



Niepewność pomiarów średniej temperatury promieniowania za pomocą termometrów kulistych

Uncertainty of mean radiant-temperature measurements using globe thermometers

Katarzyna Lindner-Cendrowska  Jarosław Baranowski 

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

kclindner@twarda.pan.pl (autor korespondencyjny) • j.bar@twarda.pan.pl

Zarys treści. W analizie bilansu cieplnego człowieka największym problemem jest określenie ilości promieniowania pochłoniętego przez człowieka. Dlatego też w badaniach komfortu cieplnego stosuje się uproszczenia i jako miarę termicznego wymiaru pola promieniowania wokół człowieka stosuje się koncepcję średniej temperatury promieniowania – Mrt (*Mean radiant temperature*), która traktuje łącznie wszystkie strumienie promieniowania długo- i krótkofalowego, na które ekspozycja jest ludzkie ciało. Na terenach zurbanizowanych do określenia wartości Mrt sugeruje się prowadzenie bezpośrednich pomiarów tego parametru. Najczęściej wykorzystuje się do tego termometr kulisty – z uwagi na prostotę jego konstrukcji, niski koszt oraz łatwość użytkowania. Celem pracy jest zweryfikowanie przydatności termometrów kulistych do pomiarów Mrt, określenie zależności ich wskazań od wartości parametrów meteorologicznych oraz ustalenie wpływ sposobu oszacowania Mrt na wartości wskaźnika UTCI (*Universal Thermal Climate Index*). Do wyznaczenia Mrt użyto trzech termometrów kulistych: jeden standardowy 15-centymetrowy (SGT) oraz dwa 4-centymetrowe akrylowe (AGT) własnej konstrukcji. Badania wykonano na terenach otwartych oraz w cieniu drzew. Typ zastosowanego instrumentu pomiarowego istotnie wpływa na wielkość Mrt w warunkach silnego osłonecznienia – najwyższe wartości Mrt uzyskano za pomocą SGT, a najniższe przy pomocy szarego AGT. W cieniu wszystkie typy przyrządów wskazywały zbliżone do siebie wartości. Błąd oszacowania UTCI w efekcie niepewności wyznaczonych wartości Mrt za pomocą różnych termometrów kulistych, odpowiada jednej kategorii stresu termicznego w warunkach radiacyjnych, natomiast w cieniu jest zaniedbywalny.

Słowa kluczowe: termometr kulisty, średnia temperatura promieniowania, UTCI.

Keywords: *globe thermometer, mean radiant temperature, UTCI.*

Wstęp

Na organizm człowieka przebywającego na otwartej przestrzeni oddziałuje zespół bodźców atmosferycznych, które wywołują odpowiedź układu termoregulacyjnego, dążącego do zachowania równowagi cieplnej organizmu (Błażejczyk i Kunert, 2011). W analizie bilansu cieplnego człowieka największym problemem jest poprawne oszacowanie wielkości poszczególnych składowych salda promieniowania. Szczególnie trudne jest dokładne określenie ilości energii pochłoniętej przez człowieka, co wynika ze skomplikowanej budowy ciała ludzkiego oraz złożonych interakcji między poszczególnymi strumieniami promieniowania krótko- i długofalowego (Kenny et al., 2008). Co więcej, w środowisku zewnętrznym

analiza pola promieniowania jest dodatkowo utrudniona przez dynamicznie zmieniające się warunki solarne oraz obecność wielu zróżnicowanych powierzchni, które mogą w różny sposób absorbować, emitować lub odbijać promieniowanie słoneczne (Banfi et al., 2022). Dlatego też w badaniach komfortu cieplnego stosuje się pewne uproszczenia i jako miarę termicznego wymiaru pola promieniowania wokół człowieka, najczęściej wykorzystuje się koncepcję średniej temperatury promieniowania (Mrt – *Mean radiant temperature*). Zgodnie z definicją, Mrt odpowiada jednolitej temperaturze hipotetycznej, idealnie czarnej sfery otaczającej człowieka, która powoduje równoważne obciążenie radiacyjne, jak wszystkie połączone źródła emitujące promieniowanie w rzeczywistym otoczeniu człowieka (Fanger, 1970; Verein Deutscher Ingenieure, 2008). Mrt traktuje łącznie wszystkie strumienie promieniowania długo- i krótkofalowego (bezpośrednie i odbite), na które narażone jest ludzkie ciało, a efekt ich oddziaływania wyraża w stopniach Celsjusza (Thorsson et al., 2007). W związku z tym, że w słoneczne i ciepłe dni uważana jest za główny czynnik kształtujący odczucia cieplne ludzi (Guo et al., 2020; Johansson et al., 2014), Mrt stała się podstawą wielu współcześnie stosowanych wskaźników biometeorologicznych (np. PET – *Physiological Equivalent Temperature* czy UTCI – *Universal Thermal Climate Index*).

Obecnie jej wartości wyznacza się najczęściej za pomocą narzędzi do modelowania mikroklimatu i analizy składowych bilansu cieplnego człowieka lub poprzez bezpośrednie pomiary instrumentalne (Johansson et al., 2014). W polskich badaniach biometeorologicznych dotychczas Mrt najczęściej szacowano wykorzystując model MENEX_2005 (Błażejczyk i Kunert, 2011). Wartości średniej temperatury promieniowania wyliczane są w tym modelu na podstawie bilansu promieniowania w zakresie długofalowym oraz przybliżonej wartości pochłoniętego przez człowieka promieniowania słonecznego, określonego w zależności od potrzeb na podstawie wszystkich strumieni promieniowania (bezpośredniego, rozproszonego i odbitego), lub częściej natężenia promieniowania całkowitego czy zachmurzenia. Model ten pomija wpływ rzeczywistego otoczenia człowieka na bilans radiacyjny. Jest to w pełni akceptowalne w przypadku szacowania Mrt dla standardowej stacji meteorologicznej, gdzie SVF (*Sky view factor*) jest bliskie 1, natomiast w obrębie zwartej zabudowy miejskiej nie jest poprawne, gdyż nie odzwierciedla skomplikowanych uwarunkowań radiacyjno-termicznych panujących w mieście. W odniesieniu do obszarów zurbanizowanych coraz częściej do wyznaczenia Mrt stosowane są modele, które uwzględniają szczegółowo geometrię ciała człowieka, rzeczywiste zasłonięcie horyzontu oraz obecność roślinności, jednocześnie umożliwiając szczegółowe symulacje radiacyjnej wymiany ciepła, zarówno dla strumieni promieniowania krótko- jak i długofalowego (Guo et al., 2020). Danymi wejściowymi do takich modeli są wartości zmiennych meteorologicznych, natomiast parametryzacja otoczenia punktów badawczych jest efektem modelowania komputerowego. Do najczęściej stosowanych i dyskutowanych modeli, umożliwiających wyznaczenie Mrt należą: RayMan, SOLWEIG i ENVI-met (Kántor i Unger, 2011). Warto jednak podkreślić, że oszacowania Mrt wykonywane dla danych warunków meteorologicznych za pomocą różnych modeli mogą różnić się istotnie między sobą w zależności od pory roku, wysokości słońca nad horyzontem czy zacienienia (Chen et al., 2014; Gál i Kántor, 2020; Du et al., 2021).

Z uwagi na skomplikowaną morfologię obszarów zurbanizowanych, do określenia wartości Mrt sugeruje się prowadzenie bezpośrednich pomiarów tego parametru. Normy ISO7726 (1998) i VDI3787 (2008) określają w jaki sposób wartość tę można wyznaczyć instrumentalnie. Za najdokładniejszą i najbardziej wiarygodną metodę uznaje się

zaproponowany przez Höppeggo (1992) zintegrowany sposób pomiaru Mrt z wykorzystaniem trzech bilansomierzy promieniowania (zestawów dwóch pyranometrów i dwóch pyrgeometrów), przez co środowisko radiacyjne określane jest w sposób niezależny od zmiennego pola wiatru (Du et al., 2021). Średnia gęstość strumienia promieniowania pochłoniętego przez ciało człowieka wyznaczana jest w tym przypadku na podstawie zmierzonych symultanicznie w 6 kierunkach (4 kardynalnych oraz w górę i w dół) niezależnych strumieni promieniowania słonecznego i ziemskiego, które następnie należy pomnożyć przez współczynniki kątowe (odzwierciedlające udział promieniowania odbieranego przez ludzkie ciało z różnych kierunków) oraz współczynniki absorpcji promieniowania krótko- i długofalowego odpowiednio dla człowieka ubranego w odzież (Kántor i Unger, 2011). Jednakże metoda ta wymaga zastosowania bardzo kosztownego sprzętu pomiarowego, który dodatkowo jest mało poręczny i trudny w transporcie, co ogranicza jej praktyczne wykorzystanie w trakcie wielopunktowych pomiarów terenowych (Du et al., 2021; Liu et al., 2022; Tang i Li, 2022). Co więcej, choć zintegrowane pomiary Mrt wykonane za pomocą 3 bilansomierzy promieniowania uznaje się za metodę referencyjną, uzyskane za ten sposób wyniki mogą się różnić w zależności od zastosowanych sensorów oraz ich specyfikacji (d'Ambrosio Alfano et al., 2013).

Dlatego też w badaniach zróżnicowania komfortu termicznego, do wyznaczania Mrt najpowszechniej obecnie stosuje się czarny termometr kulisty, który jest przyrządem prostym w konstrukcji, łatwym w użytkowaniu oraz nisko kosztowym (d'Ambrosio Alfano et al., 2021; Liu et al., 2022). Po raz pierwszy termometr kulisty został zastosowany przez Vernona (1932) i po dopracowaniu wykorzystywany był jako standardowy przyrząd do badania mikroklimatu pomieszczeń (American National Standards Institute, 2004). Pierwotnie zbudowany był z czujnika temperatury powietrza, umieszczonego we wnętrzu pomalowanej na kolor czarny miedzianej sfery o średnicy 15 cm i grubości 0,4 mm. Wraz z upowszechnieniem się pomiarów termometrami kulistymi w badaniach warunków zewnętrznych, zaczęto wykorzystywać sfery z różnych materiałów, o różnej grubości ścianki i średnicy (Thorsson et al., 2007; Wang i Li, 2015). Temperatura termometru kulistego jest wynikiem radiacyjnej i konwekcyjnej wymiany ciepła między sferą a jej otoczeniem. Zgodnie z teorią, gdy termometr kulisty osiąga stan równowagi termicznej, temperatura mierzona wewnątrz kuli (t_g) równa jest temperaturze powierzchni kuli (t_s), a t_g stanowi średnią ważoną temperatury powietrza i Mrt (Kuehn et al., 1970).

Termometr kulisty daje dobre przybliżenie wartości Mrt w pomieszczeniach, gdzie bilans radiacyjny jest mało skomplikowany. Natomiast w niejednorodnym środowisku zewnętrznym, gdzie struktura wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem jest skomplikowana, przyrząd ten może często generować niedostatecznie dokładne i niewiarygodne wyniki (Kántor i Unger, 2011). W literaturze wymienia się kilka głównych wad termometrów kulistych:

- sferyczny kształt tego przyrządu uśrednia pochłonięte promieniowanie jednakowo ze wszystkich kierunków, co daje dobre oszacowanie Mrt dla człowieka w pozycji siedzącej, ale nie dla osoby stojącej czy maszerującej (gdyż w tej pozycji przeważa dopływ bocznych strumieni promieniowania) (Thorsson et al., 2007; Kántor i Unger, 2011);
- standardowe termometry kuliste posiadające czarną powłokę mają tendencję do przeszacowywania absorpcji promieniowania krótkofalowego w stosunku do rzeczywistej ilości pochłoniętej przez skórę i odzież (Johansson et al., 2014; Banfi et al., 2022; Tang i Li, 2022);

- czas reakcji standardowego termometru kulistego wynosi około 20 minut, co w warunkach zewnętrznych, gdy warunki meteorologiczne podlegają dynamicznym zmianom, może oznaczać niemożność osiągnięcia przez ten przyrząd stanu równowagi termicznej, a tym samym obliczone wartości M_{rt} mogą nie być wiarygodne (Kántor i Unger, 2011; Wang i Li, 2015; Vanos et al., 2021).

Rozwiązanie problemu niepewności wskazań termometru kulistego wobec jego długiego czasu reakcji zaproponował już w 1977 r. Humphreys (1977), wykorzystując jako sensor pomalowaną na czarno piłeczkę pingpongową, z umieszczonym w środku czułym termometrem rtęciowym. Zmniejszenie średnicy kuli skutkuje znacznym skróceniem czasu reakcji termometru kulistego (Nikolopoulou et al., 1999), ale rodzi inne problemy, jak np. większą chwiejność jego wskazań z uwagi na większą wrażliwość na zmienność pól wiatru i promieniowania słonecznego (Guo et al., 2020; d'Ambrosio Alfano et al., 2021; Teitelbaum et al., 2022). Jednocześnie rezultatem zmiany materiału, z jakiego wykonana jest sfera (z miedzi na plastik), będzie zmniejszenie przewodnictwa cieplnego kuli, co w sytuacji intensywnego promieniowania słonecznego, może wiązać się z nierównomiernym rozkładem temperatury na powierzchni termometru kulistego i generować duże błędy (Wang i Li, 2015). Warto jednak zaznaczyć, że w warunkach silnego dopływu promieniowania krótkofalowego, problem braku jednorodności temperatury powierzchni kuli obserwowany jest również w przypadku standardowych kul miedzianych o średnicy 15 cm, charakteryzujących się doskonałym przewodnictwem cieplnym (Liu et al., 2022), natomiast w otoczeniu doskonale czarnym akrylowe i miedziane termometry kuliste o jednakowych średnicach, nie wykazują różnic w otrzymywanych wynikach (d'Ambrosio Alfano et al., 2021).

Z kolei problem przeszacowywania wielkości absorpcji promieniowania krótkofalowego przez standardowy czarny termometr kulisty może zostać rozwiązany poprzez zmianę koloru jego powłoki, aby lepiej symulował zdolności absorpcyjne skóry człowieka i jego wierzchniej odzieży. Sugeruje się stosowanie sfer pomalowanych na jasnoszary kolor, o wyższym albedo (International Organization for Standardization, 1998; Johansson et al., 2014). Dotychczas modyfikację tę zastosowano już z powodzeniem w wielu badaniach, stosując najczęściej kolor RAL 7001, jednak w warunkach intensywnego dopływu promieniowania słonecznego wartości M_{rt} wyznaczone takim instrumentem mogą być zaniżone (Thorsson et al., 2007; Vanos et al., 2021; Banfi et al., 2022).





W dotychczasowych badaniach znanych z literatury wartości M_{rt} wyznaczone za pomocą termometrów kulistych były wielokrotnie porównywane z wartościami uzyskanymi metodą referencyjną – z użyciem trzech bilansomierzy promieniowania. Wykazały one, że w zależności od warunków atmosferycznych występujących w trakcie prowadzenia pomiarów oraz konstrukcji termometru kulistego, czy wreszcie przyjętych metod wyznaczenia konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła i obliczania M_{rt} , wyniki takich pomiarów mogą się między sobą bardzo różnić (Staiger i Matzarakis, 2020; Du et al., 2021). W ostatnich latach wiele prac poświęconych było próbom opracowania poprawek dla termometrów kulistych, aby ich wskazania zbliżyć do wartości referencyjnych (d'Ambrosio Alfano et al., 2021; Du et al., 2021; Vanos et al., 2021; Banfi et al., 2022), przy czym, jak zauważają Liu et al. (2022), wzory korekcyjne często możliwe są do zastosowania jedynie w odniesieniu do warunków meteorologicznych charakterystycznych dla danego regionu, dla którego zostały opracowane. Badania te potwierdzają jednak, że nadal istnieje zapotrzebowanie na tanie, łatwe w obsłudze przyrządy, umożliwiające wyznaczenie w terenie wartości M_{rt} .

Celem pracy jest zweryfikowanie przydatności termometrów kulistych do wyznaczenia średniej temperatury promieniowania oraz określenie zależności ich wskazań od wartości parametrów meteorologicznych. Dodatkowo ustalony zostanie wpływ sposobu oszacowania Mrt na wartości wskaźnika UTCL.

Obszar badawczy i metody

Do analizy wybrano dwa gorące i słoneczne, letnie dni 3 i 4 sierpnia 2022 r. Pomiary na terenach zielonych w Warszawie prowadzono w godzinach 8:00-18:00 czasu lokalnego, w dwóch lokalizacjach: w Parku Skaryszewskim (3.08.2022) oraz Parku Łazienki Królewskie wraz z przylegającym do niego Ogrodem Botanicznym Uniwersytetu Warszawskiego (4.08.2022). W każdym zespole parkowym pomiary prowadzono nad powierzchnią trawiastą w dwóch punktach: w cieniu drzew oraz na otwartej przestrzeni. Położenie punktów wraz z ich krótką charakterystyką przedstawiono w tabeli 1.

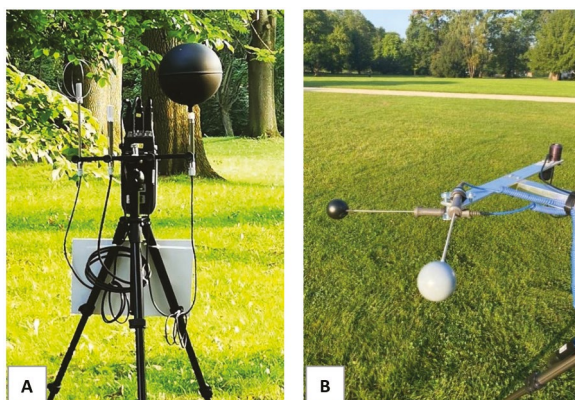
Tabela 1. Charakterystyka punktów pomiarowych
Characteristics of the measurement points

Stanowisko pomiarowe	Lokalizacja	Współrzędne geograficzne	SVF	Zdjęcie sytuacyjne
„Skaryszewski Błonia”	Otwarty teren porośnięty trawą, zlokalizowany we wschodniej części parku, sąsiadujący z niską zabudową mieszkaniową	52°14'37.22" N 21° 3'50.44" E	0,98	
„Skaryszewski Cień”	Pod drzewami liściastymi, teren porośnięty trawą, zlokalizowany w centralnej części parku	52°14'32.41" N 21° 3'21.09" E	0,16	
„Łazienki Oranżeria”	Otwarty teren, porośnięty krótko strzyżoną trawą, zlokalizowany w południowo-zachodniej części parku	52°12'40.47" N 21° 2'2.98" E	0,96	
„Ogród Botaniczny”	Pod drzewami liściastymi, teren świeżo obsiany młodą trawą, zlokalizowany w północno-zachodniej części kompleksu zieleni	52°13'3.95" N 21° 1'46.06" E	0,08	

Pomiary mikrometeorologiczne prowadzono za pomocą dwóch przenośnych stacji, wyposażonych w czujniki temperatury i wilgotności powietrza, prędkości wiatru oraz promieniowania krótkofalowego. Specyfikację techniczną wykorzystanych przyrządów zamieszczono w tabeli 2. Do wyznaczenia średniej temperatury promieniowania (Mrt) użyto 3 termometrów kulistych (ryc. 1). Standardowy termometr kulisty (SGT) zbudowany jest z miedzianej, pomalowanej na kolor czarny kuli o średnicy 15 cm i grubości ścianki 0,4 mm, w środku której znajduje się czujnik Pt100. Akrylowe termometry kuliste (AGT) własnej konstrukcji składają się z piłeczek pingpongowych o średnicy 4 cm i grubości ścianki 0,4 mm, pomalowanych na kolor czarny i szary – RAL7001, z umieszczoną wewnątrz sondą termoparową typu-T. Konstruując AGT, odwzorowano metodykę zaproponowaną i przetestowaną we wcześniejszych badaniach (Thorsson et al., 2007; Vanos et al., 2021). Wszystkie dane pomiarowe rejestrowane były z jednogminutowy krokiem czasowym, jednak z uwagi na dużą chwiejność wskazań termometrów kulistych, związaną

Tabela 2. Specyfikacja techniczna przyrządów pomiarowych
Technical specifications of measuring instruments

Parametr	Przyrząd	Zakres	Dokładność
Temperatura i wilgotność powietrza	• Termohigrometr: Onset S-THC-M002	$t = -40-75^{\circ}\text{C}$ RH = 0-100%	$t = \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ RH = $\pm 2,5\%$
Prędkość wiatru	• Sonda dookólna typu „hot wire”: DeltaOHM AP3203	0,05-5 m/s	$\pm (0,05 + 0,5\% \text{ pomiaru } v) \text{ m/s}$
Krótkofalowe promieniowanie słoneczne	• Pyranometr: Onset S-LIB-M003	0-1280 W/m ²	$\pm 10 \text{ W/m}^2$
Temperatura termometru kulistego	• Termometr kulisty $\varnothing 15 \text{ cm}$: DeltaOHM TP3275 • Termopara stalowa typu-T do termometru kulistego $\varnothing 4 \text{ cm}$: Omega Engineering THSS-18G-RSC-6	-30-120°C	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$



Ryc. 1. Aparatura pomiarowa: A) 15-centymetrowy standardowy termometr kulisty (SGT), B) 4-centymetrowe akrylowe termometry kuliste (AGT, szary i czarny)
Measuring equipment: A) 15 cm standard globe thermometer (SGT), B) 4 cm acrylic globe thermometers (AGT, grey and black)

Source: own study based on National Electoral Commission (PKW) data. Explication of types as in Fig. 1.

z dużą wrażliwością na wpływ wiatru i długim czasem potrzebnym na osiągnięcie równowagi termodynamicznej (Johansson et al., 2014; Teitelbaum et al., 2020), obliczono średnie 5-minutowe dla wszystkich parametrów meteorologicznych. Takie podejście jest powszechnie rekomendowane, gdyż prowadzi do wzrostu zgodności wyników pomiarów termometrami kulistymi z pomiarami wykonanymi metodą referencyjną – za pomocą trzech bilansomierzy promieniowania (Banfi et al., 2022; Liu et al., 2022). Wszystkie pomiary prowadzono na wysokości 1,1 m nad powierzchnią gruntu, co odpowiada średniej wysokości środka grawitacyjnego ciała dorosłego człowieka (Mayer i Höppe, 1987).

Na potrzeby tej analizy przyjęto najpopularniejszy sposób obliczania Mrt na podstawie pomiarów termometrami kulistymi, który określony został w normie ISO7726 (International Organization for Standardization, 1998). Na podstawie jednoczesnych pomiarów temperatury powietrza (t), prędkości wiatru (v) i temperatury termometru kulistego (tg) oraz znając współczynnik zdolności emisyjnej ($\varepsilon = 0,95$ dla czarnej kuli, $\varepsilon = 0,97$ dla szarej kuli) i średnicę kuli (D), Mrt oblicza się według wzoru:

$$Mrt = \sqrt[4]{(tg + 273,15)^4 + \frac{h_c}{\varepsilon \cdot \sigma} \cdot (tg - t) - 273,15} \quad [^{\circ}C]$$

gdzie:

tg – temperatura termometru kulistego [$^{\circ}C$];

t – temperatura powietrza [$^{\circ}C$];

h_c – konwekcyjny współczynnik przenikania ciepła [W/m^2K];

ε – zdolność emisyjna termometru kulistego;

σ – stała Stefana-Boltzmana [W/m^2K^4].

Głównym problemem generującym rozbieżności wyników obliczeń Mrt w różnych badaniach jest sposób parametryzacji konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła (h_c). Zgodnie z normą ISO 7726 (1998) w warunkach klimatu umiarkowanego sugeruje się stosowanie wyznaczonych empirycznie przez Hey'a (1968) współczynników h_c dla swobodnej i wymuszonej konwekcji, przyjmując do obliczeń większą wartość jednego spośród nich. Jednakże stosowanie tych wzorów jest uprawnione jedynie w zakresie temperatury powietrza 0-40 $^{\circ}C$ oraz przy liczbie Reynoldsa 10²-10⁵ (Wang i Li, 2015).

Dla wymuszonej konwekcji współczynnik przenikania ciepła wynosi: $h_c = 6,3 \cdot \left(\frac{v^{0,6}}{D^{0,4}} \right)$,

natomiast w przypadku swobodnej konwekcji: $h_c = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta t}{D} \right)$

(International Organization for Standardization, 1998).

Wzory na obliczenie konwekcyjnych współczynników przenikania ciepła, zaproponowane w ISO 7726, wyznaczone zostały dla określonych standardowych warunków i nie uwzględniają zależnej od temperatury zmienności parametrów powietrza istotnych dla transferu ciepła (tj. gęstość, lepkość kinematyczna czy przewodność cieplna) (Verein Deutscher Ingenieure, 2008)¹. Co więcej, w praktyce najczęściej wykorzystuje się h_c dla wymuszonej konwekcji, gdyż swobodna konwekcja ma istotny wpływ na współczynnik

¹ W warunkach środowiska odbiegających istotnie od przyjętej normy, zaleca się stosowanie współczynników h_c obliczonych dla rzeczywistych wartości parametrów powietrza, wyprowadzonych na podstawie średniej liczby Nusselta z dostępnych korelacji inżynierskich (Vanos et al., 2021).

przenikania ciepła jedynie przy bardzo niskiej prędkości wiatru (poniżej 0,2 m/s) (Teitelbaum et al., 2020). Dla warunków, gdy straty ciepła drogą swobodnej konwekcji nie powinny zostać pominięte, możliwe jest zastosowanie poprawki uwzględniającej tzw. konwekcję mieszaną (Teitelbaum et al., 2022).

Jak wykazano wcześniej, wartości Mrt obliczone zgodnie z normą ISO 7726 odbiegają od wartości Mrt uzyskanych za pomocą referencyjnej metody pomiaru bilansomierzami promieniowania. Dlatego wykorzystując uzyskane wyniki pomiarów szarym termometrem kulistym, obliczono wartości Mrt z uwzględnieniem istniejących poprawek dla tego przyrządu – autorstwa Thorsson et al. (2007) i Vanos et al. (2021). Modyfikacja Thorsson uwzględniła zmianę wartości konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła (h_c), na wyznaczoną eksperymentalnie korelację dla warunków klimatycznych strefy umiarkowanej, gdzie skorygowany wzór na Mrt przyjmuje postać:

$$Mrt_{Thorsson} = \sqrt[4]{(tg + 273,15)^4 + \frac{1,335 \cdot 10^8 \cdot v^{0,71}}{\varepsilon \cdot D^{0,4}} \cdot (tg - t) - 273,15} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Metoda Vanos zakłada z kolei wykorzystanie odmiennych konwekcyjnych współczynników przenikania ciepła, jak również neguje równość temperatury wnętrza termometru kulistego (tg) i średniej temperatury powierzchni przyrządu (ts), proponując jednocześnie odpowiednie wzory korekcyjne. W przypadku konwekcji wymuszonej zastosowano współczynnik h_c autorstwa Whitakera (Bergman et al., 2006), definiując wartości cech fizycznych powietrza dla średniej t i tg :

$$h_c = \frac{k_{air}}{D} \cdot \left(2 + \left(0,4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}} \right) \cdot Pr^{0,4} \right)$$

gdzie:

k_{air} – przewodność cieplna powietrza [średnia $k_{air} = 0,02632 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$];

D – średnica kuli [$D = 0,04 \text{ m}$];

Re – liczba Reynolds'a [$Re = \frac{v \cdot D}{\nu_{air}}$; średnia lepkość kinetyczna $\nu_{air} = 1,561 \cdot 10^{-5}$];

Pr – liczba Prandtla [równa dla analizowanych danych 0,7].

Natomiast w warunkach konwekcji swobodnej, na potrzeby zastosowania poprawki Vanos, Mrt obliczono wykorzystując współczynnik h_c Churchilla dla sfer (Teitelbaum et al., 2020):

$$h_c = \frac{k_{air}}{D} \cdot \left(2 + \frac{0,589 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + (0,469 / Pr)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right)$$

gdzie:

Ra – liczba Rayleigh'a [$Ra = \frac{g \cdot \beta}{\nu_{air} \cdot \alpha} \cdot (t - tg) \cdot D^3$];

g – przyspieszenie ziemskie $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;

β – rozszerzalność cieplna powietrza $\beta = 0,003332 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$;

α – dyfuzyjność termiczna powietrza $\alpha = 2,217 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Do oceny charakteru konwekcyjnej wymiany ciepła zastosowano kryterium liczby Richardsona Ri , przyjmując, że dla $Ri < 0,1$ dominuje konwekcja wymuszona (Teitelbaum et al., 2022). Następnie dla szarego termometru kulistego zmodyfikowaną wartość Mrt obliczono według poprawki Vanos zgodnie ze wzorem:

$$Mrt_{Vanos} = \sqrt[4]{(1,6 \cdot tg - 0,339 \cdot t + 264,46)^4 + \frac{h_c}{0,97 \cdot \sigma} \cdot (1,6 \cdot tg - 1,339 \cdot t - 8,69) - 273,15}$$

W pracy wykorzystano wskaźnik UTCI, który jest miarą reakcji fizjologicznych człowieka na środowisko biotermiczne. Definiowany jest on jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych określone parametry fizjologiczne organizmu będą przyjmować takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych (Błażejczyk et al., 2013). UTCI określa natężenie obciążenia cieplnego człowieka spacerującego z prędkością 4 km/h i ubranego stosownie do temperatury otoczenia. Do obliczenia wskaźnika UTCI wymagane są cztery zmienne: temperatura i wilgotność powietrza, średnia temperatura promieniowania oraz prędkość wiatru zmierzona na wysokości 10 m n.p.g. Pomiar prędkości wiatru z poziomu 1,1 m n.p.g. przeliczono do standardowej wysokości pomiaru 10 m n.p.g. zgodnie z formułą (Verein Deutscher Ingenieure, 2008):

$$v_{10m} = v \cdot \log\left(\frac{10}{0,01}\right) / \log\left(\frac{1,1}{0,01}\right)$$

Wartości UTCI obliczono w programie BioKlima 2.6 (Błażejczyk, 2005), wykorzystując obliczone wcześniej wartości Mrt i średnie 5-minutowe wartości temperatury (t) i wilgotności względnej (RH) powietrza, prędkości wiatru z poziomu 10 m n.p.g. (v_{10m}) oraz natężenia promieniowania całkowitego ($Kglob$).

Wyniki i dyskusja

Badania prowadzono w trakcie upalnych letnich dni, gdy temperatura powietrza wahała się od 19,7°C rano w Ogrodzie Botanicznym do 31,6°C tuż przed godziną 16:00 przy Oranżerii w Łazienkach (tab. 3). W ciągu obu dni pomiarowych panowały warunki radiacyjne z maksymalnym natężeniem promieniowania całkowitego przekraczającym 800 W/m², przy czym 3 sierpnia w trakcie pomiarów doływ promieniowania słonecznego był w ciągu dnia okresowo zaburzany przez zachmurzenie, natomiast 4 sierpnia przez cały okres prowadzenia pomiarów niebo było bezchmurne. We wszystkich punktach pomiarowych średnia prędkość wiatru była niewielka (0,7 m/s), co związane było m.in. z ograniczaniem przepływu powietrza przez bujną roślinność parkową. Najniższą średnią temperaturę termometru kulistego zmierzono szarym AGT (28,3°C), a najwyższą 15-centymetrowym SGT (32,1°C).

Na słonecznych stanowiskach pomiarowych najwyższe wartości średniej temperatury promieniowania Mrt zmierzono za pomocą 15-centymetrowego standardowego termometru kulistego (SGT) (ryc. 2). W warunkach niezaburzonego przez zachmurzenie doływu promieniowania słonecznego, Mrt zmierzone tym przyrządem przekraczało w ciągu dnia 70°C. Jednocześnie w tym samym czasie wartości Mrt zmierzone 4-centymetrowymi akrylowymi termometrami kulistymi (AGT) były średnio o 8,2°C niższe w przypadku czarnego AGT oraz 14,5°C niższe przy zastosowaniu szarego AGT. W przypadku stanowisk pomiarowych zlokalizowanych w cieniu, Mrt przyjmowało wartości od około 20°C rano,

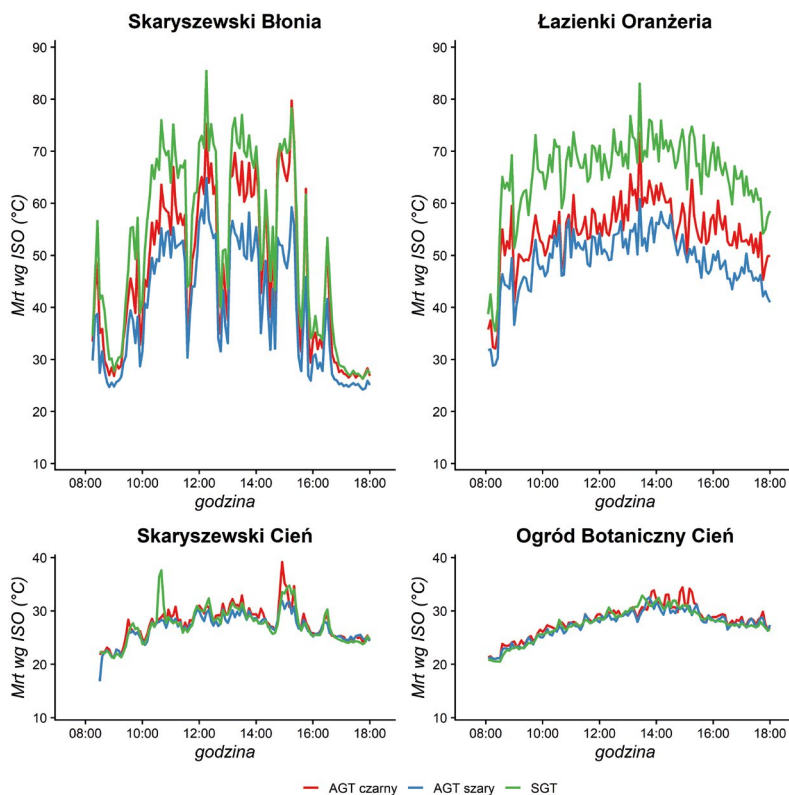
Tabela 3. Charakterystyka warunków meteorologicznych w okresie prowadzenia pomiarów
A characterisation of meteorological conditions during the measurement period

Parametr	Średnia	Odchylenie standardowe	Min.	Max.
K_{glob} [W/m ²]	281,5	278,8	10,6	847,9
t [°C]	26,0	2,8	19,7	31,6
RH [%]	53,8	12,1	32,6	81,7
v [m/s]	0,7	0,5	0,0	2,4
tg_{AGT_czarny} [°C]	29,2	4,8	20,5	39,9
tg_{AGT_szary} [°C]	28,3	4,1	18,5	36,0
tg_{SGT} [°C]	32,1	7,6	20,2	46,1

do maksymalnie 39,2°C w parku Skaryszewskim i 34,4°C wczesnym popołudniem w Ogrodzie Botanicznym. Różnice wskazań termometrów kulistych między sobą były w cieniu niewielkie, a obliczone wartości M_{rt} nie różniły się więcej niż 0,5°C. Zaobserwowane chwilowe większe różnice między termometrami kulistymi znajdującymi się w cieniu wynikały z nierównomiernego oświetlenia stanowiska pomiarowego przez przeświecające spomiędzy gałęzi drzew słońce.

Tendencja do wskazywania wyższych wartości M_{rt} przez SGT względem małych akrylowych termometrów kulistych AGT w warunkach silnego usłonecznienia była już wcześniej zaobserwowana w badaniach empirycznych (Budd, 2008; Banfi et al., 2022). Im mniejszą średnicę mają termometry kuliste, tym ich wskazania są bardziej chwiejne i uzyskują niższe wartości M_{rt} , choć w przypadku przyrządów powszechnie dostępnych w sprzedaży, nawet gdy kule mają jednakową średnicę, ich wskazania mogą różnić się nawet o 4°C (Nikolopoulou et al., 1999; Oliveira et al., 2019). Dodatkowo niższe wartości M_{rt} zmierzone przez AGT mogą być związane ze słabszą przewodnością cieplną akrylowych sfer, która w warunkach silnego dopływu promieniowania słonecznego skutkuje niejednorodnym nagrzewaniem się powierzchni kul, a tym samym niedokładnością pomiarową (Wang i Li, 2015). Jednocześnie wskazania termometrów kulistych były kilkukrotnie porównywane z wynikami zintegrowanych 6-kierunkowych pomiarów bilansomierzami promieniowania. Chen et al. (2014) wykazał, że pomiary SGT skutkują nawet o 10°C wyższymi wartościami M_{rt} niż określone metodą referencyjną, podczas gdy Kantor zaobserwowała taką zależność jedynie w trakcie dni słonecznych (Kántor et al., 2015). Inne wyniki badań częściowo potwierdzają, że czarny SGT zawyża wskazania M_{rt} , natomiast szary AGT wartości te zaniża w stosunku do pomiarów za pomocą bilansomierzy (Thorsson et al., 2007; Banfi et al., 2022). Z kolei Du (2021) stwierdził, że SGT zaniża wartości M_{rt} , co w skali roku szczególnie zaznacza się zimą. Podobnie Vanos et al. (2021) wykazali, że wszystkie termometry kuliste (zarówno SGT, jak i AGT szary lub czarny) mają tendencję do zaniżania M_{rt} względem wartości referencyjnych, dlatego też wyprowadzili odpowiednie wzory korekcyjne na podstawie pomiarów w strefie klimatu suchego i gorącego.

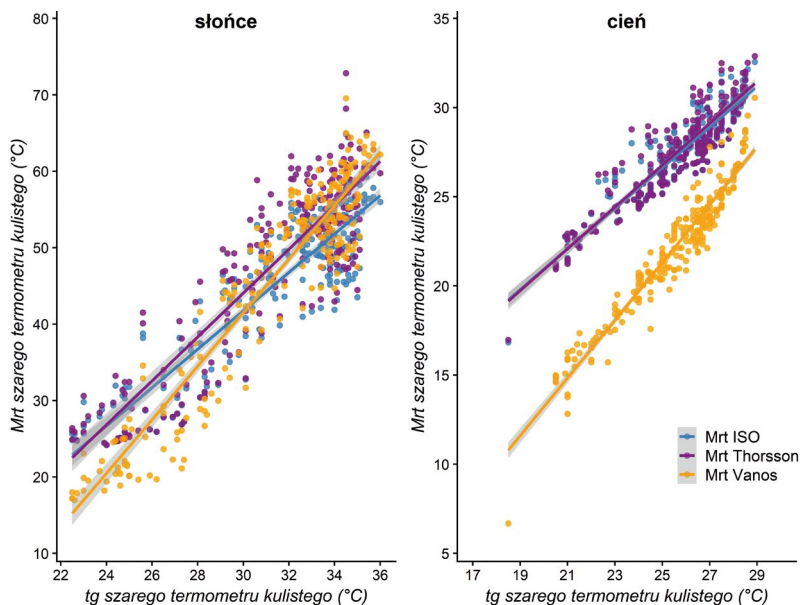
Wszelkie poprawki wprowadzone do wskazań termometrów kulistych, w założeniu powinny zbliżyć zmierzone w ten sposób wartości M_{rt} do wartości referencyjnych. Uzyskane wyniki dla szarego termometru kulistego (AGT) wyraźnie wskazują, że w zależności od przyjętej metodyki obliczania M_{rt} , otrzymamy odbiegające od siebie wartości (ryc. 3). W warunkach silnego usłonecznienia, gdy temperatura termometru kulistego (tg)



Ryc. 2. Przebiegi średniej temperatury promieniowania (Mrt, °C) zmierzonej za pomocą szarego i czarnego akrylowego termometru kulistego (AGT) oraz standardowego termometru kulistego (SGT) na stanowiskach słonecznych (Skaryszewski Błonia, Łazienki Oranżeria) oraz zacienionych (Skaryszewski Cień, Ogród Botaniczny Cień)

The mean radiant temperature (Mrt, °C) measured using grey and black acrylic globe thermometers (AGT) and a standard globe thermometer (SGT) in sunny spots (Skaryszewski Błonia, Łazienki Oranżeria) and shaded spots (Skaryszewski Cień, Ogród Botaniczny Cień)

przekracza 32°C, wartości Mrt obliczone zgodnie z normą ISO 7726 są istotnie niższe niż po zastosowaniu poprawek Thorsson lub Vanos (Thorsson et al., 2007; Vanos et al., 2021). Jednocześnie przy niższej temperaturze, Mrt obliczone wg normy oraz z uwzględnieniem poprawki Thorsson, charakteryzuje się dużą zgodnością. Z kolei zastosowanie poprawki Vanos przy niższej temperaturze t_g i niższym położeniu słońca nad horyzontem, zaniża wartości Mrt o prawie 10°C, co może być związane z m.in. wykorzystaniem w tym podejściu innego niż przewidziany normą ISO konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła – h_c Whitakera (Bergman et al., 2006). Problem ten wymaga dalszej analizy, gdyż jak niedawno stwierdzono eksperymentalnie, h_c obliczany według normy przyjmuje zbyt niską wartość w warunkach słabego przepływu powietrza, co może prowadzić do otrzymania błędnych wartości Mrt (d'Ambrosio Alfano et al., 2021). Nasze wyniki potwierdzają również, że poprawka Vanos nie może być stosowana w odniesieniu do pomiarów prowadzonych w cieniu, gdyż nie odpowiada to warunkom radiacyjnym, dla których została



Ryc. 3. Zależność średniej temperatury promieniowania (Mrt, °C) wyznaczonej różnymi metodami (ISO, z poprawką Thorsson, z poprawką Vanos) na stanowiskach słonecznych i zacienionych od temperatury szarego akrylowego termometru kulistego (AGT)

The relationship between mean radiant temperature (Mrt, °C) determined by various methods (ISO, with Thorsson's correction, with Vanos's correction) and the temperature measured by a grey acrylic globe thermometer (AGT) in the sunny and shaded spots

opracowana – otrzymane w ten sposób wartości Mrt są znacząco zaniżone względem pozostałych wyników (ryc. 3).

Średnia temperatura promieniowania jest w dużym stopniu zależna od warunków pogodowych. Najsilniej skorelowana jest z natężeniem promieniowania całkowitego – współczynnik korelacji Spearmana wynosi od 0,89 w przypadku Mrt szarego AGT do 0,93 dla Mrt wyznaczonego z SGT (tab. 3). Równie silna jest zależność wartości Mrt od prędkości wiatru na poziomie 1,1 m nad gruntem – w przypadku wszystkich termometrów kulistych współczynnik korelacji wynosi 0,88-0,89. Wpływ sposobu pomiaru Mrt uwidacznia się wraz ze wzrostem natężenia promieniowania całkowitego. Największe różnice między poszczególnymi przyrządami pomiarowymi obserwowano przy wartościach K_{glob} prze-

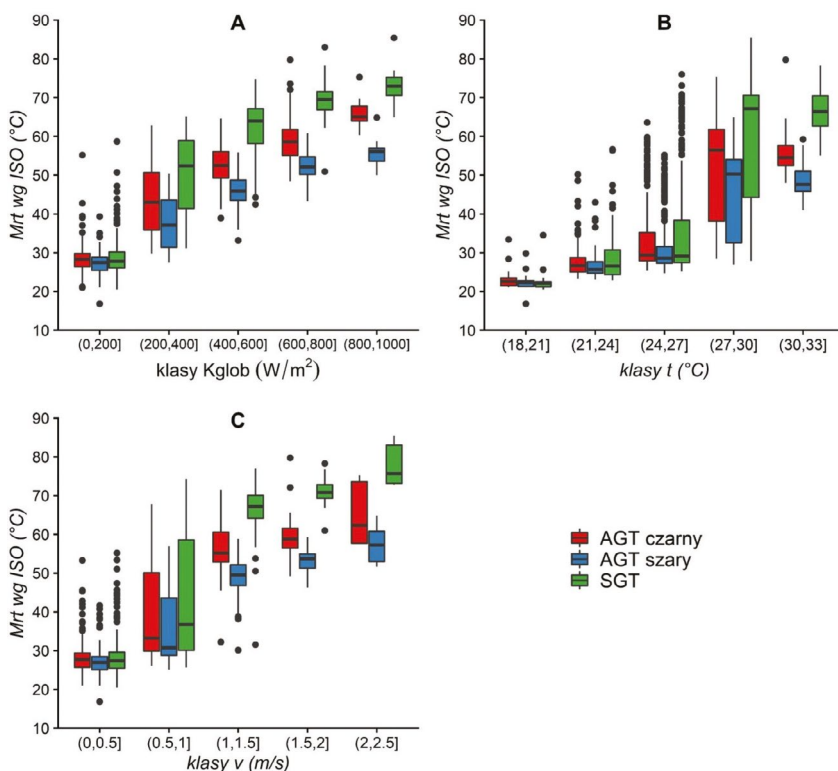
Tabela 3. Współczynniki korelacji Spearmana między Mrt zmierzonym różnymi przyrządami, a parametrami meteorologicznymi (K_{glob} , albedo, t , v)

Spearman's correlation coefficients between Mrt measured by the various instruments and meteorological parameters (K_{glob} , albedo, t , v)

Parametr	Mrt wg SGT	Mrt wg czarnego AGT	Mrt wg szarego AGT
K_{glob}	0,930	0,917	0,891
albedo	0,689	0,674	0,601
t	0,778	0,802	0,814
v	0,888	0,881	0,889

kraczących 800 W/m^2 (ryc. 4A). Zależność ta jest zgodna z wynikami Liu (2022), który stwierdził, że wraz ze wzrostem intensywności promieniowania krótkofalowego, M_{rt} zmierzone termometrem kulistym coraz bardziej różni się od M_{rt} wyznaczonej metodą referencyjną za pomocą bilansomierzy promieniowania, a dokładność oszacowania M_{rt} powyżej 600 W/m^2 spada do 60%.

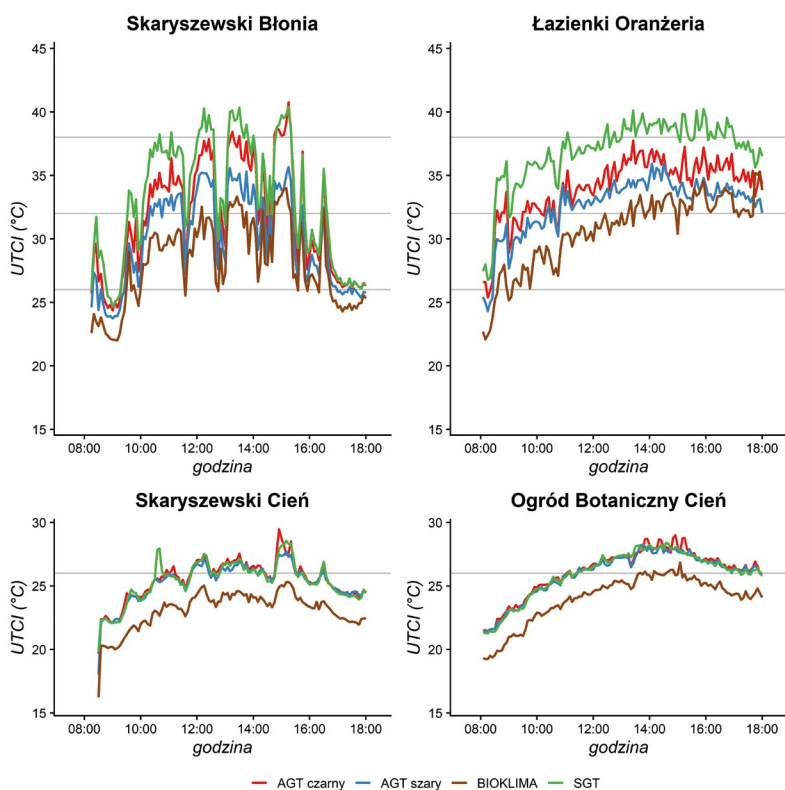
Im wyższa była prędkość wiatru, tym obserwowano większe rozbieżności pomiędzy wskazaniem termometrów kulistych (ryc. 4B), przy czym różnice te zaznaczały się wyraźniej dopiero przy przepływie powietrza powyżej 1 m/s . Jednocześnie w przypadku małych termometrów akrylowych AGT, konwekcyjne straty ciepła w związku z intensywniejszym przepływem powietrza były większe, stąd wartości M_{rt} zmierzone za pomocą AGT rosły nieproporcjonalnie wolniej niż w przypadku SGT. W przypadku prędkości wiatru poniżej $0,5 \text{ m/s}$ nie dostrzeżono wyraźnych różnic w wartościach M_{rt} w zależności od rodzaju termometru, choć należy dodać, że większość przypadków tak niskiej prędkości wiatru zmierzona była w cieniu drzew, stąd przeważający wpływ na kształtowanie M_{rt} mógł mieć wtedy ograniczony dopływ promieniowania krótkofalowego. Dotychczasowe wyniki badań podkreślają, że przy bardzo niskich prędkościach wiatru SGT zaniża wartości M_{rt} w porównaniu z metodą referencyjną, natomiast powyżej 1 m/s M_{rt} wyznaczone standar-



Ryc. 4. Zależność średniej temperatury promieniowania (M_{rt} , °C) od: A) całkowitego promieniowania słonecznego (K_{glob} ; W/m^2), B) temperatury powietrza (t ; °C), C) prędkości wiatru (v ; m/s)
 The relationship between mean radiant temperature (M_{rt} , °C) and: A) total solar radiation (K_{glob} ; W/m^2), B) air temperature (t ; °C), and C) wind speed (v ; m/s)

dowym termometrem kulistym zaczyna przewyższać wartości zmierzone trzema bilansomierzami w sześciu kierunkach (Liu et al., 2022; Teitelbaum et al., 2022).

Biorąc pod uwagę różnice w wynikach pomiarów średniej temperatury promieniowania prowadzonych różnymi metodami, należy się spodziewać, że stosując Mrt jako zmienną wejściową do obliczenia wskaźników biometeorologicznych, otrzymamy różne poziomy oszacowania stresu cieplnego (Tan et al., 2013). W warunkach silnej insolacji najwyższe wartości wskaźnika UTCI uzyskano w przypadku pomiarów Mrt wykonanych STG – w godzinach wczesnopołudniowych UTCI przekraczało 38°C, co odpowiadało bardzo silnemu stresowi cieplnemu (ryc. 5). W tym samym czasie UTCI obliczone na podstawie Mrt, wyznaczonego za pomocą akrylowych termometrów kulistych, wynosiło średnio o 2°C mniej w przypadku czarnego AGT i ok. 4°C dla szarego AGT. Choć różnice wartości Mrt wyznaczonego SGT i szarym AGT w takich warunkach osiągały w skrajnych przypadkach



Ryc. 5. Przebiegi wskaźnika UTCI (°C) obliczonego na podstawie Mrt wyznaczonej za pomocą pomiarów: szarym i czarnym akrylowym termometrem kulistym (AGT), standardowym termometrem kulistym (SGT) oraz wymodelowanej w aplikacji BioKlima – na stanowiskach słonecznych (Skaryszewski Błonia, Łazienki Oranżeria) oraz zacienionych (Skaryszewski Cień, Ogród Botaniczny Cień)
Szare linie odpowiadają granicom kategorii stresu termicznego wskaźnika UTCI.

UTCI index (°C) calculated from the Mrt estimates, as based on the measurements with: grey and black acrylic globe thermometers (AGT), a standard globe thermometer (SGT) and modelled values in the BioKlima application – in respect of the spots termed sunny (Skaryszewski Błonia and Łazienki Oranżeria) and shaded (Skaryszewski Cień and Shaded Botanical Garden)

The grey lines denote the limits of the UTCI thermal-stress ranges.

nawet ponad 20°C, to w odniesieniu do UTCI obliczonego na ich podstawie, wyniki różniły się zaledwie o kilka stopni, czyli w efekcie o 1 kategorię na skali wskaźnika. Uzyskane wyniki potwierdzają więc wnioski Weihs et al. (2012), że błąd oszacowania UTCI w efekcie niepewności wyznaczonych strumieni promieniowania nie powinien przekroczyć 1 kategorii stresu termicznego. W przypadku pomiarów prowadzonych w cieniu różnice wskazań termometrów kulistych były niewielkie, stąd też obliczone na ich podstawie wartości UTCI były bardzo zbliżone do siebie i wskazywały w najcieplejszym momencie dnia na istnienie umiarkowanego stresu ciepła. Jednocześnie warto zauważyć, że UTCI obliczone w aplikacji BioKlima zgodnie z modelem MENEX na podstawie natężenia promieniowania całkowitego, w każdym z analizowanych przypadków przyjmowało najniższe wartości, różniąc się w skrajnych przypadkach nawet o 2 kategorie stresu cieplnego od UTCI wyznaczonego na podstawie pomiarów SGT. Rodzi to obawy, że wymodelowane w BioKlimie wartości Mrt na podstawie natężenia Kglob są niedoszacowane i mogą prowadzić do zaniżania rzeczywistego poziomu stresu cieplnego w środowisku. Tymczasem Liu et al. (2022) porównali wpływ metody wyznaczania Mrt na wartości innego wskaźnika biometeorologicznego – PET. Wykonali pomiary Mrt termometrem kulistym i metodą referencyjną (za pomocą zestawu bilansomierzy), a następnie dowiedli, że istotne różnice w ocenie warunków odczuwalnych, występują jedynie przy intensywnym dopływie promieniowania słonecznego i wysokiej temperaturze powietrza. Gdy PET był wyższy niż 42°C, w ponad 70% przypadków termometr kulisty powodował zaniżenie wartości tego wskaźnika. Natomiast w przejściowych porach roku i przy pogodzie pochmurnej metoda wyznaczania Mrt nie wpływała znacząco na wartości PET, co zgodne jest z naszymi wnioskami odnośnie braku wpływu sposobu pomiaru Mrt w cieniu na wartości wskaźnika UTCI.

Podsumowanie

Termometry kuliste, choć stanowią relatywnie tanią i nieskomplikowaną metodę służącą wyznaczeniu średniej temperatury promieniowania, są przyrządami mało precyzyjnymi, charakteryzującymi się dużą chwiejnością wskazań. Przedstawione wyniki badań uwiarydociły następujące problemy wpływające na niepewność pomiarów termometrami kulistymi:

1. Typ zastosowanego instrumentu pomiarowego silnie wpływa na wartości Mrt w warunkach silnego osłonecznienia – w skrajnych przypadkach wartości Mrt oszacowanej za pomocą standardowego 15-centymetrowego termometru kulistego (SGT) są wyższe o ponad 20°C od Mrt zmierzonej szarym 4-centymetrowym termometrem kulistym (AGT).
2. Wartość Mrt, wyznaczona za pomocą termometrów kulistych, silnie zależy od dopływu promieniowania krótkofalowego oraz prędkości wiatru. Przy dużym zachmurzeniu lub w cieniu, wszystkie typy termometrów kulistych wskazywały zbliżone wartości. Z kolei im większa była prędkość wiatru (w zakresie od 0 do 2,5 m/s) tym wyższa była wartość Mrt i większe jego zróżnicowanie w zależności od sposobu pomiaru.
3. Zastosowanie różnych poprawek do wskazań szarego termometru kulistego (Thorsen et al., 2007; Vanos et al., 2021), wyprowadzonych empirycznie na podstawie porównań z metodą referencyjną (6-kierunkowy pomiar bilansomierzami promie-

niowania), prowadzi do uzyskania zbliżonych wartości Mrt jedynie w warunkach silnego osłonecznienia i wysokiej temperatury powietrza. Im niższa temperatura termometru kulistego, tym większe są rozbieżności Mrt w zależności od przyjętej poprawki.

4. Błąd oszacowania UTCI w efekcie niepewności wyznaczonych wartości Mrt za pomocą różnych termometrów kulistych, w warunkach radiacyjnych odpowiada jednej kategorii stresu termicznego, natomiast w cieniu jest zaniedbywalny. Jednocześnie UTCI wymodelowane na podstawie natężenia promieniowania całkowitego w aplikacji BioKlima w każdym przypadku przyjmuje niższe wartości i zaniża rzeczywisty poziom stresu cieplnego w środowisku.

Termometry kuliste są zadowalającym przyrządem do wyznaczania średniej temperatury promieniowania przy ocenie trendów dobowych wskaźników biometeorologicznych. Jednak na potrzeby badania ekstremów termicznych i określenia zakresu stresu cieplnego ich dokładność jest niedostateczna, a ich operacyjne wykorzystanie może prowadzić do błędnych wniosków. Wielu badaczy sugeruje, aby wykorzystując termometry kuliste, każdorazowo skalibrować je do danych warunków środowiskowych wykorzystując jako odniesienie 6-kierunkowy pomiar bilansomierzami promieniowania. Jednak zakres stosowania tak wyznaczonych poprawek będzie ograniczony jedynie do ściśle określonych warunków meteorologicznych. Jednocześnie zawsze będzie istniał margines błędów związany z samą konstrukcją termometru kulistego, gdyż nie istnieje urządzenie, które mogłoby dokładnie odtworzyć skomplikowaną radiacyjną wymianę ciepła między ciałem człowieka a środowiskiem. Należy więc zaakceptować pewne uproszczenia koncepcji Mrt i wynikającą z tego niedokładność szacunków, aby możliwe było w ogóle określenie tego parametru.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2021/05/X/ST10/00738 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Piśmiennictwo

- American National Standards Institute. (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy ASHRAE Standard-55*.
- Banfi, A., Tatti, A., Ferrando, M., Fustinoni, D., Zanghirella, F., & Causone, F. (2022). An experimental technique based on globe thermometers for the measurement of mean radiant temperature in urban settings. *Building and Environment*, 222, 109373. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109373>
- Bergman, T.L., DeWitt, D.P., Incropera, F.P., & Lavine, A.S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd.
- Błażejczyk, K. (2005). *MENEX_2005 – the updated version of man- environment heat exchange model*. Pobrane z: <https://www.igipz.pan.pl/BioKlima.html>
- Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>

- Błażejczyk, K., & Kunert, A. (2011). *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce = Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland* (2nd ed.). Warszawa: IGIPZ PAN. Pobrane z: http://rcin.org.pl/igipz/Content/19801/WA51_39725_r2011-nr13_Monografie.pdf
- Budd, G.M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT) – its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(1), 20-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003>
- Chen, Y.C., Lin, T.P., & Matzarakis, A. (2014). Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3), 535-551. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1081-z>
- d'Ambrosio Alfano, F.R., Dell'isola, M., Ficco, G., Palella, B.I., & Riccio, G. (2021). On the measurement of the mean radiant temperature by means of globes: An experimental investigation under black enclosure conditions. *Building and Environment*, 193, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107655>
- d'Ambrosio Alfano, F.R., Dell'isola, M., Palella, B.I., Riccio, G., & Russi, A. (2013). On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment. *Building and Environment*, 63, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.026>
- Du, J., Sun, C., Liu, L., Chen, X., & Liu, J. (2021). Comparison and modification of measurement and simulation techniques for estimating T_{mrt} in summer and winter in a severely cold region. *Building and Environment*, 199, 107918. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107918>
- Fanger, P.O. (1970). *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Gál, C.V., & Kántor, N. (2020). Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. *Urban Climate*, 32, 100571. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100571>
- Guo, H., Aviv, D., Loyola, M., Teitelbaum, E., Houchois, N., & Meggers, F. (2020). On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.014>
- Hey, E.N. (1968). Small globe thermometers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1(9), 955. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/1/9/424>
- Höppe, P. (1992). A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors. *Wetter Und Leben*, 44(1-3), 147-151.
- Humphreys, M.A. (1977). The optimum diameter for a globe thermometer for use indoors. *The Annals of Occupational Hygiene*, 20(2), 135-140. <https://doi.org/10.1093/annhyg/20.2.135>
- International Organization for Standardization. (1998). *ISO 7726: Ergonomics of the Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities*. Genève: ISO.
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate*, 10, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Kántor, N., Kovács, A., & Lin, T.P. (2015). Looking for simple correction functions between the mean radiant temperature from the “standard black globe” and the “six-directional” techniques in Taiwan. *Theoretical and Applied Climatology*, 121(1-2), 99-111. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1211-2>
- Kántor, N., & Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3(1), 90-100. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>

- Kenny, N.A., Warland, J.S., Brown, R.D., & Gillespie, T.G. (2008). Estimating the radiation absorbed by a human. *International Journal of Biometeorology*, 52(6), 491-503.
<https://doi.org/10.1007/s00484-008-0145-8>
- Kuehn, L.A., Stubbs, R.A., & Weaver, R.S. (1970). Theory of the globe thermometer. *Journal of Applied Physiology*, 29(5), 750-757. <https://doi.org/10.1152/jappl.1970.29.5.750>
- Liu, K., You, W., Chen, X., & Liu, W. (2022). Study on the Influence of Globe Thermometer Method on the Accuracy of Calculating Outdoor Mean Radiant Temperature and Thermal Comfort. *Atmosphere*, 13(5), 809. <https://doi.org/10.3390/atmos13050809>
- Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (1999). Improvements to the Globe Thermometer for Outdoor Use. *Architectural Science Review*, 42(1), 27-34.
<https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9696845>
- Oliveira, A.V.M., Raimundo, A.M., Gaspar, A.R., & Quintela, D.A. (2019). Globe Temperature and Its Measurement: Requirements and Limitations. *Annals of Work Exposures and Health*, 63(7), 743-758. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxz042>
- Staiger, H., & Matzarakis, A. (2020). Accuracy of mean radiant temperature derived from active and passive radiometry. *Atmosphere*, 11(8), 1-22. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080805>
- Tan, C.L., Wong, N.H., & Jusuf, S.K. (2013). Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment. *Building and Environment*, 64, 118-129.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.012>
- Tang, P., & Li, Q. (2022). Evaluation of the observation methods of outdoor mean radiant temperature in a subtropical city. *Building and Environment*, 207(PB), 108462.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108462>
- Teitelbaum, E., Alsaad, H., Aviv, D., Kim, A., Voelker, C., Meggers, F., & Pantelic, J. (2022). Addressing a systematic error correcting for free and mixed convection when measuring mean radiant temperature with globe thermometers. *Scientific Reports*, 12(1), 1-18.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10172-5>
- Teitelbaum, E., Chen, K.W., Meggers, F., Guo, H., Houchois, N., Pantelic, J., & Rysanek, A. (2020). Globe thermometer free convection error potentials. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59441-1>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 1983-1993. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>
- Vanos, J.K., Rykaczewski, K., Middel, A., Vecellio, D.J., Brown, R.D., & Gillespie, T.J. (2021). Improved methods for estimating mean radiant temperature in hot and sunny outdoor settings. *International Journal of Biometeorology*, 65(6), 967-983. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02131-y>
- Verein Deutscher Ingenieure. (2008). *VDI 3787 – Part 2: Environmental meteorology Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level Part I: Climate*. Berlin: Beuth.
- Vernon, H. (1932). The measurement of radiant heat in relation to human comfort. *Journal of Industrial Hygiene*, 14, 95-111.

- Wang, S., & Li, Y. (2015). Suitability of acrylic and copper globe thermometers for diurnal outdoor settings. *Building and Environment*, 89, 279-294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.002>
- Weih, P., Staiger, H., Tinz, B., Batchvarova, E., Rieder, H., Vuilleumier, L., Maturilli, M., & Jendritzky, G. (2012). The uncertainty of UTCI due to uncertainties in the determination of radiation fluxes derived from measured and observed meteorological data. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 537-555. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0416-7>

Summary

The most major problem experienced in analysing the human heat balance is the precise determination of the amount of energy being absorbed by a human organism under dynamically changing solar conditions, and given the presence in the vicinity of many different surfaces capable of absorbing, emitting or reflecting solar radiation in different ways. This ensures that studies relating to thermal comfort of necessity deploy certain simplifications in regard to the radiation field surrounding a human body, in particular the concept of mean radiant temperature (Mrt). Values for this can either be derived from direct instrumental measurements, or can be calculated using one microclimate model or another. The most accurate way of determining Tmrt outdoors entails integral radiation measurements and the calculation of angular factors (i.e. the proportion of radiation received by the human body from different directions). This method involves simultaneous measurement of long- and short-wave radiation flux densities in six directions, which requires three sets of net radiometers. Although this method of Mrt determination describes the radiation environment accurately and independently of the variable wind field, it requires the use of expensive and complex measurement devices. A cheap and easy-to-operate alternative is offered by the globe thermometer as, in steady-state conditions, readings from its internal air-temperature sensor (t_g) will reflect the convective and radiative heat exchange ongoing in the vicinity. It is by knowing t_g , as well as globe emissivity and diameter, that Mrt may be calculated.

In the research detailed here, three different globe thermometers were used to determine Mrt, i.e. a 15-cm standard globe thermometer (SGT) and two 4-cm custom-made acrylic globe thermometers (AGT) painted in black and grey. The measurements were conducted in the summer in Warsaw, on two selected green areas, under sunny and warm-weather conditions. In each location Mrt measurements were taken in two spots – in the shade of trees and in the open grassy spaces, with high SVF. Our results demonstrate that globe thermometers, though relatively cheap and less-complex instruments for determining Mrt, can be used to only a limited extent, due to the high level of instability of their indications under significant radiative loads. We have further demonstrated as follows:

- a) The type of globe thermometer applied has no impact on Mrt values measured in the shade, while in circumstances of high solar radiation there are major differences in the indications provided by individual instruments. In the presence of high radiative loads, SGT records the highest globe temperature (t_g), which results in the highest Mrt values, while the 4-cm grey AGT exhibits a general trend towards underestimation of Mrt. In extreme cases, the differences in Mrt values between the readings of SGT and grey AGT can be as much as 20°C.

- b) The globe thermometer is affected to a significant degree by short-wave radiation and air velocity. In light wind conditions (0-2.5 m/s), the stronger the air movement, the higher are the Mrt values, and the greater their variation in relation to method of measurement.
- c) For environments with intensive solar radiation, the use of the correction to the grey AGT indications (after Thorsson et al., 2007 and Vanos et al., 2021) leads to similar Mrt values, albeit with values obtained being higher than those calculated by reference to the ISO standard. In any case, the application of these corrections for shaded conditions is unjustified, and indeed may lead to wrong conclusions where the method after Vanos et al. is applied.
- d) The method of estimating Mrt affects the values of biometeorological indicators calculated on the basis thereof. In the case of UTCI, under sunny conditions the differences arising out of measurements made using the three globe thermometers are not as large (up to 1 thermal stress category) as when assessment is confined to absolute Mrt values. In turn, in conditions of shade, differences in UTCI ratings between devices are negligible. However, UTCI calculated on the basis of the Mrt modelled in *Bio klima* proves to be underestimated consistently (in conditions of both sun and shade), and departures from the SGT can be of as many as 2 thermal stress categories under UTCI.

Given the way in which the globe thermometer is found to be highly fluctuant, and provides only an imprecise estimate of Mrt, further research will need to be done to ensure the development of inexpensive and easy-to-operate equipment for Mrt measurement. Furthermore, in circumstances of high solar radiation and a moderate wind speed, it is recommended that use be made of the 6-directional reference method (using three net-radiometers), given that globe thermometers prove very sensitive to the influence of wind and short-wave radiation. While it is acceptable to use globe thermometers wherever the application of reference methodology proves impossible, this is on the condition that indications are corrected for using one of the applicable correction formulae, while there is also accompanying assessment of the degree of uncertainty of results related to the particular environment. Equally, when Mrt measurements are made in conditions of shade, or of cloud and light winds, globe thermometers will offer fairly reliable results, regardless of the size or colour of the globe used.