

WRAŻLIWOŚĆ MIASTA KALISZA NA ZMIANY KLIMATU – STUDIUM PRZYPADKU

Zdzisław Cichocki¹, Małgorzata Hajto², Anna Romańczak³, Maciej Sadowski³

¹ Zakład Ekologicznych Podstaw Planowania Przestrzennego, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 39e, 50-370 Wrocław, e-mail: zdzislawcichocki@wp.pl

² Zakład Ocen Środowiskowych, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa, e-mail: malgorzata.hajto@ios.gov.pl

³ Zakład Ochrony Klimatu, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa, e-mail: anna.romanczak@ios.gov.pl, maciej.sadowski@ios.gov.pl

STRESZCZENIE

Celem artykułu była ocena wrażliwości miasta Kalisza na czynniki klimatyczne jako podstawy opracowania miejskiej strategii adaptacyjnej. Ocenę oparto na danych i informacjach społecznych, gospodarczych i o środowisku – ilościowych i jakościowych. W analizach ustalono, że Kalisz najbardziej wrażliwy jest na fale upałów, powódzie i susze oraz koncentrację zanieczyszczeń powietrza. Grupy ludności najbardziej wrażliwe na fale upałów (dzieci i osoby starsze), stanowiące prawie 25% populacji miasta, w większości (prawie 72%), zamieszkują tereny śródmiejskie i osiedla blokowe, charakteryzujące się parametrami zagospodarowania terenu niekorzystnymi z punktu widzenia komfortu termicznego mieszkańców. W zasięgu wody 100-letniej mieszka ok. 1% ludności miasta, a wody 500-letniej ponad 4%. Powódzie zagrażają także części ujęć wody. Miasto jest podatne na podtopienia w wyniku opadów ulewnych oraz potencjalnie wrażliwe na susze. Ekspansja zainwestowania miejskiego na terenach otwartych po stronie nawietrznej oraz na terenach głównego kanału napowietrzania miasta w dolinie rzeki, spowoduje wzrost wrażliwości miasta na ten czynnik związany z klimatem. Uwzględnienie oczekiwanych zmian klimatu w dokumentach strategicznych rozwoju miasta w dłuższym horyzoncie czasowym powinno polegać na modernizacji sieci kanalizacyjnej, racjonalizacji zużycia wody, rozbudowie infrastruktury błękitno-zielonej, wprowadzaniu rozwiązań przyjaznych środowisku w ogrzewaniu i transporcie. W dziedzinie społecznej niezbędną jest zapewnienie klimatyzacji w okresie letnim w obiektach usług publicznych – ochrony zdrowia i edukacji.

Słowa kluczowe: zmiany klimatu, wrażliwość na zmiany klimatu, adaptacja miasta

SENSITIVITY TO CLIMATE CHANGE IN THE CITY OF KALISZ – CASE STUDY

ABSTRACT

The work aimed at assessing sensitivity to climate change of town of Kalisz to provide basis for urban adaptation strategy. The assessment was based on climatic, socio-economic and environmental data as well as on spatial management information. It was found that Kalisz are most sensitive to heat waves, floods, droughts and to air pollution. Groups of people most sensitive to heat waves (children and elderly people) which constitute almost 25% of the urban population, reside mainly in midtown areas and inhabit blocks of flats where thermal comfort parameters are disadvantageous for city dwellers. Nearly 1% of the town population lives within the reach of a 100-year flood water, while more than 4% live within the reach of a 500-year water. Floods also threat to a part of water intake installations. The town is prone to flush flooding which tend to occur here with increased frequency. The town depends on infiltrative intakes of quaternary water, it potentially makes Kalisz sensitive to droughts under condition of decreased precipitation and excessive exploitation of groundwater. The planned expansion of urban development onto windward open areas will block city ventilating channels what worsted air conditions in the city. Vital issues to be tackled include in urban strategies: upgrading of sewer system, water use rationalization, extension of blue-green infrastructure and introduction of environmentally friendly solutions in heat provision and city transportation systems.

Keywords: climate change, sensitivity to climate change, urban adaptation

WPROWADZENIE

Wrażliwość miasta na zmiany klimatu nie stanowi na ogół priorytetowego problemu dla władz i społeczności miasta. Władze miast znajdują się pod presją bieżących problemów związanych z rozwojem społeczno-ekonomicznym [Taylor i in. 2014] i nie dostrzegają potrzeby uwzględniania w nim adaptacji do zmian klimatu. Adaptacja postrzegana jest przez pryzmat zwiększenia kosztów inwestycji przy znacznej niepewności wystąpienia zmian, zwłaszcza w odległym horyzoncie czasowym. Adaptacja zostaje uznana za problemem wówczas, kiedy zostają przekroczone warunki graniczne tolerancji społeczeństwa i infrastruktury na zjawiska klimatyczne, choć także wówczas zagrożenia są powszechniej wiązane ze zmiennością pogody niż z długofalowymi zmianami warunków klimatycznych.

Strategia adaptacji do zmian klimatu Unii Europejskiej [COM (2013) 216 final] nakłada obowiązek opracowania planów adaptacji dla miast o liczbie mieszkańców powyżej 100 tys. Kluczowe miejsce w takim planie zajmuje ocena wrażliwości miasta na warunki klimatyczne. Wrażliwość na czynniki klimatyczne jest pojęciem powszechnie stosowanym w kontekście adaptacji [Fussel i Klein 2006, IPCC 2007, Hinkel 2011, IPCC 2014] i określana jest przez stopień, w jakim system podlega wpływom czynników klimatycznych. Stąd też pożądane byłoby dysponowanie wskaźnikami wrażliwości umożliwiającymi ilościową ocenę. W wielu jednak przypadkach możliwa jest tylko ocena jakościowa [Hinkel 2011].

W artykule przedstawiono próbę oceny wrażliwości wybranego miasta średniej wielkości na czynniki klimatyczne z wykorzystaniem dostępnych informacji społecznych, gospodarczych i o środowisku jako podstawy do opracowania miejskiej strategii adaptacyjnej. Wrażliwość oceniona została w oparciu o dotychczas stwierdzone wpływy czynników klimatycznych i ich pochodnych na miasto, co pozwala wnioskować o przyszłych zagrożeniach i potrzebach adaptacji.

WYBÓR MIASTA

Przedmiotem analiz był Kalisz (51°45'27"N, 18°4'48"E), miasto o liczbie populacji niewiele przekraczającej 100 tys., stanowiące ośrodek podregionu kaliskiego (NTS-3) w województwie wielkopolskim (NTS-2). Jest miastem na prawach powiatu (NTS-4).

Poza wielkością populacji kryterium wyboru miasta do studium przypadku było położenie geograficzne; warunki naturalne na Niżu Polskim nie stanowią czynnika istotnie różnicującego klimat regionu, tym samym ujawnia się wpływ miasta w kształtowaniu klimatu lokalnego. Istotnym kryterium wyboru miasta była także jego struktura przestrzenna z czytelnym układem urbanistycznym, z dużym udziałem terenów intensywnej zwartej zabudowy.

OCENA WRAŻLIWOŚCI MIASTA KALISZA NA ZMIANY KLIMATU

Metoda

Hipotetyczne relacje pomiędzy elementami miasta i warunkami klimatycznymi określone zostały w oparciu o literaturę [IPCC 2007, ETC/ACC 2010, ESPON 2011, EEA 2012, Sadowski i in. 2013, IPCC 2014]. Zostały one zweryfikowane poprzez analizę warunków przyrodniczych (w tym klimatycznych), społecznych i gospodarczych charakteryzujących miasto Kalisz (tab. 1).

Jak uwidoczniła analiza, Kalisz w największym stopniu jest zagrożony czterema zjawiskami, tj. falami upałów, suszami, powodzią oraz koncentracją zanieczyszczeń powietrza (tab. 1). Pewne elementy miasta funkcjonują natomiast w miarę sprawnie, nawet w sytuacji wystąpienia ekstremalnych zjawisk pogodowych. Przykładem jest zabezpieczenie systemu zaopatrzenia w energię od silnych wiatrów, czy sprawne działanie systemu opieki społecznej zapewniające pomoc osobom bezdomnym w ekstremalnych warunkach pogodowych. Oczywisty negatywny wpływ susz na rolnictwo nie ma istotnego znaczenia w przypadku Kalisza z uwagi na znikomy udział tej branży w strukturze dochodów własnych budżetu miasta oraz niewielki udział zatrudnienia w rolnictwie. Przeprowadzona weryfikacja pozwoliła na wyłączenie z badania nieistotnych dla Kalisza relacji pomiędzy czynnikami klimatycznymi i elementami miasta i na skoncentrowanie się na tych najważniejszych, wymienionych powyżej. Wskaźniki wrażliwości zostały określone na podstawie analizy dostępnych danych gospodarczych i społecznych oraz klimatycznych, w tym danych o zjawiskach ekstremalnych (tab. 2). W przypadku braku danych ilościowych ocena wrażliwości nosi charakter jakościowy.

Ocena tendencji zmian klimatycznych w połączeniu z oceną warunków gospodarczych, spo-

Tabela 1. Identyfikacja elementów miasta Kalisza wrażliwych na warunki klimatyczne i ich pochodne**Table 1.** Identification of sensitive urban elements to climatic conditions and their derivatives

Zjawiska klimatyczne i ich pochodne (stresory) Elementy miasta (receptory)	Fale upałów	Susze	Powodzie	Burze z gradem	Opady śniegu	Goleleż	Silne wiatry	Mrozy	Koncentracja zanieczyszczeń powietrza
Populacja									
Zabudowa									
Zieleń miejska									
System transportu									
System zaopatrzenia w energię									
System zaopatrzenia w wodę									
System odprowadzania ścieków									
Gospodarka odpadami									
Dobra kultury									
Turystyka									
Przemysł									
Rolnictwo									
Usługi publiczne									

wpływ znaczący
 wpływ niewielki
 brak wpływu

Tabela 2. Charakterystyki klimatu i jego pochodnych (stresor) i elementów miasta (receptor) wykorzystane w ocenie wrażliwości miasta na najistotniejsze czynniki klimatyczne**Table 2.** Elements of the assessment of the urban sensitivity to the most essential weather parameters and their derivatives

Fale upałów	
Klimat	Długość upałów Liczba dni z temperaturą powyżej 30°C Liczba dni z trwałością temperatury >26°C powyżej 7 godzin Rozkład temperatury powierzchni
Miasto	Udział populacji wrażliwych (osób >65 roku życia i <5 roku życia) Rozkład przestrzenny populacji wrażliwych Śmiertelność Udział powierzchni terenów biologicznie czynnej Intensywność zabudowy
Powodzie	
Klimat	Powodzie historyczne Zasięg zalewu o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% i 0,2% Liczba dni z opadem dobowym >10 mm
Miasto	Populacja na terenach zagrożenia powodziowego Budynki, obiekty infrastruktury miasta, obiekty zabytkowe na terenach zagrożenia powodziowego System kanalizacji deszczowej Interwencje straży pożarnej Miejsca i przyczyny występowania podtopień Stopień uszczelnienia terenu
Susze	
Klimat	Liczba dni z opadem <0,1 mm Maksymalna w roku długość okresów z opadem <0,1 mm
Miasto	System zaopatrzenia w wodę (charakter źródeł wody)
Koncentracja zanieczyszczeń powietrza	
Klimat	Stężenia zanieczyszczeń powietrza
Miasto	System przewietrzania miasta Rozkład przestrzenny źródeł zanieczyszczeń powietrza

łecznych i przestrzennych (ilościowa i jakościowa) umożliwiła określenie wrażliwości miasta. O wrażliwości tej decydują zarówno te elementy miasta, które stymulują bądź potęgują negatywne zjawiska klimatyczne (np. sposoby zagospodarowania terenów, intensywna zabudowa), jak i te, które ze swojej natury mogą być podatne na oddziaływanie czynników klimatycznych (np. mieszkańcy, zieleń, systemy infrastruktury technicznej).

Fale upałów

Okresy z wysoką temperaturą zmniejszają komfort termiczny i pośrednio lub bezpośrednio wpływają na samopoczucie mieszkańców, a w skrajnych przypadkach na życie [Heat-waves... 2004].

Za kryterium fali upałów przyjęto okres co najmniej trzech kolejnych dni z maksymalną temperaturą powietrza powyżej 30°C [Kossowska-Cezak 2010]. Jednak w analizach uwzględniono także krótsze ciągi, o ile temperatura w pojedynczych dniach przekraczała 30°C. Fale upałów zostały przeanalizowane zarówno pod kątem ich częstotliwości, jak i długości okresów ich występowania.

Liczne badania, prowadzone także w Polsce, potwierdzają związek śmiertelności z falami upałów [Kozłowska-Szczęśna i in. 2004, Gabriel i Endlicher 2011, Kuchcik 2013, Błażejczyk i in. 2013, Monteiro i in. 2013]. Z tych względów do oceny wrażliwości populacji na fale upałów przyjęto wskaźnik liczby zgonów w latach 2003–2015 (zbiór ok. 3200 przypadków). Przy długotrwałym utrzymywaniu się temperatury powyżej progu komfortu zwiększa się stres termiczny i ryzyko komplikacji zdrowotnych [Błażejczyk i in. 2014]. Zgodnie z normą PN-B/03421:1978 przy małym tempie metabolizmu temperatura powietrza w pomieszczeniach w lecie powinna wynosić 23–26°C [Bogdan 2011]. Liczba dni z utrzymującą się ponad 7 godzin temperaturą powyżej progu komfortu jest kolejnym ilościowym wskaźnikiem fal upałów.

Uciążliwość fal upałów w mieście potęgowana jest przez miejską wyspę ciepła (MWC) [EEA 2012, Błażejczyk i in. 2014]. W ocenie tego zjawiska w Kaliszu wykorzystano mapy temperatury powierzchni wykonane na podstawie zdjęć satelitarnych. Temperatura powierzchni nie jest tożsama z temperaturą powietrza, w oparciu o którą definiowana jest MWC, niemniej cha-

rakterystyka rozkładu termiki podłoża pozwala pośrednio wnioskować o zasięgu MWC [Voogt i Oke 2003, Weng 2009, Xie i in. 2013]. Stopień wzrostu temperatury podłoża, a w konsekwencji powietrza, zależy w szczególności od sposobu zagospodarowania terenu; odpowiednio wysoki udział w przestrzeni miejskiej terenów biologicznie czynnych istotnie wpływa na złagodzenie warunków termicznych [Xie i in. 2013, Li i in. 2013, Szulczewska i in. 2014, Błażejczyk i in. 2014, Maimaitiyiming i in. 2014]. Stąd też ocena wrażliwości miasta na wysokie wartości temperatury uwzględnia ten wskaźnik urbanistyczny, a w odniesieniu do niego rozkład przestrzenny udziału najwrażliwszej grupy populacji (osoby w wieku powyżej 65 roku życia i osoby poniżej 5 roku życia; [Błażejczyk i in. 2014]) – jako kolejnego ilościowego wskaźnika wrażliwości.

Powodzie

Spośród pięciu wymienionych w literaturze rodzajów powodzi [EEA 2012], cztery rodzaje dotyczyć mogą miasta Kalisza: powódzie wezbraniowe (rzeczne), gwałtowne zalewy, wylewy z miejskich systemów drenażowych (kanalizacyjnych), wylewy wód gruntowych.

Powodzie rzeczne, których przebieg jest z natury powolny i względnie długotrwały, generowane są przez długotrwałe wysokie opady w górnej części zlewni rzeki lub w wyniku tajania pokrywy śnieżnej. Informacje historyczne o występowaniu powodzi oraz warunkach, w których wystąpiły katastrofalne powodzie pozwalają na ocenę wrażliwości miasta na tego typu zjawiska. Wrażliwość miasta na powodzie rzeczne zależna jest także od udziału eksponowanych na to zjawisko części populacji oraz fizycznych elementów miasta [Kundzewicz 2014]. Plany zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych, w szczególności mapy zagrożenia powodziowego z określonymi zasięgami zalania przy danym prawdopodobieństwie przepływów (0,2% i 1%; [RZGW 2015]), stanowią podstawę do rozpoznania elementów miasta eksponowanych na omawiane zjawisko.

Powodzie błyskawiczne pojawiają się jako efekt krótkotrwałych, ale nawałnych deszczy. Zjawisko to najczęściej występuje latem, kiedy przeważają opady typu konwekcyjnego, w tym burzowego. Może jednak wydarzyć się także zimą, kiedy na tajenie pokrywy śnieżnej nakłada się duży opad deszczu. Wylewy z miejskich

systemów kanalizacyjnych są najczęściej wtórnym efektem powodzi wezbraniowych, powodzi gwałtownych lub jednych i drugich jednocześnie. Mogą być też powodowane charakterem systemów odprowadzania wód opadowych lub ich stanem. Wylewy wód gruntowych związane są ze szczególną budową geologiczną podłoża. Sprzyjają im wysokie stany wód w ciekach, w przypadku, gdy płytkie wody podziemne mają z nimi kontakt hydrauliczny.

Rozpoznanie miejsc i przyczyn wystąpienia powodzi – wylewów lub podtopień – pozwala zidentyfikować wrażliwe elementy miasta. Wrażliwość miasta na omawiane zagrożenia wynika ze zdolności retencyjnej zlewni, ściśle związanej ze sposobami zagospodarowania terenów. Na terenach zurbanizowanych głównym czynnikiem wpływającym na retencyjność zlewni jest uszczelnienie podłoża sprzyjające gwałtownym spływom powierzchniowym, których nie są w stanie przyjąć kontrolowane systemy przeciwpowodziowe. Odniesienie zdarzeń do powierzchni uszczelnionych jest zatem zasadne.

Susze

Wrażliwość miasta na susze odnosi się przede wszystkim do zaopatrzenia ludności i gospodarki w wodę i dotyczy zarówno jej ilości, jak i jakości [IPCC 2007, Hunt i Watkiss 2011, Sadowski i in. 2013, IPCC 2014]. Większa lub mniejsza wrażliwość miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę na susze zależy w szczególności od zasobów wodnych oraz charakteru źródeł wody, sposobów jej ujmowania, uzdatniania i dystrybucji. Rozwiązania w zakresie systemu zaopatrzenia w wodę są kluczowe w ocenie wrażliwości miasta na susze i one zostały poddane analizie. Generalnie większa wrażliwość na czynniki klimatyczne wiąże się z użytkowaniem zasobów wód powierzchniowych lub płytkich wód podziemnych mających kontakt hydrauliczny z ciekami powierzchniowymi, wówczas na każde prawdopodobne zmniejszenie zasobów wodnych należy zwrócić uwagę [Wilbanks i in. 2007].

Dla scharakteryzowania zjawiska suszy przyjęto długość okresów bez opadów i liczbę dni w roku bez opadów. Trwający około 3 tygodni okres bez opadów (opad do 1 mm nie jest traktowany jako przerwa ciągu bezopadowego) powoduje obniżenie zwierciadła wód podziem-

nych, a w konsekwencji suszę hydrologiczną, której przejawem jest zmniejszenie przepływów w rzekach [Tokarczyk i in. 2012]. W Polsce od lat 80. ubiegłego wieku obserwuje się wzrost częstotliwości występowania zjawiska suszy [Sadowski i in. 2013].

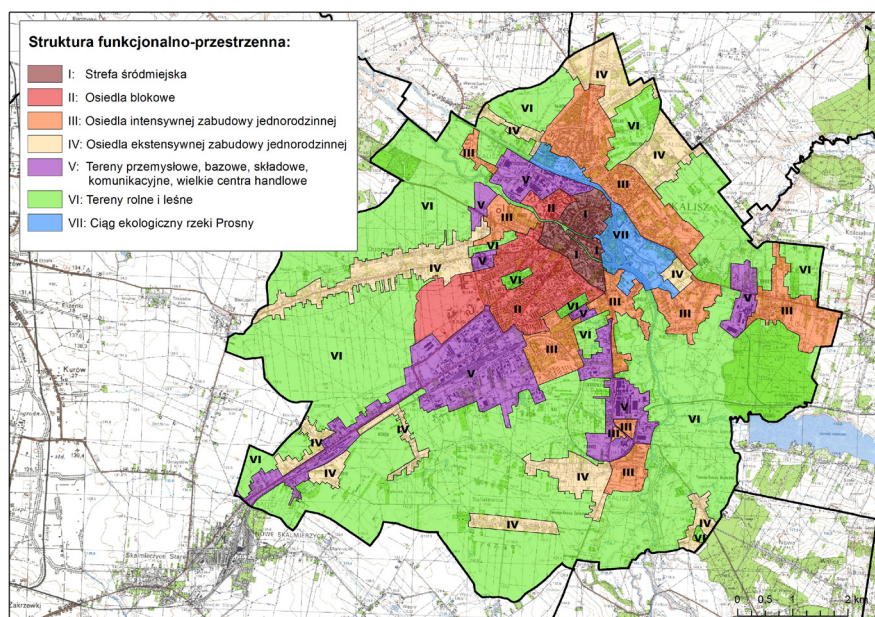
Koncentracja zanieczyszczeń powietrza

Stan zanieczyszczenia powietrza wynika z emisji, ale zależy także od warunków pogodowych sprzyjających koncentracji lub rozproszeniu zanieczyszczeń. W lecie koncentracja zanieczyszczeń zwiększa się w warunkach dłuższej trwającej gorącej, bezopadowej i bezwietrznej pogody. W zimie taka sytuacja występuje w stabilnej bezopadowej oraz bezwietrznej pogodzie wyżowej z silną inwersją termiczną. Dodatkowo zimą występuje zwiększona emisja z systemów ogrzewania. W obniżeniach terenu koncentracja zanieczyszczeń w okresach pogody inwersyjnej jesienią i zimą towarzyszą mgły. Jednocześnie koncentracja zanieczyszczeń wzrasta (w przypadku niektórych zanieczyszczeń) wraz z narastaniem intensywności MWC [Weng i Yang 2006, Lai i Cheng 2009, EEA 2012].

W ocenie wrażliwości miasta na ten czynnik rozpoznano system przewietrzania miasta uwzględniając konfigurację terenu, charakter zabudowy, tereny biologicznie czynne oraz kierunki wiatru.

Przestrzenne zróżnicowanie wrażliwości

Wrażliwość miasta na zmiany klimatu jest cechą w miarę statyczną, gdyż zdeterminowana jest trwałymi fizycznymi elementami miasta [IPCC 2007, Fussel i Klein 2006, Hinkel 2011, ESPON 2011]. Jednym z tych stałych – inercyjnych elementów jest struktura funkcjonalno-przestrzenna. Uwzględnienie struktury funkcjonalno-przestrzennej w ocenie wrażliwości miasta uzasadnione jest przestrzennym zróżnicowaniem w reagowaniu na zjawiska klimatyczne. Zróżnicowanie to jest przede wszystkim zależne od proporcji terenów zabudowanych i terenów biologicznie czynnych oraz form – architektonicznej i urbanistycznej – ściśle związanych z funkcją zabudowy. Dokonanie analizy struktury funkcjonalno-przestrzennej miasta pozwala nie tylko zidentyfikować miejsca wrażliwe, ale także wskazuje miejsca przyszłych interwencji adaptacyjnych (rys. 1).



Rys. 1. Struktura funkcjonalno-przestrzenna miasta Kalisza

Fig. 1. Urban structure of Kalisz

MATERIAŁY I DANE

Podstawowe dane statystyczne pochodziły z Głównego Urzędu Statystycznego, a przestrzenne dane referencyjne z zasobów rządowych organów administracji (Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k), ortofotomapa, mapa topograficzna w skali 1: 10 000). Wykorzystano także dane satelitarne (Landsat 8, 3 lipca 2015). Pozyskano również dane z Systemu Informacji Przestrzennej Miasta Kalisza (SIP), zasilonego między innymi danymi z Informatycznego Systemu Ochrony Kraju (ISOK). Wiele danych pozyskano też bezpośrednio z instytucji zarządzających i służb miasta Kalisza. Niektóre informacje zostały opracowane przez służby miasta.

Dane klimatyczne uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz z amerykań-

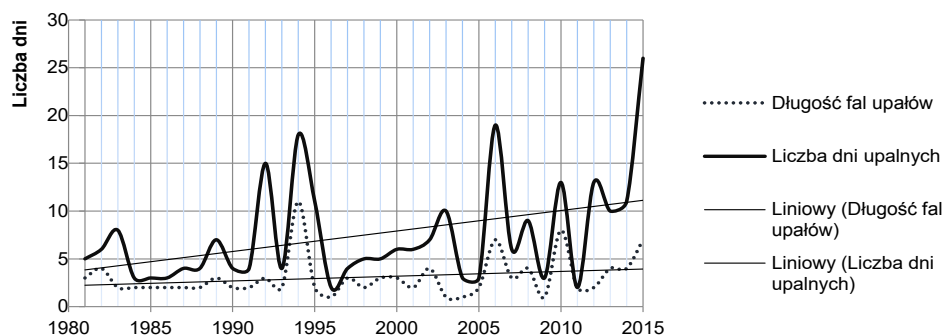
skiej Agencji ds. Atmosfery i Oceanów (NOAA). Dane pochodzą ze stacji meteorologicznej w Kaliszu położonej na północny wschód od centrum miasta. Stacja położona jest na wysokości 137 m n.p.m. w strefie krawędziowej doliny Prosny.

Analizowany okres jest zdefiniowany dostępnością danych. Dane klimatyczne obejmują okres 30-letni, dane społeczno-ekonomiczne – okres od początku XXI w. i są najczęściej zgrupowane do roku, dane przestrzenne odnoszą się do aktualnego stanu miasta.

WYNIKI I DYSKUSJA

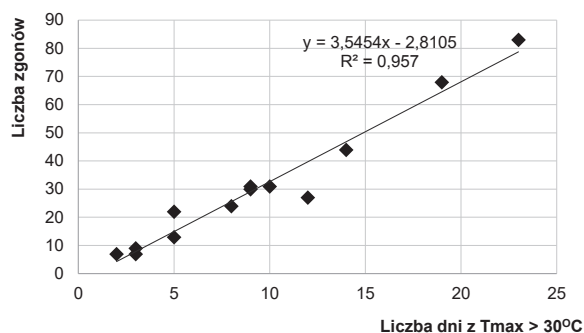
Fale upałów

Zarówno częstość występowania wartości temperatury maksymalnej $>30^{\circ}\text{C}$, jak i długość



Rys. 2. Tendencja zmian długości upałów i liczby dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C w Kaliszu

Fig. 2. Tendency of changes in heat waves duration and numbers of days with a maximum temperature above 30°C in Kalisz [NOAA]



Rys. 3. Liczba zgonów w funkcji temperatury maksymalnej powyżej 30°C [NOAA, UM w Kaliszu]

Fig. 3. Mortality rate in the function of the maximum temperature above 30°C

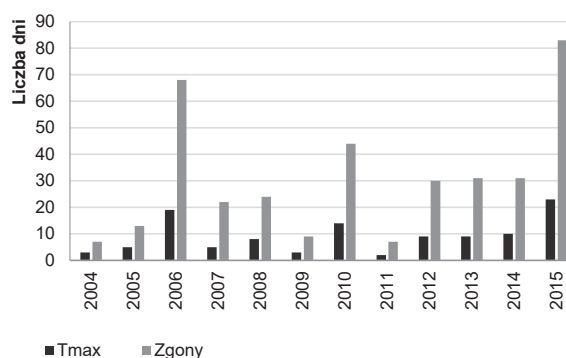
okresów z taką temperaturą wykazują znaczną fluktuację roczną przy ogólnej tendencji rosnącej (rys. 2).

Analiza zgonów wykazała ścisłą ich zależność od liczby dni z temperaturą maksymalną >30°C (rys. 3). Ogólna liczba zgonów w okresie letnim (VI-VIII) nie wykazuje szczególnych cech, jednak przy uwzględnieniu klas temperatury zróżnicowanie jest wyraźne. Przeciętna dzienna liczba zgonów w klasach temperatury maksymalnej <25°C, pomiędzy 25–30°C oraz >30°C wynosiła w latach 2003–2015 odpowiednio 2,7, 2,9 oraz 3,2.

Czasowa zmienność występowania okresów ze zwiększoną śmiertelnością zaznaczyła się przede wszystkim w latach 2006, 2010 i 2015, w których okresy z temperaturą maksymalną przekraczającą 30°C utrzymywały się z krótkimi przerwami odpowiednio 19, 10 i 22 dni (rys. 4). Niezależnie od tych incydentów liczba zgonów generalnie wykazuje tendencję rosnącą wraz z rosnącą liczbą dni upalnych w roku (rys. 5).

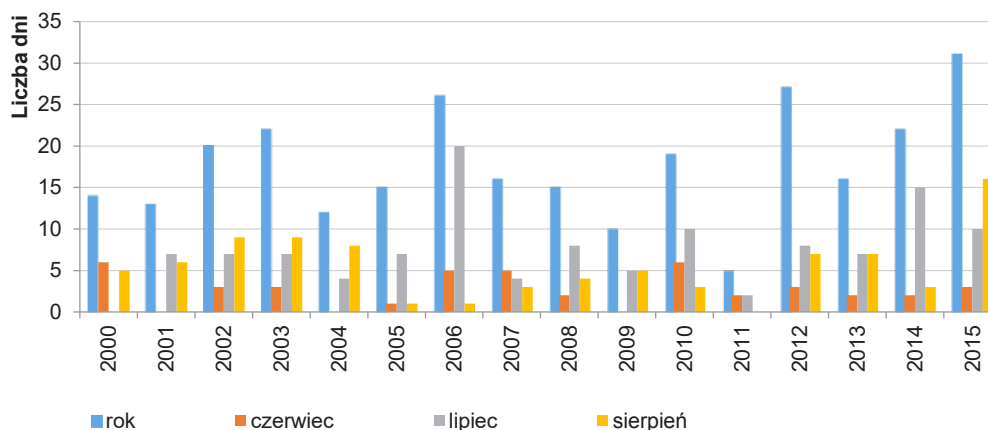
Częstość występowania uciążliwych z punktu widzenia komfortu termicznego nie wykazuje wyraźnego trendu zmian, choć w ostatnich latach analizowanego okresu w ponad połowie dni miesiąca występowały długotrwałe okresy z temperaturą przekraczającą przyjęty próg – 27 dni w roku 2012 i 31 dni w roku 2015 (rys. 5). Taka sytuacja w lipcu 2006 r. była incydentem w skali poprzedniego 10-lecia.

Populacja wrażliwa na fale upałów, a więc dzieci poniżej 5 roku życia i osoby powyżej 65 roku życia, stanowi prawie 25% populacji Kalisza, z czego prawie 72% zamieszkuje tereny śródmiejskie i osiedla blokowe. Jednocześnie są to tereny o najniższym wskaźniku terenów biologicznie czynnych (rys. 6) oraz najwyższym intensywności zabudowy (rys. 7). Wysokie wartości tych obu wskaźników skutkują najwyższą temperaturą powierzchni zarejestrowaną na ma-



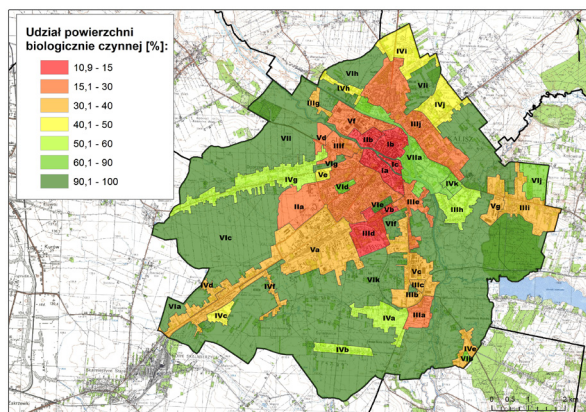
Rys. 4. Liczba zgonów przy liczbie dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C [NOAA, UM w Kaliszu]

Fig. 4. Mortality rate at the number of days with the maximum temperature above 30°C



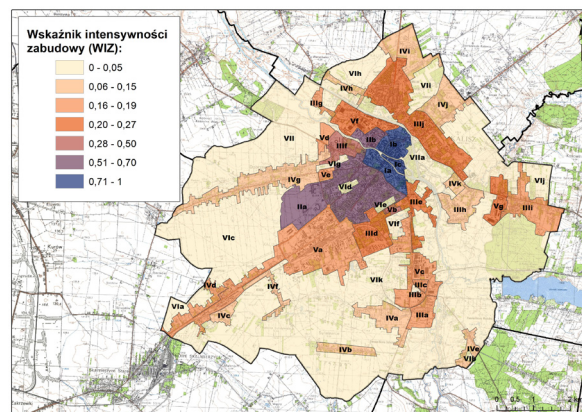
Rys. 5. Liczba dni z trwałością temperatury >26°C powyżej 7 godzin [NOAA]

Fig. 5. Number of days with temperature above 26°C lasting for more than 7 hours



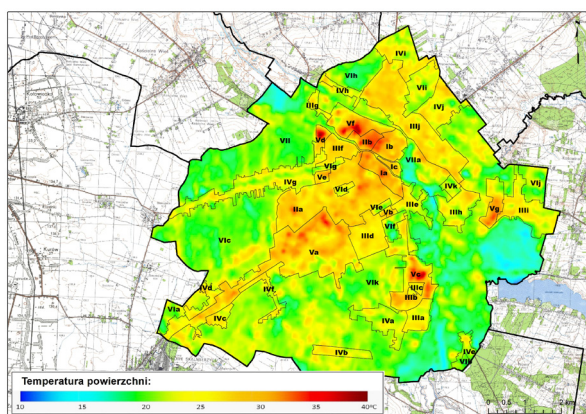
Rys. 6. Rozkład powierzchni terenów biologicznie czynnych na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej [KM SP w Kaliszu]

Fig. 6. Spatial distribution of biologically vital areas on the background urban structure



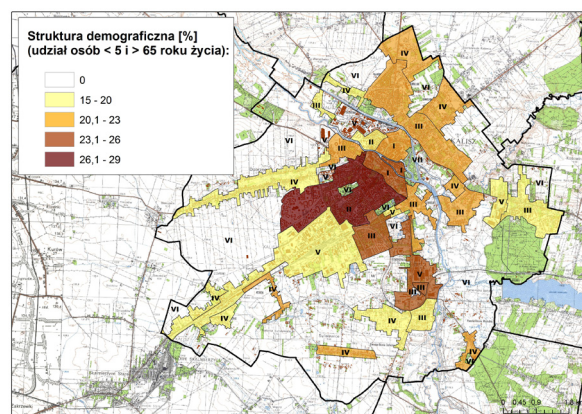
Rys. 7. Rozkład intensywności zabudowy na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej [KM SP w Kaliszu]

Fig. 7. Spatial distribution of density built-up areas on the background urban structure



Rys. 8. Mapa temperatury radiacyjnej na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej [Landsat8]

Fig. 8. Map of the radiation temperature on the background urban structure



Rys. 9. Struktura demograficzna na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej [MSIP Kalisz]

Fig. 9. Demographic structure on the background urban structure

pie temperatury radiacyjnej (rys. 8). Zarówno tereny śródmiejskie, jak i osiedla blokowe charakteryzuje największy w mieście udział ludności wrażliwej na upały (rys. 9). Tak więc tereny te pod względem populacji (jej liczebności i struktury wieku) oraz możliwej intensyfikacji odczuwania upałów w wyniku sposobów zagospodarowania terenu, są najbardziej wrażliwe w skali całego miasta.

Intensyfikacja odczuwania upałów jest także związana ze zjawiskiem MWC [EEA 2012, Błażejczyk i in. 2014]. Intensywność MWC zależy od wielkości miasta [Błażejczyk i in. 2014]. Zastosowanie dla Kalisza równań opracowanych przez Błażejczyka i in. [2014], odnoszących się do związków między wielkością miasta mierzoną populacją a intensywnością MWC pokazuje, że wskaźnik intensywności MWC w zabudowie śródmiejskiej nie przekracza $0,5^{\circ}\text{C}$. Wyspa ciepła do $0,5^{\circ}\text{C}$ jest oceniana jako mało intensywna [Błażejczyk i in. 2014]. Niemniej Błażejczyk i in. [2014] stwierdzili, że odczuwanie temperatury w różnych typach zabudowy jest bardzo zróżnicowane. Największe kontrasty w odczuwaniu temperatury występują w kanionach ulic między słonecznymi i zacienionymi miejscami w upalne dni. Jako najcieplejsze odczuwane są tereny śródmiejskie i przemysłowe, a także tereny mieszkaniowe o wysokich budynkach [Błażejczyk i Kunert, 2006]. Informacje te potwierdzają szczególną wrażliwość na czynniki klimatyczne w Kaliszu mieszkańców terenów śródmiejskich i osiedli blokowych.

nością MWC pokazuje, że wskaźnik intensywności MWC w zabudowie śródmiejskiej nie przekracza $0,5^{\circ}\text{C}$. Wyspa ciepła do $0,5^{\circ}\text{C}$ jest oceniana jako mało intensywna [Błażejczyk i in. 2014]. Niemniej Błażejczyk i in. [2014] stwierdzili, że odczuwanie temperatury w różnych typach zabudowy jest bardzo zróżnicowane. Największe kontrasty w odczuwaniu temperatury występują w kanionach ulic między słonecznymi i zacienionymi miejscami w upalne dni. Jako najcieplejsze odczuwane są tereny śródmiejskie i przemysłowe, a także tereny mieszkaniowe o wysokich budynkach [Błażejczyk i Kunert, 2006]. Informacje te potwierdzają szczególną wrażliwość na czynniki klimatyczne w Kaliszu mieszkańców terenów śródmiejskich i osiedli blokowych.

Powodzie

W dwudziestolecie 1946–1965 dla Kalisza charakterystyczne były powodzie rzeczne związane z odwilżami [Rotnicka 1973]. Także informacje z lat wcześniejszych pokazują, że w Kaliszu dominowały powodzie w okresie wczesnowiosennym (w latach 1923, 1924, 1939 i 1940). Gwałtowne topnienie pokrywy śnieżnej było także przyczyną powodzi w latach 1979 i 1980. Analiza powodzi historycznych w Polsce pokazuje sezonową zmianę ryzyka powodziowego, polegającą na zwiększeniu tego ryzyka w okresie letnim (powodzie w latach 1985, 1995, 1997, 2001, 2010 i 2011 r.). Zmiana ta jest także wskazywana w literaturze [IPCC 2007, Sadowski i in. 2013, IPCC 2014].

Ostatnie katastrofalne powodzie rzeczne miały miejsce w lipcu 1997 r. oraz maju 2010 r. W obu przypadkach przekroczone zostały znacznie poziomy i maksymalne przepływy wód w rzece Prośnie i wynosiły odpowiednio 281 cm (przy stanie alarmowym 200 cm) i $104 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (przy średniej z najwyższych wartości rocznych $65,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) podczas powodzi w 1997 r. oraz 308 cm i $125 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ w 2010 r. [Małecki i Wira 2011, Kwietniewski i in. 2014]. Zalane zostały wówczas tereny w północnej części miasta (z osiedlami Piskorzewie, Majków, Ogrody) oraz w części południowej (z osiedlami Rajsków i Piwonice).

Na terenach zagrożenia powodziowego w zasięgu wody 100-letniej mieszka aktualnie ponad 1000 osób, co stanowi ok. 1% populacji Kalisza. W zasięgu wody 500-letniej mieszka natomiast 4475 osób, tj. prawie 4,4% mieszkańców miasta. Na terenach zagrożenia powodziowego

znajduje się 297 (2,9%) budynków mieszkalnych dla wody 100-letniej i 498 (4,8%) dla wody 500-letniej. W obu przypadkach najbardziej zagrożone są osiedla mieszkaniowe na południu i północy miasta. Na zalanie narażone są także ujęcia wody w dolinie Proсны, stąd miejski system zaopatrzenia w wodę należy uznać za wrażliwy na powodzie. Najstarsza śródmiejska część miasta jest chroniona nawet w sytuacji powodzi o 0,2% ryzyku, niemniej w zasięgu zalewu o takim prawdopodobieństwie występuje ponad 160 obiektów wpisanych do rejestru lub ewidencji zabytków. Znaczące obiekty użyteczności publicznej, z wyjątkiem czterech obiektów edukacji (z 94 placówek), pozostają poza zasięgiem powodzi.

Intensywne opady w terenie zurbanizowanym podczas przechodzenia fali powodziowej powodują zwielokrotnienie ryzyka powodziowego [Sadowski i in. 2013, Kundzewicz 2014]. Takie sytuacje obrazują wartości z powodzi w latach 1997 i 2010, kiedy opad w lipcu 1997 r. oraz maju 2010 r. znacznie przewyższył średnie wartości z wielolecia 1981–2014 (tab. 3).

Dobowe sumy opadów powyżej 10 mm zdarzają się w Kaliszu coraz częściej (rys.10). Jest to trend obserwowany w całej Polsce [Ostrowski i in. 2012, Sadowski i in. 2013].

Interwencje straży pożarnej podejmowane w związku z intensywnymi opadami zdarzają się w Kaliszu od kilku do kilkudziesięciu razy w roku (rys. 11).

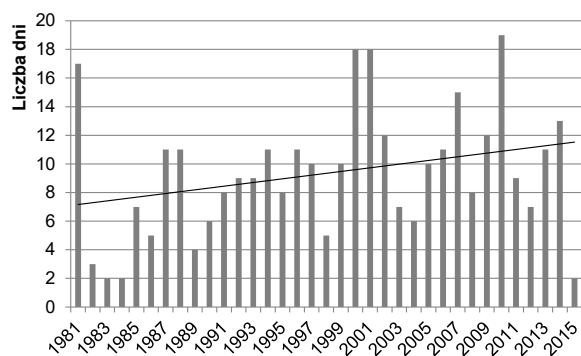
Analiza miejsc i przyczyn wystąpienia powodzi błyskawicznych i wylewów pozwala zidentyfikować wrażliwe elementy miasta (rys. 12).

Tabela 3. Porównanie charakterystyk opadów średnich z wielolecia z opadami w trakcie powodzi w Kaliszu w latach 1997 i 2010

Table 3. Precipitation characteristics comparison between the multi-annual average and the values for the period of flood events in Kalisz in years 1997 and 2010

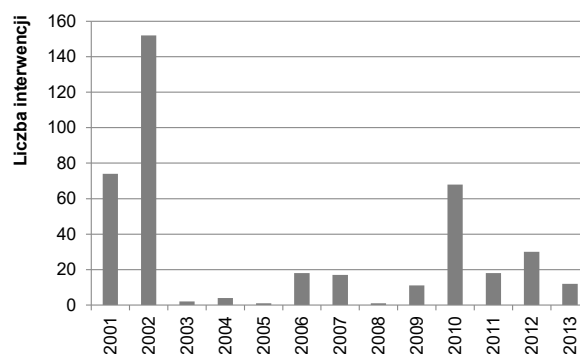
Charakterystyki opadu	Wielolecie 1981–2014	Powódź lipiec 1997
Średni opad dobowy w lipcu [mm]	2,22	4,99
Maksymalny opad w lipcu [mm]	20,90	38,10
Suma miesięczna opadu w lipcu [mm]	68,70	153,42
Liczba dni w lipcu z opadem > 1,00 mm [dni]	9,5	15
Charakterystyki opadu	Wielolecie 1981–2014	Powódź maj 2010
Średni opad dobowy w maju [mm]	1,55	4,79
Maksymalny opad w maju [mm]	13,40	34,29
Suma miesięczna opadu w maju [mm]	47,80	148,37
Liczba dni w maju z opadem > 1,00 mm [dni]	8,8	19

Źródło: IMGW-PIB, op. wł.



Rys. 10. Liczba dni z opadem powyżej 10 mm

Fig. 10. Number of days with precipitation above 10 mm [IMGW-PIB]



Rys. 11. Interwencje straży pożarnej, których przyczynę określono jako „gwałtowne opady”

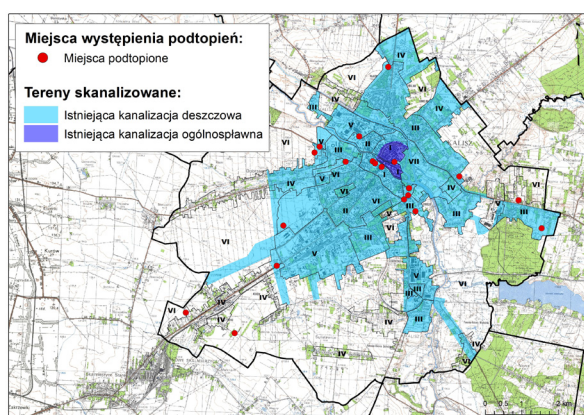
Fig. 11. Intervention of the fire service for the reason of heavy precipitation [KM SP w Kaliszu]

Intensywne opady stanowią problem dla systemów kanalizacji, szczególnie kanalizacji deszczowej. W Kaliszu system ten składa się z 68 niezależnych układów o względnie małych zlewniach. Odbiornikiem wód opadowych jest Kaliski Węzeł Wodny (KWW). W czasie wysokich stanów wód w odbiornikach, w wyniku podparcia odpływu, następuje cofka skutkująca wybijaniem wody ze studzienek kanalizacji deszczowej. Szczególnie podatne na wylewy są niżej położone tereny zabudowane, gdzie kanalizacja deszczowa ma bezpośredni kontakt hydrauliczny z systemem KWW. Zwraca uwagę, że znacznie bardziej odporna jest strefa śródmiejska uzbrojona w systemy kanalizacji ogólnospławnej (rys. 12). Nadmiar wód jest tam bowiem odprowadzany do rzeki Prosny przelewami, uniemożliwiającymi powstawanie cofki. Oczywiście niekiedy przyczyną wylewów

z systemów kanalizacyjnych może być ich stan, tj. np. zamulenie wylotów kanałów, a nie tylko czynniki pogodowe.

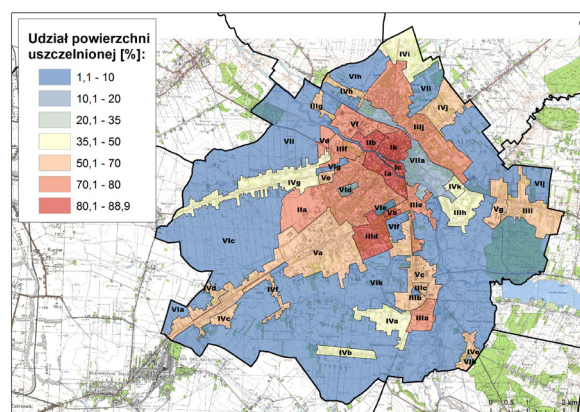
Wrażliwe na wylewy wód gruntowych są w szczególności tereny zabudowane w dolinie Prosny, gdzie woda podziemna występuje na głębokości do 3 m p.p.t. Wyższy stan wód w Prośnie i dopływach spowodowany dłuższymi opadami lub taniem pokrywy śnieżnej przyczynia się do podniesienia zwierciadła wód gruntowych, z którymi mają kontakt hydrauliczny.

O wrażliwości miasta na powódzie znacząco decyduje zdolność retencyjna zlewni. Zlewnia Prosny charakteryzuje się niskim stopniem zalesienia (ok. 21%, przy wskaźniku lesistości dla Polski wynoszącym 29,4%), co zmniejsza jej retencyjność i potęguje kulminację wezbrań. W mieście zmniejszenie retencyjności zlewni dodatkowo pogłębia stopień uszczelnienia podłoża



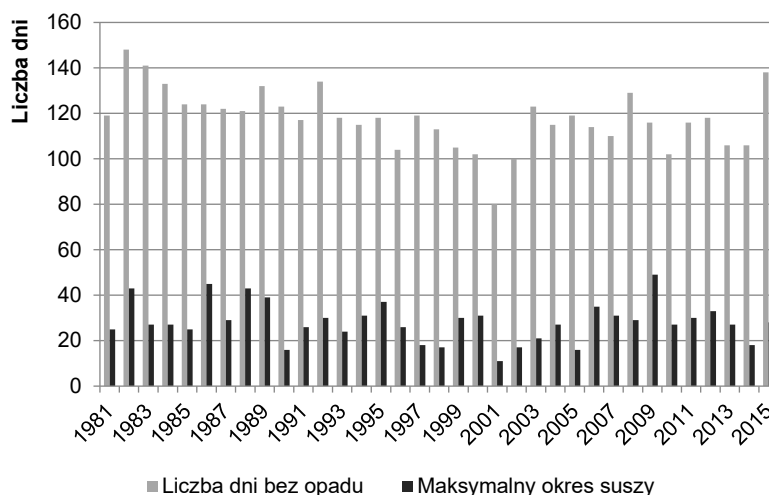
Rys. 12. Miejsca wystąpienia podtopień w latach 2010–2012 na tle systemu kanalizacji [Kwietniewski i in. 2014]

Fig. 12. Places of flooding in 2010–2012 on the background of the sewer system



Rys. 13. Powierzchnia zabudowana technicznie (uszczelniona) na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej [BDOT]

Fig. 13. The sealed surface on the background urban structure



Rys. 14. Liczba dni i maksymalna długość okresów z opadem poniżej 0,1 mm (w okresie kwiecień-wrzesień) [IMGW-PIB]

Fig. 14. The number of days and the maximum length of periods with precipitation below 0.1 mm (April-September)

gruntowego (rys. 13). Wysoki wskaźnik udziału powierzchni utwardzonej, gdzie jednocześnie występuje oddzielna kanalizacja deszczowa, oznacza wysoki stopień wrażliwości tej części miasta na omawiane zagrożenie powodziowe.

Susze

Kalisz położony jest w rejonie klimatycznym o relatywnie niskich opadach i wysokiej częstotliwości okresów bezopadowych. Zjawisko susz występuje tu niemal corocznie. W analizowanym wieloleciu 1981–2015 jedynie w sześciu latach (1991, 2001, 2002, 2003, 2005 i 2014) nie wystąpiły ciągi bezopadowe trwające dłużej niż 3 tygodnie (rys. 14).

Jak wcześniej powiedziano, problemy suszy dotyczą głównie zaopatrzenia miasta w wodę. Obecnie w mieście nie obserwuje się problemów z dostarczaniem wody mieszkańcom oraz na potrzeby przemysłu. Niemniej oparcie systemu zaopatrzenia miasta w wodę na ujęciach infiltracyjnych wód czwartorzędowych w dolinie Proсны (85% zaopatrzenia) oraz stwierdzona nadmierna eksploatacja wód podziemnych z utworów jurajskich [Żurawski 1973, Galuba i Pancewicz 2005, *Studium...* 2009] czyni Kalisz miastem potencjalnie wrażliwym na susze.

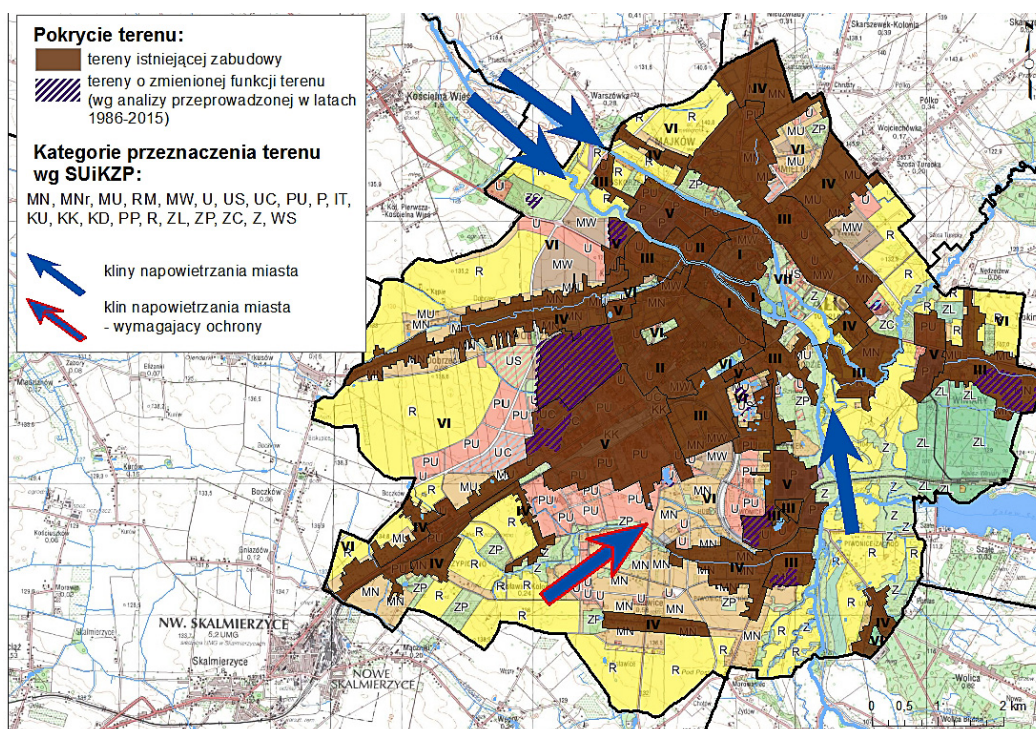
Niskie stany wód w ciekach powierzchniowych związane bezpośrednio z opadami mają wpływ na zasoby wód podziemnych, w szczególności użytkowych wód czwartorzędowych w dolinie Proсны. Z kolei zasobność w wodę

warstw jurajskich w rejonie Kalisza charakteryzuje się zmiennością przestrzenną (zależną od występowania i światła szczelin) oraz wykazuje związek z zależnymi od opadów wahaniami nadległych czwartorzędowych warstw wodonośnych (badanie z 1971 r. [Żurawski 1973]). Jednocześnie obserwuje się powstawanie leja depresji w wodach poziomów jurajskich. Systematyczne obniżanie się zwierciadła tych wód obserwowane jest od 1936 r. [Żurawski 1973, Galuba i Pancewicz 2005].

System zaopatrzenia Kalisza w wodę jest zatem w wysokim stopniu zależny od czynników klimatycznych, co czyni go potencjalnie wrażliwym na zmiany klimatu, zwłaszcza jeśli wzrastać będzie zużycie wody.

Koncentracja zanieczyszczeń powietrza

Kalisz należy do miast o największym w Polsce zanieczyszczeniu pyłami (PM10 i PM2,5) oraz benzoapirenem (BaP) [*Program ochrony powietrza...* 2015]. Głównymi źródłami zanieczyszczeń są transport samochodowy oraz systemy ogrzewania, zwłaszcza w centrum miasta, oparte na paleniskach indywidualnych. Koncentracja zanieczyszczeń w mieście – oprócz stanów pogodowych – uwarunkowana jest konfiguracją terenu. Położenie śródmiejskiej części miasta w zasięgu doliny Proсны ze znacznie wyniesionymi terenami peryferyjnymi (do ok. 30 m) sprzyja koncentracji zanieczyszczeń w najbardziej zabudowanej i zaludnionej części Kalisza.



Rys. 15. Warunki przewietrzania miasta [Studium... 2009]

Fig. 15. Ventilation conditions of Kalisz

O większej lub mniejszej koncentracji zanieczyszczeń decydują też stosunki anemometryczne, kształtowane głównie przez zabudowę miasta. Przedstawione na rysunku 15 kliny napowietrzania miasta funkcjonują w ograniczonym stopniu. Dolina Prosny, stanowiąca główny kanał napowietrzania, ma przebieg generalnie południkowy, podczas gdy przeważają tu wiatry z kierunków zachodnich, co niekorzystnie wpływa na przewietrzanie miasta.

Południowa część doliny Prosny jest w ponad 80% powierzchnią biologicznie czynną. Tereny zieleni wewnątrz miasta posiadają łączność z terenami otwartymi (w tym z jednym znaczącym kompleksem leśnym) położonymi na południowy wschód od miasta. Dość rozległe tereny otwarte lub z ekstensywną (i rozproszoną) zabudową przylegające do tego odcinka doliny od strony zachodniej wzmacniają swobodny przepływ powietrza od strony południowej, ale także z kierunku południowo-zachodniego. W południowej części miasta jednak występują największe punktowe źródła zanieczyszczeń oraz jedna z głównych dróg – źródło zanieczyszczeń komunikacyjnych [Program ochrony powietrza... 2015].

Odcinek doliny przebiegający generalnie na północ od centrum miasta oraz od rozległych terenów przemysłowych stanowi klin napowie-

trzający dla napływu mas świeżego powietrza z kierunku północno-zachodniego. W północnej i centralnej części miasta klin ten jest w wysokim stopniu zabudowany, co ogranicza jego funkcje aerosanitarne. W północnej części, gdzie położenie doliny Prosny mogłoby sprzyjać przewietrzaniu miasta, zlokalizowane są obiekty przemysłowe i handlowe. Dominujący tu typ zabudowy, powoduje znaczne przegrzanie podłoża przyczyniając się do zwiększenia intensywności MWC (por. rys. 8), co również nie sprzyja odpływowi mas powietrza ze śródmiejskiej części miasta.

Wrażliwość miasta w świetle prognozowanych zmian klimatu

Porównując obecne warunki klimatyczne z oczekiwanymi długofalowymi prognozami (tab. 4) należy się spodziewać zwiększenia wrażliwości na zidentyfikowane zagrożenia.

W rejonie Kalisza należy liczyć się więc ze znaczącym wzrostem temperatury, w tym zwłaszcza temperatury maksymalnej, oraz liczby dni i długości okresów upalnych. Jednocześnie prognozowany jest wzrost udziału w populacji mieszkańców w wieku powyżej 65 lat, co oznacza zwiększanie się wrażliwości miasta na fale upałów (rys. 16).

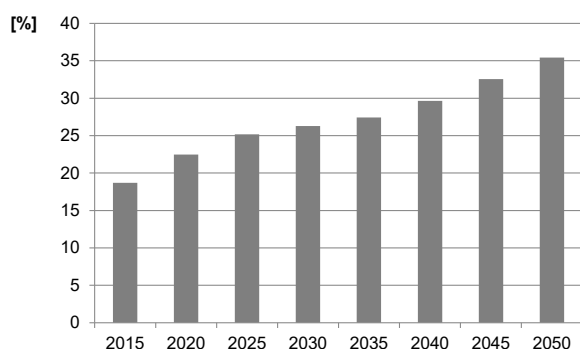
Tabela 4. Scenariusze zmian klimatu w XXI w rejonie Kalisza**Table 4.** Climate change projections for Kalisz region during the 21st century

Element	Wartość średnia			
	2010 r.	2030 r.	2050 r.	2070 r.
Średnia dobową temperaturą $T [^{\circ}\text{C}]$	8,11	8,63	9,33	10,10
Liczba dni w roku z temperaturą $T_{\text{maz}} > 25^{\circ}\text{C}$	29,80	35,56	37,49	46,28
Maksymalny opad dobowy [mm/d]	28,59	31,11	32,17	32,93
Liczba dni z opadem większym niż 20mm	1,76	2	2,2	2,24
Najdłuższy okres suchy (opad < 1mm)(w dniach)	20	22	22	24

Źródło: Liszewska i in. 2013

Kolejnym elementem zwiększania się wrażliwości miasta na zmiany klimatu jest prognozowany wzrost maksymalnego opadu dobowego (tab.4), co sprzyja gwałtownym powodziom miejskim. Rośnie także ryzyko zagrożenia powodzią rzecznych w związku z wydłużaniem się okresów z wysokim opadem. Jednocześnie rozwój gospodarczy, zwłaszcza powstawanie zabudowy mieszkaniowej na terenach ryzyka powodziowego, zwiększa ekspozycję na to zagrożenie. Rozwój taki obserwowany jest w całej Polsce od początku lat 90. minionego stulecia [Kundzewicz 2014]. W Kaliszu także na terenach zagrożenia powodziowego następuje rozwój zainwestowania miejskiego. Planowana jest ponadto dalsza zabudowa osiedli, które były zalewane w powodziach z 1997 r. i 2010 r..

Opisana potencjalna wrażliwość systemu zaopatrzenia miasta w wodę może stanowić poważny problem w warunkach przedłużających się okresów suszy (tab. 4) przy jednoczesnym wzroście zapotrzebowania na wodę następującym wraz z rozwojem społeczno-ekonomicznym.



Rys. 16. Prognoza demograficzna dla Kalisza. Udział osób powyżej 65 roku życia w populacji miasta [GUS 2014]

Fig. 16. Population projection for Kalisz. The share of the population over 65 years old in the population of the city

Wrażliwość miasta w związku z zanieczyszczeniami powietrza także może się zwiększać. Dłuższe okresy bezopadowe i wysokie wartości temperatury będą sprzyjać sytuacjom smogowym i koncentracji zanieczyszczeń. Zwiększanie się wrażliwości miasta na te zjawiska może także być wynikiem zmian w zagospodarowaniu przestrzennym – zabudową znacznych przestrzeni w południowo-zachodniej części miasta, a więc na kierunku dominujących wiatrów, w szczególności, że przewiduje się tu w głównej mierze zabudowę produkcyjno-techniczną (por. rys. 15). Rozwój przestrzenny miasta może więc ograniczać pozytywne oddziaływanie otoczenia na miasto. Jest to uwarunkowane historycznie – ekspansja miasta dokonuje się (i jest planowana) w kierunku zachodnim.

Wrażliwość miasta a podjęte działania adaptacyjne

W ocenie wrażliwości na zmiany klimatu nie ma możliwości pominięcia działań o charakterze adaptacyjnym [Fussel i Klein 2006], dotychczas planowanych lub realizowanych z uwagi na inne cele środowiskowe. Przykładowo działania mające na celu ochronę przed powodzią są aktualnie realizowane zgodnie z wymaganiami Dyrektywy Powodziowej i Dyrektywy Wodnej, ale należy też wskazać, że przebudowa systemu hydrograficznego służąca przeciwdziałaniu powodziom w Kaliszu dokonuje się od połowy XIX w. [Małecki i Wira 2011].

Zapewnienie miastu wody w latach 70. poprzedniego wieku oceniane było jako trudny do rozwiązania problem [Żurawski i in. 1973]. Obecnie w związku z podjętymi różnymi działaniami, w tym budową nowych ujęć wodnych, system zaopatrzenia w wodę funkcjonuje sprawnie, jednakże pozostaje wrażliwy na zmiany klimatu ze względu na charakter zasilania systemu.

Za działania adaptacyjne mające na celu złagodzenie oddziaływania fal upałów można uznać planowany wzrost udziału terenów zieleni miejskiej, m. in. poprzez nadawanie funkcji zieleni terenom przemysłowym [Studium... 2009; Zintegrowany Plan... 2013].

Rozwój infrastruktury zielonej jest działaniem o charakterze adaptacyjnym służącym zwiększeniu odporności miasta także na oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza. Działania mające na celu ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza nie są natomiast działaniami adaptacyjnymi, chociaż mają korzystny wpływ na odporność miasta na omawiany czynnik.

Niepewności w ocenie wrażliwości

Na dokładność uzyskanych wyników składa się suma niepewności, jakimi są obciążone poszczególne elementy analizy. Najmniejszą niepewnością charakteryzuje się ocena wrażliwości *ex post* oparta na dostępnych danych (o różnym stopniu szczegółowości), natomiast największą ocena przyszłych jej zmian. W pierwszym przypadku największa skala niepewności wynika z braku odpowiedniej jakości danych opisujących związane z klimatem zdarzenia w sferze gospodarczej i społecznej (np. interwencje straży pożarnej). Wiele tych danych było zagregowane do poziomu roku, przez co nie było możliwości skonfrontowania dobowych danych meteorologicznych z danymi o zdarzeniach w sferze społecznej i gospodarczej.

Inny poziom niepewności wiąże się z analizą zjawisk klimatycznych. Dysponowano danymi z jednej stacji meteorologicznej położonej na skraju miasta, co nie było wystarczające np. do zbadania zasięgu MWC, który określono pośrednio wykorzystując dane satelitarne.

We wszelkich ocenach prognostycznych mamy do czynienia ze znacznym poziomem niepewności. W przypadku analiz dotyczących wrażliwości miasta na zmiany klimatu, na obciążone dużą niepewnością prognozy klimatyczne nakładają się niepewności dotyczące przyszłego rozwoju miasta, zarówno przestrzennego, jak jego sfery społecznej i gospodarczej.

Pomimo znacznego zaangażowania władz miasta i odpowiednich instytucji nie udało się uzyskać wszystkich danych na takim poziomie szczegółowości, który umożliwiłaby przeprowadzenie pełnej analizy ilościowej. Problem braku danych ilościowych to także problem wyceny

kosztów ponoszonych w związku z czynnikami klimatycznymi, która jest niezbędna dla podejmowania decyzji dotyczących adaptacji [Hunt i Watkiss 2011].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Aby zapewnić zrównoważony rozwój miasta konieczne jest uwzględnienie oczekiwanych zmian klimatu w strategiach, planach i programach jego rozwoju w dłuższym horyzoncie czasowym. Dotyczy to w szczególności kierunków rozwoju zagospodarowania przestrzennego, gospodarki wodnej, ochrony powietrza, ochrony zdrowia, opieki społecznej. Uwzględnienie prognozowanych zmian powinno opierać się na stałym monitoringu zmian klimatu w mieście, ich skutków i kosztów.

Przeprowadzone badania wykazały, że miasto Kalisz w różnym stopniu jest wrażliwe na niektóre elementy klimatu. Pomimo ograniczeń wynikających z jakości informacji, było możliwe zidentyfikowanie najważniejszych zagrożeń związanych z przewidywanymi zmianami klimatycznymi i dokonanie oceny wrażliwości miasta na te czynniki. Niedostatek informacji mierzalnych nie wyklucza rzetelnej oceny wrażliwości miasta i poszczególnych elementów ekosystemu miejskiego na czynniki klimatyczne, a tym samym wskazania kierunków pożądanych działań adaptacyjnych.

Z badań wynika, że w pierwszym rzędzie należy skupić się na modernizacji sieci kanalizacyjnej, racjonalizacji zużycia wody, rozwoju infrastruktury błękitno-zielonej. Konieczne jest pilne wyeliminowanie indywidualnego ogrzewania wykorzystującego przestarzałe piece opalane węglem i wprowadzanie rozwiązań przyjaznych środowisku. W dziedzinie społecznej konieczne jest zapewnienie klimatyzacji w okresie letnim w szpitalu, przychodniach zdrowia, domach opieki, szkołach i przedszkolach.

Możliwości adaptacji poszczególnych elementów (podsystemów) miasta na prognozowane zmiany klimatyczne są zróżnicowane. Układy przestrzenne, w szczególności osadnicze, cechuje silna inercja, są więc trudne do przekształcenia. Istniejące układy silnie też warunkują ich dalszy (planowany) rozwój, w tym taki, który uwzględniałby potrzeby adaptacji do zmian klimatu. W planach zagospodarowania przestrzennego rozwój przestrzenny układów osadniczych

najczęściej określa się jako kontinuum terenów już zurbanizowanych lub ich dopełnienie („dogaśzczenie”). Tak też postąpiono w przypadku przyjętej strategii rozwoju przestrzennego Kalisza, w którym m.in. powiększono i dopełniono istniejące tereny w strefie zagrożenia powodziowego. Przewidziano też ekspansję zainwestowania miejskiego na terenach otwartych położonych po zachodniej części miasta, a więc po stronie nawietrznej.

Odpowiednie kształtowanie struktury przestrzennej miasta w aspekcie uwarunkowań klimatycznych silnie ograniczone jest też koniecznością uwzględnienia innych ważnych aspektów – ekonomicznych, własnościowych, społecznych, technicznych, funkcjonalnych, krajobrazowych oraz kulturowych. Wszystkie te aspekty składają się bowiem na ład przestrzenny oraz zrównoważony rozwój układu. W poszczególnych częściach funkcjonalnych miasta waga tych aspektów może być różna. W staromiejskim centrum szczególnej wagi nabiera np. konieczność zachowania wartości historycznych i kulturowych, co istotnie ogranicza możliwości przekształceń zarówno zabudowy, jak i układu urbanistycznego. A jest to – jak wykazano w pracy – szczególnie wrażliwa pod względem klimatycznym część miasta.

Podziękowania

Prezentowane badania zostały sfinansowane ze środków na działalność statutową Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego. Wszystkie mapy zamieszczone w artykule oraz analizy przestrzenne wykonała Małgorzata Bidłasik, której autorzy serdecznie dziękują. Autorzy wyrażają szczególne podziękowania pracownikom Urzędu Miejskiego w Kaliszu oraz służb miejskich Kalisza.

LITERATURA

1. Błażejczyk, K., Idzikowska D., Błażejczyk A. 2013. Forecast changes for heat and cold stress in Warsaw in the 21st century, and their possible influence on mortality risk, *Papers on Global Change*, 20, 47–62.
2. Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Milewski, P., Dudek, W., Kręcisz, B., Błażejczyk, A., Szmyd, J., Degórska, B., Pałczyński, C. 2014. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. Warszawa. Akademickie Sedno. ss. 171.

3. Błażejczyk, K., Kunert A. 2006. Differentiation of bioclimatic conditions of urban areas (the case of Poland) [w:] 6th International Conference on Urban Climate, 12–16 June 2006, Göteborg, Sweden. Preprints. 213–216.
4. Bogdan, A. 2011. Polskie normy a problem mikroklimatu w obiektach biurowych. *Chłodnictwo i Klimatyzacja*, Nr 9, 34–38.
5. COM(2013) 216 final An EU Strategy on adaptation to climate change. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52013DC0216> Dostęp 09.03.2016.
6. EEA Report 2/2012. 2012. Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies. <http://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-to-climate-change> Dostęp 02.03.2016.
7. ESPON 2011. Climate change and Territorial Effects on Region and Local Economies. Applied Research 2013/1/4. Draft Final Report / Version 25/2/2011 http://www.espon.eu/main/Menu_Projects/Menu_AppliedResearch/climate.html. Dostęp 02.03.2016.
8. ETC/ACC 2010. Urban Regions: Vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts. Technical Paper 2010/12.
9. Fussel H-M., Klein R. 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution Of Conceptual Thinking. *Climatic Change*, 75(3), 301–329.
10. Gabriel K.M.A, Endlicher W.R. 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2044–2050.
11. Galuba M., Pancewicz M. 2005. Plan wodny dla Kalisza. Projekt dotyczący lokalnej gospodarki wodnej realizowany we współpracy z holenderskim miastem Heerhugowaard. Urząd Miejski w Kaliszu (manuskrypt).
12. GUS 2014. Prognoza dla powiatów i miast na prawie powiatu oraz podregionów na lata 2014–2050. <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/prognoza-ludnosci/prognoza-dla-powiatow-i-miast-na-prawie-powiatu-oraz-podregionow-na-lata-2014-2050-opracowana-w-2014-r-,5,5.html>. Dostęp 29.12.2015.
13. Heat-waves: risks and responses. 2004. Health and Global Environmental Change Series, No. 2, Copenhagen, WHO Europe.
14. Hinkel J. 2011. Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a Clarification of the Science–Policy Interface. *Global Environmental*

- Change, 21(1), 198–208.
15. Hunt, A., Watkiss, P. 2011. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change*, 104(1), 13–49
 16. IPCC 2007 Fourth Assessment Report: Climate Change. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html Dostęp 2.03.2016.
 17. IPCC 2014. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [w:] Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press, 1132 pp.
 18. Kossowska-Cezak U. 2010. Fale upałów i okresy upalne – metody ich wyróżniania i wyniki zastosowania. *Prace Geograficzne, Zeszyt 123*, 143–149.
 19. Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Kuchcik M. 2004. Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka, Monografie, IGiPZ PAN, 4.
 20. Kuchcik, M. 2013. The attempt to validate the applicability of two climate models for the evaluation of heat wave related mortality in Warsaw in the 21 century. *Geographia Polonica*, 86(4), 295–311.
 21. Kundzewicz Z.W. 2014. Adapting flood preparedness tools to changing flood risk conditions: the situation in Poland. *Oceanologia* 56(2), 385–407.
 22. Kwietniewski M., Błaszczyk P., Misztal-Kruk K., Malesińska A., Pieńkowska J. 2014. Studium odprowadzania i zagospodarowania wód opadowych na obszarze miasta Kalisza – wersja uzupełniona. Miasto Kalisz (manuskrypt)
 23. Lai L-W., Cheng W-L. 2009. Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. *Science of the Total Environment*, 407(8), 2724–2733.
 24. Li X., Zhou W., Ouyang Z. 2013. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution? *Landscape and Urban Planning*, 114, 1–8.
 25. Liszewska M. i in. 2013. Ocena aktualnych i przewidywanych zmian klimatu do końca XXI w. w oparciu o scenariusze zmian klimatu [w:] Sadowski M. (red.) (2013). *Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu. Adaptacja wrażliwych sektorów i obszarów Polski do zmian klimatu do roku 2070. Projekt KLIMADA – Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu*. Warszawa. IOŚ-PIB <http://ios.edu.pl/klimada/Adaptacja2070.pdf>
 26. Maimaitiyiming M., Ghulam A., Tiyyip T., Pla F., Latorre-Carmona P., Halik Ü, Sawut M., Caetano M. 2014. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89, 59–66.
 27. Małecki Z.J., Wira J. 2011. Kaliski Węzeł Wodny. *Zeszyty Naukowe – Inżynieria Lądowa i Wodna w kształtowaniu środowiska*, Nr 4, 101–115.
 28. Monteiro A., Carvalho V., Velho S., Sousa C. 2013. The accuracy of the heat index to explain the excess of mortality and morbidity during heat waves – a case study in a mediterranean climate. *Bulletin of Geography. Socio-economic Series* 20, 71–84.
 29. Ostrowski J. i in. 2012. Nagłe powodzie lokalne (flush flood) w Polsce i skala ich zagrożeń [W:] Lorenc H. (red.) *Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. T. 3. Projekt Klimat. Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego)* Warszawa, IMGW-PIB.
 30. Program ochrony powietrza w zakresie pyłu PM10, PM 2,5 oraz B(a)P dla strefy miasto Kalisz, którego integralną część stanowi plan działań krótkoterminowych w zakresie pyłów. 2015. Uchwała nr XI/317/15 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego z dnia 26 października 2015 r.
 31. Rotnicka J. 1973. Charakterystyka zmienności stanów wody i przepływów Prosnicy w przekroju Piwonice. [w:] *Problemy wodne miasta Kalisza. Dokumentacja Geograficzna. Instytut Geografii PAN. Zeszyt z/s, 13–26.*
 32. RZGW 2015. Plan zarządzania ryzykiem powodziowym dla regionu wodnego Warty. http://www.powodz.gov.pl/pl/plan_view?id=5. Dostęp 28.10.2015
 33. Sadowski M. (red.) 2013. *Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu. Adaptacja wrażliwych sektorów i obszarów Polski do zmian klimatu do roku 2070. Projekt KLIMADA – Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu*. Warszawa. IOŚ-PIB <http://ios.edu.pl/klimada/Adaptacja2070.pdf>
 34. Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Kalisza. 2009 Uchwała nr XXXVIII/543/2009 Rady Miejskiej Kalisza z dnia 3 września 2009 r.
 35. Szulcewska B., Giedych R., Borowski J., Kuchcik M., Sikorski P., Mazurkiewicz A., Stańczyk T. 2014. How much green is needed for a vital neigh-

- bourhood? In search for empirical evidence. *Land Use Policy* 38, 330–345.
36. Taylor, B., Wallington, T., Heyenga, S., Harman, B. 2014. Urban Growth and Climate Adaptation in Australia: Divergent Discourses and Implications for Policy-making. *Urban Studies*, 51(1), 3–21.
37. Tokarczyk T., Szalińska W., Otop I. 2012. Ocena zagrożenia suszą w Polsce i prognoza jej rozwoju [W:] Lorenc H. (red.) *Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. T. 3. Projekt KLIMAT. Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego)* Warszawa, IMGW-PIB.
38. Voogt J.A., Oke T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384.
39. Weng Q.H. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(4), 335–344.
40. Weng Q.H., Yang S.H. 2006. Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS. *Environ Monit Assess* 2006;117:463–89.
41. Wilbanks T.J., Romero Lankao P., Bao M., Berkhout F., Cairncross S., Ceron J.-P., Kapshe M., Muir-Wood R., Zapata-Martí R. 2007. Industry, settlement and society. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. [w:] Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (eds). *Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, 357–390.
42. Xie M., Wang Y., Chang Q., Fu M., Minting Ye M. 2011. Assessment of landscape patterns affecting land surface temperature in different biophysical gradients in Shenzhen, China. *Urban Ecosystems*, 16(4), 871–886.
43. Zintegrowany Plan Rozwoju Obszarów Miejskich i Przemysłowych dla Miasta Kalisza do roku 2020. Uchwała Nr XXVII/355/2012 Rady Miejskiej Kalisza z dnia 27 września 2012 r. i Uchwała Nr XLII/583/2013 Rady Miejskiej Kalisza z dnia 20 grudnia 2013 r.
44. Żurawski M. 1973. Warunki geologiczne i hydrogeologiczne rejonu Kalisza. [W:] *Problemy wodne miasta Kalisza. Dokumentacja Geograficzna*. Instytut Geografii PAN. Zeszyt z/s, 27–39.
45. Żurawski M., Kaniecki A., Rotnicka J. 1973. Kompleksowa ocena możliwości zaopatrzenia w wodę miasta Kalisza z ujęć wód podziemnych i powierzchniowych. *Dokumentacja Geograficzna*. Instytut Geografii PAN. Zeszyt z/s, 54–56.