

Magdalena MŁYNARCZYK¹, Joanna ORYSIAK², Aleksandra KOPYT³

ZIELONA INFRASTRUKTURA A NIWELOWANIE SKUTKÓW WYSOKIEJ TEMPERATURY W MIEŚCIE

W związku z postępującymi zmianami klimatu coraz częściej występują fale gorąca (fale upałów), które negatywnie wpływają na organizm człowieka. Mieszkańcy miast odczuwają te skutki szczególnie dotkliwie, ponieważ zurbanizowane przestrzenie sprzyjają powstawaniu tzw. miejskich wysp ciepła. Zjawisko to wynika przede wszystkim z zabudowy terenów zielonych oraz ograniczenia powierzchni seminaturalnych, co prowadzi do intensyfikacji nagrzewania się miast i utrudnia ich naturalne chłodzenie. W niniejszym artykule omówiono bilans cieplny promieniowania słonecznego oraz wpływ podwyższonych temperatur na organizm człowieka. Przedstawiono również mechanizmy powstawania miejskich wysp ciepła oraz sposoby ich ograniczania. Jednym z kluczowych rozwiązań jest wprowadzanie Zielonej Infrastruktury, obejmującej m.in. drzewa, parki, ogrody i zielone dachy. Takie działania pozwalają na obniżenie temperatury powietrza, poprawiają komfort termiczny mieszkańców oraz minimalizują negatywne skutki długotrwałych upałów. Rola zieleni w miastach jest szczególnie istotna podczas okresów wysokiej temperatury i wilgotności powietrza. Roślinność pełni funkcję naturalnego regulatora, zapewniając cień, zwiększając wilgotność i zmniejszając nagrzewanie się powierzchni. W związku z tym istotne jest, aby w procesie planowania przestrzennego uwzględniać strategie mające na celu maksymalne wykorzystanie potencjału Zielonej Infrastruktury. W artykule przeanalizowano wybrane aspekty związane z wdrażaniem Zielonej Infrastruktury w miastach, podkreślając jej znaczenie w ograniczaniu skutków zmian klimatycznych i poprawie życia mieszkańców.

Słowa kluczowe: zielona infrastruktura, promieniowanie słoneczne, bilans cieplny promieniowania, obciążenie cieplne

¹ Zakład Ergonomii, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. ORCID: 0000-0002-9218-9781.

² Zakład Ergonomii, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. ORCID: 0000-0002-4998-2274.

³ Zakład Ergonomii, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy. ORCID: 0009-0000-2243-2558.

1. WPROWADZENIE

Zabudowa stale większych obszarów i urbanizacja powierzchni wpływają na bilans cieplny promieniowania w miastach, gdzie w okresie letnim coraz trudniej jest przetrwać czas z panującą wysoką temperaturą. Należy zatem rozważyć rozwiązania umożliwiające obniżenie nadmiernego obciążenia cieplnego mieszkańców terenów miejskich.

Do czynników kształtujących klimat należą: czynniki astronomiczne (decydują o ilości energii docierającej do Ziemi i o temperaturze powietrza), czynniki cyrkulacyjne (przyczyna nasłonecznienia, temperatury, opadów atmosferycznych) oraz czynniki lokalne (decydują o cechach klimatu danego miejsca) [Błażejczyk, Kuchcik 2020]. W przeciwieństwie do czynników astronomicznych i cyrkulacyjnych, czynniki lokalne można kształtować i modyfikować, aby zmienić warunki klimatyczne danego miejsca. Do najważniejszych czynników lokalnych należą [Błażejczyk, Kuchcik 2020]:

- fizyczne właściwości materiałów budowlanych (możliwa ich modyfikacja pod kątem możliwości nagrzewania się/akumulacji ciepła i w następstwie jego wypromieniowania),
- procentowy udział powierzchni sztucznych do seminaturalnych⁴ (im większy udział powierzchni sztucznych, tym większa destabilizacja bilansu cieplnego),
- geometria miasta (powierzchnie pionowe i poziome o różnej orientacji przestrzennej, wpływające na rozkład, wartości i kierunek prędkości przepływu powietrza/wiatru),
- szeroko rozumiana aktywność człowieka (jako wytwarzanie przez człowieka tzw. sztucznego ciepła m.in. w wyniku ruchu samochodowego, działalności przemysłowej czy stosowania urządzeń/systemów grzewczych lub chłodzących).

Na człowieka wpływa głównie promieniowanie słoneczne, którego wartość wynika z bilansu cieplnego promieniowania. W artykule przedstawiono bilans cieplny promieniowania słonecznego i jego wpływ na ludzi mieszkających w miastach (pod kątem obciążenia cieplnego), z uwzględnieniem miejskich wysp ciepła oraz pozytywnego działania tzw. Zielonej Infrastruktury.

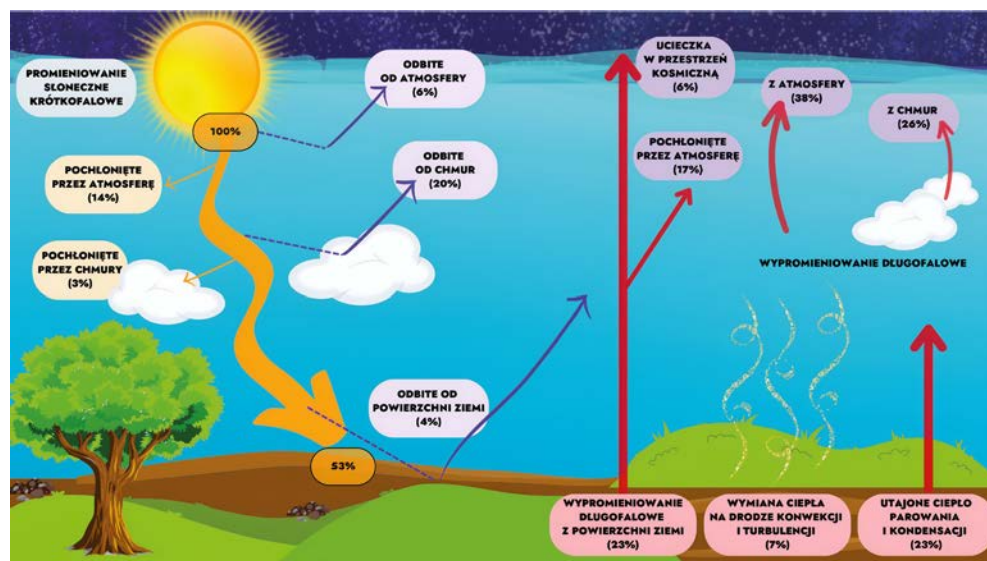
2. BILANS CIEPLNY PROMIENIOWANIA

Bilans promieniowania cieplnego ziemi (inaczej saldo radiacyjne) definiowany jest jako różnica pomiędzy przychodem i rozchodem ciepła na drodze promieniowania.

Jednym z elementów bilansu cieplnego jest promieniowanie słoneczne. Ta energia, zamieniona na ciepło, może być [Kozłowska-Szczęsna 1973] (rys. 1):

⁴ Seminaturalny – półnaturalny, mający cechy naturalne i sztuczne.

- wypromieniowana bezpowrotnie w przestrzeń pozaziemską w postaci promieniowania efektywnego,
- oddana atmosferze drogą wymiany turbulencyjnej, co przyczynia się do podniesienia temperatury atmosfery,
- przenoszona w głąb podłoża (głównie na drodze przewodnictwa), co powoduje wzrost jego temperatury,
- zużyta na parowanie wilgoci z powierzchni czynnej.



Rys. 1. Bilans promieniowania ciepłego

[oprac. M. Młynarczyk, www.canva.com; na podstawie *Wymiana ciepła w atmosferze*]

Bilans promieniowania ciepłego ziemi powierzchni ziemi można zapisać jako:

$$K = L + B + P + E + F \quad (1)$$

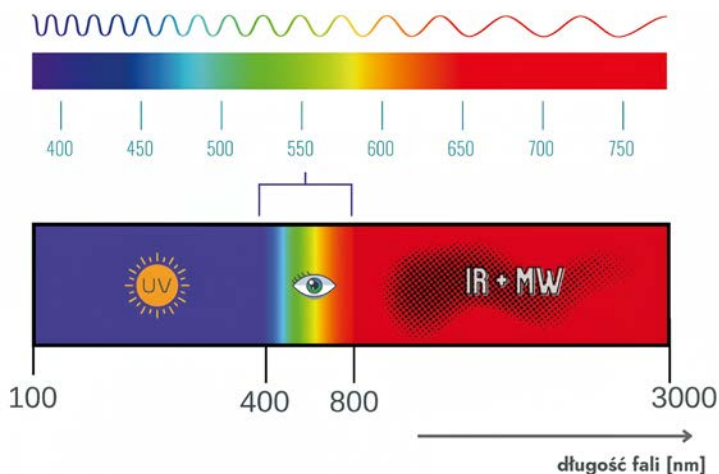
gdzie: K – promieniowanie pochłonięte, L – promieniowanie efektywne, B – wymiana ciepła między powietrzem a podłożem, P – wymiana ciepłą z atmosferą przez unoszenie, E – wymiana ciepła utajonego przy procesach parowania i kondensacji, F – zużycie ciepła na fotosyntezę.

Promieniowanie pochłonięte natomiast stanowi różnicę między dochodzącym do powierzchni Ziemi całkowitym promieniowaniem słonecznym a promieniowaniem odbitym przez tę powierzchnię. Zapisać je można następująco:

$$K = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} \quad (2)$$

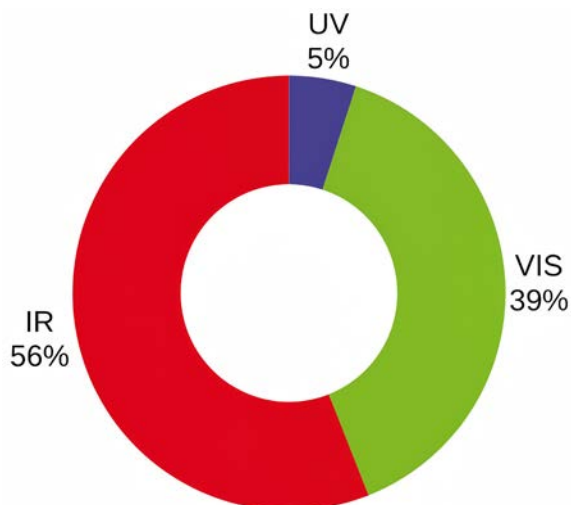
gdzie: $K_{\downarrow}$ – całkowite promieniowanie słoneczne (tzn. suma promieniowania słońca i rozproszonego promieniowania nieba), $K_{\uparrow}$ – promieniowanie odbite.

Promieniowanie pochodzenia słonecznego ($K_{\downarrow}$) zawarte jest w zakresie widmowym między $0,1 \mu\text{m}$ (bliski nadfiolet), a $3 \mu\text{m}$ (promieniowanie krótkofalowe), co zilustrowano na rys. 2.



Rys. 2. Widmo promieniowania słonecznego
[oprac. M. Młynarczyk, www.canva.com]

Największy udział w promieniowaniu docierającym do powierzchni Ziemi mają podczerwień (IR) i promieniowanie widzialne (rys. 3).



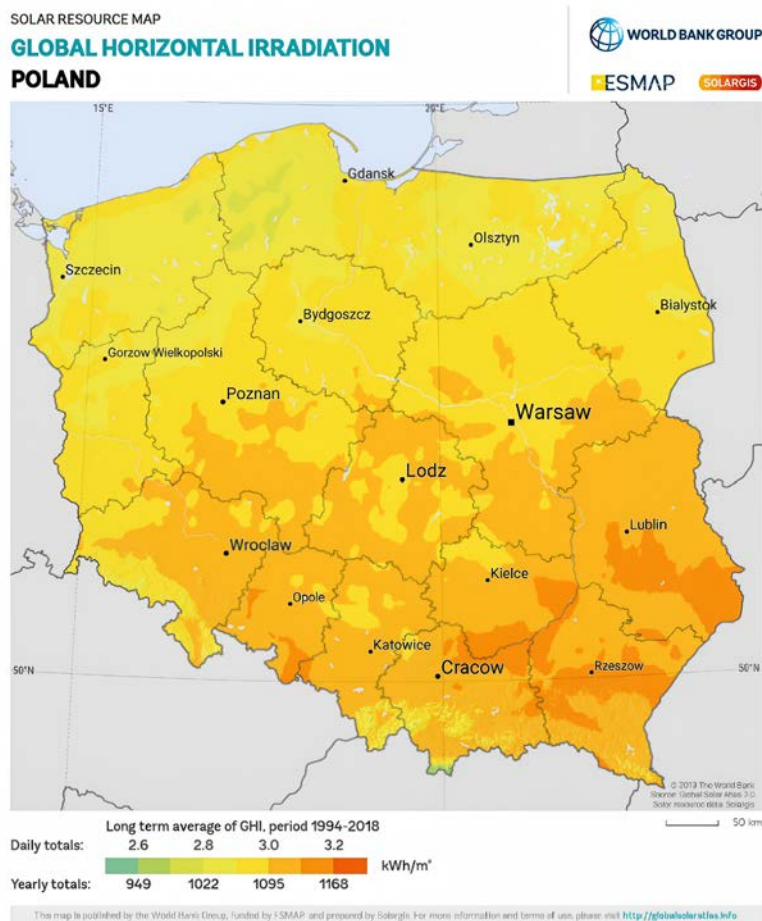
Rys. 3. Procentowy udział poszczególnych widm promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi: UV – promieniowanie ultrafioletowe, VIS – promieniowanie widzialne, IR – promieniowanie podczerwone
[na podstawie UVAg *Słońce* 2025]

Promieniowanie UV dzieli się na promieniowanie: UVA, UVB i UVC. Promieniowania UVC jest prawie całkowicie (a UVB w 90%) pochłaniane przez atmosferę ziemską i praktycznie nie dociera do powierzchni Ziemi. Natomiast promieniowanie UVA dociera w 96-99% [Ebisz, Brokowska 2015]. Promienie UVB wnikają do warstwy rogowej naskórka (niewielka ilość, ok. 10%, dociera do górnej warstwy skóry właściwej). To właśnie promienie UVB są odpowiedzialne za oparzenia słoneczne i rumień skóry. Mają najsilniejsze natężenie w bezchmurne, letnie dni pomiędzy godziną 10 a 15. Natomiast promienie UVA wnikają przez naskórek, docierają do głębokich warstw skóry właściwej, uszkadzając komórki oraz DNA, a także potęgują szkodliwe oddziaływanie promieniowania UVB. Do tego są obecne przez cały rok, nawet w pochmurne dni. Oba rodzaje promieniowania (UVA i UVB) przyczyniają się do przedwczesnego starzenia się skóry, powstawania zmarszczek i przebarwień oraz, co najgroźniejsze, nowotworów skóry [Guyot 1998].

Promieniowanie pochłonięte (K) zależy zatem od: dopływu energii słonecznej do powierzchni Ziemi ($K_{\downarrow}$), a także od zdolności odbicia promieniowania słonecznego od tej powierzchni. Zdolność odbicia promieniowania opisuje współczynnik odbicia α (ang. *reflecting power*), który zależy od rodzaju powierzchni, od której promieniowanie jest odbijane. Zdolność ta jest określana w zakresie od 0 (ciało doskonale czarne, które całkowicie pochłania promieniowanie) do 100 (ciało doskonale białe) [Kozłowska-Szczęśna 1973].

Natężenie promieniowania słonecznego docierającego do miast jest bardzo istotnym czynnikiem, który określa ryzyko wystąpienia obciążenia cieplnego człowieka. Średnie natężenie promieniowania słonecznego docierającego do granicy atmosfery wynosi 1367 W/m^2 i jest nazywane stałą słoneczną. Na skutek pochłaniania i rozpraszania w atmosferze jedynie część tego promieniowania (ok. $1000\text{--}1100 \text{ W/m}^2$) dociera do powierzchni Ziemi [Mrówczyńska, Wawer 2015]. W Polsce najwyższe natężenie promieniowania odnotowano na Kasprowym Wierchu (ok. 1200 W/m^2) i w pasie nadmorskim (ok. 1050 W/m^2), jednak najczęściej wartości promieniowania słonecznego wahają się w zakresie od 600 do 800 W/m^2 [Kozłowska-Szczęśna 1973].

Pora roku również wpływa na natężenie promieniowania słonecznego docierającego do Ziemi. W Polsce w okresie letnim (od maja do września) uzyskiwane jest ok. 77% rocznej energii promieniowania, podczas gdy w okresie zimowym (od października do kwietnia) – jedynie 23% [Kozłowska-Szczęśna 1973]. Potwierdza to tym samym problem występowania obciążenia cieplnego mieszkańców terenów miejskich głównie w okresie letnim. Uwzględniając rozkład natężenia promieniowania słonecznego w Polsce (rys. 4), można stwierdzić, że osoby znajdujące się na południu (południowym wschodzie) Polski są bardziej narażone na promieniowania słoneczne w porównaniu z osobami znajdującymi się np. na Pomorzu.



Rys. 4. Rozkład średniego rocznego i dziennego nasłonecznienia w Polsce
[Solar resource map © 2021 Solargis; World Bank Group 2025]

2. WPŁYW TEMPERATURY NA ORGANIZM CZŁOWIEKA

Utrzymanie stałej temperatury wnętrza ciała (homeostaza) wymaga prawidłowego funkcjonowania układu termoregulacji. Na efektywność mechanizmów wymiany ciepła (głównie na drodze: promieniowania, parowania oraz konwekcji) pomiędzy człowiekiem a otaczającym go środowiskiem, wpływają m.in. warunki mikroklimatu takie jak: temperatura powietrza, temperatura promieniowania, wilgotność względna oraz prędkość przepływu powietrza. Duża wartość wilgotności względnej powietrza zmniejsza efektywność parowania potu z powierzchni skóry, niezwykle ważnego mechanizmu obniżającego temperaturę wewnętrzną (wymiana ciepła na drodze parowania). W przypadku, gdy temperatura powietrza jest niższa

od temperatury skóry, zwiększona prędkość przepływu powietrza może poprawiać efektywność wymiany ciepła na drodze konwekcji wymuszonej [Cramer et al. 2022]. Natomiast ludzka skóra ma zdolność pochłaniania promieniowania, zarówno krótkofalowego (słonecznego), jak i długofalowego (wypromieniowanego przez powierzchnię Ziemi oraz inne obiekty). Promieniowanie wpływa bezpośrednio na temperaturę skóry i stanowi znaczny udział, obok metabolizmu, w składowych bilansu cieplnego jako źródło ciepła (szczególnie w przypadku bezpośredniej ekspozycji na słońce) [Kenny et al. 2008]. Gdy temperatura powietrza przewyższa temperaturę skóry, do organizmu człowieka ciepło dostarczane jest również na drodze konwekcji. Inną możliwą drogą ogrzewania organizmu jest przewodnictwo, do którego dochodzi w przypadku bezpośredniego kontaktu powierzchni skóry z nagrzaną powierzchnią [Parson 2014; Fanger 1974].

Następstwem braku możliwości wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem (nadmierna akumulacja ciepła w organizmie), jest wzrost temperatury wewnętrznej w organizmie. Układ termoregulacji jest wówczas obciążony, gdyż rekompensuje wzrost temperatury wewnętrznej, wynikający nie tylko z funkcjonowania organizmu w danych warunkach, lecz także z dodatkowego źródła ciepła. Wystąpienie obciążenia cieplnego może prowadzić do wyczerpania cieplnego, objawiającego się m.in. poprzez zawroty głowy, nudności, zmniejszone zdolności poznawcze czy odczuwany lęk, jak i do udaru cieplnego będącego bezpośrednim zagrożenia życia [Cramer et al. 2022].

3. MIEJSKIE WYSPY CIEPŁA

Zgodnie z danymi zebranymi przez ONZ w 2018 r. 55% populacji świata mieszkało na terenach zurbanizowanych. W Europie mieszkańcy miast tworzą blisko 75% całej populacji, w Polsce odsetek ten stanowił 60%. Zauważalny jest trend rosnący – ONZ przewiduje, że w 2025 r. aż 68% światowej populacji będzie mieszkańcami miast [United Nations 2018].

Jak wynika z przytoczonych statystyk, istotnie duża grupa ludzi zamieszkuje tereny silnie zmodyfikowane przez człowieka, z czym związane jest rosnące zainteresowanie naukowców nad warunkami panującymi w miastach i ich wpływie na człowieka. Już w XIX w. zaobserwowano występowanie wyższej temperatury powietrza w miastach niż na peryferiach [Fortuniak 2003]. To zjawisko klimatyczne zostało nazwane **Miejską Wyspą Ciepła**, określaną skrótem MWC (ang. *urban heat Island, UHI*) [Douglas et al. 2010]. Występowanie MWC niesie ze sobą negatywne skutki, takie jak zwiększone ryzyko obciążenia cieplnego człowieka, które negatywnie wpływa na zdrowie [Cramer et al. 2022].

W związku z zachodzącymi zmianami klimatycznymi (podniesieniem średniej wartości temperatury powietrza, zwiększonym ryzykiem występowania fal upałów) obecnie intensywnie poszukiwane są strategie umożliwiające złagodzenie

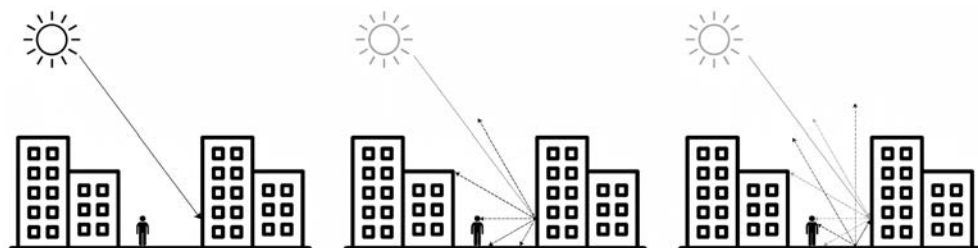
występowania zjawiska MWC oraz jego negatywnego wpływu [Zheng et al. 2021; Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020; Lupa 2020].

3.1. Temperatura w mieście

Szczególnie istotny, z punktu obciążenia cieplnego człowieka znajdującego się w mieście, jest mikroklimat występujący pomiędzy poziomem podłoża, a szczytami budynków i koron drzew. Tak zdefiniowany obszar nazywany jest warstwą koron drzew miejskich (ang. *urban canopy layer*, *UCL*) [Douglas et al. 2010]. Pomimo definiowania MWC poprzez różnice w temperaturze powietrza, na istotnie inne odczucia cieplne człowieka w mieście niż w obszarach niezabudowanych składa się więcej parametrów mikroklimatu charakterystycznie zmienionych na terenach zabudowanych, takich jak: średnia temperatura promieniowania, prędkość i wilgotność względna powietrza.

Bilans cieplny miast nie jest zrównoważony. Jest on dodatni m.in. ze względu na ciepło antropogeniczne, związane z aktywnością człowieka [Douglas et al. 2010]. Ciepło to jest wytwarzane m.in. na skutek transportu samochodowego czy procesów produkcyjnych. Jednym z urządzeń z życia codziennego mającego poprawić komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach są klimatyzatory. Należy jednak zauważyć, iż oddają one również ciepło do środowiska. Pomimo skuteczności tych urządzeń w obniżaniu temperatury wewnątrz pomieszczeń przyczyniają się one do pogorszenia warunków środowiskowych na zewnątrz, prowadząc do coraz większego zapotrzebowania na energię [Wai et al. 2022]. Badania przeprowadzane w Tokio [Ohashi 2007] oraz w Paryżu [De Munck 2012], wykazały wzrost zewnętrznej temperatury powietrza o odpowiednio 1-2°C i 0,5°C spowodowany właśnie użyciem klimatyzatorów. Wpływ klimatyzatorów jest szczególnie odczuwalny, gdy ciepłe powietrze wyprowadzane jest do warstwy korony drzew miejskich (*UCL*).

Struktura zabudowy miast np. poprzez wąskie ulice i wysokie, gęste zabudowanie terenu, powoduje powstawanie miejskich kanionów (ang. *urban canyon*, *UC*). W słoneczny dzień, promieniowanie słoneczne dostaje się do kanionu, a następnie zostaje wielokrotnie odbite m.in. od powierzchni budynków, co zostało schematycznie przedstawione na rys. 5.



Rys. 5. Wpływ zabudowy miejskiej na strukturę strumieni promieniowania (oprac. M. Młynarczyk, na podstawie [Sharifi, Lehmann 2014])

Wielokrotne odbicie powoduje zwiększenie średniej temperatury promieniowania. Skutkuje to dostarczeniem większej ilości ciepła mieszkańcom miast. Zwiększa to również ilość zaabsorbowanej przez powierzchnie miejskie energii i przyczynia do wzrostu jej temperatury [Sharifi, Lehmann 2014]. Taka geometria miasta utrudnia również ochładzanie terenu w nocy, które odbywa się poprzez wypromieniowanie energii zakumulowanej w ciągu dnia [Douglas et al. 2010].

Zabudowania miejskie magazynują więcej energii na sposób ciepła niż tereny wiejskie, pomimo często podobnych właściwości fizycznych materiałów budowlanych i roślinności, takich jak pojemność cieplna czy albedo. Wpływ na różnicę ma w tym przypadku m.in. większy udział powierzchni sztucznych (w większości hydrofobowych) w porównaniu do powierzchni naturalnych (roślinność). Promieniowanie słoneczne padające na sztuczną, hydrofobową, zabudowę nie jest wykorzystywane na odparowywanie wody, a jedynie na zwiększenie temperatury danego ciała [Stache et al. 2021]. Przewodnictwo cieplne materiałów używanych np. do pokrycia dróg jest niewielkie, w wyniku czego ciepło jest w niewielkim stopniu odprowadzane w głąb gleby. W związku z tym obserwowany jest w ciągu słonecznego dnia znaczny wzrost temperatury powierzchni pokrytych m.in. asfaltem czy betonem, w porównaniu do terenów zielonych (rys. 6) [Douglas et al. 2010; Nojewska 2020].



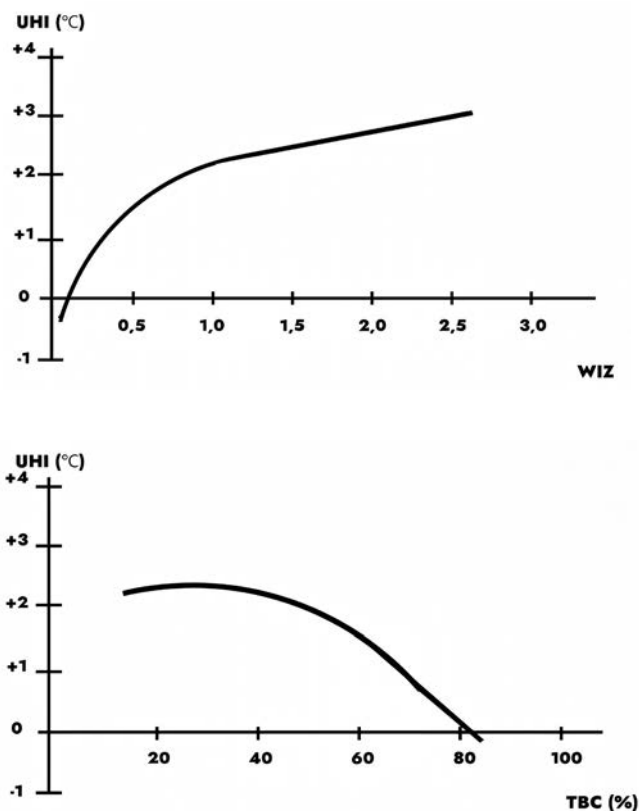
Rys. 6. Porównanie temperatury na ulicy bez drzew i z drzewami [oprac. M. Młynarczyk, www.canva.com, na podstawie Nojewska 2020]

Wpływ na warunki środowiskowe w miastach ma również zanieczyszczenie atmosfery, które przyczynia się do powstania efektu „miejskiej szklarni” (ang. *urban greenhouse*, UG). Obecne w atmosferze zanieczyszczenia odbijają część promieniowania długofalowego z powrotem do warstwy korony drzew miejskich (UCL), przyczyniając się do mniejszej amplitudy temperatury powietrza w nocy [Douglas et al. 2010].

Duża ilość energii zaabsorbowanej w ciągu dnia w mieście (spowodowana dużą pojemnością cieplną, efektem kanionu oraz niewielką ilością wody zmagazynowanej na powierzchniach), w połączeniu z mniej wydajnym procesem wypromieniowywania zgromadzonego ciepła nocą (spowodowanym efektem kanionu oraz zanieczyszczeniami atmosfery), powoduje, że różnice w temperaturze powietrza między MWC a terenami peryferyjnymi są szczególnie widoczne w nocy [Douglas et al. 2010; Azevedo et al. 2016]. W związku z panującą wysoką temperaturą powietrza także w porze nocnej układ termoregulacji ma utrudnione zadanie w utrzymaniu temperatury wewnętrznej na prawidłowym poziomie. Brak odpowiedniej regeneracji może doprowadzić do zaostrzenia odpowiedzi fizjologicznych na wysoką temperaturę.

Intensywność miejskiej wyspy ciepła (UHI) wyznaczana jest m.in. na podstawie różnic temperatury mierzonej w tym samym czasie w dwóch różnych punktach (w mieście i poza miastem/na obszarach peryferyjnych) [Douglas et al. 2010; Kuchcik, Milewski 2016]. Dotychczas przeprowadzone badania na wybranych Polskich miastach wskazały, że intensywność występowania efektu MWC wynosiła 8-9 °C **we Wrocławiu**, 10°C **w Warszawie** i 12°C **w Łodzi** [Fortuniak 2003; Dubicka, Szymanowski 2003; Szymanowski 2004; **Błażejczyk et al. 2014**]. Intensywność ta zależy m.in. od wskaźnika intensywności zabudowy (WIZ). Gdy WIZ wzrasta, rośnie intensywność miejskich wysp ciepła [Błażejczyk, Kuchcik 2020] (rys. 7a). Spośród strategii przeciwdziałających MWC, w zakresie projektowania miast wyróżnia się m.in. stosowanie materiałów o wysokim albedo. Działania te wpływają na zmniejszenie temperatury i akumulację ciepła sztucznych powierzchni. Zastosowanie w/w materiałów na poziomie przebywania mieszkańców miast, jednak naraża pieszych na zwiększoną ilość promieniowania odbitego [Yang et al. 2015; Hardin et al. 2017].

Inną możliwą strategią zmniejszającą tworzenie się MWC jest wprowadzenie do miast Zielonej Infrastruktury (ZI) [Ji 2024]. Zwiększenie odsetka terenów biologicznie czynnych (TBC) zmniejsza intensywność miejskich wysp ciepła [Błażejczyk, Kuchcik 2020] (rys. 7b).



Rys. 7. Intensywność miejskiej wyspy ciepła (UHI) w zależności od: a) wskaźnika intensywności zabudowy (WIZ) oraz b) odsetka terenów biologicznie czynnych (TBC) w Warszawie 9 na podstawie danych z 32 rejestratorów zlokalizowanych w Warszawie i poza jej granicami, badań prowadzonych w latach 2009-2018 (*średnie roczne*), Błażejczyk, Kuchcik 2020]

Jednak aby jak najbardziej efektywnie zmniejszyć obciążenie cieplne człowieka, należy poznać mechanizmy według których roślinność wpływa pozytywnie na warunki otaczającego środowiska i wykorzystać je w planowaniu miejskim.

4. ZIELONA INFRASTRUKTURA

Wspomniane struktury z betonu, stali, szkła i innych materiałów budowlanych nazywane są szarą infrastrukturą [Szczepanowska, Sitarski 2015]. Zgodnie z definicją *Słownika języka polskiego PWN* „infrastrukturą” określamy urządzenia i instytucje usługowe niezbędne do należytego funkcjonowania społeczeństwa i produkcyjnych obszarów gospodarki. Wielokrotnie wykazano, że obecność roślinności zapewnia szeroką gamę usług ekosystemowych, tym samym spełniając powyższą

definicję [Szczepanowska, Sitarski 2015]. W wyniku modyfikacji obszarów miejskich przez człowieka w sposób niesprzyjający roślinności, roślinność miejska często wymaga aktywnej pielęgnacji (np. podlewania), ale także ponownego wprowadzania jej do obszarów zabudowanych w postaci specjalnie zaprojektowanych elementów przestrzeni. To właśnie strategicznie zaprojektowaną sieć naturalnych oraz seminaturalnych obszarów roślinności nazywamy Zieloną Infrastrukturą [Szczepanowska, Sitarski 2015].

Do Zielonej Infrastruktury zalicza się m.in. drzewa przydrożne, skwery i place zieleni, parki, lasy (w obrębie lub bezpośrednio wokół zabudowań) a także specjalnie zaaranżowane elementy szarej infrastruktury w postaci zielonych ścian i dachów [Szczepanowska, Sitarski 2015; Cao et al. 2019; Zölch et al. 2018; Bing et al. 2021]. Do charakterystyki roślinności często używany jest współczynnik pokrycia liściowego (ang. *leaf area index*, LAI), który definiowany jest jako jedna druga całkowitego obszaru zielonych liści, przypadającego na obszar powierzchni podłoża [Fang et al. 2019]. Można spotkać się również z analizami prowadzonymi na podstawie współczynnika ułamka widocznego nieba (ang. *sky view factor*, SVF) [Dirksen et al. 2019]. Obie te wartości wykazują korelację z intensywnością wpływu Zielonej Infrastruktury na wybrane aspekty.

4.1. Mechanizmy działania

4.1.1. Transpiracja

Aktywny mechanizm chłodzenia, który jest najistotniejszy w przypadku Zielonej Infrastruktury to transpiracja – woda pobrana przez roślinę z gleby transportowana jest do nadziemnych części roślin, gdzie odparowuje przez aparaty szparkowe i przetchlinki. Często proces rozpatrywany jest wspólnie z odparowywaniem wody z gruntu jako ewapotranspiracja. Wydajność transpiracji zależy od czynników charakterystycznych dla danego gatunku, takich jak rodzaj przeprowadzanej przez rośliny fotosyntezy, współczynnik pokrycia liściowego (*LAI*), stanu zdrowia rośliny. Rośliny rodzime dla klimatu umiarkowanego przeprowadzają zazwyczaj fotosyntezę typu C3 lub C4, w trakcie której proces transpiracji zachodzi w trakcie dnia, skutkując obniżeniem temperatury powietrza w mieście w dzień. Gatunki roślin, które zaadaptowały się do wyjątkowo trudnych warunków środowiska (susze i silne promieniowanie słoneczne) i przeprowadzają fotosyntezę typu CAM proces transpiracji przeprowadzają w nocy, prowadząc do obniżenia temperatury powietrza nocą [Cao et al. 2019].

Tempo transpiracji w dużej mierze zależy od zawartości wody w glebie. Gdy roślina nie ma dostępu do wystarczających zasobów wody i doświadcza stresu cieplnego (w trakcie fal upałów) zamyka aparaty szparkowe redukując tempo transpiracji. Badania przeprowadzane z wykorzystaniem Eukaliptusów w Australii wykazały, że rośliny przeprowadzały transpirację nawet w trakcie symulacji fali upałów (4 słoneczne dni o temperaturze powietrza sięgającej 43-44°C, poprzedzone miesiącem

niepodlewania) i skutecznie obniżały temperaturę powietrza o średnio 2,8°C, korzystając przy tym z zasobów wody w glebie na głębokości 30-150 cm [Drake et al. 2018]. Z tego powodu niezwykle istotne jest projektowanie Zielonej Infrastruktury tak, aby dbać o zasoby wody (m.in. poprzez zapewnienie wokół drzew jak największej przestrzeni niezabetonowanej, wprowadzanie strategii poprawiających retencję wody, wykorzystywanie błękitnej infrastruktury [Budzik et al. 2024]) oraz, gdy jest to niemożliwe lub niewystarczające, dodatkowe nawadnianie roślinności [Winbourne et al. 2020].

4.1.2. Blokowanie oddziaływania promieniowania słonecznego na człowieka

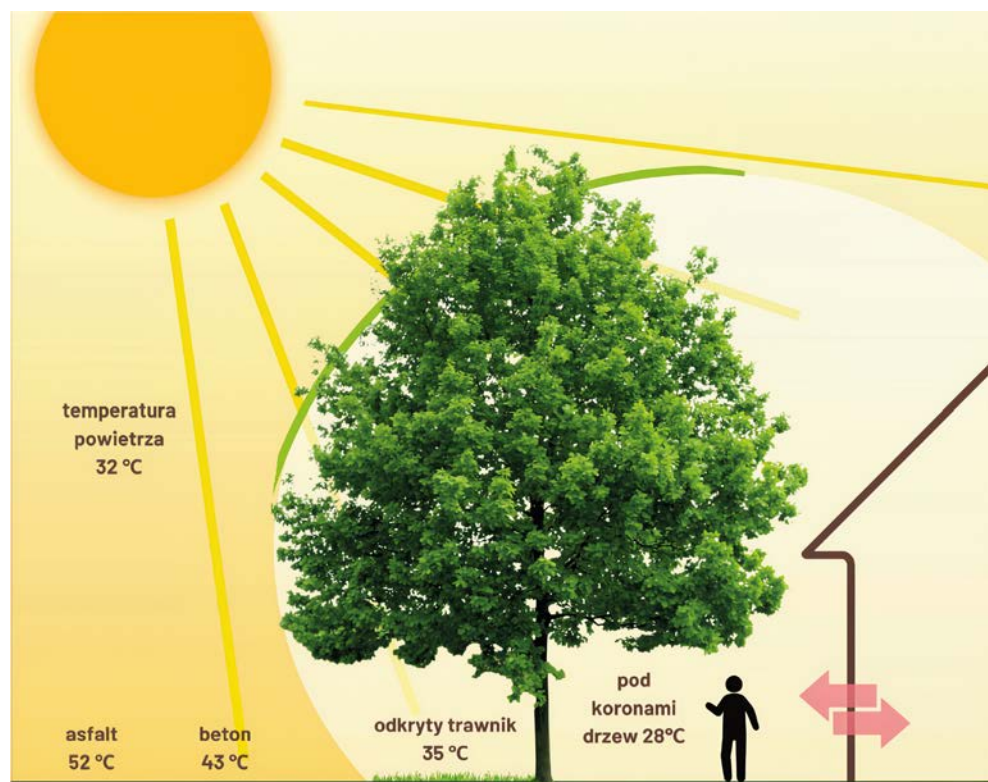
Drugim istotnym czynnikiem zmniejszającym obciążenie cieplne człowieka jest efekt zacienienia. Drzewa mogą zredukować promieniowanie słoneczne nawet o 90%, skutecznie zmniejszając jego bezpośrednie oddziaływanie na człowieka oraz na znajdujące się pod drzewem obiekty i podłoże [Szczepanowska, Sitarski 2015] (rys. 6). Im większy współczynnik *LAI*, tym silniejszy jest obserwowany efekt zacienienia, czego dowodzą m.in. badania prowadzone w Niemczech przez Rahmana M. i innych. *LAI* badanych drzew lipy drobnolistnej był średnio o 35% wyższy niż robinii akacjowej. Temperatura asfaltu pod drzewami lipy była niższa aż o 23°C w porównaniu do asfaltu na pełnym słońcu, podczas gdy dla Robinii uzyskano spadek jedynie o 13°C [Rahman et al. 2020]. W trakcie badań prowadzonych w USA przez K.R. Coltera i innych nad sześcioma gatunkami drzew zauważono, że najsilniej promieniowanie słoneczne blokują gatunki o gęstym ulistnieniu i szerokich koronach, związanych z niższym *SVF* [Colter et al. 2019]. Zależność ta jest również związana z rozmieszczeniem drzew – najsilniejsze zacienienie uzyskuje się dla drzew posadzonych gęsto, jednak w odległościach niepowodujących nakładania się ich koron [Zölch et al. 2018].

Zacienienie może być zapewniane także przez dodatkowe konstrukcje takie jak: wiaty, zadaszenia czy parasole, jednak mają mniej korzystny wpływ na odczucia cieplne człowieka. Dowodzą tego m.in. badania prowadzone w Arizonie (USA), w których pomimo przesłonięcia większego obszaru nieba przez wiatę (mniejszego *SVF*), wskaźnik PET (ang. *physiological equivalent temperature*, PET) był do 1,8°C niższy pod drzewami. W tym samym badaniu wykazano obniżenie PET w cieniu drzew o nawet 12,6°C w porównaniu do pełnego słońca. Różnice w średniej temperaturze promieniowania były jeszcze większe – 60,3°C w pełnym słońcu, 40,4°C dla wiaty oraz 36,8°C dla Jesionu (spadek o 23,5°C dla drzew) [Colter et al. 2019].

4.2. Przykłady pozytywnego działania Zielonej Infrastruktury

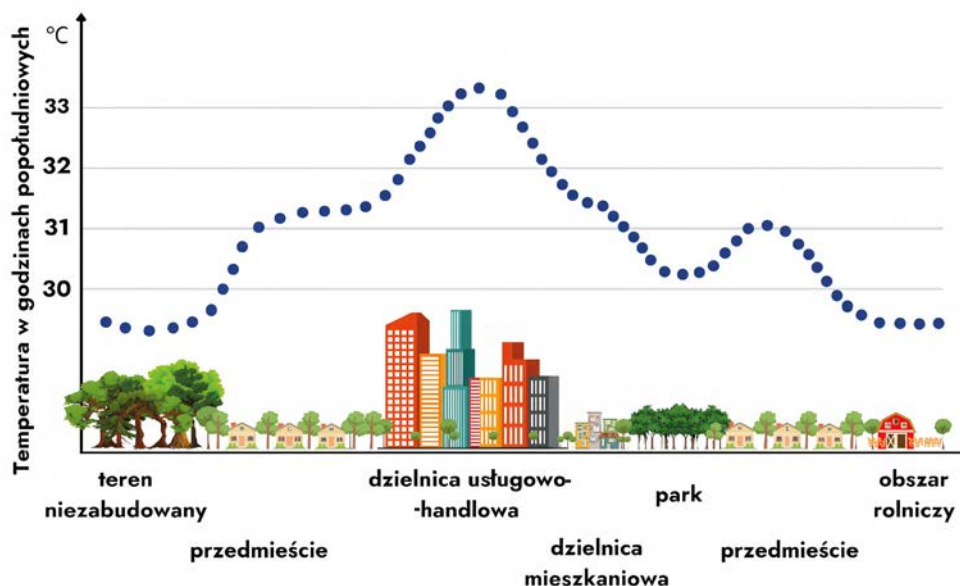
Szczepanowska i Sitarski wykazali, że w okresie letnim, gdy temperatura powietrza wyniosła 32°C, nawierzchnia asfaltowa nagrzała się do 52°C, betonowy chodnik – do 43°C, a odkryty trawnik – do 35°C. Z kolei pod koronami drzew,

gdy sąsiadująca zielen była dobrze nawodniona, temperatura powietrza wyniosła jedynie 28°C (rys. 8) [Szczepanowska, Sitarski 2015]. Podobną zależność opisują badania prowadzone przez Armsona i innych w Manchesterze, gdzie uzyskano o 12-19°C niższą temperaturę powierzchni betonowego podłoża w cieniu drzew niż na pełnym słońcu. W tym samym badaniu zaobserwowano o 5-7°C niższe temperatury termometru kulistego [Armson et al. 2012].



Rys. 8. Różnice w temperaturze w zależności od ocienienia
(oprac. M. Młynarczyk, www.canva.com, na podstawie [Szczepanowska, Sitarski 2015])

Szczepanowska i Sitarski [2015] wykazali, że średnia roczna temperatura powietrza w mieście może się obniżyć o 1,4°C, gdy pokrycie koronami drzew wzrośnie o 10%. Ponadto zwarte tereny zieleni, lasy czy parki cechują się średnio o 2-4°C niższą temperaturą niż sztuczna zabudowa, która je otacza [Błażejczyk, Kuchcik 2020; Szczepanowska, Sitarski 2015; Gao et al. 2022; Makhelouf 2009] (rys. 9).



Rys. 9. Przykładowy rozkład temperatury powietrza nad miastem [oprac. M. Młynarczyk, www.canva.com, na podstawie Szczepanowska, Sitarski 2015]

W trakcie analizy 384 parków w Stanach Zjednoczonych, pod kątem wpływu roślinności na obniżenie temperatury powietrza, zakres ich efektu chłodzącego określono na poziomie ok. 3-7°C. Ze względu na występowanie efektu bryzy (ang. *park-breeze effect*) odpowiednio zaprojektowane parki skutecznie ochładzają temperaturę powietrza do kilkuset metrów dalej (zakres wyznaczony w USA to 116-221 m) [Gao et al. 2022]. Zaobserwowano, iż czym większy jest obszar parku, tym silniejszy jest obserwowany efekt chłodzenia terenów sąsiadujących, co wynika m.in. z większego gradientu temperatury (zależność ta nie jest jednak liniowa) [Gao et al. 2022]. W celu zwiększenia zakresu, w którym odczuwalny jest efekt chłodzący, należy zapewnić obecność tak zwanych korytarzy wietrznych (ang. *wind corridors*), które umożliwiają wydajny przepływ powietrza pomiędzy obszarami najbardziej dotkniętymi MWC, a chłodniejszymi parkami i lasami [Bing et al. 2021]. Zapewnienie korytarzy wietrznych na placach zieleni w Monachium (poprzez sadzenie drzew w rzędach oddzielonych pasami trawy, równoległe do głównego kierunku wiatru) przyczyniło się do większego spadku temperatury powietrza nocą [Zölch et al. 2018]. Większa prędkość powietrza wpływa również bezpośrednio na odczucia cieplne człowieka i w trakcie fal upałów może poprawić komfort termiczny mieszkańców miast.

W przypadku gęstych zabudowań miejskich szczególnie interesujące jest wykorzystanie zielonych dachów oraz ścian. Potwierdzeniem pozytywnego wpływu zielonych dachów są m.in. wyniki badań prowadzonych w Nowym Jorku,

gdzie temperatura powierzchni standardowego dachu była o 40°C wyższa w stosunku do tzw. dachu zielonego [Rostański et al. 2021], czy w Singapurze, gdzie temperatura powietrza na wysokości 30 cm od zielonego dachu była o 4,2°C niższa od dachu konwencjonalnego [Wong et al. 2002]. Dodatkowo, średnia temperatura promieniowania mierzona na wysokości 1 m od tzw. zielonego dachu w nocy była aż o 4,5°C niższa, wskazując na skuteczność tego rozwiązania w zwalczaniu nocnego efektu MWC [Wong et al. 2002]. W przypadku zielonych ścian, badania prowadzone w Singapurze wykazały obniżenie temperatury powierzchni ścian budynków do 11,5°C oraz obniżenie temperatury powietrza o 3,3°C w odległości 15 cm [Wong 2009]. Symulacje komputerowe modelujące warunki w mieście Kanton (Chiny) wykazały, że przy pokryciu ponad 50% powierzchni miasta za pomocą zielonych dachów oraz ścian możliwe jest obniżenie temperatury PET, mierzonej na poziomie pieszego (1,5 m nad ziemią), o 2°C [Lin, Zhang 2024].

Zarówno zielone dachy, jak i zielone ściany, pełnią funkcję dodatkowej izolacji budynku, skutecznie przyczyniając się do obniżenia zapotrzebowania na energię wykorzystywaną na klimatyzację. Potwierdzają to m.in. wyniki symulacji komputerowych w Indiach, zgodnie z którymi przy zastosowaniu tych elementów ZI możliwe jest zmniejszenie zapotrzebowania na energię w budynku aż o 10% [Pragati et al. 2023].

5. DYSKUSJA

Ze względu na zachodzące zmiany klimatyczne (podniesienie się średniej wartości temperatury powietrza) należy rozważyć każdą możliwość poprawy komfortu życia na terenach zurbanizowanych. Wysoka temperatura w miastach będzie obserwowana coraz częściej [Zheng et al. 2021; Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020], a fale upałów wpływające negatywnie m.in. na ludzkie zdrowie, zwiększają także zapotrzebowanie na energię.

Na podstawie wyników badań dostępnych w literaturze naukowej można stwierdzić, że udowodniono wpływ Zielonej Infrastruktury na zmniejszenie efektu MWC [Lupa 2020]. Odpowiednio zaprojektowane tereny zieleni w mieście mogą zmniejszać obciążenie cieplne ich mieszkańców. Wysoka zieleń (parki i lasy miejskie) zapewnia cień, chroni przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym (oraz zapewnia aktywne chłodzenie poprzez transpirację) i tym samym zmniejsza nagrzewanie powierzchni terenu [Szczepanowska, Sitariski 2015; Lupa 2020]. W ten sposób zmniejsza się transfer ciepła poprzez wypromieniowanie ciepła zakumulowanego np. w materiałach budowlanych. Rola zieleni, jako czynnika łagodzącego temperaturę powietrza i obciążenie cieplne, jest zauważalna zwłaszcza podczas gorącej i wilgotnej pogody ze słabym wiatrem [Błażejczyk, Kuchcik 2020]. Pozostawianie w mieście jak największej ilości niezabetonowanych

powierzchni przyniesie wiele korzyści. Zielona Infrastruktura, w tym drzewa, parki i ogrody, pomaga w łagodzeniu obciążenia cieplnego, poprawiając komfort cieplny i obniżając ryzyko wystąpienia negatywnych skutków wysokiej temperatury na organizm człowieka.

6. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przeanalizowano wybrane aspekty, które warto rozpatrzyć, wprowadzając do miast Zieloną Infrastrukturę w celu zmniejszenia ryzyka występowania obciążenia cieplnego u mieszkańców miast. Zalecane jest, aby zapewniać obecność korytarzy wietrznych poprzez identyfikację głównego kierunku wiatru występującego na danej przestrzeni (np. placach zieleni, skwerach) i sadzenie drzew równoległe do tego kierunku, w rzędach oddzielonych pasami trawy. Korytarze wietrzne powinny umożliwiać też wydajny przepływ powietrza pomiędzy parkami i lasami a najgorętszymi obszarami miasta. W przypadku zabudowań bardzo gęstych, gdzie nie jest możliwe wprowadzenie satysfakcjonującej ilości drzew czy parków, szczególną uwagę należy zwrócić na rozwiązania takie jak zielone dachy i ściany.

Dobór odpowiednich gatunków roślinności ma znaczny wpływ na skuteczność przeciwdziałania MWC. Należy pamiętać o tym, iż w zależności od gatunku dana roślina może przeprowadzać transpirację w dzień lub w nocy, przyczyniając się do obniżania temperatury powietrza w innych porach. Wydajność transpiracji różni się również między gatunkami. W przypadku rozważania zdolności drzew do zmniejszania oddziaływania promieniowania słonecznego na człowieka oraz powierzchni miejskie należy zwrócić uwagę m.in. na docelową wysokość drzew, kształt koron (rozłożyste korony blokują więcej promieniowania niż korony wąskie) oraz gęstości ulistnienia (*LAI*).

Dostęp roślinności do wody w glebie jest niezwykle ważny w tym, aby ZI spełniała swoją rolę. Z tego powodu istotne jest zapewnienie działań takich jak: pozostawienie jak największych obszarów wokół drzew nie pokrytych chodnikiem/betonem/asfaltem, wspieranie retencji wody w mieście, łączenie Zielonej Infrastruktury z Błękitną Infrastrukturą (zbiornikami wody) oraz odpowiednie nawadnianie roślinności.

LITERATURA

Armson D. et al., 2012, *The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area*, „Urban Forestry & Urban Greening”, vol. 11(3), s. 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>.

- Azevedo J. et al., 2016, *Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: a comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations*, „Remote Sensing”, vol. 8(2), 153. <https://doi.org/10.3390/rs8020153>.
- Bing D. et al., 2021, *Cooling the city with “natural wind”: Construction strategy of Urban Ventilation Corridors in China*, „IOP Conference Series Earth and Environmental Science”, vol. 657(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012009>.
- Błażejczyk K. et al., 2014, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie: uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*, Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, Wydawnictwo Akademickie SEDNO, Warszawa.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., 2020, *Znaczenie zieleni dla kształtowania klimatu miasta, w: Oznaczeniu zieleni w miastach*. Instytut Rozwoju Miast i Regionów, Warszawa–Kraków.
- Budzik G. et al., 2024, *Understanding Urban Cooling of Blue–Green Infrastructure: A review of spatial data and Sustainable Planning Optimization Methods for mitigating urban heat islands*, „Sustainability”, vol. 17(1), 142. <https://doi.org/10.3390/su17010142>.
- Cao J. et al., 2019, *Green roof cooling contributed by plant species with different photosynthetic strategies*, „Energy and Buildings”, vol. 195, s. 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.046>.
- Colter K.R. et al., 2019, *Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix, Arizona, USA*, „Urban Forestry & Urban Greening” Aug 1, 44, 126429. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126429>.
- Cramer M.N. et al., 2022, *Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury*, „Physiological Reviews”, 102, 4, 1907-1989.
- De Munck C., et al., 2012, *How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?* „International Journal of Climatology”, 33, 1, 210-227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>.
- Dirksen M. et al., 2019, *Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies*, „Urban Climate”, 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>.
- Douglas I. et al., 2010, *Urban heat islands*. In: *The Routledge Handbook of Urban Ecology*, „Routledge”, 120-130.
- Drake J.E. et al., 2018, *Trees tolerate an extreme heatwave via sustained transpirational cooling and increased leaf thermal tolerance*, „Global Change Biology”, 24, 6, 2390–2402. <https://doi.org/10.1111/gcb.14037>.
- Dubicka M., Szymanowski M., 2003, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu – struktura przestrzenna i czasowa*. W: *Postępy w badaniach klimatycznych i bioklimatycznych*. Prace Geograficzne IGiPZ PAN 188, 145-165.
- Ebisz M., Brokowska M., 2015, *Szkodliwe oddziaływanie promieniowania ultrafioletowego na skórę człowieka*, „Hygeia Public Health”, 50, 3, 467-473.
- Fang, H., et al., 2019, *An overview of Global Leaf Area Index (LAI): methods, products, validation, and applications*, „Reviews of Geophysics”, 57, 3, 739–799. <https://doi.org/10.1029/2018rg000608>.
- Fanger P.O., 1974, *Komfort Ciepłny*, Arkady, Warszawa.

- Fortuniak K., 2003, *Miejska Wyspa Ciepła – podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Gao Z. et al., 2022, *Toward park design optimization to mitigate the urban heat Island: Assessment of the cooling effect in five U.S. cities*, „Sustainable Cities and Society”, 81, 103870. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103870>.
- Guyot, G. (1998). *Physics of the environment and climate*. Edited by J. Mason. John Wiley & Sons Ltd in association with Praxis Publishing Ltd.
- Hardin AW., Vanos JK., 2017, *The influence of surface type on the absorbed radiation by a human under hot, dry conditions*, „International Journal of Biometeorology”, 62, 1, 43–56. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1357-6>.
- Ji L. et al., 2024, *A state-of-the-art review of studies on urban green infrastructure for thermal resilient communities*, „Building and Environment”, 257, 111524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111524>.
- Kenny NA., et al., 2008, *Estimating the radiation absorbed by a human*, „International Journal of Biometeorology”, 52, 6, s. 491-503.
- Kozłowska-Szczęsna T., 1973, *Promieniowanie pochłonięte na obszarze Polski*. Prace Geograficzne nr 99, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław.
- Kuchcik M., Milewski P., 2016, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones*, „Acta Geographica Lodziensia”, 104, 21–33.
- Lin C., Zhang S., 2024, *Impact of green roofs and walls on the thermal environment of pedestrian heights in urban villages*, „Buildings”, vol. 14, 12, 4063. <https://doi.org/10.3390/buildings14124063>.
- Lupa P., 2020, *Wpływ zielonej infrastruktury na warunki termiczne miast północnej Wielkopolski oraz jej miejsce w lokalnej polityce klimatycznej*, „Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna”, nr 52, s. 219-233. Doi: 10.14746/rpr.2020.52.13.
- Makhelouf A., 2009, *The effect of green spaces on urban climate and pollution*, „Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering”, 6, 1, s. 35-40.
- Mrówczyńska M., Wawer M., 2015, *Próba budowy katastru słonecznego na obszarze miasta Zielona Góra*, „Czasopismo Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury”, nr XXXII, 62, 4/15, s. 321-333.
- Nojewska M., 2020, *Drzewa w mieście są naprawdę niezbędne. Dzięki nim różnica jest ogromna – Nauka jest niesamowita*. <https://nauka.rocks/drzewa-w-miescie/> (dostęp: 19.03.2025).
- Ohashi Y., et al., 2007, *Influence of Air-Conditioning Waste Heat on Air Temperature in Tokyo during Summer: Numerical Experiments Using an Urban Canopy Model Coupled with a Building Energy Model*, „Journal of Applied Meteorology and Climatology”, vol. 46, 1, s. 66-81. <https://doi.org/10.1175/jam2441.1>.
- Parsons K., (2014, *Human thermal environments*, CRC Press eBooks.
- Perkins-Kirkpatrick S.E., Lewis S.C., 2020, *Increasing trends in regional heatwaves*, „Nature Communications”, vol. 11, 3357. doi: 10.1038/s41467-020-16970-7.
- Pragati S, et al., 2023, *Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate*, „Sustainability”, vol. 15, 3, <https://doi.org/10.3390/su15032006>.

- Rahman MA. et al., 2020, *Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites*, „Agricultural and Forest Meteorology”, 287, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107947>.
- Rostański A. et al., 2021, *Miasto Zielone – Miasto Zdrowe*. Wyd. Stowarzyszenie Przyjaciół i Sympatyków Ekologii „Zielona Ziemia”.
- Sharifi E., Lehmann S., 2014, *Comparative analysis of Surface urban heat island effect in Central Sydney*, „Journal of Sustainable Development”, vol. 7, 3. <https://doi.org/10.5539/jsd.v7n3p23>.
- Stache E. et al., 2021, *Comparative analysis in thermal behaviour of common urban building materials and vegetation and consequences for urban heat island effect*, „Building and Environment”, vol. 213, 108489. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108489>.
- Szczepanowska H.B., Sitarski M., 2015, *Drzewa. Zielony kapitał miast. Jak zwiększyć efektywność pracy drzew?* Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa, Warszawa.
- Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*, „Acta Universitatis Wratislaviensis”, 2690, Studia Geograficzne 77.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2018, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/downloads> (dostęp: 19.03.2025).
- UVAg słońce, 2025, *Promieniowanie słoneczne*. <https://www.uwagaslonce.pl/pl/promieniowanie-uv/> (dostęp: 19.03.2025).
- Wai CY., et al., 2022, *A systematic review on the existing research, practices, and prospects regarding urban Green Infrastructure for Thermal Comfort in a High-Density Urban context*, „Water”, 14, 16, 2496. <https://doi.org/10.3390/w14162496>.
- Winbourne JB., et al., 2020, *Tree transpiration and urban Temperatures: current understanding, implications, and future research directions*, „BioScience”, 70, 7, s. 576-588. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa055>.
- Wong NH., et al., 2002, *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment*, „Building and Environment”, 38, 2, s. 261-270. [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(02)00066-5).
- Wong NH., et al., 2009, *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*, „Building and Environment”, 45, 3, 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>.
- World Bank Group, 2025, *Global Solar Atlas: Poland*. <https://globalsolaratlas.info/download/poland> (dostęp: 19.03.2025).
- Yang J. et al., 2015, *Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island?* „Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 47, s. 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>.
- Zheng Z. et al., 2021, *Large model structural uncertainty in global projections of urban heat waves*, „Nature Communications”, 12, 3736. doi: 10.1038/s41467-021-24113-9.
- Zintegrowana Platforma Edukacyjna Ministerstwa Edukacji Narodowej. (2025). *Wymiana ciepła w atmosferze*. <https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/D1DJZKNC3> (dostęp: 19.03.2025).
- Zölch T et al., 2018, *Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort*, „Building and Environment”, 149, s. 640-654. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.051>.

GREEN INFRASTRUCTURE AND REDUCING THE EFFECTS OF HIGH TEMPERATURE IN THE CITY

Summary

Due to ongoing climate change, hot waves (heat waves) are occurring more frequently, negatively affecting the human body. Urban residents experience these effects particularly severely, as built-up areas contribute to the formation of so-called urban heat islands. This phenomenon primarily results from the development of green spaces and the reduction of seminatural surfaces, leading to intensified city heating and hindering natural cooling processes. This article discusses the heat balance of solar radiation and the impact of elevated temperatures on the human body. It also presents the mechanisms behind urban heat island formation and strategies for mitigating their effects. One of the key solutions is the implementation of Green Infrastructure, which includes trees, parks, gardens, and green roofs. Such measures help lower air temperatures, improve thermal comfort for residents, and minimize the adverse effects of prolonged heatwaves. The role of greenery in cities is particularly important during periods of high temperature and humidity. Vegetation acts as a natural climate regulator by providing shade, increasing humidity, and reducing surface heating. Therefore, it is crucial to incorporate strategies into urban planning that maximize the potential of Green Infrastructure. This article examines selected aspects of Green Infrastructure implementation in cities, highlighting its significance in mitigating the effects of climate change and enhancing the life for residents.

Keywords: green infrastructure, solar radiation, radiation heat balance, heat load

