

Piotr Lupa

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Wydział Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej

Zakład Geografii Kompleksowej

piotr.lupa@amu.edu.pl,  <https://orcid.org/0000-0003-1421-4926>

Propozycja wykorzystania zdjęć Landsat do oceny warunków termalnych na potrzeby opracowania miejskich planów adaptacji w Polsce

Zarys treści: Celem artykułu jest przedstawienie propozycji uwzględnienia rozkładu temperatury powierzchniowej (LST), obliczonej na podstawie zdjęć satelitarnych Landsat, do diagnozy warunków termalnych w mieście na potrzeby przygotowania miejskich planów adaptacji. Postępowanie badawcze zostało przeprowadzone na przykładzie miasta Chojnic.

Proponowana procedura ma umożliwić uszczegółowienie diagnozy w zakresie ekspozycji, wrażliwości i podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur w okresie późnej wiosny i lata, kiedy istnieje wysokie ryzyko pogorszenia komfortu termicznego mieszkańców. W toku badań ustalono, że we wskazanym okresie ponad 60% powierzchni miasta może odznaczać się niską podatnością na wysokie temperatury otoczenia. Najniższa podatność dotyczyła zwłaszcza terenów leśnych (północny klin zieleni w dolinie Strugi Jarcewskiej), zbiorników wodnych i ich sąsiedztwa, ogródków działkowych oraz gruntów rolnych. Prawie 30% powierzchni Chojnic charakteryzowało się wysoką podatnością. Były to głównie gęsto zabudowane obszary o dużej zawartości zabudowy i ograniczonym udziale terenów biologicznie czynnych. Pozostałe 10% powierzchni miasta, cechujące się mozaikowym pokryciem terenu, zaklasyfikowano do kategorii średniej podatności na oddziaływanie wysokiej temperatury powierzchniowej.

Przedstawione w artykule postępowanie oparte na rozkładzie LST ma wyraźne odniesienie przestrzenne. Pozwala zidentyfikować w tkance miejskiej najbardziej i najmniej ekspozowane i wrażliwe miejsca, dzięki czemu działania adaptacyjne mogą być dostosowane do konkretnych lokalizacji. Dzięki wykorzystaniu otwartych źródeł danych i elastyczności w doborze podstawowych pól oceny zaproponowana metodyka może być replikowana w innych miastach.

Słowa kluczowe: miejskie plany adaptacji, podatność na zmiany klimatu, temperatura powierzchniowa, Landsat, Polska

Wprowadzenie

W dobie zmiany klimatu przejawiającej się globalnym trendem wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza szczególna sytuacja dotyczy miast stanowiących przestrzeń życia większości ludzi i silnej koncentracji efektów jego działalności (Carter i in. 2015, IPCC 2018, 2021, Lupa 2020). Tereny zurbanizowane stanowią znaczące źródło emisji gazów cieplarnianych i presji na klimat (IPCC 2018, 2021). Jednocześnie społeczności miast borykają się z szeregiem negatywnych konsekwencji kryzysu klimatycznego, takich jak wzrost intensywności zjawiska miejskiej wyspy ciepła, zwiększenie częstotliwości zdarzeń ekstremalnych, w tym deszczów nawaalnych i fal upałów, wzrost amplitudy wahań stanu wód w rzekach czy zmiany w podaży usług ekosystemowych (Kundzewicz, Kowalczak 2008, Graf 2014, Kolendowicz, Taszarek 2014, Carter i in. 2015, Jawgiel 2016, Kundzewicz i in. 2017, Saaroni i in. 2018, Lupa 2020, IPCC 2021).

Wyniki międzynarodowego badania geoankietowego przeprowadzone w oparciu o mapowanie partycypacyjne (ang. *crowdmapping*) w sześciu regionach europejskich pokazały, że obniżenie komfortu termicznego i kwestie gospodarowania wodą (jej niedoboru w okresach suszy i nadmiaru w trakcie wystąpienia deszczów nawaalnych) były najczęściej identyfikowanymi problemami łączonymi ze skutkami zmiany klimatu w mieście (Steinhaus i in. 2021, Lupa, Fagiewicz 2022, Herodowicz i in. 2023, Rzeszewski i in. 2024). Rangę wyzwania związanych z pogorszeniem warunków termalnych w miastach podkreślają również naukowcy zaangażowani w przygotowanie szóstego raportu Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC 2021). Zgodnie z ustaleniami raportu w miastach następuje lokalne nasilenie ocieplenia spowodowanego działalnością człowieka, a dalsza urbanizacja, wraz z częstszym występowaniem ekstremalnie wysokich temperatur, wzmocni w kolejnych latach dotkliwość fal upałów. Prognozie tej przypisano bardzo wysoki poziom pewności. Istotność kwestii związanych z oddziaływaniem wysokich temperatur w mieście polega na ich bezpośrednim negatywnym wpływie na zdrowie i życie ludzi wyrażanym wzrostem śmiertelności (Błazejczyk i in. 2015, Wedler i in. 2023, Baker, Sturm 2024). Badania prognostyczne przeprowadzone przez Masselot i in. (2025) pokazują, że w przypadku braku podjęcia działań adaptacyjnych wzrost liczby zgonów spowodowanych upałem będzie przewyższał potencjalny spadek liczby zgonów wywołanych zimą we wszystkich rozważanych przez zespół scenariuszach w Europie. Skutki zmian klimatu stanowią tym samym istotne wyzwanie dla zapewnienia wysokiej jakości życia i zdrowia mieszkańcom miast. W zarządzaniu tym kryzysem fundamentalne znaczenie ma przygotowanie efektywnych i społecznie akceptowalnych strategii przystosowawczych (Carter i in. 2015, Fagiewicz i in. 2021, Mizgański, Mizgański 2022, Wannevitz i in. 2024, Masselot i in. 2025) oraz ich wdrożenie za pomocą wysokiej jakości miejskich planów adaptacji (Reckien i in. 2023).

Działania na rzecz opracowania miejskich planów adaptacji (MPA) w Polsce zostały zainicjowane w 2014 r. przez Ministerstwo Środowiska, które zleciło przygotowanie pierwszego podręcznika adaptacji dla miast (PAM) opublikowanego finalnie w 2015 r. (Hajto i in. 2023). Zaczęto wówczas opracowywać pierwsze

miejskie plany adaptacji, najpierw dla miast powyżej 100 tys. mieszkańców w ramach projektu 44MPA i Adaptcity, a następnie dla miast o liczbie mieszkańców między 50 a 99 tys. i mniejszych w ramach projektu Climcities (Hajto i in. 2023). Mając na względzie najwyższą jakość polityki adaptacyjnej miast, w tym poprawne opracowanie MPA, w szczególności przy wykorzystaniu wsparcia z Funduszy Europejskich na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko (FEnIKS) i Funduszy Europejskich dla Polski Wschodniej (FEPW), Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy (IOŚ-PIB) zaktualizował podręcznik adaptacji, który został opublikowany w 2023 r. (Hajto i in. 2023).

Przełomowym wydarzeniem w rozwoju prac nad MPA było znowelizowanie pod koniec 2024 r. Prawa ochrony środowiska (POŚ) na mocy ustawy z dnia 27 listopada 2024 r. o zmianie ustawy – Prawo ochrony środowiska oraz niektórych innych ustaw, która weszła w życie 11 stycznia 2025 r. (Dz.U. z 2024 r. poz. 1940). Odtąd krajowa polityka ochrony środowiska jest prowadzona również za pomocą miejskich planów adaptacji. Ich sporządzanie jest obowiązkowe dla miast o liczbie ludności wynoszącej 20 tys. mieszkańców i więcej. W ramach tego rozwiązania miasta spełniające kryterium ludnościowe będą miały czas do dnia 1 stycznia 2028 r. na sporządzenie i uchwalenie MPA. Plany będą aktualizowane nie rzadziej niż co 6 lat, a sprawozdania z monitorowania ich wykonania mają być przekazywane do IOŚ-PIB, który będzie przygotowywać podsumowanie dla ministra właściwego do spraw klimatu. Przepisy noweli określają składowe elementy MPA, ale nie wyjaśniają pełnej metodologii ich sporządzania. Zakres składowych przyjęty w nowelizacji jest tożsamy z elementami MPA określonymi w zaktualizowanym „Podręczniku adaptacji dla miast” (Hajto i in. 2023), stąd należy przypuszczać, że większość gmin zdecyduje się na realizację nowego obowiązku, bazując na procedurach zaproponowanych przez IOŚ-PIB.

Zgodnie z nowelizacją POŚ i wytycznymi PAM (Hajto i in. 2023) część analityczna miejskiego planu adaptacji powinna obejmować nie wyłącznie ocenę ekspozycji, wrażliwości i podatności miasta na zmiany klimatu oraz rozpoznanie jego potencjału adaptacyjnego. Zgodnie z treścią podręcznika (Hajto i in. 2023) diagnoza w wymienionym zakresie z punktu widzenia funkcjonowania miasta powinna zostać opracowana na podstawie możliwie jak najdłuższych i jednorodnych serii danych meteorologicznych (temperatura powietrza, opady atmosferyczne, wiatr), pozyskanych z obserwacji ze stacji meteorologicznych IMGW-PIB lub innych instytucji publikujących dane w zestawieniach wieloletnich. Do badania powinny zostać wybrane stacje pomiarowe w mieście lub znajdujące się w niewielkiej odległości od niego, uznawane za stacje reprezentujące klimat regionalny charakterystyczny dla położenia miasta, co pozwala wnioskować o warunkach klimatycznych w mieście (patrz: Hajto i in. 2023).

Przyjęcie proponowanego podejścia (w oparciu o dane ilościowe z jednego posterunku lub stacji pomiarowej, często położonej poza granicami miasta) może być niewystarczające, by właściwie rozeznaczyć uwarunkowania klimatyczne, zwłaszcza w zakresie dotyczącym warunków termalnych, które na terenach zurbanizowanych są najczęściej bardzo zróżnicowane pod względem przestrzennym (Błażejczyk i in. 2014, Oke i in. 2017, Cao i in. 2021).

W przedstawionym kontekście celem artykułu jest przedstawienie propozycji uwzględnienia rozkładu temperatury powierzchniowej (LST), na podstawie danych z multispektralnych zdjęć satelitarnych Landsat, do diagnozy warunków termalnych w mieście na potrzeby opracowania miejskiego planu adaptacji do zmian klimatu. Zaprezentowane w dalszej części pracy procedury przygotowania i analizy zdjęć termalnych mają umożliwić uszczegółowienie diagnozy w zakresie ekspozycji, wrażliwości i podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia w okresie późnej wiosny i lata, kiedy istnieje duże ryzyko wystąpienia upałów i pogorszenia komfortu termicznego mieszkańców.

Obszar badań, materiały i metody badawcze

Procedura badawcza została przeprowadzona dla gminy miejskiej Chojnice w północnej Polsce na Pojezierzu Północnokrajeńskim w niedalekim sąsiedztwie Równiny Charzykowskiej i Borów Tucholskich (Solon i in. 2018). Zgodnie z podziałem Polski na regiony klimatyczne ze względu na częstość pojawiania się różnych typów pogody, Chojnice leżą w Regionie VII Środkowopomorskim odznaczającym się częstym występowaniem pogody umiarkowanie cieplej z dużym zachmurzeniem oraz pogody chłodnej i deszczowej (Woś 1996). Z kolei Beck i in. (2023) przewidują, że do roku 2070 obecnie notowany dla Chojnic klimat wilgotny kontynentalny z łagodnym latem i równomiernymi opadami w całym roku (Dfb) ulegnie zmianie w kierunku klimatu oceanicznego łagodnego, z cieplejszym latem i równomiernie rozłożonymi opadami w ciągu roku (Cfb). Pod względem administracyjnym miasto zlokalizowane jest w południowo-zachodniej części województwa pomorskiego w powiecie chojnickim. Chojnice zajmują powierzchnię ponad 21 km². Według stanu na koniec czerwca 2024 r. miasto liczyło 38 508 mieszkańców (GUS 2025).

W proponowanej ocenie podatności miasta Chojnic na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia wykorzystano rozkład temperatury powierzchniowej (ang. *land surface temperature*, LST), inaczej kinetycznej, która jest rzeczywistą temperaturą powierzchni czynnej ciała uwzględniającą jego emisyjność, czyli zdolność do emisji promieniowania cieplnego (Sobrino i in. 2004, Walawender 2009, Walawender i in. 2014, Majkowska i in. 2017, Łowicki, Kuklińska 2025). Analiza rozkładu temperatury powierzchniowej umożliwia przeprowadzenie oceny warunków termicznych na danym terenie, jest powszechnie stosowana w badaniach powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (np. Diem i in. 2023). Może być też wykorzystana do pośredniego odzwierciedlenia rozkładu temperatury powietrza (Majkowska i in. 2017).

Do analizy przestrzennego zróżnicowania temperatury powierzchniowej użyto czterech przetworzonych zdjęć satelitarnych misji Landsat z kolekcji Landsat 8–9 Collection 2 Level 2 Science Products (EROS 2020). Trzy zostały wykonane przez satelitę Landsat 8 w terminach 15 sierpnia 2020 r., 20 lipca 2022 r. i 5 czerwca 2023 r. w godz. 11.49–11.50 czasu środkowoeuropejskiego (9.49–9.50 GMT), jedno przez satelitę Landsat 9 w dniu 15 lipca 2023 r. o godz. 11.49

czasu środkowoeuropejskiego (9.49 GMT). Zdjęcia wybrano z serii pomiarowych wykonanych nad Polską Zachodnią w miesiącach od czerwca do września w latach 2020–2023. Kryterium wyboru zdjęć było istnienie warunków pogody radiacyjnej w momencie ich wykonania (bezchmurne niebo, pełne nasłonecznienie, brak opadów). Zebrany materiał jest reprezentatywny dla warunków dobrej, słonecznej pogody w okresie późnowiosennym i letnim, kiedy istnieje wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia upałów i pogorszenia komfortu termicznego mieszkańców. W badaniach wykorzystano kanał ST_B10 (ang. *surface temperature band*, rozdzielczość piksela 30 m) przechowujący informację o temperaturze powierzchniowej obliczonej na podstawie wartości kanału 10 (TIR, ang. *thermal infrared* – podczerwień termiczna, rozdzielczość piksela 100 m przeskalowana do 30 m). Dane zostały pobrane z serwisu Earth Explorer Amerykańskiej Służby Geologicznej (U.S. Geological Survey, USGS) i przetworzone z wykorzystaniem oprogramowania systemów informacji geograficznej ESRI ArcGIS Pro. Pozostałe rodzaje danych zestawiono w tabeli 1 prezentującej główne etapy postępowania.

Tabela 1. Kluczowe etapy oceny podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur

Główne etapy	Metody, techniki, narzędzia	Źródła danych
1. Zbieranie danych: • multispektralne zdjęcia satelitarne, • dane o pokryciu terenu, • dane o gęstości koron drzew, • dane demograficzne	Przegląd i pobranie danych z otwartych repozytoriów	• zdjęcia satelitarne Landsat 8/9 (EROS 2020), • Baza Danych Obiektów Topograficznych BDOT10k, • Tree Cover Density 2018 (TCD, rozkład gęstości koron drzew w Europie), • GUS NSP 2021 (dane ludnościowe w siatce GRID o boku pola 1 km)
2. Przetwarzanie danych – opracowanie map rozkładu przestrzennego: • temperatury powierzchniowej (LST), • gęstości koron drzew (TCD), • gęstości zaludnienia, • pokrycia terenu (z BDOT10k)	Techniki Systemów Informacji Geograficznej – GIS (program ArcGIS Pro ESRI): • nakładanie/przecinanie, • kalkulator rastra, • statystyki strefowe. Statystyki opisowe w arkuszu kalkulacyjnym Excel	Dane źródłowe pozyskane na pierwszym etapie prac
3. Diagnoza: • ocena ekspozycji i wrażliwości miasta na oddziaływanie LST, • ocena potencjału adaptacyjnego miasta, • ocena podatności miasta na zmiany klimatu	Techniki GIS: • kalkulator rastra, • statystyki strefowe. Obliczenia i analiza danych w arkuszu kalkulacyjnym Excel	Wyniki etapu drugiego, tj. mapy rozkładu LST, TCD, gęstości zaludnienia oraz mapa pokrycia terenu (BDOT10k) wykonane dla obszaru badań
4. Synteza i podsumowanie badań	Analiza i interpretacja wyników diagnozy	Wyniki etapu trzeciego, tj. mapy ekspozycji, wrażliwości i podatności miasta na oddziaływanie LST

Źródło: opracowanie własne.

W nawiązaniu do „Podręcznika adaptacji dla miast” (Hajto i in. 2023) w niniejszej pracy ocenę podatności miasta na zmiany klimatu rozumiano jako stopień, w jakim miasto jest niezdolne do poradzenia sobie z negatywnymi skutkami zmian klimatu, zwłaszcza oddziaływaniem wysokiej temperatury powierzchniowej. Za wrażliwość na zmiany klimatu przyjęto stopień, w jakim miasto podlega negatywnemu wpływowi zjawisk klimatycznych, co w pracy było ujęte ilościowo liczbą ludności narażonej na oddziaływanie wysokiej LST. Potencjał adaptacyjny jest definiowany jako materialne i niematerialne zasoby miasta, które mogą służyć do dostosowania i przygotowania się na zmiany klimatu oraz ich skutki (Hajto i in. 2023). W tej pracy potencjał mierzony był wskaźnikiem zazielenienia jako uśredniona wartość dwóch wskaźników cząstkowych: 1) gęstości koron drzew (%) i 2) udziału błękitno-zielonej infrastruktury (%), co szerzej wyjaśniono w dalszej części rozdziału.

Na etapie przetwarzania danych (tab. 1) wartości surowe pikseli kanału ST_B10 zostały przeliczone z wykorzystaniem współczynników korekcyjnych (wzór 1), zgodnie z wytycznymi technicznymi dla tej kolekcji produktów Landsat 8–9 (LSDS 2023). W efekcie uzyskano zdjęcia obrazujące rozkład LST wyrażonej w kelwinach (K). W następnym kroku przeliczono wartości wyrażone w kelwinach na stopnie Celsjusza (wzór 2):

$$LST_s(K) = DN \times MSF + AO \quad (\text{wzór 1})$$

$$LST_s(K) = T_s(K) - 273,15 \quad (\text{wzór 2})$$

- $LST_s(K)$ – temperatura powierzchniowa w kelwinach (K),
- DN – surowa wartość piksela zdjęcia satelitarnego (ang. *Digital Number*),
- MSF – mnożnikowy współczynnik skali (ang. *Multiplicative Scale Factor*), $MSF = 0,00341802$,
- AO – równoważnik addytywny (ang. *Additive Offset*), $AO = 149$,
- LST_s – temperatura powierzchniowa w stopniach Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$).

Średnią temperaturę powierzchniową ($aLST_s$) obliczono zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Majkowską i in. (2017). Sposób obliczenia ilustruje wzór 3:

$$aLST_s = \frac{\sum_{i=1}^n LST_s}{n} \quad (\text{wzór 3})$$

- $aLST_s$ – średnia temperatura powierzchniowa wyliczona dla danego piksela ($^{\circ}\text{C}$),
- LST_s – temperatura powierzchniowa danego piksela (z pojedynczego zdjęcia) ($^{\circ}\text{C}$),
- n – liczebność zbioru wartości temperatury powierzchniowej (liczba zdjęć = 4).

Na potrzeby badań wyliczono odchylenia średniej temperatury powierzchniowej jako różnice między wartością średniej LST poszczególnych pikseli a wartością średniej LST obliczonej dla Chojnic (wzór 4):

$$LST_{anom(s)} = aLST_s - aLST_s^{MC} \quad (\text{wzór 4})$$

- $LST_{anom(s)}$ – odchylenia średniej temperatury powierzchniowej ($^{\circ}\text{C}$),
- $aLST_s$ – średnia temperatura powierzchniowa piksela ($^{\circ}\text{C}$),
- $aLST_s^{MC}$ – średnia temperatura powierzchniowa miasta Chojnic ($35,03^{\circ}\text{C}$).

Statystyki dotyczące średniej LST oraz jej odchyłeń wyliczono dla miasta w jego granicach administracyjnych, dla bufora otaczającego Chojnice o promieniu równym 1 km, dla klas pokrycia terenu oraz w specjalnie utworzonej siatce kwadratów o boku 250 m stanowiącej pola podstawowe oceny ($N = 398$). Siatka kwadratów posłużyła do finalnej oceny podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia, w tym ekspozycji, wrażliwości i potencjału adaptacyjnego. Pierwotne dane o gęstości zaludnienia w siatce kilometrowej (GUS NSP 2021) interpolowano z wykorzystaniem technik GIS do budynków mieszkalnych (BDOT10k), uwzględniając ich całkowitą powierzchnię, a następnie przeniesiono do siatki pól podstawowych (narzędzie „intersect”). Granice administracyjne i klasy pokrycia terenu pochodziły z BDOT10k stanowiącej dane centralnego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (wg stanu na koniec 2023 r.).

Do oceny ekspozycji miasta na wysokie temperatury wykorzystano mapę rozkładu odchyłeń (anomalii) średniej temperatury powierzchniowej $LST_{anom(s)}$. Wartości z mapy uśredniono w ramach przyjętej siatki pól podstawowych. Polom o wartości odchylenia $-1^{\circ}\text{C} \leq LST_{anom(s)} \leq 1^{\circ}\text{C}$ przypisano średnią ekspozycję, polom o wartości $LST_{anom(s)} > 1^{\circ}\text{C}$ wysoką ekspozycję, a polom o wartości $LST_{anom(s)} < -1^{\circ}\text{C}$ niską ekspozycję.

Na potrzeby oceny potencjału adaptacyjnego, w tym określenia roli drzew w regulacji warunków termicznych w mieście, wykorzystano rastrową mapę gęstości koron drzew o rozdzielczości 10 m (TCD 2018). Dane z mapy uśredniono w ramach przyjętej siatki pól podstawowych – dla każdego pola obliczono przeciętną gęstość koron drzew (GKD, %). Następnie, bazując na danych o pokryciu terenu (BDOT10k), obliczono udział błękitno-zielonej infrastruktury (BZI, %) w polach podstawowych. Do klas pokrycia terenu, które odzwierciedlają rozkład BZI w mieście zaliczono: wody powierzchniowe (OT_PTWP), tereny leśne lub zadrzewione (OT_PTLZ), roślinność krzewiastą (OT_PTRK), roślinność trawiastą i uprawy rolne (OT_PTTR), uprawy trwałe (OT_PTUT), grunt nieużytkowany (OT_PTGN) oraz inny teren niezabudowany (OT_PTNZ). Włączenie danej klasy bądź jej wybranych obiektów do kategorii BZI nastąpiło na drodze weryfikacji wizualnej na podstawie szczegółowej ortofotomapy (wykorzystano oprogramowanie GIS i usługi WMS Geoportalu Krajowego). W oparciu o wskaźniki GKD i BZI opracowano główny wskaźnik potencjału adaptacyjnego – poziom zazielenienia przyjmujący wartości z zakresu 0–100 pkt. Stanowił on uśrednioną wartość BZI i GKD dla danego pola podstawowego. Dzięki konstrukcji tego wskaźnika możliwe było uwzględnienie wielu drobnopowierzchniowych form zieleni wysokiej (np. pojedynczych drzew, alei drzew, drzew przyulicznych) i zieleni niskiej (np. zakrzewień punktowych i liniowych), które zostałyby pominięte, gdyby zastosować wyłącznie dane o pokryciu terenu z BDOT10k. Stosując rozkład naturalny

klas, wyznaczono trzy poziomy potencjału adaptacyjnego: niski (0–25 pkt), średni (26–47 pkt) i wysoki (powyżej 47 pkt).

Wrażliwość na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia obliczono w polach podstawowych, wykorzystując dane o gęstości zaludnienia. Przyjęto, że im większa liczba ludności w danym polu, tym wyższa wrażliwość na wysokie temperatury, co jest zgodne z zaleceniami w „Podręczniku adaptacji dla miast” (Hajto i in. 2023). Aby uwzględnić grupy osób szczególnie zagrożonych oddziaływaniem wysokich temperatur otoczenia, przyjęto podwójną wagę dla osób starszych (60+ lat) i najmłodszych (0–9 lat). Stosując rozkład naturalny klas, wyznaczono trzy poziomy wrażliwości: niski, średni i wysoki (wariant I). Klasy wrażliwości w wariancie I odniesiono następnie do klas ekspozycji, wyznaczając w ten sposób finalny zakres wrażliwości (wariant II, tab. 2).

Tabela 2. Finalne klasy wrażliwości (wariant II) miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia

Klasy wrażliwości miasta (wg wariantu I)	Klasy ekspozycji miasta		
	niska	średnia	wysoka
niska	niska	niska	średnia
średnia	niska	średnia	wysoka
wysoka	średnia	wysoka	wysoka

Źródło: opracowanie własne.

Oceny podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia dokonano, wykorzystując trzy klasy podatności skonstruowane w efekcie porównania potencjału adaptacyjnego i wrażliwości (wariant II). Sposób wyznaczenia klas podatności miasta przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Klasy podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia

Klasy wrażliwości miasta (wg wariantu II)	Klasy potencjału adaptacyjnego miasta		
	niska	średnia	wysoka
niska	średnia	niska	niska
średnia	wysoka	średnia	niska
wysoka	wysoka	wysoka	średnia

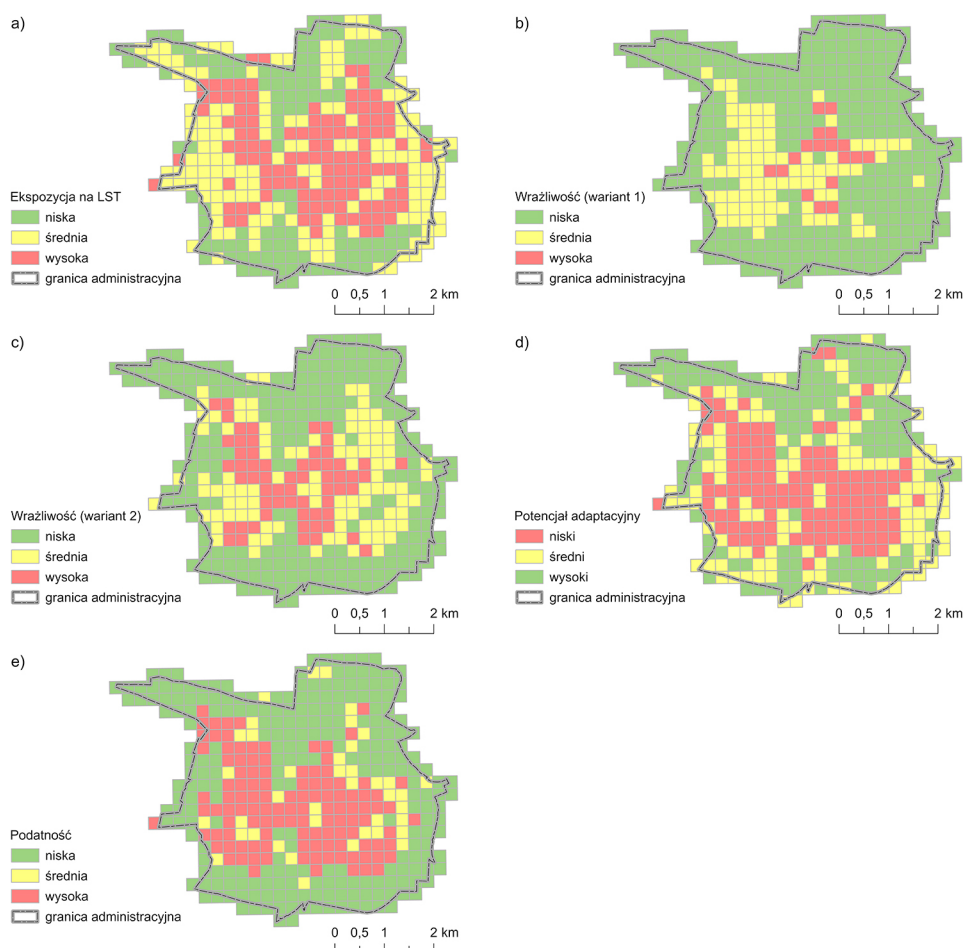
Źródło: opracowanie własne.

Wyniki

Ekspozycja miasta

Wartości temperatury w mieście w okresie późnowiosennym i letnim w warunkach pogody radiacyjnej wahały się w zakresie od niespełna 21°C do ponad 46°C. Miejsca chłodniejsze to przede wszystkim lasy i parki miejskie, zadrzewienia i zakrzewienia, zbiorniki wodne oraz zadrzewiona dolina Strugi Jarcewskiej w północnej

części obszaru badań. Miejsca najcieplejsze stanowiły silnie uszczelnnione tereny gęstej zabudowy, zwłaszcza wielkopowierzchniowa zabudowa przemysłowa. Średnia dla całego miasta $aLST_s$ wyniosła nieco ponad 35°C . Przeciętna temperatura powierzchni najcieplejszych była o ponad 11°C wyższa, terenów najchłodniejszych o ponad 14°C niższa od wartości przeciętnej. Obserwowane różnice pokazują, jak istotne dla kształtowania warunków termalnych jest pokrycie i użytkowanie terenu oraz kierunek jego zagospodarowania. Rozkład $LST^{anom(s)}$ w Chojnicach ułatwił identyfikację miejsc cieplejszych i chłodniejszych w tkance miejskiej. Do pierwszej grupy zaliczyć należy w szczególności gęstą zabudowę śródmiejską związaną ze Starym Rynkiem oraz zgrupowania wielkopowierzchniowych budynków, których pokrycia dachowe wykonane są z ciemnych materiałów bitumicznych (np. budynki przemysłowe, szpital, park handlowy). Wyspami chłodu w mieście były Lasek



Ryc. 1. Wyniki oceny podatności miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia ($^{\circ}\text{C}$) w czasie pogody radiacyjnej w okresie późnowiosennym i letnim

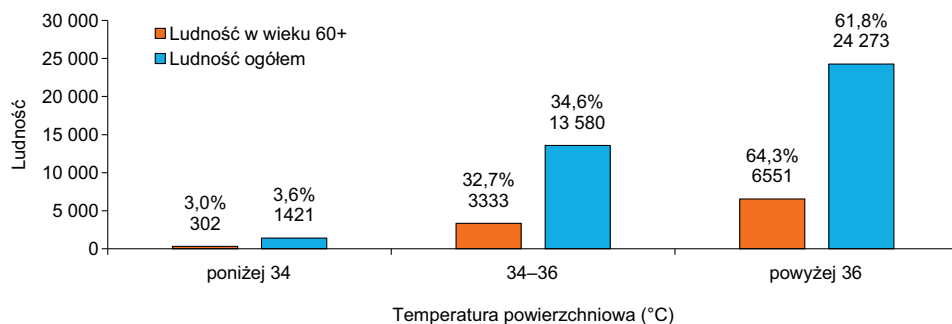
Źródło: opracowanie własne na podstawie EROS (2020), BDOT10k, TCD (2018) i GUS NSP (2021).

Miejski wraz z doliną Strugi Jarcewskiej (północny klin zieleni), park Tysiąclecia, park Miejski na Wzgórzu Ewangelickim, Cmentarz Parafialny przy ul. Kościerskiej, tereny spontanicznie rozwijającej się zieleni przy terenach kolejowych czy tereny podmokłe i zadrzewione w południowej części Chojnic przy obwodnicy. Ocenę ekspozycji miasta na oddziaływanie wysokich temperatur przedstawia rycina 1a. Wysoką ekspozycją odznaczało się niespełna 30% powierzchni miasta, a ekspozycją niską i średnią odpowiednio 32% i 38%. Miasto charakteryzowało się również występowaniem zjawiska powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, której wartość oszacowano na 1,4°C. W rozpatrywanych warunkach pogodowych w porze dnia teren w granicach miasta może być przeciętnie cieplejszy o około 1,4°C od terenów podmiejskich położonych w odległości do 1 km.

Wrażliwość miasta

Wrażliwość miasta mierzona w oparciu o wskaźnik gęstości zaludnienia jest relatywnie niewielka. Zaledwie 4,5% całkowitej powierzchni miasta zostało zaliczone do klasy wysokiej wrażliwości – były to głównie tereny w zabudowie wielorodzinnej. Aż 75% powierzchni miasta odznaczało się niską klasą wrażliwości, pozostałe 20% należało do klasy średniej wrażliwości (ryc. 1b). Uwzględniając nie tylko rozkład przestrzenny populacji, ale również ekspozycję miasta na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia (wariant II, ryc. 1c), należy zauważyć ponadtrzykrotny przyrost udziału powierzchni w klasie wysokiej wrażliwości (>15%). Wzrósł do poziomu blisko 25% również udział powierzchni Chojnic w klasie średniej wrażliwości.

Dodatkowo w ramach oceny wrażliwości miasta przeanalizowano liczbę mieszkańców narażoną na oddziaływanie temperatur otoczenia w trzech przedziałach pokrywających się z klasami ekspozycji wyznaczonymi w oparciu o wartości $LST_{anom(s)}$. Wyniki wskazują, że blisko 62% ogółu mieszkańców Chojnic przebywało na terenach o przeciętnej LST powyżej 36°C, przy czym lokalnie dla terenów zabudowy mieszkaniowej temperatury maksymalne mogły przekraczać nawet 41°C. W grupie osób starszych w wieku 60 i więcej lat udział ten był jeszcze

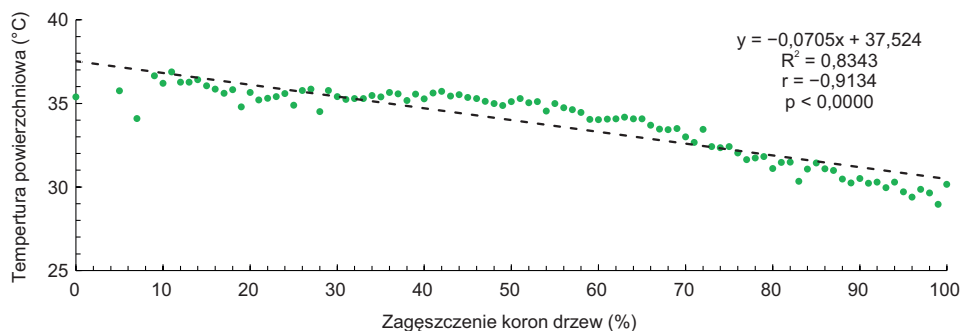


Ryc. 2. Potencjalne narażenie ludności na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia (°C) w czasie pogody radiacyjnej w okresie późnowiosennym i letnim w Chojnicach
Źródło: opracowanie własne na podstawie EROS (2020) i GUS NSP (2021).

wyższy i wynosił 64,3%. Zatem w porównaniu do całej populacji w jeszcze większym stopniu osoby starsze były narażone na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia (ryc. 2).

Potencjał adaptacyjny

Z analiz przeprowadzonych dla Chojnic wynika, że wraz ze wzrostem zagęszczenia koron drzew na danym terenie odnotowuje się mniejsze wartości temperatury powierzchniowej (ryc. 3). Wzmocnienie obecnie istniejącego systemu zadrzewień w mieście poprzez nasadzenie dodatkowych drzew zwłaszcza na terenach gęstej zabudowy może przynieść wymierne korzyści dla mieszkańców związane z łagodzeniem fal upałów w okresie letnim.



Ryc. 3. Związek między średnią temperaturą powierzchniową a zagęszczeniem koron drzew na terenie Chojnic

Źródło: opracowanie własne na podstawie EROS (2020) i TCD (2018).

Pokrycie terenu ma istotne znaczenie dla kształtowania warunków termalnych w Chojnicach. Wyniki pokazują, że wody powierzchniowe, obszary leśne i zadrzewione oraz roślinność krzewiasta odznaczają się niższą LST w porównaniu do pozostałych klas pokrycia terenu (tab. 4). Pewnym potencjałem odznaczają się również tereny pokryte roślinnością trawiastą, choć dotyczy to głównie wilgotnych łąk, a nie trawników kultywowanych, które w okresie suszy mogą odznaczać się wysokimi wartościami temperatury powierzchniowej. Średnia temperatura powierzchniowa wód na terenie miasta w analizowanym okresie wyniosła 32°C (wody stojące). W tym przypadku wartość temperatury jest pozorna i wynika z ograniczeń metodycznych związanych z rozdzielczością zastosowanych zdjęć satelitarnych. Wyliczenie LST dla drobnopowierzchniowych obiektów wodnych jest obarczone błędem. Wartość temperatury wód, zwłaszcza płynących, na podstawie badań terenowych, jest zazwyczaj znacznie niższa, stąd zbiorniki i ciek wodne pełnią na obszarach zurbanizowanych istotną funkcję termoregulacyjną.

Dla łagodzenia warunków cieplnych w Chojnicach szczególne znaczenie ma zieleń wysoka, w tym lasy i parki miejskie, zadrzewienia przyuliczne i grupy drzew. Ochronie i wzmocnieniu podlegać powinien zwłaszcza północny klin zieleni obejmujący dolinę Strugi Jarcewskiej. W jego strukturze pokrycia dominują

Tabela 4. Średnia temperatura powierzchniowa klas pokrycia terenu w Chojnicach

Klasa obiektów wg BDOT10k	Obiekty	Średnia temperatura powierzchni terenu ($aLST_s$, °C)				
		min	maks.	zakres	średnia	SD
woda powierzchniowa zabudowa	woda stojąca	28,5	37,8	9,3	32,0	1,9
	zabudowa wielorodzinna	33,3	41,2	8,0	36,9	1,5
	zabudowa jednorodzinna	30,6	41,0	10,5	36,0	1,2
	zabudowa przemysłowo-składowa	32,1	46,2	14,2	37,3	2,3
	zabudowa handlowo-usługowa	33,6	42,0	8,4	38,0	1,8
	pozostała zabudowa	31,0	41,5	10,5	36,9	2,0
teren leśny i zadrzewiony	las	27,5	38,3	10,9	30,6	2,3
	zadrzewienie	30,4	37,2	6,8	33,3	1,6
	zagajnik	31,3	35,8	4,5	32,9	0,7
roślinność krzewiasta	krzewy	28,9	36,0	7,1	32,5	2,0
	ogród działkowy	30,8	38,2	7,4	34,3	1,2
uprawa trwała	sad	32,1	38,5	6,4	35,3	1,4
	roślinność trawiasta	27,7	41,1	13,4	34,3	2,3
i uprawa rolna	uprawa na gruntach ornych	29,5	39,7	10,1	34,5	1,8
teren pod drogami kołowymi, szynowymi i lotniskowymi	teren pod drogą kołową i torowiskiem	29,6	40,8	11,2	35,7	1,8
grunt nieużytkowany	pozostały grunt nieużytkowany	36,5	37,8	1,3	37,1	0,4
	plac	32,2	45,2	13,0	36,9	1,7
pozostały teren niezabudowany	teren pod urządzeniami technicznymi lub budowlami	30,0	38,8	8,7	35,8	1,8
	teren przemysłowo-składowy	32,9	37,8	4,9	36,1	1,6

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych BDOT10k oraz analizy zdjęć satelitarnych Landsat 8/9 (EROS 2020).

tereny leśne i trawiaste. Klin przedziela zwartą zabudowę śródmiejską Chojnic, wspomagając przewietrzanie centrum miasta. Spośród klas pokrycia terenu występujących w graniach Chojnic (tab. 4) najwyższymi wartościami przeciętnej LST odznaczają się powierzchnie w największym stopniu przekształcone przez człowieka, w szczególności zabudowa handlowo-usługowa, zabudowa przemysłowo-składowa, place, zabudowa wielorodzinna, pozostałe tereny zabudowane. Obszar zabudowy, w tym zabudowy mieszkaniowej, stanowi klasę pokrycia terenu, która cechuje się najwyższymi maksymalnymi wartościami temperatury powierzchniowej przy jednych z najwyższych wartości temperatury minimalnej. Oznacza to, że wysiłki mające na celu łagodzenie skutków fal upałów i podniesienie komfortu cieplnego mieszkańców powinny w sposób szczególnie dotyczyć przestrzeni miasta związanych z tą klasą pokrycia i użytkowania ziemi.

Wysoki potencjał adaptacyjny miasta dotyczy blisko 40% jego powierzchni. Jest związany z terenami błękitno-zielonej infrastruktury zlokalizowanymi głównie na obrzeżach miasta i północnym klinie zieleni. Po około 30% powierzchni Chojnic zakwalifikowano do klas średniego i niskiego potencjału adaptacyjnego (ryc. 1d).

Podatność

W efekcie porównania potencjału adaptacyjnego miasta z jego wrażliwością na oddziaływanie wysokich temperatur otoczenia dokonano rozpoznania jego podatności, czyli stopnia, w jakim miasto jest niezdolne do poradzenia sobie z negatywnymi skutkami zmian klimatu w kontekście temperatury powierzchniowej (Hajto i in. 2023). Niska podatność Chojnic dotyczyła ponad 60% powierzchni miasta, głównie na terenach o dużym udziale powierzchniowym lasów (północny klin zieleni w dolinie Strugi Jarcewskiej), wód, ogródków działkowych i terenów rolniczych (w południowej części miasta). Podatnością wysoką odznaczało się niemal 30% powierzchni Chojnic. W tej klasie znalazły się przede wszystkim jednostki na obszarach najsilniej zabudowanych odznaczających się dużą zawartością zabudowy i relatywnie niedużym udziałem powierzchni biologicznie czynnej. Pozostała część miasta (ok. 10%) o zróżnicowanym, mozaikowym pokryciu i użytkowaniu terenu została zakwalifikowana do klasy średniej podatności (ryc. 1e).

Dyskusja

Znaczenie błękitno-zielonej infrastruktury dla łagodzenia warunków termalnych w mieście

Związek między LST a zróżnicowaniem szaty roślinnej w ujęciu ilościowym mierzonym z wykorzystaniem wskaźników wegetacji, w szczególności NDVI (znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji) czy wskaźnika pokrycia terenu koronami drzew, jest bardzo dobrze rozpoznany w literaturze (np. Oke i in. 2017, Łowicki, Kuklińska 2025). Im bujniejsza i zdrowsza pokrywa roślinna, tym mniejsze notowane wartości temperatury powierzchniowej i pośrednio temperatury powietrza na danym terenie w ciepłym sezonie roku (np. Weng i in. 2004, Guha, Govil 2021). Zasadnicza rola szaty roślinnej w kształtowaniu warunków termicznych dotyczy zwłaszcza dojrzałych drzew oraz ich skupisk (np. Gromke i in. 2015, Kim i in. 2024). Termoregulacyjna funkcja lasów, zadrzewień i zakrzewień jest efektem procesów transpiracji roślin i parowania wody z ich powierzchni. Szczególne znaczenia ma zieleń wysoka, w tym lasy i parki miejskie, zadrzewienia przyuliczne i grupy drzew, które poprzez zacienianie i wspomniane procesy metaboliczne związane z oddychaniem stanowią swoiste naturalne klimatyzatory w okresach występowania wysokich temperatur powietrza. W przypadku wód decydujące znaczenie ma jej duża pojemność cieplna, zużywanie energii na parowanie i zdolność do odbijania promieniowania słonecznego (np. Błażejczyk i in. 2014, Oke i in. 2017, Saaroni i in. 2018). Biorąc pod uwagę powyższe, należy podkreślić, że błękitno-zielona infrastruktura w mieście dostarcza istotnych korzyści dla mieszkańców, polegających na regulacji temperatury i wilgotności powietrza, w tym poprzez przewietrzanie i transpirację (kod usługi 2.3.6.2 w klasyfikacji CICES v5.2 – patrz: Haines-Young 2023). Jest to jedna z tzw. regulacyjnych usług ekosystemowych, które są przedmiotem szerokiego zainteresowania

badaczy również w Polsce (np. Zwierzchowska, Mizgajski 2019, Affek i in. 2023, Kaliszewski i in. 2023).

Wyniki badań zrealizowanych w Chojnicach potwierdzają istotną rolę terenów zieleni i wód w kształtowaniu warunków cieplnych. Najniższe wartości temperatury powierzchniowej odnotowano właśnie dla wód powierzchniowych, terenów leśnych i zadrzewionych oraz roślinności krzewiastej – najwyższe zaś dla terenów o dominującym udziale szarej infrastruktury (patrz: tab. 4). Ponadto wykryto istotną statystycznie liniową zależność – wraz ze wzrostem zagęszczenia koron drzew wartość LST malała (w porze letniej, patrz: ryc. 3).

Ograniczenia w wykorzystaniu danych Landsat

Temperatura powierzchniowa mierzona z wykorzystaniem narzędzi teledetekcyjnych, w szczególności sensorów termalnych umieszczanych na sztucznych satelitach, stanowi powszechnie stosowany wskaźnik zastępczy (tzw. *proxy indicator*) w badaniu rozkładu temperatury powietrza oraz oceny intensywności miejskiej wyspy ciepła (Walawender i in. 2014, Majkowska i in. 2017, Oke i in. 2017). Jednakże rozkładu tej temperatury nie można wprost traktować jako rozkładu temperatury powietrza na wysokości 2 m nad gruntem (Błażejczyk i in. 2014). W sezonie letnim w porze dnia jest ona zazwyczaj wyższa od temperatury powietrza (np. Naserikia i in. 2023). Choć LST wykazuje znaczące dodatnie korelacje z temperaturą powietrza, to miejsca najchłodniejsze i najcieplejsze wyznaczone w oparciu o wartości obu wskaźników nie zawsze pokrywają się ze sobą przestrzennie (np. Cao i in. 2021). Z powodzeniem stosowane są jednak regresyjne modele nieliniowe pozwalające oszacować wysokość temperatury powietrza na podstawie rozkładu LST, co dla przykładu w Poznaniu przeprowadził zespół pod kierunkiem Majkowskiej (2017).

Ocena warunków termalnych fragmentów miasta o wysokiej intensywności zabudowy na podstawie zdjęć satelitarnych odznacza się pewnym poziomem niepewności związanym z faktem, że pomiar dokonywany jest często na powierzchniach podlegających silnemu nagrzewaniu (np. dachach), które nie stanowią bezpośredniego otoczenia człowieka. Różnica między LST i temperaturą powietrza na wysokości 2 m nad gruntem jest często w takich miejscach większa w porównaniu do mniej zainwestowanych części miasta, szczególnie w ciepłe dni (Naserikia i in. 2023). Z drugiej strony temperatura powietrza w obrębie terenów intensywnie zabudowanych jest często wysoka ze względu na geometrię miasta – wielokrotne odbicia promieni słonecznych w kanionach ulicznych mogą prowadzić bowiem do zwiększonego pochłaniania promieniowania słonecznego i silnego nagrzewania się podłoża (Błażejczyk i in. 2014, Oke i in. 2017). Ma to swoje odczuwalne konsekwencje dla mieszkańców tych części miasta i w okresie letnim wiąże się z pogorszeniem ich komfortu cieplnego (np. Błażejczyk i in. 2015).

W badaniach przeprowadzonych dla Chojnic wykorzystano kanał ST_B10 (ang. *surface temperature band*) o pierwotnej rozdzielczości piksela 100 m (wynikającej z czułości sensora podczerwieni termicznej TIR), która jeszcze przed udostępnieniem podlega przeskalowaniu do rozdzielczości użytkowej 30 m (LSDS 2023).

Fakt ten limituje wykorzystanie danych w celu analizowania różnic LST obiektów drobnopowierzchniowych, np. małych rzek, oczek wodnych, budynków, których powierzchnia będzie mniejsza niż 900 m² (30 m × 30 m), a szerokość mniejsza niż 30 m. W przypadku Chojnic taka sytuacja dotyczyła wód powierzchniowych, które na obszarze badań mają charakter drobnopowierzchniowy. Interpretacja ich temperatury powinna być ostrożna, gdyż podczas wyliczania wartości średniej znaczną część pikseli obrazujących LST wód powierzchniowych stanowiły piksele mieszane – obejmujące swoim zasięgiem również inne typy pokrycia terenu, o czym pisał już Walawender (2009) i Walawender i in. (2014). Dzięki zastosowaniu w ocenie warunków termalnych siatki pól podstawowych o boku kwadratu wynoszącym 250 m, opisany wpływ został praktycznie wyeliminowany.

Innym ograniczeniem jest mniejsza dostępność scen satelitarnych spełniających kryterium braku przysłonięcia chmurami, które uniemożliwiają prawidłowe oszacowanie temperatury powierzchniowej, na co zwrócili uwagę również Łowicki i Kuklińska (2025). W rozwiązaniu tego wyzwania może pomóc wydłużenie okresu objętego analizą, tj. zwiększenie liczby sezonów (czerwiec–wrzesień) do kilku lub nawet kilkunastu. W niniejszej pracy wykorzystano 4 sceny satelitarne z lat 2020–2023.

Biorąc pod uwagę opisane wyzwania, należy podkreślić, że zdjęcia termalne Landsat 8–9 (EROS 2020) są regularnie zbierane, standaryzowane i dostępne bezpłatnie dla każdego użytkownika. USGS udostępnia dane przetworzone i ustandaryzowane w ramach wieloetapowej procedury korekcji atmosferycznej i kalibracji geometrycznej opisanej szczegółowo w podręczniku LDS (2023). Pomimo omówionych ograniczeń interpretacyjnych, zdjęcia satelitarne Landsat są z powodzeniem stosowane przez naukowców w badaniu warunków termicznych. W latach 2001–2025 opublikowanych zostało ponad 5 tys. prac opartych na wykorzystaniu zdjęć Landsat do szacowania LST. Spośród tych publikacji ponad 62% przypadało na lata 2021–2025¹.

Wnioski i podsumowanie

Zaproponowana procedura badawcza pozwoliła w sposób ilościowy ocenić ekspozycję, wrażliwość i podatność Chojnic na oddziaływanie wysokich temperatur powierzchniowych oraz oszacować potencjał adaptacyjny miasta. W odróżnieniu od metodologii proponowanej w „Podręczniku adaptacji dla miast” (Hajto i in. 2023) przedstawione w artykule postępowanie oparte o rozkład LST ma wyraźny charakter przestrzenny. Pozwala zidentyfikować w tkance miejskiej najbardziej i najmniej ekspozowane i wrażliwe miejsca, dzięki czemu działania adaptacyjne mogą być dostosowane do konkretnych lokalizacji. Możliwość interpolacji, uśredniania czy agregowania danych ilościowych w ramach różnych pól podstawowych

¹ Zapytanie z dnia 5 maja 2025 r. w wyszukiwarce Elsevier ScienceDirect o treści [„Landsat” and „land surface temperature”].

daje użytkownikowi elastyczność w adaptowaniu metodyki do lokalnych uwarunkowań związanych z funkcjonowaniem miasta.

Dokonujący się szybki rozwój technologiczny systemów teledetekcji satelitarnej i Systemów Informacji Geograficznej umożliwia monitorowanie stanu środowiska przyrodniczego z coraz wyższą dokładnością i częstotliwością pomiaru. Udostępniane bezpłatnie, ustandaryzowane, skalibrowane i zweryfikowane dane satelitarne Landsat 8–9 stanowią cenne źródło informacji nie tylko dla badaczy, ale również dla urbanistów i ekspertów działających w sektorze ochrony i zarządzania środowiskiem. Zdając sobie sprawę z ograniczeń technicznych i metodycznych, można uznać dane o rozkładzie LST za wiarygodne źródło informacji w planowaniu i wdrażaniu przez miasta działań przystosowawczych do skutków zmian klimatu.

Wzmocnienie procedur oceny podatności miast na zmiany klimatu opisanych w „Podręczniku adaptacji dla miast” (Hajto i in. 2023) poprzez uwzględnienie analizy przestrzennego rozkładu LST może skutecznie wesprzeć samorządy miast w realizacji obowiązków ustawowych związanych z opracowaniem miejskich planów adaptacji. Zaproponowane wyraźne podejście przestrzenne do oceny warunków termalnych może także wspomóc miasta w zintegrowanym planowaniu ich rozwoju i zarządzaniu kryzysem klimatycznym.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak występowania konfliktu interesów. Oświadczam, że tekst artykułu jest w całości jego dziełem.

Literatura / References

- Affek A., Wolski J., Degórska B., Solon J., Kowalska A., Regulska E., Degórski M. 2023. Usługi ekosystemów miejskich (zurbanizowanych). [W:] M. Stępniewska, A. Mizgajski (red.), Usługi ekosystemowe w zarządzaniu układami przyrodniczymi. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań. <https://doi.org/10.12657/9788379864690>
- Baker L., Sturm R. 2024. Mortality in extreme heat events: an analysis of Los Angeles County Medical Examiner data. *Public Health*, 236: 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.08.008>.
- BDOT10k, Baza Danych Obiektów Topograficznych, warstwy pochodne wg stanu na 10.04.2024 r. (https://mapy.geoportal.gov.pl/imap/Imgp_2.html?gpmap=gp0).
- Beck H.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Lutsco N.J., Dufour A., Zeng Z., Jiang X., van Dijk A.I.J.M., Miralles D.G. 2023. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 10: 724. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>
- Błażejczyk K., Baranowski J., Błażejczyk A. 2015. Wpływ klimatu na stan zdrowia w Polsce: stan aktualny oraz prognoza do 2100 roku. Wydawnictwo Akademickie Sedno, Warszawa (http://rcin.org.pl/igipz/Content/60110/PDF/WA51_79962_r2015_Wplyw-klimatu-na-sta.pdf).
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Szmyd J., Dudek W., Błażejczyk A., Kręcis B. 2014. Miejska wyspa ciepła w Warszawie – informator. IGIPZ PAN, Warszawa (https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/projekty/UHI/2014/mwc_w_warszawie_informator.pdf).
- Cao J., Zhou W., Zheng Z., Ren T., Wang W. 2021. Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103979>

- Carter J.G., Cavan G., Connelly A., Guy S., Handley J., Kazmierczak A. 2015. Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, 95: 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2013.08.001>
- Diem P.K., Nguyen C.T., Diem N.K., Diep N.T.H., Thao P.T.B., Hong T.G., Phan T.N. 2023. Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33: 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsa-se.2023.101081>
- EROS 2020, Earth Resources Observation and Science Center. 2020. Landsat 8–9 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor Level–2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>
- Fagiewicz K., Churski P., Herodowicz T., Kaczmarek P., Lupa P., Morawska-Jancelewicz J., Mizgajski A. 2021. Cocreation for Climate Change – Needs for Actions to Vitalize Drivers and Diminish Barriers. *Weather, Climate, and Society*, 13(3): 555–570. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0114.1>
- Graf R. 2014. Spatial Differentiation of Surface Runoff in Urbanised Catchments on the Example of Poznań. [W:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Water in the City*. UJK Kielce Publishing House, Kielce, Poland.
- Gromke C., Blocken B., Janssen W., Merema B., van Hooff T., Timmermans H. 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83: 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>
- Guha S., Govil H. 2021. An assessment on the relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index. *Environment, Development and Sustainability*, 3: 1944–1963. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00657-6>
- GUS 2025. Ludność wg miejsca zamieszkania i płci w podziale na miasto i wieś (dane ludnościowe dla Chojnic, aktualizacja z dnia 20.01.2025 r.). Główny Urząd Statystyczny, Bank Danych Lokalnych (<https://bdl.stat.gov.pl/>).
- GUS NSP 2021. Rozmieszczenie ludności – demografia 2021 r. (zbiór danych w siatce kilometrowej). Narodowy Spis Powszechny 2021. GUS, Warszawa.
- Haines-Young R. 2023. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.2 and Guidance on the Application of the Revised Structure (www.cices.eu).
- Hajto M., Bidłasik M., Kuśmierz A., Marcinkowski M., Potapowicz I., Rajkowska B., Romańczak A., Siwiec E. 2023. Podręcznik adaptacji dla miast. Aktualizacja 2023. Wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu. Klimada 2.0. Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie (https://klimada2.ios.gov.pl/wp-content/uploads/2023/09/Podręcznik-adaptacji-dla-miast_aktualizacja-2023_compressed.pdf).
- Herodowicz T., Kaczmarek P., Morawska J. 2023. Identyfikacja relacji budujących lokalny kapitał terytorialny w kontekście adaptacji do zmian klimatu w Metropolii Poznań – doświadczenia projektu TeRRIFICA. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 65: 131–150. <https://doi.org/10.14746/rrpr.2023.65.09>
- IPCC 2018. Summary for Policymakers. [W:] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner i in. (red.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- IPCC 2021. Podsumowanie dla decydentów. [W:] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani i in. (red.), *Zmiana klimatu 2021: fizyczne podstawy naukowe. Wkład I Grupy Roboczej do Szóstego Raportu Oceny Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu*. Cambridge University Press.
- Jawgiel K. 2016. Application of the VGI Observation in Urban Flash Flood Research on the Example of Poznań. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference: Hydrology of the Urban Catchments*, Warsaw, Poland.
- Kaliszewski A., Wysocka-Fijorek E., Ciesielski M., Neroj B., Sterańczak K., Gołos P. 2023. Usługi ekosystemów leśnych. [W:] M. Stępniewska, A. Mizgajski (red.), *Usługi ekosystemowe w zarządzaniu układami przyrodniczymi*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań. <https://doi.org/10.12657/9788379864690>

- Kim J., Khouakhi A., Corstanje R., Johnston A.S.A. 2024. Greater local cooling effects of trees across globally distributed urban green spaces. *The Science of the Total Environment*, 911, 168494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168494>
- Kolendowicz L., Taszarek M. 2014. Days with thunderstorms and tornadoes in Poland in 2011 and 2012. *The International Journal of Meteorology*, 39, 383: 20–29.
- Kundzewicz Z., Førland E.J., Piniewski M. 2017. Challenges for developing national climate services – Poland and Norway. *Climate Services*, 8: 17–25.
- Kundzewicz Z.W., Kowalczak P. 2008. *Zmiany klimatu i ich skutki*. Wyd. Kurpisz, Poznań.
- LSDS 2023. Landsat 8–9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide, LSDS-1619 version 5. 2023. Earth Resources Observation and Science (EROS), Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- Lupa P. 2020. Wpływ zielonej infrastruktury na warunki termiczne miast północnej Wielkopolski oraz jej miejsce w lokalnej polityce klimatycznej. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 52: 219–233. <https://doi.org/10.14746/rpr.2020.52.13>
- Lupa P., Fagiewicz K. 2022. Razem można więcej. O współtworzeniu rozwiązań na rzecz klimatu na przykładzie Aglomeracji Poznańskiej. *Magazyn Drzewo Franciszka*, 5–6 (https://drzewofranciszka.pl/wp-content/uploads/2023/03/Magazyn-Drzewo-Franciszka-05_06-1.pdf).
- Łowicki D., Kuklińska E. 2025. Potencjał chłodzący terenów zieleni na przykładzie parków miejskich Poznania i Wrocławia. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 18(73): 253–271. <https://doi.org/10.14746/rpr.2025.73.15>
- Majkowska A., Kolendowicz L., Półrolniczak M. i in. 2017. The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM. *Theoretical and Applied Climatology*, 128: 769–783. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1737-6>
- Masselot P., Mistry M.N., Rao S. i in. 2025. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities. *Nature Medicine* 2025. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03452-2>
- Mizgajski J.T., Mizgajski A. 2022. Globalne, europejskie i polskie dylematy polityki rozwoju wobec zmian klimatu – próba usystematyzowania. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 14(58): 73–92. <https://doi.org/10.14746/rpr.2022.58.06>
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Reckien D., Buzasi A., Olazabal M. i in. 2023. Quality of urban climate adaptation plans over time. *Urban Sustainability*, 3: 13. <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00085-1>
- Rouse J.W. Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, E73-106393, 93.
- Rzeszewski M., Kaczmarek P.G., Lupa P., Herodowicz T., Fagiewicz K., Morawska J., Churski P. 2024. Behind the scenes of a crowdmapping tool design and implementation: Guidelines for participatory mapping practices in a multicultural environment. *Geographia Polonica*, 97, 1. <https://doi.org/10.7163/gpol.0266>
- Saaroni H., Amorim J.H., Hiemstra J.A., Pearlmuter D. 2018. Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24: 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>
- Solon J., Borzyszkowski J., Bidlasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziąja W. 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland – verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica*, 91(2): 143–170. <https://doi.org/10.7163/GPol.0115>
- Steinhaus N., Hoff H., Churski P., Coquard C., Pflieger A. 2021. Eine Interaktive Beteiligungskarte Für Innovatives Klimahandeln in Europa. *Standort*, 45(4): 272–278. <https://doi.org/10.1007/s00548-021-00745-3>
- TCD 2018. European Union's Copernicus Land Monitoring Service information – Tree Cover Density 2018 raster (10 m). <https://doi.org/10.2909/486f77da-d605-423e-93a9-680760ab6791>
- Ustawa z dnia 27 listopada 2024 r. o zmianie ustawy – Prawo ochrony środowiska oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. z 2024 r. poz. 1940).

- Walawender J. 2009. Wykorzystanie danych satelitarnych Landsat i technik GIS w badaniach warunków termicznych miasta (na przykładzie aglomeracji krakowskiej). *Prace Geograficzne*, 122: 81–98.
- Walawender J., Szymanowski M., Hajto M., Bokwa A. 2014. Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. *Pure and Applied Geophysics*, 171 (6): 913–940. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0685-7>
- Wannewitz M., Ajibade I., Mach K.J. i in. 2024. Progress and gaps in climate change adaptation in coastal cities across the globe. *Nature Cities*, 1: 610–619. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00106-9>
- Wedler M., Pinto J.G., Hochman A. 2023. More frequent, persistent, and deadly heat waves in the 21st century over the Eastern Mediterranean. *Science of The Total Environment*, 870, 161883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161883>
- Weng Q., Lu D., Schubring J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Zwierzchowska I., Mizgajski A. 2019. Potencjał zielonej infrastruktury w dużych polskich miastach do świadczenia usług ekosystemowych. *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 47: 21–36. <https://doi.org/10.14746/rprp.2019.47.03>

Using Landsat data to assess thermal conditions for urban climate adaptation plans in Poland

Abstract: The article proposes the inclusion of surface temperature (LST) distribution, derived from Landsat 8/9 satellite images, in assessing thermal conditions in urban areas. This approach is intended to assist in the development of urban climate adaptation plans. The city of Chojnice, located in northern Poland with a population of nearly 39,000 residents, has been selected as the study area to test this procedure.

The proposed framework offers a more detailed diagnosis of the city's exposure, sensitivity, and vulnerability to high LSTs, particularly during late spring and summer when there is an increased risk of decreased thermal comfort for residents. The designed procedure is spatially explicit, enabling the identification of areas within the urban landscape that are most and least exposed to high temperatures. This capability allows adaptation measures to be tailored to specific locations effectively. Additionally, by utilising open data sources and allowing for adjustments to the assessment grid size, the proposed methodology can be reproduced in other cities.

In Chojnice, over 60% of the city's area has a low vulnerability to heat. This is primarily found in areas with significant forest coverage, such as the northern green wedge in the Struga Jarcewska valley, near water bodies, allotment gardens, and agricultural lands. Nearly 30% of the city is classified as having high vulnerability, mainly encompassing the densely developed areas with a high density of buildings and limited green spaces. The remaining 10% of the city area, which features a diverse and mosaic land cover, falls into the medium vulnerability to heat impact category.

Keywords: urban climate adaptation plans, vulnerability to climate change, land surface temperature, Landsat, Poland