

Received: December 30, 2024; **Received in revised form:** January 01, 2025; **Accepted:** July 07, 2025

Citation: Wiszniowski, J. (2025). Ograniczanie zanieczyszczenia powietrza i efektu miejskiej wyspy ciepła – wpływ na warunki życia mieszkańców/ Mitigating air pollution and the urban heat island effect – impact on the living conditions of inhabitants. *Środowisko Mieszkaniowe/ Housing Environment*, e2025018. <https://doi.org/10.2478/he-2025-0018>

JACEK WISZNIOWSKI*

Ograniczanie zanieczyszczenia powietrza i efektu miejskiej wyspy ciepła – wpływ na warunki życia mieszkańców

Mitigating air pollution and the urban heat island effect – impact on the living conditions of inhabitants

Streszczenie

Artykuł przeglądowy ze wskazaniem kierunku dalszych badań. Stanowi fragment szerszych badań mających na celu ocenę efektywności rozwiązań dla poprawy warunków życia w miastach europejskich. Wśród analizowanych zagadnień znajdują się te, odnoszące się do zjawisk smogu i miejskiej wyspy ciepła w kontekście ocieplenia klimatu. Wskazano na współzależność tych zjawisk, a dla oceny ich wpływu na warunki życia mieszkańców przyjęto wskaźnik nadmiarowych zgonów. Cel artykułu został zrealizowany na podstawie przeglądu krajowej i zagranicznej literatury przedmiotu oraz dokumentów, a także analizy porównawczej. Badaniem objęto warunki życia w miastach europejskich z odniesieniem do ogólnosiwiatowego kontekstu, ze względu na globalny charakter zmian klimatycznych oraz powszechnego występowania zjawisk smogu i miejskiej wyspy ciepła. W konkluzji tego artykułu autor wskazuje, że chociaż istnieją pewne przesłanki pozytywnego oddziaływania zmian klimatycznych w badanym zakresie, jednak potrzebne są dalsze badania na temat ich wpływu, oceny wykorzystywanych rozwiązań oraz stopnia ich dostosowania do lokalnych warunków klimatycznych.

Abstract

This is a review article indicating the direction of further research. It is a fragment of broader research aimed at assessing the effectiveness of solutions for improving living conditions in European cities. Among the analysed issues are those related to the phenomena of smog and urban heat island in the context of global warming. The interdependence of these phenomena was pointed out and the excess death rate was adopted to assess their impact on the living conditions of residents. The aim of the article was achieved based on a review of domestic and foreign literature on the subject and documents, as well as by means of comparative analysis. The study covered living conditions in European cities with reference to the global context, due to the global nature of climate change and the common occurrence of smog and urban heat island phenomena. In the conclusion of this article, the author indicates that although there are some premises for the positive impact of climate change in the studied scope, further research is needed on their influence, assessment of the solutions used and the degree of their adaptation to local climatic conditions.

Słowa kluczowe: warunki życia mieszkańców, zanieczyszczenie powietrza, miejska wyspa ciepła

Keywords: living conditions of inhabitants, air pollution, urban heat island

1. WPROWADZENIE

Głównym celem całościowych badań podjętych przez autora jest próba znalezienia odpowiedzi na pytanie, jakie czynniki i w jakim stopniu wpływają na poprawę warunków życia w mieście w aspekcie zapewnienia mieszkańcom czystego powietrza i ochrony przed negatywnymi skutkami światowego ocieplenia. Konsekwencje zmian klimatu oceniane w skali globalnej jako niekorzystne, w lokalnej skali miejskiej mogą być jeszcze gorsze. Pod wpływem zmian klimatycznych, w efekcie kumulacji, nasileniu ulegają

1. INTRODUCTION

The main objective of the overall research undertaken by the author is an attempt to find an answer to the question of what factors, and to what extent, influence the improvement of urban living conditions in terms of providing residents with clean air and protection from negative effects of global warming. The consequences of climate change, which are assessed on a global scale as unfavourable, may be even worse on a local urban scale. Under the influence of climate change

*Jacek WISZNIOWSKI, dr hab. inż. arch., Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska / Jacek WISZNIOWSKI, Dsc. PhD. Eng. Arch., Faculty of Architecture, Wrocław University of Technology, <https://orcid.org/0000-0003-2699-3701>, e-mail: jacek.wiszniowski@pwr.edu.pl

zjawiska typowe dla dużych miast, takie jak miejskie wyspy ciepła (MWC) i smog.

W analizie warunków życia mieszkańców przyjęto wskaźniki nadmiarowych zgonów z powodu nieoptymalnych temperatur oraz zanieczyszczenia powietrza. Uwzględniono zróżnicowanie globalnych zmian klimatu w zestawieniu z lokalnymi uwarunkowaniami wynikającymi z szerokości geograficznej.

Podstawowym założeniem przyjętym przez autora jest teza, że zwiększenie przepływu powietrza w ograniczonej sianami przestrzeni miejskiej wpływa bezpośrednio na przyspieszenie napływu świeżego i chłodniejszego powietrza. Zwiększona cyrkulacja przyczyni się do poprawy jakości i temperatury powietrza tylko pod tym warunkiem, kiedy w miejsce zużytego i nagranego napłynie powietrze czyste i chłodniejsze. Stąd wynika konieczność kontekstowego rozpatrywania skuteczności poszczególnych rozwiązań oraz hybryd. Od początku obecnego wieku nastąpił znaczny wzrost liczby publikacjiw dziedzinie zmian klimatycznych. Liczba publikacji dotyczących zmian klimatu rośnie wykładniczo od 1990 do 2020 roku (Nalau, Verrall, 2021, s. 8). Johanna Nalau i Brodie Verrall na podstawie przeglądu literatury tematu stwierdzili stały trend wzrostowy w podziale na okresy 1978-2010 (10,3%), 2011-2015 (35,1%), 2016-2020 (54,6%) (Nalau, Verrall, 2021, s. 4). W ich badaniach zastosowano kombinację technik bibliometrycznych, wizualizacyjnych oraz analizy treści. Stwierdzono, że obecnie do obiegu wprowadzane jest co roku ponad 1600 publikacji na temat adaptacji do zmian klimatu, indeksowanych w Web of Science i Scopus. Daje to średnio ok. 4,4 publikacje dziennie. To znacznie komplikuje śledzenie całej literatury oraz ocenę rozwoju bazy wiedzy. Przedmiotem publikacji dotyczących zmian klimatycznych są najczęściej USA, potem Wielka Brytania i Australia, następnie Niemcy i Chiny (Nalau, Verrall, 2021, s. 6). Zebrane dane są dostępne w Internecie pod adresem <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100290>.

Rhea Rocque z zespołem przeprowadzili analizę publikacji odnoszących się do wpływu zmian klimatycznych na zdrowie (Rocque, Beaudoin, Ndjaboue, i in., 2021). Przebadano łącznie 94 przeglądy systematyczne. Większość została opublikowana po 2015 roku. Ok. 20% zawierała metaanalizy. Wśród środowiskowych konsekwencji zmian klimatu, które mają wpływ na ludzkie zdrowie i życie, 75% publikacji dotyczyło warunków meteorologicznych (np. rosnące temperatury, fale upałów, opady, wiatr, ciśnienie powietrza), 25% dotyczyło ekstremalnych zjawisk pogodowych (susze, powodzie, huragany), jakości powietrza (np. zanieczyszczenie powietrza) – tylko 7%. Interesujące jest, że zagadnienie zanieczyszczenia powietrza pojawia się w tym kontekście głównie jako skutek narażenia na dym z pożarów (Rocque, Beaudoin, Ndjaboue, i in., 2021, s. 7).

W analizowanych publikacjach wyodrębniono 10 kategorii skutków zdrowotnych m.in.: choroby zakaźne, śmiertelność, choroby układu oddechowego, sercowo-naczyniowego lub neurologicznego (Rocque, Beaudoin, Ndjaboue, i in., 2021, s. 1). Autorzy stwierdzają, że większość przeglądów potwierdza szkodliwy wpływ zmian klimatu na zdrowie. Jednocześnie zastrzegają możliwe nakładanie się badań oraz sygnalizują potrzebę przyszłych badań dotyczących wyjaśnienia rodzaju i stopnia zależności między zmianami klimatu a zdrowiem oraz sformułowanie strategii adaptacji i łagodzenia tego wpływu.

W badaniach Rhea Rocque z zespołem zastosowała metodę Cochrane dla oceny analiz, polegającą na systematycznym mapowaniu tematów badań na dany temat i syntetyzowania wyników (Rocque, Beaudoin, Ndjaboue, i in., 2021, s. 2). Plan badań (CRD42019145972) został zarejestrowany w PROSPERO, międzynarodowym prospektywnym rejestrze przeglądów systematycznych

and as a result of accumulation, phenomena typical of large cities, such as urban heat islands (UHI) and smog, are getting intensified.

In the analysis of the living conditions of residents, excess death rates due to sub-optimal temperatures and air pollution were adopted. The diversity of global climate change was taken into account in comparison with local conditions resulting from geographical latitude.

The basic assumption, which was adopted by the author, is the thesis that increasing the air flow in the urban space limited by walls directly affects the acceleration of the inflow of fresh and cooler air. Increased circulation will only improve air quality and temperature if clean and cooler air flows in instead of used and heated air. Hence the need for contextual consideration of the effectiveness of individual solutions and hybrids. Since the beginning of this century, there has been a significant increase in the level of knowledge in the field of climate change. The number of publications on climate change has been growing exponentially from 1990 up to 2020 (Nalau and Verrall, 2021, p. 8). Based on a review of the source literature, Johanna Nalau and Brodie Verrall identified a steady upward trend across different periods: 1978–2010 (10.3%), 2011–2015 (35.1%), and 2016–2020 (54.6%) (Nalau, Verrall, 2021, p. 4). Their study used a combination of bibliometric, visualisation, and content analysis techniques. It was found that currently more than 1,600 publications on climate change adaptation are introduced annually, indexed in Web of Science and Scopus. This amounts to an average of approximately 4.4 publications per day. This significantly complicates tracking the entire literature and assessing the development of the knowledge base.

The highest number of publications on climate change adaptation come from the USA, followed by the UK and Australia, next Germany and China ranking next (Nalau and Verrall, 2021, p. 6). The collected data are available online (Nalau and Verrall, 2021). Rhea J. Rocque et al. conducted an analysis of publications relating to the impact of climate change on health (Rocque et al., 2021). A total of 94 systematic reviews were examined. Most were published after 2015, and about 20% contained meta-analyses. Among the environmental consequences of climate change that affect human health and life, 75% of publications focused on meteorological conditions (e.g. rising temperatures, heat waves, precipitation, wind, air pressure), 25% addressed extreme weather phenomena (droughts, floods, hurricanes), air quality (e.g., air pollution) 7% only. Interestingly, the issue of air pollution appears in this context mainly as a result of exposure to smoke from wildfires (Rocque et al., 2021, p. 7). In the publications analysed, 10 categories of health effects, including infectious diseases, mortality, respiratory, cardiovascular or neurological diseases, were identified (Rocque et al., 2021, p. 1). The authors conclude that most reviews confirm detrimental effects of climate change on health. At the same time, they note possible overlaps between studies and signal the need for future research on clarifying the nature and extent of the relationship between climate change and health as well as formulating strategies to adapt and mitigate these impacts. The study by Rhea J. Rocque and colleagues used the Cochrane method for assessing reviews. It involved systematically mapping research topics on a given topic and synthesizing the results (Rocque et al., 2021, p. 2). The study plan (CRD42019145972) was registered in PROSPERO, an international prospective registry of systematic reviews, available online at <https://www.crd.york.ac.uk/PROSPERO/>. The study

dostępnym w Internecie pod adresem <https://www.crd.york.ac.uk/PROSPERO/>, a badania prowadzono zgodnie z Preferred Reporting Items for Systematic przeglądom systematycznych i metaanaliz (PRISMA) (Page, McKenzie, Bossuyt i in., 2020).

Zespół 126 badaczy z całego świata przeprowadził analizę 48 tys. artykułów dotyczących zmian klimatu (Berrang-Ford, Siders, Lesnikowski i in., 2021). Ze względu na olbrzymią liczbę analizowanych publikacji, badania oparto na dwóch najnowszych podejściach, czyli uczeniu maszynowe oraz sieciach współpracy. Z tak opracowanej bazy danych wyodrębniono 1682 publikacje spełniające kryteria metody analizy pod względem rozkładu geograficznego i sektorowego oraz według kategorii ekstremalnych zjawisk pogodowych i rodzaju reakcji (Berrang-Ford, Siders, Lesnikowski i in., 2021, s. 989). Z tego zbioru wyodrębniono m.in.: 475 publikacji (28%) na temat zwiększonej częstotliwości i intensywności ekstremalnych upałów oraz 510 publikacji (30%) dotyczących zdrowia i dobrostanu mieszkańców i społeczności. Tylko 15% publikacji dotyczyło wpływu zmian klimatycznych na warunki życia w mieście i osiedlach mieszkaniowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy autorzy przeglądu stwierdzili, że badania były w dużej mierze fragmentaryczne, lokalne i przyrostowe, a dowody zmian – ograniczone (Berrang-Ford, Siders, Lesnikowski i in., 2021, s. 996). Ponadto autorzy przeglądu wskazują na duże problemy z terminologią, która nie jest zintegrowana w literaturze dotyczącej wpływu zmian i tej poświęconej adaptacji. Tylko około 30% badań dotyczyło wielu systemów, a większość koncentrowała się tylko na jednym sektorze. Protokół metodyczny oraz bazy analizowanych danych autorzy udostępniają w Internecie pod adresem: <https://osf.io/ps6xj>.

Giuseppe Formetta i Luc Feyen (Formetta, Feyen, 2019) przeprowadzili badania wpływu zmian klimatu na warunki życia mieszkańców. Analizowali oni zagrożenia związane z klimatem w latach 1980-2016 i wskazali stałą tendencję wzrostową w zakresie powodzi, zalań, podtopień, upałów, chłodu, suszy i wiatru (Formetta, Feyen, 2019, s. 2). Interesujące jest to, że na podstawie przeprowadzonych badań udowadniają oni, że pomimo wzrostu zdarzeń klimatycznych, procent zagrożonej przez nie populacji zdecydowanie maleje i wskaźnik ten zmniejszył się 6,5 razy w stosunku do okresu 1980-1989 (Formetta, Feyen, 2019, s. 1, 5-6). Można zauważyć też znaczący spadek wrażliwości na straty ekonomiczne, w tym przypadku wskaźnik ten zmniejszył się 5 razy (Formetta, Feyen, 2019, s. 1).

W przeprowadzonych badaniach związek pomiędzy narażeniem na zagrożenie pogodowe a oddziaływaniem analizowano pod kątem skutków dla populacji (liczba śmiertelnych ofiar zagrożenia pogodowego) oraz gospodarki (wielkość strat pieniężnych spowodowanych przez zagrożenie). Wrażliwość ludności określono jako stosunek liczby osób zabitych w wyniku katastrofy klimatycznej do liczby osób narażonych na zagrożenie. W badaniach dla okresu 1980-2016 przeanalizowano siedem zagrożeń związanych z pogodą: powódzie ogólne, powódzie gwałtowne, powódzie przybrzeżne, zagrożenie związane z wiatrem, zimmem, fale upałów i susze. Dane o ofiarach śmiertelnych i stratach bezpośrednich spowodowanych klęskami żywiołowymi uzyskano z bazy NatCatSERVICE firmy Monachium RE. Zbiory danych i metodologię badań udostępniono w Internecie pod adresem <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0959378019300378-mmc1.docx>

Na potrzeby obecnego badania, przeszukując najnowszą literaturę (od 2020 roku) i używając słów kluczowych, autor zidentyfikował ponad 1300 tys. publikacji odnoszących się do „zmian klimatu”. W tym zbiorze znaleziono 207 tys. publikacji odnoszących się do „zmian klimatu” i „jakości powietrza” łącznie oraz 18 tys. związanych z „miejską wyspą ciepłą”.

was conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page et al., 2020).

A team of 126 researchers from around the world conducted an analysis of 48,000 articles on climate change (Berrang-Ford et al., 2021). Due to the large number of analysed publications, the research was based on two latest approaches, i.e., machine learning and collaborative networks. From the database developed in this way, 1,682 publications were extracted that met the criteria of the analysis method in terms of geographical and sectoral distribution and by the category of extreme weather events and type of response (Berrang-Ford et al., 2021, p. 989). From this collection, among other things, the following were extracted: 475 publications (28%) on the increased frequency and intensity of extreme heat events and 510 publications (30%) on the health and well-being of residents and communities. Only 15% of the publications dealt with the impact of climate change on living conditions in the city and residential areas.

Based on their analysis, the authors of the review concluded that the studies were largely fragmented, local and incremental, and the evidence of change was limited (Berrang-Ford et al., 2021, p. 996). Moreover, the authors of the review point to major problems with terminology which is not integrated across the literature on the impact of change and adaptation. Only about 30% of the studies addressed multiple systems, while most focused on one sector only. The methodological protocol along with databases of the analysed data are made available online by authors (Berrang-Ford et al., 2021).

Giuseppe Formetta and Luc Feyen (Formetta and Feyen, 2019) conducted research on the impact of climate change on the living conditions of residents. They analysed climate-related hazards during the period from 1980 to 2016 and indicated a constant upward trend in the scope of floods, inundations, flooding, heat, cold, drought, and wind (Formetta and Feyen, 2019, p. 2). It is interesting that, based on the research conducted, they demonstrated that despite the increase in climatic events, the percentage of the population threatened by them significantly decreased—declining 6.5 times compared to the period 1980–1989 (Formetta and Feyen, 2019, pp. 1, 5–6). A significant decrease in sensitivity to economic losses can also be noticed; in this case, this indicator decreased by five times (Formetta and Feyen, 2019, p. 1).

In the research conducted, the relationship between exposure to weather hazards and their impact in terms of effects on the population (the number of fatalities caused by weather threat) and the economy (the monetary losses incurred as a result of danger) was analysed. Population vulnerability was defined as the ratio of the number of people killed by a climatic disaster to the number of people exposed to danger. Seven weather-related threats were analysed in the study for the period 1980–2016, i.e. general floods, flash floods, coastal floods, wind and coldness threats, heat waves and droughts. Data on fatalities and direct losses, which were caused by natural disasters, were obtained from the NatCatSERVICE database of Munich RE Firm. The datasets and research methodology were made available online (Formetta and Feyen, 2019). For the purpose of the current research, by searching the recent literature (since 2020) and using keywords, the author identified more than 1300 thousand publications related to “climate change”. In this collection, there were 207 thousand publications related to “climate change” and “air quality” together and 18 thousand to “urban heat island”.

Wielu publikacji nie wykorzystano w analizie ze względu na ich fragmentaryczność, natomiast więcej uwagi poświęcono autorom analizującym zjawiska smogu i miejskiej wyspy ciepła w kontekście zmian klimatu w sposób komplementarny. W bieżącym badaniu analizowano publikacje dotyczące krajów z różnych stref klimatycznych i to było jednym z kryteriów przeglądu. Wyniki badań przeprowadzonych w jednej strefie klimatycznej weryfikowano przez zestawienie z badaniami z innej strefy klimatycznej, zwracając uwagę na stosowanie podobnej metodyki. Odrzucono analizy statystyczne oparte na doborze słów kluczowych ze względu na nadreprezentatywność publikacji dotyczących USA i Chin.

2. POPRAWA JAKOŚCI POWIETRZA

Wśród miast europejskich, 33 z 50 miast o najbardziej zanieczyszczonym powietrzu, znajduje się w Polsce. W 24 miastach zostało odnotowane przekroczenie dopuszczalnych, średnich rocznych stężeń pyłu PM10 w powietrzu, a w 17 z nich stężenia te utrzymują się od 90 (Zabrze) do 165 (Kraków) dni w roku (Guerreiro, Fowler, Barbero i in., 2018; Dudek, 2019). Zanieczyszczenie powietrza przekraczające dopuszczalne normy jest niestety specyfiką polskich miast.

Zagadnienie powietrza miejskiego eksplorował m.in. Stephen Graham, rozpatrując jego polityczno-ekologiczny aspekt. W swoim artykule analizuje on wpływ na miejskie powietrze globalnego ocieplenia, miejskich wysp ciepła, a także zanieczyszczenie powietrza i związane z nim kwestie budowy pionowych struktur dla elit i klimatyzowanej urbanistyki (Graham, 2015). Podobną problematyką zajmowała się również Helen Apsimon i in. (2009), analizując strategie opracowane w celu poprawy jakości powietrza. Interesujące badania nad zanieczyszczeniem powietrza na terenach poddanych nagłej urbanizacji i industrializacji, na przykładzie Pekinu, przeprowadził Yongchun Liu i in. (2020).

Stosunkowo niewiele publikacji odnosi się do niwelowania problemu smogu poprzez zapewnianie odpowiedniej wentylacji miasta m.in. przez kształtowanie w zabudowanym środowisku miejskim korytarzy przewietrzania czy napowietrzających miasto terenów zieleni. Zajmuje się tym między innymi Joshua Comaroff (2017), Katarzyna Zielonko-Jung i Mariya Veronika Mochulska (2022) oraz Andrzej Flaga i Łukasz Flaga z zespołem (Flaga A., Flaga Ł., 2021; Flaga A., i in., 2020; Flaga Ł., i in., 2019). Można znaleźć te zagadnienia opisane też przez innych autorów, ale stanowią one raczej wątek poboczny ich badań nad problemem zanieczyszczenia powietrza w mieście.

Do poprawy jakości powietrza na pewno przyczynia się zmniejszenie liczby i intensywności źródeł emisji, jednak istotne znaczenie ma wykorzystanie do tego zjawisk aerodynamicznych. Problem smogu, dokuczliwy dla mieszkańców wielu miast, przyczynia się do zwrócenia uwagi na elementy środowiska miejskiego, które można wykorzystać do redukcji zanieczyszczenia powietrza. Można tu wyróżnić układ i formy zabudowy jako czynniki wpływające na efektywność wentylacji miasta, na co zwraca uwagę Petter Næss (2014), oraz ogólną powierzchnię i rozmieszczenie terenów zieleni ze względu na ich rolę w oczyszczaniu, nawilżaniu i natlenianiu powietrza miejskiego, o czym pisze Denis YC Leung i in. (2011).

Na kumulację zanieczyszczeń wpływa brak właściwego przewietrzania miasta. Do powstawania smogu przyczynia się jednak bardziej występowanie inwersji termicznej niż brak przepływu powietrza, co potwierdza Jolanta Godłowska, badając tę współzależność na przykładzie Krakowa (Godłowska, 2019). Problem tzw. *czapy smogowej* cechuje blokowanie konwekcyjnego unoszenia się powietrza od powierzchni ziemi ku górze (II. 1). Godłowska potwierdza obecność inwersji blokującej cyrkulację wertykalną, która zmienia się w cyklu rocznym – rośnie w okresie zimowym,

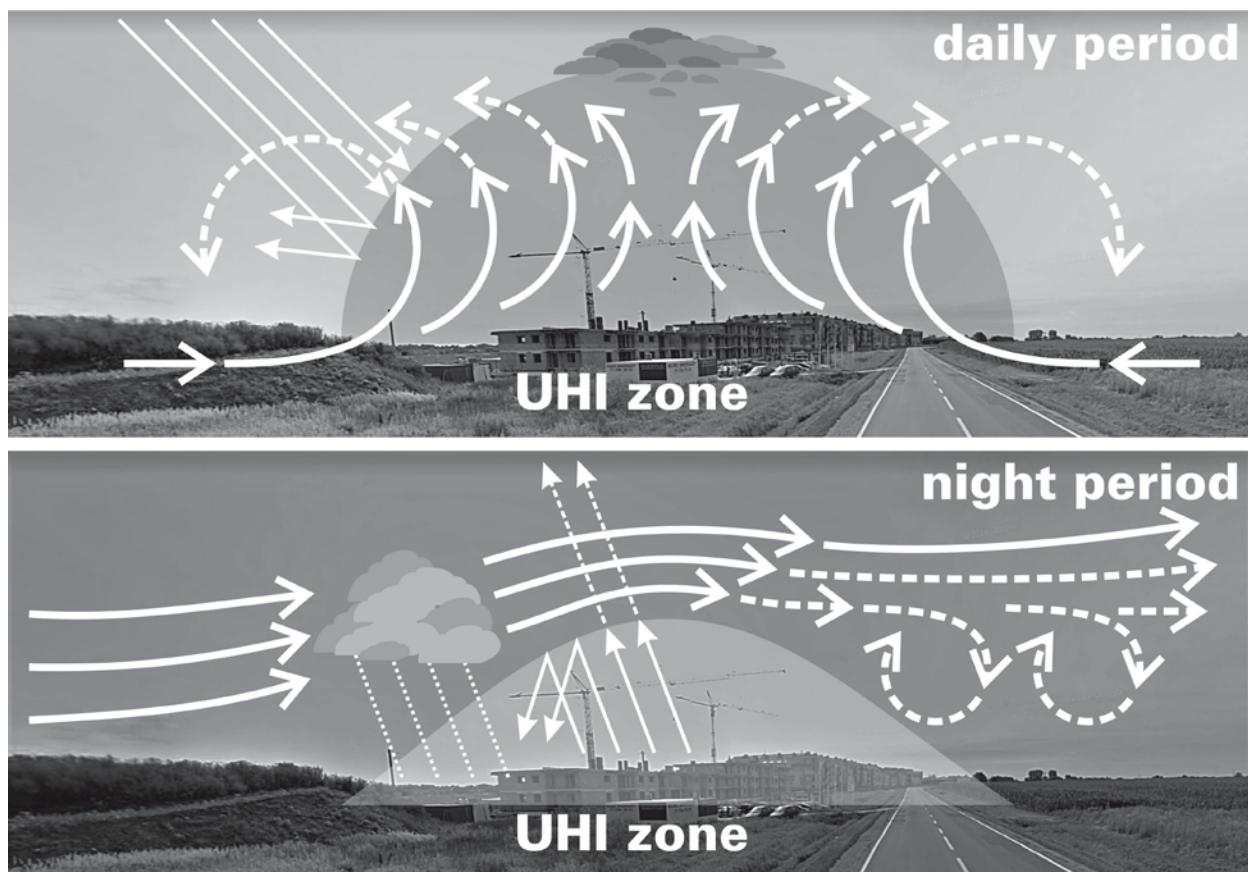
Many publications were excluded from the analysis due to their fragmentation, while greater attention was given to authors who examined the phenomena of smog and urban heat islands in the context of climate change in a complementary manner. In the current research, publications related to countries from different climate zones were analyzed, and this was one of the review criteria. The results of studies, which were conducted in one climate zone, were verified by comparing them with studies from another climate zone with a focus on the use of similar methodology. Statistical analyses based on the selection of keywords were rejected due to the over-representation of publications concerning the USA and China.

2. IMPROVING AIR QUALITY

Among European cities, 33 out of 50 cities with the most polluted air are located in Poland. In 24 cities, the permissible average annual concentrations of PM10 dust in the air were exceeded, and in 17 of them it is from 90 (Zabrze) to 165 (Krakow) days per year (Guerreiro et al., 2018; Dudek, 2019). Air pollution exceeding the permissible standards is unfortunately specific to Polish cities.

The issue of urban air was also explored by Stephen Graham who considered its political and ecological aspects. In his article, he analysed the impact of global warming on urban air, urban heat islands, as well as air pollution and related issues such as the construction of vertical structures for elites and air-conditioned urban planning (Graham, 2015). Similar issues were also addressed by Helen Apsimon et al., who analysed strategies developed to improve air quality (Apsimon et al. 2009). Yongchun Liu et al. conducted interesting studies on air pollution in areas undergoing rapid urbanisation and industrialisation, using Beijing as an example (Liu et al., 2020).

Relatively few publications address reducing the problem of smog by ensuring adequate ventilation of the city by, among other things, shaping ventilation corridors in the built-up urban environment or green spaces which aerate the city. Joshua Comaroff (2017), Katarzyna Zielonko-Jung and Mariya Veronika Mochulska (2022) and Andrzej Flaga and Łukasz Flaga with their team deal with this issue (2019). These issues are also discussed by other authors, though they are generally considered a secondary aspect of their research on urban air pollution. Reducing the number and intensity of emission sources certainly contributes to improving air quality; however, utilizing aerodynamic phenomena for this purpose is also important. The problem of smog, a nuisance for residents of many cities, draws attention to elements of the urban environment that can help reduce air pollution. Here, we can distinguish the layout and forms of buildings as factors influencing the efficiency of city ventilation, as pointed out by Petter Næss (Næss, 2014) and the overall size and distribution of green spaces, due to their role in cleaning, humidifying, and oxygenating urban air, as discussed by Denis Y.C. Leung et al. (Leung et al., 2011). Inadequate ventilation within urban environments plays a critical role in the accumulation of air pollutants. However, the occurrence of thermal inversion plays a more significant role in the formation of smog than limited air circulation, as confirmed by Jolanta Godłowska, who investigated this relationship using the example of Krakow (Godłowska, 2019). The phenomenon known as the 'smog cap' is characterised by the inhibition of convective air currents rising from the ground surface (II. 1). Godłowska confirms the presence of an inversion blocking vertical circulation, which changes in the annual cycle – it increases in winter and decreases in summer



II. 1. Problem czapy smogowej w obrębie miejskiej wyspy ciepła. Autor: Jacek Wiszniowski

III. 1. The problem of the smog cap within the urban heat island. Author: Jacek Wiszniowski

a maleje w letnim (Godłowska, 2019, s. 60). Wzrost średniego dobowego czasu trwania inwersji w okresie grzewczym jest bardzo niekorzystny ze względu na zwiększoną emisję zanieczyszczeń ze źródeł komunalno-bytowych.

Shuncheng Yang and Longyu Shi (2017) podkreślają w swoich badaniach znaczenie budowania świadomości społecznej co do skutków i skali zanieczyszczonego powietrza. Zwracają oni uwagę na potrzebę monitorowania zagrożeń, kontroli źródeł emisji zanieczyszczeń oraz przeciwdziałania irracjonalnym reakcjom mieszkańców przez skuteczną komunikację i dialog społeczny. Autorzy objęli badaniami chińskie miasto portowe Ningbo nad rzeką Jangcy, a dokładnie sześć dzielnic miejskich (Haishu, Yinzhou, Jiangdong, Jiangbei, Zhenhai, Beilun), które różnią się stopniem zanieczyszczenia powietrza, funkcją, liczebnością populacji i gęstością zaludnienia. W badaniach przyjęto metodę próbkowania warstwowego. Pomiary prowadzono w różnych okręgach, w ośmiu miejscach monitorowania środowiska atmosferycznego. Oprócz pomiarów przeprowadzono badania kwestionariuszowe i ankietowe wśród losowo wybranych mieszkańców zamieszkujących w pobliżu monitoringu atmosferycznego, a wyniki porównano z rzeczywistymi danymi z monitoringu. Autorzy dokonali oceny różnic między ankietami a rzeczywistymi danymi pomiarowymi w zakresie „dotkliwości smogu i jego skutków” (Yang, Shi, 2017, s. 221). Zebrane dane są dostępne w Internecie pod adresem <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10962247.2016.1229235>.

3. OGRANICZANIE NEGATYWNEGO WPLYWU MIEJSKIEJ WYSPI CIEPŁA

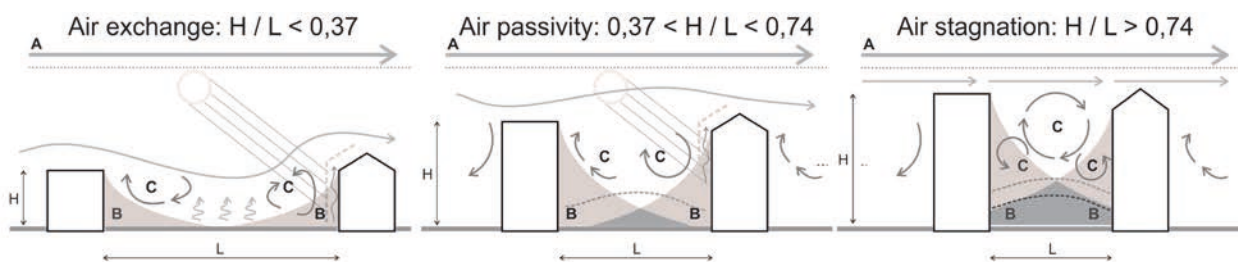
Miejski mikroklimat zależy między innymi od warunków geograficznych, topograficznych, meteorologicznych, wysokości oraz sposobu zagospodarowania i użytkowania terenów. Nieprzepuszczalne

(Godłowska, 2019, p. 60). The increase in the average daily duration of the inversion during the heating period is very unfavourable due to the increased emission of pollutants from municipal and residential sources.

In their research, Shuncheng Yang and Longyu Shi emphasize the critical importance of raising public awareness regarding both the impacts and the scale of air pollution (Yang and Shi, 2017). They highlight the necessity of monitoring environmental threats, regulating pollutant emission sources, and mitigating irrational public responses through effective communication and sustained social dialogue. The authors conducted their research in the Chinese port city of Ningbo, located along the River Yangtze, focusing on six urban districts (Haishu, Yinzhou, Jiangdong, Jiangbei, Zhenhai, and Beilun) which vary in terms of air pollution levels, functional characteristics, population size and density. The research employed a stratified sampling method. Measurements were taken in different districts and at eight atmospheric environment monitoring sites. In addition to the measurements, questionnaires and surveys were conducted among randomly selected residents living near the atmospheric monitoring site and the results were compared with the actual monitoring data. The authors assessed the discrepancies between survey responses and actual measurement data in relation to the perceived 'severity of smog and its effects'. (Yang and Shi, 2017, p. 221). All the collected data are available online (Yang and Shi, 2017).

3. REDUCING THE NEGATIVE IMPACT OF THE URBAN HEAT ISLAND

The urban micro-climate is influenced by a range of factors, including geographical and topographic features, meteorological



II. 2. Zagrożenia kondensacji zanieczyszczeń w obrębie kanionu ulicznego. A) strumień główny, B) stagnacja, C) reemisja. Autor: Jacek Wiszniowski

III. 2. The pollution condensation threat within a street canyon. A) mainstream, B) stagnation, C) re-emission. Author: Jacek Wiszniowski

nawierzchnie, materiały akumulujące ciepło, wysoka zabudowa zaburzająca cyrkulację powietrza z jednej strony oraz emisje zanieczyszczeń i ciepła powstające z procesów przemysłowych, komunalnych i transportowych z drugiej strony, mają duży wpływ na warunki życia mieszkańców.

Miejska wyspa ciepła występuje lokalnie w wyniku nagrzewania i kumulowania energii z promieni słonecznych padających na sztuczne nawierzchnie i ściany. Efekt MWC potęguje przewaga nawierzchni sztucznych przy kurczeniu się i zanikaniu naturalnych powierzchni roślinnych. Na lokalne podgrzanie powietrza ma wpływ ciepło antropogeniczne z transportu, struktury urbanistycznej, technologii przemysłowych oraz metabolizmu ludzi. Należy zauważyć, że na lokalne gromadzenie ciepła wpływa również efekt cieplarniany wynikający z większego nad miastem stężenia zanieczyszczeń powietrza i gazów cieplarnianych.

Do największej kondensacji zanieczyszczeń oraz wyższych temperatur dochodzi w najniższej strefie przy ziemi, jednocześnie wiatr ma tutaj najmniejszą prędkość. Zapylenie powietrza wzmacnia efekt cieplarniany, zatrzymując ciepło wytwarzane w procesie spalania paliw (transport, przemysł, komunalne sieci grzewcze), a jednocześnie zmniejsza nasłonecznienie, ograniczając dopływ promieni słonecznych. Występowanie problemu miejskiej wyspy ciepła jest również przyczyną reemisji zanieczyszczeń – suchego pyłu, który osadza się na utwardzonych nawierzchniach ulic, chodnikach i placach miejskich, a przez ruch pojazdów wzbija się na nowo w powietrze (II. 2). Zmniejszanie wpływu miejskiej wyspy ciepła przez schładzanie powietrza opisuje m.in. Steffen Lehmann (2014), Mattheos Santamouris (2013) i Kyra Koch z zespołem (2020). Yuanyuan Wang, Zhongyang Guo i Ji Han oraz Mohamed Hereher z zespołem prowadzący badania w różnych strefach geograficznych badają występowanie korelacji smogu i miejskiej wyspy ciepła (MWC) (Wang, Guo, Han i in., 2021; Hereher, Eissa, Alqasemi i in., 2021). Huidong Li z zespołem (2020) również potwierdzają współzależność smogu i MWC dodatkowo wykazując jej nasilenie zwłaszcza w czasie nocy. Dodatkowo trzeba zauważyć niekorzystny wpływ zjawiska miejskiej wyspy ciepła na zaburzenia konwekcji, który przyczynia się do wzrostu poziomu stężeń zanieczyszczenia powietrza w warstwie przygrunтовой. Problem ten nie jest dostatecznie eksplorowany naukowo, jak wykazali to Awais Piracha i Muhammad Tariq Chaudhary na podstawie przeglądu artykułów naukowych, dokumentów politycznych, raportów i artykułów w mediach drukowanych opublikowanych w ciągu ostatnich 10-20 lat: „Chociaż przeprowadzono badania łączące środowisko zabudowane i zanieczyszczenie powietrza ze zdrowiem, ale zignorowano w nich pogarszającą rolę MWC” (Piracha, Chaudhary, 2022).

4. REGENERACJA MIEJSKIEGO POWIETRZA

Duży potencjał regulujący i mitygujący procesy klimatyczne ma układ ekologiczno-przyrodniczy, na który składają się małe

conditions, altitude, and patterns of land development and use. Impermeable surfaces, heat-retaining materials, and tall buildings which obstruct air circulation on the one hand, as well as emissions of pollutants and heat from industrial, municipal, and transportation activities on the other, significantly affect the living conditions of urban residents.

The urban heat island occurs locally as a result of heating and accumulating energy from sunlight falling on artificial surfaces and walls. The UHI effect is intensified by the dominance of artificial surfaces while natural plant surfaces shrink and disappear. Local air heating is influenced by anthropogenic heat from transport, urban structure, industrial technologies, and human metabolism. It is important to note that local heat accumulation is also influenced by the greenhouse effect, which results from higher concentrations of air pollutants and greenhouse gases in the atmosphere above the city.

The highest concentrations of pollutants and higher temperatures are typically found in the lowest atmospheric layer near the ground, where the wind speed is also at its minimum. Particulate matter in the air intensifies the greenhouse effect by trapping the heat generated by fuel combustion (transport, industry, district heating networks) and at the same time reduces insolation by limiting the inflow of sunlight. The urban heat island effect also contributes to the re-emission of pollutants, especially dry dust which settles on the hardened surfaces of streets, sidewalks, and city squares, and is stirred back into the air by passing vehicles (III. 2).

Strategies for mitigating the urban heat island effect through air cooling were discussed by several researchers, including Steffen Lehmann (2014), Mattheos Santamouris (2013), and Kyra Koch and colleagues (2020). Yuanyuan Wang, Zhongyang Guo, and Ji Han, along with Mohamed Hereher and his team, investigated the relationship between smog and the urban heat island (UHI) effect across different geographical regions (Wang et al., 2021; Hereher et al., 2021). Huidong Li et al. also confirm the interdependence between smog and the urban heat island (UHI) effect, further highlighting its increased intensity during nighttime hours (Li et al., 2020).

Moreover, it is important to recognize the negative impact of the urban heat island (UHI) phenomenon on atmospheric convection, as these disturbances contribute to elevated concentrations of ground-level air pollutants. This issue remains underexplored in the literature, as demonstrated by Awais Piracha and Muhammad Tariq Chaudhary in their comprehensive review of academic articles, policy documents, reports, and print media published over the past two decades. They note that while numerous studies examined the relationship between the built environment, air pollution, and health, the deteriorating impact of the urban heat island (UHI) was largely overlooked (Piracha and Chaudhary, 2022).

zmienione zlewnie rzek (nadbrzeża, mokradła, tereny zalewowe, doliny rzeczne), zbiorniki wodne, obszary użytkowane ogrodnictwo i rolniczo oraz tereny zieleni. Również elementy środowiska miejskiego takie jak zabudowa, ulice, place, ciągi komunikacyjne, mogą być zazielenione, a dzięki znacznej powierzchni, jaką zajmują, mogą stanowić ważne zwiększenie udziału zieleni w obszarze zurbanizowanym (Wojtyszyn, 2020).

W miejskich planach adaptacji do zmian klimatu większość działań związanych z mitygacją zjawiska MWC dotyczy głównie zwiększania powierzchni terenów zieleni oraz wymiany nawierzchni i materiałów na te o wysokim albedo (Wiszniowski, 2021). Potwierdza to Chenghao Wang z zespołem (2021), którzy przeprowadzili syntetyczny przegląd najnowszych publikacji badawczych, zielonych systemów oceny oraz miejskich projektów wdrożeniowych związanych z wykorzystaniem chłodnych nawierzchni do łagodzenia MWC. Mitygujący i regeneracyjny wpływ zieleni na poprawę warunków życia w mieście jest dobrze opisany w literaturze badawczej. Aktualny stan wiedzy na ten temat omówiono w najnowszych raportach Tamary lungman z zespołem (2023) oraz Awais Piracha z zespołem (2022). Yendle Barwise i Prashant Kumar (2020) badali efektywność oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń za pomocą zielonej infrastruktury stosowanej wzdłuż miejskich arterii komunikacyjnych o dużym ruchu. Natomiast Abhijith i in. (2017) zajmowali się problematyką zielonych modyfikacji w przestrzeni ulicznych kanionów. Kumulacja negatywnego efektu miejskiej wyspy ciepła oraz smogu wynika z braku właściwego przewietrzania obszarów zabudowy. Pod wpływem przegrzania środowiska miejskiego występują zaburzenia w cyrkulacji powietrza, problem tzw. *czapy smogowej*. Wzrost temperatur przyczynia się także do zwiększenia ilości pyłu w powietrzu oraz do wydzielania dodatkowych związków toksycznych z nagrzanymi, asfaltowymi nawierzchni i dachów. Jednocześnie brak wymiany nagrzanego powietrza na chłodniejsze wpływa na utrzymanie podwyższonych temperatur. Przeprowadzane przez Łukasza Flagę z zespołem (2019) testy wskazują na skuteczność *wież wiatrowych* pomagających wyprowadzanie zanieczyszczonego powietrza ponad warstwę *czapy smogowej*. Aktywne systemy wymuszania wentylacji miasta mogłyby być wykorzystane do celowego, kierunkowego przemieszczania powietrza dla chłodzenia w lecie i ocieplania w zimie.

Ali Cheshmehzangi i Ayotunde Dawodu (2020) opracowali przegląd rozwiązań umożliwiających wentylację miasta. Na podstawie badań wskazali oni, że rozwiązania pasywne są korzystne zwłaszcza w strefie klimatu tropikalnego, gorącego i wilgotnego oraz gorącego i suchego, gdzie obciążenie chłodnicze jest najważniejsze i absorbuje znaczną część zużycia energii. Z tego względu ich badanie koncentruje się bardziej na kontekście krajów rozwijających się, gdzie zużycie energii nie jest jeszcze poważnym problemem, ale w obliczu szybkiego wzrostu gospodarczego, urbanizacji i rozwoju, może stanowić poważne wyzwanie.

5. WYMIANA MIEJSKIEGO POWIETRZA

W skali całego miasta na przepływ powietrza wpływa przede wszystkim meteorologia i topografia, ale także zagospodarowanie terenu, kształtowanie zieleni i zabudowy oraz ukierunkowanie ciągów ulicznych. Zabudowa, szczególnie w dzielnicach centralnych i śródmiejskich, stanowi opór dla wiatru (Gnatowska, 2010). Ze względu na aerodynamiczną szorstkość obszarów zurbanizowanych, osłabienie prędkości wiatru w strefie peryferyjnej na terenach zabudowy rozproszonej może wynieść około 15-20%, natomiast w zwartej zabudowie dzielnic centralnych średnio 30% (Czerwieniec, Lewińska, 2000). Obszary te ze względu na atrakcyjną lokalizację podlegają również silnej presji zabudowywania,

4. URBAN AIR REGENERATION

Ecological and natural systems (including relatively undisturbed river basins such as coasts, wetlands, floodplains, and river valleys), water bodies, horticultural and agricultural areas, as well as green spaces hold significant potential for regulating and mitigating climate processes. Urban elements such as buildings, streets, squares, and transportation routes can also be adapted for greening. Given the substantial area they occupy, these spaces have the potential to significantly increase the proportion of greenery within urbanised environments (Wojtyszyn, 2020).

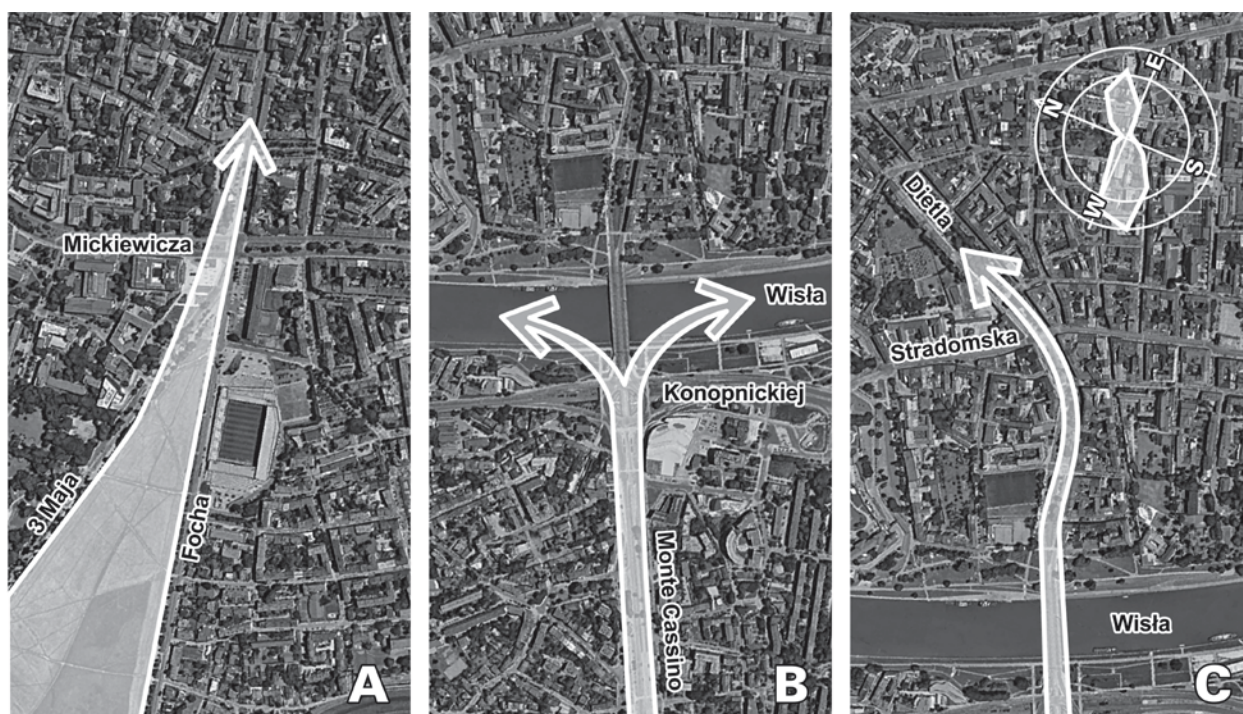
In urban climate change adaptation plans, most of the actions aimed at mitigating the urban heat island (UHI) effect primarily focus on expanding green spaces and replacing existing surfaces and materials with those that have high albedo (Wiszniowski, 2021). This is supported by the findings of Chenghao Wang and colleagues, who conducted a comprehensive review of recent research publications, green rating systems, and urban implementation projects related to the use of cool surfaces for mitigating UHI urban warming challenges (Wang et al., 2021).

The mitigating and regenerative effects of greenery on the improvement of urban living conditions are well-documented in the research literature. The current state of knowledge on this subject was discussed in the latest reports by Tamara lungman and colleagues and Awais Piracha and colleagues (lungman et al., 2023; Piracha and Chaudhary, 2022). Yendle Barwise and Prashant Kumar examined the effectiveness of green infrastructure in removing air pollutants along busy urban thoroughfares. Abhijith et al. explored the role of green modifications in the context of street canyon environments (Abhijith et al., 2017). The accumulation of smog and the intensification of the urban heat island (UHI) effect are largely attributable to inadequate ventilation in densely built environments. Overheating of the urban environment disrupts air circulation, leading to the formation of the so-called *smog cap*. Rising temperatures also contribute to higher amounts of dust and pollution in the air, as well as the release of additional toxic substances from heated asphalt surfaces and rooftops. At the same time, the lack of exchange of heated air for cooler air results in sustained elevated temperatures. The tests conducted by Łukasz Flaga and colleagues indicate the effectiveness of *wind towers* in channelling polluted air above the *smog cap* layer (Flaga et al., 2019). Active systems for forced urban ventilation could be used to intentionally direct airflows for cooling in summer and warming in winter.

Ali Cheshmehzangi and Ayotunde Dawodu have developed an overview of solutions for ventilating the city (Cheshmehzangi and Dawodu, 2020). Based on their own research, they indicated that passive solutions are particularly beneficial in the tropical climate zone – both hot and humid, as well as hot and dry – where the cooling load is a primary concern and absorbs a significant portion of energy consumption. For this reason, their study focuses more on the context of developing countries, where energy consumption is not yet a critical issue, but may become a significant challenge in light of rapid economic growth, urbanisation, and development.

5. URBAN AIR EXCHANGE

On a city-wide scale, air flow is primarily influenced by meteorology and topography, but also by land development, greenery and building formation, and the orientation of streets. Buildings, especially in central and inner-city districts, constitute wind resistance (Gnatowska, 2010). Due to the aerodynamic roughness of urbanised areas, the weakening of wind



II. 3. Wpływ układu zabudowy na kształtowanie procesów cyrkulacji powietrza. Kraków. A) Efekt dyszy. B) Efekt próżni. C) Zmiana kierunku przepływu. Autor: Jacek Wiszniowski

III. 3. Influence of the development layout on shaping the air circulation processes. Kraków. A) Nozzle effect. B) Vacuum effect. C) Change in flow direction. Author: Jacek Wiszniowski

co wiąże się ze zmniejszaniem powierzchni biologicznie czynnej, ograniczaniem dostępu do światła słonecznego oraz blokowaniem przepływu powietrza.

W przypadku poziomej wymiany mas powietrza w intensywnej zabudowie miejskiej, szczególne znaczenie mają korytarze przewietrzania, które powstają przez odpowiednie kształtowanie terenów otwartych i ciągów komunikacyjnych oraz przez wykorzystanie dolin rzecznych. Ułatwiają one ruch powietrza ze względu na niską szorstkość aerodynamiczną ciągu zorientowanego zgodnie z dominującym kierunkiem wiatrów, a także filtrują i chłodzą powietrze dzięki dużemu udziałowi zieleni oraz otwartych zbiorników wodnych. Na pionową konwekcję wpływ mają różnice temperatur i ciśnienia powstające w sąsiedztwie wysokiej zabudowy. Do utrudnienia wentylacji lub wręcz jej zablokowania dochodzi w kanionie ulicznym przy stosunku h/s powyżej 0,74 (Klemm, 2014). W sytuacji, gdy odstęp między pierzejami ulicy jest mniejszy niż wysokość zabudowy występuje stagnacja (II. 2).

Stagnacja to niekorzystne zjawisko przyczyniające się do kumulacji stężenia zanieczyszczeń oraz wzrostu temperatur. Aby temu zapobiegać należy różnicować wysokości budynków, zapewniać przerwy w zabudowie oraz otwory bramowe. Sposób kształtowania miejskiej zabudowy ma znaczący wpływ na wspomaganie procesów wymiany powietrza. W zależności od konfiguracji budynków można uzyskać efekt próżni lub dyszy, jak też wpływać na zmianę kierunku przepływu (II. 3).

Orientacja układu zabudowy może przyczyniać się do zmiany kierunku wiatru o 10-20 stopni (Bochenek, Klemm, 2016). Zjawisko próżni jest wytwarzane, kiedy z obszaru gęsto zabudowanego następuje ruch powietrza do otwartej przestrzeni. Dysza jest wytworem zwiężającej się zabudowy intensyfikującej przepływ powietrza pomiędzy pierzejami. Kierunek ruchu zmienia się, kiedy powietrze odbija się od przeszkody. Celem kształtowania układu

speed in the peripheral zone, in areas of dispersed development, can amount to about 15-20%. In contrast, in the dense development of central districts it averages around 30% (Czerwieniec and Lewińska, 2000). These areas, due to their attractive location, are also subject to strong building pressure, which is associated with reducing the biologically active surface, limiting access to sunlight, and blocking the air flow.

In the case of horizontal exchange of air masses in intensive urban development, ventilation corridors are of particular importance, which are created by appropriate shaping of open areas and communication routes and by using river valleys. They facilitate air movement due to the low aerodynamic roughness of the route oriented in accordance with the dominant wind direction, and they also filter and cool the air thanks to the large share of greenery and open water reservoirs. Vertical convection is influenced by temperature and pressure differences that arise in the vicinity of tall buildings. Ventilation is hindered or even blocked in the street canyon at h/s ratio above 0.74 (Klemm, 2014). In a situation where the distance between street frontages is smaller than the height of the buildings, stagnation occurs (III. 2).

Stagnation is an unfavorable phenomenon that contributes to the accumulation of pollutant concentration and temperature rise. To prevent this, building heights should be varied and gaps in the development and gate openings should be provided. The way in which urban development is shaped has a significant impact on supporting air exchange processes. Depending on the building configuration, a vacuum or nozzle effect can be achieved, as well as a change in the flow direction (III. 3).

The orientation of the building layout can contribute to a change in wind direction by 10–20 degrees (Bochenek and Klemm, 2016). The vacuum phenomenon is created when air moves from a densely built-up area to an open space. A nozzle

aerodynamicznego ulicy powinno być uzyskanie nie tylko przewietrzania przestrzeni ulicznej, ale również wspomaganie naturalnej wentylacji poprzecznej w budynkach.

Dla zapewnienia odpowiedniej skuteczności, korytarze przewietrzania powinny spełniać minimalne warunki. Ich długość nie może być mniejsza niż 1 kilometr. Szerokość powinna wynosić co najmniej 50 metrów, ale równocześnie cztery razy więcej niż wysokość krawędzi. Szorstkość podłoża musi być nie większa niż 0,5 metra. W obrębie napowietrzającego klina nie powinno być przeszkód, jeżeli jednak są, to ich szerokość nie może przekraczać 10% szerokości korytarza, a wysokość nie może być większa niż 10 metrów (Bochenek, Klemm, 2016).

Jiyun Song i in. (2018) opisali oddziaływanie przepływów miejskiego powietrza na naturalną wentylację budynków. W skali architektonicznej zjawiska aerodynamiczne można wykorzystać do naturalnej wentylacji budynków (atria, podwójne fasady, komory dystrybucyjne w stropach, kominy konwekcyjne), dogrzewania powietrza zasysanego z zewnątrz (rekuperacja wykorzystująca zyski słoneczne z przeszkleń oraz różnice ciśnienia wynikające z orientacji lub wysokości), schładzania powietrza (kurtyny powietrzne i wodne oraz kolektory ziemne i wodne), a także do filtrowania zanieczyszczeń (wieże antysmogowe).

6. OCENA WPLYWU JAKOŚCI POWIETRZA NA WARUNKI ŻYCIA MIESZKAŃCÓW

Niska jakość powietrza oraz stres temperaturowy mają negatywny wpływ na zdrowie i życie mieszkańców. Do oceny rzeczywistych skutków tych zagrożeń dla pogorszenia warunków życia, można przyjąć wskaźniki ilościowe, takie jak m.in.: procent populacji narażonej na ponadnormatywne stężenia zanieczyszczeń i temperatury i liczba nadmiarowych zgonów związanych z wyżej wymienionymi czynnikami.

Zanieczyszczenie powietrza jest uznane za największe środowiskowe zagrożenie dla zdrowia w Europie. Problem złej jakości powietrza dotyczy przede wszystkim mieszkańców miast. Około 96% populacji miejskiej w UE-27 było narażone na ponadnormatywne stężenie drobnego pyłu zawieszonego, co spowodowało w 2021 roku 238 tys. przedwczesnych zgonów (*Air quality in Europe*, 2022). W przyjętym w 2021 planie działania UE *Towards a Zero Pollution for Air, Water and Soil* określono cele i działania, które należy podjąć, aby do 2030 roku zmniejszyć liczbę przedwczesnych zgonów spowodowanych zanieczyszczeniem powietrza o 55% (*EU Action Plan*, 2021). Wśród działań dotyczących środowiska zbudowanego za najważniejsze uznano zmniejszenie zanieczyszczenia pochodzącego z ogrzewania budynków, transportu miejskiego oraz materiałów budowlanych. Pominęto natomiast kwestie urbanistyczne odpowiedzialne za kształtowanie miejskiej wentylacji za pomocą rozmieszczenia, orientacji, układu, formy, wielkości i wysokości zabudowy oraz zadrzewień.

Qingli Zhang i in. (2022) przeprowadzili badania obejmujące 272 chińskie miasta w okresie 2013-2015 i na ich podstawie zaproponowali ustanowienie nowego wskaźnika (AHI) poprzez integrację dziennego ryzyka śmiertelności z powodu zanieczyszczenia powietrza z ryzykiem związanym z nieoptymalną temperaturą. Ich analizy nadmiernych zgonów wykazują, że zanieczyszczenie powietrza i nieoptymalna temperatura odpowiadają średnio za 28,23% dziennej nadmiernej śmiertelności z czego aż 23,47% związane było z termicznym stresem (Zhang, Chen, Yin i in., 2022). Nie badają jednak stopnia zależności między zjawiskami smogu i MWC odpowiednio w zimie i w lecie.

is a product of the narrowing building development that intensifies the air flow between the frontages. The direction of movement changes when the air reflects off an obstacle. The aim of shaping the aerodynamic layout of the street should be to achieve not only the ventilation of the street space, but also to support natural cross ventilation in buildings.

To ensure proper effectiveness, ventilation corridors should satisfy certain minimum conditions. Their length cannot be less than 1 km. Their width should be at least 50 m, but at the same time four times greater than the height of the edge. The roughness of the ground should not exceed 0.5 m. There should be no obstacles within the aeration wedge, but if there are, their width cannot exceed 10% of the width of the corridor, and the height cannot exceed 10 m (Bochenek and Klemm, 2016).

Jiyun Song et al. described the impact of urban air flows on the natural ventilation of buildings (Song et al., 2018). On an architectural scale, aerodynamic phenomena can be used for natural ventilation of buildings (atria, double facades, distribution chambers in ceilings, convection chimneys), reheating air drawn in from the outside (recuperation using solar gains from glazing and pressure differences resulting from orientation or height), cooling the air (air and water curtains and ground and water collectors) and also for filtering pollutants (anti-smog towers).

6. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AIR QUALITY ON THE LIVING CONDITIONS OF RESIDENTS

Low air quality and temperature stress have a negative impact on the health and life of residents. To assess the actual effects of these threats on the deterioration of living conditions, quantitative indicators can be adopted, such as the percentage of the population exposed to excessive concentrations of pollutants and temperatures and the number of excess deaths related to the above factors.

Air pollution is considered the biggest environmental health risk in Europe. The problem of poor air quality mainly concerns city dwellers. About 96% of the urban population in the EU-27 was exposed to excessive levels of fine particulate matter, which caused 238,000 premature deaths in 2021 (*Air quality in Europe*, 2022).

The EU Action Plan *Towards a Zero Pollution for Air, Water and Soil*, adopted in 2021, sets out targets and actions to be taken to reduce premature deaths caused by air pollution by 55% by 2030 (*EU Action Plan*, 2021). Among the actions concerning the built environment, the most important were considered to reduce pollution coming from: heating buildings, urban transport, and construction materials. However, urban planning issues responsible for shaping urban ventilation through the layout, orientation, arrangement, form, size and height of buildings and trees were omitted.

Qingli Zhang et al. conducted a study covering 272 Chinese cities in the period 2013-2015 and proposed to establish a new index (AHI) by integrating the daily mortality risk due to air pollution with the risk associated with sub-optimal temperature (Zhang et al., 2022). Their analysis of excess mortality shows that air pollution and sub-optimal temperature account for an average of 28.23% of the daily excess mortality, of which 23.47% was related to thermal stress (Zhang et al., 2022). However, they do not investigate the degree of relationship between smog and UHI phenomena in winter and summer, respectively.

7. OCENA WPŁYWU OCIEPLENIA KLIMATU I EFEKTU MWC NA WARUNKI ŻYCIA MIESZKAŃCÓW

Tamara lungman z zespołem (2023) oszacowali, że 78% populacji 93 największych miast UE objętych badaniem doświadcza letniego efektu MWC wyższego niż 1°C, a 20% wyższego niż 2°C, co odpowiada za średnio 4,3% wszystkich letnich zgonów. Naukowcy zgadzają się też co do tego, że na efekt MWC nakłada się ocieplenie klimatu, co przyczynia się do kumulacji podwyższonych temperatur, a w związku z tym do większej liczby przedwczesnych zgonów i udarów.

Na pozytywny wpływ ocieplenia wskazują analizy śmiertelności z powodu nieoptymalnych temperatur dla Szwajcarii przeprowadzone przez Evan de Schrijver z zespołem (2022). Wykazali oni, że w okresie od 1969 do 2017 roku nastąpiło znaczące zmniejszenie liczby zgonów z powodu chłodu przy jednoczesnym niewielkim wzroście liczby zgonów z powodu upału. Należy przy tym zauważyć, że zgonów z wychłodzenia stwierdzono znacznie więcej niż wskutek przegrzania. Stosunek ten wynosi jak 30 do 1. Co więcej całkowity bilans ofiar z powodu nieoptymalnych temperatur zmniejszył się o połowę w ciągu tego okresu (de Schrijver i in., 2022). Może to świadczyć o poprawie skuteczności profilaktyki i opieki zdrowotnej, ale też o pozytywnym wpływie ocieplenia na zmniejszenie liczby zgonów z wychłodzenia.

Pierre Masselot z zespołem (2023) na podstawie badań obejmujących 854 miasta europejskie oraz Yao Wu z zespołem (2022), prowadzącym podobne badania, ale w skali globalnej, podają uśrednione wartości bardzo zbliżone do siebie. Podają oni niezależnie od siebie, że liczba zgonów z wychłodzenia jest około 10 razy większa niż liczba zgonów z powodu upału. Trzeba podkreślić, że proporcje te są uśrednione w skali globalnej i będą różnić się w zależności od strefy klimatycznej.

Pod względem nadmiarowych zgonów z powodu nieoptymalnych temperatur można stwierdzić, że pomimo niekorzystnego bilansu w skali globalnej, ocieplenie klimatu będzie korzystne dla krajów w wysokich i średnich szerokościach geograficznych. Lokalne uwarunkowania wpływają na zmianę tych wartości, niemniej dla wschodniej Europy, w tym Polski, liczba zgonów z powodu chłodu jest znacznie większa niż z upału. Jest to przesłanka do przemyślenia na nowo kierunku modelowania regionalnych i miejskich planów adaptacji do zmian klimatu i przeciwdziałania efektem lub może właśnie wykorzystania zjawiska miejskiej wyspy ciepła.

Tamara lungman i in. (2023) badali wpływ MWC na wzrost śmiertelności w okresie letnim. Natomiast Helen. L. Macintyre (2021) z zespołem analizowali zjawisko MWC w zimie wraz z prognozowanymi zmianami wywołanymi ociepleniem klimatu). Wyniki ich badań, które obejmowały Birmingham w Anglii, sugerują pozytywny wpływ MWC w okresie zimowym charakteryzujący się zmniejszeniem liczby ofiar z wychłodzenia. W związku z tym można założyć, że ten zimowy efekt ochronny MWC będzie większy w miastach położonych w strefie o chłodniejszym klimacie.

Przy niewielkim ociepleniu globalne efekty zmian klimatu mogą być korzystne, jak potwierdzają Zbigniew W. Kundzewicz i Katarzyna Juda-Rezler. Równocześnie zastrzegają oni, że znaczniejsze zmiany ocieplenia doprowadzą do przeważenia strat nad korzyściami (Kundzewicz, Juda-Rezler, 2010).

Zbigniew Kundzewicz wraz z zespołem (2018) podjął się kompleksowej oceny narzędzi monitorowania skutków zmian klimatu oraz upowszechniania wyników pomiaru w ramach międzynarodowego projektu CHASE-PL *Wpływ zmian klimatycznych ocena dla wybranych sektorów w Polsce*. W swoich badaniach autorzy wskazują na straty spowodowane głównie upałami, suszami, powodziami. Analizom poddano wskaźniki związane m.in. z falami upałów.

7. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GLOBAL WARMING AND THE UHI EFFECT ON THE LIVING CONDITIONS OF RESIDENTS

Tamara lungman and her team estimated that 78% of the population of the 93 largest EU cities included in the study experience a summer UHI effect higher than 1°C, and 20% higher than 2°C, which accounts for an average of 4.3% of all summer deaths (lungman et al., 2023). Researchers also agree that the UHI effect is compounded by global warming, which contributes to the accumulation of increased temperatures and, consequently, leads to more premature deaths and strokes.

The positive impact of warming is indicated by analyses of mortality due to sub-optimal temperatures for Switzerland conducted by Evan de Schrijver et al., 2022. They showed that in the period from 1969 to 2017 there was a significant reduction in the number of deaths due to cold, while the number of deaths due to heat increased slightly. It should be noted that deaths due to cold were significantly more frequent than those due to heat. This ratio is 30 to 1. Moreover, the total number of deaths due to sub-optimal temperatures decreased by half during this period (de Schrijver et al., 2022). This may indicate improved effectiveness of prevention and health care, as well as a positive effect of warming in reducing the number of deaths due to hypothermia.

Although the number of deaths due to heat is high and actions should be taken to reduce it, the number of deaths due to hypothermia is even higher. Pierre Masselot and colleagues, based on research covering 854 European cities, and Yao Wu and his team conducting similar research, but on a global scale, provide average values that are very similar to each other. They independently report that the number of deaths due to cold is about 10 times higher than the number of deaths due to heat (Masselot et al., 2023; Wu et al., 2022). It should be emphasised that these proportions are averaged on a global scale and will vary depending on the climate zone. In terms of excess deaths due to sub-optimal temperatures, it can be stated that despite the unfavourable balance on a global scale, climate warming will be beneficial for countries in high and middle latitudes. Local conditions affect the change in these values, however, for Eastern Europe, including Poland, the number of deaths due to cold is much higher than from heat. This provides a basis for rethinking the direction of regional and city planning models for climate change adaptation, either to counteract its effects or perhaps even to take advantage of the urban heat island phenomenon.

Tamara lungman et al. studied the effect of UHI on the increase in summer mortality, while Helen L. Macintyre et al. analysed the phenomenon of UHI in winter along with the projected changes caused by climate warming (lungman et al., 2023; Macintyre et al., 2021). The results of their study, which included Birmingham, England, suggest a positive effect of UHI in winter characterised by a decrease in the number of hypothermia deaths. Therefore, it can be assumed that this winter protective effect of UHI will be greater in cities located in a zone with a colder climate.

With small warming, the global effects of climate change may be beneficial, as confirmed by Zbigniew W. Kundzewicz and Katarzyna Juda-Rezler. At the same time, they stipulate that larger changes in warming will lead to losses outweighing benefits (Kundzewicz and Juda-Rezler, 2010).

Zbigniew Kundzewicz and his team undertook a comprehensive assessment of the tools for monitoring the effects of climate change and disseminating measurement results as part of the international project CHASE-PL *Impact of climate change; assessment for selected sectors in Poland*

Zestawienia obserwowanych zmian, wniosków i ustaleń zebrano w tabelach dostępnych w Internecie pod adresem <https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-018-0220-4/tables/1> oraz <https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-018-0220-4/tables/2>.

Interesujące jest to, że przyjmując wskaźniki nadmiarowych zgonów z powodu nieoptymalnych temperatur przy ocenie warunków życia w mieście, można stwierdzić występowanie pozytywnego trendu spadkowego. Należy założyć, że w okresie zimowym na spadek śmiertelności wpłynął efekt miejskiej wyspy ciepła, biorąc pod uwagę, że ponad 70% Europejczyków zamieszkuje miasta, a spośród nich 78% doświadcza efektu MWC (lungman, Cirach, Marando i in., 2023). Pod względem liczby nadmiarowych zgonów spowodowanych nieoptymalnymi temperaturami wpływ ocieplającego się klimatu i efektu miejskiej wyspy ciepła w zimie można zatem uznać za pozytywny. Tym bardziej, że liczba zgonów z powodu zimna jest wielokrotnie wyższa niż liczba zgonów z powodu upałów na całym świecie (Masselot, Mistry, Vanoli i in., 2023; Wu, Li, Zhao, 2022).

Chociaż wielu badaczy eksploruje zagadnienia kształtowania miejskiego klimatu oraz warunków aerosanitarnych, analizując poszczególne czynniki, potrzebne są dalsze badania do wyjaśnienia stopnia współzależności oraz oceny ich wpływu.

8. DYSKUSJA

W niniejszym przeglądzie stanu badań opracowano syntezy systematycznych przeglądów dotyczących problemów występujących w miastach: zanieczyszczenia powietrza oraz zjawiska wyspy ciepła. W większości badań problemy te analizowano pod kątem wpływu na zdrowie mieszkańców.

Okolo 75% publikacji wskazywało, że szkodliwe dla zdrowia są warunki meteorologiczne wywołane zmianami klimatu (m.in. rosnące temperatury, fale upałów, opady). Tylko 7% do szkodliwych czynników zaliczyło zanieczyszczenie powietrza i to wyłącznie jako konsekwencję pożarów wywołanych suszami (Rocque, Beaudoin, Ndjaboue, i in., 2021). Z kolei inny zespół badaczy stwierdził, że z badanych 96 tys. publikacji tylko 15% dotyczyło wpływu zmian klimatycznych na warunki życia w mieście i osiedlach mieszkaniowych (Berrang-Ford, Siders, Lesnikowski i in., 2021).

Skokowy wzrost liczby publikacji dotyczących zmian klimatu poszerza wiedzę na temat rosnących zagrożeń. Jednak dla pełnego obrazu należy zestawić to z badaniami stwierdzającymi, że równocześnie zmniejsza się procent zagrożonej populacji, liczba ofiar i poziom strat (Formetta, Feyen, 2019).

W zależności od przyjętej metodologii badań wyniki mogą się różnić, ale na ich podstawie można stwierdzić, że związek między zmianami klimatu a zdrowiem wymaga dalszych badań. Jednocześnie należy zauważyć, że wiele analiz jest fragmentarycznych (Berrang-Ford, Siders, Lesnikowski i in., 2021). Brakuje badań uwzględniających odpowiedni kontekst, przez co interpretacja wyników może być skażona.

Podobnym deficytem odznaczają się badania na temat związku pomiędzy występowaniem smogu a efektem wyspy ciepła z uwzględnieniem wpływu zmian klimatu na te zjawiska. W rozdziale drugim niniejszego przeglądu analizowano publikacje uwzględniające poszczególne zagadnienia. Wymaga jednak dalszego rozpoznania związków pomiędzy zmianami klimatu a występowaniem smogu oraz wyspy ciepła (Piracha, Chaudhary, 2022), a także rzeczywiste skutki dla zdrowia przy uwzględnieniu lokalnych uwarunkowań.

Stosunkowo dobrze zbadano rozwiązania umożliwiające wentylację miasta i budynków (Cheshmehzangi, Dawodu, 2020). Jednocześnie należy zauważyć, że m.in. zachowanie korytarzy przewietrzania jest

(Kundzewicz et al., 2018). In their research, the authors point to losses caused mainly by heat, droughts, and floods. The analyses included indicators related to, among other things, heat waves. The summaries of the observed changes, conclusions, and findings were collected in tables available on the Internet (Kundzewicz et al., 2018, Tables 1 and 2).

It is interesting that, while considering the excess death rates due to sub-optimal temperatures in the assessment of urban living conditions, a positive downward trend can be observed. It can be assumed that the urban heat island effect influenced the decrease in mortality in winter, considering that more than 70% of Europeans live in cities, and 78% of them experience the UHI effect (lungman et al., 2023). In terms of the number of excess deaths due to sub-optimal temperatures, the impact of the warming climate and the urban heat island effect in winter can therefore be viewed as positive. All the more so because the number of deaths due to cold is many times higher than the number of deaths due to heat worldwide (Masselot et al., 2023; Wu, 2022).

Although many researchers explore the issues of shaping urban climate and aerosanitary conditions by analysing individual factors, further research is needed to clarify the degree of interdependence and to assess their impact.

8. DISCUSSION

This review of the state of research synthesises systematic reviews of urban problems, such as air pollution and the heat island phenomenon. Most studies have examined these problems in terms of their impact on residents' health.

About 75% of publications indicated that meteorological conditions caused by climate change (including rising temperatures, heat waves, precipitation) are harmful to health. Only 7% included air pollution among harmful factors, and only as a consequence of drought-induced fires (Rocque et al., 2021). In turn, another team of researchers found that out of 96 thousand publications examined, only 15% concerned the impact of climate change on living conditions in the city and housing estates (Berrang-Ford et al., 2021).

The surge in the number of publications on climate change enhances our understanding of the growing threats. However, to get the full picture, this must be compared with studies that show that the percentage of the population at risk is decreasing, and the number of victims and the level of losses are decreasing (Formetta and Feyen, 2019).

Depending on the research methodology adopted, the results may vary, but they clearly suggest that the relationship between climate change and health requires further research. At the same time, it should be noted that many analyses are fragmented (Berrang-Ford et al., 2021). There is a lack of contextual studies, which could skew the interpretation of the results.

A similar deficit is noted in the research on the relationship between the occurrence of smog and the heat island effect, taking into account the impact of climate change on these phenomena. In Section 2 of this review, publications covering individual issues were analysed. However, the relationship between climate change and the occurrence of smog and the heat island (Piracha and Chaudhary, 2022), as well as the actual effects on health, considering local conditions, require further investigation. Solutions enabling ventilation of the city and buildings have been relatively well researched (Cheshmehzangi and Dawodu, 2020). At the same time, it should be noted that, among other things, maintaining ventilation corridors is a major problem due to investment pressure contributing to the development of open areas in cities.

dużym problemem ze względu na presję inwestycyjną, przyczyniającą się do zabudowywania otwartych terenów w miastach. Coraz więcej badań dotyczących wpływu zmian klimatu w zakresie nieoptymalnych temperatur obejmuje analizę nadmiarowych zgonów w aspekcie globalnym (Zhang i in., 2022; Wu, Li, Zhao, 2022) oraz lokalnym (lungman i in., 2023; Macintyre, Heaviside, Cai, 2021; Masselot i in. 2023; de Schrijver i in., 2022). Kryterium nadmiarowych zgonów wydaje się być odpowiednie dla obiektywnego określenia warunków życia mieszkańców.

9. PODSUMOWANIE

Odnoszenie się do bezwzględnych wartości nadmiarowej liczby zgonów z powodu zanieczyszczenia powietrza i nieoptymalnych temperatur jest ważnym wskaźnikiem oceny warunków życia, a monitorowanie tych danych może określać postęp lub regres w zakresie poprawy środowiska miejskiego.

Potwierdzono korelację pomiędzy występowaniem zjawisk smogu i miejskiej wyspy ciepła. W miastach zlokalizowanych w różnych strefach geograficznych zaobserwowano występowanie podobnych trendów, choć o różnym nasileniu. Wobec znacznie większej liczby zgonów spowodowanych chłodem niż upałem, zimowy efekt wyspy ciepła może być korzystny w miastach europejskich w wysokich i średnich szerokościach geograficznych. Ze względu na złożoność problematyki nie można jednak pomijać innych konsekwencji zjawiska MWC, w tym m.in. wpływu na tłumienie konwekcji pionowej w obecności inwersji termicznej, z czym wiąże się wzrost częstotliwości i długości występowania epizodów smogowych.

Aby wykorzystać pozytywny efekt zatrzymywania ciepła zimą, można rozważyć stosowanie powierzchni roślinnych, sezonowych, tracących liście w okresie zimowym – do pokrywania sztucznych nawierzchni i ścian. Stosowanie pnączy na ścianach pierzei w kanyonach ulicznych jest też optymalnym rozwiązaniem w sytuacji braku miejsca na drzewa, skwery i trawniki. Warto rozważyć zielone ściany i dachy, ewentualnie krzewy, również z tego powodu, że drzewa mogą stanowić barierę utrudniającą przepływ powietrza.

Wiedza na temat zjawisk aerodynamicznych może służyć kształtowaniu przepływów energii i materii w środowisku miejskim za pomocą rozmieszczenia, orientacji, układu, formy, wielkości i wysokości zabudowy. Rozpoznanie tej problematyki jest przydatne w opracowaniu rozwiązań dla redukcji i zapobiegania skutkom negatywnych zjawisk klimatycznych typowych dla miast, takich jak: smog (zanieczyszczenie powietrza) i wyspa ciepła (zastoiny powietrza), a także efekt dyszy (przeciągi i zawirowania), turbulencje (parcie, ssanie).

Dla poprawy jakości powietrza oraz komfortu cieplnego w środowisku miejskim duże znaczenie mają: odpowiednie kształtowanie struktur miejskich z uwzględnieniem kanałów napowietrzających, aktywne i pasywne sposoby wspomagania cyrkulacji oraz zielone rozwiązania regenerujące powietrze. Odpowiednie wykorzystanie ruchów mas powietrza w skali miasta (korytarze i kominy przewietrzające) może zapewnić miastu oddech, usuwać zanieczyszczenia i ochładzać w lecie lub ogrzewać w zimie przewietrzane tereny i owiewane budynki. Te zagadnienia wymagają dalszych badań, szczególnie tych o charakterze implementacyjnym, na co wskazuje przegląd literatury tematu i zestawienie z działaniami podejmowanymi w miastach europejskich.

Zmiany klimatu o charakterze globalnym mogą mieć różne skutki zdrowotne ze względu na inne uwarunkowania lokalne. Dlatego interpretacje wyników uzyskanych z badań opartych na teoretycznych modelach nie mogą zastąpić badań empirycznych, a tylko takie są pewniejszą podstawą dla podejmowanych działań.

Tego typu opracowania mogą przyczynić się do poprawy zrozumienia i interpretacji skutków zmian klimatycznych.

A growing number of studies on the impact of climate change on sub-optimal temperatures include the analysis of excess deaths in global (Zhang et al., 2022; Wu, 2022) as well as local (lungman et al., 2023; Macintyre et al., 2021; Masselot et al. 2023; de Schrijver et al., 2022) aspects. The excess deaths criterion seems to be appropriate for objectively defining the living conditions of residents.

9. CONCLUSIONS

Referring to the absolute values of excess deaths due to air pollution and sub-optimal temperatures is an important indicator of the assessment of living conditions, and monitoring this data can determine progress or regression in the field of improving the urban environment.

The correlation between the occurrence of smog and the urban heat island phenomena was confirmed. Similar trends were observed in cities located in various geographical zones, though with different severity. In view of a much larger number of deaths caused by cold than heat, the winter effect of the heat island can be beneficial in European cities in high and medium latitudes. However, due to the complexity of the issues, other consequences of the UHI phenomenon cannot be ignored, including influence on suppressing vertical convection in the presence of thermal inversion, which is associated with an increase in the frequency and length of smog episodes.

To take advantage of the positive effect of heat retention in winter, we can consider using plants and seasonal surfaces that shed leaves in winter to cover artificial surfaces and walls. The use of vines on the walls of the frontage in a street canyon is also an optimal solution in the absence of space for trees, squares and lawns. It is worth considering green walls and roofs, or bushes, also because of the fact that trees can be a barrier that hinders air flow.

Knowledge of aerodynamic phenomena can be used to shape the flow of energy and matter in the urban environment by means of the location, orientation, layout, form, size and height of buildings. Recognition of this issue is useful in developing solutions for reducing and preventing the effects of negative climatic phenomena typical for cities, such as smog (air pollution) and heat island (air stagnation), as well as the nozzle effect (drafts and swirls) and turbulence (pressure, suction).

In order to improve air quality and thermal comfort in the urban environment, the following are of great importance: appropriate shaping of urban structures, taking into account aeration channels, as well as active and passive methods of supporting circulation and green solutions that regenerate air. Appropriate use of air mass movements on a city scale (corridors and ventilation chimneys) can provide the city with a breath of fresh air, remove pollutants, and cool the aerated areas and buildings in summer or heat them in winter. These issues require further research, especially studies of an implementation nature, as indicated by a review of the literature on the subject and a comparison with actions taken in European cities.

Global climate change may have various health effects due to different local conditions. Therefore, interpretations of results obtained from research based on theoretical models cannot replace empirical research, and only this type of research is a more reliable basis for actions to be undertaken. Such studies can contribute to a better understanding and interpretation of the effects of climate change, and thus support adaptation actions.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Abhijith, K.V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., Pulvirenti, B., 2017, Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review, *Atmospheric Environment*, 162, s. 71–86.
- [2] Apsimon, H., Amann, M., Åström, S., Oxley, T., 2009, Synergies in addressing air quality and climate change, *Climate policy*, 9(6), s. 669–680.
- [3] Barwise, Y., Kumar, P., 2020, Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection, *Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 12.
- [4] Berrang-Ford, L., Siders, A.R., Lesnikowski, A., Fischer, A.P., Callaghan, M.W., Hadaway, N.R., ... and Abu, T.Z., 2021, A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change, *Nature Climate Change*, 11(11), s. 989–1000.
- [5] Bochenek A., Klemm K., 2016, Wyznaczanie korytarzy przewietrzających przy użyciu metody morfometrycznej dla wybranego fragmentu miasta Łodzi, *Budownictwo i Architektura*, 15(4), s. 139–151.
- [6] Cheshmehzangi, A., Dawodu, A., 2020, Passive cooling energy systems: holistic SWOT analyses for achieving urban sustainability, *International Journal of Sustainable Energy*, 39(9), s. 822–842.
- [7] Comaroff, J., 2017, On the materialities of air, *City*, 21:5, s. 607–613.
- [8] Czerwieniec M., Lewińska J., 2000, *Zieleń w mieście*, Kraków: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
- [9] de Schrijver, E., Bundo, M., Ragetti, M.S., Sera, F., Gasparrini, A., Franco, O.H., Vicedo-Cabrera, A.M., 2022, Nationwide analysis of the heat and cold-related mortality trends in Switzerland between 1969 and 2017: the role of population aging, *Environmental health perspectives*, 130(3), 037001.
- [10] Dudek, W., 2019, Problemy ze smogiem w Europie – wspólny raport o jakości powietrza, *Kontrola Państwowa*, 64(3 (386)), s. 51–57.
- [11] Flaga, A., Flaga, L., red., 2021, *Dynamiczne przewietrzanie i redukcja smogu obszarów zurbanizowanych*, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [12] Flaga, A., Krajewski, P., Pistol, A., Flaga, L., 2020, Badania modelowe dynamicznego działania na warstwie przyziemnej atmosfery wymuszającego przewietrzanie obszarów zurbanizowanych, *Inżynieria i Budownictwo*, 76/3, s. 161–164.
- [13] Flaga, L., Pistol, A., Krajewski, P., Flaga, A., 2019, Model tests of dynamic action on the atmospheric boundary layer – linear configuration of ventilation towers on a rough terrain, *Technical Transactions*, 7/2019, s. 63–79.
- [14] Formetta, G., Feyen, L., 2019, Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards, *Global Environmental Change*, 57, 101920.
- [15] Gnatowska, R., 2010, Development of local wind climate as an element of rural planning, *Teka Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego*, 7, s. 97–102.
- [16] Godłowska, J., 2019, *Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w Krakowie: badania porównawcze i próba podejścia modelowego*, Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
- [17] Graham, S., 2015, Life support: The political ecology of urban air, *City*, 19:2-3, s. 192–215.
- [18] Guerreiro, S.B., Fowler, H.J., Barbero, R., Westra, S., Lenderink, G., Blenkinsop, S., Lewis, E., Li, X.F., 2018, Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes, *Nature Climate Change*, 8(9), s. 803–807.
- [19] Hereher, M., Eissa, R., Alqasemi, A., El Kenawy, A.M., 2022, Assessment of air pollution at Greater Cairo in relation to the spatial variability of surface urban heat island, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, s. 21412–21425.
- [20] Iungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparrini, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., Nieuwenhuijsen, M., 2023, Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities, *The Lancet*, 401(10376), s. 577–589.
- [21] Klemm, K., 2014, An assessment of conditions of human comfort in open landscaped areas of Lodz, *Technical Transactions, Civil Engineering*, 3-B (8), s. 187–194.
- [22] Koch, K., Ysebaert, T., Denys, S., Samson, R., 2020, Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review, *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126843.
- [23] Kundzewicz, Z.W., Juda-Rezler, K., 2010, Zagrożenia związane ze zmianami klimatu, *Nauka*, 4, s. 69–76.
- [24] Kundzewicz, Z.W., Piniewski, M., Mezghani, A., Okruszko, T., Pińskwar, I., Kardał, I., Hov, O., Szcześniak, M., Szwed, M., Benestad, R.E., Marcinkowski, P., Graczyk, D., Dobler, A., Førland, E.J., Joanna O’Keefe, J., Adam Choryński, A., Kajsa M. Parding, K.M., Haugen, J.E., 2018, Assessment of climate change and associated impact on selected sectors in Poland, *Acta Geophysica*, 66, s. 1509–1523.
- [25] Lehmann, S., 2014, Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure, *City, Culture and Society*, 5(1), s. 1–8.
- [26] Leung, D.Y., Tsui, J.K., Chen, F., Yip, W.K., Vrijmoed, L.L.P., & Liu, C.H., 2011, Effects of urban vegetation on urban air quality, *Landscape Research*, 36(2): 173–188.
- [27] Li, H., Sodoudi, S., Liu, J., Tao, W., 2020, Temporal variation of urban aerosol pollution island and its relationship with urban heat island, *Atmospheric Research*, 241, 104957.
- [28] Liu, Y., Yan, C., Feng, Z., Zheng, F., Fan, X., Zhang, Y., Li, C., Zhou, Y., Lin, Z., Guo, Y., Zhang, Y., Ma, L., Zhou, W., Liu, Z., Dada, L., Dällenbach, K., Kontkanen, J., Cai, R., Chan, T., Chu, B., Du, W., Yao, L., Wang, Y., Cai, J., Kangasluoma, J., Kokkonen, T., Kujansuu, J., Rusanen, A., Deng, C., Fu, Y., Yin, R., Li, X., Lu, Y., Liu, Y., Lian, C., Yang, D., Wang, W., Ge, M., Wang, Y., Worsnop, D.R., Junninen, H., He, H., Kerminen, V.M., Zheng, J., Wang, L., Jiang, J., Petäjä, T., Bianchi, F. Kulmala, M., 2020, Continuous and comprehensive atmospheric observations in Beijing: a station to understand the complex urban atmospheric environment, *Big Earth Data*, 4:3, s. 295–321.
- [29] Macintyre, H. L., Heaviside, C., Cai, X., 2021, The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate, *Environment International*, 154, 106530.
- [30] Masselot, P., Mistry, M., Vanoli, J., 2023, Excess mortality attributed to heat and cold: a health impact assessment study in 854 cities in Europe, *The Lancet Planetary Health*, 7(4), s. e271–e281.
- [31] Næss, P., 2014, Urban Form, Sustainability and Health: The Case of Greater Oslo, *European Planning Studies*, 22:7, s. 1524–1543.
- [32] Nalau, J., Verrall, B., 2021, Mapping the evolution and current trends in climate change adaptation science, *Climate Risk Management*, 32, 100290.
- [33] Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimschaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D., 2021, The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, *BMJ*, 372 :n71, s. 1–9.
- [34] Piracha, A., Chaudhary, M.T., 2022, Urban Air Pollution, Urban Heat Island and Human Health: A Review of the Literature, *Sustainability*, 14, 9234.
- [35] Rocque, R.J., Beaudoin, C., Ndjaboue, R., Cameron, L., Poirier-Bergeron, L., Poulin-Rheault, R.A., Catherine Fallon, C., Tricco, A.C., Witteman, H.O., 2021, Health effects of climate change: an overview of systematic reviews, *BMJ open*, 11(6), e046333.
- [36] Santamouris, M., 2014, Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, 103, s. 682–703.
- [37] Song, J., Fan, S., Lin, W., Mottet, L., Woodward, H., Davies Wykes, M., Arcucci, R., Xiao, D., Debay, J.E., ApSimon, H., Aristodemou, E., Birch, D., Carpentieri, M., Fang, F., Herzog, M., Hunt, G.R., Jones, R.L., Pain, C., Pavlidis, D., Robins, A.G., Short, C.A., Linden, P.F., 2018, Natural ventilation in cities: the implications of fluid mechanics, *Building Research & Information*, 46(8), s. 809–828.
- [38] Wang, C., Wang, Z.H., Kaloush, K.E., Shacat, J., 2021, Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111171.
- [39] Wang, Y., Guo, Z., Han, J., 2021, The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China, *Ecological Indicators*, 129, 107976.
- [40] Wiszniowski, J., 2021, Healthy city versus the urban heat island effect in the context of global warming. Passive and active methods reduction of UHI, *Builder*, 284(3), s. 29–31.
- [41] Wojtyszyn, B., 2020, Sustainable development of urban spaces towards climate protection and adaptation to its changes, *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30(3), s. 122–133.
- [42] Wu, Y., Li, S., Zhao, Q., 2022, Global, regional, and national burden of mortality associated with short-term temperature variability from 2000–19: a three-stage modelling study, *The Lancet Planetary Health*, 6(5), s. e410–e421.
- [43] Yang, S., Shi, L., 2017, Public perception of smog: A case study in Ningbo City, China, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(2), s. 219–230.
- [44] Zhang, Q., Chen, R., Yin, G., Du, X., Meng, X., Qiu, Y., Kan, H., Zhou, M., 2022, The establishment of a new air health index integrating the mortality risks due to ambient air pollution and non-optimum temperature, *Engineering*, 14, s. 156–162.
- [45] Zielonko-Jung, K., Mochulska, M.V., 2022, Morphology of Building Development as an Element of Urban Ventilation System, *Architecture Civil Engineering Environment*, 15, s. 71–81.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE / ONLINE SOURCES

- [1] *Air quality in Europe 2022*, 2020, Report no. 05/2022, Copenhagen: European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022> Accessed 15.11.2023
- [2] *EU Action Plan, Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil*, Brussels: European Commission, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400> Accessed 11.12.2023