowanie procesów sukcesji naturalnej na terenach post- industrialnych, - rozszerzenie nawierzchni terenów (place, tereny składowania – tam gdzie jest to możliwe) - zagospodarowanie terenów post- industrialnych oraz niezagospodarowanych nieużytków przemysłowych, - jasne dachy o wysokim albedo - stawy retencyjne - niecki i rowy bioretencyjne - nawierzchnie przepuszczalne

Rodzaj terenu	Poziom ryzyka		
	Ryzyko podstawowe (RP)	Ryzyko wyższe o 1 klasę od RP	Ryzyko wyższe o 2 klasy od RP
Komunikacyjny	- o zielone torowiska - o zielone przystanki - o klimatyzowane pociągi - o klimatyzowane tramwaje - o klimatyzowane autobusy - o nawierzchnie przepuszczalne	- o zielone przystanki - o klimatyzowane pociągi - o klimatyzowane tramwaje - o klimatyzowane autobusy - o nawierzchnie przepuszczalne	- o zielone przystanki - o klimatyzowane pociągi - o klimatyzowane i tramwaje - o klimatyzowane autobusy - o nawierzchnie przepuszczalne
Centra handlowe oraz obiekty użyteczności publicznej	- o jasne dachy o wysokim albedo - o stawy retencyjne - o niecki bioretencyjne - o nawierzchnie przepuszczalne - o klimatyzowane pomieszczenia	- o jasne dachy o wysokim albedo - o stawy retencyjne - o niecki bioretencyjne - o nawierzchnie przepuszczalne - o klimatyzowane pomieszczenia	- o jasne dachy o wysokim albedo - o stawy retencyjne - o niecki bioretencyjne - o nawierzchnie przepuszczalne - o klimatyzowane pomieszczenia
Zieleń miejska w tym parki	- o tężnie solankowe - o kurtyny wodne - o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek	- o tężnie solankowe - o kurtyny wodne - o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek	- o tężnie solankowe - o kurtyny wodne - o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek
Nieużytki, rolnicze nieużytki, tereny przemysłowe, powojenne	- o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek	- o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek	- o miejskie pierścienie zieleni - o renaturyzacja rzek

Źródło: Dane własne oraz [1], [2]

7 WNIOSKI

Przeprowadzone w ramach pracy obliczenia, analizy i oceny pozwalają na dokonanie podsumowania i wyciągnięcie wniosków.

- Minimalna temperatura powierzchni ziemi Wrocławia wynosi około 21,796°C, natomiast temperatura maksymalna wynosi 42,255°C. Rozpiętość temperatur powierzchni ziemi wynosi około 20,5°C. Temperatura graniczna oddzielająca obszar powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła od pozostałej części miasta wynosi 31,963°C i jest ona nieznacznie niższa od wartości temperatury środkowej, która wynosi 32,026°C. Mediana temperatury strefy powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła wynosi 32,758°C i jest ona o około 4,4°C wyższa od mediany temperatury strefy poza PMWC (28,346°C).
- Najwyższymi średnimi temperaturami powierzchni ziemi wśród kategorii pokrycia terenu BDOT10k cechują się: tereny zabudowy przemysłowo-składowej, zabudowy handlowo-usługowej, składowania odpadów przemysłowych, teren pod drogą lotniskową, place i zwałowiska. Tereny zabudowy przemysłowo-składowej i tereny zabudowy handlowo-usługowej cechują się także najwyższymi maksymalnymi temperaturami powierzchni ziemi, przekraczającymi 42°C.
- Wśród analizowanych kategorii pokrycia terenu tereny zabudowy mieszkaniowej cechują się przeciętnymi temperaturami średnimi. Na 27 kategorii pokrycia terenu, tereny zabudowy wielorodzinnej zajmują 11 pozycję, a tereny zabudowy jednorodzinnej 13 pozycję pod względem wartości średniej temperatury powierzchni ziemi.
- Istnieją znaczące różnice pomiędzy podkategoriami zabudowy mieszkaniowej. Najwyższą średnią temperaturą powierzchni ziemi cechuje się pokryta twardą nawierzchnią (placem twardym), zwarta zabudowa wielorodzinna (32,1°C). Najniższą średnią temperaturą powierzchni ziemi cechuje się pokryta drzewami, luźna zabudowa jednorodzinna (26,0°C). Średnia temperatura powierzchni zabudowy wielorodzinnej jest o 1,6°C wyższa od średniej temperatury powierzchni zabudowy jednorodzinnej. Gęsta i zwarta zabudowa mieszkaniowa ma temperaturę powierzchni ziemi wyższą o 1,1°C od temperatury zabudowy luźnej. Zabudowa bez roślinności jest o 0,8°C cieplejsza od zabudowy, która jest pokryta roślinnością. Przekroczeniami temperatury granicznej cechuje się 9 na 21 podkategorii zabudowy mieszkaniowej; 6 to podkategorie zabudowy wielorodzinnej, 3 zaś to podkategorie zabudowy jednorodzinnej.
- Z kolei analiza uwzględniająca kategorie (klasy) pokrycia terenu według Urban Atlas wykazała iż najwyższymi temperaturami cechują się: tereny przemysłowe, handlowe, publiczne, wojskowe i prywatne; tereny kolejowe i związane z nimi grunty; obszary portowe, tereny tkanka miejskiej ciągłej (poziom uszczelnienia P.U. >80%); place budowy; i lotniska. Maksymalne temperatury powierzchni ziemi obszarów tkanki miejskiej ciągłej, tkanki miejskiej nieciągłej (P.U.: 50%-80%) istotnie przekraczają temperaturę graniczną.

- W ocenie przestrzennego rozkładu zagrożenia termicznego zastosowano podział Wrocławia na 48 osiedli.
- Osiedla cechujące się najwyższymi średnimi temperaturami powierzchni ziemi (od najwyższej) to: Przedmieście Świdnickie, Nadodrze, Tarnogaj, Huby, Szczepin, Gądów - Popowice Płd., Muchobór Mały, Gajowice, Plac Grunwaldzki, Muchobór Wielki, Oporów, oraz osiedle Powstańców Śląskich. Przedmieście Świdnickie cechuje się najwyższą średnią temperaturą (31,3°C) i jednocześnie jednym z najniższych zakresów temperatur (6,7°C).
- Maksymalna temperatura powierzchni ziemi 43 osiedli przekracza temperaturę graniczną, co oznacza, że na tych osiedlach istnieją warunki do tworzenia się powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła.
- Osiedla o najniższej średniej temperaturze powierzchni ziemi to: Zacisze - Zalesie - Szczytniki, Sołtysowice, Księżę oraz Osobowice - Rędzin. Największą rozpiętością temperatury powierzchni ziemi cechują się osiedla: Psie Pole - Zawidawie, Szczepin, Kowale, Pilczyce - Kozanów - Popowice Płn., i Gądów - Popowice Płd.
- Na terenie Wrocławia można wyodrębnić archipelag powierzchniowych miejskich wysp ciepła (PMWC) pokrywający obszar 1307,2 ha, co stanowi około 4,5% powierzchni miasta. Łączna powierzchnia PMWC i 100 metrowego bufora wokół PMWC wynosi 3477,8 ha, co stanowi 11,9% powierzchni miasta.
- Największym obszarem PMWC charakteryzują się osiedla Przedmieście Oławskie (106,6 ha) i Muchobór Mały (95,0 ha). Dużym obszarem (ponad 80 ha) charakteryzują się osiedla: Tarnogaj (85,8 ha), Psie Pole - Zawidawie (82,8 ha), Szczepin (82,3 ha) i Kowale (80,7 ha). Największym obszarem PMWC łącznie ze 100 metrowym buforem wokół PMWC cechują się Psie Pole - Zawidawie (221,0 ha) i Szczepin (205,3 ha). Dużym obszarem charakteryzują się osiedla: Kowale (195,5 ha), Karłowice - Różanka (193,3 ha), Przedmieście Oławskie (192,8 ha) oraz Muchobór Mały (190,7 ha).
- Na podstawie przeprowadzonych analiz szacuje się, iż 44763 mieszkańców Wrocławia, co stanowi 7,7% wszystkich mieszkańców miasta, mieszka w zasięgu PMWC. Szacuje się także, iż w łącznym zasięgu PMWC i 100m buforu wokół PMWC mieszka 130464 osób, co stanowi 22,4% mieszkańców.
- Osiedla o największej liczbie osób mieszkających w zasięgu PMWC to Nadodrze (12886 osób) i Przedmieście Oławskie (12121). Na te dwa osiedla przypada około 55,9% wszystkich osób mieszkających w zasięgu PMWC. Stosunkowo wysokim (powyżej 1500) poziomem liczby mieszkańców w zasięgu PMWC cechują się jeszcze: Ołbin (6367 mieszkańców), Plac Grunwaldzki (3172), Kleczków (3126), Przedmieście Świdnickie (1733) i Tarnogaj (1552). Z drugiej strony na 23 osiedla Wrocławia są wolne od obecności PMWC.

- W obszarze obejmującym PMWC i 100m bufor wokół PMWC mieszka 130464 osób. Osiedla o największej populacji zamieszkującej w obu strefach to: Nadodrze (21220), Przedmieście Oławskie (18441), Ołbin (18333) oraz Przedmieście Świdnickie (8550). Na te 4 osiedla przypada łącznie 51% populacji Wrocławia zamieszkującej w obu strefach. Jedynie 10 osiedli jest wolnych od łącznego oddziaływania PMWC i buforu wokół PMWC.
- Średnia arytmetyczna poziomu uszczelnienia gleb (PUG) Wrocławia (zakres uszczelnienia od 0 do 100) wynosi 21,14%. Mediana poziomu uszczelnienia gleb wynosi 0%, co oznacza, że co najmniej 50% powierzchni miasta cechuje się glebami nieuszczelnionymi. Osiedla o najwyższym, wyrażonym medianą, średnim poziomie uszczelnienia gleb to: Stare Miasto (87%), Nadodrze (85%), Przedmieście Świdnickie (84%) i Plac Grunwaldzki (78%). Z drugiej strony mediana poziomu uszczelnienia gleb 23 osiedli wynosi 0%.
- Średnia arytmetyczna poziomu intensywności uszczelnienia gleb (PUIG) Wrocławia (zakres uszczelnienia od 1 do 100) wynosi 52%. Mediana PUIG wynosi 46%. Osiedla o najwyższym poziomie intensywności uszczelnienia to: Stare Miasto (95%), Nadodrze (89%), Kleczków (85%), Przedmieście Świdnickie (85%) oraz Plac Grunwaldzki (83%).
- W latach 2006-2018 nastąpił wzrost średniego poziomu uszczelnienia gleb (o 4,7%) oraz obszaru z glebami uszczelnionymi (o 2645 ha). Poziom intensywności uszczelnienia gleb Wrocławia dobrze koreluje się z poziomem temperatury powierzchni. Współczynnik korelacji między tymi zmiennymi wynosi 0,97.
- W celu ułatwienia programowania działań adaptacyjnych na obszarze miasta w pracy zastosowano analizę wielokryterialną. Najważniejszym kryterium zastosowanym w analizie jest iloczyn liczby mieszkańców danego osiedla w zasięgu PMWC i średniej temperatury, na którą eksponowani są mieszkańcy danego osiedla (waga tego kryterium to 0,5, przy sumie wag równej 1,0). Pierwsze trzy miejsca w rankingu osiedli zajmują Nadodrze (1 pozycja), Przedmieście Oławskie (2 pozycja) i Ołbin (3 pozycja).
- Wynikiem projektu są przekazane Zleceniodawcy mapy numeryczne. Zbiór tych map obejmuje: (i) serię 28 rastrowych map temperatury powierzchni terenu, (ii) rastrową mapę temperatury powierzchni ziemi, (iii) wektorową mapę temperatury powierzchni ziemi, (iv) rastrową mapę powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, (v) wektorową mapę powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i pozornej wyspy ciepła, (vi) wektorową mapę gęstości zaludnienia i poziomu ryzyka mieszkańców oraz (vii) wektorową (punktową) mapę populacji Wrocławia.
- Ponadto przygotowano i przekazano Zleceniodawcy: (i) wektorową mapę klas pokrycia terenu według klasyfikacji BDOT10k, (ii) wektorową mapę klas pokrycia terenu według klasyfikacji Urban Atlas, (iii) rastrowe mapy poziomu uszczelnienia gleb dla lat 2006, 2009, 2012, 2015 i 2018, (iv) rastrową mapę wysokości terenu oraz (v) rastrową mapę kierunku nachylenia terenu.

8 LITERATURA

1. Błękitno - zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach. Katalog techniczny, 2019, Ecologic Institute i Fundacja Sendzimira
2. Błękitno – zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach. Narzędzia strategiczne, 2020, Ecologic Institute i Fundacja Sendzimira
3. Bronder, J. (2021): Określenie stopnia ekspozycji na zjawiska PMWC jednostek samorządu terytorialnego Lubelskiego Obszaru Metropolitalnego. Synteza, Katowice, Arkadis
4. Bronder, J., Nádudvari, A., Fudała J., Fudała, M. (2019): Charakterystyka zjawiska powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na obszarze aglomeracji górnośląskiej, [w] Obszary miejsko-przemysłowe wobec zmian klimatu na przykładzie miast centralnej części Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii Pod redakcją Justyny Gorgoń. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Works & Studies, Prace i Studia No. 89 Editor-in-Chief Czesława Rosik-Dulewska, Zabrze 2019
5. Copernicus Land monitoring services High Resolution land cover characteristics for the 2015 reference year: Lot 1 – Imperviousness and imperviousness change for EEA39 area and re-processing of imperviousness and imperviousness change for 2006, 2009 and 2012
6. Copernicus Land monitoring services High Resolution land cover characteristics for the 2018 reference year: Lot 1 – Imperviousness for EEA39 area. The Imperviousness degree is a thematic product showing the sealing density in the range from 0-100% for the period 2018 (including data from 2017-2019) for the EEA-39 area. The production of the high resolution imperviousness layers was coordinated by the European Environment Agency (EEA) in the frame of the EU Copernicus programme
7. Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M., 2002, Klimat Wrocławia, [w:] Środowisko Wrocławia - Informator 2002, Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju, Wrocław, 9-25
8. Earth Explorer, U.S. Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)
9. Gorgoń, J., Bronder, J. 2021. Opracowanie metodyki wyznaczania powierzchni oraz rozkładu przestrzennego elementów błękitno- zielonej infrastruktury (NBS) jako rozwiązań ukierunkowanych na minimalizację skutków MWC oraz ograniczanie innych zjawisk wpływających na obniżenie odporności na zmiany klimatu. IETU, Katowice
10. Kwiatkowski J., 1975, Zasięg fenów sudeckich i ich wpływ na mezoklimat regionów południowo - zachodniej i środkowej Polski, Przegląd Geofizyczny, 20 (28), 1
11. Landsat 8 (L8). Data Users Handbook, Version 4.0, 2019, Department of the Interior U.S. Geological Survey
12. Malczewski Jacek, 1999, GIS and multicriteria decision analysis, John Wiley & Sons, New York
13. Miejski Plan Adaptacji do zmian klimatu dla Gminy Tarnowskie Góry, 2021, Katowice
14. Plan adaptacji Miasta Wrocław do zmian klimatu do roku 2030 (<https://www.wroclaw.pl/zielony-wroclaw/miejski-plan-adaptacji-do-zmian-klimatu>)