

**NIKTÓRE CECHY BILANSU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA
W OKRESIE ZIMOWYM W WARUNKACH KLIMATU SUBPOLARNEGO
PÓŁNOCNEJ FINLANDII**

SOME FEATURES OF HUMAN HEAT BALANCE DURING WINTER SEASON
IN SUBPOLAR CLIMATE OF NORTHERN FINLAND

Krzysztof Błażejczyk¹, Dusan Fiala², Mark Richards³, Haanu Rintamäki⁴, Reija Ruuhela⁵

¹ – Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
ul. Twarda 51/55, 00–818 Warszawa
k.blaz@twarda.pan.pl

² – Institute of Construction Economics, University of Stuttgart
Keplerstrasse 11, 70174 Stuttgart, Germany

³ – Laboratory of Protection and Physiology, Empa Swiss Federal Laboratories for Materials Testing & Research
Lerchenfeldstrasse 5, 9014 St Gallen, Switzerland

⁴ – Oulu Regional Institute of Occupational Health
Aapistie 1, FIN-90220 Oulu, Finland

⁵ – Climate Service, Finnish Meteorological Institute
P.O. Box 503, 00101 Helsinki, Finland

Zarys treści. Artykuł prezentuje wyniki terenowych badań bioklimatyczno-fizjologicznych bilansu cieplnego człowieka oraz niektórych parametrów fizjologicznych organizmu w warunkach zimowych w strefie klimatu polarnego północnej Finlandii. W trakcie badań obserwowano tempo ochładzania się temperatury twarzy oraz warunki zachowania równowagi cieplnej organizmu podczas długotrwałej ekspozycji terenowej.

Słowa kluczowe: klimat subpolarny, bilans cieplny człowieka, stres zimna, ryzyko odmrożenia.

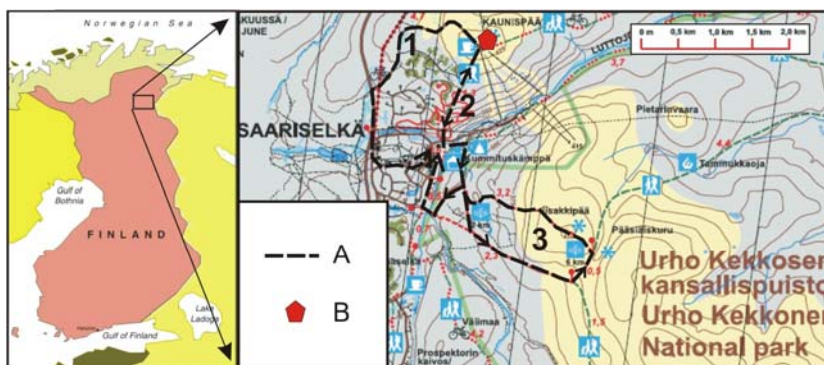
1. Wprowadzenie

Do głównych cech klimatu polarnego należą: niska temperatura powietrza, duża prędkość wiatru oraz wyraźna sezonowość dopływu promieniowania słonecznego (Araźny 2004). Każda z tych cech w sposób istotny oddziałuje na organizm człowieka, powodując określone konsekwencje w jego gospodarce cieplnej (Araźny i Błażejczyk 2007, Szczepankiewicz-Szmyrka i Pereyma 1992, Weller i in. 1994). Zbyt silne bodźce klimatyczne mogą także prowadzić do specyficznych zagrożeń zdrowia, takich jak odmrożenia, wychłodzenie organizmu a nawet hipotermia (Danielsen 1998, Sari i Candas 2000, Tikuisis 1998).

Celem opracowania jest przedstawienie niektórych cech bilansu cieplnego człowieka w warunkach klimatu polarnego północnej Finlandii w sezonie zimowym. Wykorzystano wyniki terenowych pomiarów termofizjologicznych podczas niektórych form aktywności. Eksperyment przeprowadzono w ramach Akcji COST 730 „Towards a universal thermal climate index UTCI for assessing the thermal environment of the human being”.

2. Materiały i metoda

Pomiary terenowe prowadzono w okresie od 5 do 10 lutego 2008 r. w rejonie miasta Saariselka (ryc. 1) w północnej Finlandii ($\varphi=68^{\circ}25'10''N$, $\lambda=27^{\circ}25'31''E$, Hs.=300 m n.p.m.). Termofizjologiczna część badań obejmowała pomiary temperatury skóry twarzy oraz klatki piersiowej za pomocą termopar i rejestratora 177 T4 (TESTO, Niemcy) podczas ekspozycji w terenie otwartym trwającej od 1 do 6 godzin. Podczas ekspozycji poruszano się z prędkością od 3-4 km/godz. (marsz) do 30 km/godz. (zjazd na sankach). Schemat każdej serii pomiarowej zawierają ryciny 2 i 3.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań; A – trasy pomiarów marszrutowych (1 – 6 lutego 2008 r., 2 – 7 i 8 lutego 2008 r., 3 – 9 lutego 2008 r.), B – punkt pomiarów w warunkach postoju

Fig. 1. Location of studied area; A – paths of walking measurements (1 – 6 Feb 2008, 2 – 7 and 8 Feb 2008, 3 – 9 Feb 2008), B – point of IR measurements when standing

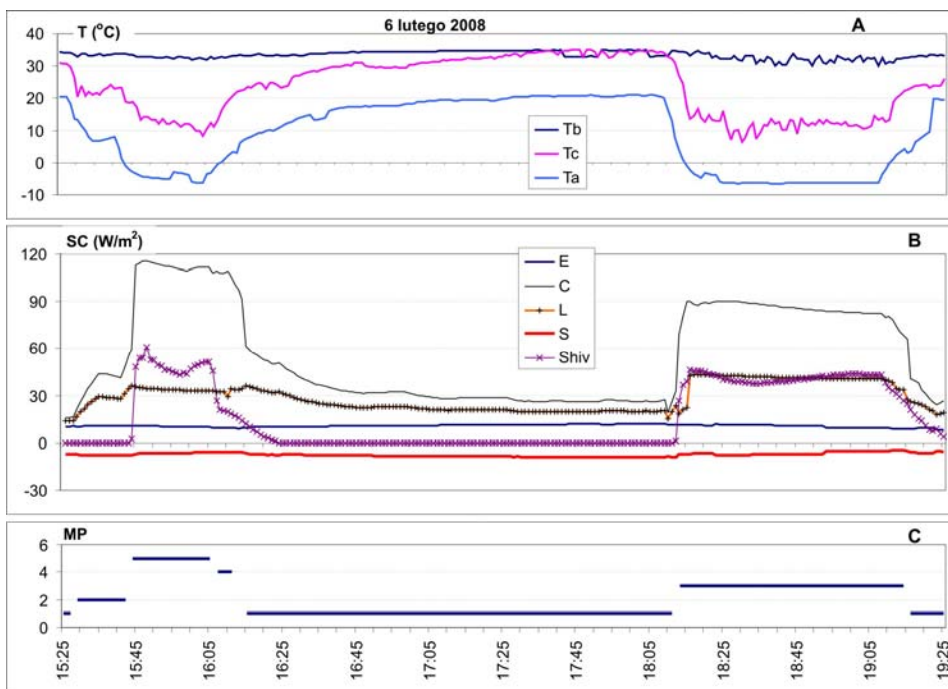
Przeprowadzono także serie pomiarów temperatury twarzy, za pomocą kamery termowizyjnej ThermoCAM PM695 (Flir Systems, Szwecja), podczas ekspozycji w warunkach niskiej temperatury powietrza (około $-12^{\circ}C$) i silnego wiatru (10-12 m/s, w porywach do 20 m/s). Celem pomiarów było określenie tempa schładzania twarzy ekspozowanej na okres 10 minut w kierunku wiatru oraz rozkładu temperatury na powierzchni twarzy. Podczas wszystkich serii pomiarów termofizjologicznych kontrolowano temperaturę i wilgotność powietrza rejestratorami HOBO Pro (Onset Comp. Corporation, USA) oraz prędkość wiatru (anemometrem Robinsona).

Wyniki pomiarów porównano z wartościami temperatury twarzy i klatki piersiowej, obliczonych za pomocą modelu Fiala (Fiala i in. 1999). Niektóre parametry bilansu cieplnego (ryzyko hipotermii, temperatura odczuwalna, stres termofizjologiczny) obliczono za pomocą modelu MENEX_2005 (Błażejczyk 2007, Błażejczyk i Matzarakis 2007).

3. Wyniki

Podczas ekspozycji w terenie otwartym obserwowano istotne zmiany w funkcjonowaniu gospodarki cieplnej organizmu w porównaniu z warunkami wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem typowymi dla ogrzewanych pomieszczeń. Reakcje fizjologiczne podczas ekspozycji różniły się przy tym zależnie od czasu pobytu, aktualnych warunków atmosferycznych i rodzaju aktywności fizycznej.

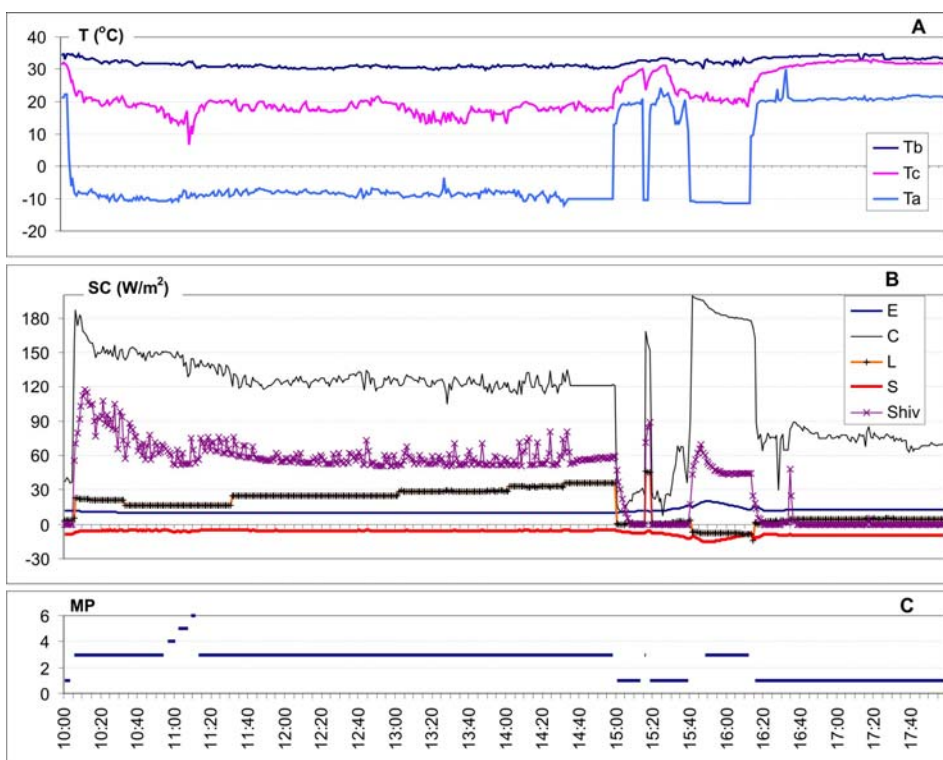
Rycina 2 ilustruje przykład dwóch ekspozycji przedzielonych pobylem w pomieszczeniu. Ekspozycja, w pozycji stojącej, twarzą do wiatru, rozpoczęła się o godz. 15:45, bezpośrednio po wyjściu z samochodu. Temperatura powietrza wynosiła około -5°C , a prędkość wiatru 7-8 m/s. W tym czasie temperatura policzka spadała stopniowo z 23 do 8°C . Po około 20 minutach zmieniono ekspozycję na plecami do wiatru. Spadek temperatury policzka zahamował się. Po 25 minutach pobytu w terenie otwartym udano się do pomieszczenia, w którym przebywano przez około 2 godziny, do 18:10. Temperatura w pomieszczeniu wynosiła $17-20^{\circ}\text{C}$. Temperatura twarzy początkowo szybko wzrosła do około 24°C , a następnie wzrastała powoli aż do $33-34^{\circ}\text{C}$. Podczas drugiej ekspozycji odbywano marsz



Ryc. 2. Przebieg temperatury (T): powietrza (Ta), klatki piersiowej (Tb) i policzka (Tc) oraz strumieni ciepła (SC): parowania (E), unoszenia (C); promieniowania długofalowego (L); salda wymiany ciepła (S) oraz drżenia mięśniowego (Shiv) podczas ekspozycji w różnych miejscach pobytu (MP): 1 – pomieszczenie, 2 – jazda samochodem, 3 – marsz 4 km/godz., 4 – stojąc twarzą do wiatru, 5 – stojąc plecami do wiatru, 6 – zjazd sankami, 6 lutego 2008 r.

Fig. 2. Changes in: temperature of air (Ta), torso (Tb) and cheek (Tc); heat fluxes by evaporation (E), convection (C), long-wave radiation (L), net heat storage (S) and shivering (Shiv) during long lasting exposure in various locations (MP, 1 – indoor, 2 – car, 3 – walking 4 km/h, 4 – standing face to wind, 5 – standing back to wind, 6 – sledge downhill), 6 Feb 2008

po stoku w dół. Charakterystyczny był szybki spadek temperatury twarzy, o blisko 20°C podczas pierwszych 10 minut marszu (co było wynikiem łącznego działania wiatru o znacznej prędkości – 5-7 m/s – oraz ruchu obserwatora z prędkością 4 km/godz.), a następnie jej względna stabilizacja na poziomie 10-13°C. Po ponownym wejściu do pomieszczenia temperatura twarzy wzrosła szybko o kilka stopni Celsjusza. Odmiennie od odsłoniętej części ciała zachowywała się temperatura klatki piersiowej. Podczas całej serii pomiarów utrzymywała się ona na wyrównanym poziomie 30-34°C. Było to wynikiem używania odzieży o termoizolacyjności odpowiedniej dla zachowania równowagi cieplnej (1 clo w pomieszczeniach i 2 clo w terenie otwartym).



Ryc. 3. Przebieg temperatury (T): powietrza (Ta), klatki piersiowej (Tb) i policzka (Tc) oraz strumieni ciepła (SC): parowania (E), unoszenia (C), promieniowania długofalowego (L), salda wymiany ciepła (S) oraz drżenia mięśniowego (Shiv) podczas ekspozycji w różnych miejscach pobytu (MP): 1 – pomieszczenie, 2 – jazda samochodem, 3 – marsz 4 km/godz., 4 – stojąc twarzą do wiatru, 5 – stojąc plecami do wiatru, 6 – jazda sankami, 9 lutego 2008 r.

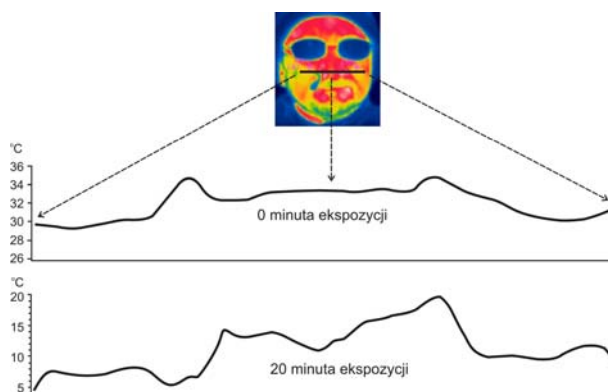
Fig. 3. Changes in: temperature of air (Ta), torso (Tb) and cheek (Tc); heat fluxes by evaporation (E), convection (C), long-wave radiation (L), net heat storage (S) and shivering (Shiv) during long lasting exposure in various locations (MP, 1 – indoor, 2 – car, 3 – walking 4 km/h, 4 – standing face to wind, 5 – standing back to wind, 6 – sledge downhill), 9 Feb 2008.

Analizując przebieg strumieni ciepła, widać podczas ekspozycji w terenie otwartym widać wyraźny wzrost natężenia strumienia strat ciepła przez unoszenie. Aby zrównoważyć zwiększone straty ciepła w organizmie uaktywniły się w tym czasie procesy produkcji ciepła w wyniku tzw. drżenia mięśniowego.

Procesy te były silne zwłaszcza podczas ekspozycji stojąc. Wynikiem procesów przepływu energii między człowiekiem, a otoczeniem jest saldo wymiany ciepła. Podczas serii pomiarowej było ono zbliżone do zera wskazując na stan równowagi cieplnej. Zdecydowały o tym: odzież o odpowiedniej izolacyjności termicznej, a w okresach wzmożonych strat ciepła uaktywnienie jego dodatkowej produkcji poprzez drżenie mięśniowe. Odczucia cieplne zmieniały się od zimno, podczas pobytu w terenie otwartym, do komfortowo po dostosowaniu się organizmu do warunków panujących w pomieszczeniach.

W dniu 9 lutego 2008 r. seria pomiarowa trwała ponad 8 godzin. Przez większość czasu obserwator odbywał marsz w terenie otwartym z prędkością 4 km/godz. przy temperaturze powietrza około -10°C i prędkości wiatru 2-3 m/s. Po południu, pomiędzy 15:00 a 15:40, przebywał w pomieszczeniu. Dodatkowym elementem ekspozycji był kilkuminutowy zjazd sankami z prędkością około 30 km/godz. około godziny 11-tej (ryc. 3). Tak jak 6 lutego zaobserwowano podobne reakcje temperatury skóry twarzy i klatki piersiowej oraz procesy wymiany ciepła z otoczeniem. Na podkreślenie zasługuje bardzo szybki spadek temperatury twarzy o ponad 10°C podczas pierwszej minuty zjazdu i jej niewielki wzrost podczas jego drugiej części. Okazało się także, że podczas długotrwałej ekspozycji terenowej nie obserwowano większych zmian temperatury twarzy (przez większość czasu wynosiła ona $17-19^{\circ}\text{C}$). Nie zmieniała się także temperatura klatki piersiowej (ryc. 3).

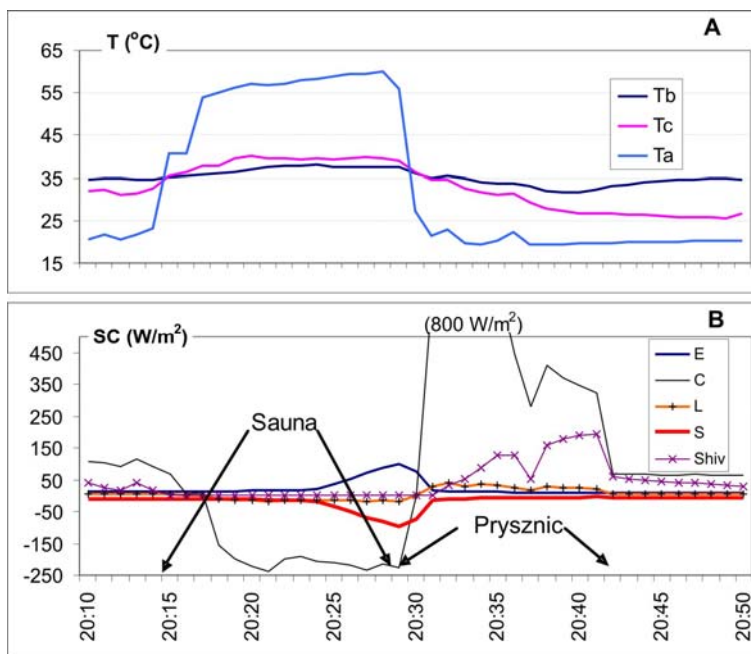
Podczas serii pomiarowych w marszu, pomiaru temperatury twarzy dokonywano termoparą przymocowaną do policzka. Miejsce umieszczenia czujnika okazało się najzimniejszą częścią twarzy, co stwierdzono analizując sekwencje zdjęć termalnych całej twarzy. Na zdjęciu termalnym widać także wyraźnie, że najcieplejszymi fragmentami twarzy są czoło i nos. W pomieszczeniu temperatura zmieniała się od około 29.5°C na policzku do około 34°C na nosie i czole, a więc powierzchniowy gradient termiczny wynosił tylko 4.5°C (ryc. 4). Po około 20 minutach ekspozycji dowieztrzej w temperaturze -12°C i przy wietrze 10-12 m/s (w porywach 20 m/s) temperatura policzków spadła do około 5°C . W przypadku nosa i czola temperatura obniżyła się tylko do $16-18^{\circ}\text{C}$, a więc gradient powierzchniowy wyniósł aż 13°C . Tak niska temperatura powodowała uczucie bólu, a duży gradient wywoływał uczucie silnych napięć na powierzchni skóry.



Ryc. 4. Rozkład temperatury na powierzchni twarzy przed ekspozycją terenową oraz po 20 minutach ekspozycji twarzą do wiatru o prędkości 12 m/s w temperaturze -10°C

Fig. 4. Distribution of face temperature along cross section before outdoor exposure (upper panel) and after 20 min of exposure facing to wind of 12 m/s at air temperature of -10°C (lower panel)

Jedną z typowych form rekreacji, a jednocześnie elementem miejscowej kultury w Finlandii, jest korzystanie z sauny. W trakcie ekspedycji przeprowadzono zatem pomiary termofizjologiczne także i podczas tej formy aktywności człowieka (ryc. 5). Bezpośrednio po przejściu z temperatury pokojowej do sauny, nagrzanej do temperatury około 60°C, rozpoczęły się reakcje dostosowawcze organizmu do zmienionych warunków otoczenia. Zaczęła szybko wzrastać temperatura ciała. W ciągu kilku minut temperatura klatki piersiowej wzrosła o 3°C, a temperatura twarzy aż o 8°C. Jednocześnie obserwowany był dopływ ciepła do organizmu drogą konwekcji (unoszenia) i promieniowania długofalowego.



Ryc. 5. Przebieg temperatury (T): powietrza (Ta), klatki piersiowej (Tb) i policzka (Tc) oraz strumieni ciepła (SC): parowania (E), unoszenia (C), promieniowania długofalowego (L), salda wymiany ciepła (S) oraz drżenia mięśniowego (Shiv) podczas ekspozycji w saunie, 9 lutego 2008 r.

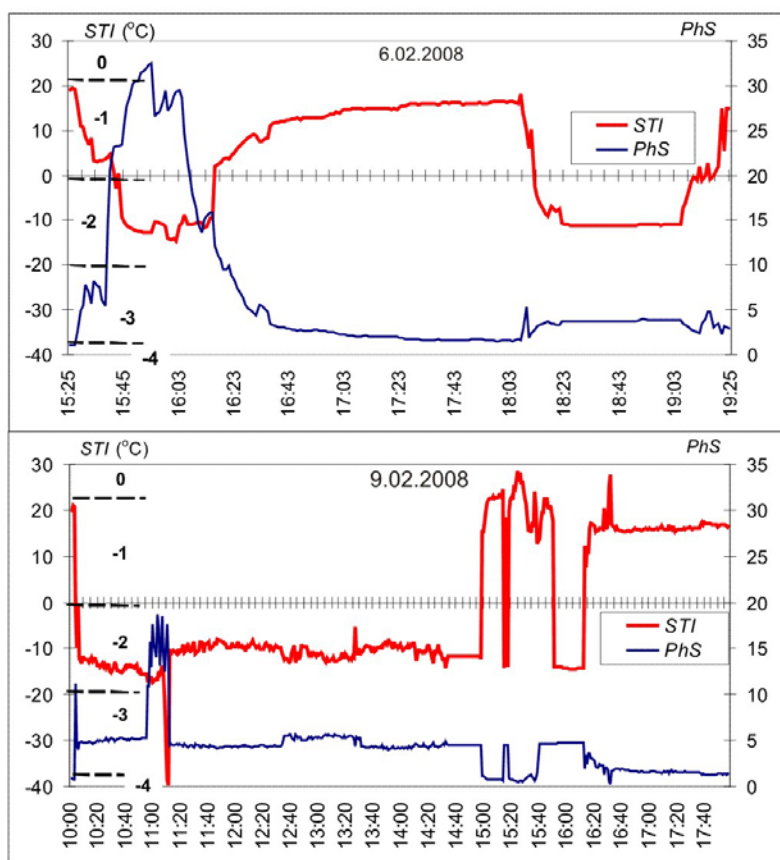
Fig. 5. Changes in: temperature of air (Ta), torso (Tb) and cheek (Tc); heat fluxes by evaporation (E), convection (C), long-wave radiation (L), net heat storage (S) and shivering (Shiv) during dry sauna exposure; Prysznic = shower; 9 Feb 2008

Po około 10 minutach uaktywniły się w pełni gruczoły potowe i rozpoczął się proces jego parowania z powierzchni ciała. Parujący pot schładzał skórę hamując wzrost temperatury skóry, zwłaszcza klatki piersiowej. Po 15 minutach w saunie udano się pod prysznic z wodą o temperaturze około 35°C. Podczas 10 minutowej kąpieli temperatura powierzchni ciała spadła o 5-10°C, przy jednoczesnym bardzo intensywnym oddawaniu ciepła do otoczenia drogą unoszenia oraz uaktywnieniu produkcji ciepła poprzez drżenie mięśniowe. Ten strumień ciepła w ciągu kilku minut miał natężenie sięgające 800 W/m². Po zakończeniu kąpieli i ponownym przejściu do pomieszczenia o temperaturze pokojowej procesy wymiany ciepła szybko (w ciągu około 5 minut) ustabilizowały się i organizm powrócił do stanu równowagi cieplnej.

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone w warunkach zimowych, w strefie klimatu subpolarnego, badania terenowe bilansu cieplnego człowieka potwierdziły wyniki badań termofizjologicznych prowadzonych w komorach klimatycznych w ujemnej temperaturze powietrza. Szczególnie istotne są jednak wyniki badań reakcji odsłoniętych (policzek) i osłoniętych (klatka piersiowa) części ciała na warunki termiczne i wietrzne otoczenia. Badania wykazały, że kilkunastominutowa ekspozycja w temperaturze około -10°C i prędkości wiatru 10-12 m/s prowadzi do szybkiego obniżenia temperatury policzka do poziomu mogącego powodować odmrożenie (por. Mäkinen i in. 2002).

Okazało się także, że ruch człowieka, dzięki dostarczaniu dodatkowych ilości ciepła metabolicznego, hamuje (w warunkach umiarkowanej prędkości wiatru i niezbyt niskiej temperatury powietrza) spadek temperatury odsłoniętej części ciała, nawet podczas kilkugodzinnej ekspozycji (por. Bittel 1998, Weller i in. 1994).



Ryc. 6. Przebieg temperatury odczuwalnej (*STI*) oraz stresu termofizjologicznego (*PhS*) podczas zmiennych warunków ekspozycji; odczucia cieplne: -4 – mroźnie, -3 – bardzo zimno, -2 – zimno, -1 – chłodno, 0 – komfortowo

Fig. 6. Changes in subjective temperature (*STI*) and physiological strain (*PhS*) during varying exposure; thermal sensations: -4 – frosty, -3 – very cold, -2 – cold, -1 – cool, 0 – comfortable

Podczas długotrwałej ekspozycji odczucia ciepłone człowieka zmieniały się od „komfortowo” lub „chłodno” w pomieszczeniach, do „zimno” w terenie otwartym. W sytuacji zjazdu na sankach temperatura odczuwalna spadała nawet do poziomu „skrajnie zimno” (linia *STI* na ryc. 6). Istotnie zmieniała się także intensywność procesów adaptacyjnych organizmu (linia *PhS* na ryc. 6), od umiarkowanych do warunków chłodu w pomieszczeniach, do bardzo silnych warunków zimna podczas ekspozycji w terenie otwartym. Intensywność tych procesów nasilała się wyraźnie w sytuacji bezruchu (por. Sari i Candas 2000).

Zachowanie równowagi cieplnej całego organizmu jest możliwe dzięki używaniu odpowiedniej odzieży oraz uaktywnieniu swojego procesu produkcji ciepła (drżenie mięśniowe).

Podziękowania

Badania przeprowadzono w ramach Akcji COST 730, dzięki finansowaniu przez Specjalny Projekt Badawczy MNiSW COST/37/2006, „Weryfikacja wielosegmentowego modelu bilansu cieplnego człowieka oraz uniwersalnego wskaźnika temperatury odczuwalnej”

Literatura

- Araźny A., 2004. Bioklimat Arktyki Norweskiej i jego zmienność w okresie 1971-2000. maszynopis rozprawy doktorskiej, UMK Toruń.
- Araźny A., Błażejczyk K., 2007. Warunki biometeorologiczne na Równinie Kaffiøyra i w regionie Lodowca Waldemara (NW Spitsbergen) w okresie od 16 lipca do 20 września 2005 r. [w:] R. Przybylak, M. Kejna, A. Araźny, P. Głowacki (red.), Abiotyczne środowisko Spitsbergenu w latach 2005-2006 w warunkach globalnego ocieplenia. UMK, Toruń: 67-87.
- Bittel J.H.M., 1998. Cold adaptation – its relevance for long term exposure. [w:] I. Holmér, K. Kuklane (red.), Problems with cold work, Arbete och Hälsa, 18; 147-151.
- Błażejczyk K., 2007. Multiannual and seasonal weather fluctuations and tourism in Poland. [w:] B. Amelung, K. Błażejczyk, A. Matzarakis (red.), Climate Change and Tourism Assessment and Copying Strategies, Maastricht – Warsaw – Freiburg, 2007: 69-90.
- Błażejczyk K., Matzarakis A., 2007. Assessment of bioclimatic differentiation of Poland based on the human heat balance. *Geographia Polonica*, vol. 80, No 1; 63-82
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M., 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87 (5), 1957-1972.
- Danielsson U., 1998. Risk of frostbite. [w:] I. Holmér, K. Kuklane (red.), Problems with cold work, Arbete och Hälsa, 18: 133-135.
- Mäkinen T., Gavhed D., Holmér I., Rintamäki H., 2002. The effects of wind on thermal responses during light and moderate exercise in the cold. [w:] *Environmental Ergonomics* X, 255-258.
- Sari H., Candas V., 2000. Thermal comfort during exercise in the cold. [w:] J. Werner, M. Hexamer (red.), *Environmental Ergonomics IX*, Shaker Verlag, Aachen: 261-264.
- Szczepankiewicz-Szmyrka A., Pereyma J., 1992. Biometeorological conditions in Hornsund, in 1979-1980. [w:] K.W. Opaliński, R.Z. Klekowski (red.), *Landscape, Life world and man in high Arctic*, Inst. of Ecology, Polish Academy of Sciences, Warszawa: 103-111.
- Tikusis P., 1998. Prediction of cold responses. [w:] I. Holmér, K. Kuklane (red.), Problems with cold work, Arbete och Hälsa, 18; 101-107.

- Weller A., Millard C., Stroud M., Greenhaff P., MacDonald I., 1994. The metabolic and thermoregulatory responses to prolonged walking exercise in cold-exposed man. [w:] J. Frim, M.B.Ducharme, P.Tikuisis (red.) Proc. of the Sixth Internat. Confer. on Environmental Ergonomics, Sept. 25-30, 1994, Montebello, Canada: 48-51.
- Wójcik G., 1963. O wielkości ochładzania bioklimatologicznego na Spitsbergenie. Biuletyn Komisji MRG, 1/32, Warszawa: 73-80.

Summary

The paper presents some results of field experiment dealing with physiological adaptation to cold in arctic climate. The bioclimatic-and-physiological measurements were carried out in February 2008 in Saariselka in northern Finland. The research are the part of COST 730 Action "Towards a universal thermal climate index UTCI for assessing the thermal environment of the human being". We have observed face cooling during long cold exposure when standing and during walking. Whole body heat balance, adaptation processes and thermal sensations were also studied.

The results show great effectiveness of cold adaptation processes. Both, physiological responses of an organism (e.g. shivering) and behavioural thermal regulation (activity, clothing) help to keep homeothermy. Some risk of local skin cooling that can lead to frostbite was observed at non covered face after 20 minute exposure in -12°C and wind speed of 12-20 m/s.