

3b. The thermal conditions in Radom determined based on the satellite data and sub-urban measurements of air temperature

Projekt LIFE14CCA/PL/000101 Adaptacja do zmian klimatu poprzez zrównoważoną gospodarkę wodą w przestrzeni miejskiej Radomia jest współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Instrumentu Finansowego LIFE oraz Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Warszawie

Warunki termiczne w Radomiu określone za pomocą danych satelitarnych oraz pozamiejskich pomiarów temperatury powietrza

Autor: mgr inż. Lech Gawuć

Warszawa, lipiec-sierpień 2016

Spis treści

1. Wprowadzenie	3
1.1. Dane	3
1.2. Metodyka.....	5
1.3. Uwagi dotyczące ograniczeń interpretacyjnych obranego podejścia badawczego	6
2. Wyniki.....	8
2.1 Zmienność średniej temperatury powierzchni w Radomiu oraz pozamiejskiej temperatury powietrza w okresie 06.2015-06.2016	8
2.2. Analiza zmienności czasowej PMWC w Radomiu w okresie 06.2015-06.2016	10
2.3 Rozkład przestrzenny temperatury powierzchni (LST) określony za pomocą zobrażeń satelitarnych MODIS.....	13
2.3.1. Rozkład przestrzenny LST w przypadku temperatury powietrza wynoszącej 0°C, 10°C, 20°C i 30°C.	13
2.3.2. Lokalizacja skrajnych (najwyższych i najniższych) temperatur powierzchni w Radomiu w okresie 06.2015-06.2016, 2 przypadki: noc i dzień	20
2.3.3. Zmienność rozkładu LST w ścisłym centrum miasta	24
2.4. Warunki termiczne w Radomiu określone za pomocą zobrażeń satelitarnych ASTER o wysokiej rozdzielczości przestrzennej.	26
3. Podsumowanie i wnioski	32
Literatura.....	33
Lista załączników.....	34

1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy jest określenie warunków termicznych na obszarze miasta Radomia w zakresie opisu rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni oraz intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC).

Kiedy temperatura powietrza jest niższa niż temperatura powierzchni, powietrze jest ogrzewane na drodze konwencyjnej przez powierzchnię Ziemi. Proces ten może być szczególnie intensywny w miastach, ze względu na duże zagęszczenie materiałów budowlanych takich jak beton czy asfalt, które nagrzewają się silniej niż powierzchnie naturalne. To prowadzi do powstawania osobowości klimatycznych na terenach zurbanizowanych, przede wszystkim do tzw. miejskiej wyspy ciepła (MWC). Zjawisko to jest definiowane jako różnica w temperaturze powietrza pomiędzy terenem miejskim i pozamiejskim (Oke 1982). Mieszkańcy terenów zurbanizowanych są wrażliwi na temperaturę powietrza, która nie jest tożsama z temperaturą powierzchni. Nie mniej, w Radomiu nie istnieje odpowiednio gęsta sieć pomiarowa temperatury powietrza, stąd zastosowanie danych satelitarnych w niniejszej pracy było konieczne. Sensory instrumentów satelitarnych są zdolne do rejestracji temperatury powierzchni ziemi (ang. *land surface temperature* - LST). W odniesieniu do LST, w literaturze fachowej stosowany jest termin powierzchniowa miejska wyspa ciepła (PMWC), której definicja jest analogiczna do MWC (Voogt i Oke 2003, Oke 1995).

Struktura niniejszego dokumentu jest następująca: podrozdział 1.1 jest poświęcony opisowi danych jakie zostały wykorzystane w badaniach, w podrozdziale 1.2 została opisana metodyka badań. Kolejny rozdział – 2. opis wyników – jest podzielony na następujące podrozdziały: 2.1 oraz 2.2 są poświęcone wynikom analiz zmienności czasowej: temperatury powietrza mierzonej za miastem, średniej temperatury powierzchni w mieście oraz intensywności PMWC wyznaczonej za pomocą trzech wskaźników. Opis analiz rozkładu przestrzennego LST w Radomiu przy wykorzystaniu obrazów satelitarnych MODIS jest zamieszczony w podrozdziale 2.3, przy wykorzystaniu obrazów ASTER w podrozdziale 2.4. W rozdziale 3-cim jest zamieszczone podsumowanie oraz wnioski końcowe.

1.1. Dane

W celu przeprowadzenia badań pozyskano wszystkie dostępne zobrazenia satelitarne zarejestrowane przez instrument MODIS (ang. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) w okresie od czerwca 2015 do czerwca 2016 (ponad 2000 obrazów) oraz wszystkie dostępne zobrazenia instrumentu ASTER (ang. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) zarejestrowane w okresie sierpień 2000 - czerwiec 2016 (55 obrazów) dla obszaru Radomia. W paśmie podczerwieni termalnej rozdzielczość przestrzenna instrumentu MODIS wynosi 1 km i 90 m w przypadku instrumentu ASTER. Czas rewizyty MODIS to ok. 12 godzin oraz 16 dni dla ASTER. Zobrazenia MODIS są rejestrowane bez przerwy 24 h na dobę, natomiast ASTER jest sensorem uruchamianym tylko na zamówienie. To sprawia, że ilość dostępnych danych z tych sensorów jest różna. W związku z powyższym, instrument MODIS jest odpowiednim narzędziem do analizy zmienności czasowej LST w skali dzielnic bądź całego miasta (z niską rozdzielczością przestrzenną). Natomiast ASTER jest odpowiedni do szczegółowej analizy rozkładu LST w mieście z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Ze względu na małą ilość dostępnych zobrażeń, nie jest możliwe badanie zmienności czasowej LST w Radomiu za pomocą obrazów ASTER.

Instrument MODIS znajduje się w dwóch egzemplarzach na pokładzie satelitów AQUA oraz TERRA, natomiast sensor ASTER znajduje się w jednym egzemplarzu na pokładzie satelity

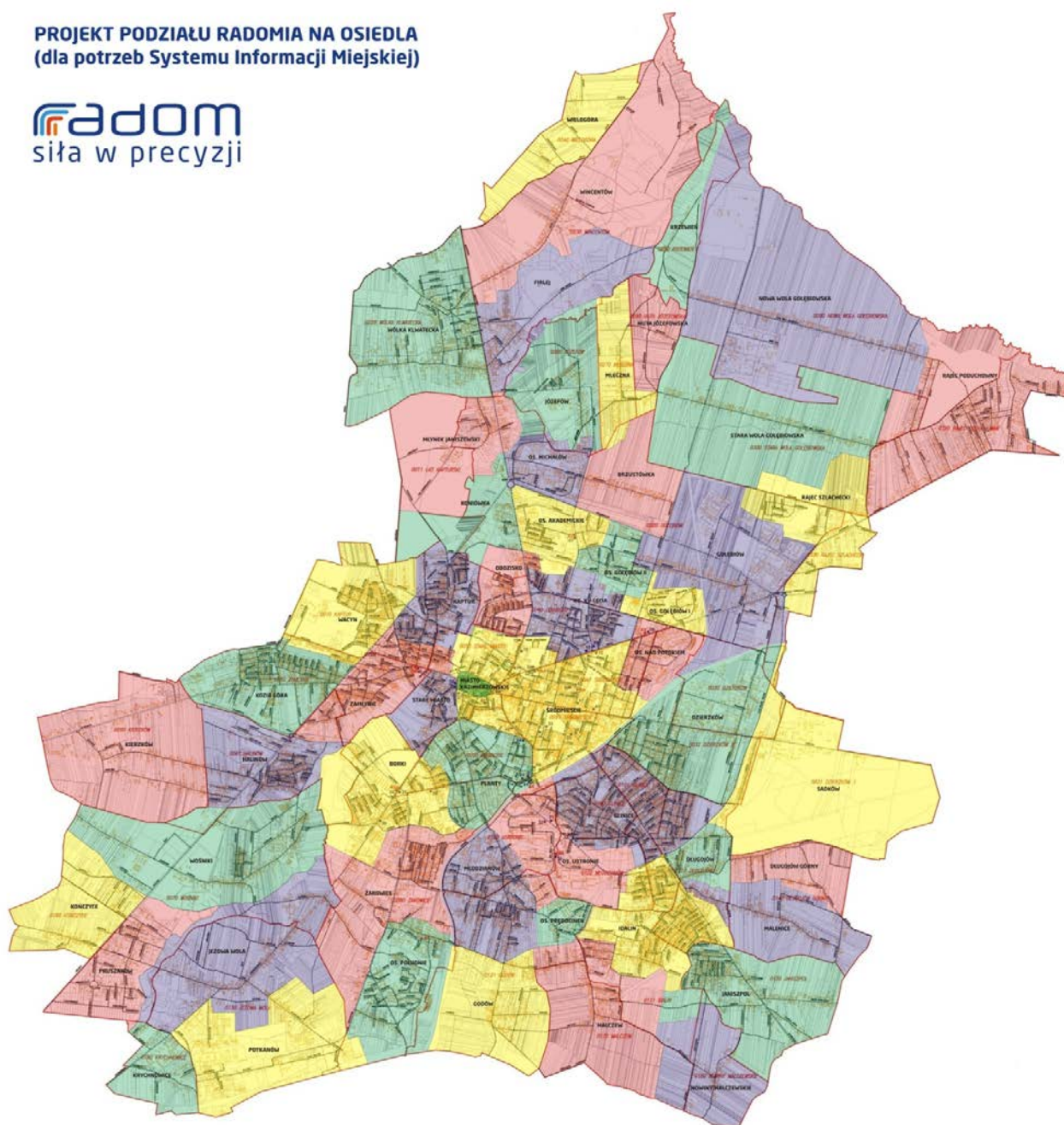
TERRA. Satelita ten przelatywał nad Radomiem między godziną 9 a 10 UTC oraz między 20 a 21 UTC. Natomiast satelita AQUA między 11 a 12 UTC oraz między północą a pierwszą UTC w nocy. Podane czasy są orientacyjne i zależą od danego przelotu satelity.

Ze względu na brak odpowiednich danych pochodzących z naziemnych stacji pomiarowych zlokalizowanych w mieście, wykorzystano wyniki obserwacji temperatury powietrza ze stacji synoptycznej WMO (Światowa Organizacja Meteorologiczna, ang. *World Meteorological Organization*) o numerze 12485 zlokalizowanej na północny zachód od miasta w odległości kilku kilometrów. W związku z występowaniem zjawiska MWC temperatura powietrza w mieście jest na ogół wyższa niż w okolicy pozamiejskiej stacji synoptycznej.

Do interpretacji rozkładu przestrzennego temperatury powietrza w obszarze Radomia wykorzystano bazę danych pokrycia terenu Urban Atlas oraz obrazy satelitarne o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej w paśmie widzialnym (46 cm) rejestrowane przez satelitę WorldView-2. Do opisu uzyskanych wyników użyto mapy osiedli miasta Radomia (Rysunek 1).

PROJEKT PODZIAŁU RADOMIA NA OSIEDLA
(dla potrzeb Systemu Informacji Miejskiej)

radom
siła w precyzji



Rysunek 1 Mapa osiedli miasta Radomia (źródło: <http://www.radom.pl/page/4,aktualnosci.html?id=2851>).

1.2 Metodyka

Pierwszym etapem przygotowywania danych do analiz było ich przetworzenie, tak aby można było przeprowadzić selekcję danych. Po przekonwertowaniu zebranych zbiorów danych do odpowiedniego formatu dokonano ekstrakcji warstw produktu satelitarnego (temperatury powierzchni oraz kąta zobrazowania). Następnie rastry danych zostały obcięte do granic obszaru zainteresowania obejmującego Radom oraz tereny przylegające do granic administracyjnych miasta.

Drugim etapem była selekcja danych. W przypadku instrumentu MODIS selekcja była oparta o dwa czynniki, tj. stopień zachmurzenia oraz kąt zobrazowania. Termalne obserwacje powierzchni Ziemi nie są możliwe do uzyskania gdy nad obszarem zainteresowania występuje zachmurzenie, dlatego do analiz zostały wybrane tylko obrazy zarejestrowane podczas bezchmurnej pogody. Drugi czynnik jest związany z wpływem kątowej anizotropii termalnej na obserwacje satelitarne dokonywane pod kątem od nadiru. Anizotropia termalna w przypadku obserwacji obszarów miejskich może mieć bardzo istotny wpływ na wyniki pomiarów (Li i inni 2014, Hu i inni 2016). Instrument MODIS charakteryzujący się bardzo szerokim kątem widzenia, jest narażony na wpływ anizotropii termalnej (Gawuć i Strużewska 2016, Hu i inni 2016). Dlatego też, w celu zmniejszenia wpływu tego zjawiska na wyniki pomiarów, badania LST w mieście często ogranicza się do obrazów zarejestrowanych pod niskim kątem od nadiru. W niniejszej pracy zastosowano obrazy satelitarne MODIS zarejestrowane pod kątem mniejszym od 40° od nadiru, przy założeniu, że niebo jest bezchmurne w co najmniej 75%. Selekcja danych pozwoliła na wybranie 109 obrazów satelitarnych zarejestrowanych w dzień, 56 obrazów zarejestrowanych w nocy oraz 68 obrazów zarejestrowanych wieczorem.

Instrument ASTER ma bardzo mały kąt widzenia, dlatego też wpływ kątowej anizotropii termalnej jest zanedbywalny. Ze względu na inną specyfikę danych ASTER oraz ubogie archiwum, selekcja obrazów ASTER została dokonana wizualnie. Wybrano jedno zobrazowanie satelitarne ASTER (zarejestrowane 7 lipca 2014 o 20:24 UTC). Wszelkie analizy za wykorzystaniem danych ASTER zostały ograniczone do jednego obrazu.

Po zakończeniu selekcji danych satelitarnych pozyskano wyniki naziemnych pomiarów temperatury powietrza ze stacji WMO. Po odcodowaniu depesz synoptycznych dokonano zestawienia pomiarów naziemnych temperatury powietrza z pomiarami satelitarnymi temperatury powierzchni. Temperatura powietrza na stacji synoptycznej jest obserwowana co godzinę, natomiast przeLOT satelity rzadko ma miejsce o pełnej godzinie. W takich przypadkach dokonano interpolacji liniowej wartości temperatury powietrza za użyciem pomiarów naziemnych przed i po przeLOTie satelity.

Rozkład przestrzenny LST w Radomiu został szczegółowo przeanalizowany dla jednego obrazu ASTER oraz dla czterech obrazów MODIS, w czasie gdy temperatura powietrza poza miastem wynosiła około 0°C (29 grudnia 2015 11:20 UTC) – „próg 0°C”, 10°C (27 marca 2016 11:15 UTC) – „próg 10°C”, 20°C (6 czerwca 2016 11:20 UTC) – „próg 20°C”, oraz 30°C (12 sierpnia 2015 09:55 UTC) – „próg 30°C”. Ponadto dokonano analizy zmienności czasowej temperatury powietrza, powierzchni oraz intensywności PMWC, jak również skrajnych wartości LST w Radomiu dla okresu czerwiec 2015 - czerwiec 2016.

W celu dokonania oceny intensywności PMWC zastosowano trzy wskaźniki (Schwarz i inni 2011, 2012 oraz Gawuć i Strużewska 2016):

- „range” - różnica między najwyższą a najniższą wartością LST zarejestrowaną wewnątrz granic administracyjnych miasta. Wskaźnik ten należy rozumieć jako maksymalną rozpiętość termiczną jaka występuje w obrębie granic administracyjnych miasta.

- „inside urban - inside rural” - różnica między w średniej LST terenu zurbanizowanego a średnią LST terenu naturalnego (tj. słabo zurbanizowanego). Obydwa obszary były wydzielone wewnątrz granic administracyjnych miasta i wspólnie pokrywały cały jego obszar. Wskaźnik ten należy rozumieć jako wartość nadwyżki temperatury jaka występuje w całym obszarze zurbanizowanym miasta. Wskaźnik pokazuje wartość uśrednioną.
- „magnitude” - różnica między najwyższą a średnią wartością LST zarejestrowaną wewnątrz granic administracyjnych miasta. Wskaźnik ten daje prawdopodobnie najbardziej „miarodajną” informację dotyczącą intensywności PMWC. Za użyciem tego wskaźnika, w zestawieniu z poprzednio wymienionymi, można w pełni wnioskować o warunkach termicznych w mieście w odniesieniu do terenów pozamiejskich.

W przypadku instrumentu ASTER zostały obliczone te same wskaźniki. Nie mniej, należy pamiętać, iż biorąc pod uwagę wysoką rozdzielczość przestrzenną instrumentu ASTER (90 m) oraz wysoką zmienność przestrzenną LST obszaru miejskiego, wartość informacyjna wskaźników „range” oraz „magnitude” jest ograniczona. Bowiem zależą one, z definicji, od wartości LST pojedynczych pikseli. Wskaźnik „inside urban - inside rural” uwzględnia uśrednione dla obszaru wartości LST, dlatego jego walory informacyjne są takie same jak w przypadku instrumentu MODIS, który ma znacząco niższą rozdzielczość przestrzenną (1 km). Obraz satelitarny ASTER jest lepszym narzędziem do analizy rozkładu przestrzennego niż do analizy intensywności PMWC w przypadku wyżej wymienionych wskaźników.

W celu dokładnego opisanie warunków termicznych w Radomiu, z analizowanych obszarów satelitarnych wyekstrahowano współrzędne geograficzne pikseli o skrajnych wartościach temperatury powierzchni. Zestawienie sporządzono jedynie dla przypadków dziennego i nocnego (z pominięciem wieczornego), gdyż w ciągu dnia powierzchnie są najbardziej nagrzane a w nocy najmocniej wychłodzone (Rysunek 10, 11, 12, 13).

1.3. Uwagi dotyczące ograniczeń interpretacyjnych obranego podejścia badawczego

Satelity przeznaczone do obserwacji powierzchni Ziemi najczęściej znajdują się na orbitach heliosynchronicznych, co sprawia, że czas ich przelotu nad Polską w dzień ma miejsce w godzinach przedpołudniowych, a po zachodzie Słońca w godzinach wieczornych oraz nocnych. W letni, bezchmurny dzień powierzchnie miasta przyjmują energię słoneczną przez cały dzień aż do zachodu Słońca. To sprawia, że najwyższe temperatury w mieście obserwowane są późnym popołudniem. Ponadto, PMWC i MWC są zjawiskami zmiennymi w czasie i przestrzeni i są zależne od warunków synoptycznych (Oke 1982, Gawuć i Strużewska 2016). Innymi słowy, intensywność tych zjawisk może się znacząco zmieniać w ciągu doby. Niestety, ze względu na uwarunkowania techniczne, zobrażenia MODIS i ASTER są pomiarami „chwilowymi”, dostępnymi tylko dla wybranych momentów w ciągu doby. Zastosowanie zobrażeń z satelitów geostacjonarnych (np. Meteostat SEVIRI), które umożliwiają pomiary LST co kilkanaście minut przez całą dobę, ze względu na ich bardzo niskie rozdzielczości przestrzenne (SEVIRI - 3 km w nadirze) jest niemożliwie dla polskich miast. Podsumowując, odbiorcy niniejszego dokumentu muszą pamiętać, iż dokonane analizy dotyczą tylko momentu przelotu satelitów Terra oraz Aqua. Uzupełnieniem niniejszych badań

mogłaby być zastosowanie technik fuzji pomiarów pochodzących z różnych systemów satelitarnych (Shen i inni 2015), lecz to znacząco wykracza poza zakres zleconej pracy.

Występowanie zachmurzenia nad miastem powoduje, iż energia uwalniana z powierzchni na drodze radiacyjnej w dużej mierze jest odbijana od chmur z powrotem w kierunku ziemi. Ten mechanizm przyczynia się do zmniejszenia tempa wychładzania powierzchni miejskich i pozamiejskich i prowadzi do obniżenia kontrastu temperatury powietrza, czyli do obniżenia natężenia MWC (Arnfield 2003). Analogicznie, różnice pomiędzy miejską i pozamiejską temperaturą powierzchni będą mniejsze wraz ze wzrostem zachmurzenia. Ze względu na fakt, iż chmury emitują własne promieniowanie w zakresie termalnym, nie ma technicznej możliwości dokonania pomiaru temperatury powierzchni Ziemi z pułapu satelitarnego podczas występowania zachmurzenia. Przejściowy klimat występujący w Polsce charakteryzuje się dużą ilością dni pochmurnych w czasie roku. W związku z tym, należy zaznaczyć, że możliwości interpretacyjne wyników uzyskanych w niniejsze pracy są ograniczone i nie reprezentują sytuacji gdy występuje zachmurzenie nad Radomiem. Uzupełnieniem uzyskanych wyników mogłaby być analogiczna analiza oparta na danych pomiarowych temperatury powietrza. Niestety, w Radomiu nie istnieje odpowiednia sieć pomiarowa, która by to umożliwiała. Stąd zastosowanie danych satelitarnych było jedynym rozwiązaniem pozwalającym na określenie warunków termicznych w mieście w zakresie pełnego rozkładu przestrzennego.

Różnice między temperaturą powietrza i powierzchni mogą prowadzić do powstawania silnych strumieni turbulencyjnych ciepła jawnego, które w warunkach miejskich stanowią zasadniczą część bilansu energetycznego powierzchni (Fortuniak 2010), czyli wymiany energii między ziemią a atmosferą. Duże różnice między LST a temperaturą powietrza zostały zaobserwowane w wielu przypadkach (Wykres 1). Nie mniej, należy zauważyć, iż temperatura powietrza była pomierzona poza miastem, a temperatura powierzchni wewnątrz granic miasta. Na obszarze terenu zurbanizowanego, ze względu na występowanie MWC temperatura powietrza jest najczęściej wyższa o kilka stopni. Stąd udokumentowane różnice między LST a powietrzem nie dają pełnego obrazu nt. kontrastu termicznego między powierzchnią a powietrzem w mieście. Ponadto, ze względu na brak danych, w niniejszej pracy nie udokumentowano intensywności zjawiska MWC związanej z temperaturą powietrza. Zastosowano obrazy satelitarne ASTER i MODIS, które umożliwiły badanie PMWC w odniesieniu do temperatury powierzchni.

2. Wyniki

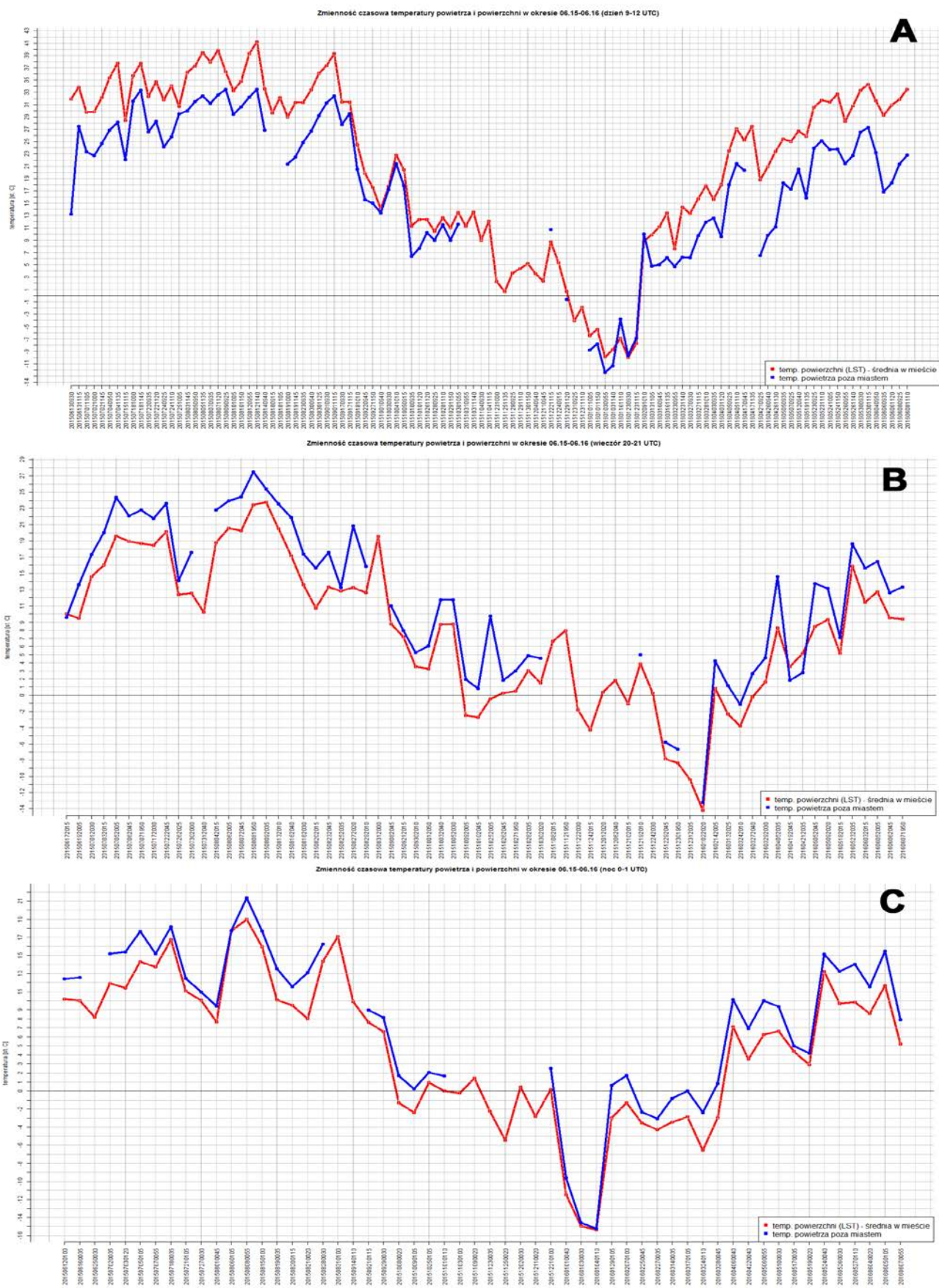
2.1 Zmienność średniej temperatury powierzchni w Radomiu oraz pozamiejskiej temperatury powietrza w okresie 06.2015-06.2016

W celu przeanalizowania warunków termicznych w Radomiu pod kątem ich zmienności czasowej sporządzono wykresy przedstawiające zmienność średniej temperatury powierzchni w mieście oraz temperatury powietrza rejestrowanej poza miastem. Wykres 1 przedstawia trzy przypadki, odpowiednio: A. dzień (godziny około 9-12 UTC), B. wieczór (godziny ok. 20-21 UTC) i C. noc (godziny ok. 0-1 UTC) .

Średnia LST w dzień w mieście od czerwca do września 2015 obliczona dla wybranych przypadków wynosiła powyżej 28°C, w połowie września zaczęła stopniowo spadać, następnie od końca grudnia do pierwszej połowy lutego była ujemna (Wykres 1 A). W styczniu zanotowano średnią LST w mieście wynoszącą około -10°C. Od lutego średnia LST stopniowo rosła, osiągając około 15°C na wczesną wiosnę, a w połowie maja 2016 przekroczyła 30°C.

Zmienność temperatury powietrza była zbliżona do zmienności średniej LST w całym badanym okresie. W dzień powierzchnia miasta była bardziej nagrzana od powietrza, natomiast wieczorem i w nocy sytuacja jest odwrotna. Najwyższe różnice pomiędzy temperaturą powietrza a LST są zauważalne w okresie letnim w roku 2015 oraz w okresie późno wiosennym w roku 2016. Wynoszą one od kilku do nawet kilkunastu stopni Celsjusza. W chłodnej części roku różnica pomiędzy temperaturą powietrza i powierzchni jest mniejsza niż w cieplej części roku. W okresie zimowym na przełomie 2015 i 2016 roku występują istotne braki w danych temperatury powietrza mierzonej na stacji pozamiejskiej. Braki w danych mogą być spowodowane awarią urządzenia, ich konserwacją bądź błędami w archiwizacji.

W dzień, powierzchnia ziemi jest ogrzewana przez energię słoneczną. W terenie zurbanizowanym występują materiały budowlane, które się bardzo mocno nagrzewają, a po zachodzie słońca długo oddają ciepło. To prowadzi do powstawania dużego kontrastu termicznego pomiędzy powierzchnią i atmosferą. W zimie natomiast, ze względu na słabsze nagrzanie powierzchni, wynikające z mniejszego nasłonecznienia i krótszego uśłonecznienia, w ogólnym przypadku obserwuje się niższe różnice w temperaturze powierzchni i powietrza. Wysokie różnice pomiędzy temperaturą powietrza i powierzchni powodują intensywną wymianę energii pomiędzy powierzchnią a atmosferą na drodze turbulencyjnej. Analogicznie, mniejszy kontrast termiczny daje mniej intensywną wymianę lub jej zanik.



Wykres 1 Zmienność średniej temperatury powierzchni w mieście oraz temperatury powietrza w dzień, wieczorem oraz w nocy w okresie czerwiec 2015 - czerwiec 2016.

W przypadku wieczornym (Wykres 1 B) w okresie letnim, LST osiągała wartości między 10°C a 24°C. W październiku (9-tego oraz 10-tego) spadła poniżej 0°C, następnie wzrastała stopniowo do 21-wszego listopada osiągając ok. 8°C, po czym zaczęła niejednostajnie opadać aż do 2 stycznia 2016, gdy osiągnęła najniższą wartość poniżej -14°C. Następnie średnia LST niejednostajnie rosła aż do okresu letniego w 2016 roku. Temperatura powietrza w przypadku wieczornym zachowywała się w sposób zbliżony do LST, nie mniej poniżej zera spadła dopiero pod koniec grudnia 2015. W większości przypadków średnia LST była niższa niż temperatura powietrza.

W przypadku nocnym (Wykres 1 C) średnia LST osiągała w lato wartości od ok. 8 do 18°C, w październiku spadła poniżej zera, osiągając minimalną wartość poniżej -14°C 4-go stycznia 2016. Następnie rosła niejednostajnie osiągając w czerwcu 2016 około 13°C.

2.2. Analiza zmienności czasowej PMWC w Radomiu w okresie 06.2015-06.2016

W celu przeanalizowania zmienności czasowej PMWC w Radomiu obliczono wartość wskaźników intensywności PMWC („range”, „magnitude” oraz „inside urban - inside rural”) dla każdego obrazu satelitarnego jaki został wybrany w trakcie selekcji danych. Wykres 2 przedstawia trzy przypadki, odpowiednio: A. dzień (ok. 9-12 UTC), B. wieczór (ok. 20-21) i C. noc (ok. 0-1) .

Zmienność intensywności PMWC w dzień wykazuje wyraźny trend sezonowy, który ma zauważalny związek ze zmianami średniej temperatury powierzchni notowanej w mieście (kolor fioletowy). W lato wskaźniki osiągają najwyższe wartości, natomiast w okresie od jesieni do zimy intensywność PMWC maleje. Zaczyna rosnąć od późnej zimy aż do lata.

Najwyższe wartości w każdym przypadku w ciągu doby jak i roku (Wykres 2 A, B i C) osiąga wskaźnik „range”, co jest związane z jego definicją (obliczany jest tylko za pomocą dwóch pikseli obrazu satelitarnego). W lato przyjmuje wartości od ok. 4°C do ponad 12°C, na jesieni ok. 6°C, w zimie od 1 do 3°C, na wiosnę ok. 4-6°C. Nie mniej, wskaźnik ten cechuje często występujące wysokie wahania wartości. Wynika to z faktu, iż jest on bardziej wrażliwy na zmiany w LST w mieście niż pozostałe wskaźniki. Natomiast wskaźnik „magnitude” w dzień przyjmuje niższe wartości niż „range”, mieszczą się one w zakresie od 4 do 6°C w lato, ok 2°C na jesieni, ok. 1°C w zimę oraz ok 2-3°C na wiosnę. „Inside urban - inside rural” w każdym przypadku dziennym przyjmuje najniższe wartości spośród wszystkich wskaźników. W lato przyjmuje wartości z zakresu ok. 1,5°C do ponad 3°C, na jesieni od ok. 0,5°C do 2°C, w zimie od ok. 0°C do 1°C, na wiosnę od ok. 1°C do 2°C.

W przeciwieństwie do pory dziennej, w przypadkach wieczornym (Wykres 2 B) i nocnym trend sezonowy jest gorzej widoczny, szczególnie w nocy (Wykres 2 C). W ciepłych porach roku intensywność PMWC jest niewiele wyższa niż w zimie. W lato „range” przyjmuje wartości od ok. 6 do 7°C wieczorem (ok. 5-7°C w nocy), na jesieni ok. 2-5,5°C zarówno wieczorem jak i w nocy, w zimie ok. 1,5-4,5°C wieczorem (ok. 2,5-4,5°C w nocy) ok. 3-7°C na wiosnę wieczorem (3-6°C w nocy).

Wskaźnik „magnitude” w nocy oraz wieczorem przyjmuje wartości ok. 3-4,5°C w lecie (2-4,5°C w nocy), na jesieni wieczorem między 2 a 3,5°C (1-2,5°C w nocy), wieczorem w zimę ok. 2-3°C (1-2°C w nocy), a na wiosnę ok. 1,5-3,5°C (w nocy 1,5-3°C). Trzeci wskaźnik („inside urban - inside rural”) w przypadkach po zachodzie słońca przyjmuje wartości ok. 2-3°C wieczorem (1-3°C w nocy), na jesieni od ok. 0,5-1,5°C wieczorem i w nocy, w zimie wieczorem 0,5 do 1,5°C (0,25-1,5°C w nocy), na wiosnę wieczorem 1-2,5°C (0,5-2°C w nocy).

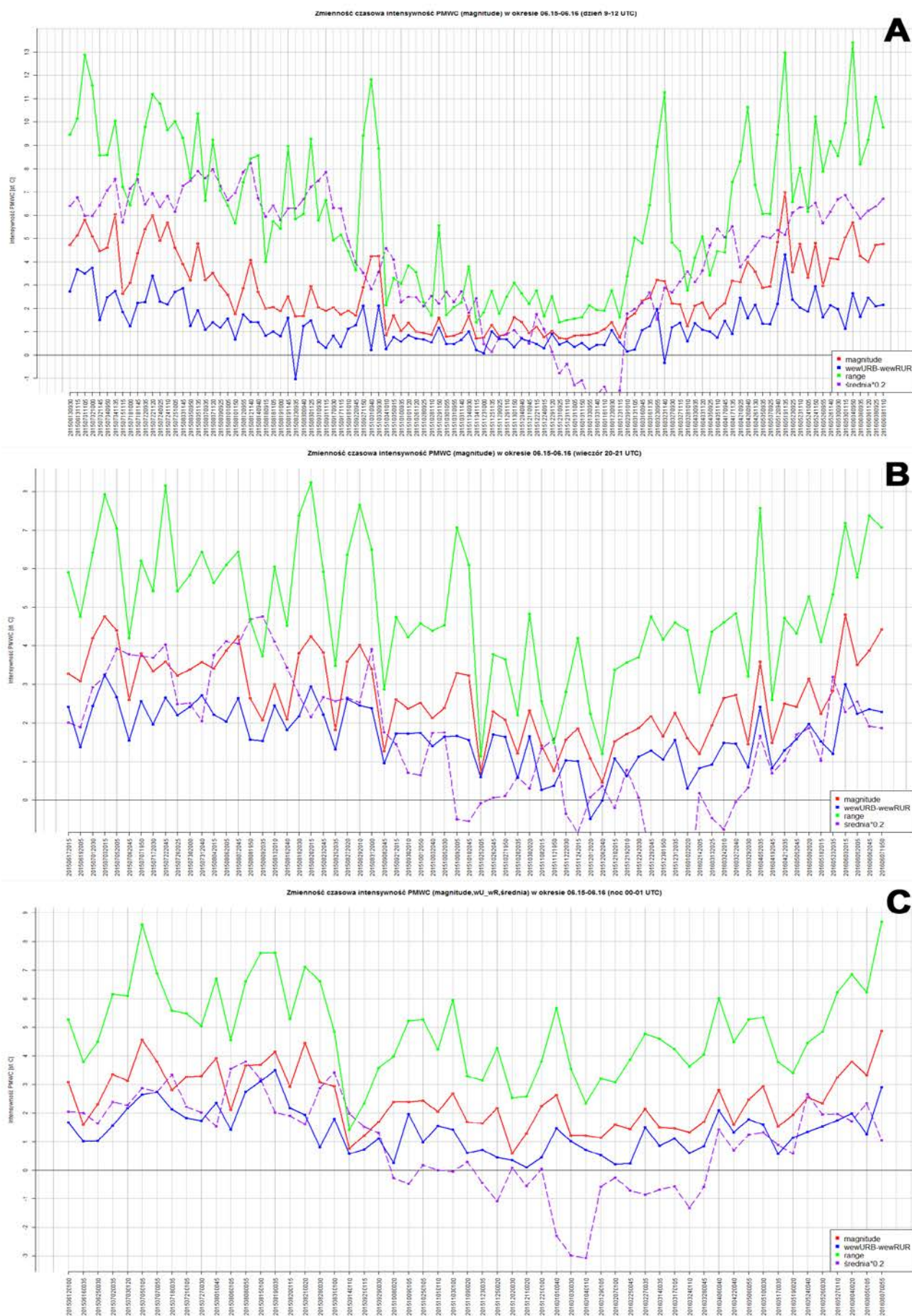
Należy zauważyć, iż za pomocą wskaźników „range” i „magnitude”, ze względu na definicję, nie ma możliwości wykrycia powierzchniowej miejskiej wyspy chłodu (PMWCh). Jest to odwrotność PMWC, czyli sytuacja w której temperatura obserwowana w mieście jest niższa niż poza miastem. Natomiast wskaźnik „inside urban - inside rural” wskazuje na wystąpienie powierzchniowej miejskiej wyspy chłodu dwa razy w ciągu dnia (23 sierpnia 2015 oraz 23 marca 2016 - Wykres 2 A) oraz wieczorem 1 grudnia 2015 (Wykres 2 B). W nocy PMWCh nie zaobserwowano przez cały rok. Występowanie PMWCh wynika ze specyficznych warunków synoptycznych, które wystąpiły w badanych przypadkach i właściwości termicznych powierzchni w mieście i poza miastem, które powodują różne tempo nagrzewania i wychładzania.

Tabela 1 Uśredniona dla pór roku intensywność PMWC w dzień.

[°C]	„magnitude”	„Inside urban - inside rural”	„range”
zima	1,00	0,50	2,10
wiosna	3,20	1,55	7,06
lato	3,85	1,89	8,63
jesień	1,56	0,73	4,04

W tabeli 1 zamieszczone są uśrednione dla poszczególnych pór roku wartości intensywności PMWC określone za pomocą wszystkich trzech wskaźników. Najwyższa intensywność PMWC została zanotowana w lato. Nieco niższą intensywność zjawiska zaobserwowano na wiosnę. W pozostałych porach roku natężenie PMWC było znacznie mniejsze. Najniższa intensywność PMWC miała miejsce w zimie.

Dokładne wartości intensywności PMWC, temperatury powietrza i skrajnych wartości LST dla wszystkich przypadków są dostępne w załączonych do dokumentów plikach tekstowych o nazwie „wyniki zbiorcze”.



Wykres 2 Zmienność intensywności PMWC w dzień, wieczorem oraz w nocy w okresie czerwiec 2015 - czerwiec 2016.

2.3 Rozkład przestrzenny temperatury powierzchni (LST) określony za pomocą obrazowań satelitarnych MODIS.

2.3.1. Rozkład przestrzenny LST w przypadku temperatury powietrza wynoszącej 0°C, 10°C, 20°C i 30°C.

Poniżej przedstawiono mapę temperatury powierzchni w Radomiu w momencie wystąpienia temperatury powietrza bliskiej 0°C. Temperatura powierzchni została uzyskana za pomocą obrazowania MODIS. W poprzedzającym dokonanie pomiaru satelitarnego (22-29 grudnia) temperatura powietrza była dodatnia przez całą dobę. 22 oraz 23-go grudnia przekraczała 10°C w dzień, następnie 24-go grudnia spadła i wynosiła ok. 8°C w dzień i około zera w nocy z 24-go na 25-ty grudnia. W dzień 25-go wzrosła ale nie przekroczyła 10°C, co nastąpiło dopiero 26-go grudnia.

Rozpiętość temperatury powierzchni w przypadku wystąpienia temperatury powietrza wynoszącej ok. 0°C („próg 0°C”) jest dość mała i wynosi niecałe 4°C (Rysunek 2). Najwyższe LST przekraczające 1,5°C zostały zaobserwowane w centrum miasta w obszarze o najwyższym stopniu urbanizacji. LST oscylujące w okolicy 0-0,5°C zostały zaobserwowane w części południowej, wschodniej i południowo-wschodniej miasta. Na zachód oraz północny zachód od centrum miasta występują najniższe zaobserwowane temperatury - poniżej 0°C. Wartości wskaźników intensywności PMWC osiągają następujące wartości: „magnitude”: 1,01°C, „inside urban-inside rural”: 0,89°C , „range”: 2,52°C (dane natężenia PMWC znajdują się w pliku „Wyniki_zbiorcze_DZIEN.txt” załączonym do niniejszego dokumentu). Rysunek 3 pokazuje jaka część powierzchni miasta miała temperaturę wyższą niż średnia w mieście. Należy stwierdzić, że znaczący obszar administracyjny miasta jest cieplejszy niż średnia.

W przypadku gdy temperatura powietrza wynosiła ok. 10°C („próg 10°C,”) rozkład przestrzenny temperatury powierzchni jest zauważalnie różny niż w przypadku „progu 0°C” (Rysunek 4). Rozpiętość LST 27 marca była wyższa niż 29 grudnia i wynosiła prawie 8°C. W przeciwieństwie do przypadku „próg 0°C”, spadek temperatury 27 marca w miarę oddalania się od centrum był mniej gwałtowny. Najwyższa LST została (17,89°C) zaobserwowana w ścisłym centrum miasta w okolicach dworca kolejowego. Silnie zurbanizowane osiedla znajdujące się poza ścisłym centrum (Młodzianów, Wacyn, Osiedle Akademickie, Idalin, Gołębiów) mają niższe LST (ok. 15°C). Wartości wskaźników intensywności PMWC osiągają następujące wartości: „magnitude”: 2,17°C, „inside urban-inside rural”: 1,37°C , „range”: 4,46°C. W okresie poprzedzającym pomiar satelitarny związany z „progiem 10°C” temperatura była zmienna. 27 marca w nad ranem temperatura spadła do ok. -1°C. 26-tego w dzień wynosiła ok. 4-6°C i ok 5°C w nocy. Natomiast w dniach 23-25-tego marca w nocy temperatura spadała poniżej -3°C w nocy , a w dzień osiągała ok. 6-7°C.

Rozkład przestrzenny obszarów o LST wyższej niż średnia w mieście (Rysunek 5) jest bardzo podobny do rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni (Rysunek 4). Obszary o LST wyższej niż średnia zajmują mniejszy obszar niż w innych przypadkach (Rysunek 3, Rysunek 7, Rysunek 9). Szczególnie odznaczają się dwa piksele zlokalizowane w ścisłym centrum miasta w okolicy dworca kolejowego. Osiedla o wysokim stopniu urbanizacji znajdujące się poza ścisłym centrum również mają LST wyższą niż średnia. Zauważalna jest także nadwyżka LST w północnej części miasta (osiedla Młynek Janiszewski, Wólka Klwatecka).

Rozkład LST w przypadku wystąpienia temperatury powietrza poza miastem wynoszącej 20°C (próg 20°C) ma cechy wspólne zarówno z „progiem 0°C” jak i „progiem 10°C” (Rysunek 6). Najwyższa LST została zaobserwowana w centrum miasta, lecz nie tylko w okolicach dworca kolejowego, lecz na większym obszarze (osiedla Idalin, Młodzianów, Borki, Stare Miasto, Glinice). Północna część obszaru badań, będąca w obrębie granic administracyjnych, jest również silnie nagrzana (powyżej 16°C). W północno-wschodniej części miasta występują wysokie kontrasty termiczne (powyżej 10°C) pomiędzy sąsiednimi pikselami. Wartości wskaźników intensywności PMWC osiągają następujące wartości: „magnitude”: 3,99°C, „inside urban-inside rural”: 2,45°C , „range”: 9,45°C. W okresie poprzedzającym wykonanie pomiaru satelitarnego temperatura powietrza malała od 22-26°C w dzień na początku czerwca oraz ok 15-17°C w nocy. 4-tego czerwca w dzień przekroczyła 25°C a w nocy spadła poniżej 15°. W dniu wykonania pomiaru tj. 6-tego czerwca temperatura powietrza w nocy spadła nieznacznie poniżej 10°C, a w dzień nie przekroczyła 20°C.

W przypadku „progu 20°C”, prawie cały zurbanizowany obszar miasta jest pokryty LST wyższą niż średnia miejska (Rysunek 7). Temperatury poniżej średniej wystąpiły w tych dzielnicach miasta, gdzie jest duży udział powierzchni naturalnych.

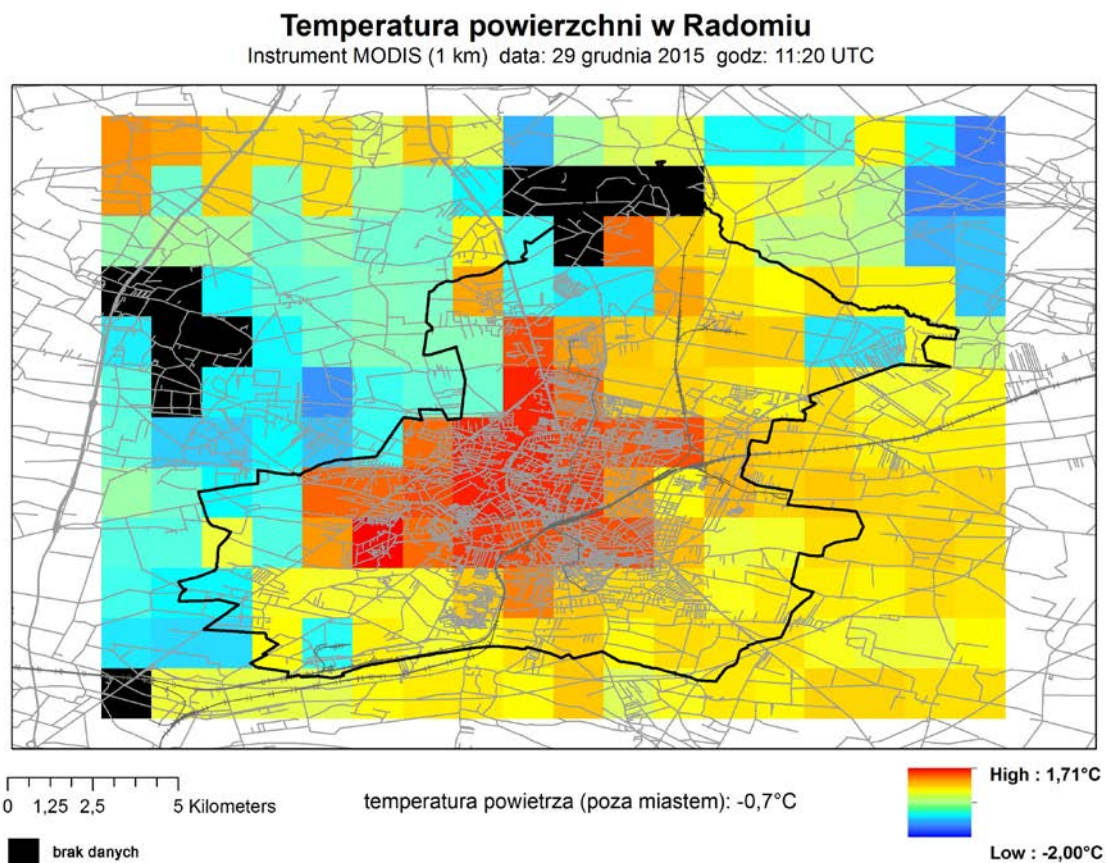
Bardzo wysokie temperatury powierzchni zaobserwowano w przypadku, gdy temperatura powietrza wynosiła 32,2°C („próg 30°C”). Na całym obszarze badań można zauważyć znaczące różnice w LST pomiędzy sąsiadującymi pikselami, zwłaszcza w części północnej oraz północno-wschodniej przy zachodniej granicy miasta. Ponadto, w przypadku „progu 30°C” centrum miasta nie jest jedynym miejscem, gdzie zanotowano bardzo wysokie LST powyżej 40°C. Większość powierzchni miasta miało LST przekraczające 35°C. Wartości wskaźników intensywności PMWC osiągają następujące wartości: „magnitude”: 2,86°C, „inside urban-inside rural”: 1,73°C , „range”: 7,42°C. W okresie poprzedzającym pomiar satelitarny temperatura powietrza systematycznie rosła od początku sierpnia. W dzień na początku miesiąca temperatury osiągały 24-25°C, a w nocy 14-18°C, od 3-go sierpnia w dzień temperatura przekraczała 30°C, a 8-go i 9-go w dzień przekraczała 35°C w nocy nie spadała poniżej 20°C.

Mimo wystąpienia bardzo wysokich LST w wielu lokalizacjach w mieście, duża część miasta miała LST niższą niż średnia (Rysunek 9). Porównując dwa skrajne przypadki („próg 0°C” i „próg 30°C”), można stwierdzić, iż większy obszar miasta ma wyższą LST niż średnia w przypadku zimowym niż letnim.

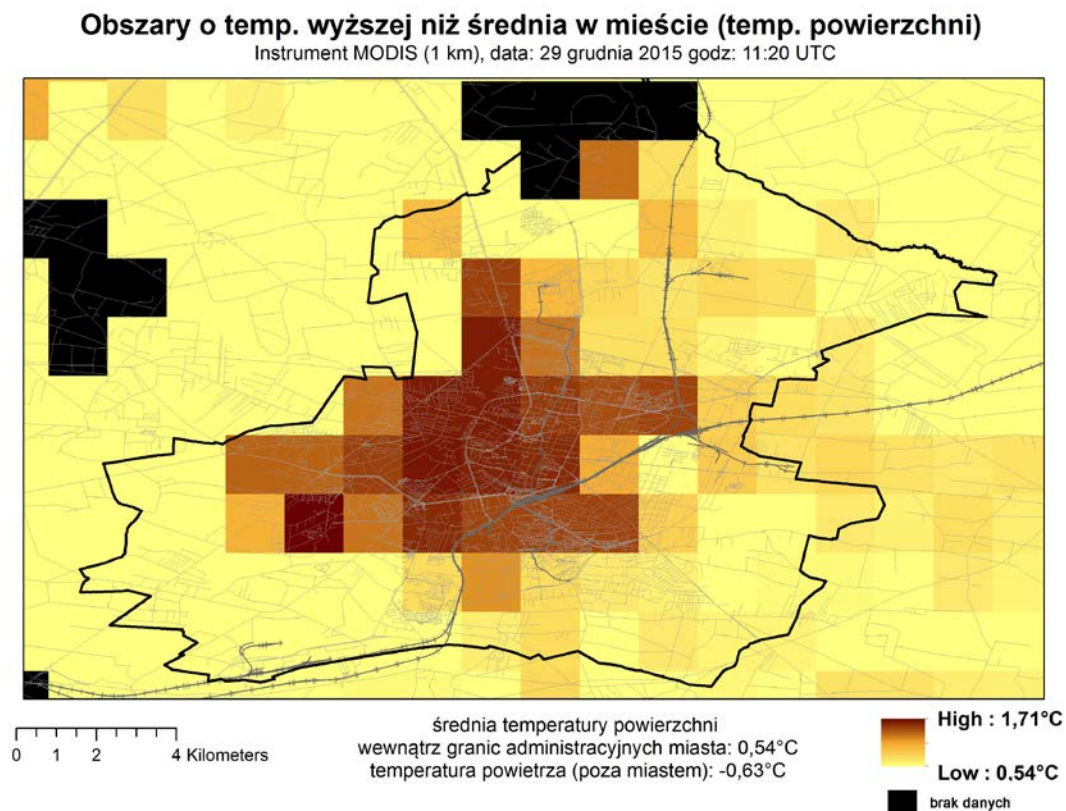
Tabela 2 Wskaźniki intensywności PMWC dla badanych przypadków rozkładu przestrzennego LST.

Lp.	Próg	Data wykonania pomiaru satelitarnego	„range” [°C]	„magnitude” [°C]	„inside urban-inside rural” [°C]
1.	0°C	29.12.2015 11:20 UTC	2,52	1,01	0,89
2.	10°C	27.03.2016 11:15 UTC	4,46	2,17	1,37
3.	20°C	6.06.2016 11:20 UTC	9,45	3,99	2,45
4.	30°C	12.08.2016 09:55 UTC	7,42	2,86	1,73

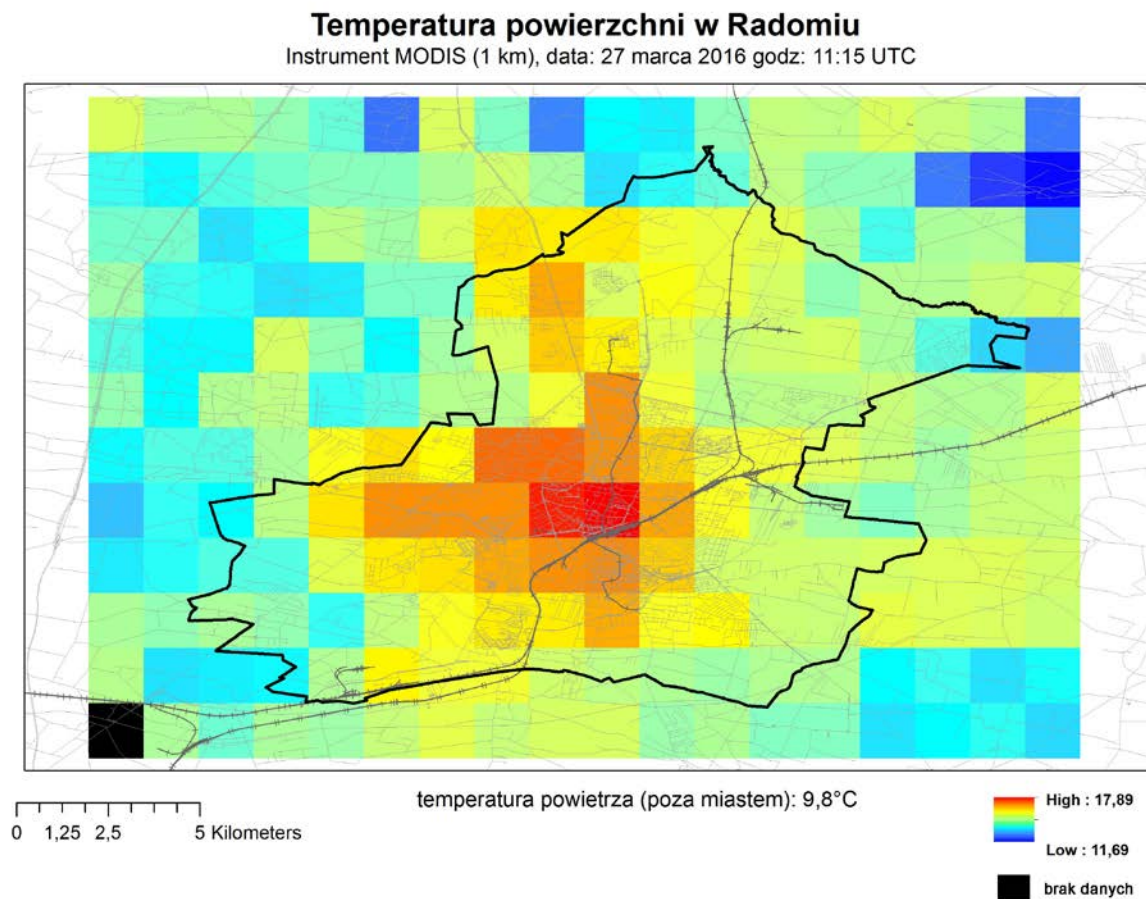
Tabela 2 zawiera wartości wskaźników intensywności PMWC dla czterech przypadków, dla których rozkład przestrzenny LST został przebadany za pomocą danych MODIS. W ogólnym przypadku, najczęściej im cieplej tym wyższa intensywność PMWC jest obserwowana. W przebadanych przypadkach natomiast, najwyższą intensywność PMWC zaobserwowano 6 czerwca 2016 („próg 20°C”, wartości wskaźników wyniosły: 9,45°C; 3,99°C; 2,34°C), podczas gdy w przypadku „progu 30°C” intensywność była niższa (wartości wskaźników wyniosły: 7,42°C; 2,86°C; 1,73°C). W dwóch pozostałych przypadkach intensywność była znacznie niższa, szczególnie dla „progu 0°C”.



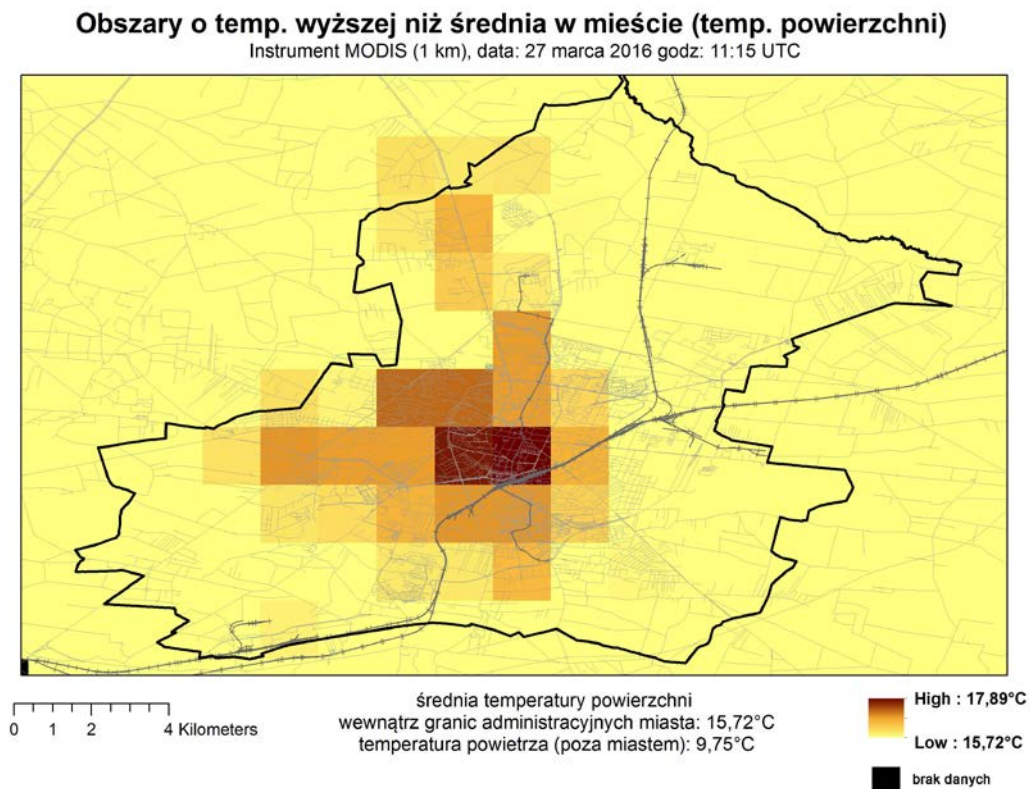
Rysunek 2 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 0 °C.



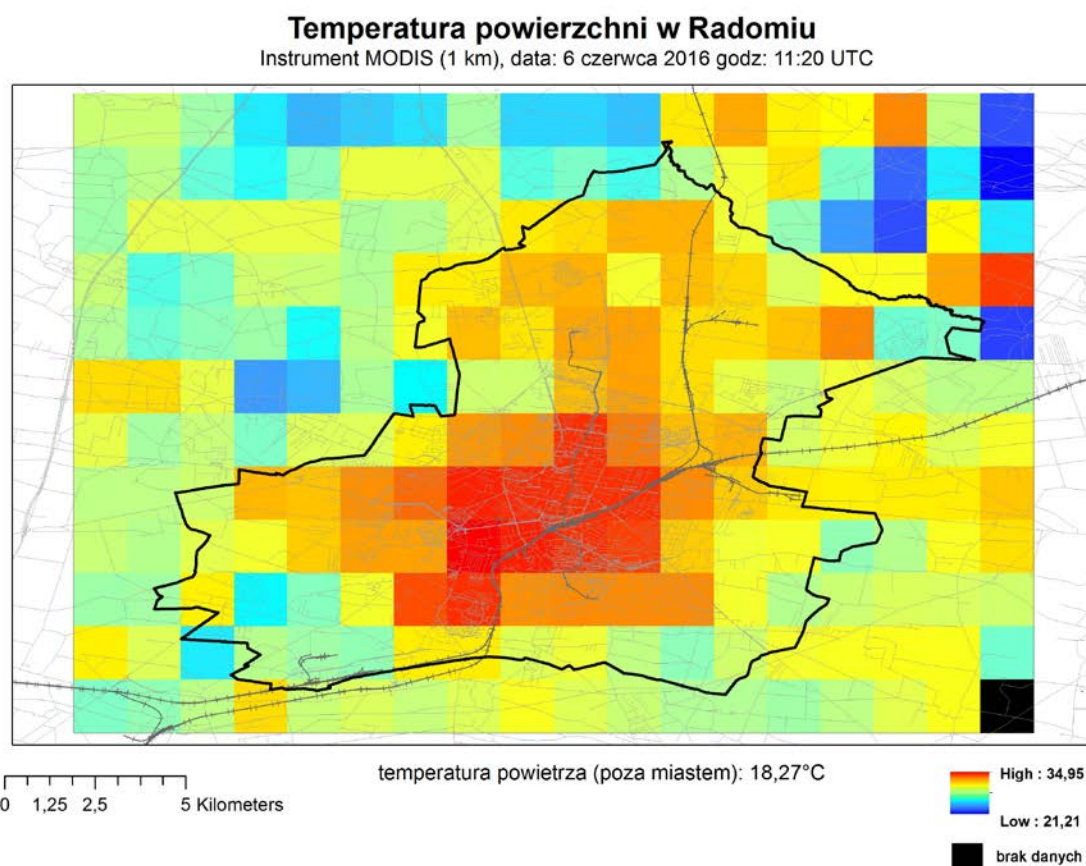
Rysunek 3 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 0°C.



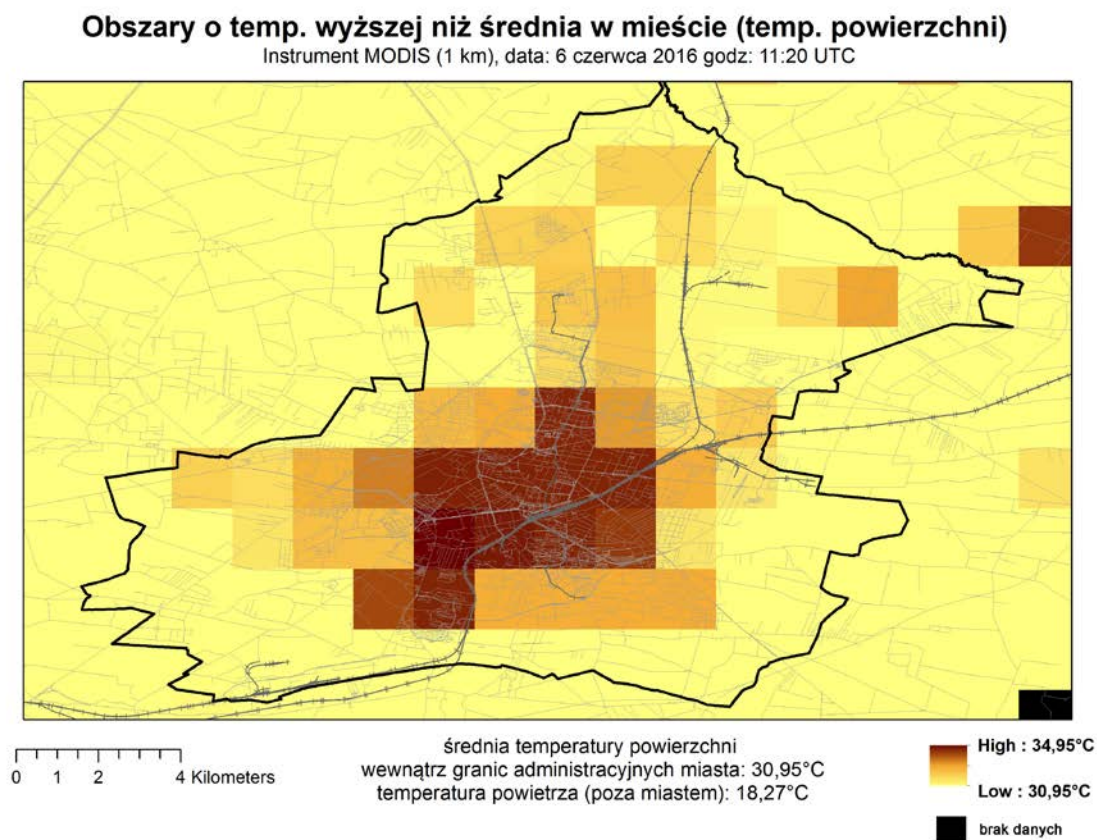
Rysunek 4 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 10 °C.



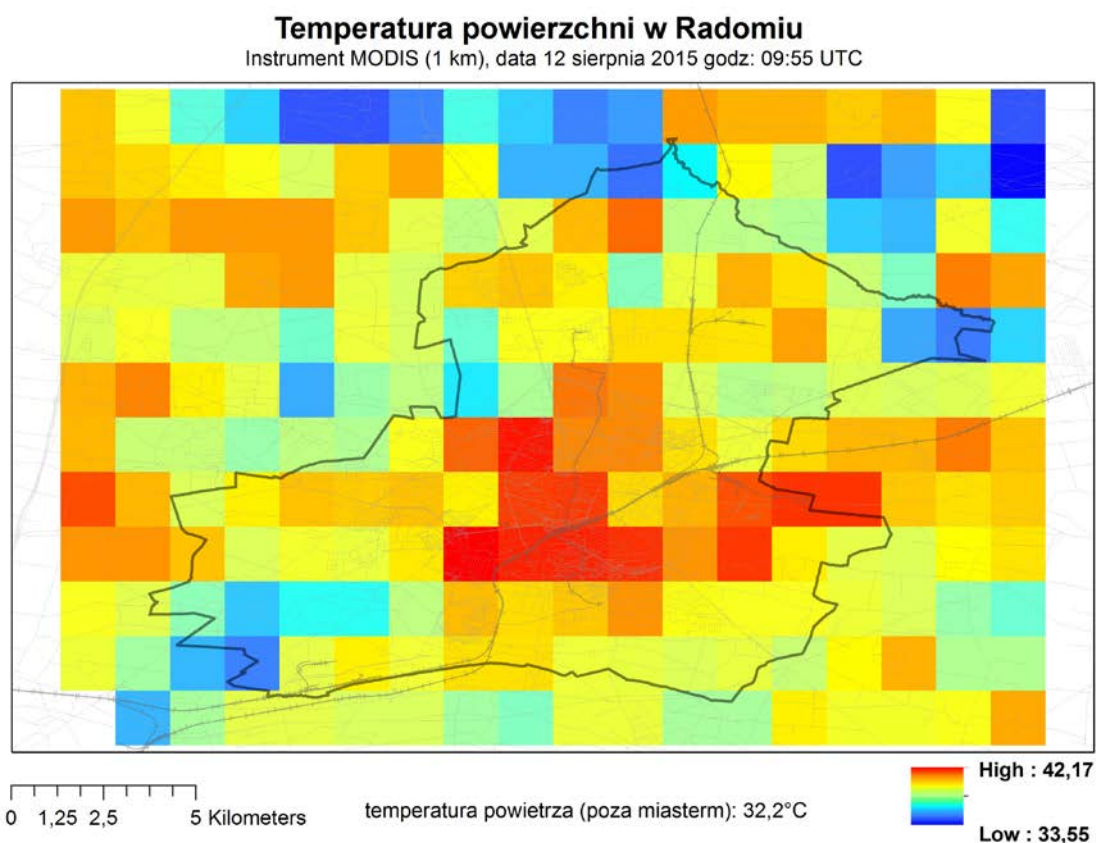
Rysunek 5 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 10°C.



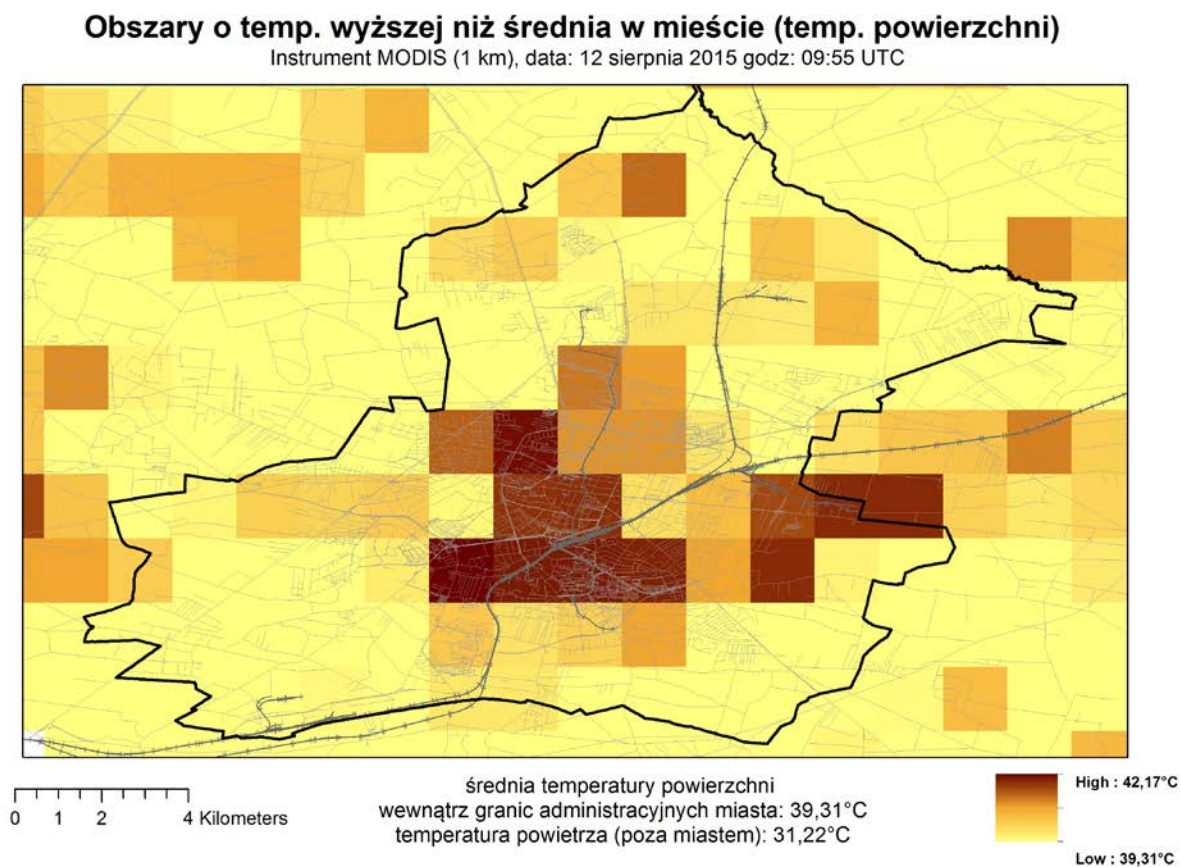
Rysunek 6 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 20 °C.



Rysunek 7 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 20°C.



Rysunek 8 temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 30 °C .



Rysunek 9 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 30°C

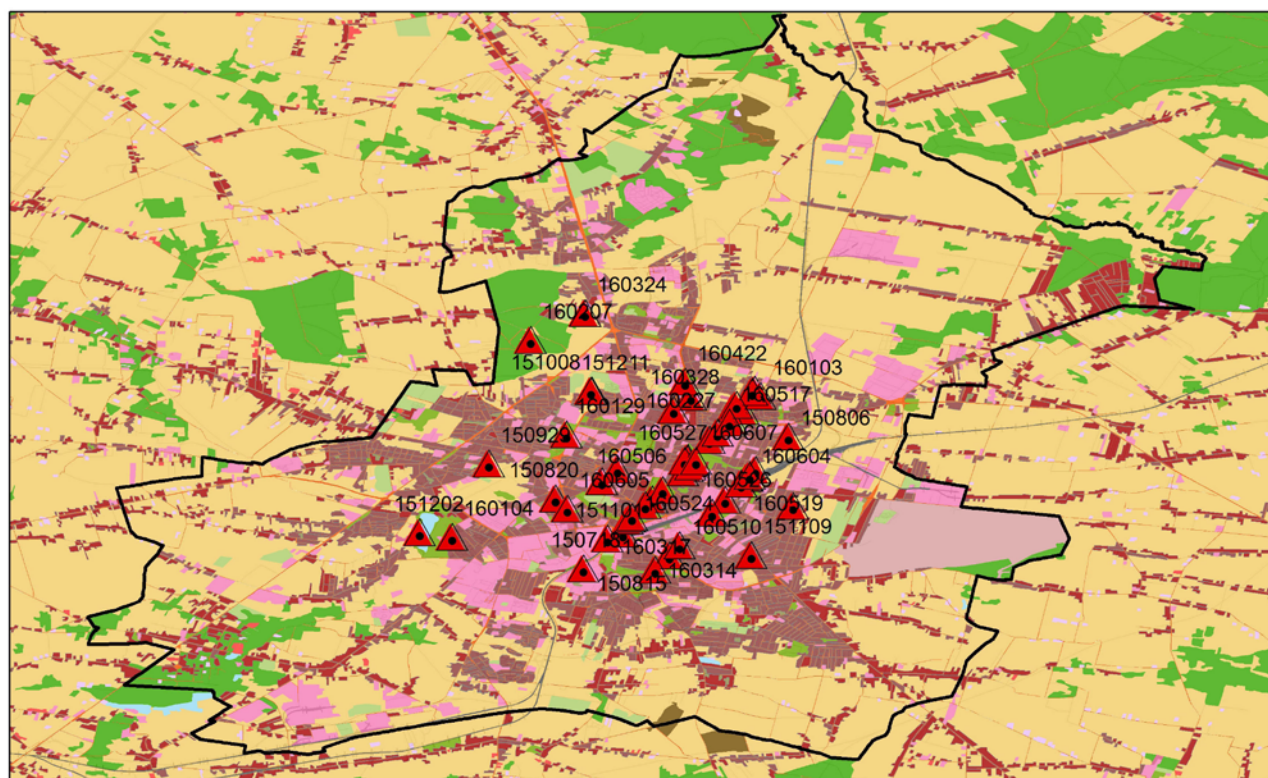
2.3.2. Lokalizacja skrajnych (najwyższych i najniższych) temperatur powierzchni w Radomiu w okresie 06.2015-06.2016, 2 przypadki: noc i dzień

Dla każdego obrazu satelitarnego wydzielono dwa punkty, odpowiadające lokalizacji najcieplejszego i najzimniejszego piksela. Najcieplejsze miejsca w mieście zarówno w nocy jak i dzień znajdują się najczęściej w centrum miasta (Rysunek 10, Rysunek 11). Jest to obszar o najwyższym stopniu urbanizacji, który jest związany z wysoką nieprzepuszczalnością powierzchni. Stąd występowanie najwyższych LST w tych obszarach jest często spotykane w różnych miastach (Azevedo i inni 2016, Gawuć i Strużewska 2016). Nie mniej, występują przypadki, gdy lokalizacja najcieplejszego LST znajduje się poza ścisłym centrum. 1 stycznia 2016 najcieplejsze miejsce w dzień znajdowało się na obszarze pól uprawnych na zachód od miasta poza granicami administracyjnymi. Kilka razy (w dzień 29 listopad 2015 i 31 grudnia 2015 oraz w nocy 4 stycznia 2016 i 2 grudnia 2015) najcieplejsze miejsce było zlokalizowane w pobliżu Zalewu Borki. W nocy 7 lutego 2016 najcieplejszy piksel obrazu satelitarnego znajdował się na obszarze Lasu Kapturskiego (Rysunek 10). Podobnych przypadków jest więcej (Rysunek 11). Uogólniając, zarówno w dzień jak i w nocy najczęściej najcieplejsze miejsce zlokalizowane jest prawie zawsze w ścisłym centrum miasta. Niemniej, zdarza się, że znajduje się ono poza centrum lub nawet poza zurbanizowaną częścią miasta.

Analogicznie do przypadków maksymalnych temperatur, najniższe temperatury występują poza centrum miasta, zarówno w nocy (Rysunek 12) jak i w dzień (Rysunek 13). W nocy można zaobserwować trzy skupiska występowania najniższych LST: w północnej części miasta, na południowy wschód i południowy zachód. W dwóch przypadkach nocnych (2 i 11 grudnia 2015) najniższa LST była zaobserwowana w obrębie lotniska. Na południowy wschód od centrum najniższe temperatury są notowane najczęściej na jesieni (3 przypadki) oraz w lecie (3 przypadki). Na południowy zachód najniższe LST są notowane na jesieni (3 przypadki), w zimie (4 przypadki). Na północ od centrum miasta notuje się najniższe temperatury bardzo często w ciągu roku, lecz najczęściej w ciepłych porach roku.

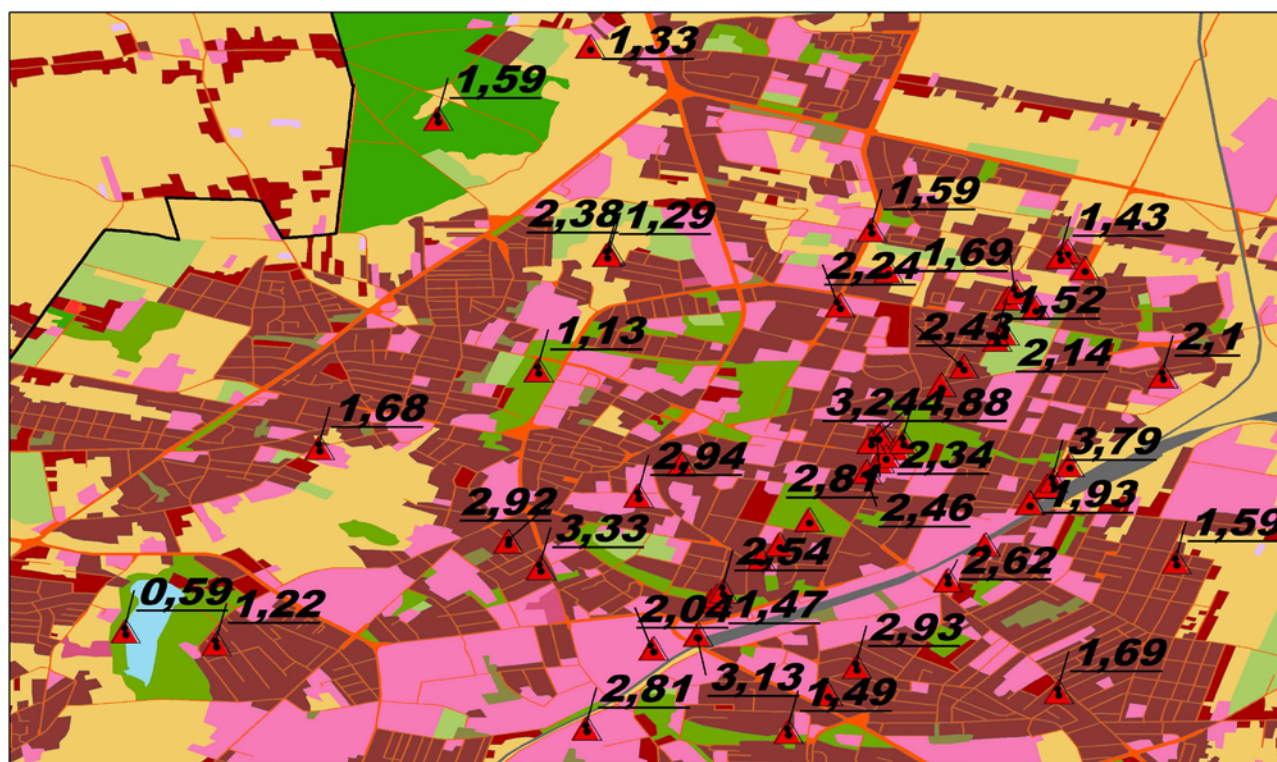
Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu (temp. powierzchni)

Instrument MODIS (1 km), 56 obrazów satelitarnych, okres 06.2015-06.2016, Noc ok. 00-01 UTC



0 1,25 2,5 5 Kilometers

Pojedynczy punkt oznacza środek piksela o rozdzielczości 1 km



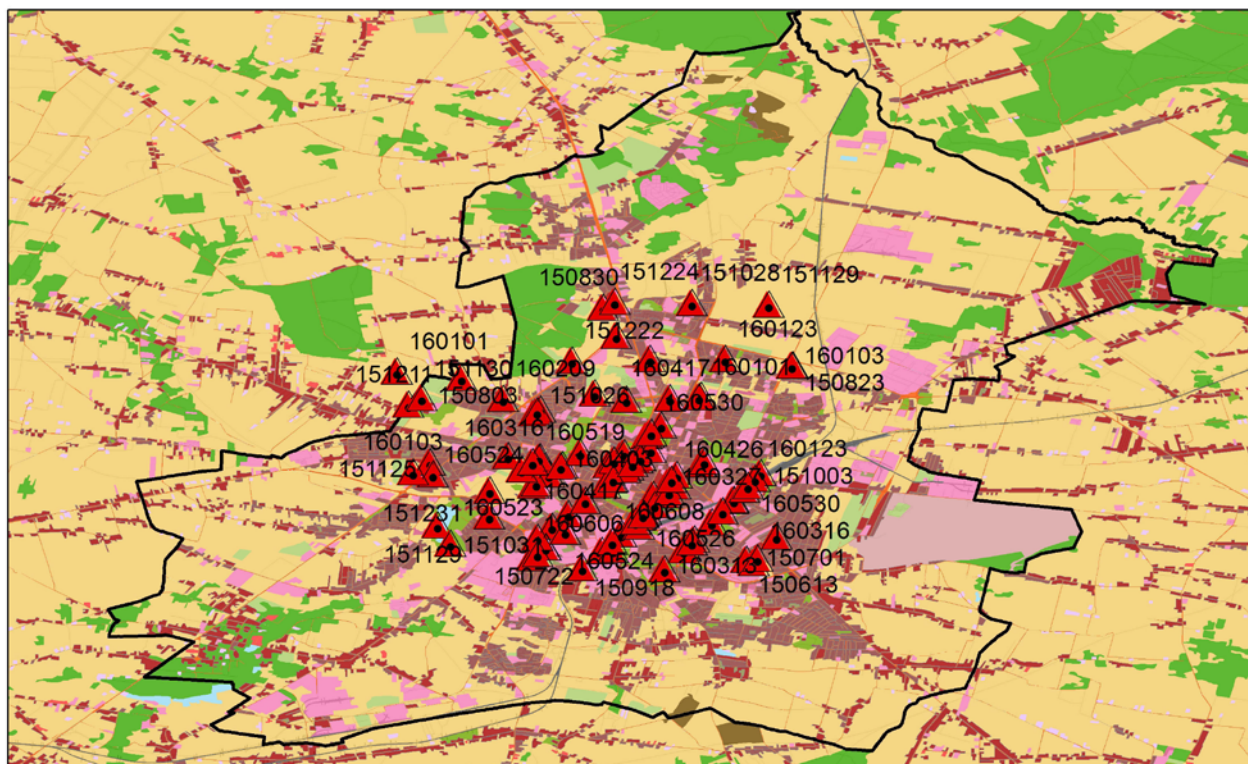
0 0,75 1,5 3 Kilometers

Pojedynczy punkt oznacza środek piksela o rozdzielczości 1 km
(etykieta to wartość wskaźnika PMWC "magnitudo")

Rysunek 10 Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu w nocy.

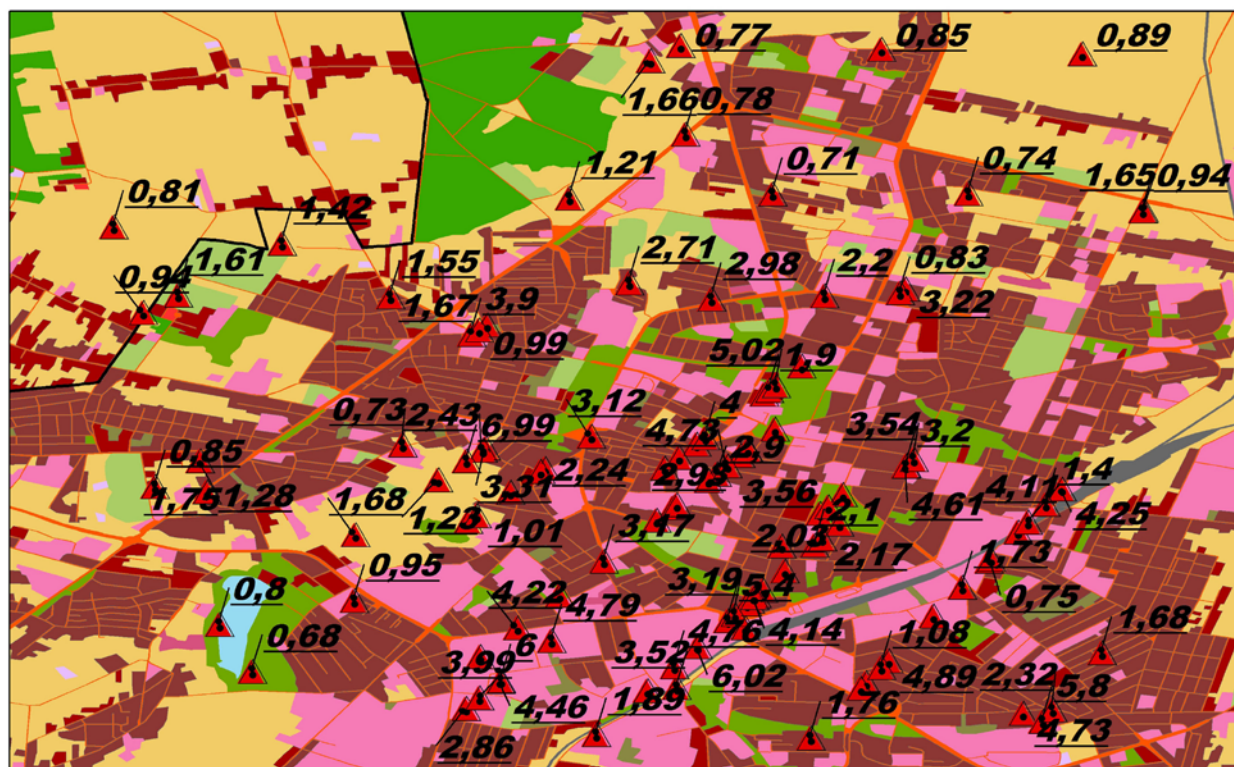
Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu (temp. powierzchni)

Instrument MODIS (1 km), 109 obrazów satelitarnych, okres 06.2015-06.2016, Dzień ok. 09-12 UTC



0 1,25 2,5 5 Kilometers

Pojedynczy punkt oznacza środek piksela o rozdzielczości 1 km



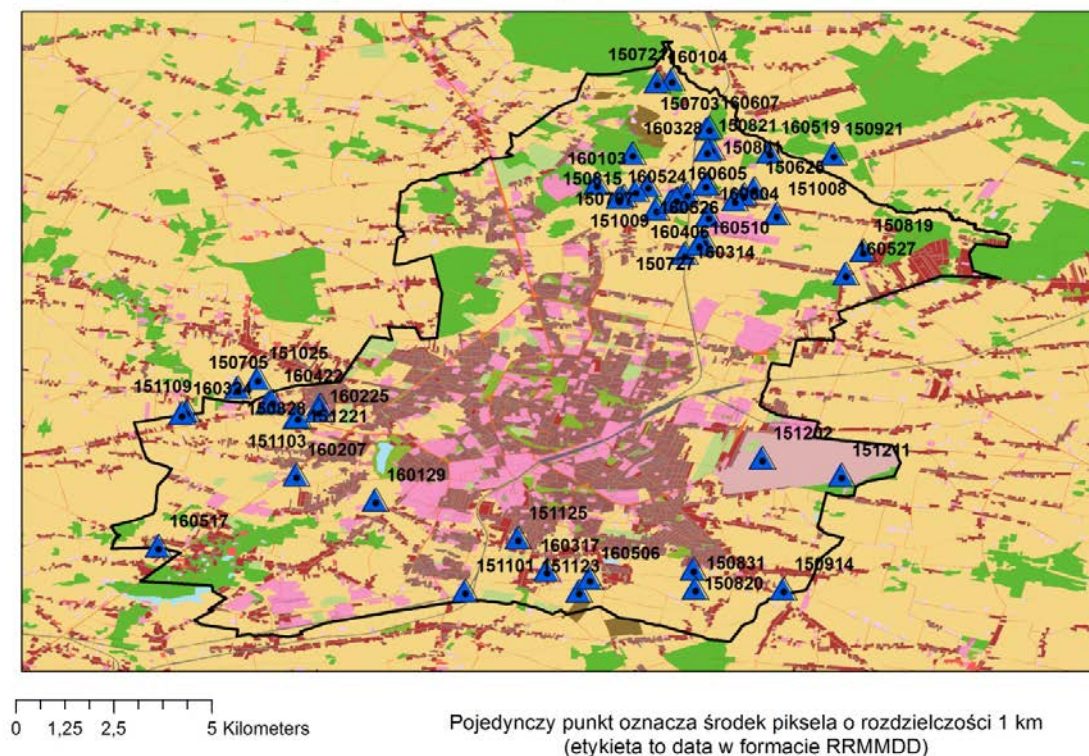
0 0,75 1,5 3 Kilometers

Pojedynczy punkt oznacza środek piksela o rozdzielczości 1 km
(etykieta to wartość wskaźnika PMWC "magnitude")

Rysunek 11 Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu w dzień.

Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu (temp. powierzchni)

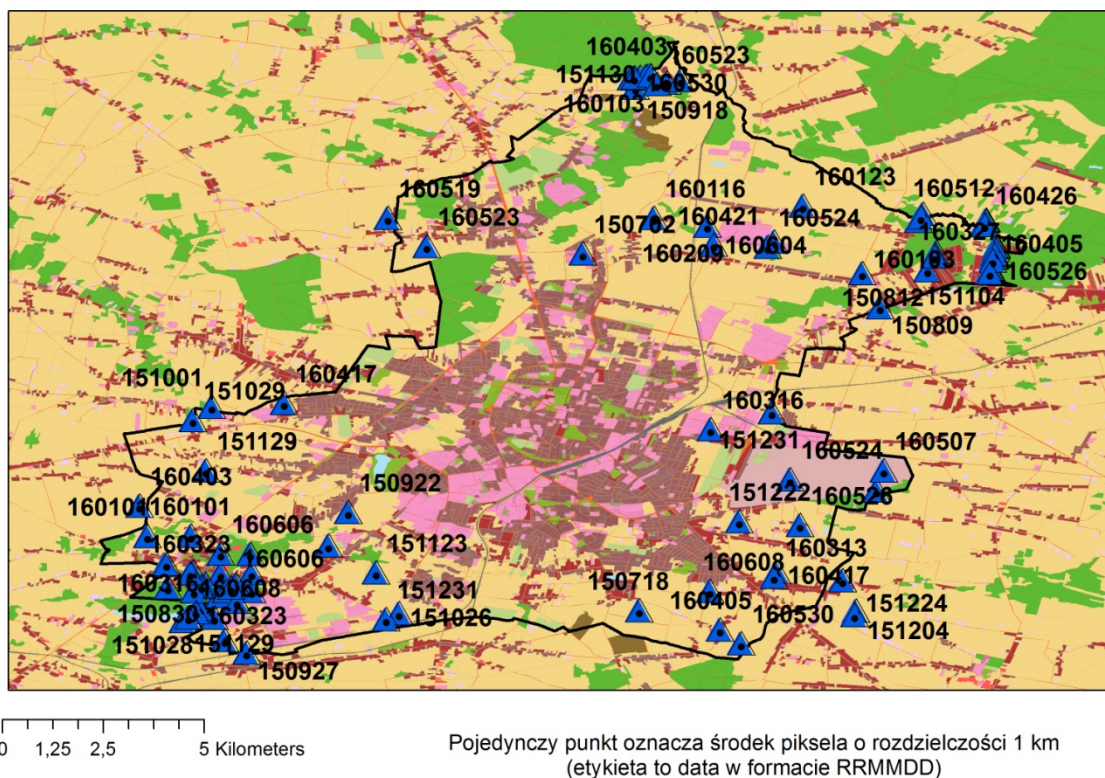
Instrument MODIS (1 km) , 56 obrazów satelitarnych, okres: 06.2015 - 06.2016. Noc ok. 00-01 UTC



Rysunek 12 Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu w nocy.

Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu (temp. powierzchni)

Instrument MODIS (1 km), 109 obrazów satelitarnych, okres: 06.2015 - 06.2016. Dzień ok. 09-12 UTC

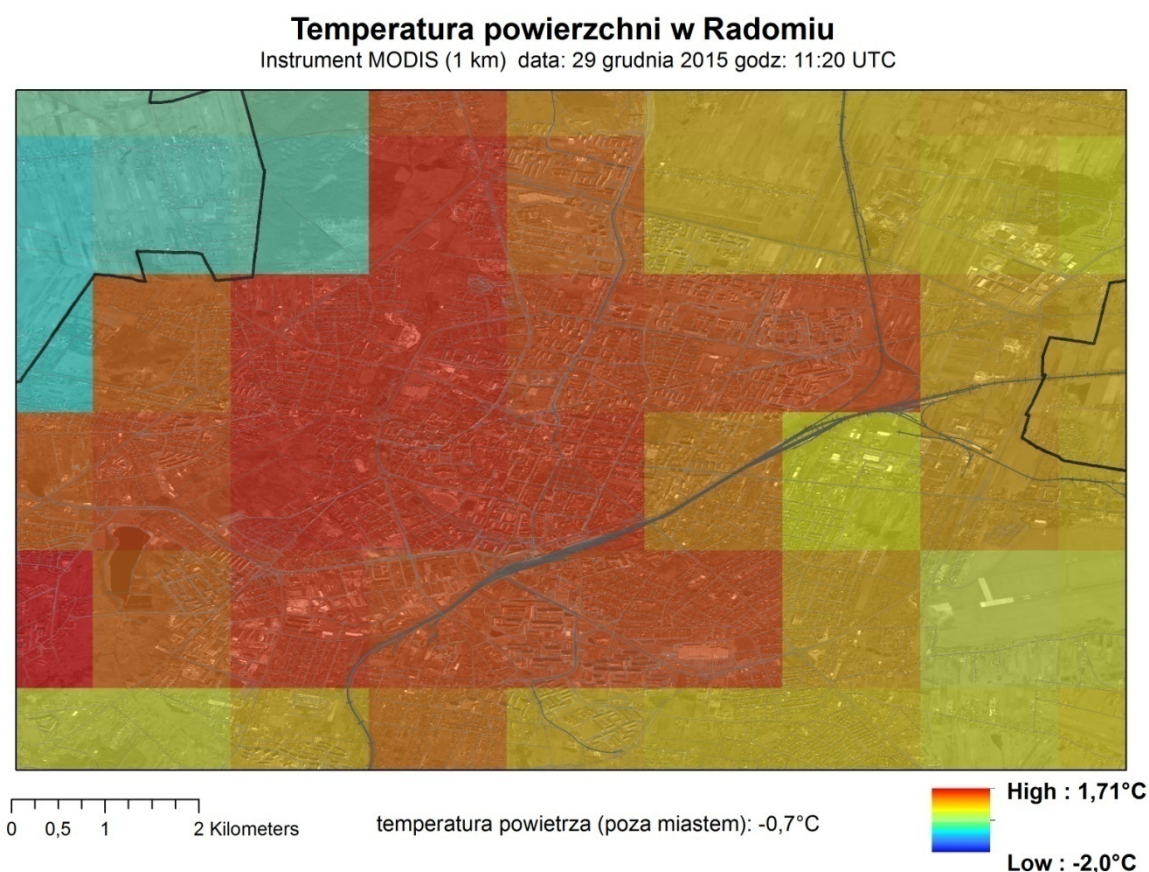


Rysunek 13 Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu w dzień.

W ciągu dnia lokalizacje najniższych LST są bardziej rozproszone niż w nocy, nie mniej, widoczne jest wyraźne skupisko najniższych LST zlokalizowane na południowy zachód od centrum miasta. Pozostałe lokalizacje są rozproszone na południowy wschód, na wschód oraz na północ od centrum miasta (Rysunek 13). Występowanie najniższych LST w ciągu różnych sezonów jest zmienne. Nie da się jednoznacznie powiązać konkretnych lokalizacji z porami roku.

2.3.3. Zmienność rozkładu LST w ścisłym centrum miasta

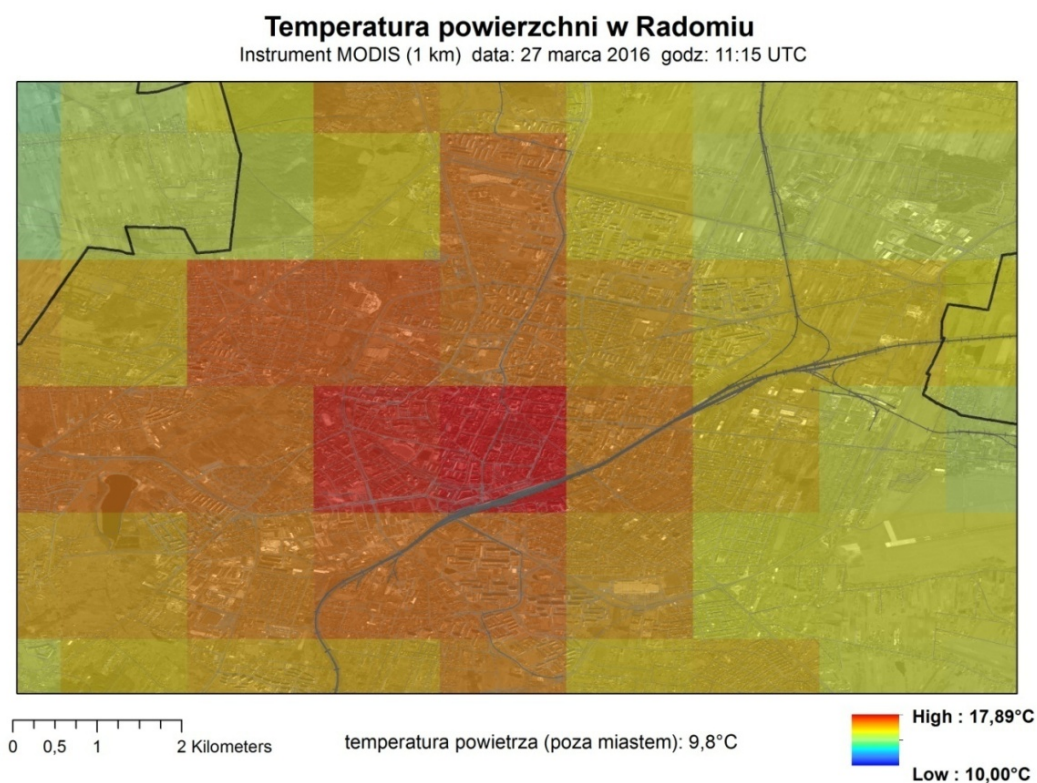
Najwyższe temperatury w większości przeanalizowanych wyżej przypadków występują w centrum miasta. Jest to ta część Radomia, która jest najsilniej zurbanizowana oraz mieszka w niej największej mieszkańców. Dlatego też, w celu dokładnego opisu rozkładu LST w centrum sporządzono szczegółowe mapy dla tego obszaru.



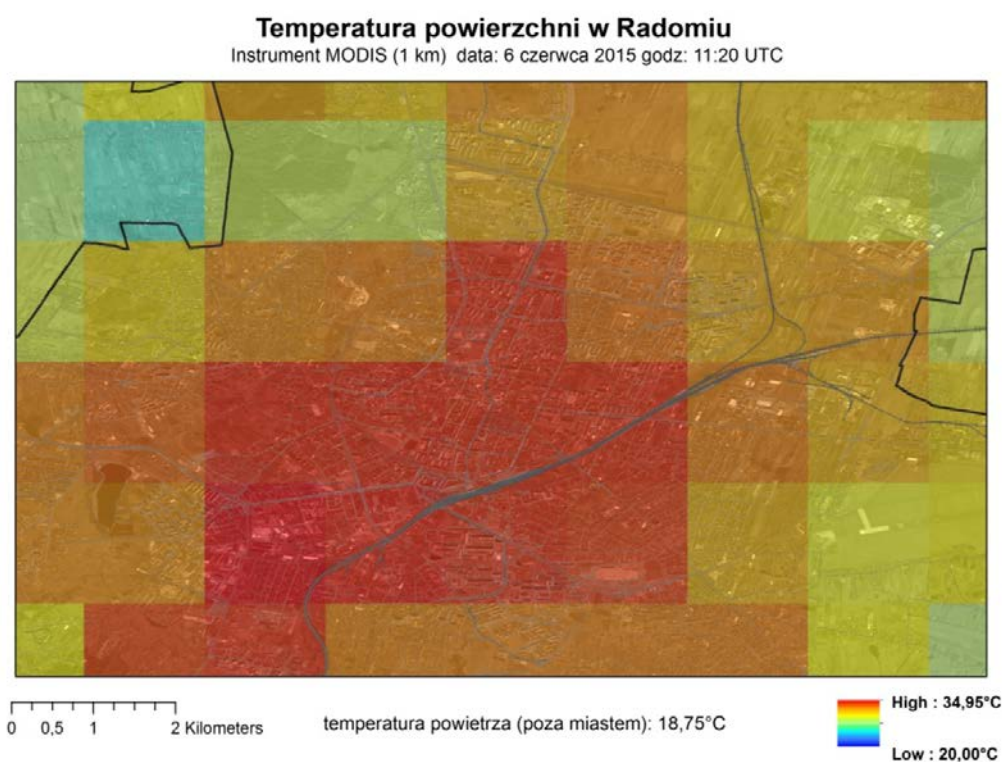
Rysunek 14 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 0°C.

W przypadku „progu 0°C” najwyższe temperatury powierzchni notowane są w osiedlach Kaptur, Obozowisko, Stare Miasto oraz Śródmieście (Rysunek 14). Na północny zachód od centrum notowane są wyraźnie niższe LST (występowanie Lasu Kapturskiego). Na północny wschód oraz na wschodzie temperatury są bliskie średniej (Stara i Nowa Wola Gołębiowska, Gołębiów, Dzierzków).

W przypadku wystąpienia temperatury powietrza wynoszącej ok. 10°C najwyższe LST jest zaobserwowane w ścisłym centrum (2 czerwone piksele na Rysunek 15). Ten obszar odpowiada osiedlom Śródmieście oraz częściowo Planty. Pozostałe osiedla mają coraz niższą LST w miarę oddalania się od centrum. Charakter LST można określić jako scentralizowany wokół Śródmieścia, z zaznaczeniem, iż LST wolniej maleje w miarę oddalania się od centrum w kierunku zachodnim niż w kierunku wschodnim.

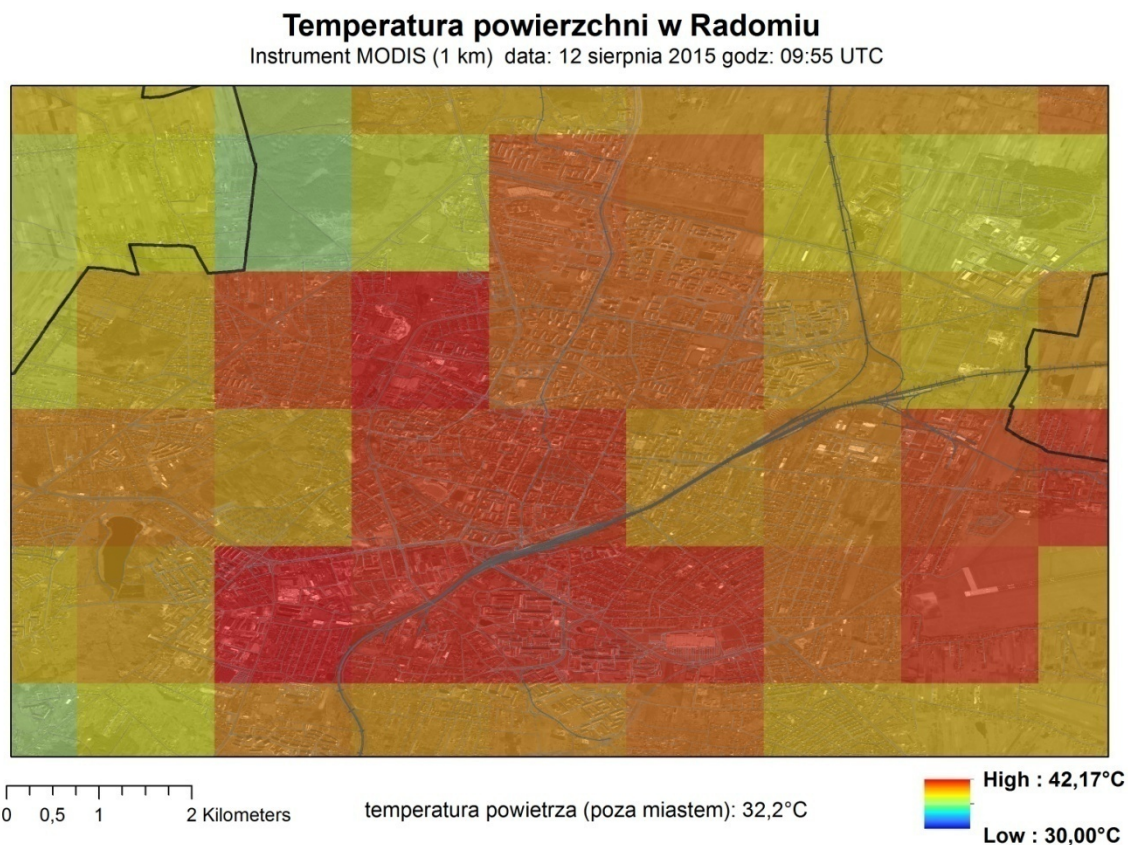


Rysunek 15 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 10°C.



Rysunek 16 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 20°C.

Wysokie temperatury powierzchni w przypadku „progu 20°C” pokrywają niemal całe centrum miasta (Rysunek 16). Najwyższą LST zanotowano na osiedlach Borki oraz Żakowice (34,95°C). Śródmieście, które najczęściej ma najbardziej nagrzane powierzchnie ma nieznacznie niższą LST (34,57°C).



Rysunek 17 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 30°C.

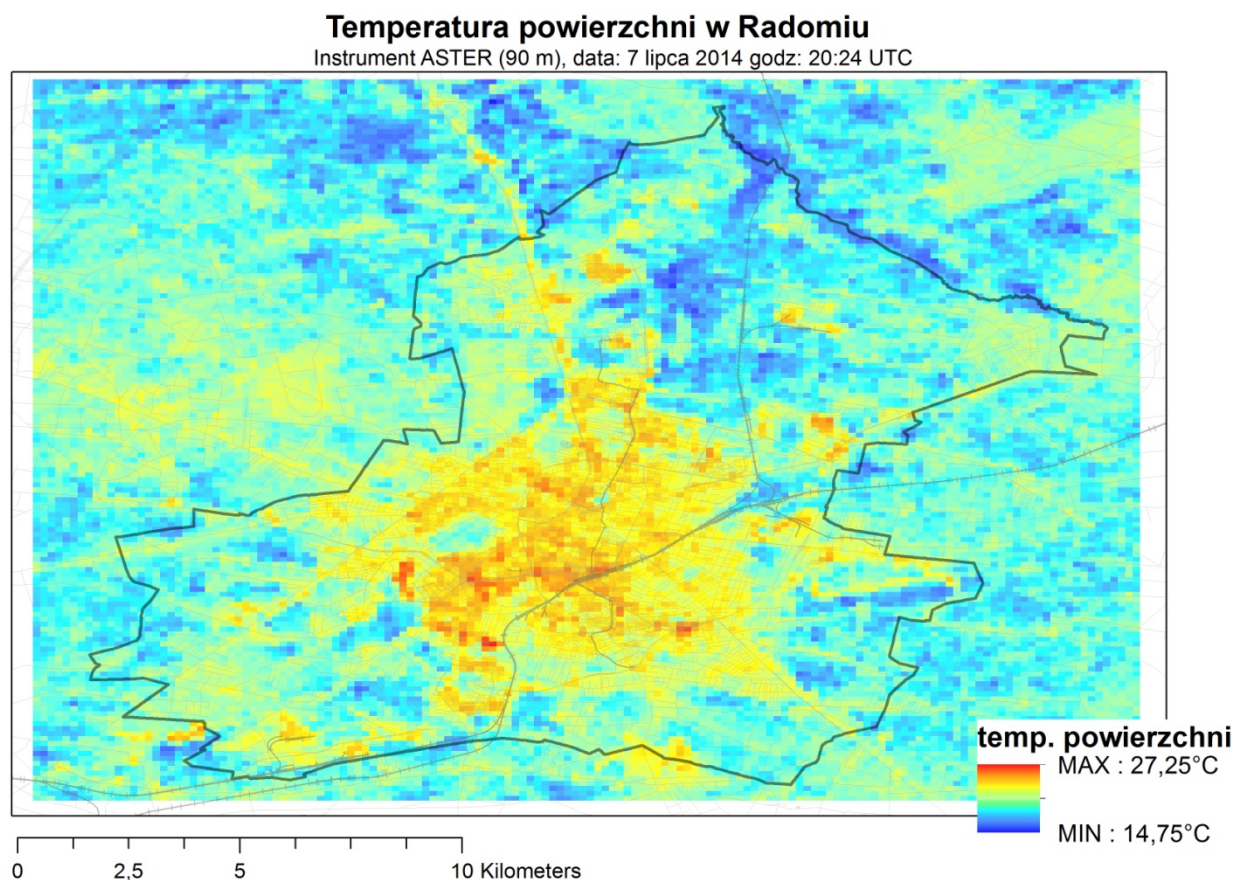
W przypadku bardzo wysokiej temperatury powietrza (32,2°C) rozkład LST w centrum kształtuje się inaczej niż w pozostałych przypadkach (Rysunek 17). Nie ma charakteru koncentrycznego. LST wykazuje stosunkowo dużą zmienność przestrzenną. Powstaje kilka ognisk wysokiej temperatury powietrzni (osiedla Borki oraz Żakowice na południowy zachód od centrum - 42,17°C, osiedla Kaptur i Obozowisko - 42,09°C - na północny zachód od centrum oraz okolice lotniska Sadków na wschodzie - 41,85°C). LST w Śródmieściu jest porównywalna, aczkolwiek nie jest najwyższa (41,81°C). Brak koncentrycznego charakteru LST na obrazie MODIS może być związane z wystąpieniem częściowego zachmurzenia przed dokonaniem pomiaru satelitarnego, opadami deszczu i zróżnicowaną wilgotnością powierzchni lub specyficznymi właściwościami termicznymi powierzchni.

2.4. Warunki termiczne w Radomiu określone za pomocą zobrazowań satelitarnych ASTER o wysokiej rozdzielczości przestrzennej.

Ze względu odmienną charakterystykę instrumentu ASTER, w okresie kilku ostatnich lat jedynie jedno zobrazowanie satelitarne zarejestrowane przez ten sensor było odpowiednie do przeprowadzenia analizy warunków termicznych w Radomiu. Pozyskane zobrazowanie zostało zarejestrowane 7 lipca 2014 o godzinie 20:24 UTC (Rysunek 18). W tym czasie pozamiejska temperatura powietrza wynosiła 20,5°C. Obraz temperatury powierzchni jest znacznie bardziej szczegółowy, jednakże pojedyncze zobrazowanie satelitarne nie pozwala na analizę zmienności czasowej. Ponadto, należy zauważyć, iż zdjęcie zostało zarejestrowane wieczorem, kilkadziesiąt minut przed zachodem Słońca, które tego dnia miało miejsce o godzinie 20:51 UTC. Powierzchna

ziemi, w ogólnym przypadku przy bezchmurnym niebie, zaczyna się wychładzać na kilka godzin przed zachodem Słońca (Oke 1982). Najczęściej najsilniejsza MWC związana z temperaturą powietrza występuje podczas pogodnych bezchmurnych nocy, najczęściej 2-3 godziny po zachodzie słońca (Fortuniak 2003).

Podsumowując, ze względu na specyficzny moment pomiaru satelitarnego (niedługo przed zachodem słońca) rozkład LST może nie być typowy dla pory nocnej, ani dla pory dziennej. Nie mniej, wysoka temperatura jest najczęściej najbardziej uciążliwa w ciągu nocy, wtedy też, ma miejsce najwięcej zgonów, zwłaszcza wśród osób starszych (Dousset i inni 2011, Taylor i inni 2015). Czas rejestracji obrazu satelitarnego (22:24 czasu lokalnego), odpowiada porze gdy znaczna część mieszkańców udaje się spać i może być narażona na negatywne skutki wysokiej temperatury powietrza i silnej MWC oraz PMWC.



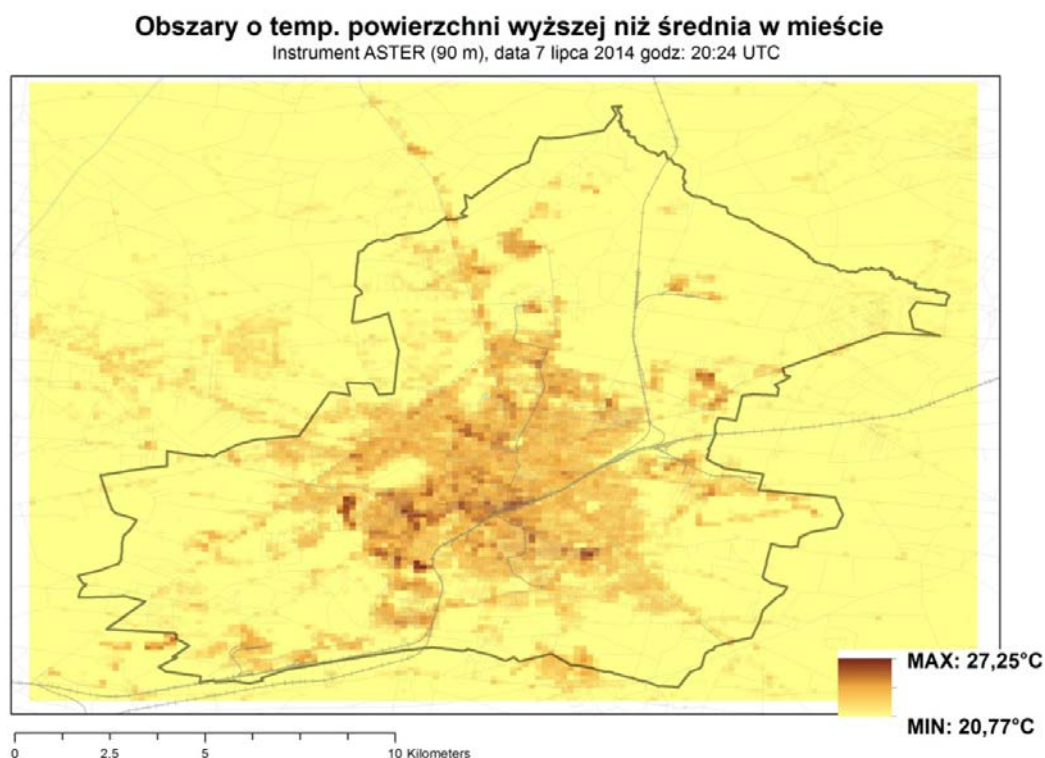
Rysunek 18 Temperatura powierzchni w Radomiu zarejestrowana przez instrument ASTER.

Rysunek 18 przedstawia mapę temperatury powierzchni z rozdzielczością przestrzenną 90 metrów. Wyraźnie widoczny jest ścisły związek LST z rodzajem pokrycia terenu. Wyraźnie widoczna jest podwyższona temperatura w obszarach zabudowanych i niższa w obszarach o dużej frakcji powierzchni naturalnych.

Zobrazowania satelitarne MODIS, ze względu na swoją niską rozdzielczość przestrzenną (1 km), w większości przypadków dają możliwość zaobserwowania wyraźnego pojedynczego ogniska najwyższej LST. Dzięki zastosowaniu obrazu ASTER o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (90 m) okazuje się, iż rozkład przestrzenny w Radomiu nie jest koncentryczny z wyraźnym centrum. Tworzy się kilka ognisk najwyższej LST w obrębie miasta (Rysunek 18,

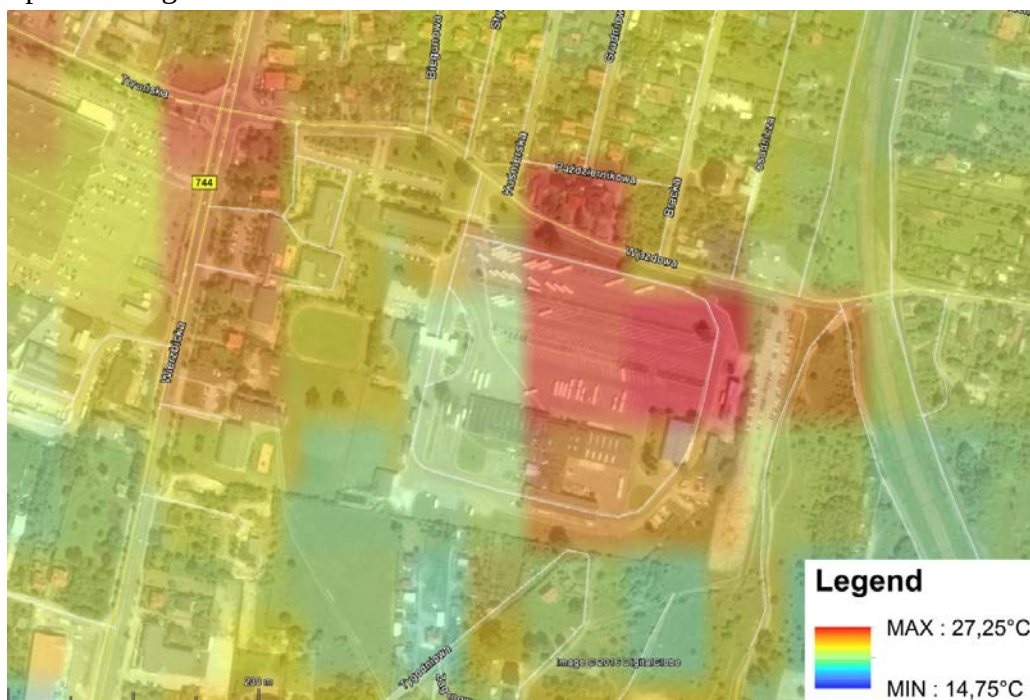
Rysunek 21). W takim przypadku można mówić o wystąpieniu tzw. „miejskim archipelagu ciepła” (Buyantuyev i Wu 2010).

Rysunek 19 ilustruje jaka część miasta miała wyższą LST niż średnia w mieście. Stwierdzić można, iż cały obszar zurbanizowany miasta ma wyższą LST niż średnia.



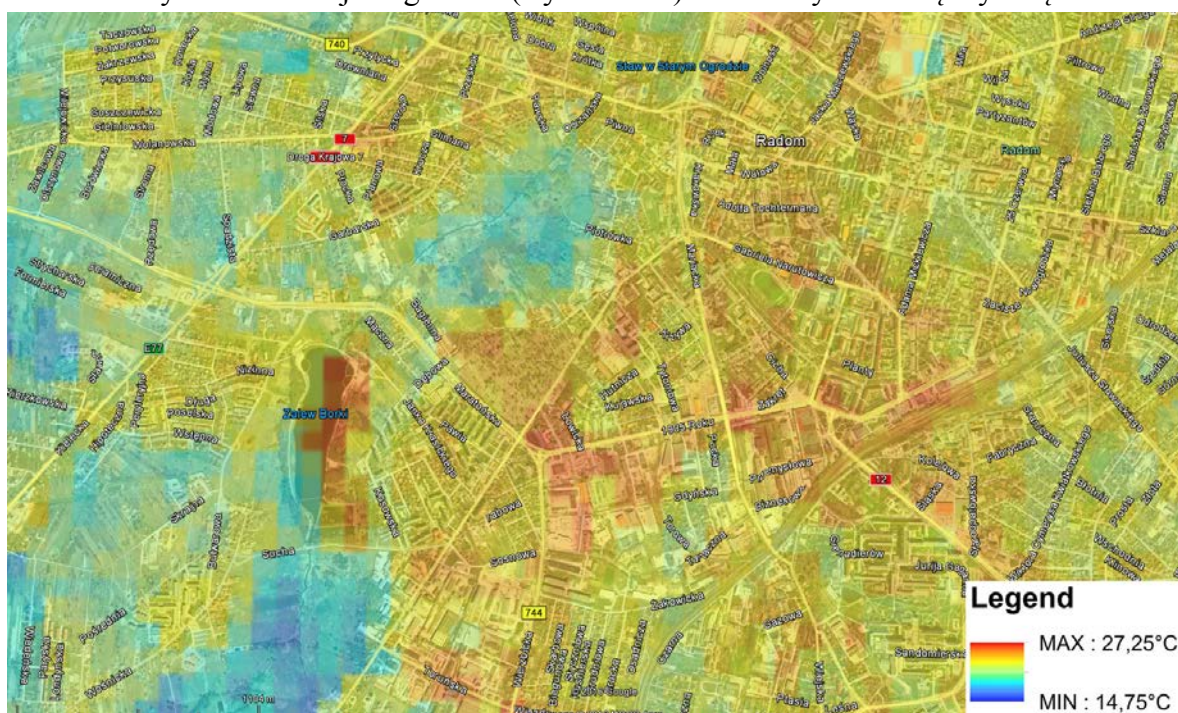
Rysunek 19 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście (obraz satelitalny ASTER).

Najwyższe LST ($27,24^{\circ}\text{C}$) zostało zaobserwowane na terenie zajezdni autobusowej Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacji (Rysunek 20). Teren ten stanowi duży plac zbudowany z asfaltu lub betonu, na którym znajduje się duża ilość autobusów, które wydzielają ciepło. Stąd, tak wysoka temperatura tego obszaru nie dziwi.



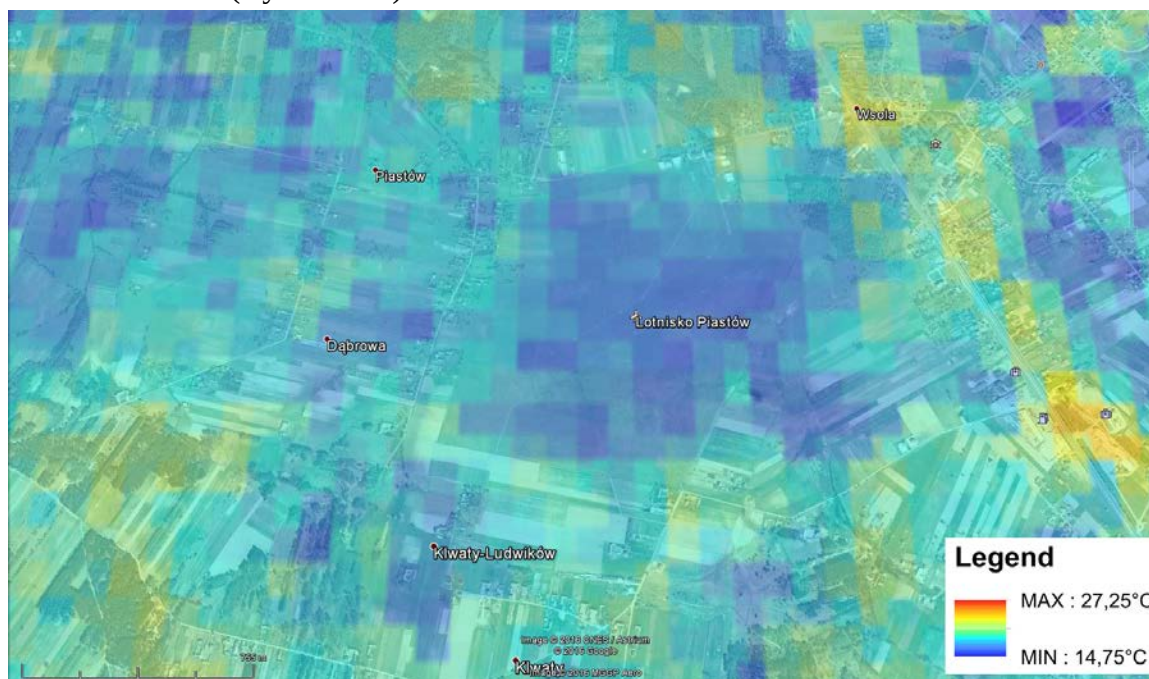
Rysunek 20 Lokalizacja najwyższej zaobserwowanej temperatury powierzchni.

Wysokie LST zostały zaobserwowane również na południowy zachód od centrum miasta, na obszarze Zalewu Borki, co wskazuje na to, iż woda Zalewu była bardziej nagrzana niż większość powierzchni miejskich (Rysunek 21). Obszar przemysłowy zamknięty ulicami Wierzbicką od zachodu, ul. 1905 Roku od północy, Żakowicką od południa oraz Grzecznarowskiego od wschodu oraz na w okolicy dworca kolejowego PKP (Rysunek 20) charakteryzował się wysoką LST.

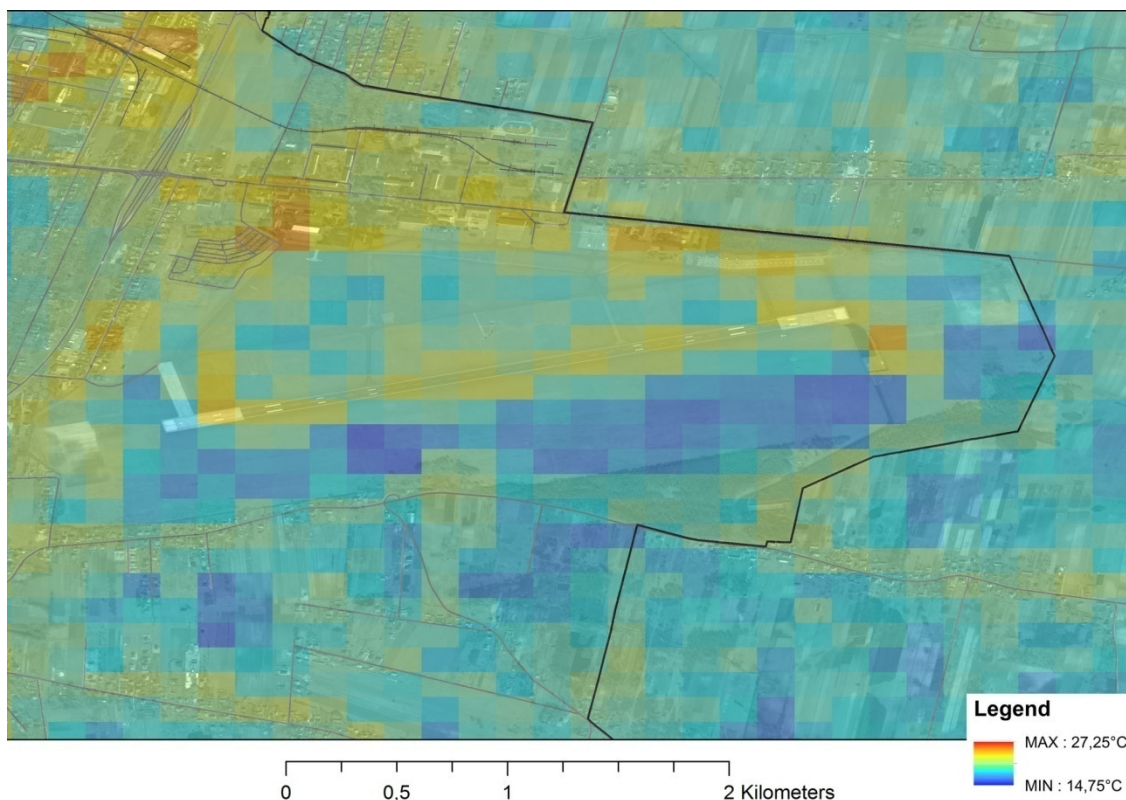


Rysunek 21 Rozkład przestrzenny LST w Radomiu (obraz satelitarny ASTER).

Infrastruktura drogowa oraz lotniskowa również charakteryzuje się wysokim LST. Drogi Krajowe nr 9 i 7 wyraźnie odznaczają się na tle otaczających je powierzchni o ok. 5-7°C (Rysunek 22). W części północnej znajduje się trawiaste lotnisko Radom-Piastów o LST ok. 16°C (Rysunek 22), a we wschodniej wyraźnie widoczny jest betonowy pas startowy lotniska Sadków o temperaturze ok. 22°C (Rysunek 23).

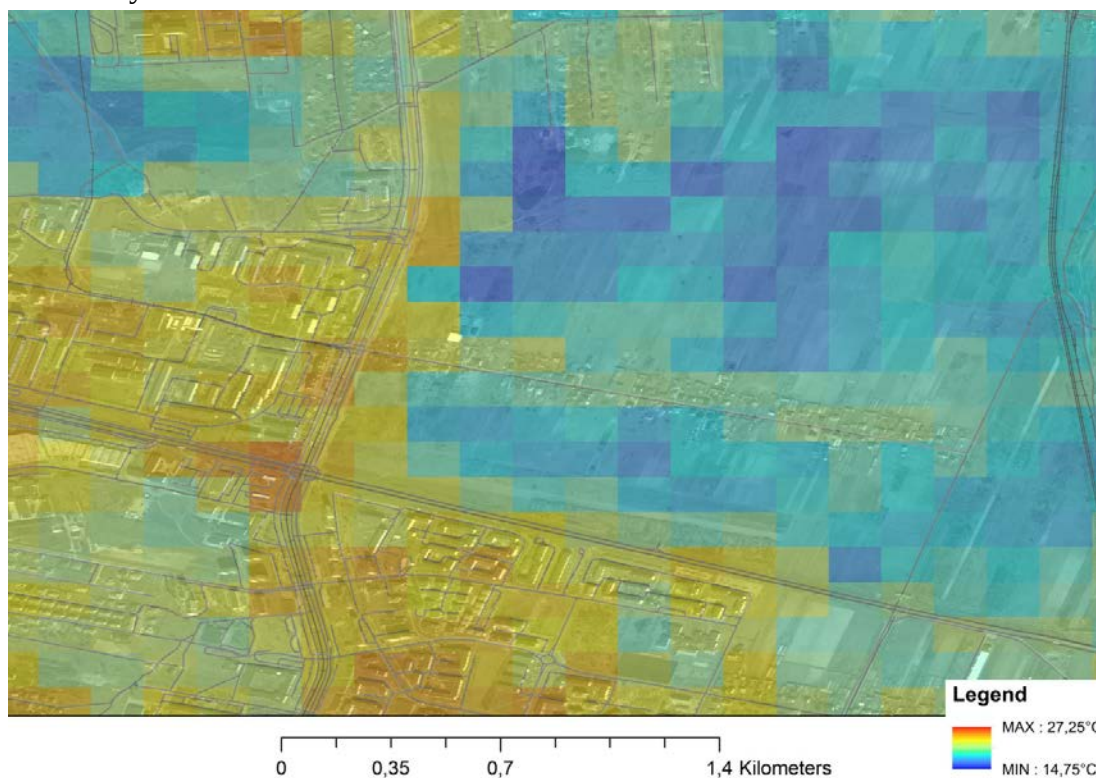


Rysunek 22 Temperatura powierzchni w okolicy lotniska Radom-Piastów oraz drogi krajowej DK 7.



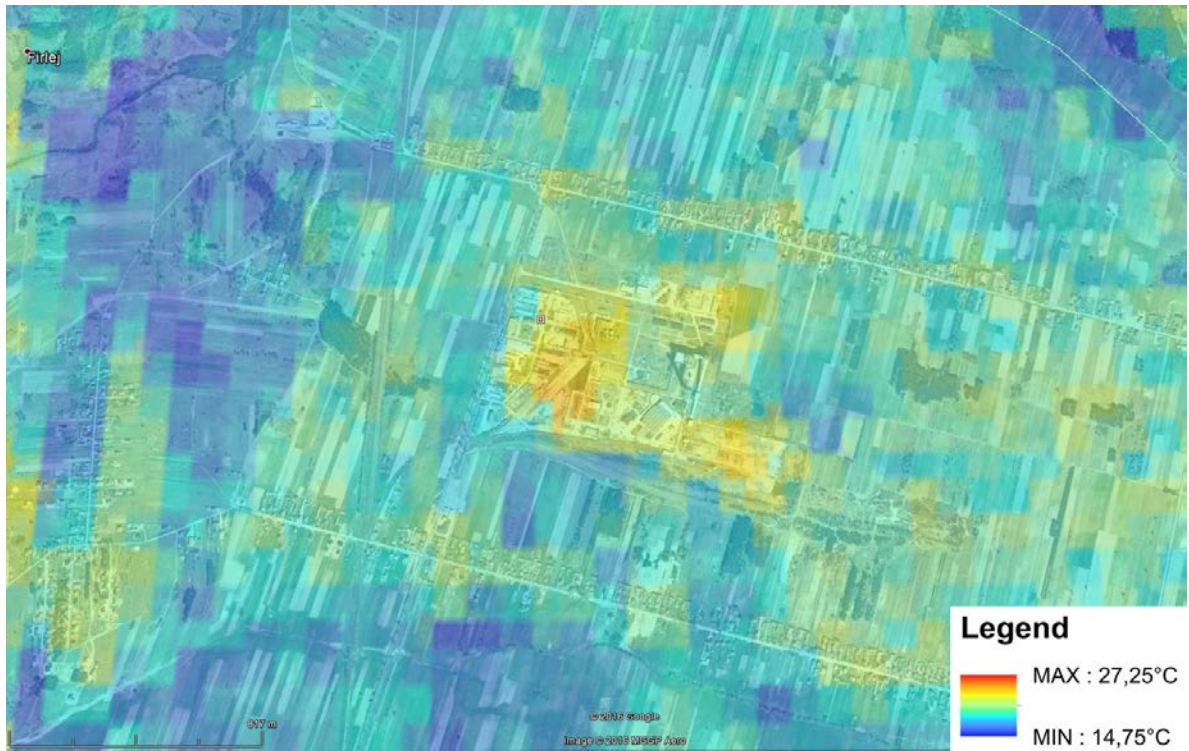
Rysunek 23 Temperatura powierzchni w okolicy lotniska Radom-Sadków.

Wyraźny związek między rodzajem zagospodarowania a temperaturą powierzchni pokazuje Rysunek 24. Pola uprawne w północno wschodniej części tego obszaru mają niskie LST ok. 17°C. Zabudowa jednorodzinna ma niewiele wyższą temperaturą powierzchni (ok. 20°C), jednak kontrast termiczny jest wyraźnie widoczny. Osiedla znajdujące się na zachód od ul. Mieszka I oraz na południe od ul. Żółkiewskiego są gęściej wyższą zabudową mieszkaniową. W porównaniu do pól kontrast termiczny dochodzi do ok. 6-8°C.

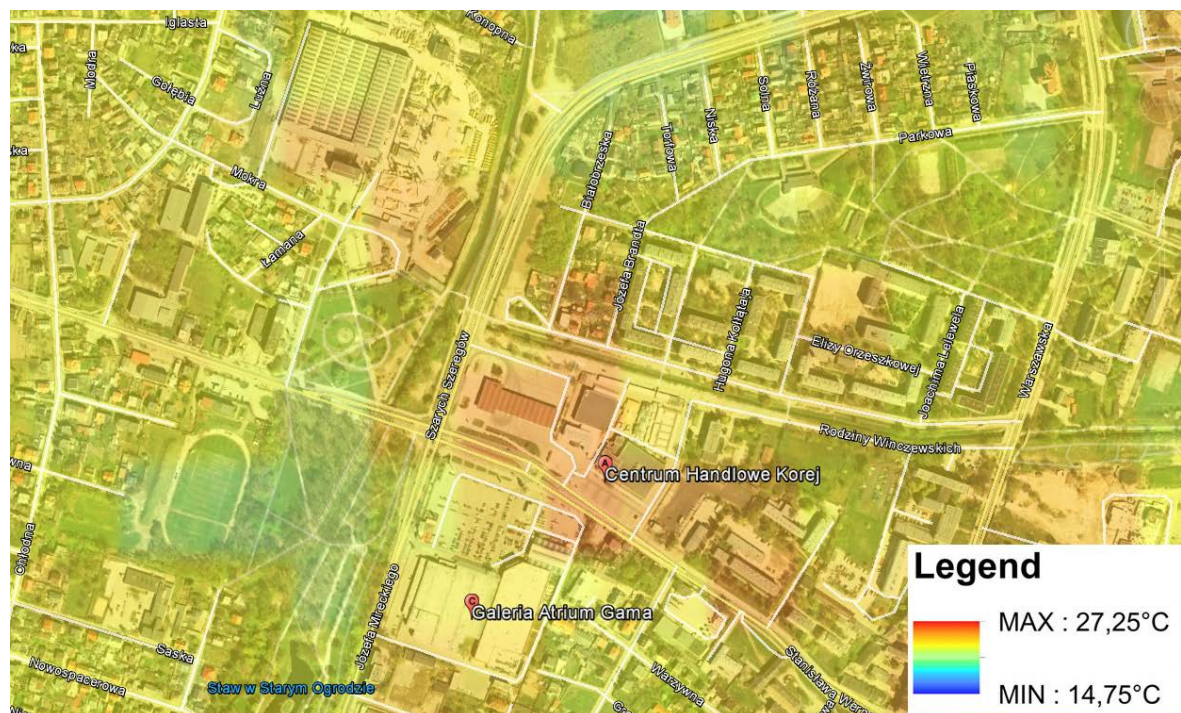


Rysunek 24 Temperatura powierzchni w okolicy ulicy Brzustowskiej.

Podwyższenie LST jest związane nie tylko z zabudową mieszkalną, lecz także z przemysłową. Różnice w LST zależą od rodzaju produkcji przemysłowej, wielkości powierzchni zakładu przemysłowego oraz rodzaju zastosowanych materiałów budowlanych. Rysunek 25 pokazuje rozkład LST w okolicach terenu przemysłowego przy ul. Energetyków (o temp. powierzchni ok. 24°C) Podwyższona LST jest wyraźnie widoczna na tle otaczających pól (LST ok. 18°C), jak również w stosunku do zabudowy jednorodzinnej (LST ok. 20°C) na północ oraz południe od zakładów przemysłowych.



Rysunek 25 Temperatura powierzchni w okolicy ulicy Energetyków (osiedle Wola Gołębiowska).



Rysunek 26 Temperatura powierzchni w okolicy centrów handlowych w Radomiu.

Z wielu opublikowanych prac naukowych wynika, iż wysoka temperatura powierzchni jest obserwowana bardzo często na obszarze centrów handlowych (Jędruszkiewicz i Zieliński 2012). Przyczyną tego jest m. in. praca klimatyzatorów czy innych urządzeń elektrycznych oraz często obecność dużych placów parkingowych. W przypadku przeanalizowanego obrazu satelitarnego ASTER zarejestrowanego 7 lipca 2014 (poniedziałek) centra handlowe mają wysoką temperaturę powierzchni (ok. 22-25°C), lecz nie odznacza się ona ewidentnie na tle miasta (Rysunek 26).

Poniżej zaprezentowano wartości intensywności PMWC oraz średniej LST zaobserwowanej w mieście w obrębie granic administracyjnych oraz poza miastem czyli poza granicami administracyjnymi (Tabela 3).

Tabela 3 Wartości wskaźników intensywności PMWC dla obrazu satelitarnego ASTER.

PMWC:	„magnitude”	„Inside urban - insiderural”	„range”	Pozamiejska temperatura powietrza	Średnia LST w mieście	Średnia LST w terenie pozamiejskim	Średnia LST w całym obszarze
wartość	6,08°C	2,15°C	11,70°C	20,5°C	20,77°C	19,56°C	20,09°C

Temperatura powietrza, która wyniosła (po interpolacji liniowej) 20,5°C, jest bardzo zbliżona do średnich LST dla wydzielonych obszarów. Wskaźniki "magnitude" oraz "range" wskazują na wystąpienie bardzo silnej PMWC, nie mniej, należy pamiętać, że są one obliczane za pomocą skrajnych wartości temperatury. Biorąc pod uwagę wysoką rozdzielczość przestrzenną ASTER (90 m), można stwierdzić, że te wskaźniki mogą nie być miarodajne w skali całego miasta. Nie mniej, wskaźnik "inside urban - inside rural", jako że jest obliczany jako różnica w średniej z dwóch obszarów, jest bardziej miarodajny co do wielkości nadwyżki temperatury w mieście w stosunku do terenów pozamiejskich.

Wartość średniej temperatury powierzchni wynosząca około 20°C, która jest bardzo zbliżona do temperatury powietrza poza miastem skłania do konkluzji, iż 7 lipca 2014 nie był zbyt gorącym dniem. Jak opisano w poprzednich rozdziałach, średnia temperatura powierzchni obszaru administracyjnego Radomia w upalne dni może przekroczyć 40°C (Wykres 1A), a dla pojedynczych pikseli (wybranych lokalizacji) można się spodziewać znacznie wyższych wartości temperatury.

3. Podsumowanie i wnioski

Selekcja danych pozwoliła na wybranie 109 obrazów satelitarnych zarejestrowanych w dzień, 56 obrazów zarejestrowanych w nocy oraz 68 obrazów zarejestrowanych wieczorem, co daje w sumie 233 obrazy satelitarne powierzchni Radomia. Obrazy zostały zarejestrowane pod niskim kątem od nadiru (poniżej 40 stopni) w warunkach bezchmurnej pogody. Analiza danych prowadzi do wniosku, że zjawisko PMWC występuje w Radomiu w znakomitej większości przypadków, a zatem niemal przez cały rok o każdej porze dnia (w czasie przelotu satelity). Najwyższe natężenie PMWC zostało zaobserwowane w porze dziennej w cieplej części roku, szczególnie w lecie roku 2015 (Wykres 2). Najniższą intensywność PMWC zanotowano w zimę, wystąpiło też kilka przypadków PMWC. Rozpiętość termiczna, określona za pomocą wskaźnika „range” często w Radomiu przekracza 8°C a nawet 10°C, natomiast pozostałe wskaźniki osiągają wartości kilku stopni. W niektórych przypadkach, zwłaszcza w lecie, bardzo mocno nagrzane powierzchnie mogą

przyczyniać się do występowania bardzo wysokich temperatur powietrza, co ma znaczący negatywny wpływ na samopoczucie mieszkańców.

Rozkład przestrzenny temperatury powierzchni w Radomiu jest typowy dla miasta średniej wielkości. Charakter LST określony za pomocą obrazów MODIS jest często koncentryczny, z wyraźnym ogniskiem najwyższych temperatur powierzchni obserwowanych w ścisłym centrum miasta, czyli w obszarze o najwyższym stopniu urbanizacji. Zastosowanie danych ASTER o wysokiej rozdzielczości przestrzennej ujawnia istnienie kilku skupisk podwyższonej LST w obrębie centrum miasta.

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy są zgodne z bieżącym stanem wiedzy naukowej na temat MWC zarówno w odniesieniu do temperatury powierzchni (Voogt i Oke 2003) jak i powietrza (Arnfield 2003).

Literatura

1. Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, 1–26. doi:10.1002/joc.859
2. Azevedo, J.A., Chapman, L., Muller, C.L., 2016. Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing* 8, 153. doi:10.3390/rs8020153
3. Buyantuyev, A., Wu, J., 2009. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecol* 25, 17–33. doi:10.1007/s10980-009-9402-4
4. Dousset, B., Gourmelon, F., Laaidi, K., Zeghnoun, A., Giraudet, E., Bretin, P., Mauri, E., Vandentorren, S., 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *Int. J. Climatol.* 31, 313–323. doi:10.1002/joc.2222
5. Fortuniak, K., 2010. Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
6. Fortuniak, K., 2003. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
7. Gawuc, L., Struzewska, J., 2016. Impact of MODIS Quality Control on Temporally Aggregated Urban Surface Temperature and Long-Term Surface Urban Heat Island Intensity. *Remote Sensing* 8, 374. doi:10.3390/rs8050374
8. Hu, L., Monaghan, A., Voogt, J.A., Barlage, M., 2016. A first satellite-based observational assessment of urban thermal anisotropy. *Remote Sensing of Environment* 181, 111–121. doi:10.1016/j.rse.2016.03.043
9. Jędruszkiewicz, J., Zieliński, M., 2014. Land Surface Temperature in Łódź Obtained from Landsat 5TM. *Contemporary Trends in Geoscience* 1, 21–29. doi:10.2478/ctg-2012-0003
10. Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F., Sobrino, J.A., 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment* 131, 14–37. doi:10.1016/j.rse.2012.12.008
11. Oke, T.R., 1995. The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects, in: Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, E.J., Viegas, D.X. (Eds.), *Wind Climate in Cities*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, pp. 81–107.

12. Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. Q.J.R. Meteorol. Soc. 108, 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502
13. Schwarz, N., Lautenbach, S., Seppelt, R., 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. Remote Sensing of Environment 115, 3175–3186. doi:10.1016/j.rse.2011.07.003
14. Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K., 2012. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). Ecological Indicators 18, 693–704. doi:10.1016/j.ecolind.2012.01.001
15. Shen, H., Li, X., Cheng, Q., Zeng, C., Yang, G., Li, H., Zhang, L., 2015. Missing Information Reconstruction of Remote Sensing Data: A Technical Review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine 3, 61–85. doi:10.1109/MGRS.2015.2441912
16. Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M., Armstrong, B., Chalabi, Z., Mavrogianni, A., Symonds, P., Oikonomou, E., Bohnenstengel, S.I., 2015. Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. Urban Climate 14, Part 4, 517–528. doi:10.1016/j.uclim.2015.08.001
17. Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, Urban Remote Sensing 86, 370–384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Listą załączników

1. Przetworzone obrazy satelitarne temperatury powierzchni (233 obrazy MODIS oraz 1 obraz ASTER w formacie geoTIFF w układzie WGS84).

2. Pliki tekstowe zawierające zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników. Pliki mają następujące nagłówki:

Lp.	Nagłówek	opis
1	platform__DOY	Nazwa sensora satelitarnego („mod” - MODIS/TERRA, „myd” - MODIS/AQUA) oraz numer dnia w roku
2	date	Data w formacie RRRRMMDDGGMM (12 cyfr)
3	ggmm	Godzina i minuta w formacie GGMM
4	airT	Temperatura powietrza obserwowana na stacji WMO 12485
5	magnit	Nateżenie PMWC wyrażone za pomocą wskaźnika „magnitude” [°C]
6	wU_wR	Nateżenie PMWC wyrażone za pomocą wskaźnika „inside urban - inside rural” [°C]
7	rang	Nateżenie PMWC wyrażone za pomocą wskaźnika „range” [°C]
8	lon_MAXlst	Długość geograficzna piksela o najwyższej wartości LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego
9	lat_MAXlst	Szerokość geograficzna piksela o najwyższej wartości LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego
10	MAXlst	Najwyższa wartość LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego [°C]
11	lon_MINlst	Długość geograficzna piksela o najniższej wartości LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego
12	lat_MINlst	Długość geograficzna piksela o najniższej wartości LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego
13	Minlst	Najniższa wartość LST dla pojedynczego obrazu satelitarnego [°C]

Załączono 4 pliki (3 dla danych MODIS i jeden dla ASTER) o następujących nazwach:

- „Wyniki_zbiorcze_DZIEN.txt”
- „Wyniki_zbiorcze_NOC.txt”
- „Wyniki_zbiorcze_WIECZOR..txt”
- „Wyniki_ASTER.txt”

Wartość „-999.00” oznacza brak danych.

3. Ilustracje w pełnej rozdzielczości:

Rysunek 1 Mapa osiedli miasta Radomia (źródło:

<http://www.radom.pl/page/4,aktualnosci.html?id=2851>).

Rysunek 2 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 0 °C.

Rysunek 3 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 0°C.

Rysunek 4 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 10 °C.

Rysunek 5 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 10°C.

Rysunek 6 Mapa temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 20 °C.

Rysunek 7 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 20°C.

Rysunek 8 temperatury powierzchni w Radomiu gdy temperatura powietrza wynosiła około 30 °C .

Rysunek 9 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście w przypadku gdy temperatura powietrza poza miastem wyniosła ok. 30°C

Rysunek 10 Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu w nocy.

Rysunek 11 Lokalizacja najcieplejszych miejsc w Radomiu w dzień.

Rysunek 12 Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu w nocy.

Rysunek 13 Lokalizacja najzimniejszych miejsc w Radomiu w dzień.

Rysunek 14 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 0°C.

Rysunek 15 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 10°C.

Rysunek 16 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 20°C.

Rysunek 17 Mapa temperatury powierzchni w centrum Radomia w przypadku temperatury powietrza wynoszącej około 30°C.

Rysunek 18 Temperatura powierzchni w Radomiu zarejestrowana przez instrument ASTER.

Rysunek 19 Obszary o temperaturze wyższej niż średnia LST w mieście (obraz satelitarny ASTER).

Rysunek 20 Lokalizacja najwyższej zaobserwowanej temperatury powierzchni.

Rysunek 21 Rozkład przestrzenny LST w Radomiu (obraz satelitarny ASTER).

Rysunek 22 Temperatura powierzchni w okolicy lotniska Radom-Piastów oraz drogi krajowej DK 7.

Rysunek 23 Temperatura powierzchni w okolicy lotniska Radom-Sadków.

Rysunek 24 Temperatura powierzchni w okolicy ulicy Brzustowskiej.

Rysunek 25 Temperatura powierzchni w okolicy ulicy Energetyków (osiedle Wola Gołębiowska).

Rysunek 26 Temperatura powierzchni w okolicy centrów handlowych w Radomiu.