

Krzysztof Błażejczyk

Instytut Geografii Akademii Bydgoskiej

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN

Robert Twardosz

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

Uniwersytet Jagielloński

STRUKTURA BILANSU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA W RÓŻNYCH WARUNKACH POGODOWYCH I PRZY RÓŻNEJ AKTYWNOŚCI FIZYCZNEJ

Wprowadzenie

Warunki pogodowe silnie wpływają na bilans cieplny człowieka przebywającego na wolnym powietrzu (Błażejczyk 2001). Nieliczne badania w tym zakresie odnoszą się do krótkich ekspozycji (do 1-2 godzin) w porze dziennej (Błażejczyk i in. 1999; Nielsen i in. 1988). Badania bilansu cieplnego człowieka w warunkach długotrwałego przebywania na wolnym powietrzu należą do rzadkości, zwłaszcza jeśli uwzględnia się godziny nocne (Błażejczyk, Twardosz 2002). Celem pracy jest przedstawienie wstępnych wyników badań dotyczących struktury bilansu cieplnego ciała człowieka w czasie wydłużonej ekspozycji na wolnym powietrzu w ciągu dnia i nocy: a) w różnych warunkach meteorologicznych oraz b) przy różnej aktywności fizycznej. Analiza dotyczy warunków klimatycznych części Pogórza Karpackiego.

Materiały i metody

W opracowaniu zostały wykorzystane dane meteorologiczne zebrane podczas programowych terenowych praktyk specjalizacyjnych z zakresu klimatologii dla studentów III roku studiów dziennych geografii w dniach 22-27

czerwca 2001 oraz 7-10 lipca 2003 r. na stacji naukowej Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ w Gaiku-Brzezowej. Badania terenowe zostały przeprowadzone w ramach współpracy zakładów klimatologii IGiGP UJ w Krakowie z IGiPZ PAN w Warszawie oraz IG AB w Bydgoszczy. Stacja w Gaiku-Brzezowej znajduje się w umiarkowanie ciepłym piętrze klimatycznym, na Pogórzu Wielickim w odległości 25 km na południe od Krakowa ($\varphi=49^{\circ}52'N$, $\lambda=20^{\circ}04'E$, $H_s=302$ m n.p.m.).

Na terenie stacji meteorologicznej wykonywane były standardowe pomiary meteorologiczne na wysokości 1,5 m n.p.g. Mierzono i rejestrowano automatycznie: natężenie całkowitego promieniowania słonecznego (K_{glob} - miernikami CM3 firmy Kipp&Zonen), prędkości wiatru (v - anemometrami czasowymi firmy Casella) oraz temperatury (T_a) i wilgotności względnej powietrza (f - minirejestratorami HOBO Pro firmy Onset Computer Corporation). Badania fizjologiczne prowadzone były na grupie kilkudziesięciu studentów w wieku od 21 do 25 lat, u których zachowana była prawidłowa proporcja wzrostu do ciężaru ciała. Temperaturę skóry mierzono przy użyciu termicznych minirejestratorów HOBO Pro w trzech punktach na powierzchni ciała: piersi (T_1), przedramieniu (T_2) i udzie (T_3). Średnią temperaturę skóry (T_{sk}) obliczono według następującej formuły:

$$T_{sk} = 0,42 T_1 + 0,19 T_2 + 0,39 T_3$$

Badania prowadzone były przez całą dobę na terenie ogródka meteorologicznego. Obserwatorzy zmieniali się w rytmie co 4 godziny. W 2001 r. poruszali się terenie ogródka ze stałą prędkością około $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (metabolizm $M=90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Natomiast w 2003 r. podczas czterogodzinnej ekspozycji zmieniali swą aktywność fizyczną w przemiennym cyklu: stanie w pozycji wyprostowanej ($M=70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), spacer z prędkością $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($M=120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), siedzenie ($M=60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), spacer ($M=120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Obserwatorzy byli ubrani stosownie do warunków pogodowych, a termoizolacyjność ich odzieży zmieniała się od 0,6 clo w godzinach południowych przy słonecznej cieplej pogodzie do 2,2 clo w czasie wietrznych, chłodnych nocy. Wszelkie zmiany w odzieży były notowane przez obserwatorów. Dodatkowo według przygotowanej skali znaczyli subiektywne odczucia cieplne.

Składowe bilansu cieplnego zostały obliczone na podstawie modelu wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem MENEX_2002 (Błażejczyk 2004a). Ogólne równanie bilansu cieplnego ma postać:

$$M + Q + C + E + Res = S$$

gdzie: M - metaboliczna produkcja ciepła, Q - bilans radiacyjny powierzchni ciała człowieka, C - turbulencyjna wymiana ciepła jawnego (konwekcja), E - turbulencyjna wymiana ciepła utajonego (ewaporacja), Res - straty ciepła w wyniku oddychania, S - saldo wymiany ciepła. Bilans radiacyjny jest sumą pochłoniętego promieniowania słonecznego (R) oraz bilansu promieniowania w zakresie długofalowym (L).

Wszystkie strumienie ciepła są wyrażone w $W \cdot m^{-2}$, a szczegółowe wzory do ich wyznaczenia znajdują się w załączniku 1. Obliczenia składników bilansu cieplnego wykonano przy pomocy programu BioKlima©2.3 (www.igipz.pan.pl/geoekoklimat/blaz/bioklima.htm)

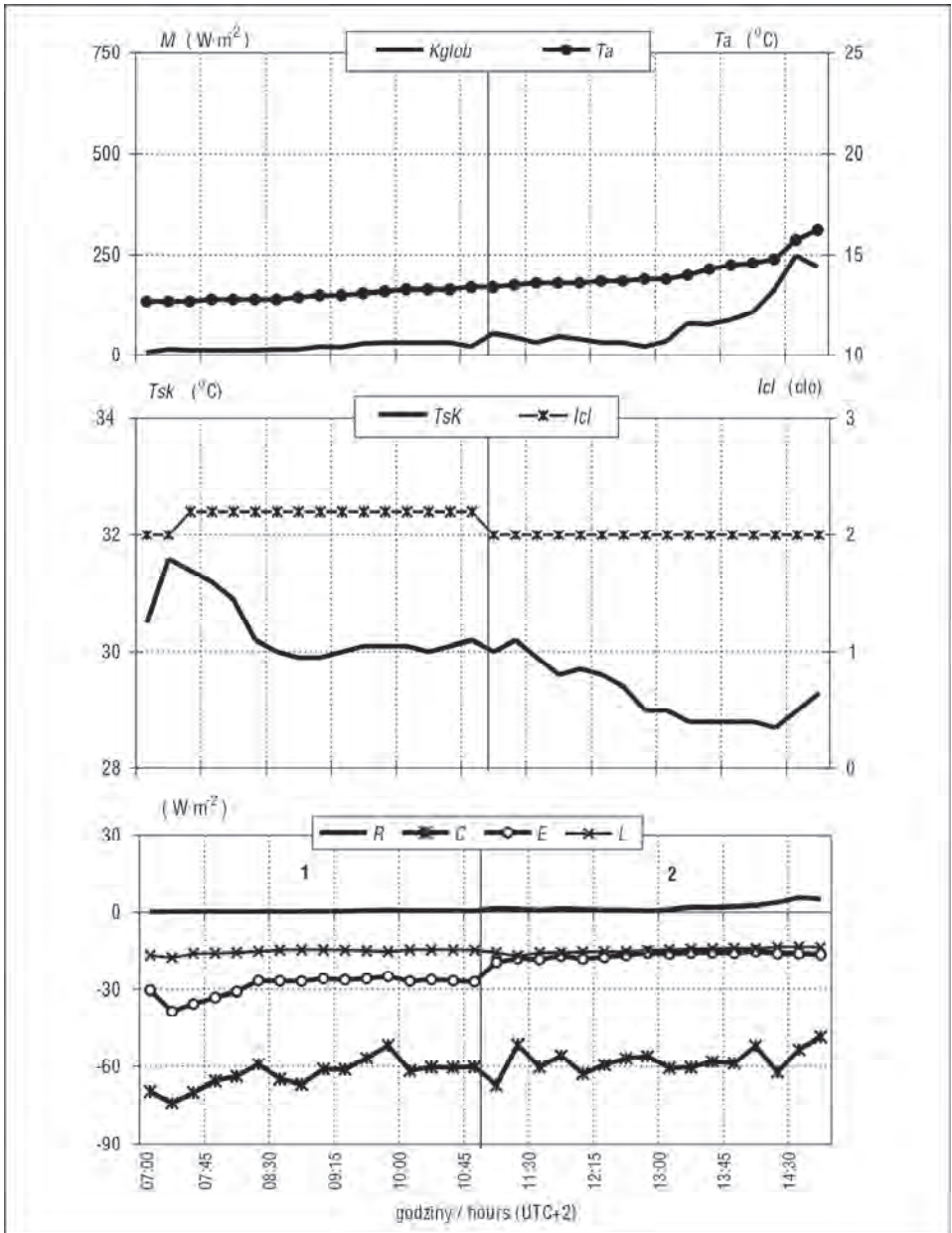
Warunki meteorologiczne a bilans cieplny człowieka

Wyniki badań wykazały duże zróżnicowanie wartości temperatury skóry obserwatorów w zależności od zmieniających się warunków pogodowych. W ciągu nocy temperatura powietrza zmieniała się od około 8 do 17°C, a prędkość wiatru od 0,7 to 5 $m \cdot s^{-1}$. W zależności od warunków meteorologicznych obserwatorzy nosili ubranie o termoizolacyjności odzieży od 0,6 do 2,2 clo. W czasie ekspozycji na wolnym powietrzu przy braku promieniowania słonecznego temperatura skóry zmniejszała się znacząco. Średnio po czterech godzinach ekspozycji była niższa o około 1,8°C niż na początku, a największy zarejestrowany spadek T_{sk} wyniósł 4,0°C.

W czasie ekspozycji w warunkach pogody słonecznej (przy T_a 18-25°C, K_{glob} 300-900 $W \cdot m^{-2}$ i v 1,5-3 $m \cdot s^{-1}$) obserwatorzy nosili odzież o wartości clo 0,6-1,0. Wówczas po 4-godzinnej ekspozycji na wolnym powietrzu następował istotny wzrost temperatury skóry T_{sk} ; średnio wyniósł 2,7°C, a maksymalnie 4,6°C (tab. 1).

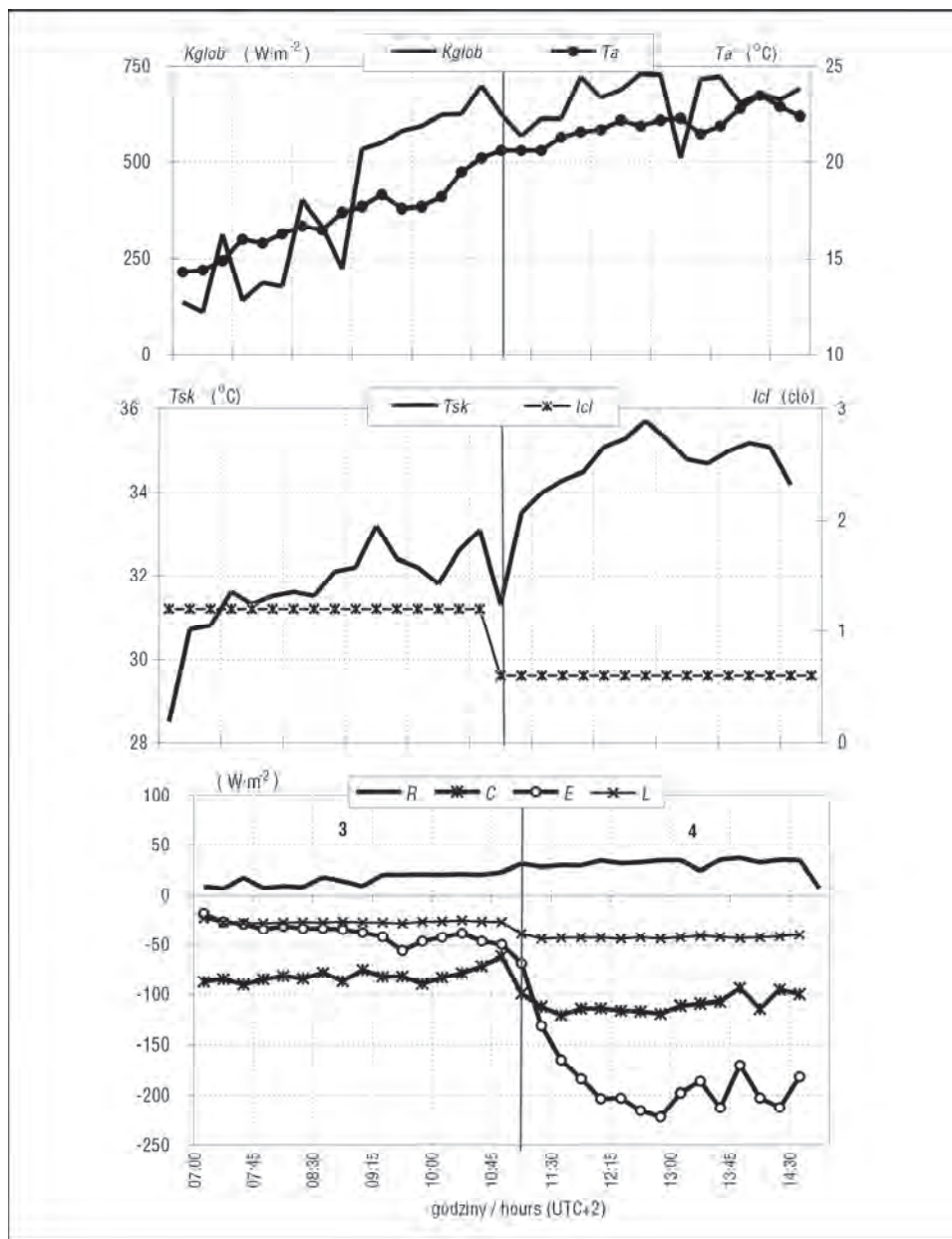
Tab. 1. Średnie wartości poszczególnych elementów meteorologicznych i charakterystyk fizjologicznych obserwatorów w ciągu 4 godzin ekspozycji na wolnym powietrzu
Tab. 1 Mean values of meteorological parameters as well as some physiological characteristics of subjects during 4 hours outdoor exposure

Meteorologiczne/fizjologiczne charakterystyki Meteorological/physiological characteristic	Chłodne noce Cool nights	Ciepłe dni Sunny days
Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)	13,7	20,8
Całkowite promieniowanie słoneczne ($W \cdot m^{-2}$) Global solar radiation ($W \cdot m^{-2}$)	0,0	470,7
Prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$) Wind speed ($m \cdot s^{-1}$)	1,8	2,1
izolacyjność termiczna odzieży (clo) Clothing insulation (clo)	1,5	0,7
Temperatura skóry (°C) Skin temperature (°C)	30,3	33,5
Średnia wartość spadku/wzrostu temperatury skóry (°C) Mean value of skin temperature decrease/increase (°C)	-1,8	2,7
Maksymalna wartość spadku/wzrostu temperatury skóry (°C) Maximal value of skin temperature decrease/increase (°C)	-4,0	4,6



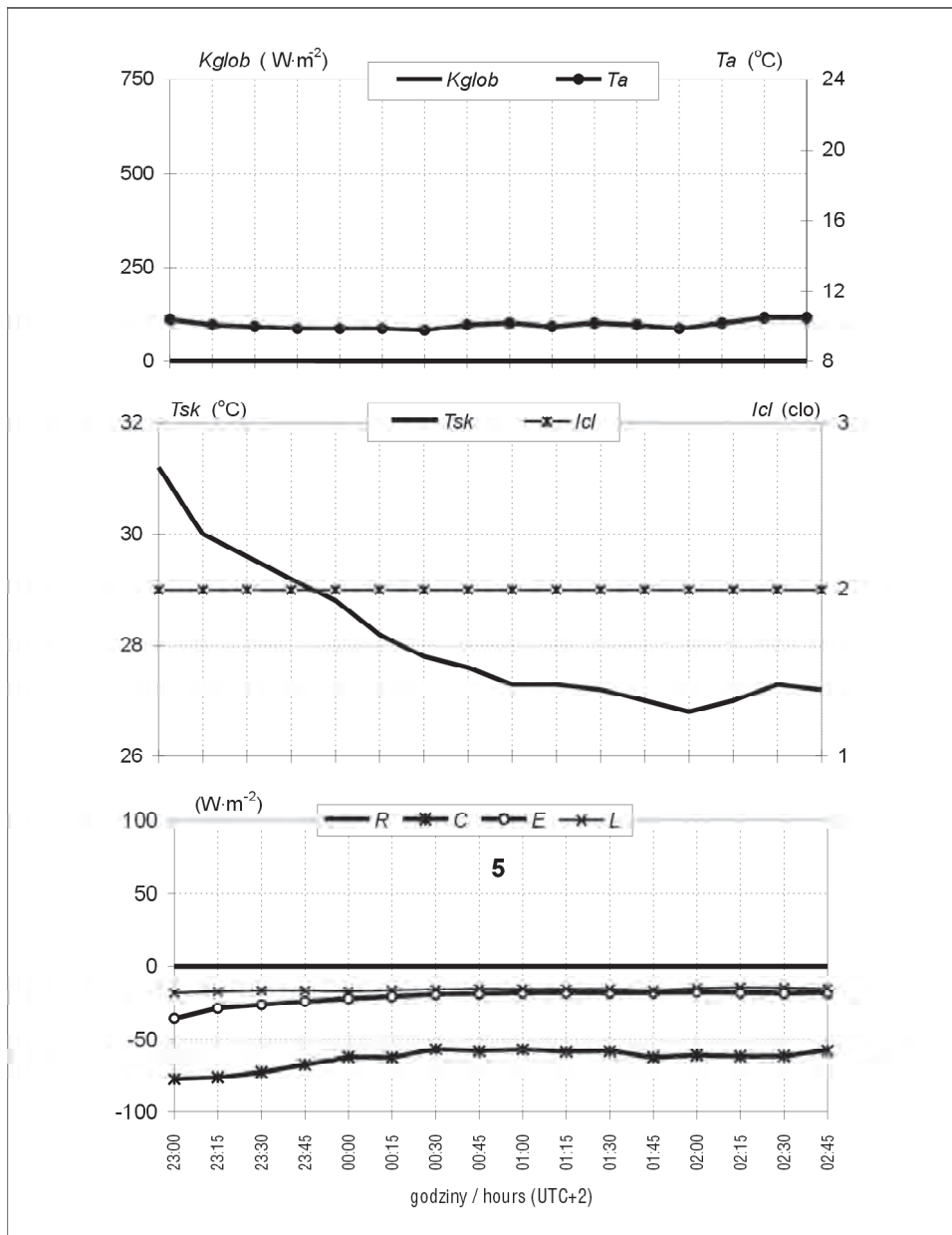
Ryc. 1. Wahania temperatury skóry (T_{sk}) i strumieni wymiany ciepła w czasie 4-godzinnej ekspozycji na wolnym powietrzu w okresie chłodnej nocy (obserwatorzy: 1 - 21-letni mężczyzna, 2 - 22-letnia kobieta)

Fig. 1. Changes in skin temperature (T_{sk}) and heat exchange components during 4 hours outdoor exposure at cold night (observers: 1 - male, 21 years old, 2 - female, 22 years old)



Ryc. 2. Wahania temperatury skóry (T_{sk}) i strumieni wymiany ciepła w czasie 4-godzinnej ekspozycji na wolnym powietrzu w okresie chłodnej nocy (obserwatorzy: 3 – 23-letni mężczyzna, 4 – 21-letnia kobieta)

Fig. 2. Changes in skin temperature (T_{sk}) and heat exchange components during 4 hours outdoor exposure at cold night (observers: 3 – male, 23 years old; 4 – female, 21 years old)



Ryc. 3. Wahania temperatury skóry (T_{sk}) i strumieni wymiany ciepła w czasie 4-godzinnej ekspozycji na wolnym powietrzu w okresie chłodnej nocy (obserwator: 5 - 21-letni mężczyzna)
 Fig. 3. Changes in skin temperature (T_{sk}) and heat exchange components during 4 hours outdoor exposure at cold night (observer: male, 5 - 21 years old)

W czasie ekspozycji w godzinach nocnych lub w ciągu dnia w warunkach chłodnej pogody stwierdzono typowy wzrost temperatury skóry T_{sk} w ciągu pierwszych 15-45 minut, a następnie intensywny jej spadek (obserwator 1, ryc. 1). W warunkach pogody słonecznej i ciepłej T_{sk} wzrastała – z niewielkimi wahaniami – w ciągu całej ekspozycji (ryc. 2). Wahania temperatury skóry następują zatem pod wpływem łącznego oddziaływania czynników meteorologicznych i reakcji fizjologicznych poprzez wymianę składników ciepła.

W warunkach niskiej temperatury powietrza i braku promieniowania słonecznego w połączeniu z intensywnym ruchem powietrza przeważają straty ciepła drogą konwekcji. Ich natężenie dochodzi do $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Pozostałe strumienie ciepła (parowanie, wypromieniowanie długofalowe) są znacznie niższe. W takich warunkach obserwatorzy określali swe odczucia cieplne jako „chłodno” lub nawet „bardzo chłodno” (ryc. 1).

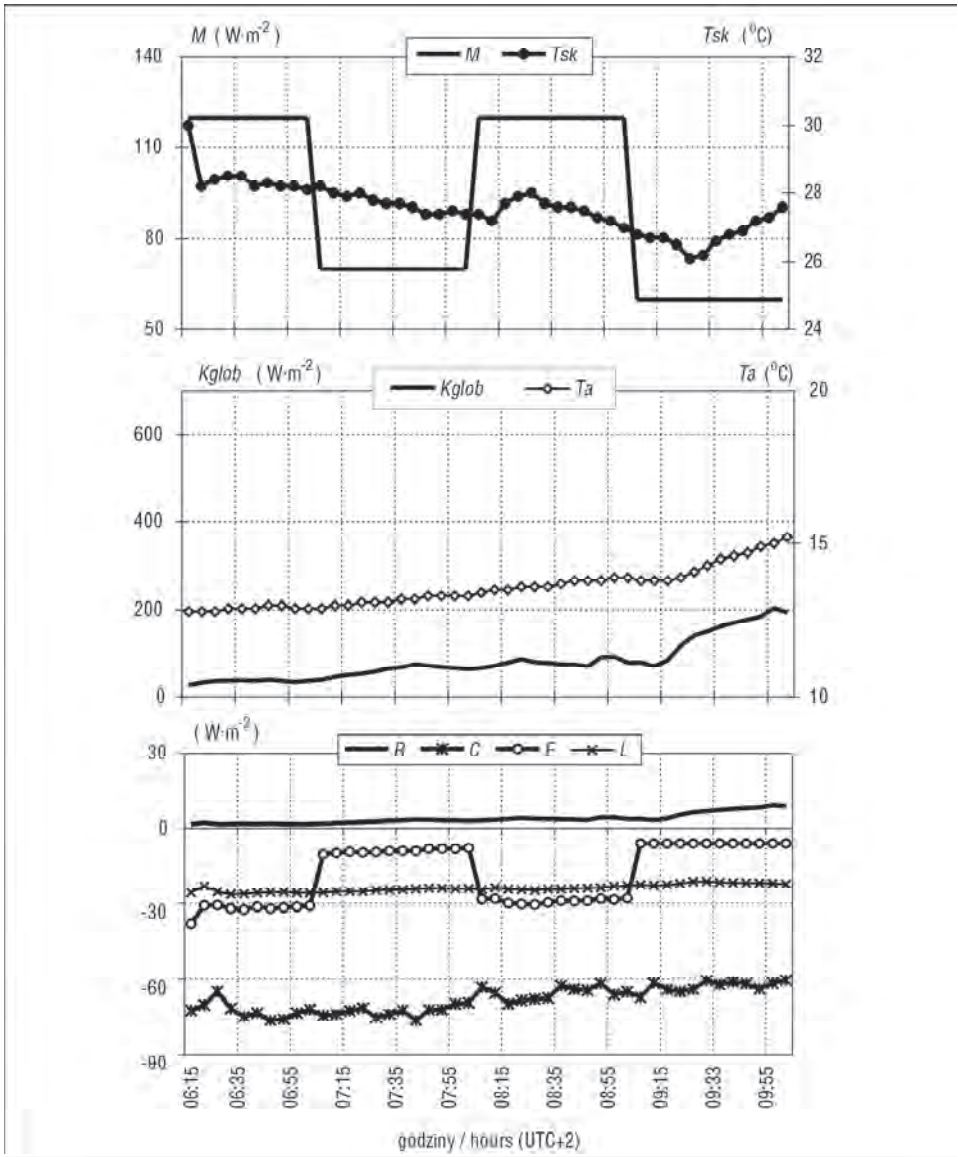
W warunkach ciepłej pogody dominującą formą eliminacji ciepła z organizmu jest parowanie potu. W czasie intensywnego promieniowania słonecznego wartość strat przez parowanie osiągnęła w krótkim okresie $250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (obserwator 4, ryc. 2). To nawiązuje do bardzo wysokiej temperatury skóry (około $35,5^\circ\text{C}$) oraz równoczesnego intensywnego pocenia się obserwatorów.

Ekspozycji w godzinach nocnych towarzyszył istotny spadek temperatury skóry. Duże różnice temperatury skóry i temperatury powietrza oraz silny wiatr powodowały intensywne straty ciepła drogą konwekcji. Po pewnym czasie prowadziło to do zmniejszenia się gradientu termicznego pomiędzy skórą a powietrzem i do redukcji konwekcyjnych strat ciepła (ryc. 3). Tym niemniej, wydłużona ekspozycja organizmu na warunki chłodu objawiała się wzrostem dyskomfortu chłodu.

Aktywność fizyczna a bilans cieplny

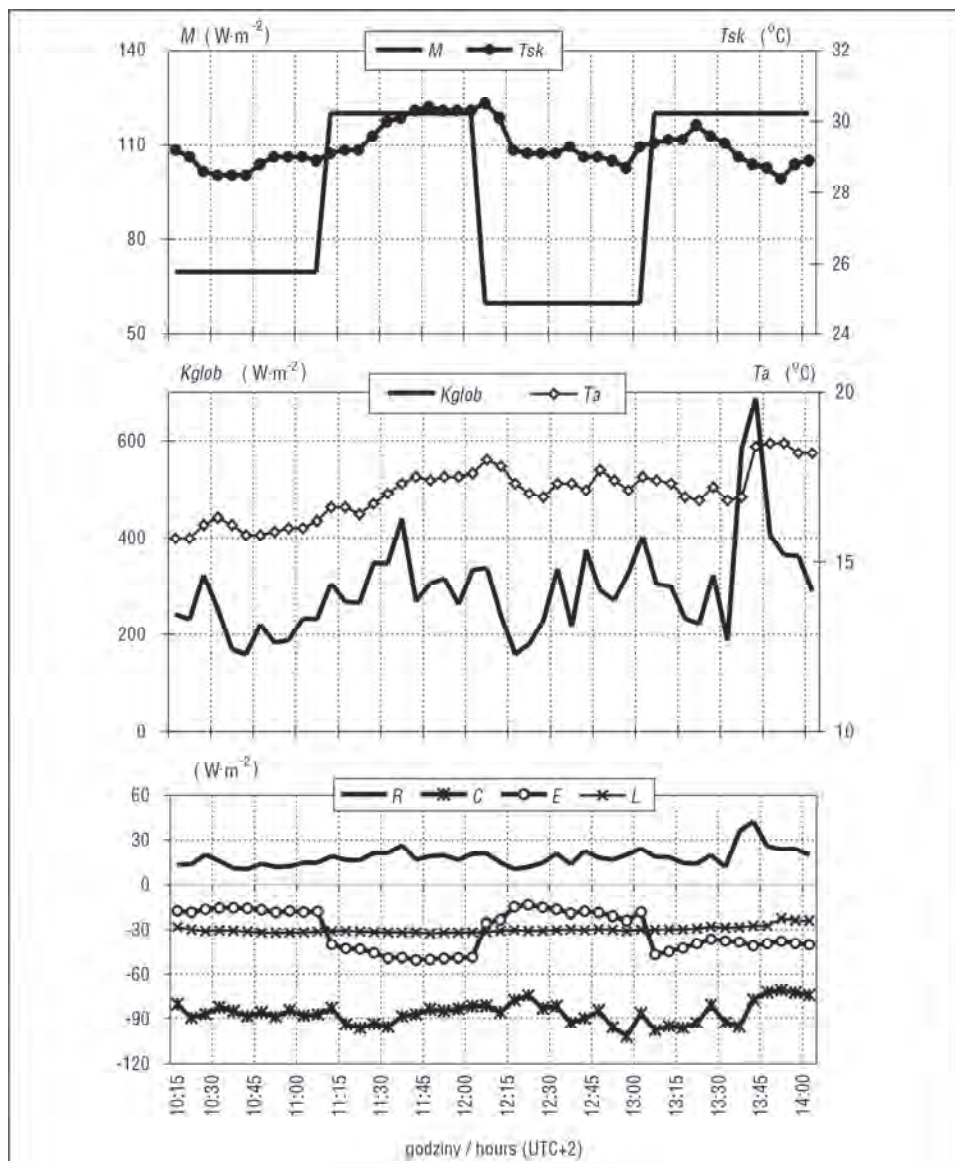
Przedmiotem badań w 2003 r. był wpływ aktywności fizycznej na bilans cieplny człowieka. W godzinach nocnych temperatura powietrza wynosiła $12\text{-}15^\circ\text{C}$, a prędkość wiatru nie przekraczała $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. W ciągu dnia dominowało zachmurzenie zmienne, od 40 do 90% pokrycia nieba, temperatura wynosiła $15\text{-}18^\circ\text{C}$, a prędkość wiatru od 1 do $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podczas 4-godzinnej ekspozycji obserwatorzy zmieniali co 1 godzinę swą aktywność fizyczną w zakresie: siedzenie, stanie, spacer z prędkością $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

W godzinach porannych, przy braku lub przy niewielkim dopływie promieniowania słonecznego, temperatura skóry zmieniała się nieznacznie w różnych fazach aktywności fizycznej. Stosunkowo niska i wyrównana temperatura powietrza i stała prędkość wiatru powodowały, że straty ciepła przez wypromieniowanie długofalowe (L) oraz przez konwekcję (C) tylko nieznacznie zmieniały się podczas ekspozycji. Znacznym zmianom podlegały natomiast ewaporacyjne straty ciepła; wahały się one od około $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w fazach niewielkiej aktywności fizycznej do około $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ podczas zwiększonego wysiłku fizycznego (ryc. 4).



Ryc. 4. Zmiany metabolicznej produkcji ciepła (M), temperatury skóry (T_{sk}), temperatury powietrza (T_a) oraz natężenia poszczególnych strumieni ciepła (R , C , E , L) podczas 4-godzinnej ekspozycji w warunkach niewielkiego dopływu całkowitego promieniowania słonecznego (K_{glob}) (obserwator: 22-letni mężczyzna)

Fig. 4. Changes in metabolism (M), skin temperature (T_{sk}), air temperature (T_a) and particular heat fluxes (R , C , E , L) during 4-hours exposure at low income of global solar radiation (K_{glob}) (observer: male, 22 years old)



Ryc. 5. Zmiany metabolicznej produkcji ciepła (M), temperatury skóry (T_{sk}), temperatury powietrza (T_a) oraz natężenia poszczególnych strumieni ciepła (R , C , E , L) podczas 4-godzinnej ekspozycji w warunkach umiarkowanego dopływu całkowitego promieniowania słonecznego (K_{glob}) (obserwator: 23-letni mężczyzna).

Fig. 5. Changes in metabolism (M), skin temperature (T_{sk}), air temperature (T_a) and particular heat fluxes (R , C , E , L) during 4-hours exposure at moderate income of global solar radiation (K_{glob}) (observer: male, 23 years old)

W warunkach zwiększonego dopływu promieniowania słonecznego znacząco zmienia się gospodarka cieplna organizmu. Zwiększony dopływ K_{glob} prowadzi do podwyższenia się temperatury skóry, zwłaszcza podczas faz zwiększonej aktywności fizycznej. Przy wysokich wartościach T_{sk} i stosunkowo niskich wartościach temperatury powietrza zwiększa się gradient termiczny skóra-powietrze, co skutkuje znacznym zwiększeniem konwekcyjnych strat ciepła. Aktywność fizyczna ma tylko nieznaczny wpływ na ich natężenie. Wyraźnie zmienia się natomiast natężenie ewaporacyjnych strat ciepła, od 15-20 $W \cdot m^{-2}$ podczas siedzenia i stania do 50-60 $W \cdot m^{-2}$ w czasie spaceru. O ile w czasie spoczynku obserwatorzy rejestrowali głównie odczucie chłodu, a nawet zimna, to podczas spaceru ich odczucia cieplne zmieniały się w kierunku komfortu, a nawet ciepła (ryc. 5).

Podsumowanie

Uzyskane wyniki dotyczące struktury bilansu cieplnego ciała człowieka w czasie wydłużonej ekspozycji na świeżym powietrzu są zgodne z wynikami opublikowanymi przez innych autorów (Błażejczyk 2000; Freitas, Ryken 1989; Krawczyk, Błażejczyk 1991). Fizjologiczna reakcja organizmu na warunki chłodu i ciepła jest podobna do tej, jaką się obserwuje w komorach klimatycznych (Clark, Edholm 1985; Parsons 1993). Mechanizmy termoregulacyjne u człowieka prowadzą do stabilizacji wymiany strumieni ciepła z otoczeniem po około 1-2 godzin ekspozycji, nawet przy zmieniających się warunkach meteorologicznych.

Zmiana aktywności fizycznej ze spoczynku do powolnego spaceru zaznacza się wyraźnym wzrostem metabolizmu oraz niewielkim podwyższeniem temperatury skóry (zwłaszcza podczas pogody słonecznej). Wynikiem tego są wyraźne zmiany ewaporacyjnych strat ciepła z organizmu oraz złączenie odczuć cieplnych zimna i chłodu.

Wydaje się, że w warunkach długotrwałej ekspozycji w terenie otwartym większy wpływ na bilans cieplny człowieka i jego odczucia cieplne mają warunki meteorologiczne niż zmiana aktywności fizycznej w niewielkim zakresie. Dopiero znaczy wzrost aktywności fizycznej (do poziomu metabolizmu 170-200 $W \cdot m^{-2}$) powoduje znaczące modyfikacje gospodarki cieplnej organizmu (Błażejczyk 2005).

LITERATURA

- Błażejczyk K., 2000, *Influence of Extremal Heat Waves on Man*, Prace Geograficzne IG UJ, 108, 101-108.
- Błażejczyk K., 2001, *Bilans cieplny człowieka jako narzędzie badań bioklimatycznych*, Przegląd Geograficzny, 73, 4, 535-554.
- Błażejczyk K., 2004a, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 192.
- Błażejczyk K., 2004b, *Radiation Balance in Man in Various Meteorological and Geographical Conditions*, Geographia Polonica, 77, 1, 63-76.
- Błażejczyk K., 2005, *New Indices to Assess Thermal Risks Outdoors*, (w druku).

- Błażejczyk K., Twardosz R., 2002, *Changes in Human Heat Balance during Prolonged Outdoors Exposition at Various Weather Conditions*, *Environmental Ergonomics*, 10, 71-74.
- Błażejczyk K., Tokura H., Bortkiewicz A., Kato M., Szymczak W., 1999, *Thermoregulatory and Circulatory Reactions in Subjects Exposed to the Sun and Wearing White and Black Clothing*, *Environmental Ergonomics*, 7, 177-181.
- Clark R.P., Edholm O.G., 1985, *Man and His Thermal Environment*, E. Arnold Ltd., London.
- de Freitas C.R., Ryken M.G., 1989, *Climate and Physiological Heat Strain during Exercise*, *International Journal of Biometeorology*, 33, 157-164.
- Krawczyk B., Błażejczyk K., 1991, *Wstępne badania bilansu cieplnego ciała człowieka na pustyni Kara-kum*. *Przegląd Geograficzny*, 63, 1/2, 143-154.
- Nielsen B., Kassow K., Aschengreen F.E., 1988, *Heat Balance during Exercise in the Sun*, *European Journal of Applied Physiology*, 58, 189-196.
- Parsons K.C., 1993, *Human Thermal Environments*, Taylor & Francis Publication, London.

HUMAN HEAT BALANCE STRUCTURE AT VARIOUS WEATHER AND AT DIFFERENT PHYSICAL ACTIVITY

SUMMARY

Weather conditions strongly influence human heat balance outdoors. Some of the existing research refers also to various physical activity outdoors. The aim of the paper is to present preliminary results of the studies dealing with the changes in the human heat balance during prolonged outdoor exposition at various meteorological conditions, both at the night and at the day time. We have also examined human heat balance during various physical activity outdoors.

The studies were carried out on the research station of the Jagiellonian University in Gaik-Brzezowa (25 km S from Kraków, longitude 49°52' N, latitude 20°04' E, Hs=302 m above sea level). 20 young volunteers within the age category of 21-25 years and with normal weight to high ratio were examined. Skin temperature of torso, forearm and thigh was measured and registered every 1 min. Mean skin temperature (T_{sk}) was calculated as follows: $T_{sk} = 0.42 T_{torso} + 0.19 T_{forearm} + 0.39 T_{thigh}$. The observers were exposed outdoors for 4 hours in upright posture (July 2001) and during varying activity (M=60, 70, 120 W m⁻² - July 2003). The observers reported their thermal sensations. Simultaneously, meteorological elements, i.e. air temperature (T_a), solar radiation (global - K_{glob} , direct - K_{dir} , diffuse - K_{dif} and reflected - K_{ref}), wind speed (v) and air vapour pressure (vp) were registered by automatic weather station. The human heat balance components were calculated for every person subject with the use of man-environment heat exchange model MENEX_2002 (Błażejczyk 2004a).

The results show great influence of actual weather on human heat balance. During outdoors exposure the solar radiation is of special importance. Its lack or presence stimulate physiological response to cold and to warm conditions. The range of adaptation processes seems to be similar to observed in climatic chambers. Acclimation mechanisms of an organism lead to stabilisation of man-environment heat exchange components after about 1-2 hours exposure even at varying meteorological conditions. Physical activity significantly influence skin temperature and evaporative heat loss outdoors. However, adaptation processes lead to relative equilibrium of heat gains and heat losses.

Translated by Author

Załącznik 1. Wzory służące do wyznaczania poszczególnych strumieni ciepła, model MENEX_2002 (Błażejczyk 2004a)

Annexe 1. Equations for the calculations of particular components of the human heat balance, MENEX_2002 model (Błażejczyk 2004a)

<p><u>Bilans ciepły czlowieka:</u> Human heat balance: $M+Q+C+E+Res = S$</p>	<p>hc – współczynnik turbulencyjnej wymiany ciepła ($K \cdot W^{-1} \cdot m^2$) hc' – współczynnik turbulencyjnej wymiany ciepła poprzez odzież ($K \cdot W^{-1} \cdot m^2$) he – współczynnik ewaporacyjnej wymiany ciepła ($hPa \cdot W^{-1} \cdot m^2$)</p>
<p><u>Bilans radiacyjny (Q):</u> Radiation balance (Q): $Q = L + R$ $L = (0.5 \cdot Lg + 0.5 \cdot La - Ls) \cdot lrc$ $Lg = 5.5 \cdot 10^{-6} \cdot (273 + Tg)^4$ $La = 5.5 \cdot 10^{-6} \cdot (273 + t)^4 \cdot (0.82 - 0.25 \cdot 10^{(0.184 - t/25)})$ $Ls = 5.39 \cdot 10^{-6} \cdot (273 + Tsk)^4$ $lrc = hc' / (hc' + hc + 21.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)$ $hc = (0.013 \cdot ap - 0.04 \cdot t - 0.503) \cdot (v + v')^{0.4}$ $hc' = (0.013 \cdot ap - 0.04 \cdot t - 0.503) \cdot 0.53 / lcl \cdot [1 - 0.27 \cdot (v + v')^{0.4}]$ $lcl = 2.1455 - 0.0618 \cdot t$</p>	<p>lcl – izolacyjność termiczna odzieży (clo) le – współczynnik osłabienia ewaporacyjnego przepływu ciepła przez odzież (bez wymiaru) lrc – współczynnik osłabienia konwekcyjnego i radiacyjnego przepływu ciepła przez odzież (bez wymiaru) L – bilans promieniowania długofalowego ($W \cdot m^{-2}$) Ls – wypromieniowanie z powierzchni ciała ($W \cdot m^{-2}$) La – promieniowanie zwrotne atmosfery ($W \cdot m^{-2}$) Lg – promieniowanie ciepłe podłoża ($W \cdot m^{-2}$) M – metabolizm ($W \cdot m^{-2}$)</p>
<p>Pochłonięte promieniowanie słoneczne (R) wyznacza się według modeli: SolDir, SolGlob, SolAll lub SolMrt (Błażejczyk 2004b)</p>	<p>R – pochłonięte promieniowanie słoneczne ($W \cdot m^{-2}$) RH – wilgotność względna powietrza (%) S – saldo wymiany ciepła ($W \cdot m^{-2}$)</p>
<p><u>Ewaporacyjne straty ciepła (E):</u> Evaporative heat loss (E): $E = he \cdot (vp - vsk) \cdot w \cdot le \cdot [0.42 \cdot (M - 58) - 5.04]$ $vsk = e^{(0.058 \cdot Tsk - 2.009)}$ $w = 1.031 / (37.5 - Tsk) - 0.065$ (at $Tsk > 36.5^\circ C$ $w = 1.0$, at $Tsk < 22^\circ C$ $w = 0.001$) $he = [t \cdot (0.00006 \cdot t - 0.00002 \cdot ap + 0.0) + 1] + 0.02 \cdot ap - 0.773$ $le = hc' / (hc' + hc)$</p>	<p>t – temperatura powietrza ($^\circ C$) T – temperatura powietrza (K) Tg – temperatura podłoża ($^\circ C$) Tsk – temperatura skóry ($^\circ C$) v – prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$) v' – prędkość poruszania się człowieka ($m \cdot s^{-1}$) vp – ciśnienie pary wodnej (hPa) vsk – ciśnienie pary wodnej na powierzchni skóry (hPa) w – współczynnik uwilgotnienia skóry (bez wymiaru)</p>
<p><u>Konwekcyjna wymiana ciepła (C):</u> Convective heat exchange (C): $C = hc \cdot (t - Tsk) \cdot lrc$</p>	
<p><u>Straty ciepła na oddychanie (Res):</u> Respiratory heat loss (Res): $Res = 0.0014 \cdot M \cdot (t - 35) + 0.0173 \cdot M \cdot (0.1 \cdot vp - 5.624)$</p>	