

STAN BADAŃ KLIMATU POZNANIA ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM POŁA TEMPERATURY I ZJAWISKA MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA

The State of Poznań climate research with particular focus on the air temperature and urban heat island phenomenon

MAREK PÓŁROLNICZAK*¹ , LESZEK KOLENDOWICZ*, AGNIESZKA MAJKOWSKA-JUSKOWIAK*

Zarys treści. W artykule przedstawiono zestawienie i najważniejsze wyniki prac dotyczących klimatu Poznania, które podzielono na dwie grupy. W pierwszej kolejności zaprezentowano prace, w których autorzy wykonali analizy na podstawie elementów meteorologicznych, zanotowanych na stacji Poznań-Ławica. Następnie przedstawiono i szerzej omówiono wyniki prac, bazujące na danych pomiarowych nie tylko ze wspomnianej stacji, ale również pochodzących z sieci stacji miejskich. W tej części opracowania przedstawiono zagadnienia dotyczące m.in. miejskiej wyspy ciepła, powierzchniowej wyspy ciepła na podstawie zdjęć satelitarnych, związków miejskiej wyspy ciepła z cyrkulacją atmosferyczną oraz cech charakterystycznych temperatury powietrza i temperatury powierzchni czynnej w typach obszarów wg Corine Land Cover. Zwrócono również uwagę na zagadnienie modelowania temperatury powietrza w mieście na podstawie danych satelitarnych i danych *in situ* z sieci stacji miejskich. Na podstawie obecnego stanu badań klimatu Poznania można stwierdzić, że obserwowane zmiany temperatury powietrza nawiązują do obserwowanych w innych stacjach meteorologicznych na obszarze Polski. Uwagę zwraca duży wzrost średniej rocznej temperatury powietrza obserwowany od połowy lat 80. ubiegłego wieku wynoszący około 0,5°C na 10 lat. Średnia roczna intensywność miejskiej wyspy ciepła wynosi niewiele ponad 1,0°C. Coraz częściej obserwowane są fale upałów, a zjawiska fal chłodu występują coraz rzadziej.

Słowa kluczowe: klimat miasta, temperatura powierzchni czynnej, miejska wyspa ciepła, jezioro chłodu, Poznań

Abstract. The article describes the most important results from selected papers concerning the climate of Poznań. The structure of the paper is twofold. The first part presents articles and topics which are based on the data recoded in the Poznań-Ławica airport meteorological station. The second part presents papers where, in addition to data from the airport station, data from the network measurements of municipal stations are also included. This section contains issues concerning the urban heat island, the surface urban heat island, relations between the urban heat island and atmospheric circulation, the characteristics of air temperature and surface temperature according to the Corine Land Cover classification types, as well as information on the creation of a statistical model of air temperature in town according to satellite and *in situ* data derived from municipal station.

Key words: climate of city, boundary layer temperature, urban heat island, cool lake, Poznań

Przegląd prac dotyczących klimatu Poznania

Regularne pomiary temperatury powietrza na obszarze Poznania rozpoczęto w roku 1848. Od tego czasu rośnie liczba prac poświęconych pojedynczym elementom meteorologicznym, jak również prac o charakterze kompleksowym z dziedziny klimatu miasta. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie rezultatów najważniejszych prac zajmujących się klimatem Poznania.

Analizy klimatu Poznania można podzielić na dwie grupy. Pierwsza to opracowania wykonane na podstawie danych z lotniskowej stacji synoptycznej Poznań-Ławica, dotyczące poszczególnych elementów oraz wybranych zjawisk meteorologicznych czy stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Drugą stanowią opracowania, w których oprócz danych ze wspomnianej stacji uwzględniono również pomiary wykonywane w samym mieście, w punktach zlokalizowanych w różnych typach użytkowania terenu. Do szeregu opracowań z grupy

* Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Zakład Klimatologii, ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: marekpol@amu.edu.pl; 1 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2322-9217>

pierwszej zaliczają się następujące prace i tematy badawcze:

- opracowania dotyczące temperatury powietrza w ujęciu wieloletnim (Woś 1992; Tamulewicz, Woś 1994; Kolendowicz i in. 2018),
- analizy występowania dni z burzą oraz wpływu cyrkulacji atmosferycznej na ich występowanie (Kolendowicz 1991, 1992, 1999, 2003, 2007),
- charakterystyka występowania pokrywy śnieżnej oraz obfitych opadów śniegu w przekroju wieloletnim (Bednorz 2013a),
- analiza międzydobowej zmienności opadów atmosferycznych (Tamulewicz 1996),
- badania międzydobowej zmienności temperatury powietrza (Tamulewicz 1998),
- charakterystyka zachmurzenia (Szyga-Pluta 2003, 2009, 2010),
- analiza warunków bioklimatycznych, tj. międzydobowej zmienności ciśnienia atmosferycznego (Półrolniczak 2009; Szyga-Pluta, Półrolniczak 2012),
- badania wpływu cyrkulacji atmosferycznej na występowanie ekstremalnych opadów atmosferycznych (Bernas, Kolendowicz 2013),
- charakterystyki bioklimatu Poznania (Półrolniczak 2010),
- zmienność występowania termicznych pór roku (Woś 1992; Szyga-Pluta 2011)
- analiza koncentracji zanieczyszczeń z uwzględnieniem cyrkulacji i wybranych elementów meteorologicznych (Czernecki i in. 2017).

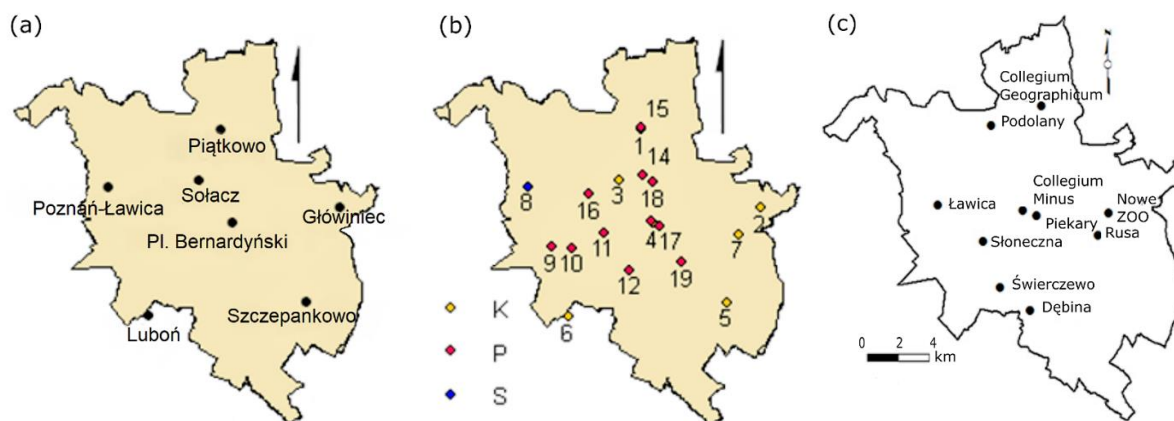
Do drugiej grupy należą opracowania, w których oprócz danych meteorologicznych z Ławicy wykorzystano wartości uzyskane z punktów pomiarowych w mieście. Jedną z pierwszych prób analizy wybranych elementów meteorologicznych z sieci pomiarowej w Poznaniu wykonał Szczerbacki (1967), który na podstawie temperatury powietrza, opadów atmosferycznych, prędkości i kierunku wiatru oraz występowania mgieł z lat 1962–1964 dokonał porównania punktów zlokalizowanych w centrum i na peryferiach miasta (rys. 1a), a także podjął próbę podziału miasta na strefy klimatyczne. W latach 90. XX wieku zespół pod kierunkiem Koczorowskiej (1995) wykonał analizy dotyczące zmienności wybranych elementów meteorologicznych (temperatura i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru). Założona sieć stacji, która funkcjonowała od maja 1992 do kwietnia 1993 roku, obejmowała posterunki, na których wykonywano pomiary stacjonarne, oraz jedenaście punktów pomiarów patrolowych (rys. 1b). Stacją referencyjną była lotniskowa stacja Poznań-Ła-

wica. Wstępne badania porównawcze średniej dobowej temperatury powietrza w rejonie Poznania wykonała Bednorz (2003b). Autorka porównała dane pomiarowe ze stacji Poznań Ławica i Stacji Ekologicznej w Jeziorach zlokalizowanej na obszarze Wielkopolskiego Parku Narodowego w odległości około 20 km od centrum miasta. Dane wykorzystane w opracowaniu dotyczyły krótkiego okresu, od sierpnia 2001 do sierpnia 2002 roku.

W najnowszych opracowaniach autorzy korzystali z danych pochodzących z punktów pomiarowych miejskiej sieci stacji Zakładu Klimatologii UAM założonej w roku 2008 (rys. 1c, tab. 1) Do najnowszych prac dotyczących klimatu miasta należą badania traktujące o miejskiej wyspie ciepła, w których podjęto próbę modelowania temperatury powietrza w mieście na podstawie danych z satelity Landsat 5 (Majkowska i in. 2017; Majkowska-Juskowiak 2018) oraz analizy dotyczące wpływu cyrkulacji atmosferycznej na miejską wyspę ciepła i jezioro chłodu (Półrolniczak i in. 2017). Zagadnieniami dotyczącymi cyrkulacji atmosferycznej i falami upałów i chłodu w mieście zajmowali się Tomczyk i in. (2018) oraz Półrolniczak i in. (2018). Dane wykorzystane w opracowaniach pochodziły z ośmiu punktów sieci pomiarowej Zakładu Klimatologii usytuowanych na obszarze Poznania w różnych typach pokrycia terenu. Zasięg czasowy danych obejmował okres od 2008 do 2016 roku.

Szczegółową analizę trendów temperatury powietrza w Poznaniu wykonaną na podstawie danych pomiarowych z lat 1848–2016 zaprezentował Kolendowicz i in. (2018). Celem badań była również próba zrekonstruowania jednorodnej serii danych średniej miesięcznej temperatury powietrza na podstawie istniejących niehomogenicznych serii pomiarowych z lat 1848–1921. Uzyskane rezultaty pokazują istotny statystycznie wzrost temperatury powietrza w całym badanym okresie wynoszący 1,1°C na 100 lat, a także intensyfikację trendu po roku 1987, wskazującego na zmianę w tempie około 0,5°C na 10 lat.

Z analizy koncentracji zanieczyszczeń pyłowych wykorzystującej dane o stężeniu PM₁₀ w latach 2006–2013 w Poznaniu (Czernecki i in. 2017) wynika, że wpływ na ten typ zanieczyszczenia wywiera miąższość granicznej warstwy atmosfery nad miastem. Duże znaczenie odgrywa również temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne oraz zachmurzenie i prędkość wiatru. Najczęściej dochodzi do przekroczeń dobowej normy zanieczyszczeń przy pogodzie wyżowej, niskiej temperaturze powietrza oraz adwekcji powietrza nad obszar aglomeracji z sektora wschodniego.



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych na terenie Poznania w latach 60. (a – Szczurbacki 1967), 90. (b – Koczorowska, Farat 2006) i w okresie 2008–2018 (c – Majkowska-Juskowiak 2018)

K – posterunki sieci specjalnej, P – punkty pomiarów patrolowych, S – stacja podmiejska, 1 – Piątkowo, 2 – Główniec, 3 – Sołacz, 4 – Pl. Bernardyński, 5 – Szczepankowo, 6 – Luboń, 7 – ZOO, 8 – Poznań-Ławica, 9 – Junikowo, 10 – Kopernika, 11 – Arena, 12 – Wilda, 13 – Park Chopina, 14 – os. Przyjaźni, 15 – os. Batorego, 16 – Jeżyce, 17 – most Rocha, 18 – ul. Winogrady, 19 – Stare Żegrze

Location of measurement points in the area of Poznań in the ‘60s (a – Szczurbacki 1967), the ‘90s (b – Koczorowska, Farat 2006) and over the period 2008–2018 (c – Majkowska-Juskowiak 2018)

K – network of special stations, P – patrol measurement points, S – suburban station, 1–19 – point names as above

Tabela 1

Podstawowe charakterystyki punktów pomiarowych w Poznaniu

Basic characteristics of measurement points in Poznań

Punkt pomiarowy <i>Measurement point</i>	Szerokość geograficzna [N] <i>Latitude [N]</i>	Długość geograficzna [E] <i>Longitude [E]</i>	Odległość od centrum * [km] / kierunek <i>Distance from center / direction</i>	Współczynnik widoku nieba <i>Sky view factor</i>	Typ wg CLC2012 <i>CLC2012 type</i>
Piekary	52°24'19"	16°55'39"	0,0 / –	0,60	Zabudowa miejska zwarta <i>Continuous urban fabric</i>
Collegium Minus	52°24'31"	16°54'53"	0,9 / W	0,71	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Słoneczna	52°23'40"	16°52'29"	3,9 / W	0,81	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Rusa	52°23'29"	16°59'00"	4,0 / E	0,86	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Dębina	52°21'19"	16°54'46"	5,7 / S	0,79	Tereny sportowe i wypoczynkowe <i>Sport and leisure facilities</i>
Ławica	52°24'59"	16°50'04"	6,9 / W	0,99	Lotniska <i>Airports</i>
Collegium Geographicum	52°27'51"	16°56'32"	6,7 / N	0,82	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Podolany	52°27'20"	16°53'29"	7,7 / NW	0,79	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Świerczewo	52°22'10"	16°53'13"	4,5 / S	0,72	Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>
Nowe ZOO	52°24'05"	16°59'45"	4,6 / E	0,63	Lasy liściaste <i>Broad-leaved forest</i>

* za centrum przyjęto punkt pomiarowy Piekary

Wyniki badań pola temperatury w Poznaniu na podstawie wybranych prac

Miejska wyspa ciepła jest najczęściej badanym zjawiskiem z zakresu klimatu miasta. Jednym z pierwszych opracowań traktujących o zjawisku miejskiej wyspy ciepła w Poznaniu jest rozprawa doktorska A. Busiakiewicza (2011). W pracy podano szczegółowej analizie dane z 10 punktów pomiarowych zlokalizowanych na terenie miasta, dla których odniesieniem były wartości temperatury powietrza zmierzone na stacji lotniskowej Poznań-Ławica (rys. 1c). Autorka stwierdziła, że średnia roczna intensywność miejskiej wyspy ciepła (MWC) w Poznaniu wynosi 1°C , a jej maksymalne natężenie uzyskane z pomiarów wykonywanych co godzinę to 7°C . W pracy badano również roczny przebieg średniego natężenia MWC i stwierdzono, że w kwietniu średnie różnice pomiędzy centrum miasta a jego peryferiami są największe. Zauważono także większe zróżnicowanie termiczne MWC w cieplej części roku. Z kolei analiza wartości MWC dla punktów pomiarowych zlokalizowanych w ścisłym centrum miasta wykazała, że w cyklu dobowym natężenie miejskiej wyspy ciepła osiąga największe wartości w porze nocnej. W opisywanej pracy, analiza wyników relacji wybranych elementów meteorologicznych z MWC pozwoliła stwierdzić, że zmniejszenie kontrastów termicznych między miastem a jego peryferiami koreluje z prędkością wiatru i zachmurzeniem. W obu przypadkach wzrost wspomnianych elementów powoduje zmniejszenie MWC.

Związkami pomiędzy MWC, a także tzw. jeziorem chłodu (JC) (sytuacja odwrotna do MWC, tj. niższa temperatura w centrum miasta w porównaniu do jego peryferii) w Poznaniu a cyrkulacją atmosferyczną w obszarze euroatlantyckim zajmowali się Półrolniczak i inni (2017). We wspomnianej pracy na podstawie danych z okresu 2008–2013 dokonano analizy godzinowych danych pomiarowych pochodzących z dwóch stacji miejskich w Poznaniu, tj. Piekary – reprezentującej ściśle centrum miasta oraz stacji lotniskowej Poznań-Ławica – stanowiącej tło pozamiejskie dla MWC i JC. Stwierdzono, że w około 85% przypadków temperatura w centrum miasta jest wyższa niż na jego obrzeżach, jednak w ponad 70% przypadków różnica ta nie przekracza $2,0^{\circ}\text{C}$. Z kolei zjawisko JC występuje z częstością nie przekraczającą 14% w ciągu roku. Analiza sytuacji synoptycznych oraz ich związków z MWC

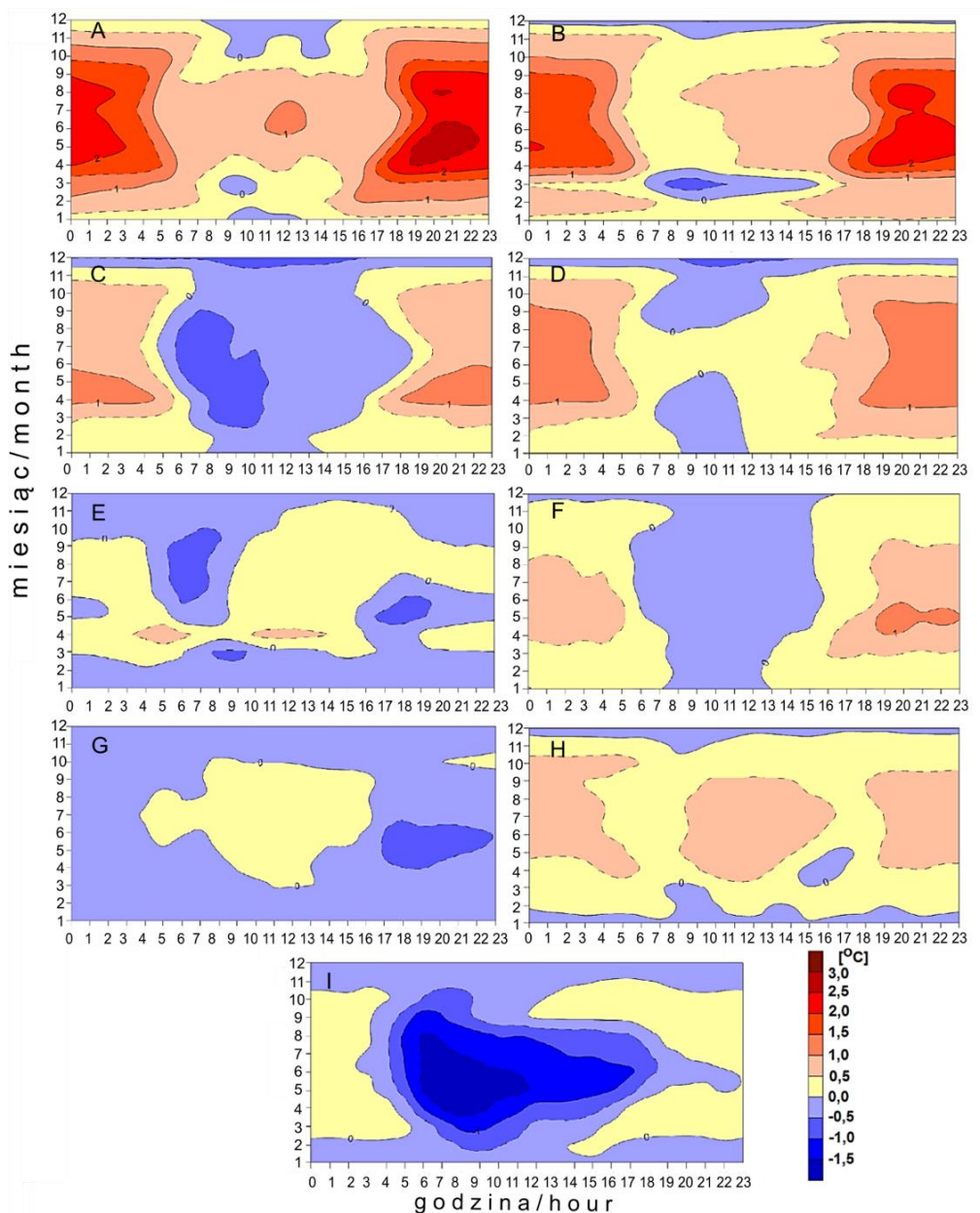
i JC wykazała, że wysoka, zarówno intensywność MWC oraz JC, jest skorelowana z pojawianiem się ośrodków wysokiego ciśnienia atmosferycznego (centrum wyżu lub klin wysokiego ciśnienia) nad obszarem Europy Środkowej.

W pracach dotyczących MWC i JC w Poznaniu autorzy zwracali również uwagę na dobowy i roczny przebieg tego elementu klimatu miasta (Busiakiewicz 2011; Półrolniczak i in. 2017; Majkowska-Juskowiak 2018). Zgodnie z ich ustaleniami dobowy oraz roczny przebieg MWC zarysowuje się najwyraźniej w punktach zlokalizowanych w centrum miasta (Piekary i Collegium Minus), a także na obszarach o zabudowie blokowej (Rusa). Najwyższa średnia intensywność MWC (powyżej $2,5^{\circ}\text{C}$) pojawia się w centrum miasta, w godzinach nocnych od kwietnia do września, a niższe średnie wartości MWC (około $1,5^{\circ}\text{C}$) występują w godzinach od około 17 do 5 UTC (rys. 2A) w okresie od marca do września. Wartościami MWC, na poziomie ok. $1,0^{\circ}\text{C}$, z dwoma maksimumami w roku charakteryzują się punkty pomiarowe Słoneczne i Ławica (rys. 2C, 2F). Z kolei punktem pomiarowym z niską intensywnością MWC, poniżej $1,0^{\circ}\text{C}$, notowaną przez większą część roku z wyjątkiem miesięcy zimowych jest punkt Świerczewo (rys. 2H). W cyklu dobowym i rocznym MWC pojawia się również tzw. zjawisko jeziora chłodu (JC), kiedy temperatura powietrza w obszarach zurbanizowanych jest niższa niż w obszarach wiejskich. W Poznaniu JC obserwuje się w punktach pomiarowych Dębina, Podolany oraz Nowe ZOO (rys. 2E, 2G, 2I). JC z największym natężeniem poniżej $-1,5^{\circ}\text{C}$ pojawia się w Nowym ZOO od marca do sierpnia w godzinach od 6 do 11 UTC.

Próba charakterystyki klimatu Poznania na podstawie danych satelitarnych jest opracowanie dotyczące temperatury powierzchni czynnej (TPC) wykonane przez Majkowską (2015). Autorka na podstawie danych satelitarnych MODIS (ang. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) o rozdzielczości przestrzennej 1 km dokonała charakterystyki warunków termicznych w mieście biorąc pod uwagę wybrane wskaźniki, tj. powierzchni wyspy ciepła, wielkości powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła PMWC, zmienności odchylenia standardowego oraz zakresu. Analiza wykonana w tym opracowaniu objęła łącznie 217 scen, co stanowiło około 15% całości obrazów, które zostały pozyskane dla przyjętego okresu badawczego (wykorzystano 105 scen dla pory dziennej oraz 112 dla pory nocnej). Na jej podstawie ustalono, że:

- średnia wielkość powierzchni wyspy ciepła w Poznaniu to 41,2 km². Wielkość ta zmienia się w zakresie od 24 do 60 km², z tendencją wzrostową zasięgu w porze nocnej;
- średnia wartość PMWC, tj. różnica pomiędzy maksymalną a średnią wartością TPC danej sceny osiąga większe wartości w ciągu dnia (około 3,0°C) niż w nocy (około 2,3°C);

- większa zmienność wartości PMWC, mierzona odchyleniem standardowym (sd – *standard deviation*), występuje w ciągu dnia (sd = 1,4°C) niż w nocy (sd = 1,0°C);
- średnie wartości TPC dla pory dziennej i nocnej są istotnie różne, wynoszą odpowiednio ok. 7,0°C i 4,7°C.



Rys. 2. Średni miesięczny oraz dobowy przebieg intensywności MWC (°C) w punktach pomiarowych w okresie 2009–2016 (Majkowska-Juskowiak 2018)

A – Piekary, B – Collegium Minus, C – Słoneczna, D – Rusa, E – Dębina,
F – Ławica, G – Podolany, H – Świerczewo, I – Nowe ZOO

The average monthly and daily intensity of UHI (Urban Heat Island) at measurement points in the period 2009–2016

A–I explanations same as above

Kontynuacją badań klimatu Poznania na podstawie danych satelitarnych jest opracowanie dotyczące m.in. powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC) wykonane przez Majkowską i in. (2017). Analizie poddano 15 scen z satelity Landsat 5 (rozdzielczość 1 km), dla których obliczono TPC, a także dokonano próby opracowania algorytmu pozwalającego uzyskać rozkład przestrzenny temperatury powietrza na wysokości 2 m nad poziomem gruntu na podstawie TPC. W tym celu wykorzystano zarówno zdjęcia satelitarne, jak i pomiary *in situ* w 10 punktach miasta. Analiza PMWC wykazała, że największe anomalie termiczne powierzchni czynnej na obszarze Poznania osiągają 11,3°C. Do najcieplejszych obszarów w mieście należą tereny zwartej zabudowy śródmiejskiej, a także obszary przemysłowe i lotniska. We wspomnianej pracy, w celu estymacji temperatury powietrza na 2 metrach nad powierzchnią czynną z danych satelitarnych autorzy posłużyli się nieliniowym modelem statystycznym, którego dopasowanie określono współczynnikiem determinacji r^2 równym 0,84. Największa punktowa wartość anomalii na podstawie estymowanej temperatury powietrza na 2 metrach nad powierzchnią czynną osiągnęła 7,3°C.

Kolejnym opracowaniem dotyczącym klimatu Poznania, częściowo kontynuującym zagadnienie miejskiej wyspy ciepła z wykorzystaniem m.in. danych satelitarnych, jest rozprawa doktorska A. Majkowskiej-Juskowiak (2018). W rozprawie, oprócz danych pomiarowych z punktów sieci miejskiej, analizowano dane satelitarne z satelity Landsat serii 5 i 8. W pracy wykorzystano wszystkie dostępne obrazy satelitarne z okresu od 1 stycznia 2009 roku do 31 grudnia 2016 roku (łącznie 28 obrazów satelitarnych), tzn. takie, które spełniały warunki dotyczące możliwości obliczenia temperatury powierzchni czynnej, tj. bezchmurne niebo i brak lub mała prędkość wiatru i przeliczenia tej temperatury do wartości temperatury powietrza na wysokości 2 metrów nad poziomem gruntu. Istnienie wieloletniej serii danych pomiarowych pozyskanych ze stacji sieci miejskiej i pomiarów prowadzonych przez lotniskową stację Poznań-Ławica dotyczących temperatury i wilgotności powietrza oraz zbiór 28 możliwych do wykorzystania obrazów satelitarnych umożliwiło autorce podjęcie próby oszacowania wielu wskaźników dotyczących powierzchniowej wyspy ciepła oraz modelowania temperatury powietrza w mieście na wysokości 2 metrów nad poziomem gruntu. Jak podkreślono w opracowaniu, rezultaty tych analiz odnoszą się do określonej pory doby, uwarunkowanej czasem przelotu satelity nad obszarem badań, a także szczególnego typu pogody,

czyli tzw. pogody radiacyjnej, tj. bezchmurnej z brakiem lub niewielkimi prędkościami wiatru. Uzyskane wyniki dotyczące podstawowych charakterystyk klimatu miasta opisane w omawianej pracy pozwoliły doprecyzować wcześniejsze spostrzeżenia ustalone przez innych autorów, jak również dostarczyły nowych w zakresie TPC i modelowania temperatury powietrza na wysokości 2 metrów nad powierzchnią czynną. Podanie dokładniejszych danych dotyczących podstawowych charakterystyk było możliwe ze względu na dysponowanie dłuższą serią danych oraz przyjęciem innej niż w poprzednich pracach stacji referencyjnej (Poznań-Ławica), czyli punktu pomiarowego zlokalizowanego przy Collegium Geographicum. Jak wykazują analizy w tym punkcie pomiarowym wartości temperatury powietrza są niższe niż na stacji Poznań-Ławica, na co wyraźnie wskazują np. średnie roczne wartości temperatury powietrza (tab. 2). Na podstawie wartości z okresu 2009–2016 stwierdzono, że najcieplejszym miejscem są Piekary, gdzie średnia roczna temperatura powietrza jest wyższa o 1,0°C niż na stacji referencyjnej (Collegium Geographicum). Punktami pomiarowymi o większej średniej rocznej temperaturze powietrza w odniesieniu do stacji tła poza punktem Piekary są: Collegium Minus (0,9°C), Rusa (0,6°C), Świerczewo (0,4°C) oraz Słoneczna i Ławica (0,3°C). Z kolei niższe średnie roczne notowane są w punktach: Podolany (−0,1°C), Dębina (−0,4°C) i Nowe ZOO (−0,7°C).

W pracy Majkowskiej-Juskowiak (2018), w celu scharakteryzowania zróżnicowania warunków termicznych w Poznaniu oszacowano powierzchnię miejską wyspy ciepła (PMWC), na podstawie której powstała mapa anomalii średniego rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni czynnej (TPC_{ANOM}) przedstawiona w formie odchylenia od średniej (rys. 3). Zróżnicowanie przestrzenne TPC_{ANOM} odzwierciedla mozaikę różnych, sąsiadujących ze sobą typów pokrycia terenu. Wartość średnia TPC_{ANOM} dla obszaru badań z wszystkich typów pokrycia terenu to 0,1°C. Wyraźnie niższe wartości TPC_{ANOM} pojawiają się jako jeziora chłodu w obszarach leśnych i zbiorników wodnych, jednak znaczna część miasta charakteryzuje się anomaliami dodatnimi (rys. 3). Największa dodatnia anomalia termiczna TPC_{ANOM} osiąga 12,1°C, natomiast największa ujemna to −6,6°C.

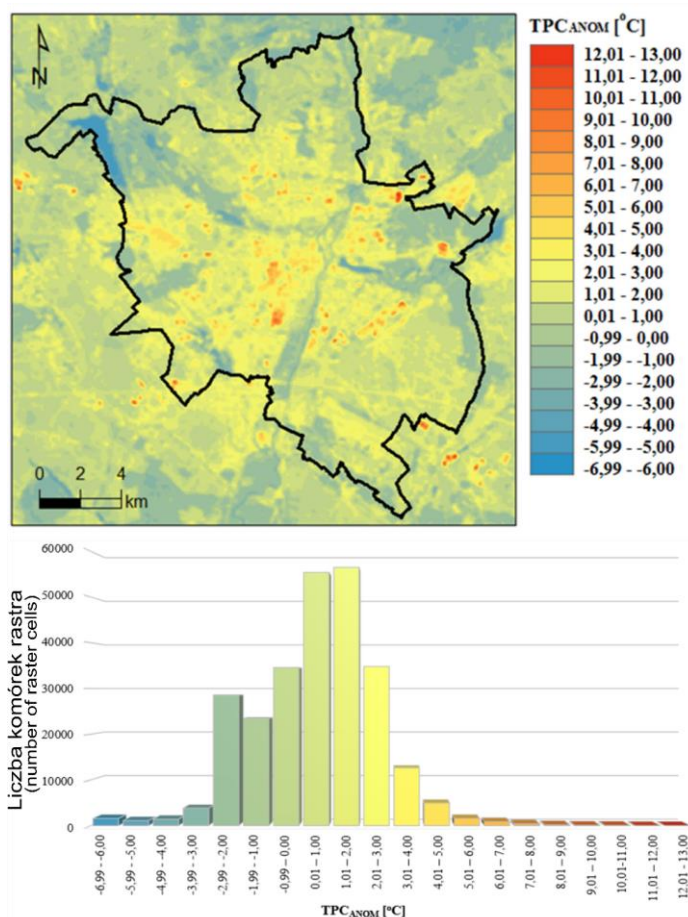
Analiza wartości TPC_{ANOM} na podstawie histogramu (rys. 3) wskazuje na przewagę obszarów z anomaliami dodatnimi (7 kategorii ujemnych i 13 dodatnich), w których największą powierzchnię zajmują obszary o wartościach w przedziałach: 0,01–1,00°C oraz 1,01–2,00°C. Ogólnie, dodatnie wartości TPC_{ANOM} stanowią ponad połowę powierzchni

Tabela 2

Średnia roczna temperatura powietrza (°C) w punktach pomiarowych w Poznaniu w latach 2009–2016
(Majkowska-Juskowiak 2018)

Average annual air temperature (°C) at measurement points in Poznań in the period 2009–2016
(Majkowska-Juskowiak 2018)

Punkt pomiarowy <i>Measurement point</i>	Rok <i>Year</i>								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2009–2016
Piekary	10,1	8,8	10,7	8,6	10,3	11,2	11,8	10,7	10,3
Collegium Minus	10,0	8,7	10,6	8,9	10,6	10,9	11,1	10,5	10,2
Słoneczna	9,3	8,0	9,8	9,2	10,0	10,2	10,5	9,9	9,6
Rusa	9,5	8,2	10,1	9,5	10,3	10,6	10,8	10,2	9,9
Ławica	9,3	8,0	9,9	9,3	9,2	10,6	10,5	9,9	9,6
Collegium Geographicum	9,2	7,7	9,6	9,0	8,9	10,3	10,3	9,6	9,3
Podolany	9,0	7,7	9,5	8,4	8,8	10,2	10,1	9,5	9,2
Świerczewo	9,4	8,0	9,8	9,4	9,4	10,7	10,7	10,0	9,7
Dębina	9,1	7,8	9,5	7,1	7,6	10,3	10,3	9,8	8,9
ZOO	8,7	7,4	9,2	8,7	8,9	bd	bd	bd	8,6



Rys. 3. Poznań – zróżnicowanie przestrzenne oraz histogram wartości anomalii temperatury powierzchni czynnej TPC_{ANOM}

Dane na podstawie wybranych zdjęć satelitarnych z lat 2008–2016 (Majkowska-Juskowiak 2018)

Poznań – spatial variability and a histogram of anomaly values of the active surface temperature TPC_{ANOM}

Data based on selected satellite images from the period 2008–2016 (Majkowska-Juskowiak 2018)

badanego obszaru, tj. 63,9%, jednak większość (60,8%) powierzchni to obszary o wartości TPC_{ANOM} nie przekraczające $4,0^{\circ}C$. Bardzo duże i małe wartości TPC_{ANOM} pojawiają się punktowo i z najmniejszym udziałem w ogólnej liczbie komórek rastra, np. dla anomalii powyżej $10^{\circ}C$ łączna liczba pikseli wynosi 10, co stanowi zaledwie 0,003% powierzchni Poznania.

Badania nad temperaturą powierzchni czynnej w pracy Majkowskiej-Juskowiak (2018) odnie-

siono również do klas pokrycia terenu wg Corine Land Cover 2012 (CLC2012). Na podstawie wartości średnich TPC_{ANOM} w granicach wyznaczonych zgodnie z CLC2012 ustalono, że dla 9 klas pokrycia terenu średnie wartości TPC_{ANOM} przyjmują wartości dodatnie, natomiast dla 11 typów średnie TPC_{ANOM} jest ujemne. Najcieplejszymi obszarami w Poznaniu są obszary zajęte przez zabudowę zwartą, miejsca budowy a także tereny przemysłowe lub handlowe (tab. 3), dla których średnie

Tabela 3

Poznań – średnia, maksymalna i minimalna oraz odchylenie standardowe TPC_{ANOM} ($^{\circ}C$) wg Corine Land Cover 2012 (Majkowska-Juskowiak 2018)

Poznań – average, maximal, minimal and standard deviation of TPC_{ANOM} ($^{\circ}C$) according to the Corine Land Cover 2012 types (Majkowska-Juskowiak 2018)

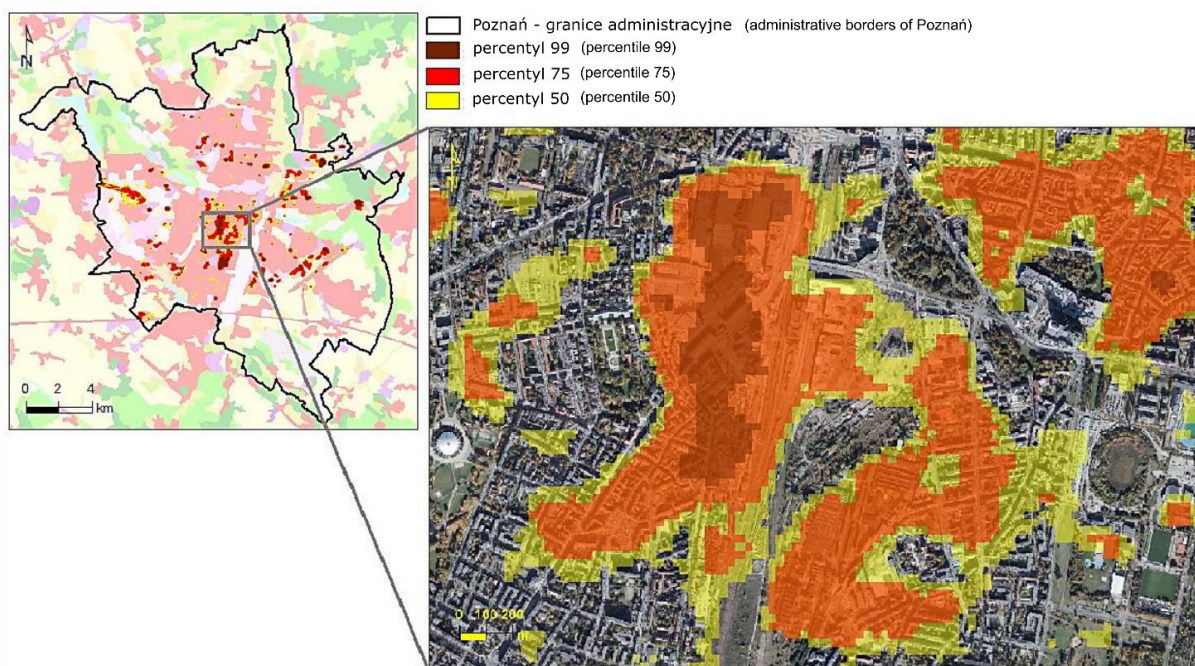
Typ CLC2012 <i>CLC2012 type</i>	Minimum <i>Minimum ($^{\circ}C$)</i>	Maksimum <i>Maximum ($^{\circ}C$)</i>	Średnia <i>Average ($^{\circ}C$)</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>
Zabudowa miejska zwarta <i>Continuous urban fabric</i>	1,4	5,8	3,6	0,8
Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>	-4,1	9,3	1,7	1,2
Tereny przemysłowe lub handlowe <i>Industrial or commercial units</i>	-2,8	12,1	2,9	2,0
Tereny komunikacyjne <i>Road and rail networks and associated land</i>	-1,8	10,3	2,5	1,3
Lotniska <i>Airports</i>	-2,1	4,7	2,3	1,1
Miejsca budowy <i>Construction sites</i>	1,7	3,9	3,2	0,5
Tereny zielone <i>Green urban areas</i>	-3,2	4,1	-0,6	1,6
Tereny sportowe i wypoczynkowe <i>Sport and leisure facilities</i>	-4,5	4,5	-0,1	1,5
Grunty orne <i>Non-irrigated arable land</i>	-3,3	3,3	0,4	0,8
Łąki, pastwiska <i>Pastures</i>	-4,8	5,5	-0,3	1,3
Złożone systemy upraw i działek <i>Complex cultivation patterns</i>	-4,2	6,0	0,5	1,2
Tereny zajęte głównie przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej <i>Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation</i>	-4,8	6,2	-0,5	1,5
Lasy liściaste <i>Broad-leaved forest</i>	-4,9	2,3	-2,0	0,8
Lasy iglaste <i>Coniferous forest</i>	-4,1	1,2	-2,1	0,8
Lasy mieszane <i>Mixed forest</i>	-4,7	2,3	-2,0	1,0
Murawy i pastwiska naturalne <i>Natural grasslands</i>	-0,8	-0,7	-0,8	0,0
Lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian <i>Transitional woodland-shrub</i>	-2,6	1,4	-0,5	0,6
Roślinność rozproszona <i>Sparsely vegetated areas</i>	0,1	1,3	0,6	0,4
Bagna śródlądowe <i>Inland marshes</i>	-3,8	0,2	-2,3	0,8
Zbiorniki wodne <i>Water bodies</i>	-6,6	1,5	-4,9	1,5

Dane na podstawie wybranych zdjęć satelitarnych z lat 2008–2016
Data based on selected satellite images from the period 2008–2016

wartości TPC_{ANOM} to odpowiednio: $3,6^{\circ}C$, $3,2^{\circ}C$, $2,9^{\circ}C$. Obszarami o najniższych wartościach TPC_{ANOM} są z kolei zbiorniki wodne ($-4,9^{\circ}C$), bagna śródlądowe ($-2,3^{\circ}C$) oraz lasy iglaste ($-2,1^{\circ}C$).

Na podstawie analizy 28 zdjęć satelitarnych ustalono, że średni obszar zajmowany przez powierzchnię wyspę ciepła w Poznaniu osiąga $32,1 \text{ km}^2$, co stanowi 12,3% powierzchni miasta (Majkowska-Juskowiak 2018). Największy zasięg przestrzenny PMWC wystąpił 15 lipca 2011 roku i osiągnął ponad 43 km^2 , co stanowi 16,6% obszaru Poznania, a najmniejszy, tj. $17,8 \text{ km}^2$ (6,8%) zanotowano 15 maja 2013 roku. Analiza sezonowa powierzchniowej wyspy ciepła wyka-

zała, że największy obszar zajmuje ona latem ($35,8 \text{ km}^2$) i jesienią ($35,3 \text{ km}^2$). Średni obszar zajmowany przez PMWC dla wiosny to $23,5 \text{ km}^2$, a zimą $28,3 \text{ km}^2$. Rys. 4 pokazuje rozkład przestrzenny powierzchni wyspy ciepła uzyskany z sumowanych obszarów o TPC większej niż wartość średniej plus odchylenie standardowe dla 28 obrazowań satelitarnych. Wyróżnione w ten sposób obszary wskazują miejsca sprzyjające kumulacji energii cieplnej, w których tworzą się „ogniska” PMWC. Dla 50. percentyla wartości anomalii TPC obszar PMWC wynosi $17,8 \text{ km}^2$, dla 75. jest to $10,4 \text{ km}^2$, a dla 99. – $1,5 \text{ km}^2$.



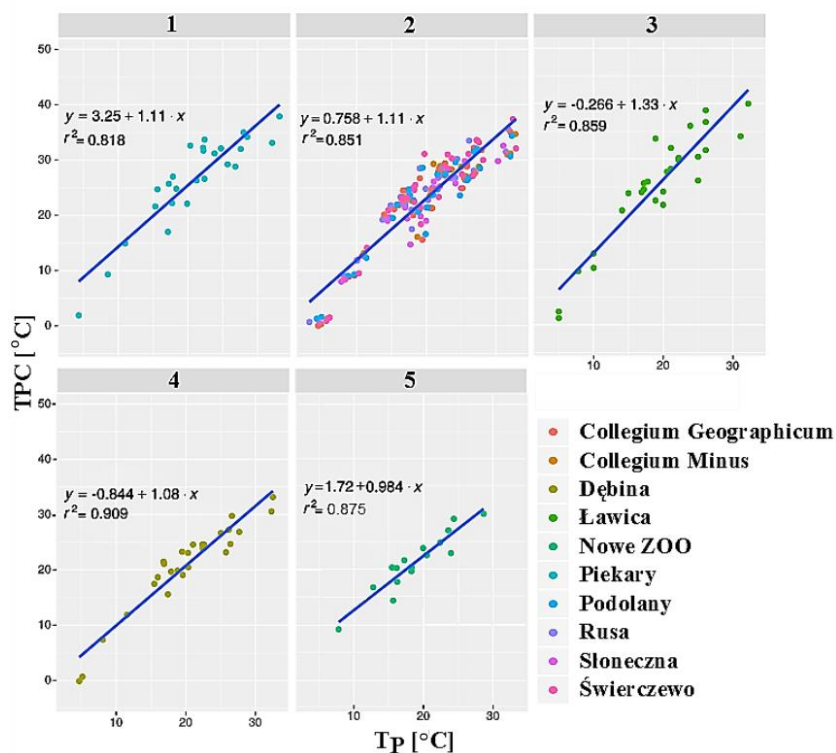
Rys. 4. Przykład obszaru o największym kontraście termicznym w Poznaniu na podstawie przestrzennego rozkładu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC) (Majkowska-Juskowiak 2018)

Example of an area with the highest thermal contrast in Poznań based on the spatial distribution of the Surface Urban Heat Island (SUHI) (Majkowska-Juskowiak 2018)

Modelowanie temperatury powietrza w mieście

Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, badanie klimatu miasta w Poznaniu obejmowało również próby szacowania temperatury powietrza na podstawie obliczonych ze zdjęć satelitarnych wartości temperatury powierzchni czynnej (TPC) i temperatury powietrza z punktów pomiarowych *in situ* (Majkowska-Juskowiak 2018). Do szacowania temperatury powietrza wykorzystano łącznie 6 modeli regresji liniowej, które powstały dzięki zastosowaniu 5-krotnej walidacji krzyżo-

wej. Ostatecznie, wykorzystując dane z punktów pomiarowych, zbudowano jeden wspólny model dla 5 typów pokrycia terenu oraz osobne modele dla każdego z następujących typów: 1) zabudowa miejska zwarta – na podstawie temperatury powietrza z punktu Piekary, 2) zabudowa miejska rozproszona – na podstawie pomiarów z: Collegium Minus, Rusa, Słoneczna, Collegium Geographicum, Podolany, Świerczewo, 3) lotniska – Ławica, 4) tereny sportowe i wypoczynkowe – na podstawie danych z Dębiny oraz 5) lasy liściaste – na podstawie temperatury powietrza w punkcie Nowe ZOO. Szczegółowe parametry i statystyki modeli pokazuje rys. 5 i tab. 4.



Rys. 5. Wykresy rozrzutu temperatury powierzchni czynnej (TPC) i temperatury powietrza w danej lokalizacji (Tp) dla poszczególnych typów pokrycia terenu (Majkowska-Juskowiak 2018)

1 – zabudowa miejska zwarta; 2 – zabudowa miejska rozproszona; 3 – lotniska;
4 – tereny sportowe i wypoczynkowe; 5 – lasy liściaste

Scatterplots of land surface temperature (LST) and air temperature at measurement points according to types of land cover (Majkowska-Juskowiak 2018)

1 – compact urban development; 2 – dispersed urban development; 3 – airport;
4 – sports and leisure areas and 5 – deciduous forests

Tabela 4

Parametry modeli statystycznych do estymacji temperatury powietrza w różnych typach użytkowania terenu (Majkowska-Juskowiak 2018)

Parameters of statistical models used for air temperature estimation in various types of land use (Majkowska-Juskowiak 2018)

Typ wg CLC2012 <i>Type according to CLC2012</i>	Współczynnik kierunkowy regresji <i>Slope of regression model</i>	Wyraz wolny <i>Intercept coefficient</i>	Współczynnik korelacji <i>Correlation coefficient</i>	Średni błąd bezwzględny <i>Mean absolute error</i>	Średni błąd kwadratowy <i>Root mean squared error</i>
Zabudowa miejska zwarta <i>Continuous urban fabric</i>	0,74	1,42	0,90	2,39	2,85
Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>	0,76	2,41	0,92	2,17	2,63
Lotniska <i>Airports</i>	0,65	2,87	0,93	2,04	2,59
Tereny sportowe i wypoczynkowe <i>Sport and leisure facilities</i>	0,84	2,53	0,95	1,76	2,10
Lasy liściaste <i>Broad-leaved forest</i>	0,89	0,83	0,94	1,42	1,74
Łącznie dla wszystkich typów pokrycia terenu <i>Total for all types</i>	0,73	3,00	0,91	2,26	2,81

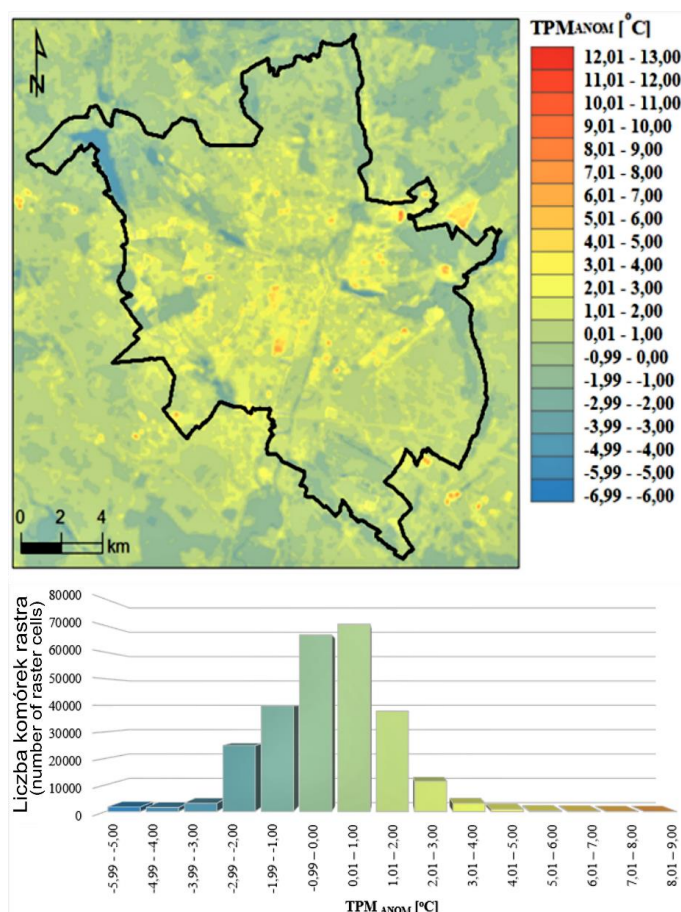
Najlepsze dopasowanie modelu do danych pomiarowych zgodnie z wartością współczynnika determinacji dotyczy terenów sportowych i wypoczynkowych (0,90), a najmniejsze obszarów o zwartej zabudowie śródmiejskiej (0,81). Współczynnik determinacji dla wszystkich danych (wszystkie typy terenu łącznie) wynosi 0,82.

Na podstawie stworzonych modeli możliwe było obliczenie średniej anomalii temperatury powietrza w mieście. Estymowana temperatura powietrza z danych satelitarnych i pomiarowych (TPM) została pokazana jako mapa anomalii (TPM_{ANOM} – rys. 6). TPM_{ANOM} to uśredniony rozkład różnic dla 28 zobrażeń satelitarnych przeliczonych za pomocą modeli statystycznych do temperatury powietrza. Maksymalna i minimalna wartość TPM_{ANOM} dla wszystkich typów pokrycia terenu to odpowiednio 8,7°C i -5,3°C, natomiast średnia wynosi -0,4°C.

Największą powierzchnię w mieście zajmują obszary z TPM_{ANOM} w zakresach 0,01–1,00°C oraz

-0,99–0,00°C. Przeważają obszary z wartościami ujemnymi, a wartości dodatnie TPM_{ANOM} powyżej 0,01°C zajmują mniej niż połowę powierzchni miasta, tj. 47,5%. Duże wartości TPM_{ANOM} > 7°C występują na niewielkim obszarze i stanowią 0,02% powierzchni Poznania.

Średnie wartości TPM_{ANOM} dla klas pokrycia terenu CLC2012 wskazują, że najcieplejszymi obszarami w mieście w ciągu dnia są: miejsca budowy, tereny przemysłowe lub handlowe, tereny komunikacyjne oraz tereny sportowe i wypoczynkowe (tab. 5), w których TPM_{ANOM} to odpowiednio: 1,8°C, 1,6°C, 1,3°C i 1,3°C. Wartość TPM_{ANOM} w obszarach zabudowy śródmiejskiej zwartej osiąga średnią na poziomie 0,9°C, a w obszarach zabudowy miejskiej rozproszonej 0,8°C. Obszary z najniższą średnią wartością TPM_{ANOM} to zbiorniki wodne (-4,0°C), bagna śródlądowe (-2,1°C) oraz lasy iglaste i mieszane (-1,9°C).



Rys. 6. Poznań – różnicowanie przestrzenne oraz histogram wartości anomalii estymowanej temperatury powietrza TPM_{ANOM} (Majkowska-Juskowiak 2018)

Poznań – spatial variability and a histogram of anomaly values of the active surface temperature TPM_{ANOM} (Majkowska-Juskowiak 2018)

Poznań – średnia, maksymalna i minimalna oraz odchylenie standardowe TPM_{ANOM} (°C)
wg Corine Land Cover 2012 (Majkowska-Juskowiak 2018)

Poznań – average, maximal, minimal and standard deviation of TPM_{ANOM} (°C)
according to Corine Land Cover 2012 types (Majkowska-Juskowiak 2018)

Typ CLC2012 <i>CLC2012 type</i>	Minimum <i>Minimum (°C)</i>	Maksimum <i>Maximum (°C)</i>	Średnia <i>Average (°C)</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>
Zabudowa miejska zwarta <i>Continuous urban fabric</i>	-1,3	2,7	0,9	0,7
Zabudowa miejska rozproszona <i>Discontinuous urban fabric</i>	-4,3	6,7	0,8	1,0
Tereny przemysłowe lub handlowe <i>Industrial or commercial units</i>	-2,2	8,8	1,6	1,5
Tereny komunikacyjne <i>Road and rail networks and associated land</i>	-2,4	6,5	1,3	0,9
Lotniska <i>Airports</i>	-3,2	1,5	-0,8	0,8
Miejsca budowy <i>Construction sites</i>	0,5	2,4	1,8	0,5
Tereny zielone <i>Green urban areas</i>	-3,7	2,6	-0,9	1,2
Tereny sportowe i wypoczynkowe <i>Sport and leisure facilities</i>	-3,5	5,4	1,3	1,3
Grunty orne <i>Non-irrigated arable land</i>	-2,9	1,9	-0,2	0,7
Łąki, pastwiska <i>Pastures</i>	-4,1	3,4	-0,7	1,0
Złożone systemy upraw i działek <i>Complex cultivation patterns</i>	-3,9	4,4	-0,1	0,9
Tereny zajęte głównie przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej <i>Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation</i>	-3,5	4,2	-0,8	1,2
Lasy liściaste <i>Broad-leaved forest</i>	-4,4	2,6	-1,1	0,8
Lasy iglaste <i>Coniferous forest</i>	-3,1	0,9	-1,9	0,6
Lasy mieszane <i>Mixed forest</i>	-3,0	1,9	-1,9	0,7
Murawy i pastwiska naturalne <i>Natural grasslands</i>	-0,4	-0,3	-0,4	0,0
Lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian <i>Transitional woodland-shrub</i>	-2,2	0,5	-0,7	0,5
Roślinność rozproszona <i>Sparsely vegetated areas</i>	-0,2	0,6	0,0	0,5
Bagna śródlądowe <i>Inland marshes</i>	-3,6	-0,2	-2,1	0,7
Zbiorniki wodne <i>Water bodies</i>	-5,2	1,7	-4,0	1,3

Podsumowując stan badań klimatu Poznania stwierdzić należy, że autorzy opublikowanych do tej pory prac zajmowali się szerokim spektrum tematów. W szczególności, najważniejsze prace dotyczyły następujących zagadnień:

- zmian średniej miesięcznej temperatury powietrza w okresie 1848–2016 z uwzględnieniem trendów dla wartości średnich rocznych i sezonowych oraz zmienności wielkości trendów temperatury powietrza w krótszych okresach

badanego wielolecia ze szczególnie intensywnym trendem dodatnim w ostatnich latach,

- natężenia miejskiej wyspy ciepła, którą badano na podstawie danych satelitarnych i danych *in situ*.

W znacznej liczbie prac badano wpływ cyrkulacji atmosferycznej na wybrane elementy meteorologiczne, tj. wielkość opadów, aktywność burzową, występowanie pokrywy śnieżnej, zachmurzenie, występowanie fal upałów i chłodu,

warunków bioklimatycznych oraz stan aerosanitarny miasta.

W przyszłości przewiduje się kontynuację badań zjawiska miejskiej wyspy ciepła w nawiązaniu do podziału obszaru miasta opartego na lokalnych strefach klimatu (ang. *local climate zones*) oraz prognozy zmian temperatury na obszarze aglomeracji w perspektywie czasowej do 2100 roku. Ponadto kontynuowane będą badania stanu aerosanitarnego w pionowych profilach atmosfery nad miastem przy wykorzystaniu pomiarów z UAV (*unmanned aerial vehicle*) oraz przejazdów patrolowych.

Literatura

- Bednorz E. 2003a. Snow cover in Poznań in the winters of 1990–1999. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 310-320.
- Bednorz E. 2003b. Wstępne porównanie średniej dobowej temperatury powietrza dwóch stacji meteorologicznych w rejonie Poznania. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 54: 21-25.
- Bednorz E. 2013. Heavy snow in Polish–German lowlands–Large-scale synoptic reasons and economic impacts. *Weather and Climate Extremes* 2: 1-6.
- Bernas M., Kolendowicz L. 2013. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie ekstremalnych opadów w Poznaniu w latach 1920–2010. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 64: 7-27.
- Busiakiewicz A. 2011. Dynamika miejskiej wyspy ciepła na obszarze Poznania w świetle wybranych elementów meteorologicznych. Rozprawa doktorska – manuskrypt, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Czernecki B., Półrolniczak M., Kolendowicz L., Marosz M., Kendzierski S., Pilgaj N. 2017. Influence of the atmospheric conditions on PM10 concentrations in Poznań, Poland. *Journal of Atmospheric Chemistry* 74, 1: 115-139.
- Koczorowska R. 1995. Rozkład podstawowych parametrów meteorologicznych w wybranych punktach Poznania. *Gazeta Obserwatora IMGW* 44, 1: 10.
- Koczorowska R., Farat R. 2006. Specyfika warunków termicznych i wiatrowych aglomeracji poznańskiej (The specificity of thermal and wind condition of Poznań agglomeration). IMGW, Poznań.
- Kolendowicz L. 1991. Wpływ typów cyrkulacji atmosfery wg klasyfikacji B. Osuchowskiej-Klein na pojawienie się burz w Poznaniu w latach 1954–1965. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 42: 133-150.
- Kolendowicz L. 1992. Typy cyrkulacji atmosfery a występowanie dni z burzą w Poznaniu w latach 1951–1990. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 44: 103-114.
- Kolendowicz L. 1999. Zmniejszenie częstości dni z burzą na przełomie czerwca i lipca w Poznaniu w latach 1961–1990. *Przegląd Geofizyczny* XLIV, 1-2: 73-78.
- Kolendowicz L. 2003. Variability of thunderstorm activity in Poznań. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 335-346.
- Kolendowicz L. 2007. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie dni z burzą w Poznaniu w latach 1951–2000. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 58: 81-89.
- Kolendowicz L., Czernecki B., Półrolniczak M., Taszarek M., Tomczyk A.M., Szyga-Pluta K. 2018. Homogenization of air temperature and its long-term trends in Poznań (Poland) for the period 1848–2016. *Theoretical and Applied Climatology*: 1-14.
- Majkowska A. 2015. Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła w Poznaniu w 2014 roku przy wykorzystaniu danych satelitarnych MODIS. Praca dyplomowa – Studium Podyplomowe Geoinformacja, manuskrypt.
- Majkowska A., Kolendowicz L., Półrolniczak M., Hauke J., Czernecki B. 2017. The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM. *Theoretical and Applied Climatology* 128, 3-4: 769-783.
- Majkowska-Juskowiak A. 2018. Estymacja wpływu pokrycia terenu na rozkład temperatury powierzchni czynnej i powietrza w Poznaniu na podstawie danych satelitarnych Landsat oraz danych pomiarowych. Rozprawa doktorska – manuskrypt, WNGiG, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Półrolniczak M. 2009. Międzydobowe zmiany ciśnienia atmosferycznego w Poznaniu na tle cyrkulacji atmosferycznej. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 60: 115-132.
- Półrolniczak M. 2010. Bioklimat Poznania na tle mechanicznych bodźców biometeorologicznych w latach 1951–2000. W: E. Bednorz, L. Kolendowicz (red.) *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 107-119.
- Półrolniczak M., Kolendowicz L., Majkowska A., Czernecki B. 2017. The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznań, Poland.

- Theoretical and Applied Climatology* 127, 3-4: 611-125.
- Półrolniczak M., Tomczyk A.M., Kolendowicz L. 2018. Thermal conditions in the city of Poznań (Poland) during selected heat waves. *Atmosphere* 9 (1), 11: 1-15.
- Szczerbacki M. 1967. Klimat miasta Poznania. W: J. Jankowiak (red.) *Zagadnienia klimatu i warunków higienicznych na obszarze Poznania i strefy podmiejskiej*. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk. Komisja Upowszechniania Nauki, Poznań: 11-46
- Szyga-Pluta K. 2003. Cloud types in Kołobrzeg, Poznań and Wieluń in the months with the lowest and highest cloudiness. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 304-309.
- Szyga-Pluta K. 2009. Typy cyrkulacji atmosfery a rodzaje chmur w Poznaniu. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 60: 133-145.
- Szyga-Pluta K. 2010. Zachmurzenie w Moskwie i w Poznaniu W: L. Kolendowicz (red.) *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki cyrkulacyjne i radiacyjne*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 157-170.
- Szyga-Pluta K. 2011. Zmienność termicznych pór roku w Poznaniu. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 62: 181-195.
- Szyga-Pluta K., Półrolniczak M. 2012. Międzydobowe zmiany ciśnienia atmosferycznego w Poznaniu na tle typów cyrkulacji GWL (Grosswetterlagen). *Przegląd Geograficzny* 84, 3: 423-435.
- Tamulewicz J. 1996. Poznańska seria opadów atmosferycznych w świetle wskaźnika kontynentalizmu pluwiального. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 47: 115-126.
- Tamulewicz J. 1998. Stosunki termiczne Poznania w świetle międzydobowych zmian temperatury powietrza. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 49: 195-203.
- Tamulewicz J., Woś A. 1994. Zmiany cech stosunków termicznych powietrza w Poznaniu w przekroju wieloletnim (1848–1990). *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 45: 93-103.
- Tomczyk A.M., Półrolniczak M., Kolendowicz L. 2018. Cold waves in Poznań (Poland) and thermal conditions in the city during selected cold waves. *Atmosphere* 9 (6), 208: 1-13.
- Woś A. 1992. Temperatura powietrza poszczególnych pór roku w Poznaniu w przekroju wieloletnim. *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 44: 177-183.

Summary

To sum up the research concerning the state of climate in Poznań, we can state that the authors of reviewed articles dealt with a wide range of topics. In particular, the most important works included the following issues:

- changes in the average monthly air temperature in the period 1848–2016, including trends for annual and seasonal averages and variations of shorter-term air temperature trends in the multi-year period studied, with a particularly intense positive trend in recent years,
- the intensity of the urban heat island, which was examined on the basis of satellite and in-situ data;

In a significant number of works, the influence of atmospheric circulation on selected meteorological elements, i.e. precipitation, thunderstorm activity, snow cover, cloudiness, heat and cold waves occurrence, bioclimatic and aerosanitary conditions, were investigated.

In the future, the study of the urban heat island phenomenon is expected to establish a division of the city area based on local climate zones and forecasts of temperature changes in the agglomeration in the 2100 time horizon. In addition, investigation of aerosanitary conditions will be continued by using the UAV (unmanned aerial vehicle) (vertical concentration of pollution) and by patrol measurements in the streets of the city.