

Krzysztof BŁAŻEJCZYK , Anna BŁAŻEJCZYK 

FUNDACJA PRZYJAZNA PRZESTRZEŃ-PRZYJAZNY KLIMAT

ZMIANY KLIMATU I ICH WPŁYW NA BUDOWNICTWO I KOMFORT ŻYCIA MIESZKAŃCÓW MIAST, PRZYKŁAD WARSZAWY

CLIMATE CHANGES AND THEIR IMPACT ON CONSTRUCTION AND
LIVING COMFORT FOR CITY RESIDENTS, THE EXAMPLE OF WARSAW

Wstęp

Obserwowana współcześnie zmiana klimatu jest tematem licznych publikacji, na łamach których naukowcy starają się odpowiedzieć na pytanie o jej przyczyny. Arażny i in. (2021) wskazują na zwiększoną częstość antycyklonalnych sytuacji synoptycznych, które przewyższają frekwencję typów cyklonalnych w Europie Środkowej. Inni autorzy zwracają uwagę na wyraźny pod koniec XX wieku wzrost adwekcji powietrza z zachodu (Ustrnul 2007, Niedźwiedź, Ustrnul 2021), szczególnie w miesiącach zimowych (Bartoszek 2017). Sytuacja taka utrzymuje się także w pierwszych dekadach XXI wieku (Arażny i in. 2021). Te i inne wyniki badań nad klimatem są m.in. wykorzystywane do opracowywania raportów Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu (IPCC 2001, 2007, 2014, 2022), które poza informacją o fizycznych podstawach obserwowanych zmian zawierają również analizę ich oddziaływania na różne branże gospodarki oraz społeczeństwo. Jednym z tych obszarów jest budownictwo oraz funkcjonowanie terenów miejskich (Dodman i in. 2022).

W Polsce, mimo że odsetek ludności miejskiej w ostatnich latach się zmniejsza, to nadal współczynnik urbanizacji sięga 60% (*Sytuacja Demograficzna Polski* 2021), a w większości dużych aglomeracji, w tym w Warszawie, liczba mieszkańców stale rośnie. Powoduje to intensyfikację procesów urbanizacyjnych wpływających na zmiany przestrzenne w miastach. Presja budowy nowych osiedli mieszkaniowych zwykle spycha idee równoważonego rozwoju miast na dalszy plan, a zabudowa miejska coraz częściej wkracza na tereny tzw. korytarzy nawietrzających oraz w obszary cenne przyrodniczo (Błażejczyk i in. 2014; Błażejczyk K. 2022). Innym problemem jest tzw. budownictwo plombowe, które skutkuje istotnym pogorszeniem jakości życia mieszkańców i kurczeniem się przestrzeni publicznych (Marcinkowski 2015).

Jedną z przyczyn chaotycznego rozwoju budownictwa i mało skutecznej ochrony obszarów cennych przyrodniczo jest brak planów zagospodarowania przestrzennego dla większości dużych polskich miast, w tym także Warszawy (Śleszyński i in. 2007). W 2017 roku tylko 30,5% obszaru gmin w Polsce miało uchwalone plany zagospodarowania terenu, w Warszawie to niecałe 50% terenu miasta (Śleszyński i in. 2018). Uniemożliwia to w dużej mierze bądź utrudnia realizację polityki adaptacji miast do zmiany klimatu (KLIMADA 2013).

Obszary pokryte miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego to głównie tereny już silnie zurbanizowane, a większość inwestycji budowlanych w polskich miastach jest nadal realizowana na podstawie decyzji o warunkach zabudowy. Plany o charakterze ochronnym (np. chroniące tereny zagrożone powodzią, systemy przewietrzania miast, korytarze ekologiczne i zielone pierścienie wokół dużych miast) stanowią bardzo rzadko przedmiot planowania miejscowego (KLIMADA 2013). Podejmowane próby działań, które można określić jako adaptacyjne do zmian klimatu, zazwyczaj nie zyskują akceptacji społecznej. Dlatego też miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego, zakładające przeznaczenie gruntów na suche zbiorniki retencyjne, tereny zielone lub z różnych powodów wyłączone spod zabudowy, są w dużych miastach „skazane” na nieuchwalenie, ewentualnie wskutek presji mieszkańców bądź inwestorów zostają zmienione, tak aby na wskazanych terenach można było wprowadzać zabudowę mieszkaniową lub mieszkaniowo-usługową.

Tymczasem obserwowana zmiana klimatu coraz silniej wymusza konieczność podejmowania dwojakich działań – mitygacyjnych i adaptacyjnych. W latach 2011-2012 wielodyscyplinarny zespół naukowców stworzył w ramach projektu KLIMADA *Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu* (KLIMADA 2013), obszerny raport, który stał się podstawą do opublikowania przez Ministerstwo Środowiska w roku 2013 dokumentu *Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do roku 2030* (MŚ 2013). W opracowaniach tych proponuje się, aby analizy wpływu zmiany klimatu na poszczególne wrażliwe sektory były przeprowadzone na podstawie kilku podstawowych elementów klimatycznych, które zagregowano w tzw. Umowne Kategorie Klimatu (UKK) opisujące te zjawiska (tab. 1).

Zarówno w raporcie z projektu KLIMADA, jak i w dokumencie rządowym, jako obszary wrażliwe wymienione są m.in. budownictwo oraz gospodarka przestrzenna i miasta (sektor: obszary miejskie). W przypadku obszaru budownictwo analizy wrażliwości inwestycji na czynniki klimatyczne należy dokonywać dla poszczególnych etapów „życia” inwestycji, a mianowicie: do projektowania, wykonawstwa robót budowlanych i technologii wykonawczych, wyrobów i materiałów budowlanych oraz utrzymania (eksploatacji) obiektów. W tym ostatnim etapie analiz wkraczamy w obszar gospodarki przestrzennej i miast, a szczególnie wpływu obszarów miejskich na warunki życia mieszkańców. Wśród działań adaptacyjnych dla tych sektorów wymieniono m.in.: (i) wprowadzenie obowiązkowych planów zagospodarowania przestrzennego na poziomie regionalnym i lokalnym, szczególnie dla obszarów zurbanizowanych; (ii) uwzględnienie

Tabela 1. Umowne Kategorie Klimatu (UKK)
o istotnym wpływie na sektory wrażliwe (KLIMADA 2013).

Table 1. Conventional Climate Categories (UKK)
with a significant impact on sensitive sectors (KLIMADA 2013).

UKK	Cechy klimatu składające się na daną kategorię Climate features that make up a given category
Mróż Frost	bardzo niska temperatura, przemarzanie gruntu, pokrywa lodowa, gołoledź, stres zimna very low temperature, ground freezing, ice cover, black ice, cold stress
Śnieg Snow	intensywne opady, zamieć śnieżna, pokrywa śnieżna, gradobicie heavy snowfall, blizzard, snow cover, hail
Deszcz Rain	intensywne opady, wystąpienie powodzi lub podtopień heavy rainfall, flooding or inundation
Wiatr Wind	bardzo silny wiatr, burza, duży gradient ciśnienia atmosferycznego, turbulencja very strong wind, storm, large atmospheric pressure gradient, turbulence
Upał Hot	bardzo wysoka temperatura, usłonecznienie, stres gorąca very high temperature, insolation, heat stress
Mgła Fog	zjawiska ograniczające widzialność, mgła, niska podstawa chmur phenomena limiting visibility, fog, low cloud base

w planach zagospodarowania w miastach konieczności zwiększenia obszarów zielonej i błękitnej infrastruktury; (iii) opracowanie zasad zabudowy obszarów zieleni w miastach oraz budowy obiektów użyteczności publicznej; (iv) opracowanie planów gospodarki wodno-ściekowej w kontekście ryzyka opadowego i powodziowego oraz suszy w miastach. Należy także pamiętać, że podejmowane w miastach działania dotyczące zielonej i błękitnej infrastruktury mają na celu poprawę warunków życia mieszkańców przede wszystkim na etapie eksploatacji powstałych inwestycji.

Kierunki polityki przestrzennej polskich miast powinny uwzględniać zmiany klimatu, a rolą urbanistów i architektów powinno być minimalizowanie klimatycznych uciążliwości życia w obszarach zurbanizowanych. Dotyczy to zarówno pojedynczych budynków – poprzez stosowanie różnych rozwiązań technicznych – jak i przestrzeni publicznych – dzięki wprowadzaniu błękitno-zielonej infrastruktury czy elementów tzw. małej architektury oraz rozwiązań opartych na zasobach przyrody, tzw. Nature Based Solutions (*Jak zmiany klimatu...* 2019; Nowak, Schabowicz 2022).

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie, jak w okresie 1971-2020 zmieniły się w Warszawie warunki klimatyczne w odniesieniu do sektorów budownictwo i obszary miast (poprzez analizę zmian UKK) oraz ich możliwe predykcje w horyzoncie czasowym 2021-2070. Wskazane zostaną także przykłady rozwiązań urbanistyczno-architektonicznych oraz błękitno-zielonej infrastruktury, które pozwalają na minimalizowanie niekorzystnych dla mieszkańców miast cech klimatu.

Materiały i metoda

Do analizy cech klimatu o istotnym wpływie na budownictwo i obszary miast wykorzystano codzienne i miesięczne dane meteorologiczne ze stacji Warszawa-Okęcie za okres 1971-2020. Dane te są dostępne w serwisie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Zostały one przetworzone przez autorów opracowania, uwzględniając zakres ich dostępności. Biorąc pod uwagę oddziaływanie różnych cech klimatu na budownictwo i na człowieka w mieście, wybrano następujący zestaw kryteriów oceny UKK (tab. 2).

Tabela 2. Umowne Kategorie Klimatu (UKK) w sektorze budownictwa i warunków życia w obszarach zurbanizowanych oraz kryteria ich oceny (opracowanie własne na podstawie KLIMADA 2013).

Table 2. Conventional Climate Categories (UKK) in the construction sector and living conditions in urban areas and the criteria for their assessment (own elaboration based on KLIMADA 2013).

UKK	Kryterium oceny Evaluation criterion	Najważniejsze ryzyka i ich wpływ na sektory The most important risks and their impact on the sectors
Mróz Frost	liczba dni z temperaturą maksymalną poniżej 0°C days with $t_{max} < 0^{\circ}C$	niedogrzanie pomieszczeń, przemarzanie gruntu (wpływ na fundamentowanie), niewystarczająca mrozoodporność materiałów i wyrobów budowlanych, niewystarczająca termoizolacyjność instalacji wodno-kanalizacyjnej oraz grzewczej, ryzyko wystąpienia problemów zdrowotnych związanych z ekspozycją mieszkańców na stres zimna
	liczba dni z temperaturą minimalną poniżej -10°C days with $t_{max} < -10^{\circ}C$	
	liczba dni ze stresem zimna (UTCI < -13°C) days with cold stress (UTCI < -13°C)	
Upał Hot	liczba dni z temperaturą maksymalną powyżej 25°C days with $t_{max} > 25^{\circ}C$	przeegrzewanie pomieszczeń, niewystarczająca termoizolacyjność, gwałtowne powstawanie wód roztopowych na wiosnę, zwiększenie ryzyka wystąpienia pożarów, wzrost intensywności miejskiej wyspy ciepła, częstsze i dłuższe fale upałów, noce tropikalne, ryzyko wystąpienia problemów zdrowotnych związanych z ekspozycją mieszkańców na stres mieszkańców na stres ciepła (problemy kardiologiczne, odwodnienie organizmu, udar cieplny)
	liczba dni z temperaturą maksymalną wyższą od 30°C days with $t_{max} > 30^{\circ}C$	
	liczba dni ze stresem gorąca (UTCI > 32°C) days with heat stress (UTCI > 32°C)	
Wiatr Wind	liczba dni z wiatrem o prędkości maksymalnej powyżej 10 m s ⁻¹ days with wind_max > 10 m s ⁻¹	podatność konstrukcji na dynamiczne działanie wiatru
Deszcz Rain	liczba dni z opadem powyżej 1 mm days with precipitation > 1mm	niewydolność sieci kanalizacyjnej w przypadku gwałtownych opadów, zawilgocenie budynków; zmiany poziomu wód gruntowych, zagrożenia podtopieniami i powodzią błyskawicznymi, częstsze pojawianie się okresów susz, niedobory wody powodujące straty w zieleni miejskiej
	liczba dni z opadem powyżej 10 mm days with precipitation > 10 mm	
	suma opadu precipitation total	
Śnieg Snow	liczba dni z pokrywą śnieżną days with snow cover	zmiennie obciążenia konstrukcji nośnej dachów

Analizę prognozowanych na lata 2021-2070 UKK dla Warszawy przeprowadzono dla dwóch scenariuszy rozwoju opracowanych na potrzeby IPCC (IPCC 2014), opisanych akronimami:

- RCP4.5 (umiarkowanego, zakładającego dalszy wzrost stężeń CO₂, odpowiednio do 540 ppm w roku 2100 oraz osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 4,5 W m⁻²);
- RCP8.5 (w którym zakładany jest stały wzrost stężeń CO₂ do 940 ppm w roku 2100 i wzrost wymuszenia radiacyjnego do poziomu 8,5 W m⁻²).

Charakterystyki klimatu zawarte w analizie pochodzą z danych wymodelowanych w bazie danych Meteororm 8.03 (Global Meteorological Database for Planers). Pominęto analizę scenariusza RCP2.6 jako mało realistycznego (zakłada on stabilizację ilości CO₂ na poziomie 400 ppm pod koniec stulecia, jednak poziom ten obecnie został już przekroczony).

Zmiany podstawowych charakterystyk klimatu

50-letnia seria danych meteorologicznych ze stacji Warszawa-Okęcie wskazuje na wyraźny, istotny statystycznie, wzrost temperatury powietrza. Średnie roczne, maksymalne i minimalne jej wartości wzrastały o 0,47-0,50°C na każde 10 lat (rys. 1). Zwiększały się także absolutne, maksymalne i minimalne wartości temperatury (tab. 3).

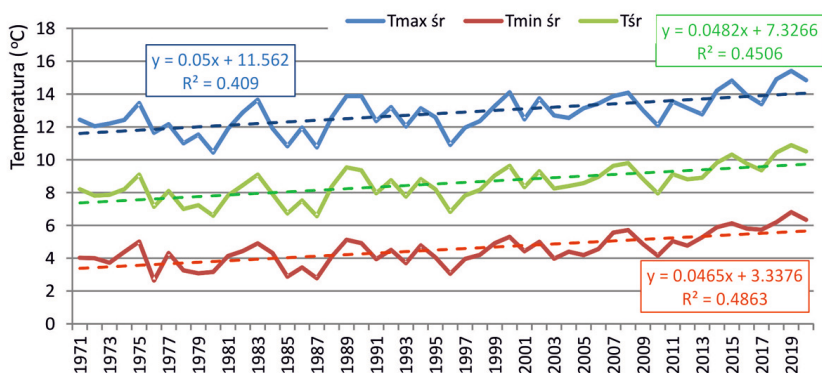
W latach 1971-2020 miały miejsce wahania rocznych sum opadów. Zmienność opadów z roku na rok jest duża, co sprawia, że trend wzrostowy, wynoszący około 10,4 mm/10 lat, nie jest istotny statystycznie (rys. 2).

Zmiany UKK w latach 1971-2020 i prognoza dla okresu 2021-2070

Analiza zmian UKK zostanie poprzedzona ogólną charakterystyką zmian temperatury powietrza, jednej z najważniejszych cech klimatu. Obserwowany w latach 1971-2020 wzrost temperatury powietrza utrzyma do roku 2070, przy czym w scenariuszu RCP8.5 będzie on większy niż w RCP4.5. Na koniec analizowanego okresu temperatura średnia roczna wzrośnie odpowiednio do 11,2 i 12,7°C, a więc o 1,4 i 2,9°C w stosunku do dziesięciolecia 2011-2020. Znaczący wzrost nastąpi także w przypadku średnich wartości temperatury maksymalnej i minimalnej oraz najniższej wartości temperatury minimalnej. Dla kolejnych dekad okresu 2021-2070 nie przewiduje się natomiast znaczących zmian najwyższej wartości temperatury maksymalnej (tab. 3).

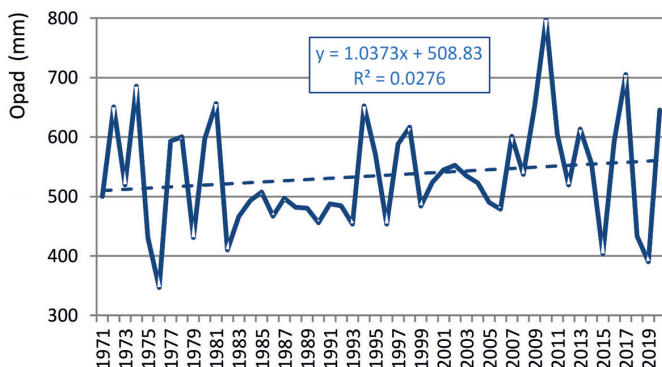
UKK: mróz

W okresie minionych 50 lat roczna liczba dni mroźnych, tzn. dni z temperaturą maksymalną poniżej 0°C, zmniejszała się i w latach 2011-2020 wynosiła tylko 24,4.



Rys. 1. Zmiany średnich rocznych (T_{sr}), średnich maksymalnych ($T_{max\acute{s}r}$) i średnich minimalnych ($T_{min\acute{s}r}$) wartości temperatury powietrza oraz odpowiednie linie trendu i równania regresji, Warszawa–Okęcie, 1971-2020. Źródło: opracowanie własne na podstawie przetworzonych danych IMGW-PIB.

Fig. 1. Changes in annual averages (T_{sr}), maximum averages ($T_{max\acute{s}r}$), minimum averages ($T_{min\acute{s}r}$) values of air temperature as well as trend lines and regression equations, Warszawa–Okęcie, 1971-2020. Source: own elaboration based on transformed raw IMGW-PIB data.



Rys. 2. Zmiany rocznych sum opadów atmosferycznych (RR) oraz linia trendu i jej równanie regresji, Warszawa–Okęcie, 1971-2020. Źródło: opracowanie własne na podstawie przetworzonych danych IMGW-PIB.

Fig. 2. Changes in annual precipitation totals (RR) as well as trend line and regression equation, Warszawa–Okęcie, 1971-2020.

Source: own elaboration based on transformed raw IMGW-PIB data.

Obydwa scenariusze zmian klimatu zakładają dalszy spadek liczby dni mroźnych do 16 (RCP4.5) i 12 (RCP8.5) rocznie. W okresie 1971-2020 roczna liczba dni bardzo mroźnych (z $T_{max} < -10^{\circ}\text{C}$) była w Warszawie niewielka (1,3-2,5). Prognozy na kolejne dziesięciolecia wskazują wartości wyższe od danych historycznych, ale obydwa scenariusze zakładają spadek liczby dni z temperaturą maksymalną poniżej -10°C (tab. 4). Obserwowane i pro-

Tabela 3. Średnie 10-letnie wartości wybranych charakterystyk klimatu w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 3. 10-year average values of selected climate characteristics in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa-Okęcie station.

Okres Period	T_{sr} (°C)	$T_{max,abs}$ (°C)	$T_{max,śr}$ (°C)	$T_{min,abs}$ (°C)	$T_{min,śr}$ (°C)
1971-1980	7,7	33,6	11,9	-25,2	3,8
1981-1990	8,1	33,4	12,4	-30,7	4,1
1991-2000	8,3	36,4	12,6	-21,6	4,2
2001-2010	8,8	35,7	13,1	-27,1	4,7
2011-2020	9,8	37,0	14,1	-23,1	5,8

Okres Period	T_{sr} (°C)		$T_{max,abs}$ (°C)		$T_{max,śr}$ (°C)		$T_{min,abs}$ (°C)		$T_{min,śr}$ (°C)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
2021-2030	10,0	10,3	34,5	34,6	14,1	14,5	-16,7	-15,9	5,7	6,0
2031-2040	10,3	10,9	34,8	35,3	14,6	15,2	-16,1	-15,1	6,1	6,5
2041-2050	10,7	11,5	35,2	36,0	14,9	15,6	-15,4	-14,4	6,4	7,2
2051-2060	11,1	12,1	35,6	36,8	15,4	16,4	-14,8	-13,6	6,8	7,7
2061-2070	11,2	12,7	35,6	37,4	15,4	16,9	-14,7	-13,1	7,0	8,4

T_{sr} – temperatura średnia roczna, $T_{max,abs}$ – najwyższa wartość temperatury maksymalnej, $T_{abs,min}$ – najniższa wartość temperatury minimalnej, $T_{max,śr}$ – średnia wartość temperatury maksymalnej, $T_{min,śr}$ – średnia wartość temperatury minimalnej.

T_{sr} – average annual temperature, $T_{max,abs}$ – the highest value of the maximum temperature, $T_{abs,min}$ – the lowest value of the minimum temperature, $T_{max,śr}$ – the average value of the maximum temperature, $T_{min,śr}$ – the average value of the minimum temperature.

* dane w tabelach 3-9: opracowanie własne na podstawie przetworzonych danych IMGW-PIB oraz Meteonorm 8.03.

* data in tables 3-9: own elaboration based on transformed raw IMGW-PIB and Meteonorm 8.03 data.

gnozowane zmiany tej kategorii UKK pozwalają na przyjęcie w projektowaniu budynków łagodniejszych wymagań w stosunku do systemów grzewczych. Potwierdzają to analizy tzw. heating degree days (HDD) wykonane dla Warszawy (Błażejczyk i in. 2014).

UKK: upał

W tej kategorii UKK nacisk kładzie się na zmiany liczby dni gorących (z temperaturą maksymalną powyżej 25°C) i upalnych (temperatura maksymalna powyżej 30°C), które zwiększają dyskomfort termiczny człowieka i są przyczyną wzrostu zgonów oraz

ostrzych stanów chorobowych układu oddechowego i układu krążenia. Istnieje bogata literatura dokumentująca wpływ takich warunków na zdrowie i jakość życia człowieka (por. Błażejczyk i in. 2018).

W okresie 1971-2020 liczba dni gorących i upalnych wzrastała w Warszawie znacząco, osiągając w latach 2011-2020 odpowiednio 56,7 oraz 11,7. Był to zatem wzrost blisko 2-krotny i ponad 4-krotny w stosunku do lat 1971-1980. Obydwa scenariusze zmian klimatu zakładają dalszy wzrost liczby dni gorących (do 70 wg RCP4.5 i 90 wg RCP8.5) oraz upalnych, odpowiednio do 20 i 34 dni rocznie (tab. 5). Na zwiększone wymagania dotyczące łagodzenia stresu gorąca w pomieszczeniach wskazuje także wzrost tzw. cooling degree days (CDD) w kolejnych dekadach XXI w. (Błażejczyk i in. 2014).

Upał jest czynnikiem, który powinien być szczególnie uwzględniany zarówno w odniesieniu do sektora budownictwa (np. poprzez zwiększone wymogi związane z instalacjami klimatyzacyjnymi i wentylacyjnymi, większą izolacyjnością termiczną budynków), jak i obszarów miast. Polityka przestrzenna powinna koncentrować się na utrzymywaniu sprawnego systemu wentylacji miasta i wymiany powietrza oraz stosowania rozwiązań zmniejszających stres cieplny. Skutecznym zabiegiem jest np. zwiększanie powierzchni zielonych, przede wszystkim zieleni wysokiej, które stabilizują warunki higrotermiczne na obszarach zurbanizowanych, jak również chronią przed wzmocnionym promieniowaniem słonecznym, szczególnie niebezpiecznym dla dzieci i osób starszych (KLIMADA 2013).

Tabela 4. Średnie 10-letnie wartości liczby dni mroźnych ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) i bardzo mroźnych ($T_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$) w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 4. The 10-year average values of the number of frosty days ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) and very frosty days ($T_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$) in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for Warsaw-Okęcie station.

Okres Period	dni z $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$	Okres Period	dni z $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ RCP4.5	dni z $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ RCP8.5
1971-1980	36,8	2021-2030	24,0	23,0
1981-1990	35,7	2031-2040	21,0	17,0
1991-2000	35,7	2041-2050	18,0	17,0
2001-2010	38,0	2051-2060	15,0	14,0
2011-2020	24,4	2061-2070	16,0	12,0

Okres Period	dni z $T_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$	Okres Period	dni z $T_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$ RCP4.5	dni z $T_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$ RCP8.5
1971-1980	1.3	2021-2030	12,0	7,0
1981-1990	2.5	2031-2040	11,0	9,0
1991-2000	1.9	2041-2050	9,0	5,0
2001-2010	2,0	2051-2060	7,0	7,0
2011-2020	1.4	2061-2070	7,0	3,0

Tabela 5. Średnie 10-letnie wartości liczby dni gorących ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) i upalnych ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 5. Average 10-year values of the number of hot days ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) and hot days ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa-Okęcie station.

Okres Period	dni z $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$	Okres Period	dni z $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ RCP4.5	dni z $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ RCP8.5
1971-1980	35,0	2021-2030	54,0	56,0
1981-1990	35,8	2031-2040	66,0	71,0
1991-2000	42,5	2041-2050	67,0	72,0
2001-2010	50,0	2051-2060	68,0	88,0
2011-2020	56,7	2061-2070	70,0	90,0

Okres Period	dni z $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$	Okres Period	dni z $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ RCP4.5	dni z $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ RCP8.5
1971-1980	3,6	2021-2030	10,0	13,0
1981-1990	4,1	2031-2040	12,0	20,0
1991-2000	7,4	2041-2050	13,0	24,0
2001-2010	9,5	2051-2060	16,0	30,0
2011-2020	11,7	2061-2070	20,0	34,0

Kategorie mróz i upał należy także rozpatrywać z perspektywy bezpośredniego oddziaływania na komfort cieplny mieszkańców na etapie eksploatacji inwestycji. W tym celu przeanalizowano warunki stresu termicznego, posługując się różnymi charakterystykami wskaźnika UTCI (Błażejczyk i in. 2012, 2015): wartością średnią roczną, maksymalną i minimalną roczną oraz częstością dni ze stresem zimna ($\text{UTCI} < -13^{\circ}\text{C}$) i dni ze stresem gorąca ($\text{UTCI} > 32^{\circ}\text{C}$) (tab. 6). W minionych 50 latach wyraźnie wzrastały średnie roczne wartości UTCI. Widać także trend rosnący maksymalnych wartości UTCI oraz liczby dni ze stresem ciepła. Zmniejszały się natomiast minimalne wartości UTCI i częstość dni ze stresem zimna. W kolejnych dekadach należy się spodziewać dalszego wzrostu wartości UTCI (średnich i maksymalnych) oraz liczby dni ze stresem gorąca, którego częstość w scenariuszu RCP8.5 może osiągnąć 33 dni w roku. Zmniejszać się będzie liczba dni ze stresem zimna. W dekadzie 2061-2070 może być ich mniej niż 30 (RCP4.5), a nawet 15 (RCP8.5) rocznie. Tak duże zmiany warunków stresu termicznego będą pociągały za sobą wzrost ryzyka pojawiania się różnych chorób klimatyzależnych (Błażejczyk i in. 2015) i konieczność wprowadzenia odpowiednich zmian w lokalnych systemach ochrony zdrowia.

Tabela 6. Średnie 10-letnie wartości wybranych charakterystyk UTCI w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 6. 10-year average values of selected UTCI characteristics in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa-Okęcie station.

Okres Period	UTCI _{sr} (°C)	UTCI _{max} (°C)	UTCI _{min} (°C)	UTCI > 32°C (dni/days)	UTCI < -13°C (dni/days)
1971-1980	3,7	36,6	-51,9	3,4	59,4
1981-1990	4,2	36,1	-42,3	3,5	58,5
1991-2000	5,0	41,1	-38,2	6,9	51,5
2001-2010	6,0	38,0	-40,8	7,5	49,4
2011-2020	8,0	40,5	-44,6	9,7	34,5

Okres Period	UTCI _{sr} (°C)		UTCI _{max} (°C)		UTCI _{min} (°C)		UTCI > 32°C (dni/days)		UTCI < -13°C (dni/days)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
2021-2030	8,4	9,0	36,2	37,4	-40,4	-35,8	9,0	6,0	33,0	26,0
2031-2040	9,2	10,0	36,3	40,5	-33,7	-42,0	10,0	11,0	30,0	27,0
2041-2050	9,7	10,6	38,8	39,9	-42,5	-36,2	10,0	14,0	26,0	23,0
2051-2060	10,0	10,0	40,7	40,7	-41,8	-41,8	14,0	14,0	26,0	26,0
2061-2070	10,2	12,3	37,8	41,3	-31,0	-38,0	8,0	33,0	27,0	15,0

UTCI_{sr} – średnia roczna wartość UTCI, UTCI_{max} – najwyższa roczna wartość UTCI, UTCI_{min} – najniższa roczna wartość UTCI, UTCI>32°C – roczna liczba dni ze stresem gorąca, UTCI < -13°C – roczna liczba dni ze stresem zimna.

UTCI_{sr} – average annual UTCI, UTCI_{max} – the highest annual value of UTCI, UTCI_{min} – the lowest annual value of UTCI, UTCI > 32°C – annual number of hot stress days, UTCI < -13°C – annual number of cold stress days.

UKK: wiatr

Wbrew intuicyjnemu przeświadczeniu, w minionych 50 latach liczba dni z wiatrem silnym (o prędkości maksymalnej powyżej 10 m s⁻¹) zmniejszała się o 5,6 dnia na 10 lat. Proces ten nasilił się wyraźnie po roku 2000. Prognozy na lata 2021-2070 nie przewidują większych zmian w częstotliwości wiatrów silnych (tab. 7). Należy jednak pamiętać o tym, że metody obserwacji prędkości wiatru w latach 1971-2020 wyraźnie się zmieniały (m.in. wprowadzanie nowych generacji wiatromierzy), co sprawia, że analiza wieloletnich ciągów prędkości wiatru wymaga szczególnej uwagi. Także modelowane prognozy wiatru charakteryzują się dużą niepewnością. Obserwowane losowe występowanie silnych wiatrów (huragany) i ich lokalny charakter (np. trąby powietrzne) nie dają możliwości

Tabela 7. Średnie 10-letnie wartości liczby dni z wiatrem o prędkości maksymalnej $>10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 7. 10-year average values of the number of days with a maximum wind speed $>10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa-Okęcie station.

Okres Period	Dni z wiatrem >10 m/s	Okres Period	Dni z wiatrem >10 m/s RCP4.5	Dni z wiatrem >10 m/s RCP8.5
1971-1980	42,3	2021-2030	38,0	32,0
1981-1990	45,7	2031-2040	33,0	35,0
1991-2000	45,0	2041-2050	36,0	33,0
2001-2010	30,5	2051-2060	39,0	38,0
2011-2020	20,5	2061-2070	34,0	34,0

precyzyjnego określenia zagrożenia tym zjawiskiem. Mimo tych zastrzeżeń projektanci muszą pamiętać o tym, że przez co najmniej 30 dni w roku mogą wiać wiatry silne, a zatem należy odpowiednio dostosować do tego konstrukcje budynków oraz miejscowe zagospodarowanie terenu. Wzrost gwałtowności porywów wiatru jest szczególnie niebezpieczny dla obiektów wysokich i wysokościowych, konstrukcji halowych, wież, mostów i wiaduktów (KLIMADA 2013).

UKK: deszcz

Opady atmosferyczne, zwłaszcza w formie deszczu, są ważnym czynnikiem klimatycznym oddziałującym na funkcjonowanie ośrodków miejskich. Dane archiwalne wskazują, że w Warszawie w minionych 50 latach roczne sumy opadów zmieniały się znacząco z roku na rok (rys. 2). Średnie wartości 10-letnie łagodzą obraz tej zmienności. To samo dotyczy prognoz na XXI wiek, które nie zakładają znaczącego wzrostu sum opadów. Niemniej, z uwagi na dynamikę tego elementu klimatu, można przyjąć, że także w kolejnych latach obecnego wieku trzeba się liczyć z dużą zmiennością opadów. W niewielkim zakresie zmieniała się i będzie się zmieniać liczba dni z opadem $>1 \text{ mm}$ i $>10 \text{ mm}$. Prognozy przewidują, że te ostatnie będą występowały przez około 15 dni w roku, głównie w okresie letnim (tab. 8).

Biorąc pod uwagę, że w Warszawie sumy roczne opadu zmieniały się w bardzo szerokim zakresie (od około 350 mm w roku 1976 do blisko 800 mm w roku 2010), w projektowaniu inwestycji trzeba przewidzieć zarówno urządzenia i systemy służące retencjonowaniu wody, jak i takie, które mają skutecznie odprowadzać jej nadmiar. Objętość tzw. podziemnych bloków retencyjno-rozsączających powinna być zaplanowana tak, aby były one w stanie zmagazynować możliwie całą wodę deszczową z okresowo występujących intensywnych opadów. Istotne będzie też wprowadzenie elementów błękitno-zielonej

Tabela 8. Średnie 10-letnie wartości roczne sumy opadu, liczba dni z opadem >1 mm i >10 mm w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa–Okęcie.

Table 8. 10-year average annual values of precipitation totals, number of days with precipitation >1 mm and >10 mm in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa–Okęcie station.

Okres Period	opad (mm)	Okres Period	Opad (mm) RCP4.5	Opad (mm) RCP8.5
1971-1980	535,6	2021-2030	569,1	569,4
1981-1990	491,6	2031-2040	573,8	566,3
1991-2000	531,6	2041-2050	574,0	566,4
2001-2010	571,3	2051-2060	580,3	569,6
2011-2020	546,3	2061-2070	578,9	576,9

Okres Period	Dni z opadem >1 mm	Okres Period	Dni z opadem >1 mm RCP4.5	Dni z opadem >1 mm RCP8.5
1971-1980	90,9	2021-2030	110,1	110,0
1981-1990	88,5	2031-2040	110,3	110,0
1991-2000	94,8	2041-2050	110,3	110,0
2001-2010	96,1	2051-2060	110,5	110,1
2011-2020	90,9	2061-2070	110,4	110,3

Okres Period	Dni z opadem >10 mm	Okres Period	Dni z opadem >10 mm RCP4.5	Dni z opadem >10 mm RCP8.5
1971-1980	12,8	2021-2030	14,0	15,0
1981-1990	10,1	2031-2040	15,0	14,0
1991-2000	10,9	2041-2050	15,0	14,0
2001-2010	13,2	2051-2060	16,0	15,0
2011-2020	13,0	2061-2070	16,0	15,0

infrastruktury poprawiających spowolnienie odpływu oraz zwiększenie małej retencji w celu gromadzenia wód opadowych. Na terenach miast należy tworzyć odrębne systemy kanalizacji deszczowej. Warto wziąć pod uwagę ich wykorzystywanie dla potrzeb gospodarczych.

Miasta, z uwagi na duże zagęszczenie zabudowy oraz uszczelnienie powierzchni terenu przez nawierzchnie asfaltowe i betonowe, a co za tym idzie zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie infiltracji, są szczególnie podatne na podtopienia w wyniku gwałtownych ulew, intensywnych długotrwałych opadów lub gwałtownego topnienia pokrywy śnieżnej i lodowej. Zabezpieczenie miasta przed skutkami powodzi błyskawicznych jest praktycznie niemożliwe, występowanie szkód może jednak istotnie zmniejszyć dobra wydolność systemu odwadniającego oraz możliwości gromadzenia wody – zarówno

no w zbiornikach retencyjnych (w tym retencji przyobiektowej), jak i poprzez retencję gruntową (KLIMADA 2013).

Bolączką Warszawy i innych miast Polski jest powtarzające się w ostatnich latach zjawisko suszy atmosferycznej i glebowej. Prognozowane zwiększanie częstości i intensywności takich susz będzie wymagało odpowiedniej infrastruktury nawadniającej i stosowania właściwego doboru gatunków zieleni miejskiej.

UKK: śnieg

Minione 50 lat zaznaczyło się w całej Polsce, w tym także w Warszawie, zmniejszającą się liczbą dni z pokrywą śnieżną oraz ubytkiem jej grubości. Prognozy na wiek XXI przewidują dalszy spadek obu wskaźników (tab. 9). Mimo to, klimat Polski będzie nadal cechował się występowaniem pokrywy śnieżnej w okresie zimowym. Należy pamiętać więc o obciążeniu śniegiem w analizach nośności konstrukcji, zwłaszcza budynków wielkopowierzchniowych. Z kolei duże opady śniegu w okresie wczesnowiosennym, w którym coraz częściej pojawia się stosunkowo wysoka temperatura powietrza, zwiększają ryzyko związane z dużą ilością wód roztopowych, które mogą powodować czasowe przeciążenia instalacji kanalizacyjnych.

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że najważniejszymi, związanymi ze zmianami klimatu, czynnikami ryzyka dla budownictwa i jakości życia mieszkańców obszarów zurbanizowanych są: wzrost temperatury powietrza, zwiększenie liczby dni gorących i upalnych, zmniejszenie liczby dni z pokrywą śnieżną oraz dalsze utrzymywanie się znacznej liczby dni z intensywnymi opadami deszczu, zwłaszcza od maja do sierpnia. Należy się także liczyć ze znaczną liczbą dni z silnym wiatrem. Prognozowane zmiany warunków termicznych będą skutkować zwiększeniem problemów z zachowaniem komfortu termicznego mieszkańców miast. Dlatego bardzo ważne jest za-

Tabela 9. Średnie 10-letnie wartości liczby dni z pokrywą śnieżną w okresie 1971-2020 oraz ich wartości prognozowane na lata 2021-2070 wg scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 dla stacji Warszawa-Okęcie.

Table 9. Average 10-year values of the number of days with snow cover in the period 1971-2020 and their projected values for the years 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Warszawa-Okęcie station.

Okres Period	Dni ze śniegiem	Okres Period	Dni ze śniegiem RCP4.5	Dni ze śniegiem RCP8.5
1971-1980	54,4	2021-2030	64,0	51,0
1981-1990	51,4	2031-2040	45,0	50,0
1991-2000	42,6	2041-2050	42,0	33,0
2001-2010	61,5	2051-2060	44,0	42,0
2011-2020	40,0	2061-2070	43,0	31,0

równowadź odpowiednie planowanie struktury funkcjonalno-przestrzennej miast, jak i kształtowanie przestrzeni publicznych umożliwiające łagodzenie obciążających warunków biotermicznych. Pozytywnie, z punktu widzenia samych budowli, jak i korzystających z nich mieszkańców, można natomiast ocenić zmniejszanie się liczby dni mroźnych i bardzo mroźnych.

Planowanie przestrzeni miejskich – reakcja na zmiany klimatu

Specyficzne cechy klimatu miasta są wynikiem m.in. fizycznych właściwości materiałów pokrywających grunt rodzimy (które pochłaniają więcej promieniowania słonecznego niż odbijają), małego udziału naturalnych powierzchni roślinnych (które stabilizują bilans cieplny), dużej liczby powierzchni pionowych (silnie modyfikujących dopływ promieniowania słonecznego oraz kierunek i prędkość wiatru), a także aktywności człowieka (która dostarcza ciepło wytwarzane przez urządzenia grzewcze i klimatyzacyjne, przemysł, ruch samochodowy) (Oke 1981; Arnfield 1990; Błażejczyk i in. 2014).

W kształtowaniu warunków bioklimatycznych w miastach dużą rolę odgrywa także geometria budynków i odległości między nimi. Ma to kluczowe znaczenie nie tylko dla przepływu powietrza, ale także dla panujących wewnątrz zabudowy warunków termicznych, radiacyjnych i aerosanitarnych (Hegger i in. 2008; Klemm 2011).

W przypadku dużych i średnich miast mamy do czynienia ze specyficznym klimatem o wyraźnie mniej przyjaznych i komfortowych dla mieszkańców cechach niż te panujące poza obszarem zabudowanym. Do najistotniejszych różnic w stosunku do terenów niezurbanizowanych należą: mniejsze o 5-15% osłonecznienie, większe o 5-10% zachmurzenie, mniejszy o 10-30% dopływ promieniowania słonecznego, wyższa temperatura powietrza, zmniejszenie różnic między temperaturą dnia i nocy, zmniejszenie o 20-30% prędkości wiatru, niższa wilgotność względna powietrza, większa liczba dni z opadem oraz wydłużenie czasu ich trwania, a także wzrost częstości występowania opadów gradu, burz i opadów o silnym natężeniu (Lewińska 2000, Zielonko-Jung 2014). Kombinacja różnych cech klimatu rozpatrywanych z punktu widzenia oddziaływania na organizm człowieka tworzy specyficzny bioklimat miasta (Kozłowska-Szczęśna i in. 1997; Błażejczyk 2002; Ali-Toudert, Mayer 2007; Klemm 2011).

Planowanie i projektowanie terenów zurbanizowanych – na poziomie obszaru całych miast, dzielnic, kwartałów zabudowy, ale i wewnątrz urbanistycznych – powinno opierać się na wiedzy dotyczącej specyfiki klimatu miast, a zwłaszcza na analizie warunków radiacyjnych, termicznych, wietrznych i biotermicznych. Analizy takie stają się w wielu krajach standardem (Reuter i in. 2010; Ketterer, Matzarakis 2014), a ich celem jest zmniejszenie zagrożeń dla zdrowia i życia mieszkańców oraz poprawa jakości przestrzeni miast poprzez odpowiednie kształtowanie ich warunków mikroklimatycznych i biotermicznych. W Polsce kryteria te są bardzo rzadko brane pod uwagę przy projektowaniu, planowaniu czy rewitalizowaniu przestrzeni obszarów zurbanizowanych. Dlatego też jakość przestrzeni publicznych w miastach jest z reguły wynikiem przyjętych powszechnie

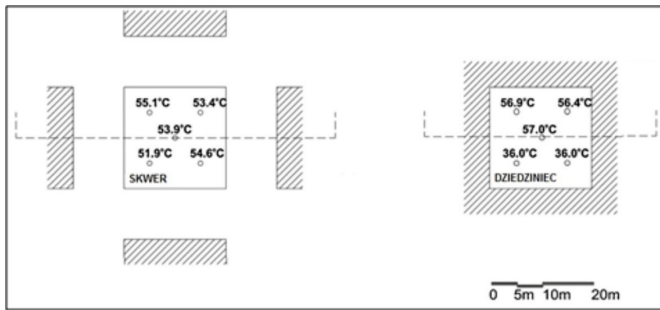
schematów projektowych czy rewitalizacyjnych. Należy przy tym pamiętać, że przestrzeń miast jest zasobem ograniczonym, a jej zagospodarowanie jest z zasady długotrwałe. Tym bardziej, zwłaszcza w obliczu zmian klimatu i niezbędnych działań adaptacyjnych, które muszą być wprowadzane w polskich miastach, jednym z głównych celów kształtowania ich przestrzeni powinno być tworzenie optymalnych warunków mikroklimatycznych i bioklimatycznych (Błażejczyk 2022).

W ostatnich latach powstało szereg programów pozwalających na numeryczne modelowanie klimatu i bioklimatu przestrzeni miejskich. Najbardziej popularnymi programami symulacyjnymi są: MITRAS (Schlünzen i in. 2003), ENVI-met (Brüse 2004), SOLWEIG (Lindberg i in. 2008), MUKLIMO_3 (Sievers, Früh 2012), HURES (Park i in. 2014), Ray-Man (Matzarakis i in. 2010) i PALM (Maronga i in. 2020). Należy oczywiście pamiętać, że symulacje nie będą w pełni odzwierciedlać złożoności mikroklimatycznej wewnątrz urbanistycznych (czyli przestrzeni pomiędzy różnymi obiektami w mieście), mogą jednak dostarczyć porównywalnych wyników do analizy mikroklimatu w odniesieniu do założeń projektowych (Chatzidimitriou, Yannas 2015).

Jak osiągnąć komfort termiczny w przestrzeniach miejskich

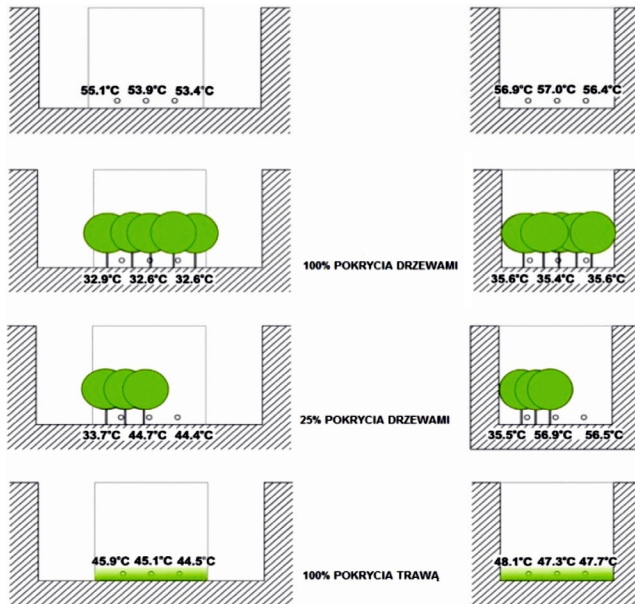
Badania wpływu morfologii miasta – elementów takich jak geometria ulic i budynków (Chen i in. 2012) – oraz zagospodarowania wewnątrz urbanistycznych przy użyciu różnych rodzajów roślinności (Shashua-Bar i in. 2011), czy właściwości materiałów budowlanych (Santamouris i in. 2012; Erell i in. 2014) na komfort cieplny użytkowników miejskich przestrzeni są prowadzone od wielu lat. W świetle postępującego ocieplenia klimatu cenne są zwłaszcza wyniki badań na temat strefy klimatu podzwrotnikowego. Jednym z wielu przykładów są analizy Chatzidimitriou i Yannas (2015). Dotyczą one różnych rozwiązań projektowych mających na celu poprawę komfortu cieplnego określonego na podstawie tzw. ekwiwalentnej temperatury fizjologicznej (Physiological Equivalent Temperature, PET, Höppe 1999). Autorzy zastosowali w nich różne formy zacieniania dwóch przestrzeni miejskich w Grecji, skweru i dziedzińca (drzewa, struktury zacieniające, zadaszenia, trawę i powierzchnię wodną). W letni, słoneczny dzień wewnątrz skweru nagrzewa się do 52-55°C, a wewnątrz dziedzińca od 36°C (w miejscach zacienionych) do 57°C (w miejscach nasłonecznionych) (rys. 3).

Dane pogodowe wykorzystane do symulacji są reprezentatywne dla gorących warunków panujących latem w większości miast południowej i centralnej Europy, w których połączenie wysokiej temperatury powietrza, umiarkowanej prędkości wiatru i intensywnego promieniowania słonecznego prowadzi do bardzo silnego lub nieznośnego stresu ciepła. Największy efekt chłodzący (o około 20°C) osiągnięto przy zastosowaniu drzew i struktur ocieniających. Wprowadzenie samej nawierzchni trawiastej obniżyło temperaturę PET tylko o ok. 10°C (rys. 4), a powierzchni wodnej o około 12°C (rys. 5). Podany przykład wskazuje, jak ważną rolę w kształtowaniu mikroklimatu przestrzeni miejskich odgrywa zieleń.



Rys. 3. Temperatura odczuwalna PET na badanych powierzchniach; szraf oznacza budynki (opracowanie własne na podstawie Chatzidimitriou, Yannas 2015).

Fig. 3. Perceived PET temperature on the tested surfaces; shraf means buildings (adapted from Chatzidimitriou, Yannas 2015).



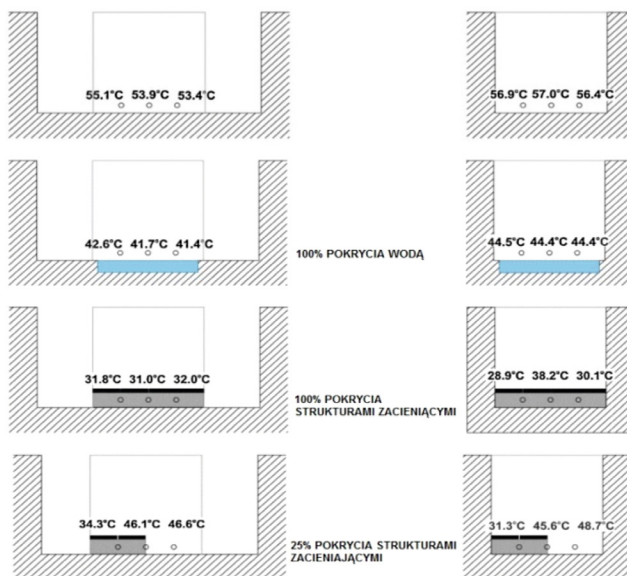
Rys. 4. Przekroje skweru (po lewej) i dziedzińca (po prawej) z modelowanymi wartościami PET (ekwiwalentnej temperatury fizjologicznej) w południe (symulacja: EnviMet).

Opracowanie własne na podstawie Chatzidimitriou, Yannas (2015).

Fig. 4. Sections of the square (left) and courtyard (right) with modeled PET (Physiologically Equivalent Temperature) values at noon (simulation: EnviMet).

Adapted from Chatzidimitriou, Yannas (2015).

Badania jednoznacznie pokazują, że drzewa dużo skuteczniej poprawiają warunki mikroklimatyczne niż powierzchnie trawiaste i tzw. łąki kwietne (rys. 6). Niemniej, stosowanie trawników i łąk kwietnych łagodzi dobowe wahania temperatury i poprawia



Rys. 5. Przekroje skweru (po lewej) i dziedzińca (po prawej) z modelowanymi wartościami PET w południe (symulacja: EnviMet). Opracowanie własne na podstawie Chatzidimitriou, Yannas (2015).

Fig. 5. Sections of the square (left) and courtyard (right) with modeled PET values at noon (simulation: EnviMet). Adapted from Chatzidimitriou, Yannas (2015).

bioróżnorodność (Sherine i in. 2019). Przy doborze zieleni w przestrzeniach miejskich należy także uwzględnić jej działanie alergenne, które może być obciążeniem dla mieszkańców (Kuchcik i in. 2016).

Elementy wodne w przestrzeniach miejskich stanowią: naturalne i sztuczne zbiorniki wodne (rys. 7), wodne place zabaw, baseny (rys. 8), kanały wodne, fontanny tradycyjne lub tryskające bezpośrednio z posadzki placu czy ulicy oraz kurtyny wodne (rys. 9). Stosowanie wody w przestrzeniach miejskich wpływa pozytywnie na mikroklimat poprzez oczyszczanie i ochładzanie powietrza. Ruch wody w wodotryskach ujemnie jonizuje powietrze, a to znacznie poprawia samopoczucie ludzi przebywających w ich otoczeniu. Z kolei kurtyny wodne oczyszczają powietrze z pyłów i tłumią miejski hałas (Pluta 2018).

Struktury zacieniające (shade structure, canopy) to pełne lub ażurowe konstrukcje, przymocowane na stałe do zabudowy lub wolnostojące, stosowane w parkach, na placach, ulicach czy na dziedzińcach w celu zapewnienia ich użytkownikom cienia (rys. 10-11). Obniżają ilość promieniowania słonecznego docierającego do podłoża, a poprzez to istotnie zmniejszają obciążenia cieplne, chronią przed promieniowaniem UV, są odporne na silne porywy wiatru, a jednocześnie wymuszają lokalną cyrkulację powietrza (Turnbull, Parisi 2006). Struktury zacieniające stosowane są od wielu lat w basenie Morza Śródziemnego, w Australii oraz Stanach Zjednoczonych i wydaje się, że mogą być doskonałym rozwiązaniem także w przestrzeniach publicznych polskich miast.



Rys. 6. Łąka kwietna w Katowicach, fot. S. Rybok.
Fig. 6. Flower meadow in Katowice, photo: S. Rybok.



Rys. 7. Stawy Brustmana na osiedlu Wawrzyszew w Warszawie, fot. D. Żuchowicz.
Fig. 7. Brustman's ponds in the Wawrzyszew estate in Warsaw, photo: D. Żuchowicz.



Rys. 8. Miejski basen, Plac Poczdamski, Berlin, fot. Fundacja Sendzimira.
Fig. 8. Municipal pool, Potsdamer Platz, Berlin, photo: Sendzimir Foundation.



Rys. 9. Multimedialny Park Fontann, fot. m.st. Warszawa.

Fig. 9. Multimedia Fountain Park, photo: Warsaw City Council.



Rys. 10. Struktura zacieniająca w Phoenix's Civic Space Park, fot. Architeton.

Fig. 10. Shading structure in Phoenix's Civic Space Park, photo: Architeton.



Rys. 11. Cavenagh Street, Darwin's CBD, Australia, fot. M. Franchi, ABC News.

Fig. 11. Cavenagh Street, Darwin's CBD, Australia, photo: M. Franchi, ABC News.

Podsumowanie i wnioski

Analiza obserwowanych i prognozowanych do roku 2070 cech klimatu wskazuje, że największe zmiany – obecnie i w przyszłości – dotyczą temperatury powietrza. W okresie 1971-2020 wzrastały zarówno średnie, jak i maksymalne oraz minimalne wartości temperatury powietrza (o około 0,5°C/10 lat). Trend ten będzie w najbliższych dziesięcioleciach postępował.

W badanym okresie w Warszawie liczba dni gorących wzrosła blisko dwukrotnie, a dni upalnych ponad 4-krotnie, osiągając w ostatnim dziesięcioleciu odpowiednio 56,6 i 11,7 dni rocznie. Scenariusze zmian klimatu zakładają dalszy wzrost liczby dni gorących (do 70, wg RCP4.5 i 90, wg RCP8.5) oraz upalnych, odpowiednio do 20 i 34 dni rocznie. Zmniejsza się natomiast – i nadal będzie się zmniejszać – liczba dni mroźnych i bardzo mroźnych oraz liczba dni z pokrywą śnieżną.

Zarówno dane obserwacyjne, jak i obydwa scenariusze zmian klimatu (RCP4.5 i RCP8.5) nie wskazują na istotne zmiany ilości opadów i liczby dni z opadem oraz na zmiany liczby dni z wiatrem silnym. Należy jednak pamiętać, że liczba dni opadowych i wietrznych będzie się utrzymywać na dość wysokim poziomie, a same zjawiska mogą coraz częściej przybierać formy ekstremalne w postaci np. nawałnych opadów, huraganów czy trąb powietrznych.

Uwzględnianie coraz częstszych sytuacji pojawiania się silnego stresu termicznego na terenach zurbanizowanych w tworzeniu katalogu działań adaptacyjnych do zmian klimatu jest zatem niezbędne. Działania te są konieczne na różnych poziomach polityki przestrzennej. Dokumenty planistyczne, takie jak miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego oraz studia uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, powinny uwzględniać rozwiązania, które w perspektywie kilkunastu lub kilkadziesięciu lat pozwolą na zachowanie przestrzeni miejskich o przyjaznym, a przynajmniej o nieopresyjnym mikroklimacie i bioklimacie.

L i t e r a t u r a

- Ali-Toudert F., Mayer H., 2007, Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions, *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 223-237, DOI: 10.1007/s00704-005-0194-4.
- Araźny A., Bartczak A., Maszewski R., Krzemiński M., 2021, The influence of atmospheric circulation on the occurrence of dry and wet periods in Central Poland in 1954-2018, *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 1079-1095, DOI: 10.1007/s00704-021-03780-0.
- Arnfield A.J., 1990, Street design and urban canyon solar access, *Energy and Buildings*, 14 (2), 117-131, DOI: 10.1016/0378-7788(90)90031-D.
- Bartoszek K., 2017, Zmienność wskaźników cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Lubelszczyzny i związek temperatury powietrza i opadów atmosferycznych z tymi wskaźnikami, *Prace Geograficzne*, 150, 61-78, DOI: 10.4467/20833113PG.17.017.7321.

- Błażejczyk A., 2022, Klimatologia a planowanie przestrzeni miejskich, (w druku).
- Błażejczyk A., Błażejczyk K., Baranowski J., Kuchcik M., 2018, Heat stress mortality and desired adaptation responses of healthcare system in Poland, *International Journal of Biometeorology*, 62 (3), 307-318, DOI: 10.1007/s00484-017-1423-0.
- Błażejczyk K., 2002, Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej, *Dokumentacja Geograficzna*, 26, 161 s.
- Błażejczyk K., 2022, Czy mieszkańcom miast można zapewnić przyjazny klimat?, [w:] *Człowiek w środowisku zamieszkania: wyzwania XXI wieku*, Polskie Towarzystwo Statystyczne, Warszawa, (w druku).
- Błażejczyk K., Baranowski J., Błażejczyk A., 2015, Wpływ klimatu na stan zdrowia w Polsce: stan aktualny oraz prognoza do 2100 roku, *Wydawnictwo Akademickie SEDNO*, Warszawa, 218 s.
- Błażejczyk K., Epstein Y., Jendritzky G., Staiger H., Tinz B., 2012, Comparison of UTCI to selected thermal indices, *International Journal of Biometeorology*, 56 (3), 515-535, DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2.
- 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, *Wydawnictwo Akademickie Sedno*, Warszawa, 171 s.
- Brüse M., 2014, ENVI-met 3.0: Updated Model Overview, University of Bochum, dostępne online <https://www.envi-met.net/documents/papers/overview30.pdf> (17.05.2023).
- Chatzidimitriou A., Yannas S., 2015, Microclimate development in open urban spaces: the influence of form and materials, *Energy and Buildings*, 108, 156-174, DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.048.
- Chen L., Ng E., An X., Ren C., Lee M., Wang U., 2012, Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach, *International Journal of Climatology*, 32 (1), 121-136, DOI: 10.1002/joc.2243.
- Dodman D., Hayward B., Pelling M., Castan Broto V., Chow W., Chu E., Dawson R., Khirfan L., McPhearson T., Prakash A., Zheng Y., Ziervogel G., 2022, Cities, settlements and key infrastructure, [w:] *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 907-1040.
- Erell E., Pearlmutter D., Boneh D., Kutiel P.B., 2014, Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons, *Urban Climate*, 10 (2), 367-386, DOI: 10.1016/j.uclim.2013.10.005.
- Hegger M., Fuchs M., Stark T., Zeumer M., 2008, *Energy Manual, Sustainable Architecture*, Birkhäuser, Berlin, 280 s.
- Höppe P., 1999, The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75, DOI: 10.1007/s004840050118.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,

- J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White (red.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1042 s.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 987 s.
- IPCC, 2014, *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*, C.B. Field, 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 (red.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (red.), Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jak zmiany klimatu wpływają na budynki i ich otoczenie?, 2019, dostępne online <https://inzy-nierbudownictwa.pl/jak-zmiany-klimatu-wplywaja-na-budynki-i-ich-otoczenie/> (17.05.2023).
- Ketterer C., Matzarakis A., 2014, Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany, *Landscape and Urban Planning*, 122, 78-88, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.
- Klemm K., 2011, Kompleksowa ocena warunków mikroklimatu w luźnych i zwartych strukturach urbanistycznych, *Studia z Zakresu Inżynierii*, 75, 172 s.
- KLIMADA, 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*, Raport z Projektu KLIMADA, Inst. Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1997, *Bioklimatologia człowieka. Metody i ich zastosowanie w badaniach bioklimatu Polski*, Monografie IGiPZ PAN, 1, 200 s.
- Kuchcik M., Dudek W., Błażejczyk K., Milewski P., Błażejczyk A., 2016, Two faces to the greenery on housing estates—mitigating climate but aggravating allergy. A Warsaw case study, *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 170-181, DOI: 10.1016/j.ufug.2016.02.012.
- Lewińska J., 2000, *Klimat miasta. Zasoby, zagrożenia, kształtowanie*, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Kraków, 151 s.
- Lindberg F., Holmer B., Thorsson S., 2008, SOLWEIG 1.0 – modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *International Journal of Biometeorology*, 52 (7), 697-713, DOI: 10.1007/s00484-008-0162-7.
- Maronga B., Banzhaf S., Burmeister C., Esch T., Forkel R., Fröhlich D., Fuka V., Gehrke K. F., Geletic J., Giersch S., Gronemeier T., Groß G., Heldens W., Hellsten A., Hoffmann F., Inagaki A., Kadasch E., Kanani-Sühring F., Ketelsen K., Raasch S., 2020, Overview of the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 13 (3), 1335-1372, DOI: 10.5194/gmd-13-1335-2020.

- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H., 2010, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology*, 54 (2), 131-139, DOI: 10.1007/s00484-009-0261-0.
- MŚ, 2013, Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do roku 2030, Ministerstwo Środowiska, 60 s.
- Niedźwiedz T., Ustrnul Z., 2021, Change of atmospheric circulation, [w:] *Climate Change in Poland. Past, Present, Future*, M. Falarz (red.), Springer Climate, 123-150.
- Nowak Ł., Schabowicz K., 2022, Budownictwo zrównoważone a zmiany klimatu, dostępne online <https://inzygnierbudownictwa.pl/budownictwo-zrownowazone-a-zmiany-klimatu/> (17.05.2023).
- Oke T.R., 1981, canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observation, *International Journal of Climatology*, 1 (3), 237-254, DOI: 10.1002/joc.3370010304.
- Park S., Tuller S.E., Jo M., 2014, Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments, *Landscape and Urban Planning*, 125, 146-155, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.02.014.
- Pluta K., 2018, Woda w kompozycji współczesnych rozwiązań urbanistycznych i krajobrazowych, *Środowisko Mieszaniowe*, 24, 60-73, DOI: 10.4467/25438700SM.18.058.9648.
- Reuter U., Hoffmann U., Kapp R., 2010, City of Stuttgart. Climate change – challenge facing urban climatology, Publication series No. 3, dostępne online <http://www.stadtklima-stuttgart.de> (17.05.2023).
- Rogowska M., 2014, Przestrzeń publiczna w mieście – zagadnienia wybrane, *Studia Komitetu Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN*, 170, 158-164.
- Santamouris M., Gaitani N., Spanou A., Saliari M., Gianopoulou K., Vasilakopoulou K., 2012, Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – design realisation and results of the flisvos project, *Building and Environment*, 53, 128-136, DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E., 2011, The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment, *International Journal of Climatology*, 31 (10), 1498-1506, DOI: 10.1002/joc.2177.
- Sherine W., Basil K., Khaled N., Ahmed A., 2019, Green envelop impact on reducing air temperature and enhancing outdoor thermal comfort in arid climates, *Civil Engineering Journal*, 5 (5), 1124-1135, DOI: 10.28991/cej-2019-03091317.
- Sievers U., Früh B., 2012, A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings, *Meteorologische Zeitschrift*, 21(4), 349-364
- Śleszyński P., Bański J., Degórski M., Komornicki T., Więckowski M., 2007, Stan zaawansowania planowania przestrzennego w gminach, *Prace Geograficzne*, 211, 284 s.
- Śleszyński P., Deręgowska A., Kubiak Ł., Sudra P., Zielińska B., 2018, Analiza stanu i uwarunkowań prac planistycznych w gminach w 2017 roku, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN na zlecenie Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju, Warszawa.
- Sytuacja demograficzna Polski, 2021, Rządowa Rada Ludnościowa. Warszawa file:///C:/Users/rstepnowski/Downloads/sytuacja_demograficzna_polski_do_2021_r_w_formacie_pdf.pdf
- Turnbull D., Parisi A., 2006, Effective shade structures, *The Medical Journal of Australia*, 184 (1), 13-15, DOI: 10.5694/j.1326-5377.2006.tb00088.x.

- Ustrnul Z, 2007, Variability of the westerly circulation index over Europe in the 20th century. [w:] Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych, K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), Kraków, 55-63.
- Zielonko-Jung K., 2014, Zwarta przestrzeń miejska jako środowisko budynków energooszczędnych, *Architectus*, 2 (38), 49-58, DOI: 10.5277/arc140205.

S t r e s z c z e n i e

Stały rozwój terytorialny miast jest drugim, obok zmiany klimatu, czynnikiem pociągającym za sobą istotne pogorszenie jakości ich środowiska. Tendencji tej ulega m.in. klimat lokalny obszarów zurbanizowanych, co przejawia się przede wszystkim wzrostem temperatury powietrza oraz zakłóceniem reżimu opadowego. Zmiany klimatu mają duży wpływ na sektor budownictwa zarówno na etapie powstawania, jak i eksploatacji inwestycji oraz – poprzez coraz trudniejsze warunki mikro- i bioklimatyczne – na warunki życia mieszkańców miast.

W artykule przedstawiono historyczny, aktualny i prognozowany stan klimatu w Warszawie rozpoznany z punktu widzenia oddziaływania na budownictwo (w kontekście tzw. Umownych Kategorii Klimatu) i komfort życia mieszkańców obszarów zurbanizowanych. Do analiz wykorzystano wyniki obserwacji prowadzonych na stacji meteorologicznej Warszawa–Okęcie w okresie 1971-2020 oraz symulacji dla okresu 2021-2070 według scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5, udostępnione w bazie danych METEONORM 8.0.

Zarówno historyczne, jak i prognozowane cechy klimatu Warszawy wskazują, że największe zmiany dotyczą warunków termicznych. Wartości temperatury powietrza od wielu lat systematycznie wzrastają (średnio o około 0,5°C/10 lat) i proces ten będzie trwał w przyszłości. Wyraźnie mniejsze zmiany mają miejsce w przypadku reżimu opadowego i wiatrowego. Obserwowana zmiana klimatu stanowi duże wyzwanie dla mieszkańców i władz miasta oraz architektów i urbanistów. Artykuł zawiera kilka propozycji rozwiązania tych problemów poprzez zmiany w zagospodarowaniu przestrzeni miejskich.

Słowa kluczowe: Umowne Kategorie Klimatu, zmiany klimatu, RCP4.5, RCP8.5, Warszawa.

S u m m a r y

The constant territorial development of cities is the second factor, apart from climate change, which entails a significant deterioration in the quality of their environment. This tendency is followed by the local climate of urbanized areas, which is manifested primarily by the increase in air temperature and the disruption of the precipitation regime. Climate change has a major impact on the construction sector, both at the stage of planning and operation of investments, and – through increasingly difficult micro- and bioclimatic conditions – on the living conditions of city dwellers.

The article presents the historical, current and projected state of the climate in Warsaw recognized from the point of view of its impact on construction (through analysis of so-called Conventional

Climate Categories) and on the comfort of life of the residents of urban areas. The results of observations conducted at the Warszawa–Okęcie meteorological station in the period 1971-2020 and simulations for the period 2021-2070 according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, available in the METEONORM 8.0 database, were used for the analysis of so-called Conventional Climate Categories as well as their influence on micro- and bioclimatic conditions and on the living conditions of city dwellers.

Both historical and projected features of Warsaw's climate indicate that the greatest changes concern thermal conditions. Air temperature values have been steadily increasing for many years (on average by about 0.5°C/10 years) and this process will continue in the future. Significantly smaller changes take place in the case of precipitation and wind regimes. The observed climate changes pose a great challenge for the inhabitants and city authorities, as well as for architects and urban planners. The article contains several proposals for solving these problems through changes in the development of urban spaces.

Keywords: Conventional Climate Categories, climate change, RCP4.5, RCP8.5, Warsaw.