

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 159

KRZYSZTOF BŁĄZEJCZYK

WYMIANA CIEPŁA
POMIĘDZY
CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM
W RÓŻNYCH WARUNKACH
ŚRODOWISKA GEOGRAFICZNEGO

WROCLAW · WARSZAWA · KRAKÓW
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 159

Komitet redakcyjny

REDAKTOR NACZELNY: ROMAN SZCZESNY
ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO: ZBIGNIEW TAYLOR
CZŁONKOWIE: ANDRZEJ S. KOSTROWICKI, LESZEK STARKEL,
ANDRZEJ STASIAK, JAN SZUPRYCZYŃSKI
SEKRETARZ: IRENA STAŃCZAK

Recenzent

PROF. DR HAB. MED. DANUTA KORADECKA

Praca habilitacyjna

Redaktor Wydawnictwa Krystyna Nasuszny
Redaktor techniczny Anna Sławińska-Olek

© Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1993

PL ISSN 0373-6547
ISBN 83-04-04170-7

Zakład Narodowy im. Ossolińskich - Wydawnictwo, Wrocław 1993
DRUKARNIA UNIWERSYTETU WROCŁAWSKIEGO

SPIS TREŚCI

| | |
|--|----|
| 1. Wprowadzenie | 7 |
| 1.1. Założenia i cel pracy | 7 |
| 1.2. Podstawy termoregulacji | 8 |
| 1.2.1. Rola skóry w procesie termoregulacji | 11 |
| 1.2.2. Rola odzieży w procesie termoregulacji | 11 |
| 1.2.3. Inne czynniki wpływające na przebieg termoregulacji | 12 |
| 1.3. Aklimatyzacja organizmu do różnej temperatury otoczenia | 13 |
| 1.3.1. Aklimatyzacja do środowiska zimnego | 13 |
| 1.3.2. Aklimatyzacja do środowiska gorącego | 13 |
| 2. Charakterystyka strumieni ciepła | 15 |
| 2.1. Zyski ciepła | 15 |
| 2.1.1. Metabolizm | 15 |
| 2.1.2. Pochłonięte promieniowanie słoneczne | 18 |
| 2.2. Straty ciepła | 20 |
| 2.2.1. Parowanie | 20 |
| 2.2.2. Oddychanie | 21 |
| 2.2.3. Unoszenie | 21 |
| 2.2.4. Przewodzenie | 23 |
| 2.2.5. Promieniowanie długofalowe | 23 |
| 2.2.6. Praca | 24 |
| 2.3. Wzrost (ubytek) ciepła w organizmie | 24 |
| 3. Modele bilansu cieplnego człowieka | 26 |
| 3.1. Modele bilansu cieplnego dla warunków niestacjonarnych | 26 |
| 3.2. Modele bilansu cieplnego dla warunków stacjonarnych | 28 |
| 3.3. Zastosowania modeli bilansu cieplnego człowieka do badań geograficznych w skali regionalnej i lokalnej | 30 |
| 4. Wyniki badań klimatologiczno-fizjologicznych | 32 |
| 4.1. Charakterystyka badań | 32 |
| 4.1.1. Badania laboratoryjne | 32 |
| 4.1.2. Badania terenowe | 32 |
| 4.2. Badania ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego | 35 |
| 4.3. Metoda obliczania strumieni ciepła | 40 |
| 4.4. Wymiana ciepła w różnych warunkach meteorologicznych | 41 |
| 4.4.1. Warunki meteorologiczne a temperatura skóry | 42 |
| 4.4.2. Wymiana ciepła w różnych sytuacjach pogodowych | 45 |
| 4.4.3. Odczuwalność cieplna człowieka | 53 |
| 4.5. Wymiana ciepła w różnych strefach klimatycznych | 54 |
| 4.6. Wymiana ciepła w różnych rodzajach środowiska geograficznego Polski | 60 |
| 4.6.1. Wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w wybranych rodzajach środowiska (na przykładzie północno-wschodniej Polski) | 60 |
| 4.6.2. Bilans cieplny człowieka w różnych typach krajobrazu | 65 |
| 4.6.2.1. Struktura bilansu cieplnego | 66 |
| 4.6.2.2. Obciążenia cieplne organizmu | 72 |
| 4.7. Wymiana ciepła przy różnej termoizolacyjności odzieży | 75 |
| 4.8. Klasyfikacja warunków biotermicznych | 77 |

| | |
|---|-----|
| 4.9. Dyskusja wyników | 78 |
| 5. MENEX – kompleksowy model wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem | 81 |
| 5.1. Podstawowe założenia modelu | 81 |
| 5.1.1. Obliczanie poszczególnych strumieni ciepła | 84 |
| 5.1.1.1. Szacunkowe wyznaczanie temperatury skóry | 85 |
| 5.1.1.2. Szacunkowe wyznaczanie pochłoniętego promieniowania słonecznego | 86 |
| 5.1.1.3. Uproszczony sposób wyznaczania strumieni ciepła | 88 |
| 5.2. Zastosowania modelu | 90 |
| 5.2.1. Zastosowanie modelu MENEX do biotermicznej oceny warunków środowiskowych | 90 |
| 5.2.2. Zastosowanie modelu MENEX do ogólnej oceny warunków bioklimatycznych | 91 |
| 5.2.3. Zastosowanie modelu MENEX do oceny biotermicznych warunków pracy | 92 |
| 5.2.4. Zastosowanie modelu MENEX do prognozowania warunków biotermicznych | 93 |
| 5.2.5. Zastosowanie modelu MENEX do charakterystyki zróżnicowania przestrzennego warunków biotermicznych | 95 |
| 6. Podsumowanie | 100 |
| Literatura | 103 |
| Dodatek 1. Wykaz symboli stosowanych w pracy | 110 |
| Dodatek 2. Przykład płachty obliczeniowej stosowanej w programach LOTUS i EXCEL przy obliczaniu bilansu cieplnego człowieka | 113 |
| Dodatek 3. Program mikrokomputerowy modelu MENEX (wersja 1.0) | 115 |
| Heat exchange between man and his surroundings in different kinds of geographical environment (summary) | 122 |

WPROWADZENIE

1.1. ZAŁOŻENIA I CEL PRACY

Wymiana ciepła, zachodząca nieprzerwanie pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, jest jednym z podstawowych procesów fizjologicznych, decydującym o prawidłowym funkcjonowaniu organizmu. Ma on duże znaczenie w kształtowaniu biotermicznych warunków życia i pracy w różnych rodzajach środowiska (Brobeck 1965).

Badania bilansu cieplnego człowieka obejmują szeroki zakres zagadnień, spośród których można wymienić:

- badania procesów termoregulacyjnych, prowadzących do zrównoważenia przychodów i strat ciepła w organizmie,
- badania fizycznych i fizjologicznych parametrów zewnętrznej warstwy ciała, w której następuje wymiana ciepła z otoczeniem,
- badania procesów aklimatyzacyjnych, prowadzących do zmian w funkcjonowaniu organizmu w skrajnych warunkach termiczno-wilgotnościowych,
- badania termoizolacyjnych właściwości odzieży,
- badania wpływu różnych warunków środowiskowych na wielkość i strukturę wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem,
- badania subiektywnych odczuć cieplnych człowieka i uciążliwości biotermicznej różnych środowisk.

Większość dotychczasowych badań bilansu cieplnego człowieka prowadzona była w komorach klimatycznych lub w innego rodzaju pomieszczeniach zamkniętych. Celem poniższego opracowania jest natomiast określenie, w jaki sposób różne warunki środowiska geograficznego wpływają na kształtowanie się wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem – przebywającym w terenie otwartym – a otoczeniem. Rozwiązaniu tego zagadnienia będzie służyło znalezienie odpowiedzi na kilka pytań szczegółowych:

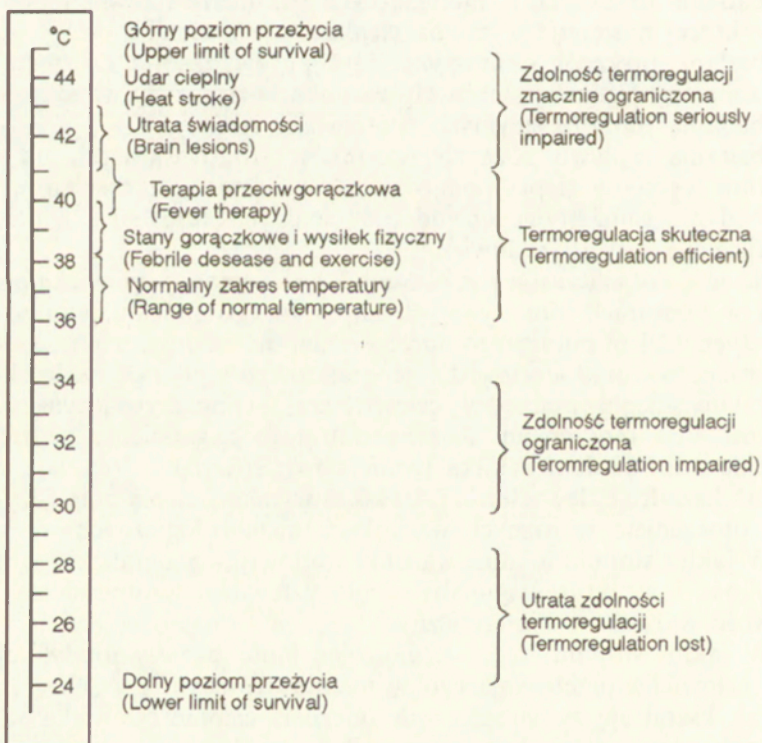
- 1) Jak kształtuje się wielkość i struktura wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych warunkach meteorologicznych?
- 2) W jakim stopniu lokalne warunki środowiska geograficznego wpływają na wielkość i strukturę wymiany ciepła człowieka z otoczeniem oraz na uciążliwość warunków biotermicznych?
- 3) W jakim stopniu różna termoizolacyjność odzieży modyfikuje bilans cieplny człowieka przebywającego w terenie otwartym?
- 4) Jak kształtują się subiektywne odczucia cieplne człowieka w różnych warunkach wymiany ciepła z otoczeniem?

Syntezą przeprowadzonych badań jest nowy model wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, pozwalający na obiektywną, klimatyczno-

-fizjologiczną ocenę i klasyfikację różnych warunków pogodowych i klimatycznych oraz różnych, lokalnych typów środowiska geograficznego. Może on też być przydatny do oceny termicznych obciążeń związanych z pracą oraz w prognozowaniu warunków biotermicznych. Podczas tworzenia modelu wykorzystano wcześniejsze doświadczenia autora w dziedzinie bilansu ciepłego człowieka, jak również wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych z nowym, analogowym wzorcem organizmu ludzkiego – o kształcie elipsoidy – stosowanym w badaniach termofizjologicznych.

1.2. PODSTAWY TERMOREGULACJI

Człowiek jest istotą stałociępną, to znaczy zdolną do zachowania stanu względnej równowagi cieplnej i utrzymywania prawie stałej temperatury wewnętrznej, niezależnie od temperatury otoczenia i jej zmian. Stan taki określany jest mianem homeotermii. Występuje ona wtedy, gdy temperatura wewnętrzna organizmu wynosi $37 \pm 2^\circ \text{C}$ (Bligh, Johnson 1973; Mitchell 1977; Popoczko 1990). Nieco węższy zakres wahań temperatury ciała ($+ 1^\circ \text{C}$) podaje J. Narębski (1980). W fizjologii przyjmuje się również, że układ termoregulacyjny człowieka jest w pełni sprawny, gdy temperatura ciała wynosi $36\text{-}40^\circ \text{C}$ (ryc. 1.1; Hardy 1965; Klonowicz, Kozłowski 1973).

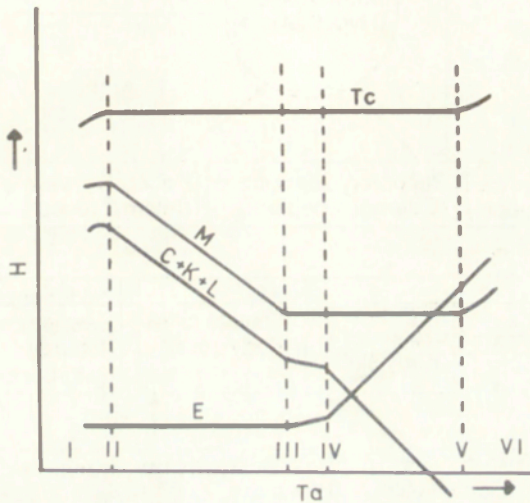


Ryc. 1.1. Sprawność układu termoregulacyjnego w różnej temperaturze wewnętrznej (Hardy 1965)
Thermoregulation system efficiency at different body temperature (by Hardy 1965)

Termoregulacja jest to „dostosowywanie się wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem w sposób zapewniający równowagę bilansu cieplnego i stałą temperaturę wewnętrzną” (Kozłowski 1986). Wyróżniane są dwa biologiczne rodzaje termoregulacji (Bligh, Johnson 1973):

- termoregulacja autonomiczna,
- termoregulacja behawioralna,

oraz tak zwana termoregulacja techniczna, związana z urządzeniami ogrzewczymi i klimatyzacyjnymi, znajdującymi się w otoczeniu człowieka (Hensel 1981; ryc. 1.2).



Ryc. 1.2. Wpływ temperatury otoczenia na produkcję i straty ciepła oraz na temperaturę wewnętrzną u istot stałocieplnych (Ingram, Mount 1975)

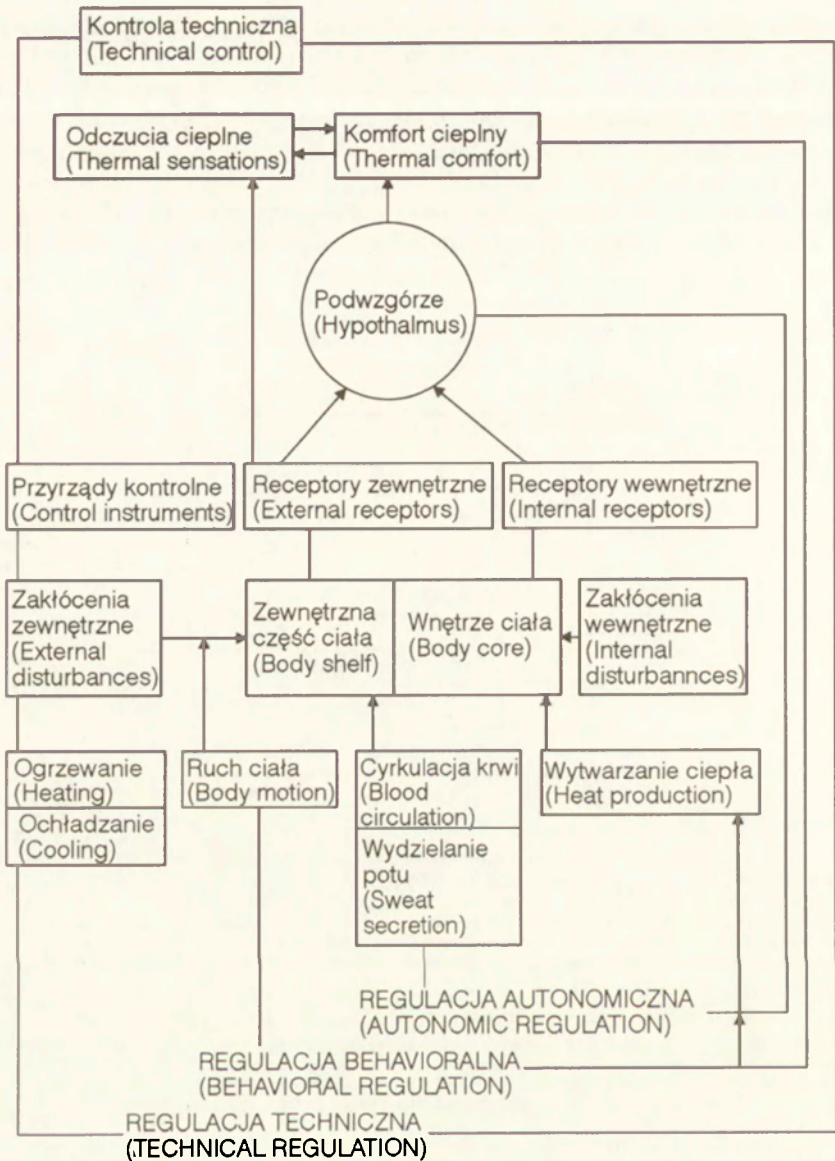
I – strefa wychładzania organizmu, II – temperatura, w której metabolizm jest największy i rozpoczyna się wychładzanie, III – temperatura krytyczna, IV – temperatura, w której wzrastają straty ciepła na parowanic, V – temperatura, w której rozpoczyna się przegrzewanie organizmu, VI – strefa przegrzewania się organizmu; III-IV – strefa najmniejszego obciążenia układu termoregulacyjnego, III-V – strefa najmniejszego metabolizmu, II-V – zakres sprawności układu termoregulacyjnego; H – produkcja lub straty ciepła, Tc – temperatura ciała; inne oznaczenia w Dodatku I

Influence of ambient temperature on heat production, heat loss and deep body temperature in a homeothermic being (by Ingram and Mount 1975)

I – zone of hypothermia, II – temperature of summit metabolism and incipient hypothermia, III – critical temperature, IV – temperature of marked increase in evaporative loss, V – temperature of incipient hyperthermic rise, VI – zone of hyperthermia; III-IV – zone of least thermoregulatory effort, III-V – zone of minimal metabolism, II-V – thermoregulatory range, H – heat production or loss, Tc – body temperature, another explanations in Appendix I

Termoregulacja autonomiczna polega na regulacji temperatury ciała przez odruchowe reakcje na ciepło i zimno. Składają się na nią trzy mechanizmy fizjologiczne: zmiany metabolicznej produkcji ciepła i termoizolacyjnych właściwości zewnętrznej warstwy ciała oraz wydzielanie potu (ryc. 1.3).

Właściwości termoizolacyjne zewnętrznej warstwy ciała, przez którą rozumie się skórę i tkankę podskórną (Kozłowski 1986), związane są z jej temperaturą. W niskiej temperaturze otoczenia zmniejsza się przekrój peryferycznych naczyń krwionośnych i przepływ krwi przez tę warstwę ciała oraz obniża jej temperatura, a przez to zwiększają się jej właściwości termoizolacyjne (Blanc 1975). Z jednej strony chroni to organizm przed nadmierną utratą ciepła, z drugiej zaś prowadzi do wzrostu ciśnienia tętniczego i obciążenia serca dodatkową pracą (Henneman i in. 1958; Wood i in. 1958). W wysokiej



Ryc. 1.3. Powiązania autonomicznej, behavioralnej i technicznej regulacji temperatury ciała człowieka (Hensel 1981)

Scheme of autonomic, behavioral and technical thermoregulatory systems of the human body (by Hensel 1981)

temperaturze otoczenia obserwuje się natomiast dwa zjawiska: zmniejszenie termoizolacyjności skóry i uaktywnienie gruczołów potowych. Pozwala to na sprawną eliminację ciepła z ustroju (Beaumont, Bullard 1965; Kaleta 1971; Rewerski i in. 1972; Narębski 1980; Kozłowski 1986; Kaciuba-Uściłko 1990).

Ważnym fizjologicznym mechanizmem termoregulacji jest zmiana ilości ciepła wytwarzanego przez organizm. Ogólnie biorąc, wraz z obniżaniem się

temperatury otoczenia wzrasta metaboliczne wytwarzanie ciepła. Zagadnienie to zostanie szerzej omówione w podrozdziale 2.1.1.

Na ostateczny efekt dostosowywania się temperatury ciała do warunków otoczenia, a także na subiektywne odczucia ciepłne, w istotny sposób wpływają behawioralne reakcje termoregulacyjne związane ze sposobem zachowania się człowieka, np. poprzez zmianę pozycji ciała lub odzieży oraz ruch (Blanc 1975; Cabanac 1980; Hensel 1981; Kozłowski 1986).

Mechanizm uaktywniania układu termoregulacyjnego i zapewnienia optymalnego kierunku i zakresu działań dostosowawczych organizmu wyjaśnia teoria „set-pointu”. Mianem tym określa się poziom temperatury wewnętrznej organizmu, na którą nastawione jest centrum termoregulacji. Odchylenie temperatury ciała od tego poziomu wywołuje reakcje termoregulacyjne proporcjonalne do powstałego sygnału termicznego. Układ termoregulacyjny człowieka może przy tym zmieniać swój poziom nastawienia, dostosowując go do oddziałujących czynników zewnętrznych (Hammel 1965; Hardy 1965; Cabanac 1980; Kozłowski 1986).

1.2.1. ROLA SKÓRY W PROCESIE TERMOREGULACJI

Skóra stanowi naturalną powłokę pokrywającą i chroniącą wszystkie wewnętrzne organy i narządy człowieka. Jej grubość waha się od 0,5 mm na powiekach do 7-8 mm na podszewkach, dłoniach i grzbiecie (Sylwanowicz i in. 1989). Jest ona — wraz z tkanką podskórną — ważną barierą na drodze przepływu ciepła z wnętrza ciała ku atmosferze i w kierunku odwrotnym. W obrębie tej warstwy następuje bowiem wymiana ciepła zapewniająca stałą temperaturę wewnętrzną organizmu w różnej temperaturze otoczenia.

Receptory zimna i ciepła oraz gruczoły potowe znajdujące się w obrębie skóry reagują zarówno na sygnały termiczne docierające z wnętrza organizmu, jak i na zmiany temperatury otoczenia. Miarą tych dwustronnych oddziaływań jest poziom temperatury, jaką skóra przyjmuje. W wielu badaniach fizjoklimatycznych stwierdzone są wyraźne związki nie tylko pomiędzy temperaturą skóry i temperaturą powietrza, ale także pomiędzy innymi elementami meteorologicznymi, głównie natężeniem promieniowania słonecznego i prędkością wiatru (Winslow i in. 1937; Hendler i in. 1958; Iampietro i in. 1958; Young 1979; Clark R. P. 1980; Houdas, Ring 1982, Clark R.P., Edholm 1985; Hanawa i in. 1985; Błażejczyk 1988c; Nielsen B. i in. 1988; Błażejczyk i in. 1993).

1.2.2. ROLA ODZIEŻY W PROCESIE TERMOREGULACJI

Odzież zabezpiecza organizm zarówno przed nadmiernymi stratami, jak i przed zbyt dużym dopływem ciepła z otoczenia. Podstawową międzynarodową jednostką termoizolacyjności odzieży (Icl) jest clo (ISO/DIS 9920), która wyraża jej względną izolacyjność termiczną, przy czym 1 clo odpowiada oporowi cieplnemu $0,155 \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$.

W wielu krajach prowadzone są systematyczne badania określające termoizolacyjność różnych zestawów odzieży oraz zmiany fizjologiczne zachodzące w organizmie człowieka podczas pobytu lub pracy w różnych warunkach otoczenia. Wskazują one, że rodzaj odzieży, a nawet sposób jej noszenia,

wpływają na przebieg i końcowy efekt procesów termoregulacyjnych (Goldman 1980; Smolander i in. 1984, 1987; Smolander 1987; Sołtyński 1988; Gavhed, Holmer 1989a, 1989b; Holmer 1989a, 1989b; Nielsen R. i in. 1989a, 1989b; Holmer, Gavhed 1990; Nielsen R., Endrusick 1990a, 1990b). Badane są również warunki przepływu ciepła przez różne zestawy odzieży (Clark J. A. i in. 1973; Goldman 1980, 1988; Jokl 1982; Holmer 1989b, 1989c; Nielsen B. 1990; Tamura, Tomizawa 1991).

Wyniki powyższych badań pozwoliły na opracowanie przez Międzynarodową Organizację Standaryzacji norm termoizolacyjności różnych zestawów odzieży (tab. 1.1) oraz warunków pracy w różnych rodzajach środowiska (ISO 7730, ISO/DIS 7933, ISO/DIS 9920, ISO/DC 11079, PN-85/N-08013).

Tabela 1.1. Skład i izolacyjność termiczna wybranych zestawów odzieży (wg ISO/DIS 9920)
Insulation of different clothing assembles (by ISO/DIS 9920)

| Skład zestawu | Termoizolacyjność | |
|--|-------------------|--------------------|
| | (clo) | ($m^2 K W^{-1}$) |
| Slipy, podkoszulek bez rękawów, krótkie szorty, sandały | 0,23 | 0,036 |
| Slipy, koszula z krótkim rękawem, szorty, skarpety, półbuty | 0,52 | 0,081 |
| Slipy, koszula z długim rękawem, spodnie, skarpety, półbuty | 0,73 | 0,113 |
| Slipy, koszula z długim rękawem, spodnie, marynarka, skarpety, półbuty | 0,97 | 0,150 |
| Slipy, podkoszulek, koszula, kamizelka, marynarka, spodnie, skarpety, półbuty | 1,49 | 0,231 |
| Kalesony, podkoszulek, koszula, ciepłe spodnie i marynarka, kurtka, skarpety, trzewiki | 1,90 | 0,293 |
| Kalesony, podkoszulek, koszula, ciepłe spodnie i marynarka, skarpety, trzewiki, kombinezon | 2,25 | 0,348 |
| Kalesony, podkoszulek, koszula, ciepłe spodnie i marynarka, skarpety, trzewiki, kombinezon, czapka, rękawiczki | 2,55 | 0,395 |

Określenie termoizolacyjności odzieży zapewniającej komfort cieplny w danych warunkach otoczenia może służyć także do ogólnej oceny środowiska termicznego, w jakim człowiek przebywa (Ajzenstat 1974; Blanc 1975; Nishi i in. 1978; Holmer 1988). Rozkład Icl warunkującego komfort jest także przedstawiany na mapach, stanowiąc element oceny warunków biotermicznych badanych obszarów (Cicenko 1967; Auliciems, Freitas 1976; Krawczyk 1993).

1.2.3. INNE CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PRZEBIEG TERMOREGULACJI

Na efektywność termoregulacji wpływają także inne czynniki, takie jak: płeć, stopień wytrenowania oraz przystosowania do skrajnych warunków termicznych otoczenia. V. J. Brumštejn (1950) i W. L. Kenney (1985) stwierdzili na przykład, że sprawność eliminacji ciepła przez parowanie potu jest u kobiet mniejsza niż u mężczyzn. Inni autorzy (Smolander 1987; Smolander i in. 1984; Gavhed, Holmer 1989b) zaobserwowali, że u osób często pracujących w wysokiej temperaturze otoczenia sprawność termoregulacji jest większa niż u tych,

które zetknęły się z tymi warunkami po raz pierwszy. Efektywność regulacji temperatury ciała u osób o jednakowym stopniu przystosowania do wysokiej temperatury otoczenia, ale o różnym wytrenowaniu organizmu badali J. Smolander i in. (1987). Notowali oni u osób wytrenowanych mniejszy wzrost temperatury wewnętrznej niż u osób z grupy kontrolnej.

1.3. AKLIMATYZACJA ORGANIZMU DO RÓŻNEJ TEMPERATURY OTOCZENIA

Mianem aklimatyzacji określa się „zespół przystosowawczych zmian fizjologicznych, które zmniejszają napięcia spowodowane obciążającymi – sezonowymi lub regionalnymi – wahaniami warunków meteorologicznych i klimatycznych” (Bligh, Johnson 1973; Folk 1980). Zmiany te dotyczą trzech podstawowych procesów fizjologicznych: wytwarzania ciepła, przepływu krwi przez zewnętrzną warstwę ciała oraz wydzielania potu (ryc. 1.2).

1.3.1. AKLIMATYZACJA DO ŚRODOWISKA ZIMNEGO

Aklimatyzacja organizmu do otoczenia zimnego obejmuje dwie kategorie reakcji dostosowawczych prowadzących do obniżenia temperatury powierzchni ciała i zwiększenia wytwarzania ciepła.

Związane z niską temperaturą otoczenia obniżenie się temperatury skóry i tkanki podskórnej oraz wzrost ich termoizolacyjności zmniejsza gradient termiczny pomiędzy człowiekiem a otoczeniem i eliminację ciepła z organizmu. Obserwuje się wtedy jednocześnie zwiększenie produkcji ciepła przez intensyfikację przemian chemicznych w komórkach oraz wzrost napięcia spoczynkowego mięśni i występowanie drżenia mięśniowego (Adams, Covino 1958; Downey i in. 1971; Blanc 1975; Kozłowski 1986; Gavhed, Holmer 1989a).

Częste powtarzanie się wspomnianych procesów prowadzi do powstania trwałych (Adams, Covino 1958; Milan i in. 1963), sezonowych (Yoshimura, Morimoto 1974) lub tylko okresowych (Scholander i in. 1958) przystosowań aklimatyzacyjnych organizmu do otoczenia zimnego. U osób zaaklimatyzowanych do zimnych warunków otoczenia obserwuje się większy o 40-50% metabolizm podstawowy oraz większą termoizolacyjność skóry i tkanki podskórnej niż u osób niezaaklimatyzowanych (Blanc 1975).

1.3.2. AKLIMATYZACJA DO ŚRODOWISKA GORĄCEGO

Występujące podczas obciążenia cieplnego organizmu rozszerzenie naczyń krwionośnych i wzrost skórny przepływu krwi prowadzi do podwyższenia temperatury skóry i uaktywnienia gruczołów potowych (Beaumont, Bullard 1965; Rewerski i in. 1972; Narębski 1980; Kozłowski 1986; Kaciuba-Uściłko 1990). Parujący pot obniża temperaturę skóry i zwiększa w ten sposób gradient termiczny pomiędzy wnętrzem ciała a jego powłoką. Obserwuje się przy tym niewielkie (o 1-2° C) podwyższenie temperatury wewnętrznej (Givoni, Belding 1965; Garden i in. 1966; Elizondo, Bullard 1971; Givoni, Goldman 1973).

Proces eliminacji ciepła wraz z parującym potem jest ograniczany przez maksymalnie możliwe wydzielanie potu (ok. 4 litrów na godzinę) i pełne

nasycenie powietrza parą wodną, które w temperaturze równej lub wyższej od temperatury ciała hamuje parowanie potu i eliminację ciepła. Negatywnym skutkiem intensywnego wydzielania i parowania potu jest odwadnianie organizmu, prowadzące do nadmiernego wzrostu temperatury wewnętrznej (Oksenič 1981; Kozłowski 1986).

Trwałym, aklimatyzacyjnym efektem wymienionych procesów termoregulacyjnych jest wytworzenie w organizmach mieszkańców strefy okołorównikowej i podzwrotnikowej stanu stałego podwyższenia (do ok. 38°C) temperatury wewnętrznej ciała oraz zdolności szybkiego reagowania gruczołów potowych na bodźce termiczne (Raynaud i inni 1976; Oksenič 1981). Obserwuje się również zdolność dostosowania organizmu do intensywnej pracy w skrajnie gorącym i wilgotnym środowisku (temperatura powietrza 36-40°C, wilgotność względna 90-95%); proces aklimatyzacji trwa około 8-10 dni (Strydom i in. 1966; Givoni, Goldman 1973; Wyndham i in. 1973; Smolander i in. 1984, 1987).

2. CHARAKTERYSTYKA STRUMIENI CIEPŁA

Omówione procesy termoregulacji i aklimatyzacji modyfikują zarówno ilość ciepła docierającego do skóry i tkanki podskórnej (ciepło wytworzone w procesach metabolicznych i pochłonięte promieniowanie słoneczne), jak i ilość ciepła odprowadzanego do otoczenia (straty ciepła na parowanie i oddychanie oraz jego wymiana przez przewodzenie, unoszenie i promieniowanie długofalowe).

2.1. ZYSKI CIEPŁA

2.1.1. METABOLIZM

Stałym źródłem ciepła dla organizmu jest metabolizm. Mianem tym określa się uwalnianie ciepła w wyniku tlenowych przemian chemicznych następujących w obrębie komórek organizmu (utlenianie tłuszczów, cukrów i innych substancji) oraz beztlenowych przemian następujących w obrębie mięśni szkieletowych (Stetson, red., 1967; Bligh, Johnson 1973; Stoker i in. 1973; Kozłowski 1986; Sylwanowicz i in. 1989). Podstawowymi terminami stosowanymi w tym zakresie są:

- metabolizm podstawowy (BMR – Basal Metabolic Rate), oznaczający podstawową produkcję ciepła w organizmie, mierzoną w środowisku termoneutralnym, w stanie spoczynku, po śnie,
- wielkość metabolizmu (MR – Metabolic Rate), określana też jako metaboliczna produkcja ciepła (M – Metabolic Free Energy Production), oznaczająca energię powstałą w wyniku przemian chemicznych oraz pracy mechanicznej (ekwiwalentem 1 kalorii ciepła jest $4,18 \cdot 10^7$ erga pracy).

Terminem powszechnie stosowanym w badaniach bilansu cieplnego człowieka jest metaboliczna produkcja ciepła – lub po prostu metabolizm – i jest on oznaczany symbolem M.

Na metabolizm podstawowy, który w warunkach termoneutralnych (tzn. w temperaturze otoczenia 18-28°C) wynosi 40-55 W·m⁻² wpływają takie czynniki, jak : płeć, wiek, wzrost i waga ciała, termiczne warunki otoczenia oraz sezonowe i regionalne zróżnicowanie klimatu (Hammel 1965; Stetson, red., 1967; Downey i in. 1971; Kenney 1985). Bibliografię prac dotyczącą wpływu powyższych czynników na metabolizm podstawowy daje C. Schofield (1985).

Fizjologowie są zgodni, że wraz ze spadkiem temperatury powietrza wzrasta podstawowa metaboliczna produkcja ciepła. Jest to odpowiedź organizmu na zwiększone zapotrzebowanie energetyczne wiążące się z intensywnym oddawaniem ciepła do otoczenia (Klonowicz, Kozłowski 1970; Kaleta

1971; Rewerski i in. 1972; Kozłowski 1986). Przy spadku temperatury otoczenia (T_a) w stosunku do warunków termoneutralnych o 5°C – BMR wzrasta o 17% (Wenneberg i in. 1973), przy spadku T_a o $10\text{--}15^\circ\text{C}$ – BMR rośnie o prawie 50% (Downey i in. 1971), a przy spadku T_a o $15\text{--}20^\circ\text{C}$ metabolizm podstawowy wzrasta nawet o 80% (Scholander i in. 1958).

Dla środowiska gorącego wyniki badań fizjologicznych nie są jednoznaczne. W niektórych eksperymentach obserwowany jest niewielki (o 5-10%) spadek BMR (Hammel 1965; Strydom i in. 1966; Rowell i in. 1969; Kozłowski 1986; Smolander 1987). W wielu badaniach prowadzonych w środowisku gorącym stwierdza się jednak wzrost metabolizmu podstawowego o 5-10% w stosunku do warunków termoneutralnych (Vitte, Petryn 1952; Hey 1974; Ingram, Mount 1975). C. F. Consolazio i in. (1963) uważają, że jest to spowodowane wzrostem potrzeb energetycznych intensywnie pracującego układu krążenia, aktywnością gruczołów potowych i podwyższeniem się temperatury ciała.

Wpływ sezonowości klimatu na podstawową produkcję ciepła badali H. Yoshimura i T. Morimoto (1974) obserwując, że BMR u osób zamieszkujących umiarkowane strefy klimatyczne jest zimą o 10-20% większy niż latem.

Ważnymi czynnikami różnicującymi podstawową metaboliczną produkcję ciepła są cechy osobnicze: płeć, wiek, wzrost i waga ciała. W. N. Schofield (1985) przeprowadził szerokie badania porównawcze metabolizmu podstawowego zmierzonego u różnych grup ludzi. Stwierdził on, że dla osób w wieku 18-60 lat wielkość BMR można określić z dokładnością ponad 90% na podstawie płci i wagi ciała, bez konieczności prowadzenia pomiarów instrumentalnych (tab. 2.1).

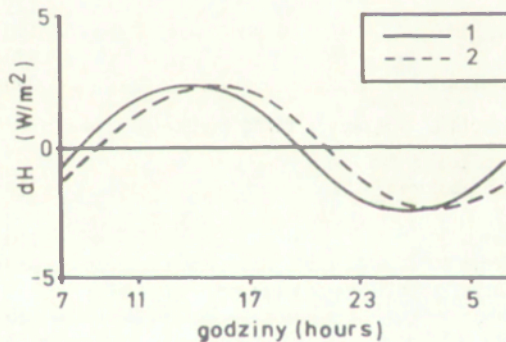
Tabela 2.1. Metabolizm podstawowy u osób w wieku 18-60 lat w zależności od wagi ciała i płci (wg W. N. Schofielda, 1985)
Basal Metabolic Rate at persons within age category of 18-60 years depending on sex and weight (by W. N. Schofield, 1985)

| Waga (kg) | Metabolizm podstawowy ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | | Waga (kg) | Metabolizm podstawowy ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | |
|--------------|---|------|--------------|---|------|
| | m | k | | m | k |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 29 | 32,7 | 30,6 | 57 | 44,9 | 37,6 |
| 30 | 33,4 | 30,9 | 58 | 45,6 | 37,8 |
| 31 | 34,0 | 31,3 | 59 | 46,0 | 38,1 |
| 32 | 34,4 | 31,6 | 60 | 46,3 | 38,4 |
| 33 | 34,7 | 32,0 | 61 | 46,6 | 38,8 |
| 34 | 35,4 | 32,4 | 62 | 47,0 | 39,1 |
| 35 | 35,8 | 32,7 | 63 | 47,7 | 39,5 |
| 36 | 36,1 | 32,9 | 64 | 48,0 | 40,2 |
| 37 | 36,8 | 33,1 | 65 | 48,3 | 40,4 |
| 38 | 37,4 | 33,4 | 66 | 48,6 | 40,8 |
| 39 | 37,8 | 33,6 | 67 | 49,0 | 41,0 |
| 40 | 38,1 | 33,8 | 68 | 49,3 | 41,2 |
| 41 | 38,5 | 34,0 | 69 | 49,7 | 41,5 |
| 42 | 38,8 | 34,2 | 70 | 49,9 | 41,7 |
| 43 | 39,5 | 34,4 | 71 | 50,1 | 41,9 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|------|------|----|------|------|
| 44 | 39,9 | 34,7 | 72 | 50,4 | 42,2 |
| 45 | 40,2 | 34,9 | 73 | 50,7 | 42,4 |
| 46 | 40,8 | 35,1 | 74 | 51,1 | 42,6 |
| 47 | 41,2 | 35,4 | 75 | 51,4 | 42,9 |
| 48 | 41,5 | 35,6 | 76 | 51,7 | 43,1 |
| 49 | 41,8 | 35,8 | 77 | 52,0 | 43,3 |
| 50 | 42,2 | 36,1 | 78 | 52,4 | 43,6 |
| 51 | 42,8 | 36,3 | 79 | 52,6 | 43,9 |
| 52 | 43,2 | 36,6 | 80 | 52,8 | 44,2 |
| 53 | 43,6 | 36,8 | 81 | 53,1 | 44,6 |
| 54 | 43,9 | 37,0 | 82 | 53,3 | 44,9 |
| 55 | 44,3 | 37,2 | 83 | 53,5 | 45,1 |
| 56 | 44,6 | 37,4 | 84 | 53,8 | 45,3 |

m — mężczyźni, k — kobiety.

Czynnikiem zwiększającym metaboliczną produkcję ciepła ponad poziom podstawowy jest wysiłek fizyczny. Zagadnienia tego dotyczy znaczna część badań fizjoklimatycznych (Strydom i in. 1966; Rowell i in. 1969; Nielsen B. i in. 1972; Wyndham i in. 1973; Young 1979; Smolander 1987; Gavhed, Holmer 1989b). Obserwuje się wyraźną cykliczność dobową metabolicznej produkcji ciepła (ryc. 2.1); w ciągu dnia jest ona większa od sumy strat ciepła z organizmu, natomiast nocą — mniejsza (Kreider i in. 1958; Webb 1971; Aschoff i in. 1974).



Ryc. 2.1. Uśrednione odchylenia (dH) produkcji ciepła (1) i sumy jego strat (2) od wartości średniej dobowej (wg Aschoffa i in. 1974)

Average deviations (dH) of heat production (1) and heat loss (2) from 24-hour means (by Aschoff et al. 1974)

Wyniki badań fizjologicznych pozwoliły na opracowanie norm wielkości metabolizmu dla różnej aktywności fizycznej (ISO 8996). Tabela 2.2 zawiera wielkości metabolicznej produkcji ciepła (ponad metabolizm podstawowy) przy różnej postawie i aktywności fizycznej człowieka. Aby obliczyć sumaryczną wartość metabolizmu (M), należy do metabolizmu podstawowego (równego $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) dodać kolejno metabolizm związany z pozycją ciała, intensywnością wykonywanej pracy i prędkością ruchu człowieka.

Tabela 2.2. Metaboliczna produkcja ciepła (powyżej BMR)
podczas różnej aktywności fizycznej (wg ISO 8996)
Metabolic heat production (above BMR) with different activity
(by ISO 8996)

| Aktywność człowieka | Metabolizm ($W \cdot m^{-2}$) |
|---|---------------------------------|
| Metabolizm związany z pozycją ciała | |
| Pozycja | |
| siedząca | 10 |
| klęcząca | 20 |
| stojąca | 25 |
| stojąca (pochylona) | 30 |
| Metabolizm związany z pracą różnych części ciała | |
| Praca dłońmi | |
| lekka | 15 |
| średnia | 30 |
| ciężka | 40 |
| Praca jedną ręką | |
| lekka | 35 |
| średnia | 55 |
| ciężka | 75 |
| Praca dwiema rękami | |
| lekka | 65 |
| średnia | 85 |
| ciężka | 105 |
| Praca z obciążeniem tułowia | |
| lekka | 125 |
| średnia | 190 |
| ciężka | 280 |
| bardzo ciężka | 390 |
| Metabolizm związany z różną prędkością poruszania się | |
| Marsz z prędkością 2-5 km/h | |
| w miejscu płaskim | 110 |
| pod górę | |
| nachylenie 5° | 210 |
| nachylenie 10° | 360 |
| Marsz z góry z prędkością 5 km/h | |
| nachylenie 5° | 60 |
| nachylenie 10° | 50 |
| Marsz z prędkością 4 km/h z obciążeniem | |
| 10 kg | 125 |
| 30 kg | 185 |
| 50 kg | 285 |

2.1.2. POCHŁONIĘTE PROMIENIOWANIE SŁONECZNE

Skóra człowieka ma zdolność pochłaniania promieniowania słonecznego (Budyko 1959, 1971; Breckenridge, Goldman 1971; Cena 1974; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980). Ma ono bezpośredni wpływ na jej temperaturę i stanowi drugie – obok metabolizmu – źródło ciepła dla organizmu (Gregorczyk 1966; Clark R. P., Edholm 1985; Błażejczyk 1988c; Nielsen B. i in. 1988; Błażejczyk i in. 1993).

Metody mające na celu określenie ilości promieniowania pochłoniętego przez człowieka można podzielić na dwie grupy:

- metody określające termiczny efekt promieniowania,
- metody określające energetyczny efekt promieniowania.

W pierwszym wypadku oblicza się tak zwaną średnią temperaturę promieniowania, zaproponowaną przez P. O. Fangera (1974) do badań w pomieszczeniach zamkniętych. Istnieją jednak udane próby zaadaptowania tej wielkości do badań w miastach (Jendritzky, Nübler 1982; Jendritzky, Menz 1986; Jendritzky, Sievers 1986) oraz jej obliczania na podstawie temperatury powietrza i natężenia promieniowania słonecznego (Skrzypski 1981, 1989; Jendritzky 1990).

Druga grupa metod obejmuje różnego rodzaju formuły służące do określenia promieniowania pochłoniętego przez człowieka nie ubranego (R') lub ubranego (R). Do przeliczania strumieni promieniowania słonecznego z jednostki powierzchni przyrządu pomiarowego na jednostkę powierzchni ciała człowieka przyjmuje się najczęściej geometryczny model pionowo usytuowanego cylindra (Budyko, Cicenکو 1960; Underwood, Ward 1966; Brown, Gillespie 1986; Kryś, Brown 1990). Istnieje w tym zakresie wiele różnych propozycji (Budyko, Cicenکو 1960; Terjung 1969, 1974; Breckenridge, Goldman 1971, 1977; Ajzenštat 1973, 1986; Morgan, Baskett 1974; Tuller 1975; Clark J. A., Cena 1976; Lee 1980; Burt i in. 1982a; Höppe 1982; Terjung, O'Rourke 1983, Nielsen B. i in. 1988; Freitas, Ryken 1989).

K. Błażejczyk, H. Nilsson i I. Holmér (1993) przeprowadzili badania porównawcze powyższych metod, określając związek pomiędzy temperaturą skóry a ilością promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka nie ubranego i ubranego, obliczonymi za pomocą różnych wzorów. Ogólnie biorąc związek ten nie jest zbyt silny, a najwyższy współczynnik korelacji (0,69) występuje w wypadku wzoru Breckenridge-Goldmana (tab. 2.3). Poważne

Tabela 2.3. Związki statystyczne pomiędzy średnią temperaturą skóry a pochłoniętym promieniowaniem słonecznym obliczonym na podstawie różnych wzorów (Błażejczyk i in. 1993)

Statistical relations between mean skin temperature and absorbed solar radiation, calculated with the use of different formulas (Błażejczyk et al. 1993)

| Autor wzoru | Współczynnik korelacji | SEE |
|-------------------------------------|------------------------|------|
| Budyko i Cicenکو (1960) | 0,68 | 1,24 |
| Breckenridge i Goldman (1971, 1977) | 0,69 | 1,25 |
| Lee (1980) | 0,51 | 1,49 |
| Terjung (1974) | 0,67 | 1,28 |
| Morgan i Basket (1974) | 0,64 | 1,34 |
| Tuller (1975) | 0,57 | 1,42 |
| Höppe (1982) | 0,62 | 1,36 |
| Nielsen i in. (1988) | 0,67 | 1,28 |
| Freitas i Ryken (1989) | 0,61 | 1,37 |
| Kryś i Brown (1990) | 0,68 | 1,26 |

SEE – średni błąd szacowania.

wątpliwości budzą także bezwzględne wartości R' ; w niektórych metodach osiągają one nawet $600-800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Wskazane słabości istniejących metod oceny ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego są – jak się wydaje – spowodowane stosowaniem cylindra jako analogowego modelu ciała człowieka oraz brakiem pomiarów fizjologicznych, weryfikujących uzyskiwane dla tego modelu analogowego wartości R' i R .

Ogólny wzór na ilość promieniowania słonecznego pochłoniętego przez organizm człowieka ma następującą postać:

$$R = (\beta_1 Q + \beta_2 D + \beta_3 r) (1 - a) CI, \quad (1)$$

gdzie β_1 , β_2 , β_3 oznaczają parametry służące do przeliczenia natężenia promieniowania mierzonego na powierzchni horyzontalnej na promieniowanie docierające do człowieka, a CI – parametr określający opór cieplny odzieży. Wszystkie symbole nie objaśnione w tekście są zamieszczone w Dodatku 1.

2.2. STRATY CIEPŁA

W fizjologii wyróżnianych jest sześć sposobów eliminacji ciepła z organizmu (ISO/DIS 7933; Bligh, Johnson 1973; Monteith 1974; Ingram, Mount 1975; Mitchell 1977; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980; Clark R. P., Edholm 1985):

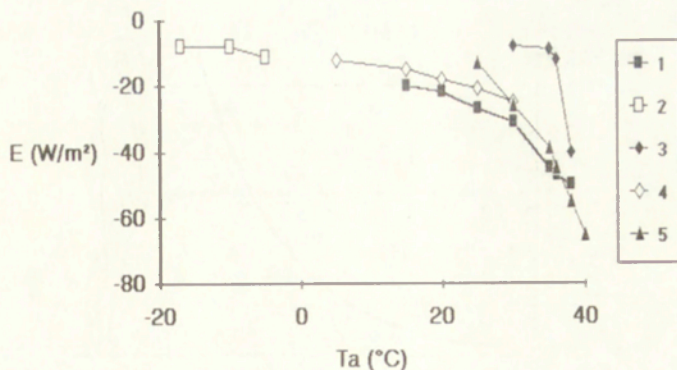
- przez parowanie wody z powierzchni skóry (ewaporacja – E),
- przez oddychanie (respiracja – Res),
- przez turbulencyjne unoszenie ciepła jawnego z powierzchni ciała (konwekcja – C),
- przez przewodzenie (kondukcja – K),
- przez wypromieniowanie długofalowe (radiacja – L),
- przez przemianę ciepła w pracę mięśni (praca – W).

2.2.1. PAROWANIE

Na wyparowanie z powierzchni ciała 1 grama wody w ciągu 1 godziny zużywane jest około $0,385 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ciepła (Clark R.P., Edholm 1985). Znane są dwa sposoby wydzielania wody na powierzchnię skóry: dyfuzyjne i wymuszone przez podwyższoną temperaturę skóry (czyli wydzielanie potu). Straty ciepła na parowanie wody, wydzielonej dyfuzyjnie i przez pocenie się, można zapisać w postaci ogólnego wzoru:

$$E = h_e (e_s - e_a) w CI. \quad (2)$$

Intensywność tego procesu zależy od różnicy ciśnienia pary wodnej, jakie występuje na powierzchni ciała i w otaczającym powietrzu. Czynnikiem przyspieszającym parowanie jest ruch powietrza (McLean 1974; Ingram, Mount 1975; Mitchell 1977; Clark R. P., Edholm 1985). Duże znaczenie ma tu również stopień uwilgotnienia skóry (w). Wyraża on udział w ogólnej powierzchni ciała tej jego części, która jest całkowicie wilgotna (ISO/DIS 7933). Stwierdzana w różnych badaniach eksperymentalnych wielkość strat ciepła na parowanie waha się od $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ w temperaturze powietrza poniżej 0°C , do około $15-25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy T_a $20-30^\circ\text{C}$ i $40-60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy T_a powyżej 30°C (ryc. 2.2).



Ryc. 2.2. Wpływ temperatury powietrza na straty ciepła związane z parowaniem według różnych autorów

1 – Błażejczyk 1991a, 2 – Gavhed, Holmér 1989a, 3 – Hey 1974, 4 – Brumfielt 1950, 5 – Holmér 1989b
Influence of air temperature on evaporative heat loss by different authors

Istotnym fizjologicznym efektem ewaporacyjnych strat ciepła jest obniżenie temperatury skóry. Na podstawie danych zamieszczonych przez P. O. Fanger (1974) można stwierdzić, że strata – w wyniku parowania – 1 wata ciepła z 1 m² skóry powoduje obniżenie się jej temperatury o 0,066°C. Zwiększa to różnicę temperatury pomiędzy wnętrzem ciała a jego powierzchnią i intensyfikuje dalszy przepływ ciepła w tym kierunku, chroniąc w ten sposób organizm przed przegrzaniem.

2.2.2. ODDYCHANIE

W procesie oddychania ciepło jest zużywane na nagrzewanie i nasycenie parą wodną powietrza, które styka się z powietrzem wydychanym (ISO/DIS 7933; Budyko, Cicenکو 1960). Straty ciepła na oddychanie (respirację) są więc zależne od temperatury i wilgotności powietrza wydychanego i powietrza otaczającego człowieka, co można zapisać w postaci ogólnego wzoru:

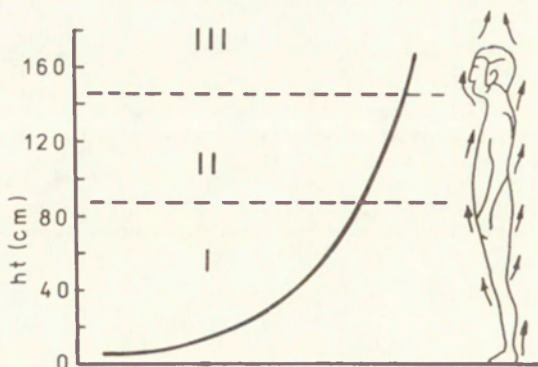
$$\text{Res} = C_p(\text{Tex} - \text{Ta}) + L_h(\text{eex} - \text{ea}), \quad (3)$$

gdzie Tex – temperatura powietrza wydychanego, eex – prężność pary wodnej w powietrzu wydychanym.

Niektórzy autorzy włączają poszczególne formy oddawania ciepła przez oddychanie odpowiednio do strumieni ciepła unoszonego i związanego z parowaniem (Bligh, Johnson 1973; McLean 1974; Monteith 1974; Nishi 1980; Höpfe 1984; Clark R. P., Edholm 1985). W dodatniej temperaturze powietrza respiracyjne straty ciepła są niewielkie i nie przekraczają 8 W·m⁻² (Liopo, Cicenکو 1971; Błażejczyk 1991a).

2.2.3. UNOSZENIE

Turbulencyjne unoszenie ciepła jawnego z powierzchni ciała jest niekiedy określane mianem konwekcji. Jej intensywność jest u człowieka stojącego różna w poszczególnych częściach ciała (ryc. 2.3) i wiąże się ze sposobem przepływu powietrza wokół niego. Ma to swoje odzwierciedlenie w profilach

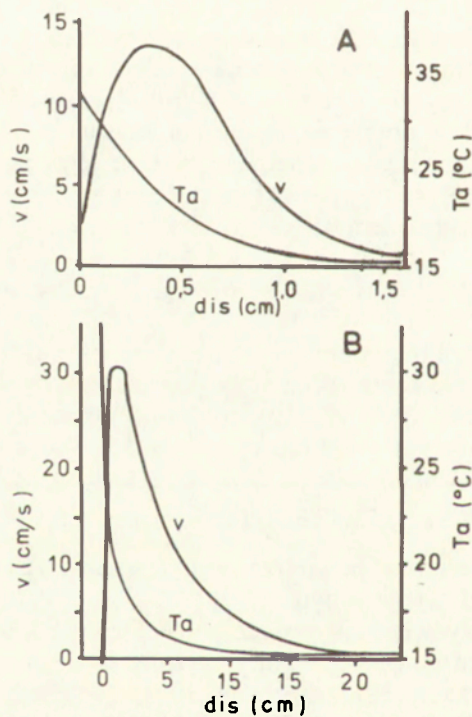


Ryc. 2.3. Strefy przepływu powietrza wokół człowieka stojącego (wg Clarka R. P. i Edholma 1985)

I – przepływ laminarny, II – strefa przejściowa, III – przepływ turbulencyjny

Zones of air flow at standing man (by Clark R. P. and Edholm 1985)

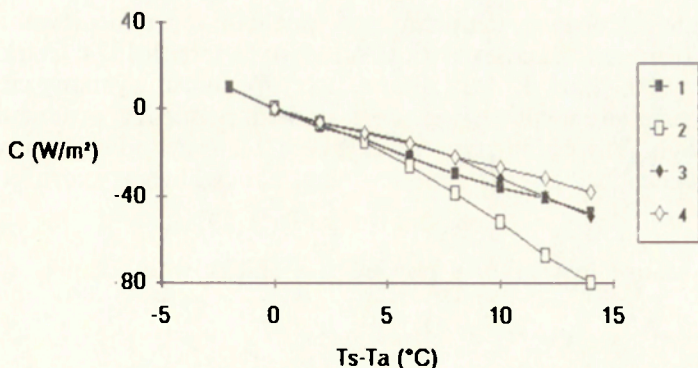
I – laminar flow, II – transitional flow, III – turbulent flow



Ryc. 2.4. Temperatura powietrza (T_a) i prędkości jego ruchu (v) w różnej odległości od skóry (dis) w strefie przepływu laminarnego (A) i turbulencyjnego (B); profile dla temperatury otoczenia 15°C i temperatury skóry 33°C (Clark R. P., Edholm 1985)

Air temperature (T_a) and air movement (v) in different distance (dis) from the skin at laminar (A) and turbulent (B) flow zone; profiles for ambient temperature of 15°C and skin temperature of 33°C (by Clark R. P. and Edholm 1985)

zmian temperatury i prędkości ruchu powietrza w granicznej warstwie przy-skinnej (ryc. 2.4). Wielkość wymiany ciepła przez unoszenie zależy od różnicy pomiędzy temperaturą skóry a temperaturą powietrza oraz od tak zwanego



Ryc. 2.5. Zależność wymiany ciepła przez unoszenie od różnicy pomiędzy temperaturą skóry i temperaturą powietrza według różnych autorów

1 - Błażejczyk 1991a, 2-4 - wg Mitchella 1974 (2 - Nielsen, 3 - Birbeck, 4 - Colin)

Dependence of convective heat exchange from air to skin temperature differences by some authors

współczynnika konwekcyjnego przenoszenia ciepła (hc), który jest funkcją gęstości i pojemności cieplnej powietrza oraz prędkości jego przepływu wokół ciała (ISO/DIS 7933; Budyko, Cicenکو 1960; Bligh, Johnson 1973; Mitchell 1974; Clark R. P. 1980; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980; Clark R. P., Edholm 1985):

$$C = hc(T_s - T_a) Cl. \quad (4)$$

W temperaturze powietrza niższej od temperatury skóry strumień ciepła unoszonego turbulencyjnie jest skierowany od człowieka ku otoczeniu (ryc. 2.5). W warunkach klimatycznych Polski obserwuje się niekiedy dopływ ciepła do organizmu drogą konwekcji podczas adwekcji powietrza zwrotnikowego, gdy jest ono cieplejsze od powierzchni ciała (Błażejczyk 1991a).

2.24. PRZEWODZENIE

Z wymianą ciepła przez przewodzenie (kondukcję) mamy do czynienia w wypadku bezpośredniego kontaktu człowieka z innym ciałem. Jej intensywność zależy od różnicy temperatury stykających się powierzchni oraz ich pojemności i przewodności cieplnej (Ingram, Mount 1975).

W badaniach fizjoklimatycznych strumień ten jest pomijany z uwagi na znikomą jego wartość związaną z tym, że u człowieka stojącego powierzchnia ciała kontaktująca się z podłożem jest bardzo mała (ISO/DIS 7933, ISO/DC 11079). Kondukcyjny strumień ciepła jest rozpatrywany jedynie podczas analizy przepływu ciepła z wnętrza ciała do jego powierzchni lub też pomiędzy skórą a poszczególnymi warstwami odzieży (Clark J. A. i in. 1973; Burt i in. 1982a; Jokl 1982; Clark R. P., Edholm 1985).

2.25. PROMIENIOWANIE DŁUGOFALOWE

Pomiędzy człowiekiem a powietrzem i obiektami otoczenia następuje wzajemny przepływ ciepła drogą promieniowania o długości fal 0,8-4,0 μm . Skóra, podobnie jak każda powierzchnia fizyczna, emituje promieniowanie

proporcjonalnie do swej temperatury i pochłania promieniowanie ciepłe z otoczenia (Budyko, Cicenko 1960; Cena 1974; Monteith 1974; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980; Clark R. P., Edholm 1985). Wielkość wymiany ciepła przez promieniowanie długofalowe jest więc saldem pomiędzy promieniowaniem wyemitowanym i pochłoniętym przez skórę i zależy od pola temperatury wokół człowieka. Można to zapisać w postaci ogólnego wzoru:

$$L = \Sigma (s\sigma T_s^4 - s\sigma T_n^4) Cl, \quad (5)$$

gdzie T_n oznacza temperaturę powietrza i obiektów otoczenia.

2.2.6. PRACA

Badając bilans cieplny człowieka rozpatruje się także ciepło, które powstaje w wyniku pracy mięśni, ale jest jednocześnie zużywane na ich ruch (tzw. praca pozytywna – Nielsen B. i in. 1972; Bligh, Johnson 1973). Przy cyklicznych zmianach napięcia mięśni podczas każdej czynności fizycznej następuje kolejno: uwalnianie ciepła, zatrzymywanie go w mięśniach i jego zużycie na ponowne wprowadzenie ich w ruch (Mitchell 1977).

Ponieważ przy większości form fizycznej aktywności człowieka ilość ciepła uwalnianego podczas pracy i zużywanego na nią równowazy się, dlatego w badaniach fizjoklimatycznych wielkość W jest pomijana jako nieznacząca (ISO/DIS 7933, ISO/DC 11079).

2.3. WZROST (UBYTEK) CIEPŁA W ORGANIZMIE

Istotnym elementem wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem jest jej saldo (S). Terminem tym określa się wzrost (saldo dodatnie) lub też spadek (saldo ujemne) zawartości ciepła w organizmie, co jest wynikiem niezbilansowania się przychodów i strat ciepła (Bligh, Johnson 1973; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980; Clark R. P., Edholm 1985; Kaciuba-Uściłko 1990).

W badaniach fizjologicznych zmiany zawartości ciepła w organizmie są określane przez bezpośrednie pomiary temperatury ciała i oblicza się je według wzoru:

$$S = 0,83 m (0,65 T_{re} - 0,35 T_s), \quad (6)$$

gdzie T_{re} oznacza temperaturę rektalną, m masę ciała, a 0,83 jest jego ciepłem właściwym (Kaciuba-Uściłko 1990).

Wielkość S może być także wyznaczona jako reszta z równania bilansu cieplnego człowieka (Raynaud i in. 1976; Nielsen B. i in. 1988; Błażejczyk 1991a; Błażejczyk, Krawczyk 1991; Krawczyk, Błażejczyk 1991; Kravčík i in. 1991).

Niebezpieczne dla organizmu jest zarówno zbyt duże saldo ujemne, jak i nadmierne zgromadzenie ciepła w organizmie. Dla wzrostu temperatury ciała o 1°C konieczne jest zakumulowanie 245-300 kJ ciepła (Clark J. A. i in. 1980; Smolander 1987); odpowiada to strumieniowi ciepła o stałym w ciągu jednej godziny natężeniu około $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pewna ilość ciepła jest przy tym gromadzona bezpośrednio w obrębie skóry i tkanki podskórnej oraz mięśni, nie przenikając do organów wewnętrznych (Nadel 1985).

Głównymi czynnikami stymulującymi wzrost zawartości ciepła w organizmie i powodującymi podwyższenie temperatury wewnętrznej są praca (Garden i in. 1966; Strydom i in. 1966; Rowell i in. 1969; Nielsen B. i in. 1972; Givoni, Goldman 1973; Wyndham i in. 1973; Smolander i in. 1984; Smolander 1987) oraz przebywanie w wysokiej temperaturze otoczenia (Strange-Petersen, Vejby-Christiansen 1973; Reynaud i in. 1976; Kenney 1985; Błażejczyk 1991a). Przebywanie w środowisku zimnym prowadzi natomiast do ubytku ciepła w organizmie i obniżenia się temperatury wewnętrznej (Iampietro i in. 1958; Gavhed, Holmér 1989a; Holmér 1989c).

Całkowite zbilansowanie się zysków i strat ciepła z organizmu w krótkich okresach jest praktycznie niemożliwe. Występuje ono jedynie „w wystarczająco długim czasie” (Ingram, Mount 1975; Mitchell 1977; Clark R. P., Edholm 1985). Szczegółowe pomiary produkcji i strat ciepła w okresach dobowych wskazują, że w tym właśnie czasie wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem zamyka się bilansem zerowym (Kreider i in. 1958; Aschoff i in. 1974; Webb 1971; ryc. 2.1).

Ponieważ saldo wymiany ciepła kształtuje się w wyniku działania czynników fizjologicznych i meteorologicznych, jego wartość mówi o obciążeniu cieplnym organizmu i wskazuje na odczucia cieplne człowieka. Ogólnie biorąc, przy wzrastającej ilości ciepła w organizmie człowiek odczuwa „komfort” lub „gorąco”, a przy ubytku ciepła dominują odczucia „komfortu” i „zimna” (Nishimura i in. 1978).

3. MODELE BILANSU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA

Podstawowy model opisujący wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, stosowany w badaniach fizjoklimatycznych, ma postać równania (Bligh, Johnson 1973):

$$S = M - (\pm W) \pm E \pm R_s \pm C \pm K, \quad (7)$$

w którym straty ciepła na oddychanie są włączone do strumieni wymiany ciepła związanych z parowaniem i unoszeniem.

Podobne równanie występuje także w wielu innych modelach, które zależnie od warunków (jakie mają opisywać) lub celów (jakim mają służyć) można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- modele bilansu cieplnego człowieka dla warunków niestacjonarnych,
- modele bilansu cieplnego człowieka dla warunków stacjonarnych.

Jako niestacjonarne określa się takie warunki, w których następują ciągle chwilowe wahania reakcji termoregulacyjnych organizmu, będące wynikiem obciążenia pracą lub zmieniających się warunków termicznych otoczenia, a saldo wymiany ciepła jest różne od zera (Clark J. A. i in. 1980).

O warunkach stacjonarnych można mówić w wypadku dłuższych okresów, gdy uśrednione dla nich wartości parametrów fizjologicznych i meteorologicznych są na poziomie zapewniającym równowagę się zysków i strat ciepła (Mitchell 1977).

3.1. MODELE BILANSU CIEPLNEGO DLA WARUNKÓW NIESTACJONARNYCH

W badaniach fizjoklimatycznych – prowadzonych głównie w komorach klimatycznych – rozpatrywanie bilansu cieplnego człowieka w warunkach niestacjonarnych służy przede wszystkim opisowi funkcjonowania ustroju przy konkretnym obciążeniu termicznym, w różnej odzieży i przy różnym wysiłku fizycznym. Określane jest obciążenie układu oddechowego i krążenia oraz subiektywne odczucia cieplne (Behling i in. 1971; Mitchell 1977; Nishimura i in. 1978; Young 1979; Clark J. A. i in. 1980; Nishi 1980; Höpfe 1984; Clark R. P., Edholm 1985; Nadel 1985; Sołtyński 1988; Nielsen R., Endrusick 1990a, 1990b).

Modele opisujące niestacjonarne warunki wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem są także stosowane w badaniach bioklimatycznych. Służą one przede wszystkim do oceny warunków środowiskowych, w których przebywa człowiek lub też do określenia lokalnego zróżnicowania biotermicznego. Problemem, który wymaga tu rozwiązania, jest określenie temperatury skóry – podstawowego parametru fizjologicznego wpływającego na wartość poszczególnych strumieni ciepła. Większość modeli przyjmuje założenie, że

temperatura skóry jest stała i wynosi (najczęściej) 33° C. Obliczona w ten sposób zmiana zawartości ciepła w organizmie (saldo wymiany ciepła) zależy tylko od warunków meteorologicznych panujących w otoczeniu człowieka i może być traktowana jedynie jako wskaźnik oceny warunków bioklimatycznych, a nie jako realna wielkość fizjologiczna. Podejście takie pozwala zatem na określenie względnych różnic biotermicznych pomiędzy odmiennymi warunkami klimatycznymi, pogodowymi czy też terenowymi.

Pierwszy tego rodzaju bioklimatyczny model bilansu cieplnego człowieka został opracowany przez W. H. Terjunga (1966, 1970, 1971, 1974). Stosowany był do badania bioklimatu miast w Kalifornii. W modelu tym autor rozpatrywał oddzielnie dopływ i oddawanie ciepła do otoczenia przez unoszenie, parowanie i promieniowanie długofalowe. Podobny model był też stosowany przez S. E. Tullera (1975) do badania mikroklimatu otoczenia budynków.

Niemal w tym samym czasie opracowali swe modele P. Webb (1971) oraz N. P. Povolockaja (1975a, 1975b). Nowością w modelu P. Webba było uwzględnienie strat lub zysków ciepła związanych ze spożywaniem napojów. N. P. Povolockaja wydzieliła natomiast w swym modelu – jako oddzielny człon – straty ciepła na oddychanie. Badania kliniczne i ankietowe, prowadzone wśród pacjentów i mieszkańców uzdrowisk kaukaskich, pozwoliły autorce na opracowanie klasyfikacji obciążeń termicznych i odczuć cieplnych ludzi, przy różnej wskaźnikowej wartości salda wymiany ciepła (tab. 3.1).

Tabela 3.1. Odczuwalność cieplna człowieka przy różnych wskaźnikowych wartościach salda wymiany ciepła
Thermal sensations in man with different index values of net heat storage

| Odczucia cieplne | Saldo wymiany ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | |
|----------------------|---|----------------|
| | Povolockaja (1975b) | Freitas (1985) |
| Bardzo gorąco | | > 307 |
| Gorąco | > 290 | 162-307 |
| Ciepło | 175-290 | 84-161 |
| Umiarkowanie ciepło | 59-174 | 17-83 |
| Komfortowo | -58- +58 | -49- +16 |
| Umiarkowanie chłodno | -116- -59 | -110- -50 |
| Chłodno | -174- -117 | -184- -111 |
| Zimno | -232- -175 | -281- -185 |
| Bardzo zimno | < -232 | < -282 |

Propozycja G. Jendritzky'ego (1982, 1990), nosząca nazwę „Klima-Michel-Modell”, służy do badań bioklimatycznych w skali lokalnej i regionalnej. W modelu tym straty ciepła na parowanie są rozdzielone na dyfuzyjne i związane z poceniem się.

Model opracowany przez C. R. de Freitas (1985, 1990) otrzymał od autora nazwę HEBIDEX. Posłużył autorowi do oceny odczuć cieplnych użytkowników plaży w Australii (tab. 3.1).

Dopiero ostatnie lata przyniosły badania fizjoklimatyczne przeprowadzone w terenie otwartym, podczas których mierzono zarówno parametry termiczno-wilgotnościowe i insolacyjne środowiska, jak i temperaturę skóry. Do ob-

liczenia poszczególnych strumieni ciepła stosowano różne modele. Określone w badaniach zmiany zawartości ciepła w organizmie są realnymi wielkościami fizjologicznymi, mówiącymi o rzeczywistych, termicznych obciążeniach organizmu.

Badania B. Nielsen i innych (1988) dotyczyły osób ćwiczących na ergometrze, ubranych tylko w spodenki gimnastyczne. Zmiany zawartości ciepła w organizmie liczone były w dwojaki sposób: na podstawie zmiany temperatury skóry i temperatury rektalnej oraz jako reszta z równania bilansu cieplnego. Różnice pomiędzy tak wyznaczonymi wartościami S nie przekraczały 5%.

C. R. de Freitas i M. G. Ryken (1989) prowadzili pomiary u osób biegających w stroju gimnastycznym, a zastosowanemu do obliczeń bilansu cieplnego modelowi nadali nazwę BIODEX.

Badania K. Błażejczyka i B. Krawczyk prowadzone były w różnych strefach klimatycznych i odnosiły się do człowieka ubranego w odzież letnią (o izolacji termicznej 1 clo), stojącego w pozycji relaksowej. W zastosowanym modelu straty ciepła związane z parowaniem, unoszeniem i promieniowaniem długofalowym określono na podstawie zmierzonej temperatury skóry (Błażejczyk 1991a; Błażejczyk, Krawczyk 1991; Krawczyk, Błażejczyk 1991; Kravčík i in. 1991).

W tabeli 3.2 zestawiono założenia omówionych modeli bilansu cieplnego człowieka stosowanych dla warunków niestacjonarnych. W większości z nich saldo wymiany ciepła jest jedynie wskaźnikiem bioklimatycznym. Rzeczywiste zmiany zawartości ciepła w organizmie i związane z tym obciążenia termiczne mogą być ocenione tylko na podstawie pełnych badań fizjoklimatycznych, obejmujących zarówno parametry meteorologiczne, jak i temperaturę skóry człowieka.

Tabela 3.2. Modele bilansu cieplnego człowieka dla warunków niestacjonarnych stosowane w badaniach fizjologicznych i bioklimatycznych
Models of the human heat balance for unstationary conditions used in physiology and bioclimatology

| Autor modelu | Uwzględniane strumienie ciepła | Miara salda wymiany ciepła |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Bligh i Johnson (1973) | M, W, E, Rs, C, K, Res | wielkość fizjologiczna |
| Terjung (1966) | M, E, Rs, C | wskaźnik bioklimatyczny |
| Terjung (1974) | M, R, L, E, C | wskaźnik bioklimatyczny |
| Webb (1971) | M, K, E, C, Rs, W, P | wskaźnik bioklimatyczny |
| Povolockaja (1975a, b) | M, Rs, E, C, Res | wskaźnik bioklimatyczny |
| Freitas (1985) (HEBIDEX) | M, R, L, E, C, K | wskaźnik bioklimatyczny |
| Nielsen i in. (1988) | M, W, R, L, C, E | wielkość fizjologiczna |
| Freitas i Ryken (1989) | M, W, E, C, R | wielkość fizjologiczna |
| Jendritzky (1990) | M, W, R, L, C, E, Res, P | wskaźnik bioklimatyczny |
| Błażejczyk (1991a) | M, R, L, E, C, Res | wielkość fizjologiczna |

P – zyski lub straty ciepła związane ze spożywaniem napojów i pokarmów, objaśnienia symboli innych strumieni ciepła w Dodatku 1.

3.2. MODELE BILANSU CIEPLNEGO DLA WARUNKÓW STACJONARNYCH

Modele te zakładają równoważenie się zysków i strat ciepła z organizmu i służą do oceny warunków bioklimatycznych różnych obszarów lub okresów.

Czynnikami równoważącymi bilans cieplny są: temperatura skóry, termoizolacyjność odzieży, parowanie potu z powierzchni ciała lub poziom aktywności fizycznej. Wielkość czynnika równoważącego jest z reguły wskaźnikiem oceny termicznych warunków środowiska.

Najpowszechniejsze są modele zakładające bilansowanie się wymiany ciepła przez zmianę temperatury skóry. Jednym z pierwszych był model opracowany przez zespół M. I. Budyko (Budyko 1959, 1971; Budyko, Cicenکو 1960; Liopo, Cicenکو 1971). Czynnikiem równowagi bilansu cieplnego jest – poza temperaturą skóry – termoizolacyjność odzieży. Model ten został zmodyfikowany przez B. Krawczyk (1977, 1978, 1979), która rozdzieliła saldo wymiany radiacyjnej w pełnym zakresie widma (R_s) na pochłonięte promieniowanie słoneczne (R) i saldo promieniowania w zakresie długofalowym (L). Model ten był także stosowany w badaniach przez K. Błażejczyka (1987a, 1987b); autor rozpatrywał w nim strukturę pochłoniętego promieniowania słonecznego.

D. L. Morgan i R. L. Baskett (1974) stworzyli model MANMO, w którym wskaźnikiem odczuwalności cieplnej jest stosunek temperatury skóry, zapewniającej równowagę cieplną, do temperatury skóry w warunkach komfortowych (33°C).

Specyfiką modelu HUMAN, opracowanego przez J. E. Burta i innych (1982a) jest rozpatrywanie wymiany ciepła pomiędzy skórą i odzieżą w obrębie różnych warstw odzieży oraz pomiędzy odzieżą a otoczeniem.

C. R. de Freitas (1985, 1990), poza modelem HEBIDEX (omówionym w podrozdz. 3.1), opracował także model STEBIDEX, w którym zakłada równowagę zysków i strat ciepła poprzez zmiany temperatury skóry. Taką samą podstawę bilansowania się wymiany ciepła przyjął V. K. Marinov (1961; 1971 (red.)); wskaźnikiem komfortu termicznego jest jednak u niego prężność pary wodnej na powierzchni skóry.

Dla warunków klimatycznych charakteryzujących się wysoką temperaturą powietrza i małą jego wilgotnością opracowane zostały modele zakładające równoważenie się bilansu cieplnego człowieka przez parowanie wody z powierzchni ciała, a natężenie ewaporacji jest wskaźnikiem obciążenia cieplnego stroju (Ajzenštat 1973; Ajzenštat i in. 1974; Givoni 1976).

Do oceny natężenia stresu zimna przydatny jest model IREQ opracowany przez I. Holmera (1988). Wskaźnikiem oceny biotermicznej środowiska jest termoizolacyjność odzieży wymagana dla zapewnienia równowagi cieplnej organizmu.

N. Hammer i inni (1986) oraz E. Koch i E. Rudel (1988) zaproponowali model, w którym równoważenie się przychodów i strat ciepła jest efektem zmian termoizolacyjności odzieży oraz aktywności fizycznej. Kombinacja metabolizmu i odzieży, równoważących wymianę ciepła, jest wskaźnikiem odczuwalności cieplnej.

Tabela 3.3 zawiera zestawienie omówionych modeli. W większości z nich czynnikiem równoważącym bilans cieplny jest temperatura skóry. Istniejące skale odczuć cieplnych, opartych na wartości temperatury skóry (T_s) bilansującej wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, znajdują się w tabeli 3.4.

Tabela 3.3. Modele bilansu cieplnego człowieka dla warunków stacjonarnych, stosowane w badaniach bioklimatycznych

Models of the human heat balance for stationary conditions used in bioclimatology

| Autor modelu | Uwzględniane strumienie ciepła | Czynnik równowagi cieplnej |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Budyko i Cicenکو (1960) | M, Rs, E, C, Res | temperatura skóry, odzież |
| Marinov (1961) | M, R, L, E, C, Res | temperatura skóry |
| Ajzenštat (1973) | M, R, L, E, C, Res | parowanie potu |
| Morgan i Baskett (1974) | M, R, L, E, C, Res | temperatura skóry |
| Givoni (1976) | M, Rs, C, E | parowanie potu |
| Krawczyk (1979) | M, R, L, E, C | temperatura skóry |
| Burt i in. (1982a, b, c) | M, Rs, C, E, Res, K | temperatura skóry |
| Freitas (STEBIDEX — 1985) | M, R, L, E, C, K | temperatura skóry |
| Hammer i in. (1986) | M, W, E, C, Res, Rs | metabolizm, odzież |
| Holmér (1988) | M, W, Res, E, C, Rs | odzież |

Objaśnienia jak w tabeli 3.2.

Tabela 3.4. Skale odczuwalności cieplnej człowieka oparte na temperaturze skóry warunkującej równowagę cieplną organizmu

Scales of thermal sensations in man based on the mean skin temperature required for heat equilibrium of the organism

| Skala wg Liopo i Cicenکو (1971) | Odczuwalność cieplna | Skala wg Freitas (1985, 1990) |
|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| < 28,1°C | bardzo zimno | < 21,1°C |
| 28,1-28,9 | zimno | 21,1-25,9 |
| 29,0-31,9 | chłodno | 26,0-29,0 |
| — | umiarkowanie chłodno | 29,1-30,8 |
| 32,0-33,2 | komfortowo | 30,9-32,2 |
| — | umiarkowanie ciepło | 32,3-33,3 |
| 33,3-34,3 | ciepło | 33,4-34,4 |
| 34,4-35,5 | gorąco | 34,5-35,2 |
| > 35,5 | bardzo gorąco | > 35,2 |

3.3. ZASTOSOWANIA MODELI BILANSU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA DO BADAŃ GEOGRAFICZNYCH W SKALI REGIONALNEJ I LOKALNEJ

Z ważniejszych opracowań regionalnych należy wymienić atlasy bilansu cieplnego człowieka Azji Środkowej (Ajzenštat 1973) i Bułgarii (Marinov (red.) 1971). Dla terytorium Stanów Zjednoczonych AP zostały opracowane mapy rozkładu różnych wskaźników bioklimatycznych opartych na bilansie cieplnym człowieka (Terjung 1966; Steadman 1979a, 1979b). Dla terenu byłego ZSRR G. V. Cicenکو (1967) wykonała mapy różnych składowych bilansu cieplnego człowieka. Najnowszą propozycją regionalnych opracowań bioklimatycznych opartych na bilansie cieplnym człowieka są mapy obciążeń cieplnych wykonane przez G. Jendritzky'ego (1990) dla byłego RFN. Zaznaczono na nich strefy wystąpienia ryzyka przegrzania i wychłodzenia organizmu na podstawie „wskaźnikowej” wartości S.

W. H. Terjung i S. S.-F. Louie (1971) opublikowali tabele, w których zestawili obciążenia termiczne człowieka przebywającego w różnych szerokościach geograficznych i na różnych wysokościach nad poziom morza.

Istnieją także opracowania dotyczące skali lokalnej. Stwierdzono w nich, że ilość promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka na obszarze miast jest zróżnicowana; w śródmieściu jest ona o 12-15% większa niż na terenach podmiejskich (Terjung, 1970; Terjung i in., 1970). Także G. Jendritzky i W. Nübler (1981) oraz G. Jendritzky i U. Sievers (1986) zajmowali się podobnym zagadnieniem. Zauważyli oni, że złożona struktura miasta powoduje różne nasłonecznienie „kanionów” ulicznych i silne zróżnicowanie warunków radiacyjnych.

Obszarów zurbanizowanych dotyczyły również badania J. F. Clarke'a i W. Bacha (1971), którzy zaobserwowali, że obciążenie cieplne organizmu jest w wypadku nawierzchni wybrukowanej o 30-35% większe niż na trawnikach. D. L. Morgan i R. L. Baskett (1974) badając bilans cieplny człowieka w ośmiu strefach miasta stwierdzili, że najkorzystniejsze warunki biotermiczne panują w parku, a najbardziej obciążające – na terenie zakładu przemysłowego. Do podobnych wniosków doszli także G. Jendritzky i W. Nübler (1981), na podstawie badań przeprowadzonych we Freiburgu w Niemczech, oraz J. E. Burt i inni (1982b, 1982c) – w wypadku miast kalifornijskich.

T. I. Abdumalikov (1974) porównał wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych typach krajobrazu pustyni Kyzyl-kum i gór Kopet-dag, a N. P. Povolockaja (1975a) zestawiała średnie miesięczne, wskaźnikowe wartości salda wymiany ciepła dla kilku typów krajobrazu północnego Kaukazu.

W Polsce, B. Krawczyk porównała strukturę bilansu cieplnego człowieka w różnych częściach górskiego uzdrowiska Iwonicz (1979, 1980, 1983) oraz na wąskiej mierzei nadmorskiej w Dźwirzynie koło Kołobrzegu (1984a, 1984b). K. Błażejczyk (1988a, 1991b) badaniami swymi objął dolinę Wisły w rejonie Warszawy oraz obszar Pojezierza Suwalskiego.

G. Menz (1990) zaproponował – wykorzystując „Klima-Michel-Modell” – metodę wydziałania jednostek biotopoklimatycznych o jednorodnych cechach bilansu cieplnego człowieka. Są one charakteryzowane liczbą dni, podczas których może latem wystąpić niebezpieczeństwo przegrzania organizmu.

Także K. Błażejczyk (1984a, 1984b, 1985, 1990a) opracował metodę wydziałania biotopoklimatów na podstawie struktury zysków i strat ciepła z organizmu w warunkach stacjonarnych. Metodą tą wykonano mapy biotopoklimatyczne różnych rodzajów krajobrazu Polski w skalach 1:25 000 – 1:100 000 (Błażejczyk 1984c, 1988a, 1988b, 1990b, 1990c, 1991c, 1992).

Pomimo stosunkowo dużej liczby prac z zakresu zastosowań bilansu cieplnego człowieka do badań w skali lokalnej mają one, poza propozycjami G. Menza i K. Błażejczyka, charakter wycinkowy i obejmują tylko niektóre rodzaje środowiska geograficznego.

4. WYNIKI BADAŃ KLIMATOLOGICZNO-FIZJOLOGICZNYCH

4.1. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ

Przeprowadzone badania składały się z dwóch części:

- badań laboratoryjnych, z zastosowaniem nowego modelu analogowego ciała człowieka – elipsoidy,
- badań terenowych, przeprowadzonych w różnych warunkach pogodowych i w różnych strefach klimatycznych (ryc. 4.1), podczas których mierzono zarówno parametry meteorologiczne, jak i fizjologiczne.

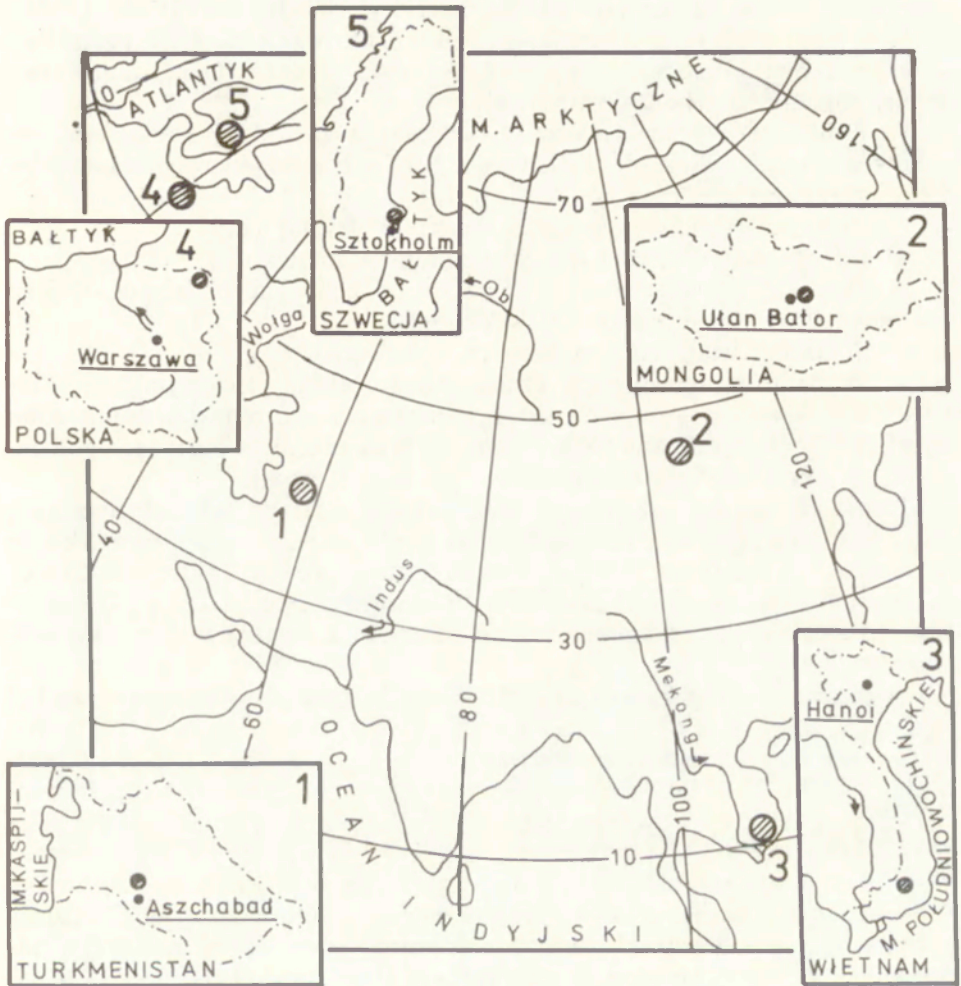
4.1.1. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne przeprowadzono w okresie od lutego do maja 1992 r. w Zakładzie Fizjoklimatologii Narodowego Instytutu Medycyny Pracy w Solnej (Szwecja). Badania te miały na celu określenie ilości promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka, z uwzględnieniem różnych warunków przepływu ciepła przez odzież. Jako model analogowy ciała człowieka zastosowano elipsoidę. Model ten jest zalecany przez Międzynarodową Organizację Standardyzacji (ISO 7730; ISO/DIS 9920) do badań termofizjologicznych jako lepiej niż cylinder odwzorujący postać człowieka stojącego.

Pomiary przeprowadzono w komorze klimatycznej z zastosowaniem lampy jodowej, emitującej promieniowanie krótkofalowe o spektrum zbliżonym do promieniowania słonecznego (Beeson 1978). Wyniki uzyskane w komorze poddano weryfikacji podczas analogicznych obserwacji przeprowadzonych w terenie otwartym.

4.1.2. BADANIA TERENOWE

Podczas terenowych badań bilansu cieplnego człowieka mierzono podstawowe parametry meteorologiczne i fizjologiczne niezbędne do obliczenia strumienia ciepła przepływającego od człowieka ku otoczeniu lub w kierunku przeciwnym, w różnych warunkach pogodowych i w różnych, lokalnych typach środowiska geograficznego. Pomiary te prowadzono w ramach szerszych badań topoklimatycznych, prowadzonych przez Zakład Klimatologii IGiPZ PAN. Niektóre wyniki tych badań były wcześniej publikowane, dotyczyły one jednak innych zagadnień niż prezentowane w obecnym opracowaniu. Przeprowadzono pięć serii pomiarów (w nawiasach podano istniejące publikacje oparte na wspomnianych wyżej badaniach):



Ryc. 4.1. Lokalizacja obszarów badanych terenowych bilansu ciepłego człowieka

1 – pustynia Kara-kum, 2 – centralna Mongolia, 3 – środkowy Wietnam, 4 – północno-wschodnia Polska, 5 – środkowa Szwecja

Areas of field investigations of the human body heat balance:

1 – Kara-kum desert, 2 – central Mongolia, 3 – central Vietnam, 4 – North-East Poland, 5 – central Sweden

1) w październiku 1986 r. – w strefie klimatu podzwrotnikowego suchego – na stacji naukowej Instytutu Pustyni Turkmeńskiej Akademii Nauk w Karykul koło Aszchabadu, w brzeżnej strefie pustyni Kara-kum (Błażejczyk, Krawczyk 1991; Krawczyk, Błażejczyk 1991; Kravcik i in. 1991);

2) w sierpniu 1987 r. – w strefie klimatu kontynentalnego, umiarkowanie chłodnego – w brzeżnej, południowej strefie gór Chentej w centralnej Mongolii, w obrębie doliny rzeki Toła (Skoczek i in. 1990);

3) w marcu 1988 r. – w strefie klimatu zwrotnikowo-monsunowego – na stacji naukowej Instytutu Badań Kawy w Ea-kmat koło Buon Ma Thuot na Płaskowyżu Tay Nguyen w środkowym Wietnamie (Błażejczyk i in. 1992);

4) w lipcu 1989 r. – w strefie klimatu umiarkowanie ciepłego, przejściowego – na obszarze Suwalskiego Parku Krajobrazowego, w północno-

-wschodniej Polsce (Błażejczyk 1991a; Błażejczyk, Grzybowski 1993a, 1993b), 5) w maju 1992 r. – w strefie klimatu umiarkowanie ciepłego, morskiego – w środkowej Szwecji, w rejonie Sztokholmu (badania te były częściowo finansowane przez The Swedish Institute).

W każdej serii przeprowadzono, jednakową metodą i z użyciem jednakowego typu aparatury badawczej, pomiary następujących elementów meteorologicznych:

- temperatury powietrza (psychrometrem Assmanna),
- wilgotności powietrza (psychrometrem Assmanna),
- natężenia promieniowania słonecznego: całkowitego, bezpośredniego i odbitego (pyranometrem Janiszewskiego),
- prędkości wiatru (anemometrem Robinsona),
- temperatury powierzchni gruntu (termometrem rtęciowym).

Obserwowano również wielkość zachmurzenia i jego rodzaj oraz mierzono wysokość Słońca nad horyzontem. Pomiary prowadzono w odstępach godzinnych, od wczesnych godzin porannych aż do zmierzchu.

Termometrem termistorowym obserwatorzy mierzyli także temperaturę skóry w pięciu punktach na powierzchni swego ciała: na czole, dłoni, klatce piersiowej, udzie i łydce. Pomiaru dokonywali w pozycji stojącej-relaksowej, w warunkach ustalonej wymiany ciepła z otoczeniem, to znaczy po 20 minutach pobytu na punkcie pomiarowym, skierowani twarzą w kierunku północnym.

W pierwszej, drugiej, trzeciej i piątej serii pomiarowej obserwatorem był mężczyzna o wzroście 172 cm, wadze około 70 kg i wieku 37-42 lata. W czwartej serii pomiarowej obserwatorów było 11, w tym 5 kobiet i 6 mężczyzn, w wieku 25-45 lat. Wszyscy mieli prawidłowe proporcje wzrostu do wagi ciała. Waga obserwatorów wynosiła średnio: 57 (± 7) kg u kobiet i 75 (± 5) kg u mężczyzn, a wzrost, odpowiednio – 158 (± 6) cm oraz 172 (± 7) cm.

Obserwatorzy ubrani byli w odzież sportową o izolacyjności termicznej 1 clo (jedynie w serii trzeciej – w Wietnamie – termoizolacyjność odzieży wynosiła 0,5 clo). Indywidualne różnice temperatury skóry pomiędzy poszczególnymi obserwatorami nie przekraczały 0,5°C (przy $T_s < 33^\circ\text{C}$) i 0,3°C (przy $T_s > 33^\circ\text{C}$).

Podczas drugiej i piątej serii pomiarowej (w sierpniu 1987 r. w centralnej Mongolii i w maju 1992 r. w środkowej Szwecji) przeprowadzono także badania porównawcze bilansu cieplnego człowieka używającego odzieży o różnej termoizolacyjności (0,5 clo, 1 clo i 1,5 clo).

Do obliczenia średniej ważonej temperatury korzystano z następującego wzoru:

$$T_s = 0,07T_1 + 0,05T_2 + 0,5T_3 + 0,18T_4 + 0,2T_5,$$

gdzie: T_1 – temperatura skóry czoła, T_2 – temperatura skóry dłoni, T_3 – temperatura skóry klatki piersiowej, T_4 – temperatura skóry uda, T_5 – temperatura skóry łydki.

W opracowaniu wykorzystano także wyniki innych badań topoklimatycznych prowadzonych przez Zakład Klimatologii IGiPZ PAN w różnych regionach fizycznogeograficznych Polski: na wybrzeżu Bałtyku, Pojezierzu Augustowskim i Suwalskim oraz w rejonie Warszawy i w Beskidzie Sądeckim.

4.2. BADANIA ILOŚCI POCHŁONIĘTEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Jak już wspomniano w podrozdziale 2.1.2, stosowane dotychczas metody oceny ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego odnoszą się do cylindra jako analogowego modelu ciała człowieka. Badania porównawcze przeprowadzone przez K. Błażejczyka, H. Nilssona i I. Holméra (1993) wykazały, że model ten niezbyt wiernie odzwierciedla rzeczywisty wpływ promieniowania słonecznego na organizm ludzki.

W fizjoklimatologii jako analog ciała człowieka stosowany jest model elipsoidy. Niestety, dotychczas nie był on używany do oceny obciążeń cieplnych organizmu spowodowanych promieniowaniem słonecznym. Prezentowane obecnie badania miały na celu określenie, jaka część poszczególnych strumieni promieniowania słonecznego zostaje zaabsorbowana przez powierzchnię elipsoidy, a przez analogię – także przez organizm człowieka.

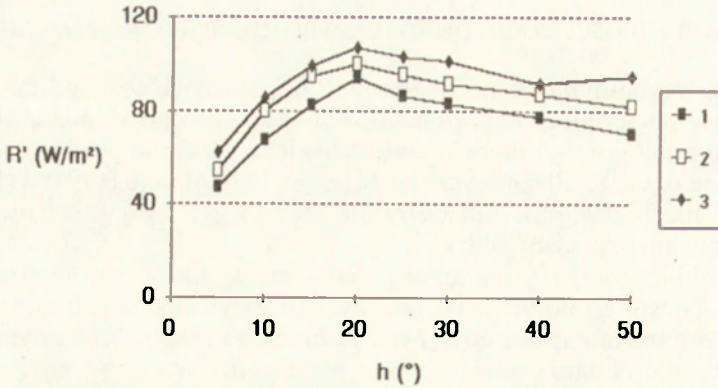
Pomiary przeprowadzono w komorze klimatycznej, w dwu zakresach temperatury powietrza: 0-2°C i 20-22°C. Jako źródło promieniowania słonecznego zastosowano lampę jodową (Thorn, typ CSI OQ 1000), a jako model ciała człowieka – czujnik temperatury o kształcie elipsoidy (Brüel & Kjaer, typ MM0023); jego oś dłuższa ma 160 mm, a oś krótsza – 54 mm, powierzchnia ma kolor popielaty o albedo 30%. Czujnik ten wskazuje tak zwaną temperaturę radiacyjną, która kształtuje się na jego powierzchni w wyniku oddziaływania temperatury powietrza oraz promieniowania długofalowego (Elnäs i in. 1985). Po wyłączeniu wzrostu temperatury spowodowanej przez promieniowanie długofalowe różnica pomiędzy temperaturą radiacyjną i temperaturą powietrza wskazuje na ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego.

Temperaturę radiacyjną i intensywność promieniowania długofalowego oraz natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą: bezpośredniego, rozproszonego i odbitego, mierzono pyranometrem Kip & Zonen nad trzema rodzajami podłoża (białym, zielonym i czarnym) przy wysokości „słońca” zmieniającej się od 5° do 50°. Promieniowanie długofalowe oraz bezpośrednio i rozproszone miało dla wszystkich powierzchni natężenie jednakowe. Znaczne różnice występowały jedynie w wypadku promieniowania odbitego; wahało się ono od 9-18 W · m⁻² nad powierzchnią czarną do 45-160 W · m⁻² dla podłoża białego.

Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana ilość wyemitowanego lub zaabsorbowanego promieniowania jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury, której zmianę to promieniowanie spowodowało. Ilość promieniowania słonecznego pochłoniętego przez jednostkę powierzchni badanego modelu elipsoidy zmieniała się w zależności od kąta padania promieni słonecznych od 45-60 W · m⁻² przy wysokości słońca 5° do 90-110 W · m⁻² przy h = 20° (ryc. 4.2).

Porównując natężenie poszczególnych strumieni promieniowania słonecznego, zmierzonych na powierzchni poziomej, z ich ilością pochłoniętą przez powierzchnię modelu określono współczynniki absorpcji. Wynoszą one:

- 0,36 dla promieniowania rozproszonego,
- (0,49 – 0,005 h) dla promieniowania odbitego od podłoża,
- ctg h (0,25 – 0,001 h) dla promieniowania bezpośredniego.



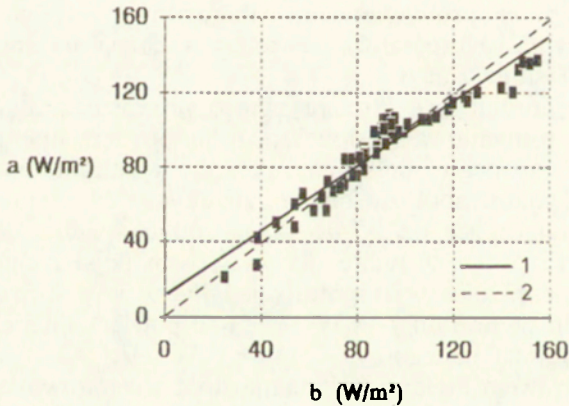
Ryc. 4.2. Promieniowanie słoneczne pochłonięte przez model elipsoidy przy różnym kącie padania promieni słonecznych i barwie podłoża

Barwa podłoża: 1 - czarna, 2 - zielona, 3 - biała

Solar radiation absorbed by an ellipsoid model with different Sun altitude and ground colour

Ground colour: 1 - black, 2 - green, 3 - white

Pomiary kontrolne, przeprowadzone w komorze klimatycznej oraz w terenie otwartym, dostarczyły niezależnych danych dotyczących ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego (R'). Porównując je z wartościami obliczonymi na podstawie podanych wyżej współczynników widać dużą zgodność (ryc. 4.3); współczynnik korelacji wynosi 0,923.



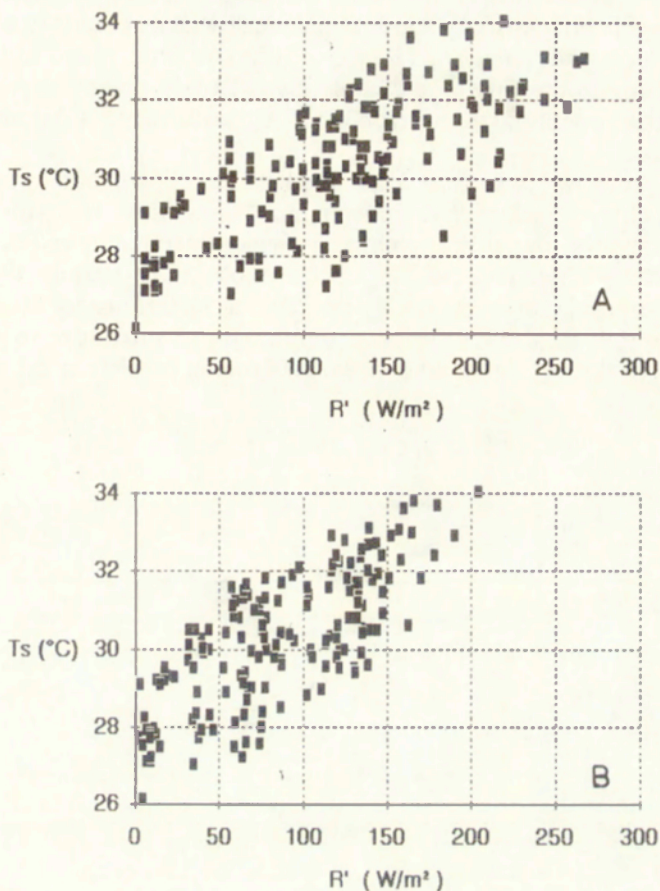
Ryc. 4.3. Porównanie zmierzonej (a) i obliczonej według nowego wzoru (b) ilości promieniowania słonecznego pochłoniętego przez elipsoidalny model ciała człowieka

1 - prosta regresji, 2 - prosta tożsamości

Comparison of measured (a) and calculated with the use of new equation (b) solar radiation absorbed by an ellipsoid model of man

1 - regression line, 2 - identity line

Zbadano także korelację pomiędzy średnią temperaturą skóry, obserwowaną w terenie otwartym podczas czwartej serii pomiarowej (w północno-wschodniej Polsce), a ilości promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka nie ubranego (R'), obliczoną dla modelu cylindra i modelu elipsoidy (ryc. 4.4). Współczynniki korelacji ($n = 225$ i $p = 0,05$) wynoszą:



Ryc. 4.4. Korelacja pomiędzy średnią temperaturą skóry a ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego obliczoną dla różnych modeli analogowych ciała człowieka: cylindra (A) (wg wzoru Krysa i Browna 1990) i elipsoidy (B)

Correlation between mean skin temperature and absorbed solar radiation calculated for different analog models of the human body: cylinder (A) (by Krysa and Brown equation 1990), and ellipsoid (B)

- 0,68 dla modelu cylindra (wg wzoru Budyko-Cicenko, 1960),
- 0,69 dla modelu cylindra (wg wzoru Krysa-Browna, 1990),
- 0,74 dla badanego obecnie modelu elipsoidy.

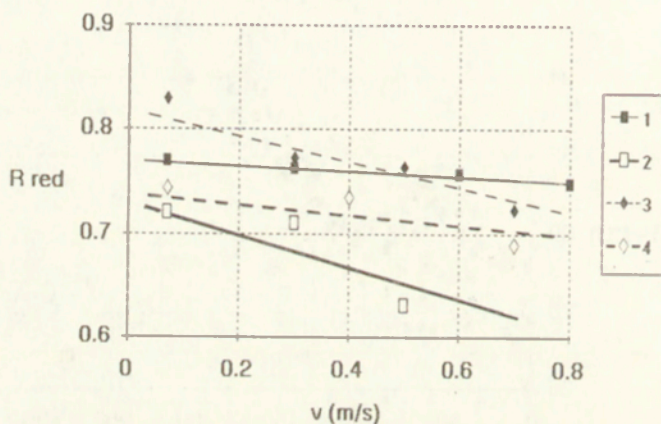
Stosunkowo wysoki współczynnik korelacji stwierdzony w wypadku elipsoidy wskazuje, że ten analog ciała ludzkiego lepiej niż cylinder ilustruje wpływ promieniowania słonecznego na reakcje fizjologiczne człowieka, określone przez średnią temperaturę skóry.

Przeprowadzone porównanie wskazuje również na istnienie różnic w bezwzględnych wartościach pochłoniętego promieniowania słonecznego: w modelu elipsoidy są one o 30-50% mniejsze niż dla modelu cylindra.

Człowiek przebywający w terenie otwartym używa z reguły różnego rodzaju odzieży. Znanych jest kilka współczynników określających jej opór

cieplny dla przepływu promieniowania. Ponieważ jednak były one konstruowane dla innych od elipsoidy modeli ciała człowieka, przeprowadzono więc eksperyment polegający na zmierzeniu, w jakim stopniu różne rodzaje tkanin okrywające badany obecnie model elipsoidy osłabiały przepływ promieniowania słonecznego, pochłoniętego przez nie i przewodzonego w kierunku powierzchni czujnika.

Wykorzystano w tym celu dwa identyczne elipsoidalne czujniki temperatury, z których jeden był przemiennie okrywany różnymi rodzajami tkanin: poliestrową, flanelową, wełnianą cienką i wełnianą grubą. Wszystkie miały jednakowy kolor (beżowy) o albedo około 30%, różniły się natomiast strukturą i grubością, a w efekcie – izolacyjnością termiczną, która wynosiła odpowiednio: 0,1, 0,25, 0,1 i 0,18 clo. Pomiarzy przeprowadzono w komorze klimatycznej, w której zmieniano prędkość ruchu powietrza od 0,07 do 0,8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Ryc. 4.5. Współczynniki osłabienia przepływu promieniowania słonecznego (R_{red}) zmierzone na modelu elipsoidy przy różnej prędkości ruchu powietrza (v) dla różnych tkanin

1 – polyester, 2 – flanela, 3 – wełna cienka, 4 – wełna gruba

Reducing coefficients (R_{red}) of solar radiation transfer by clothing measured at ellipsoid model with different air movement (v) for different fabrics

1 – polyester, 2 – flannel, 3 – wool (1 mm thick), 4 – wool (3 mm thick)

Rycina 4.5 ilustruje zmierzone współczynniki osłabienia przepływu ciepła przez różnego rodzaju tkaniny podczas różnej prędkości ruchu powietrza. Najwięcej energii słonecznej przenikało przez cienką tkaninę wełnianą i poliestrową, a najmniej – przez flanelę. Średnie wartości zmierzonych współczynników osłabienia przepływu ciepła są zbliżone do wartości obliczonych za pomocą wzorów: Budyko-Cicenko (1960), Brekenridge-Goldmana (1977) oraz Lee (1980) – tabela 4.1. Okazało się także, że zmierzone przy różnych prędkościach ruchu powietrza wartości współczynnika osłabienia przepływu ciepła są bardzo podobne do wartości obliczonych według wzoru Budyko-Cicenko (tylko ten wzór uwzględnia wpływ prędkości wiatru na przenikanie ciepła przez odzież); współczynnik korelacji dla wielkości zmierzonych i obliczonych wynosi 0,89.

Można zatem stwierdzić, że istniejące w literaturze przedmiotu wzory określające stopień osłabienia przepływu promieniowania słonecznego pochło-

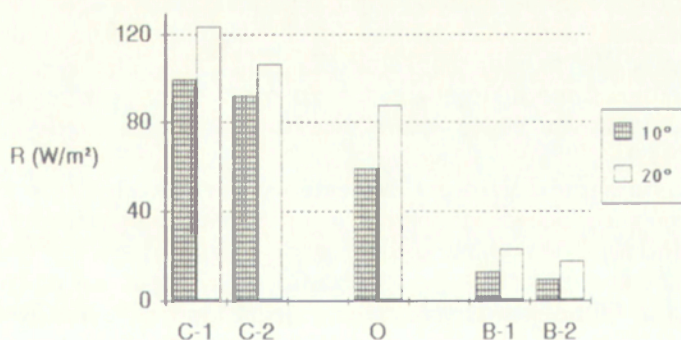
Tabela 4.1. Zmierzone na modelu elipsoidy i obliczone współczynniki osłabienia przepływu promieniowania słonecznego przez różnego rodzaju tkaniny o albedo 30%

Measured at an ellipsoid model and calculated coefficients reducing transfer of solar radiation by different fabrics with albedo of 30%

| Rodzaj tkaniny | Termoizolacyjność (clo) | Współczynnik osłabienia przepływu promieniowania | | | |
|----------------|-------------------------|--|-----------------------|------------------------------|------------|
| | | zmierzony na modelu elipsoidy | obliczony wg wzoru | | |
| | | | Budyko-Cicenko (1960) | Breckenridge-Goldmana (1977) | Lee (1980) |
| Polyester | 0,10 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,87 |
| Flanela | 0,25 | 0,71 | 0,71 | 0,74 | 0,77 |
| Wełna cienka | 0,10 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,87 |
| Wełna gruba | 0,18 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,79 |

niętego przez odzież odpowiadają wartościom zmierzonym dla modelu elipsoidy; mogą więc być stosowane dla tego analogowego wzorca ciała człowieka.

Określano także, w jakim zakresie może zmieniać się ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego w zależności od barwy noszonej odzieży i albedo jej powierzchni. Mierzono w tym celu pochłanianie promieniowania słonecznego przez model elipsoidy, przykryty tkaninami o jednakowej termoizolacyjności, ale o odmiennej barwie: białej (albedo około 90%) i czarnej (albedo około 3%). Porównano przepływ energii słonecznej przez zestawy odzieży składające się z jednej i dwu warstw. Ich termoizolacyjność wynosiła odpowiednio 0,36 i 0,43 clo. Duże pochłanianie promieniowania słonecznego przez odzież koloru czarnego powodowało, że na powierzchni modelu elipsoidy jego natężenie było 1,2-1,7 razy większe niż dla elipsoidy odkrytej. W wypadku odzieży białej ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni modelu stanowiła jedynie 16-25% ilości obserwowanej na elipsoidzie odkrytej (ryc. 4.6).



Ryc. 4.6. Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni modelu elipsoidy (R) przez różne zestawy tkanin przy wysokości „słońca” 10° i 20°

C-1 – czarna, jednowarstwowa, C-2 – czarna dwuwarstwowa, B-1 – biała jednowarstwowa, B-2 – biała dwuwarstwowa, O – elipsoida odsłonięta

Solar radiation absorbed by an ellipsoid model (R) covered by different fabrics assemblies with „sun” altitude of 10° and 20°

C-1 – black 1-layer, C-2 – black 2-layers, B-1 – white 1-layer, B-2 – white 2-layers, O – uncovered ellipsoid

Przedstawiony eksperyment wskazuje na duże znaczenie barwy noszonej odzieży w pochłanianiu promieniowania słonecznego i przewodzeniu ciepła do powierzchni ciała. Nieuwzględnianie tego czynnika może prowadzić do znacznych błędów podczas rozpatrywania bilansu cieplnego człowieka. Można także stwierdzić, że u osób przebywających w terenie otwartym, przy dopływie promieniowania słonecznego, kolor odzieży może mieć istotne znaczenie w regulacji poziomu wymiany ciepła z otoczeniem i salda tej wymiany.

4.3. METODA OBLICZANIA STRUMIENI CIEPŁA

Podczas badań terenowych wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem była określana dla warunków niestacjonarnych, charakteryzujących się wahaniami chwilowych wartości parametrów meteorologicznych i temperatury skóry. Ogólna postać przyjętego do obliczeń równania bilansu cieplnego ma zatem postać:

$$M + R + C + E + L + Res = S. \quad (9)$$

W związku z tym, że pomiary temperatury skóry dotyczyły człowieka w postawie stojącej, a indywidualny metabolizm podstawowy poszczególnych obserwatorów – określony metodą W. N. Schofielda (1985), tabela 2.1. – wahał się w niewielkim zakresie ($38-53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, zależnie od płci i wagi ciała), przyjęto – zgodnie z normą ISO 8996 – stałą wartość metabolizmu równą $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Różniła się ona od indywidualnego metabolizmu badanych osób nie więcej niż o $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Do obliczenia ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego wykorzystano omówione wyżej wyniki badań autora, przeprowadzonych z elipsoidalnym modelem ciała człowieka. Do obliczania wielkości pozostałych strumieni ciepła zastosowano zaadaptowane przez autora wzory zaproponowane przez T. N. Liopo i G. V. Cicenکو (1971) oraz B. Krawczyk (1979). Adaptacja przebiegała w następujących kierunkach:

- przeliczono wielkość poszczególnych współczynników i parametrów, dostosowując je do układu jednostek SI,

- zmieniono symbolikę stosowaną do oznaczenia poszczególnych parametrów oraz strumieni ciepła, dostosowując je do norm międzynarodowych (ISO/DIS 7933),

- zmieniono zapis wzorów szczegółowych tak, aby ujemna wartość strumieni ciepła oznaczała ich przepływ od powierzchni ciała ku otoczeniu, a wartość dodatnia – od atmosfery do organizmu,

- opracowano algorytm do obliczania strat ciepła na oddychanie (na podstawie tabel opublikowanych przez T. N. Liopo i G. V. Cicenکو 1971).

Do obliczeń bilansu cieplnego człowieka wprowadzono także wzór pozwalający (przy saldzie wymiany ciepła różnym od zera) na określenie maksymalnie dopuszczalnego czasu przebywania w danym środowisku, bez niebezpieczeństwa przegrzania lub wychłodzenia organizmu. Oparto się przy tym na stwierdzeniach fizjologów, że niebezpieczeństwo przegrzania lub wychłodzenia organizmu występuje wtedy, gdy temperatura wewnętrzna odchyła się od stanu normalnego (tzn. 37°C) o więcej niż 2°C (por. podrozdz. 1.2 i 2.3).

Szczegółowe wzory stosowane do obliczania poszczególnych strumieni ciepła mają następującą postać (wykaz wszystkich użytych symboli w Dodatku 1):

- pochłonięte promieniowanie słoneczne

$$R = [Q \operatorname{ctg} h(0,25 - 0,001 h) + 0,36D + (0,49 - 0,005 h)r] (1 - a)I_{rc}, \quad (10)$$

- straty ciepła na parowanie

$$E = h_e d(ea - e_s) w I_e, \quad (11)$$

- wymiana ciepła przez unoszenie

$$C = h_c d(T_a - T_s) I_{rc}, \quad (12)$$

- wymiana ciepła przez promieniowanie długofalowe

$$L = [2s \sigma T^3 (T_g - T_a) - 0,5s \sigma T^4 (0,254 - 0,005ea) (1 - c_N) + 4s \sigma T^3 (T_a - T_s)] I_{rc}. \quad (13)$$

- straty ciepła na oddychanie

$$R_{es} = T_a(0,0005f + 0,112) + (0,013f - 9,653) + 0,147. \quad (14)$$

Parametry pomocnicze stosowane w powyższych wzorach liczone w sposób następujący:

$$e_s = e^{(0,058 T_s + 2,003)}, \quad (15)$$

$$w = 1,031 / (37,5 - T_s) - 0,065, \quad (16)$$

(wg Ajzenštata i in. 1974; przy $T_s > 36,5^\circ \text{C}$ przyjmowano maksymalną wartość w wynoszącą 1,0),

$$4s \sigma T^3 = 0,056 T_a + 4,48, \quad (17)$$

$$s \sigma T^4 = 0,95 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} (273 + T_a)^4, \quad (18)$$

$$h_e = T_a(0,00006 T_a - 0,00002 a_p + 0,011) + 0,02 a_p - 0,773, \quad (19)$$

$$h_c = 0,013 a_p - 0,04 T_a - 0,503, \quad (20)$$

$$d = \sqrt{v}, \quad (21)$$

$$d' = 0,53 / I_{cl}, \quad (22)$$

$$I_{rc} = h_c d' / (h_c d' + h_c d + 4s \sigma T^3), \quad (23)$$

$$I_e = h_e d' / (h_e d' + h_c d). \quad (24)$$

Maksymalny czas przebywania w danych warunkach środowiskowych (MTE) liczone według wzoru:

$$MTE = 5400 / |S| \quad (25)$$

4.4. WYMIANA CIEPŁA W RÓŻNYCH WARUNKACH METEOROLOGICZNYCH

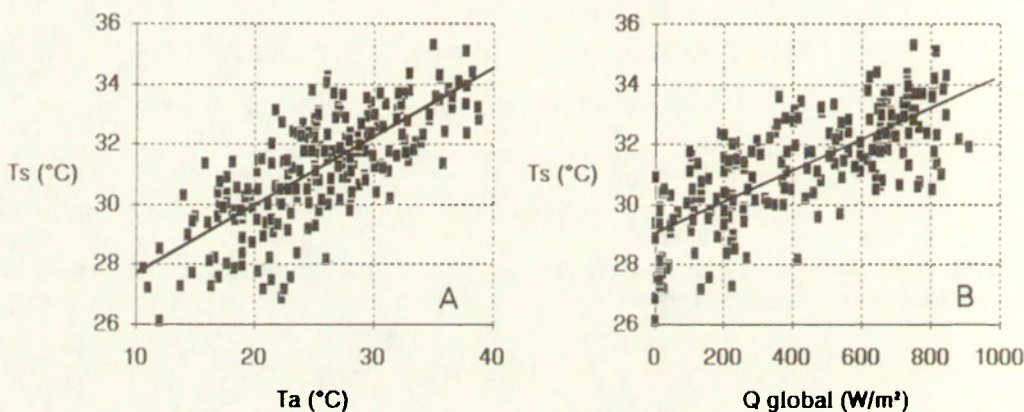
Wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych warunkach meteorologicznych analizowano na podstawie najdłuższej serii pomiarowej, przeprowadzonej w lipcu 1989 r. na terenie Suwalskiego Parku Krajobrazowego. Pogoda w okresie badań zmieniała się od upalnej i słonecznej do chłodnej i deszczowej.

Zebrane dane pozwoliły na obliczenie wszystkich strumieni ciepła. Prowadzono także badania ankietowe dotyczące odczuwalności ciepłej, co umożliwiło dokonanie analizy odczuć cieplnych występujących przy różnej temperaturze skóry i różnej zmianie zawartości ciepła w organizmie.

4.4.1. WARUNKI METEOROLOGICZNE A TEMPERATURA SKÓRY

Temperatura skóry jest tym parametrem fizjologicznym, mierzonym podczas badań terenowych, który w sposób bezpośredni wpływa na intensywność wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Dlatego też na wstępie omówienia wyników badań terenowych nieco uwagi poświęcone zostanie temu właśnie zagadnieniu.

Wyraźny wpływ na temperaturę skóry człowieka ma temperatura powietrza (ryc. 4.7). Jest to związane z reagowaniem receptorów zimna i ciepła, znajdujących się w skórze, na bodźce termiczne docierające z otoczenia.



Ryc. 4.7. Korelacja pomiędzy temperaturą skóry a temperaturą powietrza (A) i całkowitym promieniowaniem słonecznym (B)

Correlation between mean skin temperature and air temperature (A) as well as global solar radiation (B)

Uaktywniają one procesy termoregulacyjne, które dostosowują temperaturę skóry do aktualnych warunków termicznych otoczenia. Około 55% przypadków zmiany temperatury skóry można wyjaśnić bezpośrednim wpływem temperatury powietrza (tab. 4.2).

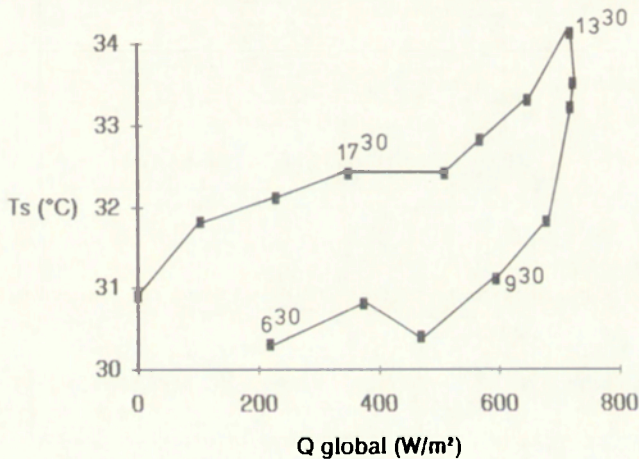
Nieco słabszy jest związek T_s z prężnością pary wodnej i wilgotnością względną powietrza. Nie jest to jednak bezpośredni wpływ wilgotności powietrza na temperaturę skóry. Jest to raczej związane z tym, że w warunkach klimatycznych Polski wraz ze wzrostem temperatury powietrza wzrasta także zawartość w nim pary wodnej.

Istnieje natomiast bezpośredni wpływ promieniowania słonecznego na wartość T_s (por. podrozdz. 1.2.1). Współczynniki korelacji i determinacji są w wypadku całkowitego promieniowania słonecznego podobne jak dla temperatury powietrza (tab. 4.2). Obserwuje się przy tym specyfikę przebiegów dziennych temperatury powietrza i natężenia promieniowania słonecznego.

Tabela 4.2. Związki statystyczne pomiędzy zmierzoną średnią temperaturą skóry a niektórymi elementami meteorologicznymi ($n = 214$, $p = 0,05$)
 Statistical relationships between measured mean skin temperature and some meteorological elements

| Element meteorologiczny | Współczynnik | |
|------------------------------------|--------------|------------------|
| | korelacji | determinacji (%) |
| Całkowite promieniowanie słoneczne | 0,743 | 55,2 |
| Temperatura powietrza | 0,739 | 54,6 |
| Prężność pary wodnej | 0,669 | 44,8 |
| Prędkość wiatru | 0,129 | 1,7 |

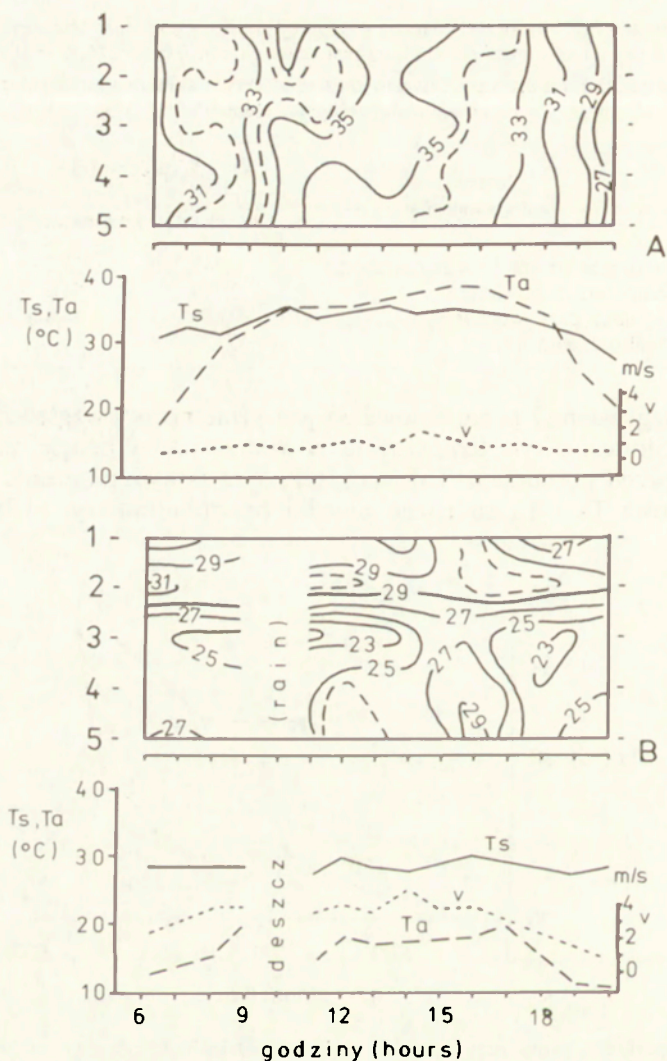
O ile przebieg dzienny promieniowania jest symetryczny względem momentu górowania Słońca, o tyle temperatura powietrza jest w drugiej połowie dnia wyższa niż przed południem. Tak więc, przy tym samym natężeniu promieniowania wartości T_s i T_a są różne przed i po południu (ryc. 4.8).



Ryc. 4.8. Temperatura skóry przy różnym natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego (Q global) i w różnych porach dnia

Mean skin temperature with different intensity of global solar radiation (Q global) and in different hours

Najsłabszy jest związek temperatury skóry z prędkością wiatru. Tylko około 2% zmian T_s wiąże się bezpośrednio ze zmianą v . Jest to niewątpliwie uwarunkowane tym, że temperatura skóry była mierzona przez osoby ubrane, a więc w warunkach, gdy wiatr docierał tylko do odsłoniętych części ciała. Gdy jednak weźmiemy pod uwagę odsłoniętą dłoń, to jej temperatura wyraźnie zależy od warunków wietrznych. Ilustruje to rycina 4.9, przedstawiająca temperaturę skóry różnych części ciała podczas pogody upalnej, bezchmurnej i bezwietrznej oraz umiarkowanie ciepłej, deszczowej i wietrznej. Widać, że w pierwszym typie pogody różnica pomiędzy temperaturą dłoni i tułowia była niewielka i nie przekraczała $1,5^{\circ}\text{C}$; w drugim – osiągała nawet 10°C .



Ryc. 4.9. Rozkład temperatury skóry w różnych częściach ciała podczas pogody upalnej, bezchmurnej i bezwietrznej (A) oraz umiarkowanie ciepłej, wietrznej i deszczowej (B)

1-5 – miejsca pomiaru temperatury skóry: 1 – czoło, 2 – pierś, 3 – dłoń, 4 – udo, 5 – łydka

Local skin temperature at different weather conditions: hot, calm and sunny (A) and temperate warm, windy and rainy (B)

1 – forehead, 2 – chest, 3 – palm, 4 – thigh, 5 – calf

Przeprowadzono także analizę korelacji wielokrotnej pomiędzy temperaturą skóry a niektórymi parametrami meteorologicznymi (tab. 4.3). Najwyższy jej współczynnik obserwuje się rozpatrując związek T_s z temperaturą powietrza, wilgotnością względną powietrza, całkowitym promieniowaniem słonecznym i prędkością wiatru, a tylko nieco mniejszy przy uwzględnieniu temperatury i wilgotności względnej powietrza, zachmurzenia i prędkości wiatru. Korelacja wielokrotna jest jeszcze silniejsza wtedy, gdy całość materiału podzielimy na trzy grupy ze względu na różne warunki wietrzne i insulacyjne (pogoda

z wiatrem o prędkości $\leq 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $> 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz sytuacje z bardzo małym dopływem promieniowania słonecznego, np. wnętrza lasów, godziny wczesnoporanne i przedwieczorne).

Tabela 4.3. Współczynniki korelacji wielokrotnej dla średniej temperatury skóry i niektórych elementów meteorologicznych ($n = 214$, $p = 0,05$)
Multiply correlation coefficients of mean skin temperature and some meteorological elements

| Charakterystyka warunków środowiskowych | Współczynnik korelacji | | |
|--|------------------------|-------------|----------|
| | zmienne niezależne | | |
| | Ta, f, K↓, v | Ta, f, N, v | Ta, f, v |
| Całość materiału | 0,81 | 0,79 | 0,64 |
| Przy małym dopływie promieniowania słonecznego | 0,79 | 0,78 | 0,83 |
| Przy prędkości wiatru $\leq 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 0,86 | 0,84 | 0,67 |
| Przy prędkości wiatru $> 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 0,84 | 0,83 | 0,68 |

K↓ – promieniowanie całkowite, objaśnienia innych symboli w Dodatku 1.

4.4.2. WYMIANA CIEPŁA W RÓŻNYCH SYTUACJACH POGODOWYCH

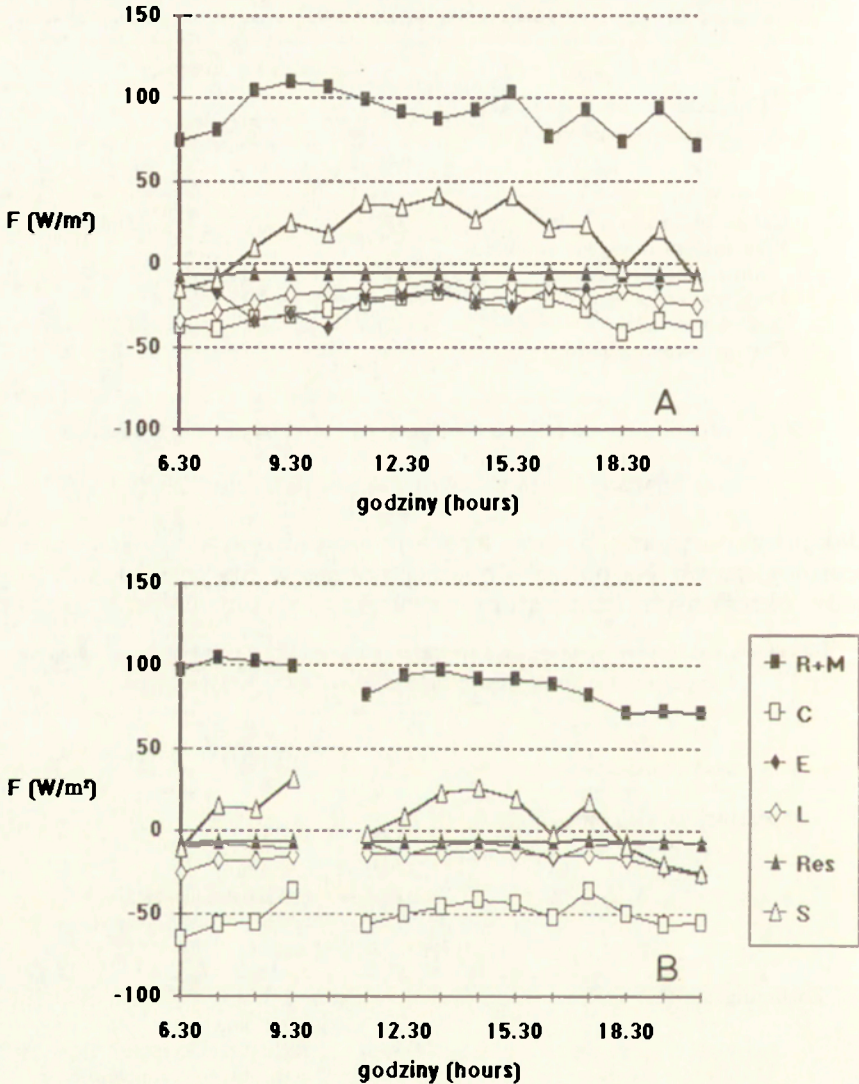
Jak już wspomniano, badania terenowe prowadzono w różnych warunkach meteorologicznych. Na potrzeby obecnego opracowania wydzielono 11 typów pogody określonych temperaturą powietrza, zachmurzeniem i prędkością

Tabela 4.4. Zakresy wartości elementów meteorologicznych w różnych typach pogody
Ranges of meteorological elements in different weather types

| Parametr meteorologiczny | Zakres | Typ pogody |
|--|-----------|----------------------|
| Temperatura powietrza (°C) | 5,1-13,0 | zimna |
| | 13,1-18,0 | chłodna |
| | 18,1-23,0 | umiarkowanie ciepła |
| | 23,1-28,0 | ciepła |
| | 28,1-33,0 | gorąca |
| | > 33,0 | upalna |
| Zachmurzenie (%) | 0-20 | bezczmurna |
| | 21-40 | zachmurzenie małe |
| | 41-70 | zachmurzenie zmienne |
| | 71-90 | zachmurzenie duże |
| | > 90 | pochmurna |
| Prędkość wiatru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 0-1,0 | bezwietrzna |
| | 1,1-2,0 | wiatr słaby |
| | 2,1-4,0 | wietrzna |
| | 4,1-6,0 | wiatr silny |
| | > 6,0 | wiatr bardzo silny |

wiatru. Tabela 4.4. zawiera zakresy powyższych parametrów w różnych typach pogody oraz określenia słowne tych typów.

Charakterystyczna dla półrocza ciepłego jest w Polsce pogoda ciepła, ze słabym wiatrem i zmiennym zachmurzeniem (ryc. 4.10A). W tym typie pogody występowały wahania ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego, nie



Ryc. 4.10. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody ciepłej ze słabym wiatrem i zmiennym zachmurzeniem (A) oraz chłodnej, pochmurnej, z silnym wiatrem (B) w warunkach klimatycznych Polski

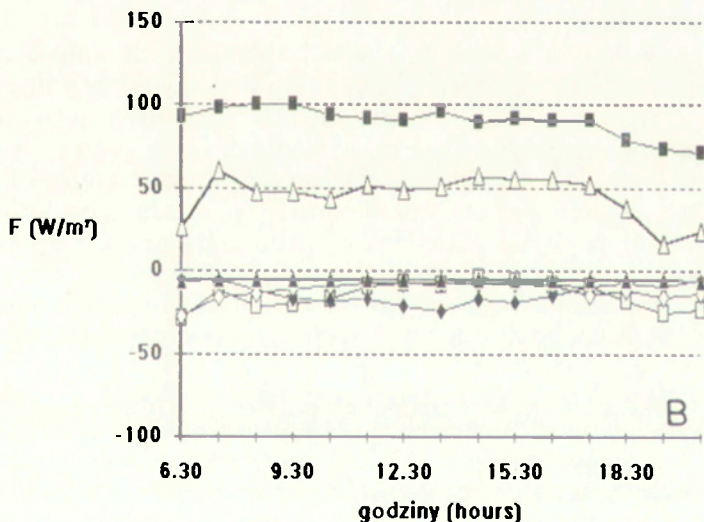
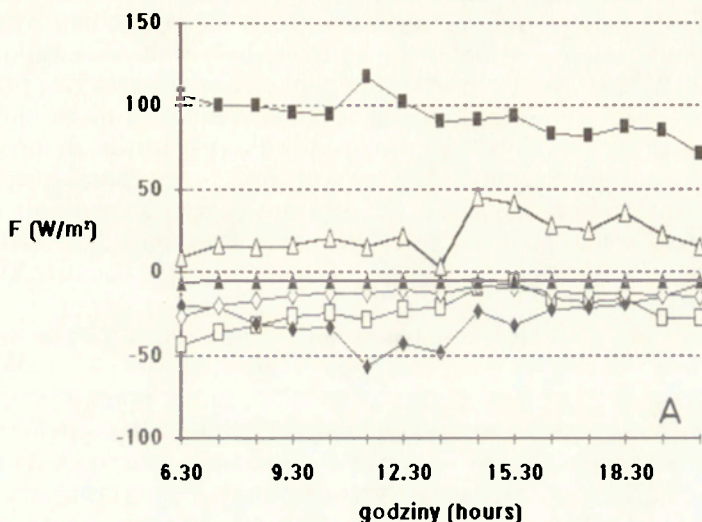
R + M – ogólne zyski ciepła, C – unoszenie, E – parowanie, L – promieniowanie długofalowe, Res – oddychanie, S – zmiany zawartości ciepła w organizmie (saldo wymiany)

Daily course of heat fluxes (F) during warm weather with weak wind and varied cloudiness (A) as well as during cool, cloudy weather with strong wind (B) at the climatic zone of Poland

R + M – total heat gains, C – convection, E – evaporation, L – radiation, Res – respiration, S – net heat storage

obserwowano jednakże przewagi żadnego ze strumieni wymiany ciepła. Jedyne rano i przed wieczorem przeważały konwekcyjne straty ciepła i mniejsze niż w ciągu dnia było saldo wymiany.

Podczas częstej – od wiosny do jesieni – pogody chłodnej i pochmurnej, z silnym wiatrem wyraźnie dominowały straty ciepła przez unoszenie. Pozostałe strumienie miały wartości niewielkie (ryc. 4.10B).



Ryc. 4.11. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody ciepłej i wietrznej: z zachmurzeniem małym (A) oraz pochmurnej (B) w warunkach klimatycznych Polski

Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Daily course of heat fluxes (F) during warm, windy weather with small (A) and full cloudiness (B) at the climatic zone of Poland

Explanations at fig. 4.10

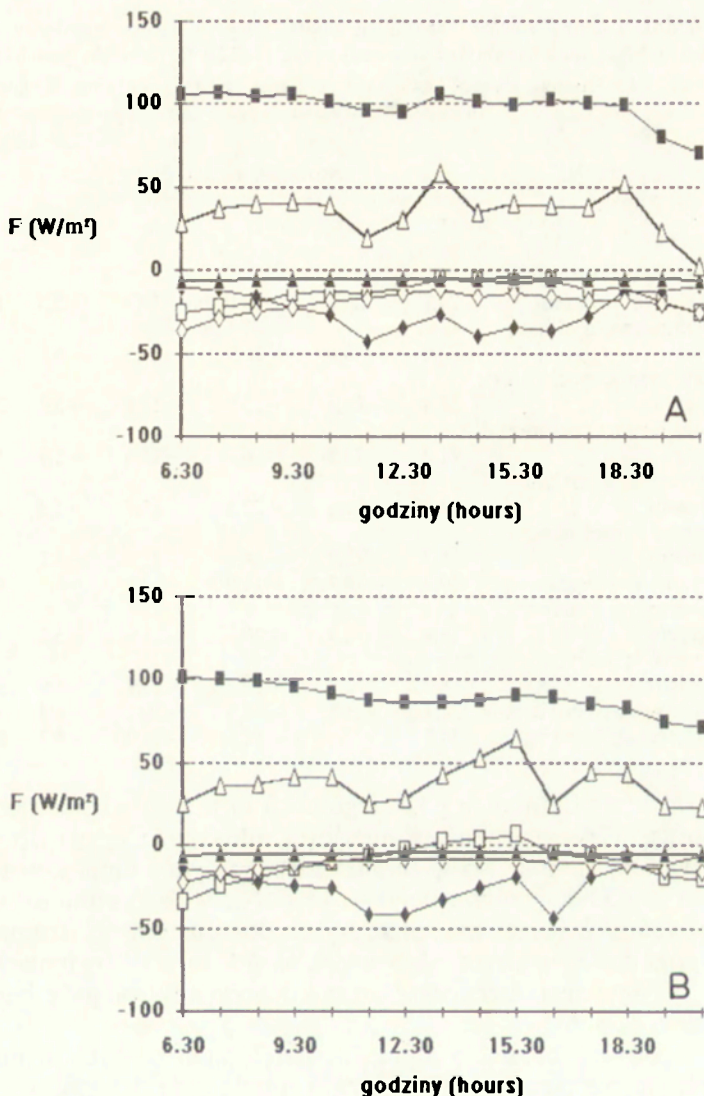
Podczas pogody cieplej i wietrznej widać wyraźne różnice wartości poszczególnych strumieni ciepła pomiędzy dniami z zachmurzeniem małym i dużym (ryc. 4.11). Najwyraźniej objawia się to w wypadku strat ciepła na parowanie i zmian zawartości ciepła w organizmie. Podczas pogody słonecznej straty ciepła na parowanie były zdecydowanie większe niż przy zachmurzeniu dużym; wiąże się to z wyższą temperaturą skóry notowaną przy dopływie bezpośredniego promieniowania słonecznego. W efekcie tego, saldo wymiany ciepła było w dniu słonecznym niższe niż w pochmurnym. Charakterystyczne dla pogody słonecznej i wietrznej były wahania ewaporacyjnych strat ciepła. Wiąże się to prawdopodobnie ze zwiększonym przez wiatr parowaniem potu z powierzchni ciała. Intensywnie parujący pot obniżał temperaturę skóry, a to z kolei powodowało okresowe zmniejszenie się wydzielania i parowania potu, a co za tym idzie – ewaporacyjnej wymiany ciepła. Dopiero po pewnym czasie temperatura skóry ponownie się podnosiła oraz wzrastało wydzielanie i parowanie potu. Przy pogodzie wietrznej, ale pochmurnej, wahań temperatury skóry i ewaporacyjnego strumienia ciepła nie obserwowano.

Podobne, jak podczas pogody cieplej, zmiany strat ciepła związanych z parowaniem notowano podczas pogody gorącej (ryc. 4.12). Wtedy gdy temperatura powietrza przewyższała temperaturę skóry, pojawiała się zjawiska dopływu ciepła do organizmu przez unoszenie; zjawisko to nasilało się wraz ze wzrostem prędkości wiatru. W warunkach wietrznych mniejsza była natomiast o prawie 10% ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego niż w dniu bezwietrznym. Wiąże się to z tym, że wraz ze wzrostem prędkości wiatru zwiększa się oporność cieplna odzieży, a więc mniej ciepła przenika przez nią do powierzchni skóry.

Z jeszcze większym natężeniem zjawisko cyklicznych wahań ewaporacji i konwekcyjnego dopływu ciepła występowało podczas pogody upalnej i bezchmurnej. Interesujące jest, że w warunkach wietrznych straty ciepła na parowanie były okresowo mniejsze niż w warunkach bezwietrznych. Wiąże się to z omówionym już zjawiskiem cyklicznych wahań temperatury skóry. W warunkach pogody upalnej, bezchmurnej i wietrznej zjawisko to bardzo wyraźnie się nasiliło. Wraz z dopływem ciepła przez unoszenie stanowiło to poważne obciążenie układu termoregulacyjnego. Maksymalny czas przebywania w takich warunkach wynosi około 90 minut. Dlatego też obserwatorzy korzystali w okresach pomiędzy obserwacjami z osłon przeciwsłonecznych lub przebywali w cieniu drzew.

Pomiędzy kwietniem a październikiem często pojawia się na obszarze Polski pogoda wietrzna, umiarkowanie ciepła ze zmiennym zachmurzeniem i opadami deszczu. Wtedy gdy sytuacje takie występowały podczas braku wiatru nie obserwowano przewagi któregoś ze strumieni ciepła, natomiast w warunkach wietrznych zaznaczała się dominacja strat ciepła przez jego unoszenie. Bezpośrednio po opadzie deszczu strumień strat ciepła związanych z parowaniem był znacznie mniejszy niż przed opadem, co wiąże się z ogólnym obniżeniem wtedy temperatury powietrza i temperatury skóry.

Porównując średnie dzienne wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych sytuacjach pogodowych widać, że wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia zmniejsza się ilość pochłoniętego



Ryc. 4.12. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody gorącej o małym zachmurzeniu: bezwietrznej (A) i wietrznej (B) w warunkach klimatycznych Polski

Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Daily course of heat fluxes (F) during hot weather with small cloudiness: calm (A) and windy (B) at the climatic zone of Poland

Explanations at fig. 4.10

promieniowania słonecznego (tab. 4.5). Podobny efekt powoduje wzrost prędkości wiatru. Wraz z podnoszeniem się temperatury powietrza zmniejszają się straty ciepła przez unoszenie (konwekcję), a zwiększają – straty ciepła związane z parowaniem. Straty ciepła przez promieniowanie długofalowe (radiację) wyraźnie wzrastają przy pogodzie bezwietrznej.

Po uśrednieniu strumieni ciepła dla jednostopniowych przedziałów temperatury powietrza w różnych warunkach zachmurzenia i prędkości wiatru,

Tabela 4.5. Średnie dzienne wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem oraz maksymalny czas przebywania (MTE) w różnych typach pogody
 Mean daily values of man-environment heat exchange fluxes and maximal time of exposure (MTE) in different weather types

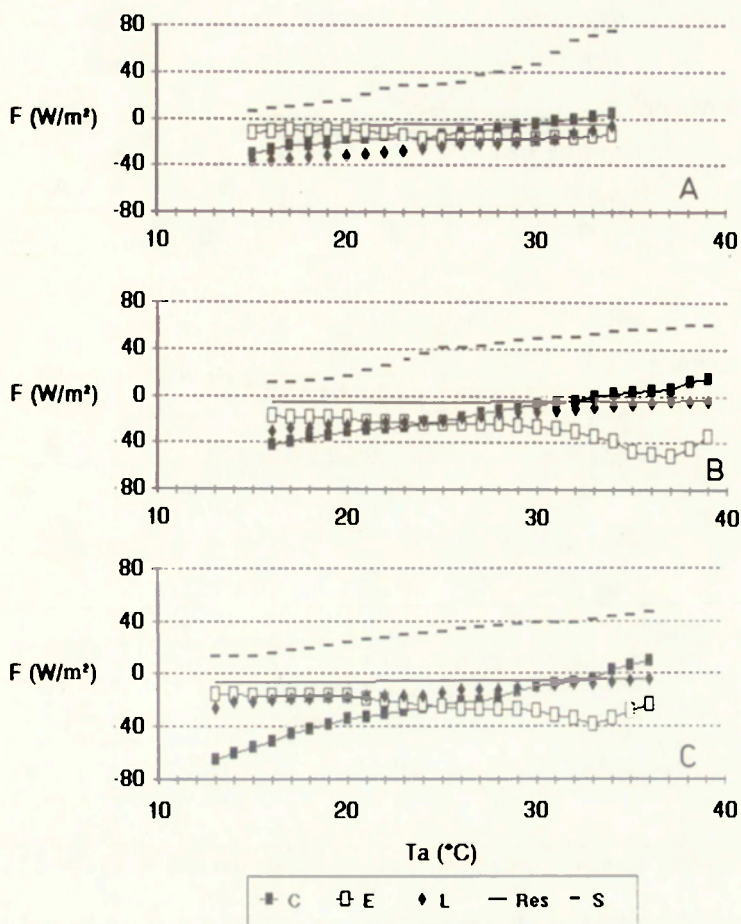
| Typ pogody | Strumień ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | | | | | | MTE (min) |
|--|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|-----------|
| | R | C | L | E | Res | S | |
| Ciepła, ze zmiennym zachmurzeniem i słabym wiatrem | 20,9 | -29,0 | -19,0 | -19,9 | -5,5 | 17,5 | 309 |
| Chłodna, pochmurna, z silnym wiatrem | 22,0 | -48,0 | -15,9 | -10,3 | -6,1 | 11,6 | 466 |
| Umiarkowanie ciepła, pochmurna, bezwietrzna | 18,4 | -28,1 | -15,0 | -17,8 | -5,3 | 22,2 | 243 |
| Umiarkowanie ciepła, pochmurna, wietrzna | 22,2 | -32,5 | -16,9 | -17,6 | -5,7 | 19,5 | 277 |
| Ciepła, bezwietrzna, z małym zachmurzeniem | 28,8 | -21,8 | -22,1 | -23,7 | -5,3 | 26,0 | 208 |
| Ciepła, wietrzna, z małym zachmurzeniem | 23,7 | -23,7 | -14,0 | -28,1 | -5,1 | 22,1 | 244 |
| Ciepła, pochmurna, wietrzna | 20,2 | -14,7 | -11,9 | -13,4 | -5,2 | 44,9 | 120 |
| Gorąca, bezwietrzna, z małym zachmurzeniem | 28,4 | -13,9 | -20,1 | -24,3 | -5,2 | 34,9 | 155 |
| Gorąca, wietrzna, z małym zachmurzeniem | 18,7 | -10,7 | -12,2 | -23,9 | -4,9 | 36,9 | 146 |
| Upalna, bezchmurna, bezwietrzna | 28,3 | -1,8 | -18,6 | -30,1 | -4,4 | 43,6 | 124 |
| Upalna, bezchmurna, wietrzna | 24,8 | +2,4 | -11,6 | -21,0 | -4,3 | 60,2 | 90 |

zaznaczają się strefy dominacji poszczególnych form strat ciepła z organizmu. Ogólnie biorąc, większe zróżnicowanie form oddawania ciepła do otoczenia obserwuje się przy pogodzie z zachmurzeniem małym i umiarkowanym (ryc. 4.13) niż przy pogodzie pochmurnej (ryc. 4.14). Nie widać natomiast większych różnic w wartościach i wzajemnych relacjach poszczególnych strumieni ciepła pomiędzy pogodą z wiatrem słabym ($0,5-2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) i umiarkowanym ($> 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Wyraźnie zaznaczają się tylko przypadki pogody bezwietrznej ($v < 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Zbadano również korelację pomiędzy natężeniem różnych strumieni wymiany ciepła a temperaturą powietrza i prędkością wiatru; w wypadku ewaporacji uwzględniono także wilgotność względną powietrza (tab. 4.6). Całość materiału podzielono, analogicznie jak dla temperatury skóry, na trzy grupy, zależnie od warunków insolacyjnych i wietrznych. Współczynniki korelacji wielokrotnej dla badanych zmiennych przekraczają 0,78, a unoszenia i promieniowania długofalowego wynoszą nawet 0,89-0,96. W odniesieniu do strat ciepła na parowanie nie obserwuje się różnic pomiędzy współczynnikami korelacji wielokrotnej uwzględniającymi dwie (T_a, v) lub trzy (T_a, v, l) zmienne niezależne.

Ogólnie można stwierdzić, że:

– podczas pogody bezwietrznej, z małym i umiarkowanym zachmurzeniem straty ciepła przez promieniowanie długofalowe (radiację) dominują nad innymi strumieniami w bardzo szerokim zakresie temperatury powietrza ($8-30^\circ\text{C}$).



Ryc. 4.13. Wartości strumieni ciepła (F) przy zachmurzeniu $\leq 60\%$ i przy różnej temperaturze powietrza (T_a) oraz prędkości wiatru $\leq 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (A), $0,5\text{--}2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (B) i $\geq 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (C)
Objaśnienia jak na ryc. 4.10

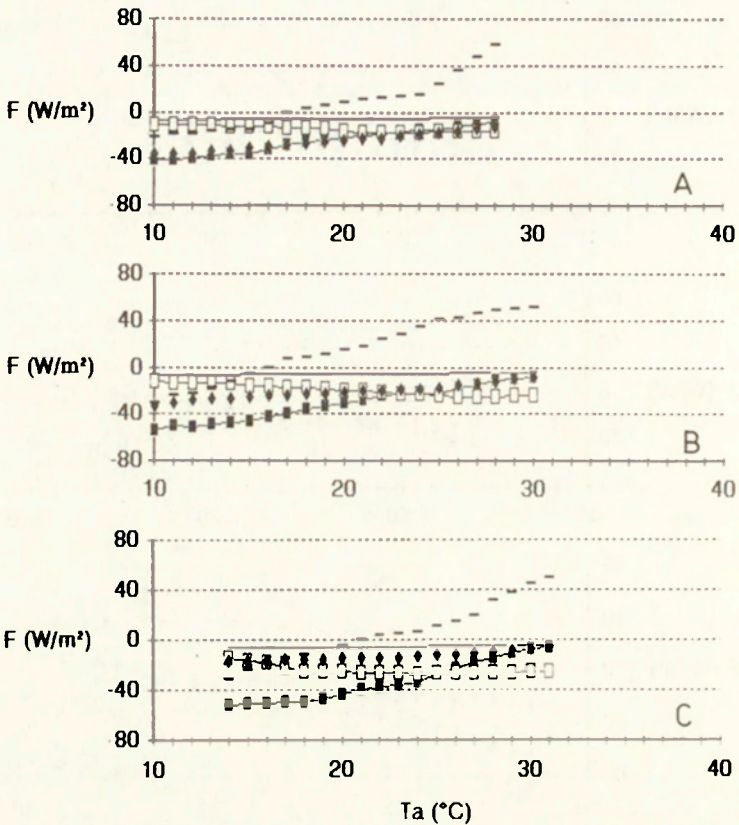
Heat fluxes (F) at cloudiness $\leq 60\%$ and at different air temperature (T_a) with wind speed $0\text{--}0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (A), $0.5\text{--}2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (B) and $\geq 2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (C)

Explanations at fig. 4.10

– podczas pogody bezwietrznej i pochmurnej obserwuje się równowagę strumieni ciepła związanych z promieniowaniem długofalowym i unoszeniem,
– podczas pogody wietrznej, niezależnie od warunków solarnych, radiacyjna wymiana ciepła jest niewielka, a w stratach ciepła dominują: unoszenie (w temperaturze powietrza niższej od $23\text{--}25^\circ\text{C}$) lub parowanie (powyżej tej temperatury),

– w wysokiej temperaturze powietrza straty ciepła na parowanie zmniejszają się nieco, jako skutek intensywnego parowania potu i obniżenia się temperatury skóry,

– maksymalny czas przebywania w danych warunkach pogodowych przekracza z reguły $3,5\text{--}4$ godziny i jedynie podczas pogody gorącej i upalnej jest ograniczony do $1,5\text{--}2,5$ godziny.



Ryc. 4.14. Wartości strumienia ciepła (F) przy zachmurzeniu $> 80\%$ i przy różnej temperaturze powietrza (T_a) oraz prędkości wiatru $\leq 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (A), $0,5-2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (B) i $\geq 2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (C)
Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Heat fluxes (F) at cloudiness $> 80\%$ and at different air temperature (T_a) with wind speed $0-0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (A), $0.5-2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (B) and $\geq 2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (C)

Explanations at fig. 4.10

Tabela 4.6. Współczynniki korelacji prostej i wielokrotnej pomiędzy wartością strumienia ciepła a niektórymi elementami meteorologicznymi ($n = 214$, $p = 0,05$)

Coefficients of simple and multiply correlation between heat fluxes and some meteorological parameters

| Strumień ciepła | Współczynnik korelacji | | |
|-----------------|------------------------|----------|-------------|
| | zmienne niezależne | | |
| | T_a | T_a, v | T_a, v, f |
| 1 | 2 | 3 | 4 |

Przy bardzo małym dopływie promieniowania słonecznego

| | | | |
|---|------|------|------|
| C | 0,81 | 0,93 | — |
| L | 0,72 | 0,89 | — |
| E | 0,59 | 0,78 | 0,78 |
| S | 0,85 | 0,88 | — |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|
| Przy prędkości wiatru $\leq 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | | | |
| C | 0,93 | 0,95 | — |
| L | 0,78 | 0,89 | — |
| E | 0,75 | 0,78 | 0,79 |
| S | 0,67 | 0,76 | — |
| Przy prędkości wiatru $> 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | | | |
| C | 0,89 | 0,96 | — |
| L | 0,88 | 0,92 | — |
| E | 0,67 | 0,78 | 0,78 |
| S | 0,71 | 0,81 | — |

4.4.3. ODCZUWALNOŚĆ CIEPLNA CZŁOWIEKA

Do oceny warunków biotermicznych istotne jest określenie, jakie subiektywne odczucia ciepłe pojawiają się u człowieka w różnych sytuacjach pogodowych. Jak już wspomniano w rozdziale 3, w bioklimatologii stosowane są skale odczuwalności cieplnej, opracowane na podstawie wskaźnikowych wartości temperatury skóry i salda wymiany ciepła. Badania subiektywnych odczuć ciepłych, występujących przy różnych, zmierzonych wartościach temperatury skóry, prowadzone były rzadko (Hanawa i in. 1985; Nielsen R., Endrusick 1990a). W odniesieniu do salda wymiany ciepła wzmiankę o odczuciach ciepłych znaleźć można jedynie w pracy K. Nishimury i innych (1978).

Podczas badań terenowych prowadzonych w północno-wschodniej Polsce podjęto próbę określenia, jakie odczucia ciepłe występują u człowieka w różnych warunkach meteorologicznych. W tym celu obserwatorzy (11 osób) określali swoje odczucia termiczne według siedmiostopniowej skali: bardzo zimno, zimno, chłodno, komfortowo, ciepło, gorąco, bardzo gorąco. Zbadano następnie, w jakich zakresach temperatury skóry i salda wymiany ciepła pojawiają się poszczególne rodzaje odczuć. W każdym wypadku dysponowano 265 parami danych.

Notowana podczas badań temperatura skóry wahała się od 25,5 do 35,7°C. Saldo wymiany ciepła zmieniało się natomiast od -26 do +83 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Poszczególne odczucia ciepłe pojawiały się w następujących zakresach temperatury powierzchni ciała i salda wymiany ciepła:

- zimno od 25,5 do 28,8°C i od -26 do +3 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- chłodno od 26,1 do 30,8°C i od -15 do +21 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- komfortowo od 26,9 do 32,1°C i od -12 do +45 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- ciepło od 27,8 do 33,5°C i od +12 do +60 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- gorąco od 30,1 do 35,0°C i od +18 do +73 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,
- bardzo gorąco od 31,3 do 35,7°C i od +30 do +83 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Podobny rozkład odczuć ciepłych w różnych zakresach temperatury skóry obserwowali także w swych badaniach fizjoklimatycznych R. Nielsen i T. L. Endrusick (1990a); „komfort” występował przy T_s od 28,5 do 30,5°C, a „ciepło” od 30,5 do 32,8°C.

Zbadano również, w jakich zakresach temperatury skóry i przy jakich zmianach zawartości ciepła w organizmie poszczególne rodzaje odczuć pojawiały się z częstością większą od 50%. Dało to podstawę do zaproponowania fizjoklimatycznych skal odczuwalności cieplnej, opartych na wielkościach T_s i S (tab. 4.7).

Tabela 4.7. Odczucia cieplne obserwatorów przy różnych wartościach średniej temperatury skóry i salda wymiany ciepła
Thermal sensations of subjects with different mean skin temperature and net heat storage

| Temperatura skóry (°C) | Odczucia cieplne | Saldo wymiany ciepła ($W \cdot m^{-2}$) |
|------------------------|------------------|---|
| < 27,0 | zimno | < -15,0 |
| 27,0-28,1 | chłodno | -15,0- -5,1 |
| 28,2-30,2 | komfortowo | -5,0-15,0 |
| 30,3-31,4 | ciepło | 15,1-35,0 |
| 31,5-33,5 | gorąco | 35,1-55,0 |
| > 33,5 | bardzo gorąco | > 55,0 |

Skale te mają charakter wstępny. Do ich weryfikacji i rozszerzenia o odczucia „bardzo zimno” niezbędne są dalsze badania. Winny one objąć swym zakresem większą grupę osób oraz warunki pogodowe występujące w północzu chłodnym.

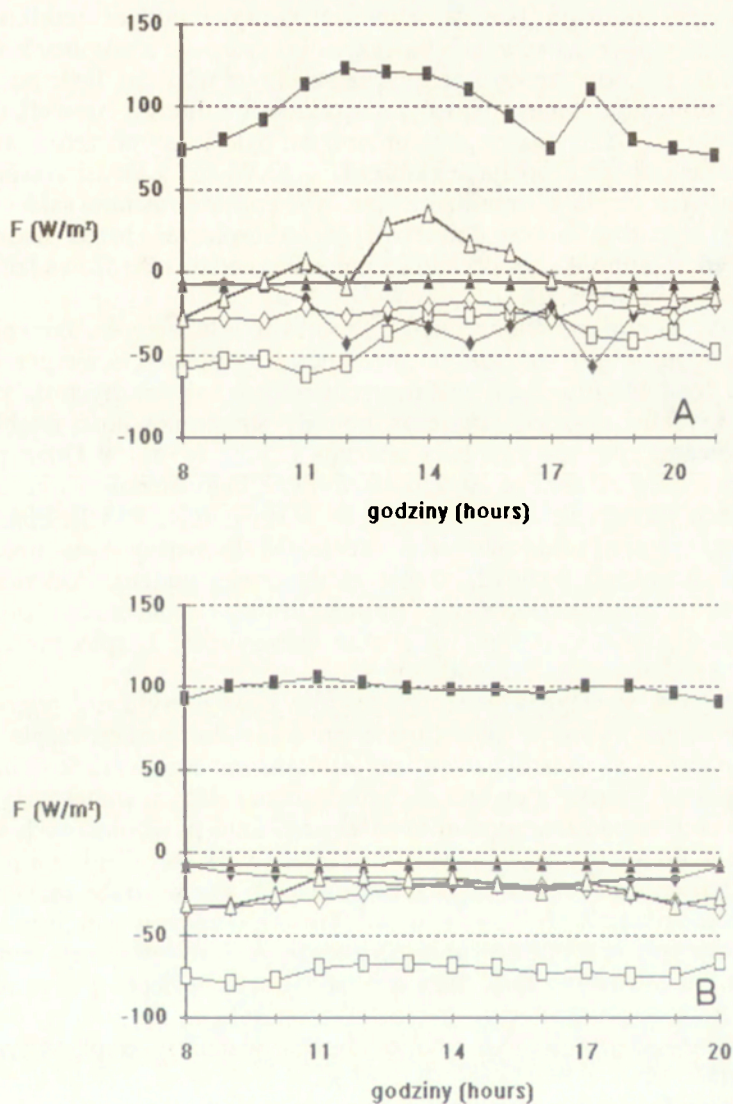
4.5. WYMIANA CIEPŁA W RÓŻNYCH STREFACH KLIMATYCZNYCH

Poza badaniami w północno-wschodniej Polsce, reprezentującej klimat przejściowy, umiarkowanie ciepły, przeprowadzono także serie pomiarów porównawczych w innych strefach klimatycznych.

- w klimacie kontynentalnym, umiarkowanie chłodnym (centralna Mongolia),
- w klimacie morskim, umiarkowanie ciepłym (środkowa Szwecja),
- w klimacie podzwrotnikowym suchym (pustynia Kara-kum),
- w monsunowym klimacie zwrotnikowym (środkowy Wietnam).

Warunki pogodowe podczas badań porównawczych były typowe dla danych obszarów w porze roku, w której prowadzono pomiary. W klimacie kontynentalnym była to druga połowa lata, z pogodą umiarkowanie ciepłą, ze zmiennym zachmurzeniem i umiarkowanym wiatrem. W strefie klimatu morskiego, umiarkowanie ciepłego pomiarów bilansu cieplnego dokonano podczas typowej wiosną pogody zimnej i wietrznej, o różnym stopniu pokrycia nieba chmurami. W klimacie podzwrotnikowym objęto badaniami przełom lata i jesieni, ze zmianą pogody od gorącej do umiarkowanie ciepłej. W klimacie zwrotnikowym pomiary prowadzono w okresie sucho-gorącym z pogodą upalną o małym zachmurzeniu i słabych wiatrach. Jako ilustrację warunków biotermicznych panujących w każdej ze stref klimatycznych wybrano przykłady różnych sytuacji pogodowych.

W klimacie kontynentalnym, podczas pogody umiarkowanie ciepłej, z małym zachmurzeniem i słabym wiatrem obserwowano – podobnie jak w klimacie przejściowym Polski – wahania strat ciepła na parowanie i zawartości



Ryc. 4.15. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody umiarkowanie ciepłej ze słabym wiatrem i małym zachmurzeniem w warunkach klimatycznych centralnej Mongolii (A) oraz podczas pogody zimnej i wietrznej z zachmurzeniem małym w klimacie morskim, umiarkowanie ciepłym środkowej Szwecji (B)

Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Daily course of heat fluxes (F) during temperate warm, calm weather with small cloudiness in the climatic zone of central Mongolia (A) and with cold, windy weather with small cloudiness in maritime, temperate warm climate of central Sweden (B)

Explanations at fig. 4.10

ciepła w organizmie (ryc. 4.15A). Przy zachmurzeniu dużym notowano w Mongolii większe niż w Polsce wartości pochłoniętego promieniowania słonecznego. Było to spowodowane większą przezroczystością atmosfery oraz dopływem promieniowania odbitego od zboczy okolicznych wzniesień.

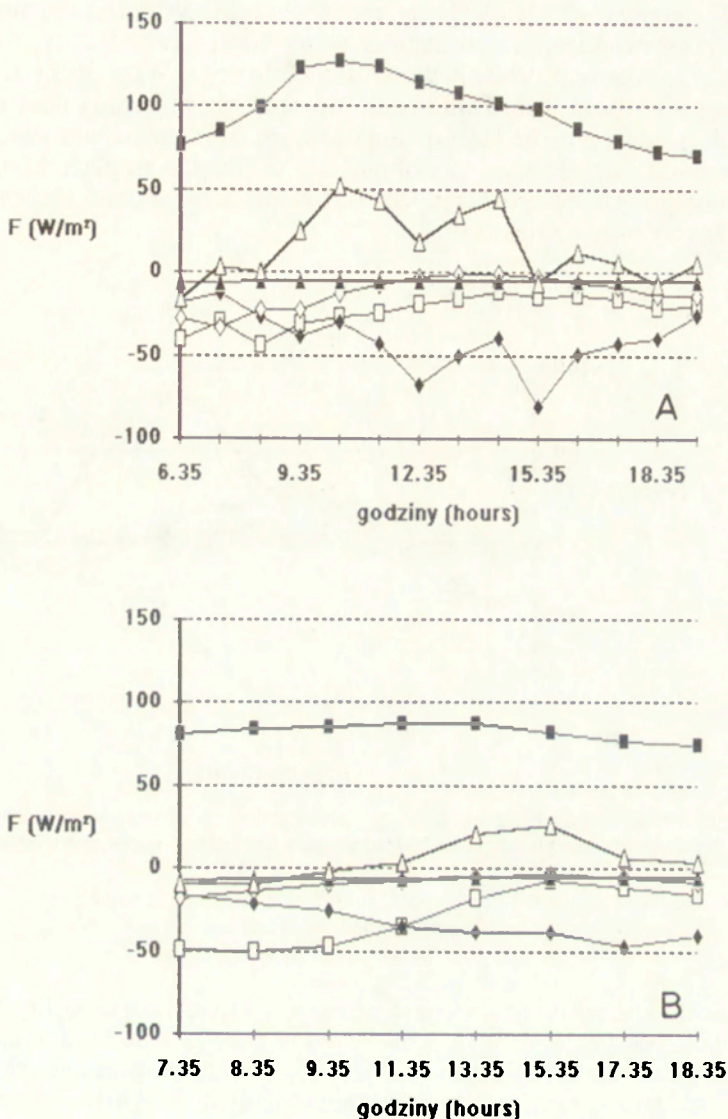
W drugiej połowie lata w klimacie kontynentalnym środkowej Azji zdarzają się – podczas adwekcji powietrza arktycznego z północy kontynentu – przypadki pogody zimnej, pochmurnej, z silnym wiatrem. Ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego była w takich warunkach niewielka, a głównym sposobem oddawania ciepła z organizmu było jego unoszenie, stanowiące 70-80% strat ciepła i osiągające natężenie – $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Obserwowano wtedy znaczny ubytek ciepła w organizmie, tzn. występowało ujemne saldo wymiany ciepła. W wypadku braku dodatkowych zabezpieczeń przed nadmiernymi stratami energii mogło to po około czterech godzinach prowadzić do wychłodzenia organizmu.

Wiosną, w umiarkowanie ciepłym morskim klimacie środkowej Szwecji przeważa pogoda wietrzna i zimna (z temperaturą powietrza nie przekraczającą 15°C i częstymi zmianami zachmurzenia, od dni słonecznych do pochmurnych, z opadami deszczu). Podczas pogody słonecznej ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego była znaczna ($25\text{-}30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Duże prędkości wiatru sprawiały jednak, że bardzo intensywnie było turbulencyjne unoszenie ciepła, które wahało się od -65 do $-85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 4.15B). Efektem tego było duże, ujemne saldo wymiany ciepła. Maksymalny czas przebywania w takich warunkach wynosił jedynie około trzech godzin. Podczas pogody pochmurnej z małym dopływem promieniowania słonecznego proces wychładzania organizmu następował jeszcze intensywniej; bezpieczny czas przebywania wynosił około 2,5 godziny.

Typowe dla suchego klimatu podzwrotnikowego sytuacje pogodowe na przełomie lata i jesieni to następujące po sobie dni gorące, ciepłe i umiarkowanie ciepłe, ze zmieniającym się zachmurzeniem i prędkością wiatru. Podczas pogody ciepłej, z małym zachmurzeniem i słabym wiatrem (ryc. 4.16A) obserwowano tu podobne prawidłowości przebiegu poszczególnych strumieni ciepła jak w klimacie przejściowym Polski. Jedynie straty ciepła na parowanie były w strefie podzwrotnikowej wyraźnie większe niż w strefie umiarkowanej. W pierwszej połowie dnia, gdy układ termoregulacyjny adaptował się do dużego dopływu promieniowania słonecznego i wzrastającej temperatury powietrza, obserwowano dość duży wzrost zawartości ciepła w organizmie. Po uaktywnieniu się gruczołów potowych (co nastąpiło około godziny dwunastej) wzrosły straty ciepła na parowanie i saldo wymiany ciepła wyraźnie się zmniejszyło.

W okresie letnim silne wiatry często powodują na pustyni Kara-kum burze piaskowe. Przykład takiej sytuacji ilustruje rycina 4.16B; początek burzy piaskowej, spowodowanej silnym wiatrem ($10\text{-}12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), wystąpił około godziny 9^{30} . Dopływ promieniowania słonecznego do organizmu był wtedy mały, z uwagi na duże zapylenie powietrza. Eliminacja ciepła odbywała się głównie przez parowanie potu.

W klimacie zwrotnikowym, w porze sucho-gorącej przeważa pogoda upalna, bezchmurna (lub z zachmurzeniem małym) z umiarkowanym wiatrem (pomiaru fizjoklimatyczne prowadzono jednakże w miejscu osłoniętym od



Ryc. 4.16. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody ciepłej, z małym zachmurzeniem i słabym wiatrem (A) oraz gorącej, z zachmurzeniem zmiennym i bardzo silnym wiatrem (B) w warunkach klimatycznych pustyni Kara-kum

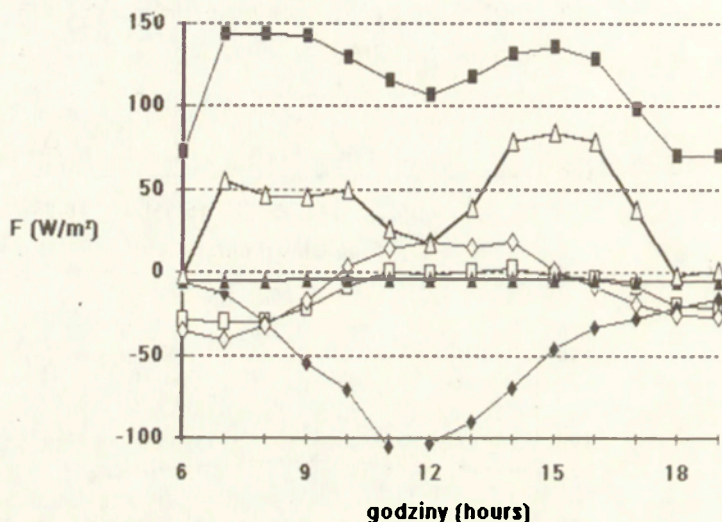
Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Daily course of heat fluxes (F) during warm weather with weak wind and varying cloudiness (A) as well as during hot weather with varying cloudiness and very strong wind (B) at the climatic zone of Kara-kum desert

Explanations at fig. 4.10

wiatru, gdzie ruch powietrza był minimalny). W warunkach takich wyraźnie zaznaczył się duży dopływ promieniowania słonecznego do organizmu (ryc. 4.17). Było to spowodowane zarówno wysokim natężeniem promieniowania słonecznego w strefie okołorównikowej, jak i mniejszą izolacyjnością termiczną

używanej odzieży (0,5 clo). Inną cechą charakterystyczną wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w tej strefie klimatycznej był dodatni kierunek strumienia promieniowania długofalowego. Wiązało się to z wysoką temperaturą podłoża, które emitowało do atmosfery znaczną ilość promieniowania długofalowego, będącego dodatkowym źródłem ciepła dla człowieka. Obserwowano tu także – podobnie jak w innych strefach klimatycznych – zmniejszanie się ewaporacyjnych strat ciepła wraz z przekroczeniem progu intensywnego parowania potu.



Ryc. 4.17. Przebieg dzienny strumieni ciepła (F) podczas pogody upalnej, bezchmurnej i bezwietrznej w warunkach klimatycznych środkowego Wietnamu w porze sucho-gorącej

Objaśnienia jak na ryc. 4.10

Daily course of heat fluxes (F) during heat, sunny, calm weather at the climatic zone of central Vietnam in dry-hot season

Explanations at fig. 4.10

W tabeli 4.8 zestawiono średnie dzienne wartości poszczególnych strumieni ciepła dla typowych sytuacji pogodowych w danej strefie klimatycznej i w danej porze roku. Z największym obciążeniem cieplnym spotkano się w klimacie zwrotnikowym i morskim, umiarkowanie ciepłym. W klimacie przejściowym, umiarkowanie ciepłym (w ciągu lata) i w klimacie podzwrotnikowym (na przełomie lata i jesieni) obciążenie cieplne organizmu było podobne; różne były jedynie proporcje strumieni strat ciepła. Najmniejsze obciążenie cieplne obserwowano latem w klimacie kontynentalnym.

Porównano także strukturę bilansu cieplnego człowieka w różnych strefach klimatycznych, ale w podobnych warunkach pogodowych (tab. 4.9). Podczas pogody umiarkowanie ciepłej największy wzrost salda wymiany ciepła obserwowano w klimacie umiarkowanie ciepłym, przejściowym. Podobna sytuacja występowała podczas pogody ciepłej z małym zachmurzeniem. W obydwu typach pogody notowano w klimacie kontynentalnym środkowej Azji stosunkowo duże ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego. Wiąże się to prawdopodobnie z dużą czystością atmosfery w tym rejonie świata oraz

Tabela 4.8. Średnie dzienne wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem oraz maksymalny czas przebywania (MTE) w sytuacjach pogodowych typowych dla różnych stref klimatycznych w określonych porach roku

Mean daily values of man-environment heat exchange fluxes and maximal time of exposure (MTE) in weather conditions typical for different climatic zones in defined seasons

| Klimat | Strumień ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | | | | | | MTE (min) |
|---|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|--------------|
| | R | C | L | E | Res | S | |
| Umiarkowanie ciepły, przełajowy (ciepła połowa roku) | 20,9 | -29,0 | -19,0 | -19,9 | -5,5 | 17,5 | 309 |
| Umiarkowanie ciepły, morski (wiosna) | 24,6 | -69,7 | -35,4 | -14,0 | -7,0 | -31,3 | 183 |
| Umiarkowanie chłodny, kontynentalny (druga połowa lata) | 33,2 | -44,4 | -22,4 | -34,3 | -6,3 | -4,4 | 1227 |
| Podzwrotnikowy, suchy (przełom lata i jesieni) | 28,0 | -23,7 | -12,7 | -40,4 | -5,5 | 15,4 | 351 |
| Zwrotnikowy, monsunowy, (pora sucho-gorąca) | 34,7 | -12,2 | -9,5 | -50,4 | -4,5 | 38,0 | 142 |

Tabela 4.9. Średnie dzienne wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem oraz maksymalny czas przebywania (MTE) w podobnych warunkach pogodowych, ale w różnych strefach klimatycznych

Mean daily values of man-environment heat exchange fluxes and maximal time of exposure (MTE) in similar weather conditions but in different climatic zones

| Klimat | Strumień ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | | | | | | MTE (min) |
|---|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|--------------|
| | R | C | L | E | Res | S | |
| Umiarkowanie ciepło, pochmurnie, z silnym wiatrem | | | | | | | |
| Przełajowy – um. ciepły | 22,2 | -32,5 | -16,9 | -17,6 | -5,7 | 19,5 | 277 |
| Kontynentalny – um. chłodny | 25,4 | -41,9 | -23,7 | -24,9 | -6,2 | -1,4 | 3857 |
| Podzwrotnikowy suchy | 12,0 | -46,1 | -10,4 | -21,2 | -6,2 | -1,6 | 3375 |
| Ciepło, z małym zachmurzeniem i słabym wiatrem | | | | | | | |
| Przełajowy – um. ciepły | 23,7 | -23,7 | -14,0 | -28,1 | -5,1 | 22,1 | 244 |
| Kontynentalny – um. chłodny | 33,2 | -44,4 | -22,4 | -34,3 | -6,3 | -4,4 | 1227 |
| Podzwrotnikowy suchy | 28,0 | -23,7 | -12,7 | -40,4 | -5,5 | 15,4 | 351 |
| Upalnie, bezchmurnie i bezwietrznie | | | | | | | |
| Przełajowy – um. ciepły | 28,3 | -1,8 | -18,6 | -30,1 | -4,4 | 43,6 | 124 |
| Zwrotnikowy monsunowy | 34,7 | -12,2 | -9,5 | -50,4 | -4,5 | 38,0 | 142 |
| Chłodno, pochmurnie, z silnym wiatrem | | | | | | | |
| Przełajowy – um. ciepły | 22,0 | -48,0 | -15,9 | -10,3 | -6,1 | 11,6 | 466 |
| Morski – um. ciepły | 15,6 | -71,5 | -29,6 | -11,6 | -7,0 | -34,2 | 158 |
| Kontynentalny – um. chłodny | 15,7 | -70,1 | -17,1 | -10,0 | -7,0 | -18,6 | 290 |

mniejszą, niż w klimacie umiarkowanie ciepłym środkowej Europy, zawartością w niej pary wodnej. Stosunkowo małe wartości pochłoniętego promieniowania słonecznego w strefie pustynnej klimatu podzwrotnikowego są, jak się wydaje, wynikiem znacznego zapylenia powietrza nad obszarem pustyni Kara-kum.

Podczas pogody upalnej pochłonięte przez człowieka promieniowanie słoneczne było w klimacie zwrotnikowym nieco większe niż w klimacie umiarkowanie ciepłym, przejściowym, mimo zbliżonego do siebie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego. Wydaje się, że było to spowodowane przede wszystkim mniejszą termoizolacyjnością odzieży używanej w Wietnamie. Odzież taka umożliwiała jednak znaczne podwyższenie temperatury skóry (do 36,7° C) i silne uaktywnienie gruczołów potowych oraz stosunkowo swobodne przenikanie ciepła traconego przez organizm w wyniku parowania. Tak więc, przy różnym natężeniu poszczególnych strumieni ciepła, ogólne saldo jego wymiany było w klimacie przejściowym, umiarkowanie ciepłym i zwrotnikowym podobne do siebie.

Podczas pogody chłodnej lub zimnej oraz z silnym wiatrem intensywność oddawania ciepła z organizmu była w klimacie kontynentalnym, umiarkowanie chłodnym i morskim, umiarkowanie ciepłym znacznie większa niż w umiarkowanie ciepłym, przejściowym. Efektem tego był duży ubytek ciepła z ustroju, notowany w centralnej Mongolii i w środkowej Szwecji.

Jak z powyższego przeglądu widać, istnieje wiele różnic i podobieństw w kształtowaniu się wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w odmiennych strefach klimatycznych:

- różny jest dopływ promieniowania słonecznego do organizmu, co jest związane zarówno z szerokością geograficzną, jak i z przezroczystością atmosfery oraz zawartością w niej pary wodnej,

- w klimatach suchych wyraźnie podwyższona jest wartość strat ciepła na parowanie,

- zbliżone do siebie są relacje poszczególnych strumieni ciepła w podobnych warunkach pogodowych,

- we wszystkich strefach klimatycznych obserwuje się zmniejszenie ewaporacji na skutek intensywnego parowania potu, prowadzącego do obniżenia się temperatury skóry i przez to do mniejszej aktywności gruczołów potowych.

Wydaje się, że ostatnie zagadnienie wymaga szczególnych badań laboratoryjnych i terenowych dla uchwycenia cykliczności zmian uwilgotnienia i temperatury skóry. Może to doprowadzić do wprowadzenia pewnych korekt w metodzie obliczania strat ciepła na parowanie.

4.6. WYMIANA CIEPŁA

W RÓŻNYCH RODZAJACH ŚRODOWISKA GEOGRAFICZNEGO POLSKI

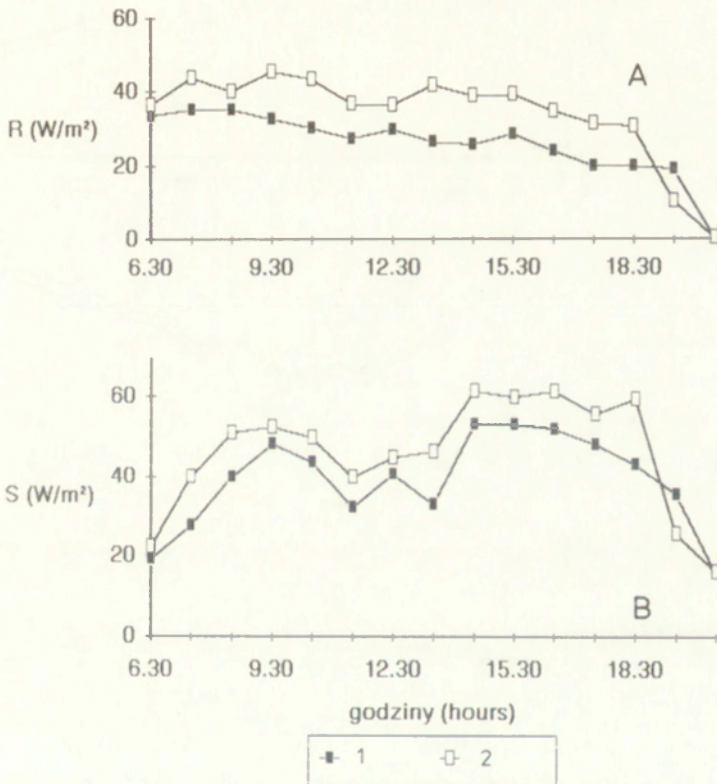
4.6.1. WYMIANA CIEPŁA POMIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM

W WYBRANYCH RODZAJACH ŚRODOWISKA (NA PRZYKŁADZIE PÓŁNOCNO-WSCHODNIEJ POLSKI)

Podczas badań terenowych bilansu cieplnego człowieka w lipcu 1989 r. w północno-wschodniej Polsce prowadzono pomiary fizjoklimatyczne nie tylko w różnych warunkach pogodowych, ale także w różnych typach

środowiska geograficznego: na wysoko położonej równinie, szczycie izolowanego pagóra morenowego, w dnie wąskiej doliny rzecznej oraz w głębi lasu i na jego skraju.

Porównując dane z jednoczesnych pomiarów przeprowadzonych na równinie i w dnie doliny podczas pogody z zachmurzeniem $\leq 60\%$ widać, że w obrębie doliny większe było natężenie pochłoniętego promieniowania słonecznego (ryc. 4.18) i strat ciepła związanych z promieniowaniem długofalowym (ryc. 4.19). Średnia wartość L wynosiła na równinie około $-13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a w dolinie $-20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Było to spowodowane tym, że w dnie



Ryc. 4.18. Przebieg dzienny pochłoniętego promieniowania słonecznego (A) oraz salda wymiany ciepła (B), wartości średnie dla zachmurzenia $\leq 60\%$

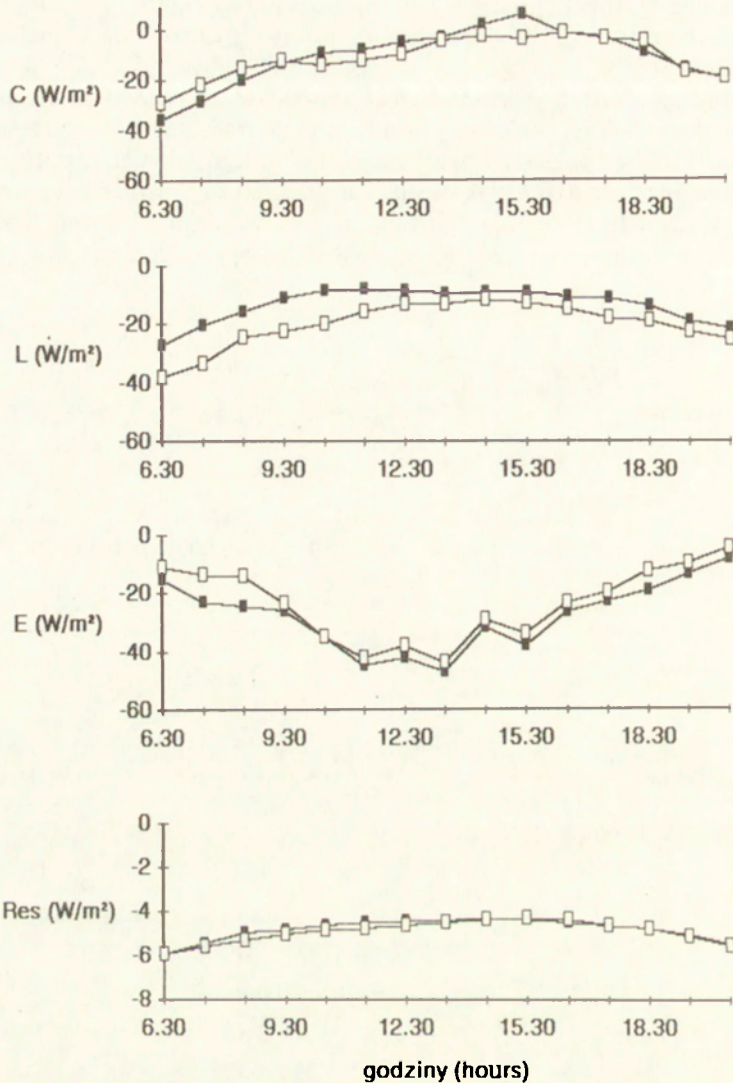
1 - rozległa równina, 2 - dno wąskiej doliny

Daily course of absorbed solar radiation (A) and net heat storage (B), average values for cloudiness $\leq 60\%$

1 - upland, 2 - bottom of narrow valley

doliny notowano znacznie mniejsze niż na równinie prędkości wiatru. Różnice w wartościach poszczególnych strumieni ciepła sprawiały, że w dolinie wzrost zawartości ciepła w organizmie był o blisko $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ większy niż na wyniesieniu (ryc. 4.18).

Analizując bilans cieplny człowieka w kolejnych typach środowiska: na izolowanym pagórze, w lesie i na jego skraju, należy dodać, że rozpiętość pomiędzy porównywanymi stanowiskami wynosiła jedynie 100 m. Punkt na

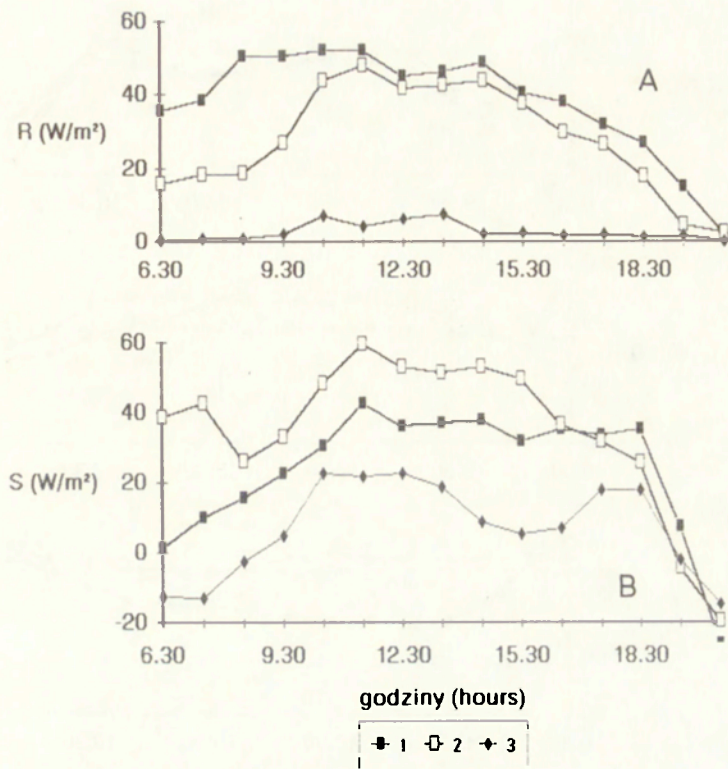


Ryc. 4.19. Przebieg dzienny strumieni strat ciepła z organizmu, wartości średnie dla zachmurzenia $\leq 60\%$
Objaśnienia jak na ryc. 4.18

Daily course of different heat loss fluxes, average values for cloudiness $\leq 60\%$
Explanations at fig. 4.18

skraju lasu usytuowany był w cieniu wąskiego szpaleru drzew odchodzących od zwartego drzewostanu.

Na tej niewielkiej przestrzeni obserwowano bardzo duże różnice wartości poszczególnych strumieni ciepła. Pochłonięte promieniowanie słoneczne zmniejszało się od $27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (średnio dla dni z zachmurzeniem $\leq 60\%$) do $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ w cieniu drzew i tylko do $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ w głębi lasu (ryc. 4.20). Mniejszy



Ryc. 4.20. Przebieg dzienny pochłoniętego promieniowania słonecznego (A) i salda wymiany ciepła (B) w różnych typach środowiska geograficznego, wartości średnie dla zachmurzenia $\leq 60\%$

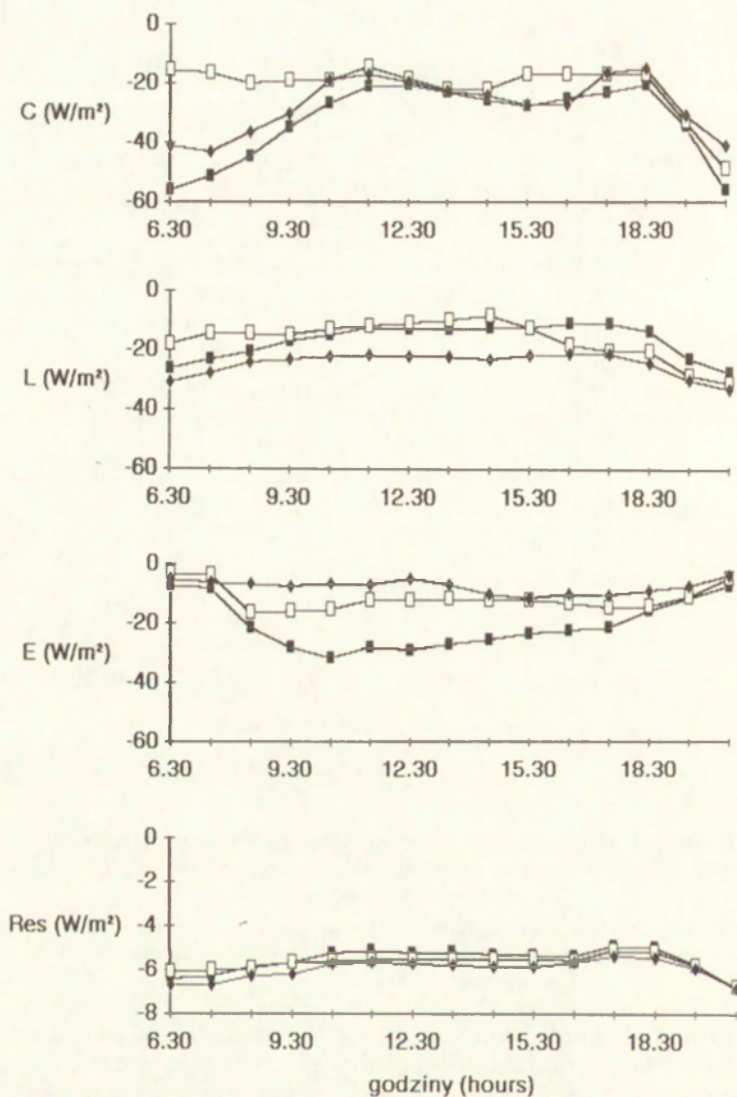
1 - teren otwarty, 2 - skraj lasu, 3 - wewnątrz lasu

Daily course of absorbed solar radiation (A) and net heat storage (B) in different types of geographical environment, average values for cloudiness $\leq 60\%$

1 - open area, 2 - field and forest border, 3 - forest

dopływ promieniowania słonecznego na skraju lasu i w jego głębi miał swe konsekwencje w różnicach temperatury skóry, która średnio wynosiła odpowiednio: $31,0$, $29,5$ i $28,4^\circ C$. Różne były także wartości poszczególnych strumieni ciepła (ryc. 4.21). Wypromieniowanie długofalowe było największe w lesie (średnio $-24 W \cdot m^{-2}$), a straty ciepła na parowanie — w terenie otwartym (średnio $-21 W \cdot m^{-2}$). Straty ciepła przez unoszenie były w lesie i w terenie otwartym zbliżone do siebie. W pierwszym przypadku wiązało się to ze stosunkowo niską temperaturą skóry i powietrza, a w drugim — ze swobodnym przepływem powietrza wokół człowieka, co zwiększało unoszenie ciepła z powierzchni ciała. Najmniejsze saldo wymiany ciepła obserwowane było w lesie (około $1 W \cdot m^{-2}$). Wiąże się to z tym, że przy stosunkowo dużych stratach ciepła z organizmu człowiek dysponował tam praktycznie tylko ciepłem metabolicznym.

Jak widać z powyższego, krótkiego przeglądu, nawet na niewielkim obszarze o urozmaiconym zagospodarowaniu i rzeźbie terenu obserwuje się



Ryc. 4.21. Przebieg dzienny strumieni strat ciepła z organizmu w różnych typach środowiska geograficznego, wartości średnie dla zachmurzenia $\leq 60\%$

Objaśnienia jak na ryc. 4.20

Daily course of heat loss fluxes at different types of geographical environment, average values for cloudiness $\leq 60\%$

Explanations at fig. 4.20

znaczne zróżnicowanie przestrzenne poszczególnych strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Zróżnicowanie to jest efektem lokalnych odmienności podłoża, szaty roślinnej oraz rzeźby i zagospodarowania terenu. Modyfikują one bowiem wartości podstawowych elementów meteorologicznych, głównie temperatury powietrza i prędkości wiatru oraz dopływ promieniowania słonecznego.

4.6.2 BILANS CIEPLNY CZŁOWIEKA W RÓŻNYCH TYPACH KRAJOBRAZU

Liczne badania topoklimatyczne prowadzone przez Zakład Klimatologii IGiPZ PAN dostarczają danych pomiarowych dotyczących rozkładu przestrzennego podstawowych elementów meteorologicznych w różnych typach krajobrazu i środowiska geograficznego Polski. Obliczono na ich podstawie wartości poszczególnych strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Zastosowano w tym celu uproszczone wzory (34-45, podrozdz. 5.1.1), oparte na obserwowanych związkach pomiędzy różnymi składnikami bilansu cieplnego człowieka a temperaturą powietrza i prędkością wiatru. Rozpatrywano przy tym nie wartości bezwzględne poszczególnych strumieni strat ciepła, ale ich wzajemne relacje, a saldo wymiany ciepła traktowano jako przybliżoną ocenę obciążeń cieplnych człowieka (błąd w stosunku do wartości zmierzonych nie przekracza 20%). Ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego została oszacowana także na podstawie wzorów uproszczonych (31-33, podrozdz. 5.1.1).

Strukturę bilansu cieplnego człowieka określono w przedstawiony wyżej sposób dla 32 rodzajów środowiska geograficznego, reprezentujących następujące typy krajobrazu: pagórkowaty pojezierny, leśny, nadmorski, równin środkowopolskich, podmiejski i górski (ryc. 4.22). W każdym z typów krajobrazu wybrano punkt odniesienia dla innych stanowisk. Kierowano się przy tym zasadą, że punkt odniesienia reprezentuje ten rodzaj środowiska,



Ryc. 4.22. Rozmieszczenie obszarów badań topoklimatycznych, których wyniki uwzględniono w opracowaniu

Krajobrazy: 1 – pojezierny, 2 – leśny, 3 – nadmorski, 4 – równinny, 5 – podmiejski, 6 – górski

Location of the areas of topoclimatological investigations taken into considerations in the study

Landscapes: 1 – lakeland, 2 – forest, 3 – sea-shore, 4 – lowland, 5 – suburban, 6 – mountains

w którym w danym krajobrazie lokalizowane są z reguły stacje meteorologiczne sieci państwowej. Dla krajobrazu pojeziernego, nadmorskiego i równin środkowopolskich punktami odniesienia były stanowiska położone na rozległych równinach, dla krajobrazu leśnego – polana, dla krajobrazu podmiejskiego – skraj wsi i pól, a dla krajobrazu górskiego – dno szerokiej doliny.

Bilans cieplny człowieka obliczono dla pięciu klas temperatury powietrza obserwowanej w punktach odniesienia, a mianowicie: $\leq 18,0$, $18,1-22,0$, $22,1-25,0$, $25,1-28,0$ i $\geq 28,1^{\circ}\text{C}$. Stwierdzono, że zróżnicowanie przestrzenne wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem występowało najwyraźniej wtedy, gdy temperatura powietrza w punkcie odniesienia wynosiła $18-28^{\circ}\text{C}$. Przy $T_a < 18^{\circ}\text{C}$ we wszystkich typach środowiska przeważało turbulencyjne unoszenie ciepła, a przy $T_a > 28^{\circ}\text{C}$ – straty ciepła związane z parowaniem.

4.6.2.1. Struktura bilansu cieplnego

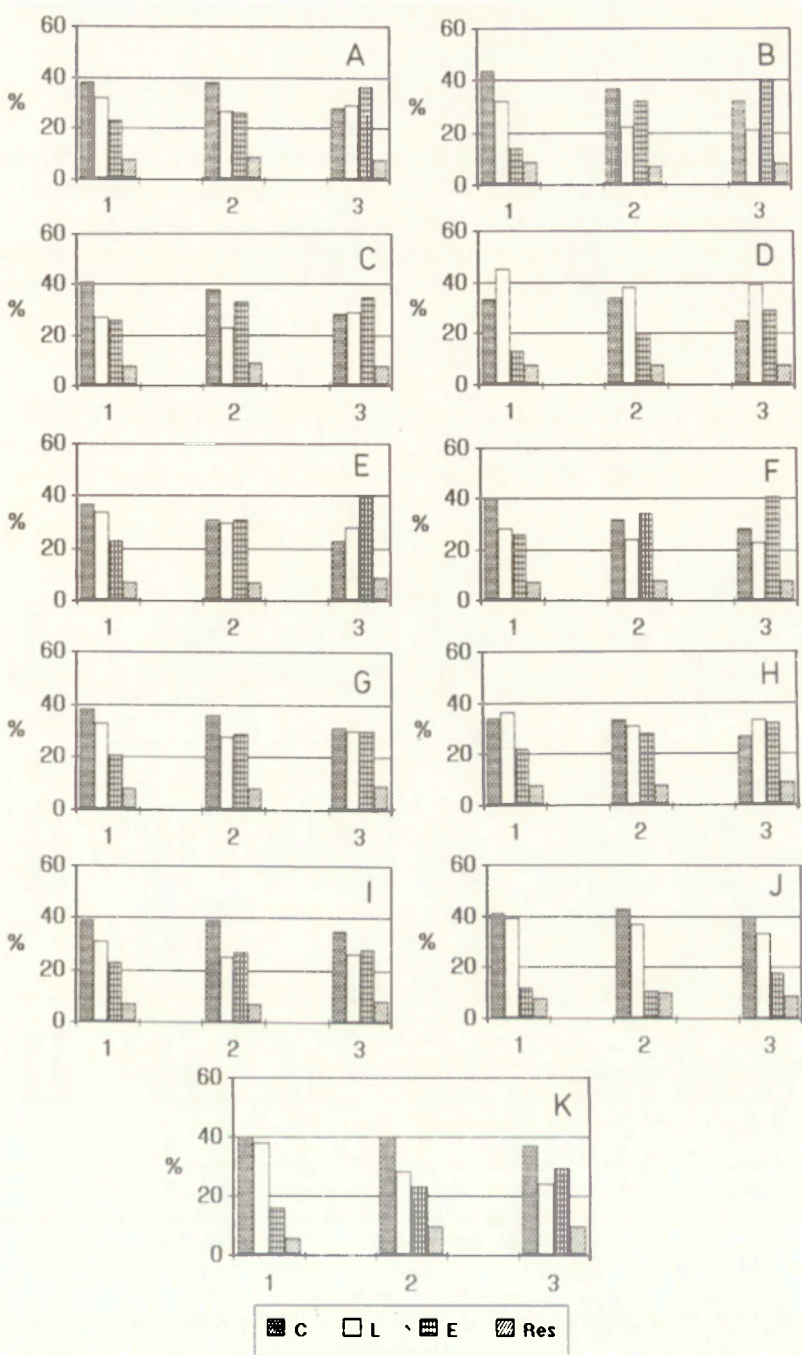
Zróżnicowanie przestrzenne struktury bilansu cieplnego człowieka w obrębie badanych typów krajobrazu jest znaczne. Jest to efektem oddziaływania różnych czynników środowiskowych, które modyfikują rozkład poszczególnych elementów meteorologicznych na danym obszarze. Najwyraźniej zaznacza się oddziaływanie rzeźby terenu oraz układu różnych form jego zagospodarowania.

Pagórkowaty krajobraz pojezierny

Do analizy bilansu cieplnego człowieka w tym typie krajobrazu wykorzystano dane z badań topoklimatycznych prowadzonych w lipcu 1988 r. i lipcu 1989 r. na obszarze Pojezierza Suwalskiego. Objęły one łącznie 11 rodzajów środowiska: równinę, izolowany pagór morenowy, rozległą kotlinę rzeczną, wąską dolinę, dno niewielkiego, 50-metrowego zagłębienia wypełnionego jeziorem, plażę nad otwartym brzegiem jeziora, dno krótkiej doliny suchej, zbocze północne i południowe doliny oraz wnętrze lasu i jego skraj (ryc. 4.23).

Różnice w strukturze bilansu cieplnego pomiędzy równiną i pagórem są niewielkie; w obu przypadkach przy $T_a < 25^{\circ}\text{C}$ dominuje unoszenie ciepła, a przy $T_a > 25^{\circ}\text{C}$ – straty związane z parowaniem. Podobną strukturę strat ciepła obserwuje się także w rozległej kotlinie. W innych wklęsłych formach rzeźby terenu sytuacja jest bardziej złożona. W wąskiej i zacisznej dolinie dominuje wymiana ciepła przez promieniowanie długofalowe. W dnie zagłębienia udział radiacji jest również duży, choć niewielką przewagę ma tam strumień ciepła unoszonego turbulencyjnie. Natomiast na piaszczystej plaży nadjeziornej, gdzie przepływ powietrza jest swobodny, przeważa unoszenie lub parowanie, a zmiana strumienia dominującego następuje już w temperaturze powietrza około 22°C . Wiąże się to z podwyższoną temperaturą piaszczystego podłoża i przygruntowej warstwy powietrza.

Porównując strukturę bilansu cieplnego człowieka pomiędzy południowym i północnym zboczem doliny można stwierdzić, że są one związane z termiką podłoża. Zbocze południowe zaznacza się, w odniesieniu do zbocza północnego, zwiększonym udziałem strat ciepła na parowanie i promieniowanie długofalowe.



Ryc. 4.23. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu pojeziernego: równina (A), izolowany pagór (B), kotlina (C), wąska dolina rzeczna (D), dno zagłębienia (E), plaża nad jeziorem (F), dno małej, suchej doliny (G), zbocze północne (H), zbocze południowe (I), wewnątrz lasu (J), zacieniony skraj lasu (K)

C, L, E, Res – strumienie ciepła; zakresy temperatury powietrza obserwowanej w punkcie odniesienia (nazwa podkreślona): 1 – 18,1-22,0, 2 – 22,1-25,0, 3 – 25,1-28,0°C

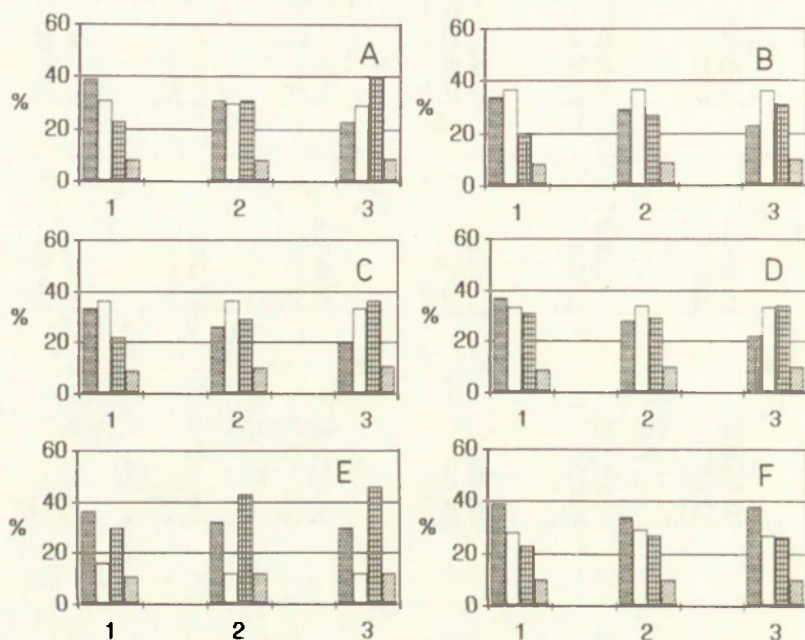
Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the lakeland landscape: upland (A), isolated hill (B), wild basin (C), narrow river valley (D), bottom of deep basin (E), beach at the lake (F), bottom of small dry valley (G), north slope (H), south slope (I), wood (J), shaded wood border (K)

C, L, E, Res – heat fluxes; ranges of air temperature observed at the basic post (which is marked by underlining): 1 – 18.1-22.0, 2 – 22.1-25.0, 3 – 25.1-28.0°C

Wyraźnie odmienna od innych typów środowiska jest struktura wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w lesie i na jego skraju. Charakterystyczna jest tam dominacja wypromieniowania długofalowego i strumienia ciepła unoszonego oraz bardzo małe straty ciepła na parowanie. Jedynie przy $T_a > 25^\circ\text{C}$ na skraju lasu zwiększa się wyraźnie ewaporacja.

Krajobraz leśny

Do charakterystyki struktury bilansu ciepłego człowieka w krajobrazie leśnym wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w sierpniu 1975 r. i lipcu 1976 r. na skraju Puszczy Augustowskiej w Augustowie (ryc. 4.24). Na



Ryc. 4.24. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu leśnego: polana (A), las wilgotny (B), bór świeży stary (C), bór świeży młody (D), park leśny nad jeziorem (E), park leśny z dala od brzegu (F)

Objaśnienia jak na ryc. 4.23

Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the forest landscape: glade (A), moisture forest (B), fresh forest, 80 years old (C), fresh forest, 40 years old (D), forest park at the lake shore (E), forest park far from lake shore (F)

Explanations at fig. 4.23

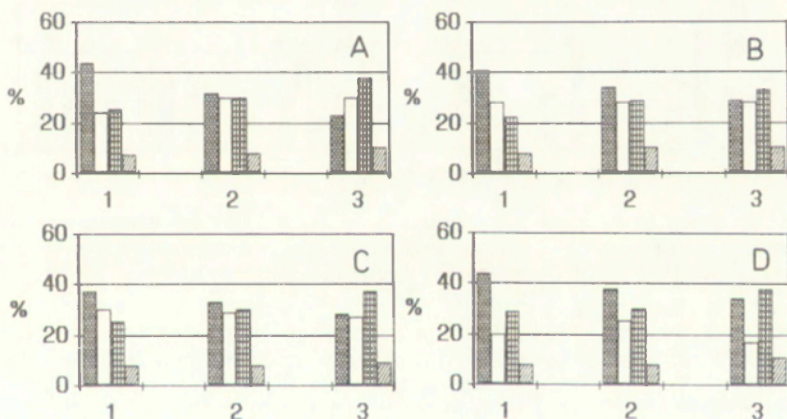
polanie leśnej, która jest punktem odniesienia dla zbiorowisk leśnych, widać wyraźną symetrię w udziale strumienia ciepła unoszonego i traconego podczas parowania potu; przy $T_a < 22^\circ\text{C}$ przeważa unoszenie, przy $T_a = 22-25^\circ\text{C}$ udział C i E jest taki sam, a przy $T_a > 25^\circ\text{C}$ zdecydowanie dominuje parowanie. Stosunkowo małe prędkości wiatru na polanie powodują, że udział strat ciepła przez promieniowanie długofalowe jest tam znaczny i sięga 30%.

W zbiorowiskach leśnych (las wilgotny, bór świeży stary i bór świeży młody) udział wypromieniowania długofalowego jest większy niż na polanie,

osiągając w niektórych zakresach temperatury powietrza nawet 38%. Nieco inny jest obraz struktury strat ciepła z organizmu w zbiorowiskach mających charakter parku leśnego. W lesie rosnącym na wysokim, piaszczystym brzegu jeziora, gdzie gęstość lasu była niewielka i nie miał on piętra krzewów, obserwuje się przewagę strat ciepła na parowanie począwszy już od temperatury powietrza około 22°C. Sprzyjają temu znaczne prędkości wiatru oraz stosunkowo wysoka temperatura powietrza notowane w tym typie środowiska leśnego. W parku leśnym leżącym z dala od brzegu jeziora struktura strat ciepła jest wypadkową dla starych zbiorowisk borowych i strefy brzegowej lasu. Duża zwartość koron nie pozwala na nagrzewanie się powietrza w warstwie przyziemnej, a jednocześnie dość swobodny jego przepływ sprawia, że dominuje tu turbulencyjne unoszenie ciepła.

Krajobraz nadmorski

Do ilustracji lokalnego zróżnicowania bilansu cieplnego człowieka w strefie nadmorskiej wykorzystano materiały z badań topoklimatycznych przeprowadzonych w czerwcu 1979 r. w Dźwirzynie pod Kołobrzegiem. Stanowiska pomiarowe usytuowane były w profilu: plaża, zalesiona wydma, skraj lasu na południowym zapleczu wydm i rozległa równina na południe od mierzei nadmorskiej (ryc. 4.25).



Ryc. 4.25. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu nadmorskiego: plaża (A), zalesiona wydma (B), nasłoneczniony skraj lasu (C), równina (D)

Objaśnienia jak na ryc. 4.23

Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the sea-shore landscape: beach (A), coastal dune with forest (B), sunny wood border (C), lowland (D)

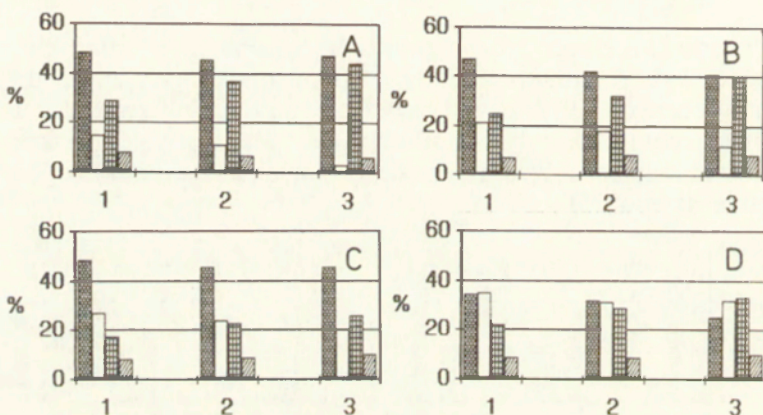
Explanations at fig. 4.23

Najbardziej wyróżnia się odrębność struktury strat ciepła na zapleczu pasa zalesionych wydm. Znaczny jest tam udział wymiany ciepła przez promieniowanie długofalowe, przy braku zdecydowanej przewagi któregoś ze strumieni. W pozostałych typach środowiska w temperaturze powietrza < 22°C wyraźnie uwidacznia się dominacja ciepła unoszonego. Podczas stosunkowo częstych

w okresie letnim wiatrów południowych — gdy na plaży, osłoniętej od wiatru przez las, ruch powietrza był niewielki — znaczny jest na brzegu morza udział strat ciepła związanych z promieniowaniem długofalowym.

Krajobraz równin środkowopolskich

Do charakterystyki bioklimatycznej krajobrazu równin środkowopolskich wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w sierpniu 1983 r. w południowej części Wysoczyzny Ciechanowskiej w rejonie Serocka. Pomiary prowadzono w czterech rodzajach środowiska: na rozległej równinie, polu leżącym w otoczeniu niewielkich lasów, małym bagnie i we wnętrzu młodego lasu sosnowego (ryc. 4.26).



Ryc. 4.26. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu równin środkowopolskich: równina (A), pole otoczone lasami (B), bagno (C), młody las sosnowy (D)

Objaśnienia jak na ryc. 4.23

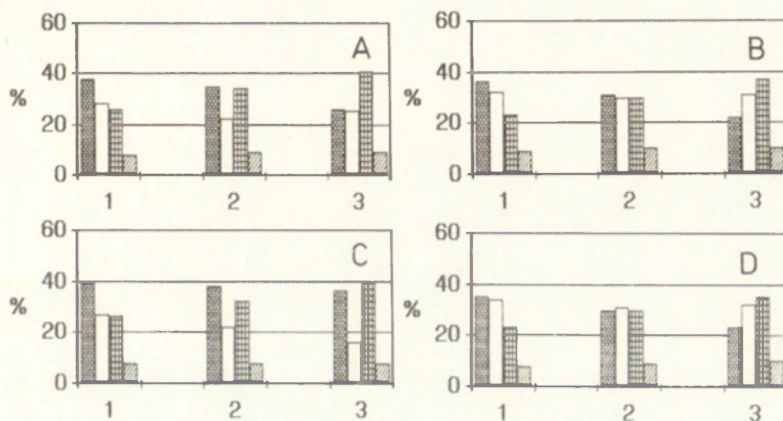
Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the lowland landscape: lowland (A), field surrounded by small woods (B), swamp (C), sapling pine wood (D)

Explanations at fig. 4.23

Porównując strukturę strat ciepła z organizmu, widać wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi stanowiskami. Na równinie około 40-50% ciepła jest oddawane do atmosfery przez unoszenie, 30-40% — przez parowanie, a tylko 10-15% — drogą promieniowania długofalowego. Na zacisznie położonym polu proporcje strumieni ciepła są nieco inne; zwiększa się tu wyraźnie — do 20-30% — udział długofalowego wypromieniowania ciepła. W obrębie bagna zdecydowanie dominuje unoszenie ciepła; stosunkowo małe są natomiast jego straty związane z parowaniem, co jest niewątpliwie spowodowane podwyższoną wilgotnością powietrza. We wnętrzu lasu udział wszystkich strumieni strat ciepła z powierzchni skóry jest zbliżony do siebie i wynosi około 30%. Niewielka przewaga ewaporacji zaznacza się jedynie podczas wysokiej temperatury powietrza.

Krajobraz podmiejski

Zróznicowanie przestrzenne bilansu cieplnego człowieka w obrębie krajobrazu podmiejskiego określono na podstawie badań przeprowadzonych w dolinie Wisły w okolicach Warszawy w czerwcu i sierpniu 1985 r. Badaniami objęto następujące rodzaje środowiska: skraj wsi i pól, łąkę z trawą wysoką i niską oraz zabudowę miejską Łomianek (ryc. 4.27).



Ryc. 4.27. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu podmiejskiego: łąka z trawą wysoką (A), skraj wsi i pól (B), łąka z trawą niską (C), zabudowa willowa (D);

Objaśnienia jak na ryc. 4.23

Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the suburban landscape: meadow with high grass (A), border of village and fields (B), mowed meadow (C), villa's settlement (D)

Explanations at fig. 4.23

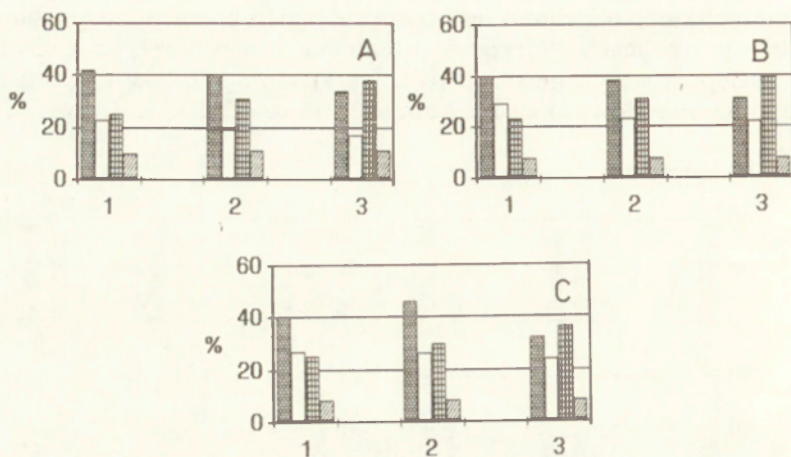
Na obu rodzajach łąk udział strat ciepła związanych z unoszeniem i parowaniem jest wyraźnie większy niż w punkcie odniesienia (skraj wsi i pól), gdzie stosunkowo duże jest wypromieniowanie długofalowe (30-35%). Jeszcze większy jest udział radiacji w obrębie zabudowy willowej Łomianek, co wiąże się z niewielkimi tam prędkościami wiatru.

Krajobraz górski

Zróznicowanie biotopoklimatyczne w krajobrazie górskim omówiono na przykładzie badań przeprowadzonych w lipcu 1980 r. w Złockiem pod Muszyną na obszarze Beskidu Sądeckiego. Porównano strukturę bilansu cieplnego w trzech rodzajach środowiska: w dnie szerokiej doliny rzecznej, w dnie jej stosunkowo wąskiego dopływu i na niewysokim grzbiecie górskim (ryc. 4.28).

Nie obserwuje się tutaj większych różnic pomiędzy przebadanymi rodzajami dolin; w obydwu unoszenie stanowi 30-45% strat ciepła, parowanie – 20-40%, a wypromieniowanie długofalowe – 20-30%. Struktura strat ciepła z organizmu na grzbiecie górskim różni się od warunków dolinnych

wyraźnie mniejszym udziałem radiacji oraz nieco większym udziałem ciepła traconego przez drogi oddechowe.



Ryc. 4.28. Struktura strat ciepła z organizmu w różnych zakresach temperatury powietrza w wybranych typach środowiska geograficznego krajobrazu górskiego: niski grzbiet (A), wąska dolina (B), szeroka dolina (C)

Objaśnienia jak na ryc. 4.23

Structure of heat loss in different air temperature ranges in selected types of geographical environment in the mountain landscape: small ridge (A), narrow valley (B), wide valley (C)

Explanations at fig 4.23

4.6.2.2. Obciążenia cieplne organizmu

Analiza struktury strat ciepła z organizmu jest tylko częścią oceny warunków biotermicznych. Dla ich pełnej charakterystyki ważne jest także porównanie obciążeń cieplnych związanych z pochłanianiem promieniowania słonecznego oraz ze zmianami zawartości ciepła w ustroju. W tabeli 4.10 zestawiono wartości pochłoniętego promieniowania słonecznego oraz salda wymiany ciepła, obserwowane w badanych rodzajach środowiska, w różnych zakresach temperatury powietrza.

Na rozległych równinach, gdzie przeważają straty ciepła unoszonego turbulencyjnie z organizmu, ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego waha się od 20 do 28 $W \cdot m^{-2}$. Wzrost zawartości ciepła zmienia się natomiast od 14-30 $W \cdot m^{-2}$ w temperaturze powietrza $< 18^{\circ}C$ do 28-35 $W \cdot m^{-2}$ przy T_a około $25^{\circ}C$. Stwarza to dla organizmu niewielkie obciążenie termiczne.

W zbiorowiskach leśnych dopływ promieniowania słonecznego jest ograniczony przez korony drzew, stąd też ilość promieniowania pochłoniętego jest stosunkowo mała i waha się, zależnie od zwartości koron, od około 3 $W \cdot m^{-2}$ w lesie gęstym i młodym do 15 $W \cdot m^{-2}$ w lasach starych, o prześwietlonych koronach. Wymiana ciepła jest prawie zrównoważona. W temperaturze powietrza (w terenie otwartym) $< 18^{\circ}C$, w zbiorowiskach leśnych nadbrzeżnych oraz w lasach młodych i gęstych występuje niewielki ubytek ciepła

z organizmu. Niewielkie ilości obu omówionych strumieni ciepła stwarzają dla organizmu łagodne warunki cieplne.

W środowiskach sąsiadujących z lasem (polana, skraj lasu) dopływ ciepła do organizmu jest związany z lokalnymi warunkami solarnymi: w cieniu

Tabela 4.10. Pochłonięte promieniowanie słoneczne (R) i saldo wymiany ciepła (S) w różnych typach środowiska geograficznego Polski

Absorbed solar radiation (R) and net heat storage (S) in different types of geographical environment of Poland

| Typ środowiska geograficznego | Strumień ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----|----|----|-----|----|----|----|
| | R | | | | S | | | |
| | zakres T_a ($^{\circ}C$) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Równiny | | | | | | | | |
| morenowa | 25 | 21 | 24 | 25 | 16 | 19 | 34 | 33 |
| nadmorska | 27 | 20 | 29 | — | 20 | 17 | 35 | — |
| środkowa Polska | 25 | 22 | 25 | 24 | 13 | 19 | 24 | 29 |
| Wypukłe formy terenu | | | | | | | | |
| pagór morenowy | 23 | 22 | 29 | 31 | 11 | 19 | 28 | 37 |
| niski grzbiet górski | 24 | 21 | 22 | 23 | 14 | 16 | 20 | 23 |
| Wklęsłe formy terenu | | | | | | | | |
| kotlina | 34 | 25 | 32 | 29 | 28 | 37 | 36 | 37 |
| wąska dolina rzeczna | 35 | 31 | 33 | 31 | 43 | 48 | 50 | 53 |
| zagłębienie | 36 | 31 | 32 | 37 | 41 | 49 | 54 | 57 |
| sucha dolina | 31 | 30 | 31 | 29 | 27 | 46 | 46 | 52 |
| zbocze południowe doliny | 33 | 32 | 33 | 30 | 16 | 18 | 28 | 30 |
| zbocze północne doliny | 29 | 28 | 29 | 27 | 13 | 14 | 23 | 23 |
| dolina górska szeroka | 29 | 25 | 27 | — | 19 | 23 | 28 | — |
| dolina górska wąska | 31 | 32 | 30 | — | 23 | 29 | 32 | — |
| Zbiorowiska leśne | | | | | | | | |
| młodnik sosnowy (nizina) | 3 | 5 | 7 | 7 | -7 | 7 | 13 | 18 |
| młodnik sosnowy (morena) | 0 | 0 | 1 | 4 | -14 | -5 | 7 | 8 |
| bór świeży młody | 13 | 13 | 10 | 11 | 4 | 13 | 19 | 24 |
| bór świeży stary | 15 | 16 | 14 | 14 | 6 | 12 | 18 | 23 |
| las wilgotny | 15 | 11 | 11 | 11 | 6 | 11 | 18 | 23 |
| park leśny | 17 | 19 | 17 | 19 | -1 | 6 | 10 | 9 |
| park leśny nadjeziorny | 19 | 21 | 20 | 20 | -6 | 0 | 4 | 7 |
| las nadmorski | 9 | 9 | 14 | 11 | -9 | 9 | 19 | 23 |
| polana leśna | 33 | 32 | 25 | 29 | 16 | 27 | 30 | 37 |
| skraj lasu nasłoneczniony | 22 | 29 | 31 | 28 | 33 | 46 | 49 | 50 |
| skraj lasu zacieniony | 7 | 7 | 14 | 14 | 1 | -1 | 16 | 22 |
| Różne zagospodarowanie terenu | | | | | | | | |
| plaża nadmorska | 26 | 31 | 40 | 39 | 16 | 31 | 43 | 48 |
| plaża nadjeziorna | 22 | 29 | 31 | — | 16 | 30 | 35 | — |
| pole po żniwach | 27 | 28 | 27 | — | 11 | 18 | 26 | 28 |
| łąka z trawą wysoką | 28 | 27 | 28 | 30 | 9 | 28 | 32 | — |
| łąka z trawą niską | 27 | 25 | 27 | — | 11 | 26 | 28 | — |
| bagno | 25 | 25 | 25 | 27 | 8 | 21 | 27 | 32 |
| skraj wsi | 29 | 27 | 31 | 36 | 25 | 38 | 46 | 49 |
| zabudowa willowa | 30 | 31 | 37 | 39 | 24 | 44 | 50 | 56 |

Zakresy T_a : 1 — $\leq 18,0$, 2 — 18,1-22,0, 3 — 22,1-25,0, 4 — $\geq 25,1$.

wynosi on $7-14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a w miejscach nasłonecznionych — $28-35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Wzrost zawartości ciepła zmienia się odpowiednio od około 0 do $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Obciążenie cieplne panujące w miejscu zacienionym można zatem określić jako niewielkie, a w miejscu nasłonecznionym jako znaczne.

W typach środowiska o różnym zagospodarowaniu terenu ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego zależy od zacienienia, osłonięcia od wiatru oraz od charakteru podłoża. Na przykład na plaży nadmorskiej i w obrębie zabudowy willowej, na skutek zwiększonego dopływu promieniowania odbitego od podłoża (piasek na plaży) lub ścian pobliskich budynków (zabudowa willowa), R jest większe niż w terenach otwartych, z podłożem trawiastym. Wzrost zawartości ciepła w organizmie jest również zależny od tych czynników i waha się od $7-32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ na polach, łąkach i bagnie do $14-46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ wśród zabudowy i na plaży nadmorskiej. Na polach i łąkach obciążenie cieplne organizmu jest więc niewielkie, a na plaży i w obrębie zabudowy — duże.

Na wypukłych formach rzeźby (pagór, grzbiet) pochłonięte promieniowanie słoneczne wynosi $21-35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a wzrost zawartości ciepła w ustroju waha się od $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ — w temperaturze powietrza $< 18^\circ\text{C}$ — do $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy $T_a > 25^\circ\text{C}$. Obciążenie cieplne zmienia się tutaj od niewielkiego do znacznego.

W wypadku wklęsłych form rzeźby ilość pochłoniętego przez organizm promieniowania słonecznego wynosi $30-40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Saldo bilansu cieplnego zależy natomiast od rozległości i głębokości formy; w formach rozległych wynosi ono $15-35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a w głębokich i wąskich — $30-45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Obciążenie cieplne ustroju waha się od niewielkiego (w formach rozległych) do dużego (w formach wąskich i głębokich).

* * *

Z powyższej analizy wynika, że typ środowiska geograficznego wpływa znacząco na strukturę bilansu cieplnego człowieka. Różne są ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego, odmienne proporcje poszczególnych strumieni wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem oraz ogólna wartość salda wymiany ciepła.

Zależnie od ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego można wydzielić środowiska o dopływie małym (wnętrza lasów i miejsca stale zacienione), przeciętnym (tereny otwarte z podłożem trawiastym) oraz dużym (tereny o dużym promieniowaniu odbitym lub rozproszonym, np. obszary odsłoniętych piasków i tereny zabudowane).

Ze względu na wielkość zmian zawartości ciepła w organizmie zaznaczają się środowiska o saldzie małym (lasy), przeciętnym (rozległe tereny odkryte) oraz dużym (wąskie doliny i głębokie zagłębienia oraz tereny zabudowane).

Na podstawie struktury strat ciepła można wydzielić obszary o dominacji wymiany ciepła przez unoszenie (do których zalicza się większość środowisk), obszary o przewodze lub znacznym udziale wymiany następującej na drodze promieniowania długofalowego (lasy, wąskie i głębokie wklęsłe formy terenu, zabudowa) oraz tereny o przewodze lub znacznym udziale strat ciepła na

parowanie (polany leśne i nasłonecznione skraje lasu, obszary zabudowane oraz niektóre wklęsłe formy terenu).

4.7. WYMIANA CIEPŁA PRZY RÓŻNEJ TERMOIZOLACYJNOŚCI ODZIEŻY

Jak już wspomniano w podrozdz. 1.2.2. oraz 4.2, odzież wpływa znacząco na wymianę ciepła między człowiekiem a otoczeniem. Badania porównawcze wymiany ciepła podczas używania odzieży o różnej termoizolacyjności przeprowadzono w czasie dwóch serii pomiarowych: w sierpniu 1987 r. w centralnej Mongolii oraz w maju 1992 r. w środkowej Szwecji.

Pomiary temperatury skóry prowadzono u obserwatora ubranego w odzież o termoizolacyjności 0,5, 1 i 1,5 clo oraz średnim albedo około 30%. Do porównania wybrano dla obu serii dane z dwu typów pogody, o podobnej temperaturze powietrza (20-25°C w Mongolii i 10-15°C w Szwecji), prędkości wiatru (1-4 m·s⁻¹) i wilgotności powietrza (50-80%), ale o różnym zachmurzeniu (0-50% i 80-100%).

Wzrost termoizolacyjności odzieży powodował nieznaczne podwyższenie się średniej ważonej temperatury skóry (tab. 4.11). Stwierdzone różnice są jednak nieistotne statystycznie, a przy tym na tyle małe, że o wymianie ciepła

Tabela 4.11. Średnie dzienne wartości strumieni ciepła przepływającego pomiędzy człowiekiem a otoczeniem i maksymalny czas przebywania (MTE) w różnych warunkach pogodowych i przy różnej termoizolacyjności odzieży

Mean daily values of man-environment heat exchange fluxes and maximal time of exposure (MTE) with different weather conditions and clothing insulation

| Termoizolacja odzieży (clo) | Temperatura skóry (°C) | Strumień ciepła (W·m ⁻²) | | | | | | MTE (min) |
|--|------------------------|--------------------------------------|--------|-------|-------|------|-------|-----------|
| | | R | C | L | E | Res | S | |
| Słonecznie, umiarkowanie ciepło, ze słabym wiatrem | | | | | | | | |
| 0,5 | 32,9 | 58,2 | -60,8 | -31,2 | -58,0 | -5,8 | -27,6 | 196 |
| 1,0 | 33,2 | 36,4 | -39,8 | -19,9 | -41,2 | -5,8 | -0,3 | ∞ |
| 1,5 | 33,4 | 25,1 | -33,2 | -11,4 | -17,0 | -5,8 | 27,7 | 195 |
| Pochmurnie, umiarkowanie ciepło, ze słabym wiatrem | | | | | | | | |
| 0,5 | 33,0 | 46,9 | -58,8 | -35,1 | -52,9 | -6,0 | -35,9 | 150 |
| 1,0 | 32,9 | 26,8 | -37,3 | -21,9 | -32,8 | -6,0 | -1,2 | 4500 |
| 1,5 | 33,1 | 14,3 | -31,1 | -9,2 | -14,0 | -6,0 | 24,0 | 225 |
| Słonecznie, zimno, wietrznie | | | | | | | | |
| 0,5 | 29,4 | 38,8 | -109,1 | -55,4 | -19,8 | -7,0 | -82,5 | 67 |
| 1,0 | 29,5 | 24,6 | -69,7 | -35,4 | -14,0 | -7,0 | -31,3 | 183 |
| 1,5 | 29,7 | 18,0 | -51,4 | -26,0 | -11,1 | -7,0 | -7,5 | 1400 |
| Pochmurnie, zimno, wietrznie | | | | | | | | |
| 0,5 | 28,7 | 18,9 | -112,9 | -46,8 | -16,4 | -7,0 | -94,2 | 57 |
| 1,0 | 28,9 | 15,6 | -71,5 | -29,6 | -11,6 | -7,0 | -34,2 | 158 |
| 1,5 | 29,1 | 14,1 | -52,6 | -21,8 | -9,3 | -7,0 | -6,7 | 806 |

między człowiekiem a otoczeniem decydowała przede wszystkim termiczna izolacyjność noszonej odzieży.

Wraz ze wzrostem termoizolacyjności odzieży zmniejszało się natężenie poszczególnych strumieni ciepła. Zmniejszyły się również ich odchylenia standardowe. Świadczy to o tym, że odzież o większej izolacyjności termicznej nie tylko zmniejszała natężenie poszczególnych strumieni ciepła, ale zmniejszała także ich wahania czasowe.

Zarówno przy zachmurzeniu małym, jak i zachmurzeniu dużym ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego zwiększała się wraz ze zmniejszaniem się termicznego oporu odzieży. Dla odzieży o termoizolacyjności 0,5 clo R było dwu-, trzykrotnie większe niż przy $I_{cl} = 1,5$ clo. Różnice strumienia R pomiędzy pogodą umiarkowaną ciepłą i zimną są związane z prowadzeniem pomiarów przy innych wysokościach Słońca nad horyzontem. Także natężenie strumieni ciepła odprowadzanego z organizmu zmniejszało się w podobnym stosunku wraz ze wzrostem izolacyjności termicznej odzieży.

Efektom powyższych procesów były obserwowane zmiany zawartości ciepła w stroju. Podczas pogody umiarkowanej ciepłej, kiedy używano odzieży lekkiej (0,5 clo) ubytek ciepła wynosił około $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a przy odzieży cieplej (1,5 clo) obserwowano wzrost ilości ciepła o prawie $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Jedynie w wypadku odzieży o termoizolacyjności 1 clo zyski i straty ciepła w organizmie równoważyły się. Obserwowane w porównywanych sytuacjach saldo wymiany ciepła wskazuje na zróżnicowane odczucia cieplne człowieka; przy $I_{cl} = 1,0$ clo występowało odczucie komfortu, przy $I_{cl} = 0,5$ clo – uczucie zimna, a przy $I_{cl} = 1,5$ clo – niewielki stres cieplny. Podczas używania odzieży o termoizolacyjności 0,5 i 1,5 clo maksymalny czas przebywania w danych warunkach pogodowych był ograniczony do 2,5-3,5 godziny.

Podczas pogody zimnej ubytek ciepła był znaczny i zmieniał się od $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ w wypadku odzieży lekkiej do $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ w wypadku tzw. normalnej odzieży letniej (1 clo). Dopiero odzież ciepła (1,5 clo) zapewniała organizmowi równowagę cieplną. Odczucia cieplne zmieniały się od bardzo zimno (przy $I_{cl} = 0,5$ clo) do komfortowo (przy $I_{cl} = 1,5$ clo). Maksymalny czas przebywania wynosił przy 0,5 clo około 1 godziny, a przy 1,0 clo – 2,5-3 godzin.

Na podstawie przedstawionego materiału można sformułować następujące wnioski:

- temperatura powierzchni ciała wzrasta nieznacznie wraz ze wzrostem termoizolacyjności odzieży; obserwowane różnice T_s są jednak nieistotne statystycznie,
- ogólna wymiana ciepła oraz natężenie poszczególnych jego strumieni zmniejsza się wraz ze wzrostem termoizolacyjnych właściwości odzieży,
- w warunkach termoneutralnych przy $I_{cl} = 1,0$ clo zyski i straty ciepła równoważą się, przy $I_{cl} = 0,5$ clo występuje niedobór ciepła, a przy $I_{cl} = 1,5$ clo jego niewielki nadmiar,
- w warunkach pogody zimnej równoważenie się zysków i strat ciepła następuje dzięki używaniu odzieży o termoizolacyjności 1,5 clo; przy odzieży lżejszej występuje znaczny ubytek ciepła w organizmie.

4.8. KLASYFIKACJA WARUNKÓW BIOTERMICZNYCH

W badaniach bioklimatycznych sprawą bardzo ważną jest ocena uciążliwości dla człowieka warunków biotermicznych. Podstawową charakterystyką, która może być w tym celu wykorzystana, jest zmiana zawartości ciepła w organizmie (saldo wymiany ciepła). Uwzględniając przyjmowane w termofizjologii zakresy sprawności układu termoregulacyjnego można stwierdzić, że saldo, którego wielkość bezwzględna nie przekracza $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, nie powoduje większych obciążeń ustroju, niedobór lub nadmiar ciepła równy $20\text{--}45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ stwarza obciążenie znaczne. W wypadku salda wymiany ciepła równego $\pm 45\text{--}90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ obciążenie cieplne jest duże, a kiedy ubytek lub wzrost zawartości ciepła jest większy od $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ występują zakłócenia w pracy układu termoregulacyjnego, grożące przegrzaniem lub wychłodzeniem organizmu.

Wyniki badań wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, przeprowadzonych w różnych sytuacjach pogodowych i w różnych typach środowiska geograficznego, pozwalają na uzupełnienie charakterystyki warunków biotermicznych o analizę obciążeń cieplnych spowodowanych pochłonięciem promieniowania słonecznego. Im większa jest bowiem ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego, tym większe jest obciążenie cieplne, nawet przy takiej samej wynikowej zmianie zawartości ciepła w ustroju.

Tabela 4.12. Klasyfikacja obciążeń cieplnych człowieka w zależności od zmian zawartości ciepła w organizmie (saldo wymiany) i ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego (w $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Classification of heat load in man depending on net heat storage (S) and absorbed solar radiation (R) (in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

| Saldo wymiany ciepła (S) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | Pochłonięte promieniowanie słoneczne (R) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) | | |
|--|--|--|--------|
| | < 15,0 | 15,1-30,0 | > 30,0 |
| > 90,0 | niebezpieczeństwo przegrzania organizmu (hazard of organism overheating) | | |
| 45,1-90,0 | warunki obciążające (loaded conditions) | warunki silnie obciążające (strongly loaded conditions) | |
| 20,1-45,0 | warunki lekko obciążające (slightly loaded conditions) | warunki obciążające (loaded conditions) | |
| -20,1-+20,0 | warunki oszczędzające (mild conditions) | warunki lekko obciążające (slightly loaded conditions) | |
| -45,0- -20,0 | warunki obciążające (loaded conditions) | | |
| -90,0- -45,1 | warunki silnie obciążające (strongly loaded conditions) | warunki obciążające (loaded conditions) | |
| < -90,0 | niebezpieczeństwo wychłodzenia organizmu (hazard of organism overcooling) | | |

Proponowana tu klasyfikacja warunków biotermicznych opiera się więc na ocenie obciążeń cieplnych organizmu związanych ze zmianami zawartości ciepła w ustroju (S) i ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego (R). Można na tej podstawie wydzielić pięć grup warunków biotermicznych (tab. 4.12):

1) warunki oszczędzające, w których saldo wymiany ciepła waha się od -20 do $+20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego jest niewielka i nie przekracza $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,

2) warunki lekko obciążające, charakteryzujące się ubytkiem ciepła rzędu $20-45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ lub jego wzrostem o $20-45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ oraz ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego wynoszącą ponad $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,

3) warunki obciążające, w których ubytek ciepła waha się od 20 do $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy $R < 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ lub gdy wzrost jego ilości wynosi $45-90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy R mniejszym od $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,

4) warunki silnie obciążające, w których wzrost ilości ciepła przekracza $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, a ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego $> 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ lub gdy ubytek ciepła jest większy od $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ przy $R < 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,

5) warunki grożące przegrzaniem lub wychłodzeniem organizmu, w których saldo wymiany ciepła jest większe od $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ lub mniejsze od $-90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Cennym uzupełnieniem powyższej klasyfikacji jest określenie struktury strat ciepła z organizmu człowieka do otoczenia. Można tu wyodrębnić cztery podstawowe rodzaje struktury bilansu cieplnego:

- z przewagą unoszenia ciepła z powierzchni ciała (typ konwekcyjny),
- z przewagą lub dużym udziałem (25-30%) wymiany ciepła na drodze promieniowania długofalowego (typ radiacyjny),
- z przeważającym udziałem strat ciepła na parowanie potu z powierzchni ciała (typ ewaporacyjny),
- z wyrównanym udziałem wszystkich strumieni ciepła (typ mieszany).

Klasyfikacja ta odnosi się do niestacjonarnych warunków wymiany ciepła i może mieć zastosowanie we wszystkich dziedzinach badań bioklimatu człowieka, na przykład: do oceny biotermicznej warunków pogodowych, różnych warunków klimatycznych i topoklimatycznych oraz obciążeń cieplnych spowodowanych pracą w terenie otwartym.

4.9. Dyskusja wyników

Jak już wspomniano, opracowanie to jest oparte na badaniach bilansu cieplnego przeprowadzonych w terenie otwartym. Inne prace o podobnym zakresie (Nielsen B. i in. 1988; Freitas, Ryken 1989) dotyczyły odmiennych warunków wyjściowych; obejmowały ludzi w innej odzieży i o innej aktywności fizycznej. Inne były również cele badań. W obecnym opracowaniu chodziło o określenie warunków kształtowania się wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych sytuacjach środowiskowych (pogodowych, klimatycznych, terenowych). Celem badań wymienionych wyżej autorów było natomiast przesłedzenie obciążeń cieplnych człowieka przy różnym wysiłku fizycznym, a teren otwarty był jedynie miejscem przeprowadzenia pomiarów. Z tego też względu nie można porównywać w sposób bezpośredni stwierdzonych przez tych autorów wartości poszczególnych strumieni ciepła z wyini-

kami przedstawionymi w niniejszej pracy. Można jedynie zaznaczyć, że zarówno B. Nielsen, jak i autor obecnego opracowania, obserwowali ścisły związek temperatury skóry z dopływem promieniowania słonecznego do człowieka.

Porównując natężenie wymiany ciepła z otoczeniem przez unoszenie i parowanie potu, obserwowanych w komorach klimatycznych i w terenie otwartym, widać wyraźne ich podobieństwo (ryc. 2.3 i 2.6). Wraz ze wzrostem temperatury powietrza obserwowano w warunkach terenowych, podobnie jak np. E. N. Hey (1974) w laboratoriach, zwiększanie się strat ciepła na parowanie. Sytuacja odwrotna występowała natomiast w wypadku unoszenia ciepła i jego wypromieniowania długofalowego.

Notowane podczas badań w terenie otwartym zmniejszanie się strat ciepła na parowanie w wysokiej temperaturze powietrza było także stwierdzane w eksperymentach laboratoryjnych (Malchaire, 1991). J. B. Malchaire rejestrował zmiany temperatury skóry i ilości parującego potu. Zaobserwował on, że w cyklu około 20 minut następują systematyczne wahania badanych parametrów: temperatury skóry o 3-4°C, a strat wody z ustroju (na skutek parowania potu) o 4-5 g · min⁻¹. W prezentowanych terenowych badaniach fizjoklimatologicznych pomiar temperatury skóry był wykonywany co 60 minut, dlatego też nie udało się stwierdzić, jak długie są fazy ochładzania skóry przez parujący pot i jej ponownego nagrzewania się. Zagadnienie to wymaga dalszych, bardziej szczegółowych badań, które powinny doprowadzić do wprowadzenia niezbędnych korekt w metodzie obliczania strat ciepła związanych z parowaniem.

Obserwowane różnice wymiany ciepła w odmiennych typach środowiska geograficznego są zgodne ze spostrzeżeniami innych autorów, zwłaszcza jeśli chodzi o ocenę uciążliwości cieplnej (podrozdz. 3.3). Jako najbardziej uciążliwe są odnotowywane warunki biotermiczne w obrębie zabudowy miejskiej i w małych, zamkniętych formach rzeźby lub zagospodarowania terenu (np. głębokie kotliny, polany leśne). Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy przedstawionego w pracy materiału.

Brak jest w zasadzie badań porównawczych bilansu cieplnego człowieka w różnych strefach klimatycznych. Prace K. Błażejczyka i B. Krawczyka (Błażejczyk, Krawczyk 1991; Krawczyk, Błażejczyk 1991; Kravčik i in. 1991) oparte są wprawdzie częściowo na tym samym materiale pomiarowym, co w obecnym opracowaniu, mają one jednak charakter metodyczny, ilustrowany przykładami badań prowadzonych w różnych warunkach klimatycznych. Inna była w nich także metoda oceny ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego.

Określenie ilości ciepła pochodzącego z absorpcji promieniowania słonecznego jest bardzo ważnym zagadnieniem w badaniach bilansu cieplnego człowieka. Stosowane w tym zakresie liczne metody opierały się na przyjmowaniu pionowo usytuowanego cylindra jako modelu analogowego ciała człowieka. Niemniej dopiero R. D. Brown i T. J. Gillespie (1986) oraz S. A. Krys i R. D. Brown (1990) przeprowadzili pomiary eksperymentalne promieniowania pochłoniętego przez cylinder. Jest ono o 30-40% większe od promieniowania pochłoniętego przez stosowany w badaniach termofizjologicznych i w obecnym opracowaniu model elipsoidy.

Spostrzeżenia poczynione podczas badań dotyczących wymiany ciepła w zależności od różnej termoizolacyjności odzieży są zbieżne z wynikami uzyskiwanymi w komorach klimatycznych. W obu wypadkach notuje się zmniejszoną intensywność wymiany ciepła z otoczeniem wraz ze wzrostem termoizolacyjności odzieży. W terenie otwartym obserwowano także mniejsze wahania czasowe poszczególnych strumieni ciepła przy odzieży o większej izolacyjności termicznej. Stwierdzony w badaniach laboratoryjnych duży wpływ koloru noszonej odzieży na ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego jest zgodny z wynikami prezentowanymi przez B. Nielsen (1990), która obserwowała znacznie większy wzrost temperatury skóry i zawartości ciepła w organizmie u osób noszących odzież czarną niż u osób ubranych w odzież białą.

W bioklimatologii człowieka od dawna dokonywane są próby opracowania klasyfikacji warunków biotermicznych. Ich przegląd można znaleźć w pracach T. Kozłowskiej-Szczęsnej (red. 1985) oraz B. Krawczyk (1988). Przykładem nowej propozycji klasyfikacji warunków biotermicznych są prace T. Kozłowskiej-Szczęsnej (1987a, b). Wszystkie z dotychczas opracowanych klasyfikacji opierają się jednak na analizie pojedynczych elementów meteorologicznych lub ich zespołów. Nie mają one natomiast bezpośredniego odniesienia do procesów fizjologicznych zachodzących w organizmie człowieka i dlatego trudno jest porównywać je z klasyfikacją zaproponowaną w niniejszej publikacji. W przyszłości należałoby podjąć badania porównawcze w tym zakresie i dokonać oceny takich samych sytuacji pogodowych lub środowiskowych z użyciem kilku istniejących metod klasyfikacyjnych.

5. MENEX – KOMPLEKSOWY MODEL WYMIANY CIEPŁA POMIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM

Przegląd różnych modeli bilansu cieplnego, przeprowadzony w rozdziale 3, wskazuje, że pomimo znacznej ich liczby, żaden nie spełnia wymogów kompleksowości, to znaczy nie może być bez dodatkowych adaptacji stosowany do różnorodnych badań bioklimatycznych. Dlatego też podjęto próbę opracowania nowego modelu wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Pozwala on na określenie bilansu cieplnego człowieka i obciążenia cieplnego organizmu w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych, w różnych sytuacjach środowiskowych. Może być stosowany we wszystkich aspektach badań bioklimatycznych. Modelowi nadano nazwę MENEX. Przyjęte w modelu rozwiązania stanowią syntezę przeprowadzonych badań szczegółowych, omówionych w rozdziale 4.

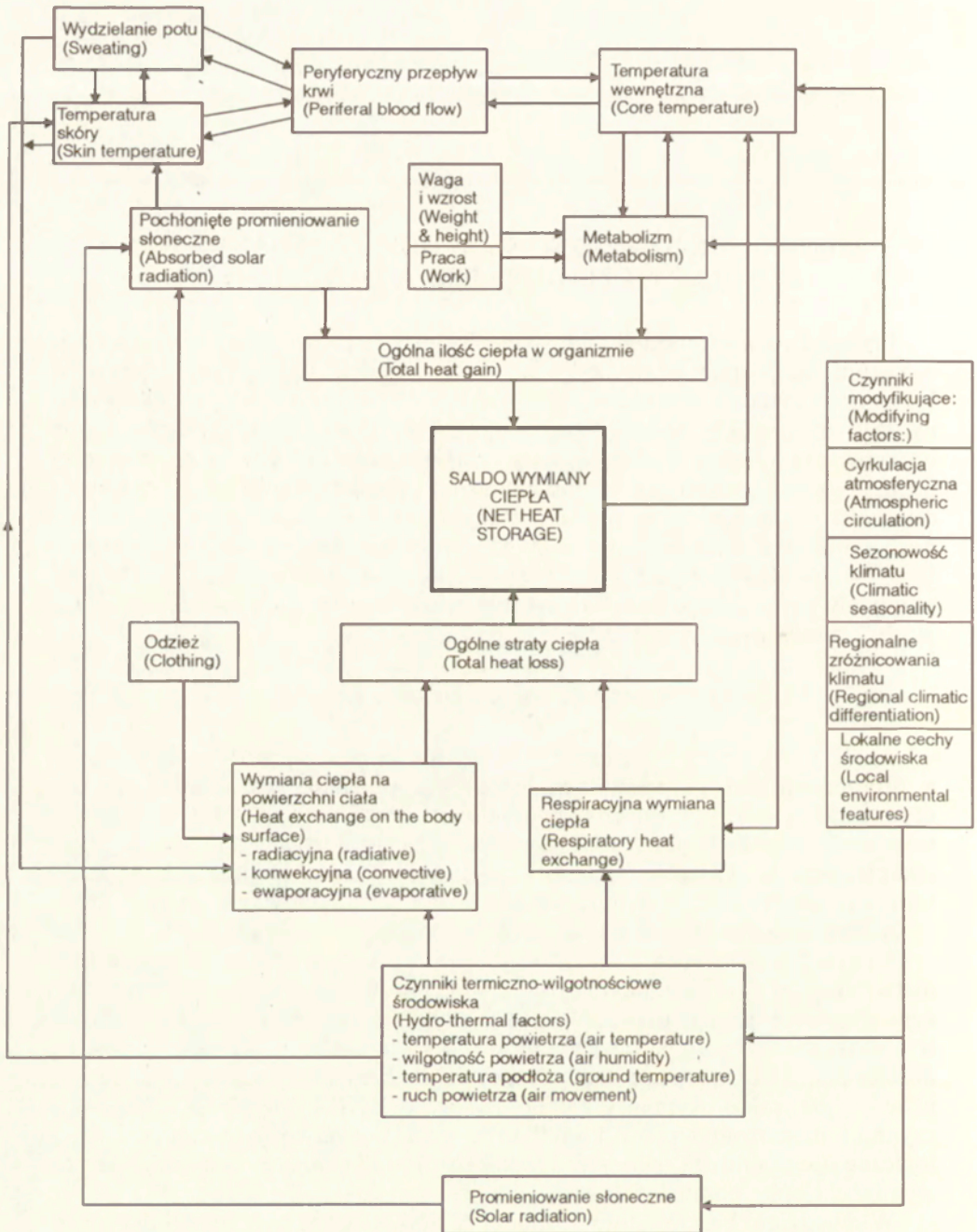
5.1. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA MODELU

Analiza wielkości i struktury wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem jest najpełniejszym sposobem poznania gospodarki cieplnej organizmu w różnych warunkach środowiskowych. Uwzględnia się bowiem tutaj zarówno stan fizyczny atmosfery otaczającej człowieka, jak i fizjologiczne reakcje ustroju. Wartość wzrostu lub ubytku ciepła w organizmie (saldo wymiany ciepła) daje – w połączeniu z ilością promieniowania pochłoniętego – najpełniejszą charakterystykę obciążeń cieplnych ustroju.

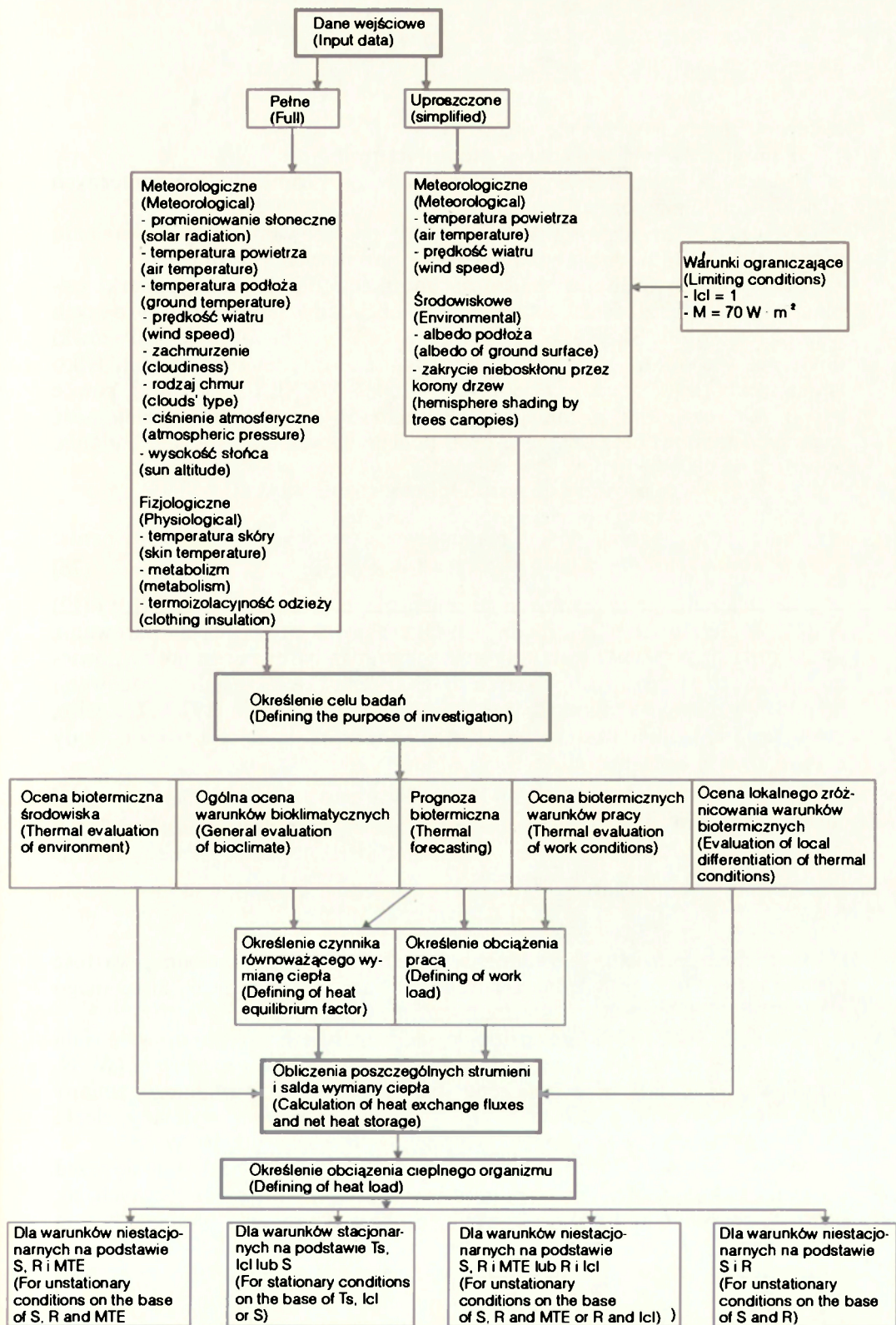
Rycina 5.1 przedstawia schemat powiązań pomiędzy różnymi czynnikami meteorologicznymi i klimatycznymi a funkcjonowaniem układu termoregulacyjnego. Obie grupy procesów, to znaczy procesy fizyczne obserwowane w atmosferze i fizjologiczne zachodzące w organizmie, wpływają na ogólną ilość ciepła, jaką ustrój człowieka dysponuje i oddaje do otoczenia, a co za tym idzie – na saldo wymiany ciepła. Model MENEX uwzględnia wszystkie czynniki meteorologiczne i klimatyczne oraz podstawowe parametry fizjologiczne (temperatura skóry i metabolizm) oddziałujące bezpośrednio na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem.

W dziedzinie bioklimatologii model MENEX może być szczególnie przydatny do:

- 1) oceny biotermicznej różnych warunków środowiskowych (pogodowych, klimatycznych, mikroklimatycznych),
- 2) ogólnej oceny warunków bioklimatycznych jakiegoś obszaru lub okresu,
- 3) oceny biotermicznych warunków pracy człowieka w różnych sytuacjach



Ryc. 5.1. Powiązania pomiędzy procesami fizjologicznymi oraz czynnikami środowiskowymi, wpływającymi na wymianę ciepła człowieka z otoczeniem, uwzględnionymi w modelu MENEX
 Scheme of relationships between physiological processes and environmental factors, influence man-surroundings heat exchange, taken into consideration in the MENEX model



Ryc. 5.2. Model wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem – MENEX
Scheme of man-environment heat exchange model – MENEX

meteorologicznych w terenie otwartym,

4) prognozowania warunków biotermicznych,

5) badania przestrzennego zróżnicowania warunków biotermicznych w skali topoklimatycznej.

Rycina 5.2. przedstawia kolejne etapy postępowania przy stosowaniu modelu MENEX podczas rozwiązywania powyższych zagadnień.

Praktycznym rezultatem badań są informacje dotyczące gospodarki cieplnej organizmu człowieka i stopnia jego obciążenia termicznego w danych warunkach środowiskowych. Na tej podstawie można określić wskazówki dotyczące sposobów zachowania równowagi energetycznej ustroju lub tylko zmniejszenia jego obciążeń cieplnych. Model MENEX daje tutaj pewne propozycje rozwiązań, niemniej jednak wskazana jest pogłębiona znajomość zagadnień termofizjologicznych u osób podejmujących tego rodzaju badania.

5.1.1. OBLICZANIE POSZCZEGÓLNYCH STRUMIENI CIEPŁA

Podstawowa, ogólna postać matematyczna modelu ma formę równania:

$$M + R + C + E + L + \text{Res} = S. \quad (26)$$

Do obliczenia poszczególnych strumieni ciepła stosuje się wzory (10) i (12) – (24) zamieszczone w podrozdz. 4.3. Określając straty ciepła na parowanie uwzględnia się poprawkę związaną ze zwiększonym parowaniem potu z powierzchni ciała przy różnym obciążeniu pracą. Poprawka ta została opracowana na podstawie danych zamieszczonych w pracy P. O. Fangera (1974). Tak więc, wzór na obliczenie strat ciepła następujących podczas parowania wody z powierzchni ciała ma postać:

$$E = h_e d(e_a - e_s) w_{le} - [0,42(M - 58) - 5,04]. \quad (27)$$

Współczynnik dyfuzji turbulencyjnej określany jest dla ogólnej prędkości ruchu powietrza, która jest sumą prędkości wiatru (v) oraz prędkości poruszania się człowieka (v'). Tak więc:

$$d = \sqrt{v + v'}.$$

W modelu przyjęto – zgodnie z normą ISO 8996 – średnią wartość metabolizmu, bez uwzględnienia zróżnicowania osobniczego związanego z płcią, wiekiem i cechami morfologicznymi człowieka.

U osób w wieku 18-60 lat i normalnych proporcjach wzrostu do wagi ciała indywidualne zróżnicowanie metabolizmu jest stosunkowo niewielkie (W. N. Schofield 1985), tak więc obliczone dla tzw. człowieka średniego zmiany zawartości ciepła w organizmie nie różnią się od salda wymiany ciepła określonego dla indywidualnych przypadków o więcej niż $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Myśląc o upowszechnieniu badań bilansu cieplnego człowieka staje się przed problemem dostępności danych pomiarowych, zarówno meteorologicznych, jak i fizjologicznych. Chodzi głównie o dane dotyczące natężenia promieniowania słonecznego i temperatury skóry. Dlatego też w modelu MENEX przewidziano możliwość zastosowania uproszczonych procedur wyznaczania tych dwu wielkości. Zmniejszają one wprawdzie dokładność wyznaczonych strumieni ciepła o 5-15%, ale dzięki temu pozwalają na powszechniejsze stosowanie metody bilansu cieplnego człowieka w badaniach bioklimatycznych.

Istnieje także możliwość przybliżonego, szacunkowego określenia poszczególnych strumieni i salda wymiany ciepła na podstawie temperatury powietrza i prędkości wiatru. Sposób ten może służyć do względnego porównywania różnych warunków środowiskowych i przybliżonej, fizjologicznej oceny obciążeń cieplnych organizmu.

5.1.1.1. Szacunkowe wyznaczenie temperatury skóry

Silne związki korelacyjne, obserwowane pomiędzy temperaturą skóry a niektórymi elementami meteorologicznymi (por. podrozdz. 4.4.1), pozwalają na zaproponowanie następujących wzorów do wyznaczenia T_s , opartych na współczynnikach regresji wielokrotnej:

– dla sytuacji z bardzo małym dopływem promieniowania słonecznego (np. wewnątrz lasów, godziny nocne, poranne i przedwieczorne)

$$T_s = 0,293T_a + 0,0012f - 0,077v + 26,0, \quad (28)$$

– dla sytuacji z prędkością wiatru $\leq 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

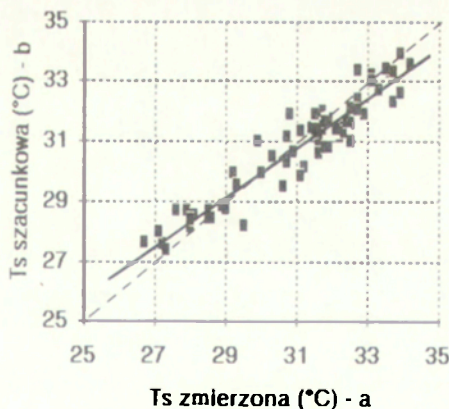
$$T_s = 0,294T_a + 0,001f + 1,12(1 - N) - 0,08v + 26,03, \quad (29)$$

– dla sytuacji z prędkością wiatru $> 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$T_s = 0,267T_a + 0,01f + 1,1(1 - N) - 0,074v + 25,1. \quad (30)$$

W razie określania temperatury skóry człowieka przebywającego w miejscu zacienionym należy we wzorach (29) i (30) zastosować dodatkowy współczynnik korekcyjny równy 0,96.

Wyznaczona w ten sposób temperatura skóry może być odnoszona do człowieka stojącego lub wykonującego niewielki wysiłek fizyczny (o metabolizmie nie większym od 120 W m^{-2}). Określony dla niezależnych danych



Ryc. 5.3. Porównanie zmierzonej (a) i obliczonej według wzorów szacunkowych (b) temperatury skóry ($n = 75$, $p = 0,05$)

Objaśnienia jak na ryc. 4.3

Comparison of measured (a) and calculated (b) mean skin temperature ($n = 75$, $p = 0.05$)

Explanations at fig. 4.3

współczynnik korelacji pomiędzy temperaturą skóry zmierzoną i obliczoną za pomocą powyższych wzorów wynosi 0,90, a prosta regresji badanego związku jest bardzo zbliżona do linii identyczności (ryc. 5.3).

5.1.1.2. Szacunkowe wyznaczanie pochłoniętego promieniowania słonecznego

Wyznaczając szacunkowo ilość promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka nie ubranego (R') oparto się na związku, jaki zachodzi pomiędzy tą wielkością a wysokością Słońca nad horyzontem, przy różnym zachmurzeniu. Parametr związany z zachmurzeniem jest określony przez iloczyn jego wielkości i współczynnika oznaczającego rodzaj chmur (N_c). Korelacja pomiędzy ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego a wysokością Słońca jest silna. Jej współczynniki wynoszą odpowiednio: dla $N_c \leq 0,3$ – 0,89, dla $N_c = 0,31-0,6$ – 0,91 i dla $N_c > 0,6$ – 0,95. Związki te są opisane następującymi równaniami regresji:

– dla iloczynu $N_c \leq 0,3$

$$R' = (\ln h - 1,1)/0,015, \quad (31)$$

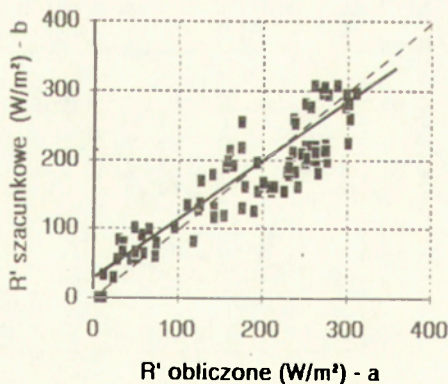
– dla iloczynu $N_c = 0,31-0,6$

$$R' = e^{(0,051h + 2,34)}, \quad (32)$$

– dla iloczynu $N_c > 0,6$

$$R' = 2,21h - 6,8. \quad (33)$$

W wypadku człowieka przebywającego w miejscu zacienionym należy zastosować współczynniki korekcyjne wynoszące: 0,35 dla wzoru (31), 0,58 dla wzoru (32) i 0,83 dla wzoru (33).



Ryc. 5.4. Porównanie obliczonych na podstawie danych pomiarowych (a) oraz wzorów szacunkowych (b) ilości promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka nie ubranego ($n = 75$, $p = 0,05$)

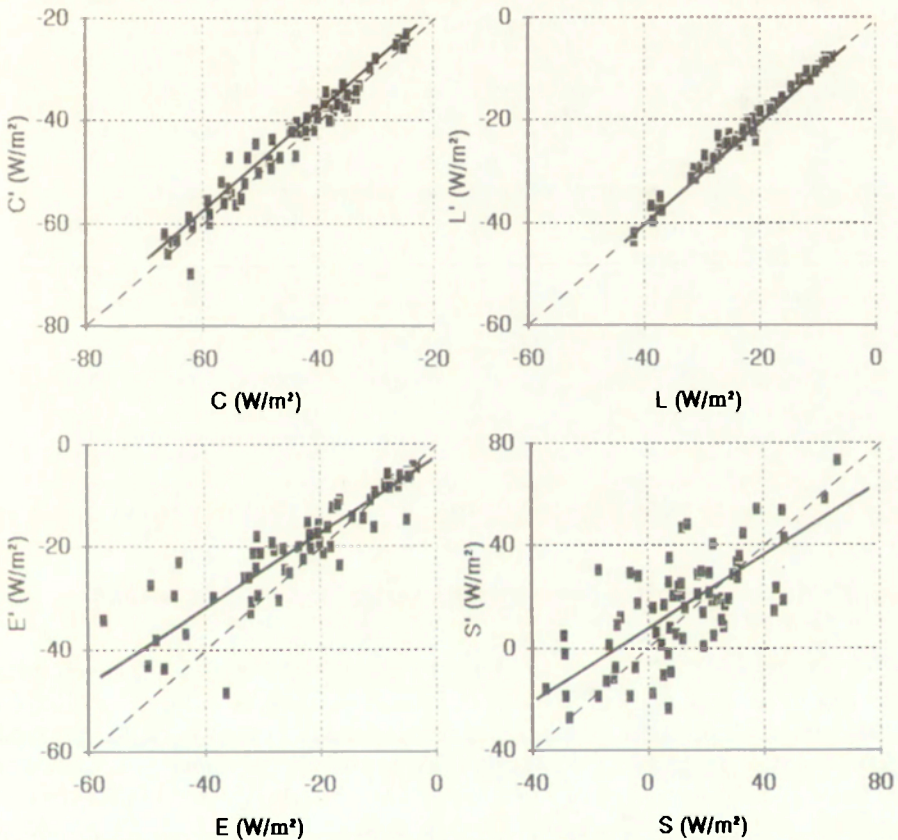
Objaśnienia jak na ryc. 4.3

Comparison of solar radiation absorbed by unclothed man, calculated on the base of measured data (a) and simplified equations (b) ($n = 75$, $p = 0.05$)

Explanations at fig. 4.3

Wyznaczona w ten sposób ilość promieniowania słonecznego pochłoniętego przez człowieka nie ubranego może zastąpić wartość R obliczoną dla modelu elipsoidy na podstawie bezpośrednich pomiarów promieniowania słonecznego. Określony dla niezależnych danych ($n = 75$, $p = 0,05$) współczynnik korelacji pomiędzy porównywanymi wartościami R – zmierzona i obliczona sposobem szacunkowym – wynosi 0,92. Także zbieżność linii regresji i linii idynczności świadczy o sile badanego związku (ryc. 5.4).

Dokładność strumieni ciepła obliczonych z zastosowaniem przedstawionych wyżej wzorów szacunkowych jest bardzo duża (ryc. 5.5). Określone dla niezależnych danych współczynniki korelacji pomiędzy wartościami strumieni



Ryc. 5.5. Porównanie strumieni ciepła wyznaczonych z użyciem metody pełnej na podstawie zmierzonej (oś pozioma) i obliczonej za pomocą wzorów szacunkowych (oś pionowa) temperatury skóry ($n = 75$, $p = 0,05$)

C' , L' , E' , S' – szacunkowe wartości strumieni ciepła, inne objaśnienia jak na ryc. 4.3

Comparison of heat fluxes calculated with the use of full method on the base of measured (x axis) and estimated (y axis) skin temperature ($n = 75$, $p = 0.05$)

C' , L' , E' , S' – estimated values of heat fluxes, another explanations at fig. 4.3

ciepła, obliczonymi na podstawie zmierzonych i szacunkowych wartości T_s i R , wynoszą 0,88-0,99. Błąd standardowy waha się od 5,4% dla promieniowania długofalowego do 15,6% dla zmian zawartości ciepła w organizmie

(tab. 5.1). Stosunkowo duży błąd obserwowany jest w wypadku parowania. Wiąże się to z błędem powstałym podczas szacowania temperatury skóry; przy jej wysokich wartościach każda, niewielka nawet, zmiana T_s powoduje istotną zmianę stopnia uwilgotnienia skóry i wynikających stąd strat ciepła na parowanie. Na około szesnastoprocentową niedokładność salda wymiany ciepła składa się natomiast suma błędów powstałych podczas obliczania poszczególnych strumieni ciepła.

Tabela 5.1. Związki statystyczne pomiędzy strumieniami ciepła obliczonymi metodą pełną i sposobami uproszczonymi ($n = 75$, $p = 0,05$)
Statistical relationships between heat fluxes calculated with the use of full and simplified methods

| Charakterystyka statystyczna | Strumień ciepła | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|------|
| | R + M | C | L | E | S |
| Sposób uproszczony oparty na szacunkowych wartościach T_s i R' | | | | | |
| Współczynnik korelacji | 0,92 | 0,98 | 0,99 | 0,89 | 0,88 |
| Błąd standardowy: | | | | | |
| $W \cdot m^{-2}$ | 12,1 | 2,4 | 1,2 | 5,1 | 10,5 |
| % | 11,4 | 5,5 | 5,4 | 13,0 | 15,6 |
| Sposób uproszczony oparty na T_a i v | | | | | |
| Współczynnik korelacji | – | 0,91 | 0,89 | 0,85 | 0,86 |
| Błąd standardowy: | | | | | |
| $W \cdot m^{-2}$ | – | 5,5 | 4,4 | 6,1 | 10,9 |
| % | – | 14,7 | 15,2 | 17,5 | 18,3 |

5.1.1.3. Uproszczony sposób wyznaczania strumieni ciepła

W badaniach, w których chodzi głównie o określenie względnych różnic pomiędzy porównywanymi warunkami środowiskowymi, można posłużyć się uproszczonym sposobem wyznaczania strumieni wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Przy opracowywaniu proponowanych tu wzorów uproszczonych oparto się na silnych związkach korelacyjnych, obserwowanych pomiędzy natężeniem strumieni ciepła a temperaturą powietrza i prędkością wiatru (por. podrozdz. 4.4.2). Równania regresji wielokrotnej opisującej te związki wyznaczono – analogicznie jak dla temperatury skóry – dla sytuacji z wiatrem $\leq 4,0$ i $> 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz z bardzo małym dopływem promieniowania słonecznego (wnętrza lasów, godziny nocne, poranne i przedwieczorne). Wzory te mają następującą postać:

– dla sytuacji pogodowych i terenowych z wiatrem $\leq 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$C = 2,39T_a - 2,91v - 74,18, \quad (34)$$

$$L = 0,95T_a + 3,14v - 44,61, \quad (35)$$

$$E = -0,87T_a - 1,46v - 0,87, \quad (36)$$

$$S = 2,76T_a - 4,77v - 29,78, \quad (37)$$

- dla sytuacji pogodowych i terenowych z wiatrem $> 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$C = 2,4Ta - 2,9v - 84,2, \quad (38)$$

$$L = 0,9Ta + 3,1v - 43,6, \quad (39)$$

$$E = -1,37Ta - 2,46v + 14,2, \quad (40)$$

$$S = 2,3Ta - 0,5v - 35,32, \quad (41)$$

- w wypadkach bardzo małego dopływu promieniowania słonecznego

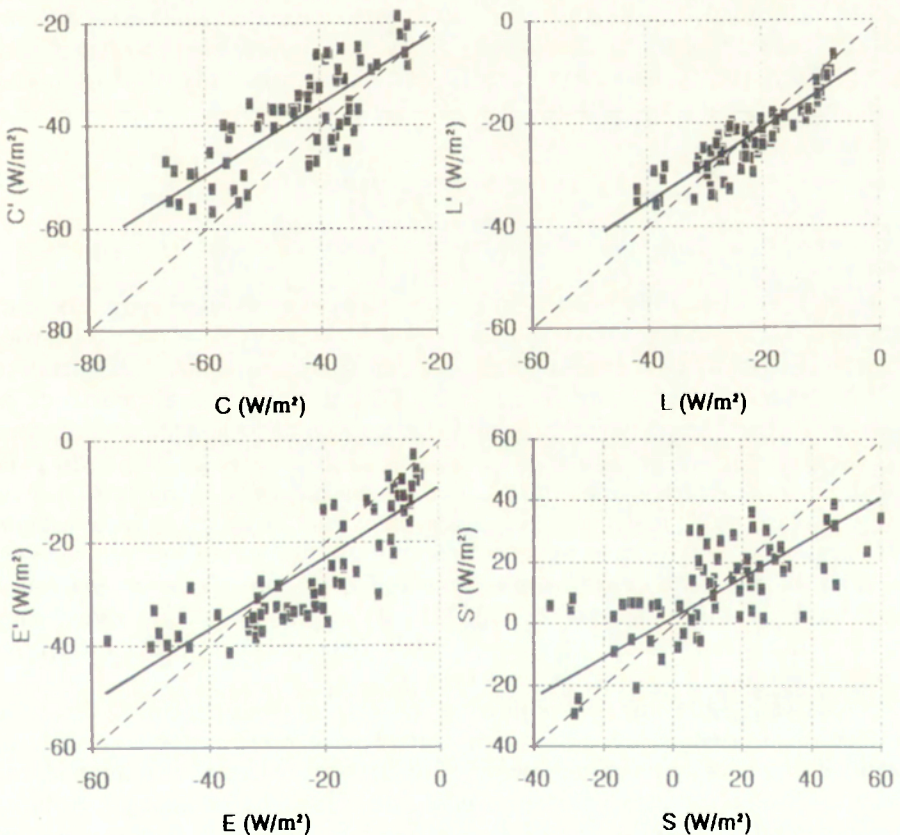
$$C = 2,36Ta - 8,24v - 66,2, \quad (42)$$

$$L = 0,77Ta + 5,63v - 43,02, \quad (43)$$

$$E = -0,32Ta - 4,10v - 5,50, \quad (44)$$

$$S = 3,34Ta - 1,48v - 51,2. \quad (45)$$

Powyższe równania opracowano na podstawie pomiarów przeprowadzonych w warunkach meteorologicznych scharakteryzowanych temperaturą powietrza $5-40^\circ\text{C}$, zachmurzeniem $0-100\%$, prędkością wiatru $0-8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i prężnością pary wodnej $8-29 \text{ hPa}$ oraz odnoszących się do człowieka



Ryc. 5.6. Porównanie strumieni ciepła wyznaczonych z użyciem metody pełnej (oś pozioma) i obliczonych sposobem uproszczonym (oś pionowa) ($n = 75$, $p = 0,05$)

Objaśnienia jak na ryc. 4.3 i 5.5

Comparison of heat fluxes calculated with the use of full method (x axis) and estimated by simplified method (y axis) ($n = 75$, $p = 0.05$)

Explanations at fig. 4.3 and 5.5

stojącego ($M = 70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), w odzieży o termoizolacyjności 1 clo. Stosowanie uproszczonego sposobu wyznaczania bilansu cieplnego człowieka jest więc ograniczone do podanych wyżej warunków.

Dokładność strumieni ciepła obliczonych za pomocą wzorów uproszczonych jest stosunkowo duża (ryc. 5.6). Określone dla danych niezależnych współczynniki korelacji pomiędzy wartościami strumieni wyznaczonymi metodą pełną i uproszczoną wynoszą 0,85-0,91. Błędy standardowe wahają się od 15% dla unoszenia i promieniowania długofalowego do 18% dla salda wymiany ciepła.

* * *

W dobie powszechnego dostępu do mikrokomputerów osobistych obliczenie poszczególnych składowych bilansu cieplnego człowieka jest stosunkowo proste. Przydatne są do tego programy obliczeniowe typu LOTUS, EXCEL czy QUATRO. Przykład organizacji płachty obliczeniowej zawiera Dodatek 2. Opracowano również specjalny program, napisany w języku TURBO-PASCAL 6.0, dostosowany do kompilowania na mikrokomputerach IBM/PC (zob. Dodatek 3). Dodatki 2 i 3 zawierają podstawową wersję modelu. Szczegółowy, pełny program – który jest nadal rozwijany i udoskonalany – można otrzymać po skontaktowaniu się z autorem.

5.2. ZASTOSOWANIA MODELU

5.2.1. ZASTOSOWANIE MODELU MENEX DO BIOTERMICZNEJ OCENY WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH

Możliwości modelu MENEX mogą być najpełniej wykorzystane do charakterystyki i oceny warunków biotermicznych w różnych sytuacjach środowiskowych wtedy, gdy dysponujemy pełnym zestawem danych wejściowych – meteorologicznych i fizjologicznych. Obliczone wówczas wartości poszczególnych strumieni wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem – jakie występują w warunkach niestacjonarnych – dają podstawę do pełnej charakterystyki i oceny gospodarki cieplnej organizmu w różnych warunkach meteorologicznych, przy różnej aktywności fizycznej i różnym rodzaju odzieży.

Przykładem takiego właśnie zastosowania modelu mogą być podrozdziały 4.4, 4.5 i 4.7 prezentowanego opracowania. Do dokonania oceny warunków biotermicznych, jakie panują w danych sytuacjach środowiskowych, mogą służyć: skala odczuwalności cieplnej (tab. 4.7) i klasyfikacja obciążeń cieplnych organizmu (tab. 4.12).

W sytuacji, gdy nie dysponujemy pomiarami temperatury skóry lub promieniowania słonecznego, można zastosować uproszczony sposób obliczania T_s i R , na podstawie wzorów (28)-(33). Należy jednakże pamiętać, że ta procedura ogranicza stosowalność modelu do człowieka siedzącego, stojącego w postawie relaksowej lub wykonującego minimalny wysiłek fizyczny w odzieży o termoizolacyjności od 0,5 do 1,5 clo.

Uzupełnieniem charakterystyki warunków biotermicznych jest określenie maksymalnie dopuszczalnego czasu przebywania człowieka w danym środowisku, przy istniejącym obciążeniu cieplnym organizmu. Wykorzystuje się w tym celu wzór (25).

Celem wielu badań bioklimatycznych jest ogólna ocena warunków przebywania człowieka na konkretnych obszarach czy też w określonych okresach. Większość istniejących dotychczas modeli bilansu cieplnego człowieka służy właśnie rozwiązaniu tego zagadnienia. Także model MENEX daje możliwość prowadzenia tego rodzaju badań.

Wykorzystuje się wówczas średnie wartości poszczególnych parametrów meteorologicznych dla okresu doby, dekady, miesiąca, sezonu czy też roku. Stosując tego rodzaju dane zakłada się występowanie stacjonarnych warunków wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, gdy saldo (S) równe jest zeru.

Zadaniem osoby badającej jest określenie czynnika równoważącego bilans cieplny człowieka. Zależnie od tego uzyskuje się różnego rodzaju wielkość wskaźnikową stosowaną w dalszej analizie warunków bioklimatycznych. Istnieją tutaj następujące możliwości:

- czynnikiem równoważącym – i jednocześnie wskaźnikiem oceny warunków bioklimatycznych – jest temperatura skóry; wartość metabolizmu i rodzaj odzieży mogą być ustalane dowolnie,

- czynnikiem równoważącym jest termoizolacyjność odzieży, która w danych warunkach meteorologicznych i przy założonej, stałej temperaturze skóry i określonej aktywności fizycznej zapewni komfort cieplny; jako T_s przyjmuje się najczęściej 33°C (niekiedy dla okresu zimowego 32°C , a dla pogody gorącej 35°C).

Można również jako wskaźnik oceny warunków bioklimatycznych traktować potencjalną zmianę zawartości ciepła w organizmie, zakładając stałą temperaturę skóry (najczęściej 33°C) i stałą – dowolnie przyjętą – termoizolacyjność odzieży i aktywność fizyczną.

Obliczenie poszczególnych strumieni bilansu cieplnego odbywa się na podstawie wzorów (10), (12)-(24) oraz (27). Mogą być też stosowane wzory uproszczone (31)-(33) do określenia pochłoniętego promieniowania słonecznego.

Wybierając opcję równoważenia się bilansu cieplnego należy pamiętać, że dobieranie wartości czynnika równoważącego, przy której saldo wymiany ciepła będzie najbliższe zeru, dokonuje się metodą kolejnych przybliżeń.

Do oceny warunków bioklimatycznych mogą być zastosowane skale odczuć cieplnych oparte na wartości temperatury skóry bilansującej wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem zamieszczone w tabeli 3.4. Na podstawie wzmianek o odczuciach cieplnych człowieka, podawanych w niektórych opracowaniach fizjologicznych (Hanawa i in. 1985; Nielsen R., Endrusick 1990a), oraz wyników własnych badań temperatury skóry w różnych sytuacjach pogodowych (podrozdz. 4.4.1 i 4.4.3) wydaje się, że skala zaproponowana przez C. R. de Freitas jest bardziej zbliżona do termofizjologicznej rzeczywistości niż skala T. N. Liopo i G. V. Cicenکو.

Do oceny warunków bioklimatycznych na podstawie wskaźnikowej, potencjalnej zmiany zawartości ciepła w organizmie można zastosować jedną ze skal zamieszczonych w tabeli 3.1. Ocena warunków bioklimatycznych na podstawie wartości I_{cl} równoważącej bilans cieplny człowieka i zapewniającej komfort cieplny może być dokonana z zastosowaniem skali zaproponowanej przez B. Krawczyk (1992).

Podczas pracy na wolnym powietrzu istotne jest określenie, jaki rodzaj odzieży roboczej i ochronnej zapewni człowiekowi optymalne biotermiczne warunki pracy. Podstawowymi miarami komfortu cieplnego są: temperatura powierzchni ciała, która winna wynosić 32-33°C, oraz niewielkie saldo wymiany ciepła (od -20 do +20 W·m⁻²).

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji biotermicznych warunków pracy w terenie otwartym sprowadza się więc praktycznie do określenia, w jakim rodzaju odzieży możliwe będzie zapewnienie równowagi termicznej ustroju i komfortu cieplnego w danej sytuacji meteorologicznej i przy określonym obciążeniu pracą.

Do wyznaczenia pożądanej termoizolacyjności odzieży stosuje się wzory: (10), (12)-(24) i (27). W przypadku braku pomiarów promieniowania słonecznego można wykorzystać do obliczenia R wzory (31)-(33). Doboru odpowiedniego I_{cl} dokonuje się metodą kolejnych przybliżeń. Wartość metabolizmu jest ustalana zgodnie z normą ISO 8996 (tab. 2.2). Należy pamiętać, że w przypadku pracy wiążącej się z ruchem człowieka konieczne jest uwzględnienie względnego wzrostu ruchu powietrza wokół ciała (v' – tab. 5.2).

Tabela 5.2. Względny ruch powietrza wokół ciała przy różnej prędkości poruszania się człowieka (wg Fangera, 1974)

Relative air motion with different human activity (by Fanger 1974)

| Ruch człowieka (prędkość w km·h ⁻¹) | | Względny ruch powietrza (m·s ⁻¹) |
|---|-----|--|
| Marsz w terenie równym lub z góry | | |
| | 3,2 | 0,9 |
| | 4,0 | 1,1 |
| | 4,8 | 1,3 |
| | 5,6 | 1,6 |
| | 6,4 | 1,8 |
| | 8,0 | 2,2 |
| Marsz pod górę przy różnym nachyleniu terenu | | |
| 5% | 1,6 | 0,6 |
| | 3,2 | 0,9 |
| | 4,8 | 1,3 |
| 15% | 6,4 | 1,8 |
| | 1,6 | 0,4 |
| | 3,2 | 0,9 |
| 25% | 4,8 | 1,3 |
| | 1,6 | 0,4 |
| | 3,2 | 0,9 |

Możliwe jest również określenie, jakiego rodzaju modyfikacje parametrów meteorologicznych (zwiększony ruch powietrza, zastosowanie osłon przeciw-słonecznych itp.) pozwolą na zmniejszenie obciążeń cieplnych podczas pracy w określonej odzieży.

Model MENEX pozwala również na określenie, jak długo człowiek może pracować z danym obciążeniem w sytuacji, gdy saldo wymiany ciepła nie da się

zminimalizować. Jest to szczególnie przydatne wtedy, gdy nie istnieje możliwość regulacji wymiany ciepła przez zmianę odzieży.

5.2.4. ZASTOSOWANIE MODELU MENEX DO PROGNOZOWANIA WARUNKÓW BIOTERMICZNYCH

Dla dobrego samopoczucia człowieka ważne jest zachowanie równowagi cieplnej organizmu. Jednak wiele chorób infekcyjnych lub zwykłych przeziębień jest wynikiem nieprzygotowania się ludzi do warunków pogodowych panujących danego dnia. Podawane w prognozach meteorologicznych informacje o pojedynczych elementach pogody nie są wystarczającą wskazówką do oceny warunków biotermicznych, jakie mogą panować w ciągu dnia.

Model MENEX daje propozycję uzupełnienia prognoz pogody o charakterystykę i ocenę warunków biotermicznych. Prognoza taka zawiera następujące elementy:

- określenie rodzaju odzieży optymalnej dla zapewnienia komfortu cieplnego podczas przebywania w różnych sytuacjach środowiskowych,
- określenie obciążenia cieplnego organizmu w różnych porach dnia, przy używaniu odzieży o danej termoizolacyjności (0,5, 1,0, 1,5 lub 2,0 clo) oraz przy bardzo małej i małej aktywności fizycznej ($M = 70$ i $116 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

W obu przypadkach charakterystyki te mogą być określone dla osób przebywających w miejscach nasłonecznionych lub zacienionych oraz wietrznych i osłoniętych od wiatru.

Do sformułowania prognozy biotermicznej niezbędne są informacje o przewidywanej w różnych porach dnia temperaturze i wilgotności powietrza, prędkości wiatru, wielkości i rodzaju zachmurzenia oraz o ciśnieniu atmosferycznym.

Obliczenie pożądanej termoizolacyjności odzieży i wartości salda wymiany ciepła odbywa się z zastosowaniem wzorów (12)-(24) oraz (27). Ilość promieniowania słonecznego docierającego do człowieka (R) określa się za pomocą wzorów szacunkowych (31)-(33), przy czym dla miejsc zacienionych stosuje się odpowiednie współczynniki korekcyjne: 0,35 — dla wzoru (31), 0,58 — dla wzoru (32) i 0,83 — dla wzoru (33).

Szacując temperaturę skóry przyjmuje się założenie, że nie różni się ona istotnie u człowieka stojącego i u wykazującego małą aktywność fizyczną (Fanger 1974) w wypadku używania odzieży o termoizolacyjności od 0,5 do 1,5 clo (por. wyniki prezentowane w podrozdz. 4.7). Do wyznaczenia T_s stosuje się wzory (28)-(30). Dla człowieka przebywającego w cieniu wartość T_s , wyliczona według wzorów (29) i (30), należy pomnożyć przez współczynnik korekcyjny 0,96.

Określając bilans cieplny człowieka w miejscach osłoniętych od wiatru przyjmuje się prędkość ruchu powietrza równą $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Do określenia pożądanej termoizolacyjności odzieży przyjmuje się stałą temperaturę ciała, równą 33°C , a dobór I_{cl} , przy którym bilans cieplny człowieka równoważy się, odbywa się metodą kolejnych przybliżeń.

Tabela 5.3 zawiera wartości poszczególnych parametrów wskaźnikowych (R , S , I_{cl}) i dominujący strumień ciepła, określone dla różnych warunków środowiskowych (miejsce nasłonecznione i zacienione, wietrzne i osłonięte od wiatru). Ustalono je dla następujących, przewidywanych warunków pogodowych:

Tabela 5.3. Podstawowe charakterystyki wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, które posłużyły do sformułowania przykładowej prognozy warunków biotermicznych
Essential characteristics of man-environment heat exchange used with example of forecasting of thermal conditions

| Parametry wymiany ciepła | Miejsce przebywania człowieka | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-----|---------|-----|----------|-----|---------|-----|
| | naświetlone | | | | zacięte | | | |
| | wietrzne | | zacięte | | wietrzne | | zacięte | |
| | metabolizm ($W \cdot m^{-2}$) | | | | | | | |
| | 70 | 116 | 70 | 116 | 70 | 116 | 70 | 116 |
| Godziny poranne | | | | | | | | |
| Promieniowanie pochłonięte ($W \cdot m^{-2}$) | 25 | 25 | 29 | 29 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| Saldo wymiany ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | -24 | 2 | -14 | 12 | -31 | -4 | -24 | 3 |
| Dominujący strumień ciepła | C | C | C/L | C/L | C | C | C/L | C/L |
| Termoizolacyjność odzieży (clo) | 2,5 | 1,7 | 2,3 | 1,4 | 2,9 | 1,9 | 2,8 | 1,8 |
| Godziny okołopołudniowe | | | | | | | | |
| Promieniowanie pochłonięte ($W \cdot m^{-2}$) | 32 | 32 | 50 | 50 | 11 | 11 | 18 | 18 |
| Saldo wymiany ciepła ($W \cdot m^{-2}$) | -3 | 24 | 28 | 54 | 1 | 27 | 15 | 42 |
| Dominujący strumień ciepła | E | E | E | E | C | E | C/E | E |
| Termoizolacyjność odzieży (clo) | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 0,9 | 1,0 | 0,8 |

Zapis C/L i C/E oznacza wyrównane proporcje tych dwu strumieni ciepła.

- temperatura powietrza $10^{\circ}C$ rano i $23^{\circ}C$ w ciągu dnia,
- prężność pary wodnej odpowiednio 10 i 15 hPa,
- wilgotność względna powietrza odpowiednio 80 i 50%,
- prędkość wiatru odpowiednio 1 i $3 m \cdot s^{-1}$,
- zachmurzenie (chmury Cumulus) odpowiednio 30 i 60%.

Prognoza biotermiczna dla tych właśnie warunków może mieć następującą postać: „W dniu jutrzejszym należy się liczyć ze znacznymi wahaniami warunków biotermicznych. Rano, u osób ubranych w odzież lekką, może występować uczucie zimna i wychładzanie organizmu; dla zapewnienia komfortu cieplnego niezbędna jest wtedy odzież jesienna (płaszcz, kurtka lub gruby sweter). W ciągu dnia wystarczy zwykła odzież „biurowa”, a w miejscach osłoniętych od wiatru – nawet odzież lekka. W miejscach tych należy unikać wysiłku fizycznego, ponieważ wymiana ciepła z otoczeniem może być tam zaburzona, prowadząc do przegrzewania się organizmu i wystąpienia uczucia gorąca”.

52.5. ZASTOSOWANIE MODELU MENEX
DO CHARAKTERYSTYKI ZRÓZNICOWANIA PRZESTRZENNEGO WARUNKÓW BIOTERMICZNYCH

Badania przestrzennego zróżnicowania warunków klimatycznych, w skali lokalnej są ważne dla tych dziedzin życia człowieka, które wiążą się z przebywaniem poza zabudowaniami.

Jak już stwierdzono w podrozdziałach 3.3 i 4.6, wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem kształtuje się odmiennie w różnych typach środowiska geograficznego. Do charakterystyki tego zróżnicowania i przedstawienia go na mapach można stosować klasyfikację warunków biotermicznych zamieszczoną w podrozdziale 4.8.

Obliczanie poszczególnych strumieni ciepła odbywa się sposobem uproszczonym, opartym na danych dotyczących temperatury powietrza i prędkości wiatru (wzory (34)-(45)). Chodzi bowiem o to, aby badania przestrzenne były oparte na możliwie gęstej sieci punktów pomiarowych, reprezentujących różne środowiska, a stosunkowo łatwe jest uzyskanie danych o rozkładzie temperatury w przygruntowej warstwie powietrza.

Można w tym celu wykorzystać pomiary temperatury maksymalnej powietrza lub też lotnicze czy satelitarne zdjęcia termalne. Dysponując takimi danymi można, zgodnie z metodami klasycznej topoklimatologii (Paszyński 1980, 1983), wykonać roboczą mapę odchyień temperatury powietrza od środowiska, które przyjmujemy jako punkt odniesienia (Skoczek i in., 1991).

Roboczą mapę względnych prędkości wiatru (także w stosunku do punktu odniesienia) możemy przygotować na podstawie klasyfikacji E. N. Romanovej (Kozłowska-Szczęsna (red.) 1985; tab. 5.4, 5.5).

Tabela 5.4. Względne prędkości wiatru (K_w) w różnych typach rzeźby terenu, w stosunku do rozległego, płaskiego obszaru wyniesionego (wg Kozłowskiej-Szczęsnej, red., 1985)

Relative wind speed (K_w) in different types of orography, in relation to the upland, open area (by Kozłowska-Szczęsna, ed., 1985)

| Forma rzeźby terenu | K_w |
|--|-------|
| 1 | 2 |
| Odkryte wzniesienia | |
| różnica wzniesień do podnóża > 50 m | 1,45 |
| różnica wzniesień do podnóża < 50 m | 1,35 |
| Stoki dowietrzne o nachyleniu > 3° | |
| część górna | 1,25 |
| część środkowa | 1,05 |
| część dolna | 1,00 |
| Stoki równoległe do wiatru o nachyleniu > 3° | |
| część górna | 1,15 |
| część środkowa | 0,95 |
| część dolna | 0,85 |
| Stoki odwietrzne o nachyleniu > 3° | |
| część górna | 0,85 |
| część środkowa | 0,85 |
| część dolna | 0,75 |
| Wierzchołki, górne części dowietrznych i odwietrznych zboczy o nachyleniu 1-3° | 1,30 |
| Środkowe i dolne części dowietrznych i równoległych do wiatru zboczy o nachyleniu > 4° | 1,15 |

| 1 | 2 |
|--|------|
| Środkowe i dolne części odwieznych zboczy o nachyleniu $> 3^\circ$ | 0,80 |
| Doliny, parowy i wąwozy | |
| dna i dolne części zboczy | |
| równoległych do wiatru | 1,15 |
| prostopadłych do wiatru | 0,75 |
| zamkniętych | 0,55 |
| środkowe i górne części zboczy | |
| równoległych do wiatru | 1,25 |
| prostopadłych do wiatru | 0,85 |
| zamkniętych | 0,55 |

Tabela 5.5. Współczynniki zmiany prędkości wiatru (β) w różnych typach lasu
(wg Kozłowskiej-Szczęsnej, red., 1985)
Coefficients of the change of wind speed (β) into different types of forests
(by Kozłowska-Szczęsna, ed., 1985)

| Charakterystyka zbiorowiska leśnego | β |
|---|---------|
| Las mieszany lub liściasty o wysokości drzew 6-10 m | 0,02890 |
| Las iglasty, bardzo gęsty, z niższym piętrzem drzew i poszyciem | 0,02275 |
| Las mieszany lub liściasty o wysokości drzew > 10 m | 0,02112 |
| Las iglasty, dość gęsty o wysokości drzew 10-15 m | 0,02012 |
| Las iglasty o mniejszej niż wyżej gęstości | 0,01147 |
| Las sosnowy, bardzo rzadki, bez niższego piętra drzew i poszycia o wysokości drzew około 20 m | 0,00971 |
| Las pozbawiony liści, z niższym piętrzem drzew i poszyciem | 0,00790 |
| Las pozbawiony liści, z bardzo rzadkim niższym piętrzem drzew i poszyciem | 0,00725 |
| Rzadki, wysoki las iglasty bez poszycia i niższego piętra drzew | 0,00725 |

Prędkość wiatru w obrębie lasu (v_1) liczy się według wzoru: $v_1 = v \cdot e^{-\beta x}$, gdzie β – współczynnik zmiany prędkości wiatru, x – odległość od brzegu lasu.

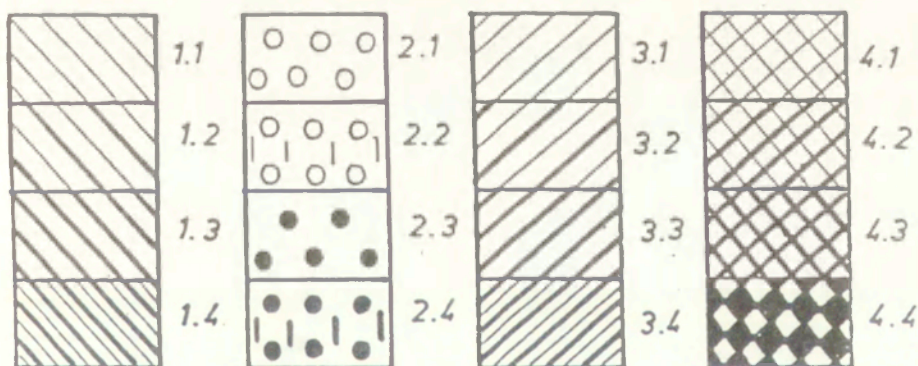
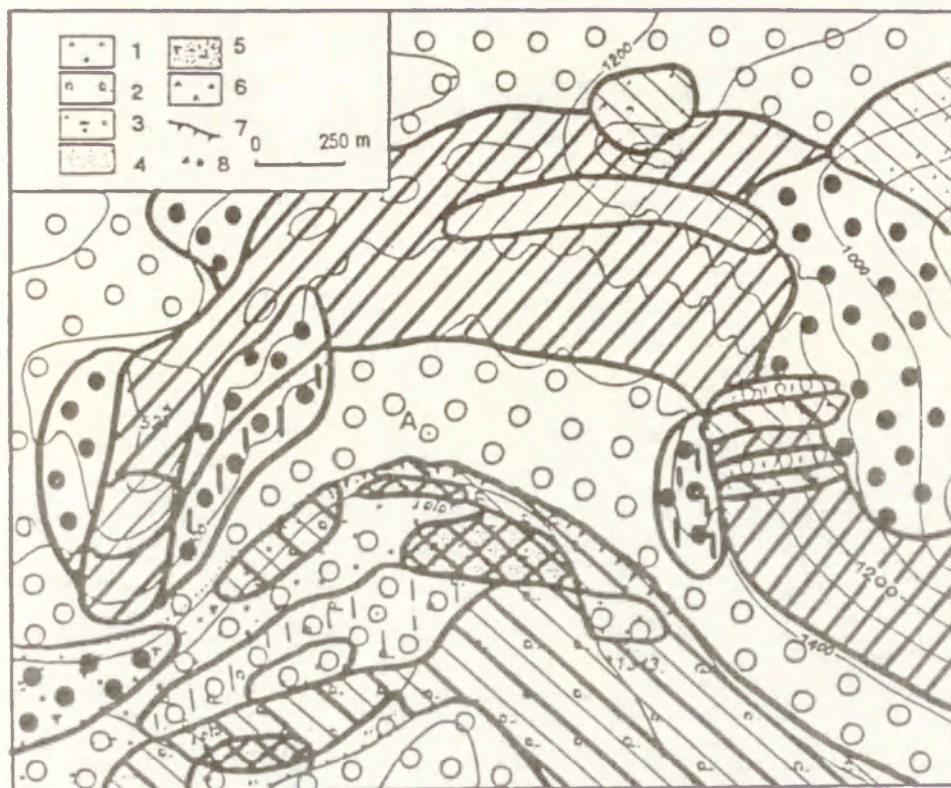
Przyjmując dla punktu odniesienia temperaturę powietrza równą 21, 23, 25 i 27°C oraz prędkość wiatru $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, określamy przewidywane wartości tych elementów meteorologicznych w pozostałych typach środowiska. Do obliczenia strumieni bilansu cieplnego człowieka korzystamy z wzorów:

- (34)-(41) dla terenów otwartych,
- (42)-(45) dla terenów zalesionych.

Strumień strat ciepła na oddychanie (Res) ma nieznaczną wartość w szerokim zakresie warunków termiczno-wilgotnościowych, a jego udział w ogólnej wymianie ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem wynosi jedynie 5-8%. W toku przeprowadzonych badań nie stwierdzono prawie żadnego zróżnicowania respiracyjnych strat ciepła w różnych typach środowiska geograficznego. Wydaje się zatem, że w badaniach biotopoklimatycznych można zrezygnować z jego wyznaczania.

Dopływ promieniowania słonecznego do organizmu, podczas pogody o zachmurzeniu $\leq 60\%$, można oszacować przyjmując następujące wartości R:

- $< 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ dla wnętrza lasów i terenów zadrzewionych,
- $> 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ dla terenów zabudowanych oraz o albedo podłoża większym od 25%,

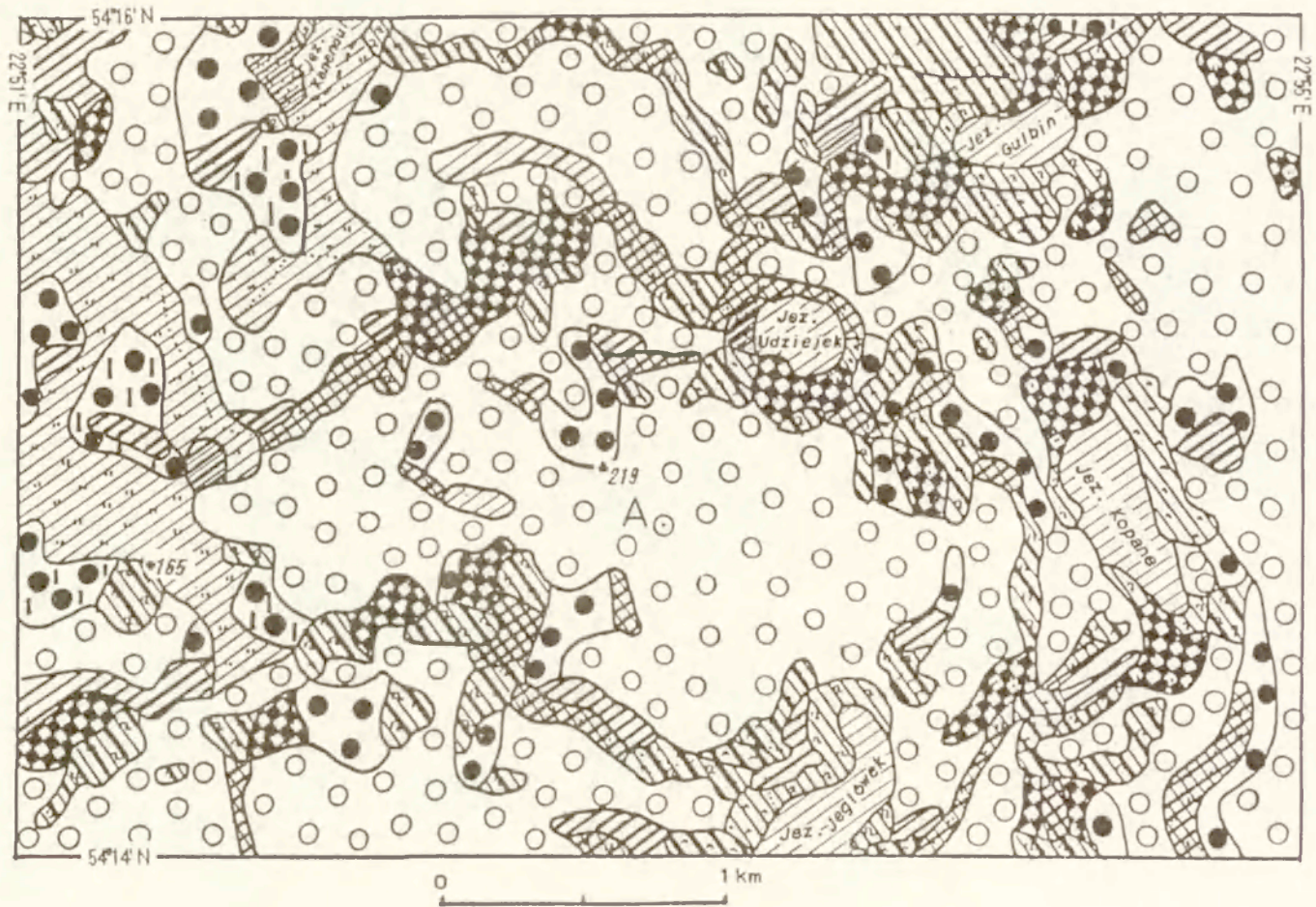


Ryc. 5.7. Mapa biotopoklimatów fragmentu doliny Toły (gory Chentey, Mongolia)

1 – wilgotne łąki, 2 – wilgotne lasy liściaste, 3 – suche łąki, 4 – luźne piaski i żwirny, 5 – żwirowiska porośnięte krzewami, 6 – lasy iglaste, 7 – skarpy, 8 – punkty wysokościowe, A – bazowe stanowisko pomiarowe (punkt odniesienia). Warunki biotermiczne: 1.1-1.4 – oszczędzające, 2.1-2.4 – lekko obciążające, 3.1-3.4 – obciążające, 4.1-4.4 – silnie obciążające (druga cyfra symbolu oznacza typ wymiany ciepła, odpowiednio: 1 – konwekcyjny, 2 – radiacyjny, 3 – ewaporacyjny, 4 – mieszany)

Map of biotopoclimates of Tola valley (Khentey mountains, Mongolia)

1 – wet meadows, 2 – deciduous forests, 3 – dry meadows, 4 – sand and gravel plains, 5 – gravel plain with bushes, 6 – coniferous forests, 7 – escarpments, 8 – height gauges, A – main measurement post. Thermal conditions: 1.1-1.4 – mild, 2.1-2.4 – slightly loaded, 3.1-3.4 – loaded, 4.1-4.4 – strongly loaded (the second numeric character of symbol defines type of heat exchange, respectively: 1 – convective, 2 – radiative, 3 – evaporative, 4 – mixed)



Ryc. 5.8. Mapa biotopoklimatów fragmentu Pojezierza Suwalskiego (objaśnienia jak na ryc. 5.7)
 Map of biotopoclimates of Suwałki Lakeland region (North-East Poland) (explanations at fig. 5.7)

– 15-30 W · m⁻² dla pozostałych typów środowiska.

Przykładem zastosowania modelu MENEX w badaniach klimatu lokalnego mogą być mapy biotopoklimatyczne odcinka górskiej doliny rzeki Toła w centralnej Mongolii oraz fragmentu Pojezierza Suwalskiego w północno-wschodniej Polsce (ryc. 5.7 i 5.8).

Do wykonania mapy biotopoklimatów doliny Toły w górach Chentey w centralnej Mongolii wykorzystano uogólnione, publikowane wyniki pomiarów temperatury maksymalnej powietrza prowadzone w rejonie Cagan Arał i Bajan Bułag (Skoczek i in. 1991, Błażejczyk i in. 1992). Mapa Pojezierza Suwalskiego opiera się na wynikach pomiarów topoklimatycznych prowadzonych na tym obszarze w różnych typach środowiska geograficznego (Błażejczyk, Grzybowski 1993a, b). Na obu mapach określono odchylenia temperatury maksymalnej powietrza i prędkości wiatru, notowanych w różnych formach rzeźby i zagospodarowania terenu, od obserwowanej w punktach bazowych (wysoki taras nadzalewowy w dolinie Toły i wysoczyzna morenowa na Pojezierzu Suwalskim). Następnie za pomocą wzorów uproszczonych obliczono wartość strumieni i saldo wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w różnych zakresach temperatury powietrza.

Porównując obie mapy widać, że w rejonie Cagan Arał przeważają rozległe jednostki biotopoklimatyczne o jednorodnych cechach bilansu cieplnego człowieka. Na obszarze Pojezierza Suwalskiego wielkość poszczególnych jednostek jest natomiast znacznie mniejsza i obserwuje się duże ich rozdrobnienie. Jest to spowodowane różnym charakterem rzeźby terenu i jego zagospodarowania przestrzennego; w górach Mongolii dominują rozległe partie zboczy o jednorodnej szacie roślinnej, a w krajobrazie pojeziernym północno-wschodniej Polski występują niewielkie formy terenu o bardzo urozmaiconej roślinności. Wydaje się zatem, że wykonane mapy biotopoklimatyczne dobrze ilustrują przestrzenne zróżnicowanie warunków biotermicznych, nawiązujące do lokalnego zróżnicowania środowiska geograficznego.

W celu sprawdzenia, czy proponowana metoda wydzielenia biotopoklimatów jest zgodna z wynikami badań szczegółowych, porównano, do jakich grup i typów warunków biotermicznych zakwalifikowano stanowiska, dla których bilans cieplny człowieka określono metodą pełną i sposobem uproszczonym. Okazało się, że w każdym wypadku stanowisko było zaliczane do tej samej grupy i tego samego typu warunków biotermicznych. Można zatem stwierdzić, że pomimo pewnych uproszczeń, zaproponowany sposób klasyfikacji typów środowiska geograficznego może być przydatny do szerokiego stosowania w badaniach biotopoklimatycznych, zwłaszcza gdy chodzi o zbadanie względnych różnic biotermicznych na danym obszarze.

6. PODSUMOWANIE

Wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem jest jednym z podstawowych procesów warunkujących prawidłowe funkcjonowanie organizmu. Na intensywność tego procesu wpływają zarówno czynniki wewnątrzustrojowe (metabolizm, przepływ krwi obwodowej, wydzielanie potu), jak i atmosferyczne (promieniowanie słoneczne i długofalowe, temperatura, wilgotność i ruch powietrza). Procesy fizjologiczne dążą przy tym do ustalenia wymiany ciepła na poziomie zapewniającym równowagę cieplną organizmu.

Prezentowana praca zawiera wyniki badań fizjoklimatycznych – przeprowadzonych w terenie otwartym – w różnych warunkach pogodowych i strefach klimatycznych oraz w różnych, lokalnych typach środowiska geograficznego. Mierzono w nich zarówno parametry meteorologiczne, jak i temperaturę skóry obserwatorów. Celem badań było określenie bilansu cieplnego i obciążeń termicznych człowieka przebywającego w odmiennych warunkach środowiskowych. Badaniami objęto różne sytuacje meteorologiczne: od pogody zimnej (z temperaturą powietrza 5-15°C, silnym wiatrem i pełnym zachmurzeniem) do upalnej (z temperaturą powietrza > 35°C, bezchmurnej i bezwietrznej).

Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem – przebywającym w terenie otwartym – a otoczeniem jest wyraźnie kształtowana przez różne elementy środowiska geograficznego: warunki pogodowe i topoklimatyczne. Podlega ona również wpływom czynników makroklimatycznych (regionalne zróżnicowanie dopływu promieniowania słonecznego, przezroczystości atmosfery i wilgotności przygruntowej warstwy powietrza). Jest ona również modyfikowana przez rodzaj odzieży noszonej w różnych warunkach pogodowych i klimatycznych.

1. Stwierdzono, że w warunkach termoneutralnych (to znaczy przy $T_a = 18-28^\circ\text{C}$) nie występowały problemy z zachowaniem przez organizm równowagi cieplnej. W sytuacjach skrajnych zrównoważenie się wymiany ciepła było trudne – lub wręcz niemożliwe – bez zastosowania dodatkowych zabezpieczeń przed nadmiernym odpływem lub dopływem ciepła do organizmu.

Na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem w odmiennych strefach klimatycznych wpływały specyficzne cechy środowiska geograficznego badanych obszarów. Największe różnice regionalne obserwowano przy dopływie do organizmu promieniowania słonecznego. W porównaniu z klimatem umiarkowanie ciepłym środkowej Europy był on mniejszy w klimacie podzwrotnikowym (na skutek dużego zapylenia powietrza nad pustynią Ka-

ra-Kum), natomiast większy w klimacie kontynentalnym środkowej Azji (jako wynik dużej czystości powietrza w tej części kontynentu) oraz w klimacie zwrotnikowym (na skutek dużego natężenia promieniowania słonecznego oraz małej termoizolacyjności noszonej w Wietnamie odzieży). Ilość ciepła traconego przez parowanie potu z powierzchni ciała była największa w klimatach odznaczających się niską wilgotnością powietrza.

2. Analizując zróżnicowanie wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, jakie występuje w skali lokalnej, zaobserwowano, że jest ono największe podczas pogody z małym i umiarkowanym zachmurzeniem ($N \leq 60\%$) oraz z temperaturą powietrza $18-28^{\circ}\text{C}$ i prędkością wiatru $1-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ogólnie można stwierdzić, że największe obciążenia cieplne organizmu obserwuje się w niewielkich przestrzennie i głębokich, wklęsłych formach rzeźby terenu oraz w obrębie zabudowy miejskiej. Najłagodniejsze warunki biotermiczne występują w lasach i parkach; w niskiej temperaturze powietrza mogą tam jednak, częściej niż na innych terenach, pojawiać się odczucia cieplne „zimno”.

3. Używanie odzieży o różnej termoizolacyjności wyraźnie modyfikuje wymianę ciepła pomiędzy organizmem a otoczeniem. O ile temperatura skóry różni się nieznacznie w wypadku odzieży o izolacyjności 0,5, 1,0 i 1,5 clo, o tyle obserwuje się zasadnicze różnice wartości poszczególnych strumieni ciepła i salda jego wymiany.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały ponadto, że na ilość pochłoniętego promieniowania słonecznego wpływa nie tylko jego natężenie i wysokość Słońca, ale również izolacyjność termiczna i kolor noszonej odzieży. Różnica albedo tkanin sprawia, że przez odzież białą do powierzchni ciała dociera jedynie 20-30% promieniowania, jakie jest pochłaniane przez człowieka nie ubranego. W odniesieniu do odzieży czarnej ilość ta sięga 150-200%. Zakres obserwowanych zmian jest więc bardzo duży. Wskazuje to wyraźnie, że przez zmianę barwy noszonej odzieży można regulować dopływ promieniowania słonecznego do organizmu i obciążenia cieplne człowieka przebywającego w terenie otwartym.

4. Badania ankietowe dotyczące odczuć cieplnych przeprowadzone wśród obserwatorów wykonujących pomiary fizjoklimatyczne pozwoliły na opracowanie nowych skal odczuwalności cieplnej człowieka. Miarą odczuć cieplnych może być temperatura skóry i zmiany zawartości ciepła w organizmie. Odczucia cieplne obserwatorów zmieniały się od „zimno”, przy $T_s < 27^{\circ}\text{C}$ i $S < -15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ do „bardzo gorąco” przy $T_s > 33,5^{\circ}\text{C}$ i $S > 55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Komfort cieplny występował wtedy, gdy temperatura skóry wynosiła $28,2-30,2^{\circ}\text{C}$, a saldo wymiany ciepła wahało się od -5 do $+15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

* * *

Wyniki badań laboratoryjnych i terenowych pozwoliły na zaproponowanie nowego kompleksowego modelu wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem (MENEX). Jest on dostosowany do badań bilansu cieplnego w warunkach niestacjonarnych (przy chwilowych wahaniami parametrów meteorologicznych i fizjologicznych) i stacjonarnych (dla uśrednionych wartości czynników meteorologicznych i fizjologicznych).

Model MENEX może mieć zastosowanie w badaniu obciążeń cieplnych organizmu w różnych warunkach pogodowych, w różnych rodzajach środowiska geograficznego oraz przy różnym wysiłku fizycznym. Może być także wykorzystywany do opracowywania prognoz biotermicznych oraz ogólnej oceny bioklimatycznej różnych regionów lub okresów.

Na zakończenie należy jeszcze raz podkreślić, że badania wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem oraz związanych z tym obciążeń i odczuć cieplnych są najpełniejszym sposobem analizy wpływu warunków środowiskowych na organizm. Powinno się zatem postulować coraz szersze stosowanie tej metody w badaniach bioklimatycznych do charakterystyki i oceny warunków życia i pracy człowieka. Zaproponowany w opracowaniu model MENEX może być pomocą w tym zakresie.

LITERATURA

- Abdumalikov T. I., 1974, *Bioklimatičeskaja ocenka nekotoryh landsaftov srednej Azji*, Trudy SARNIGMI, 20, 76-80.
- Adams T., Covino B. G., 1958, *Racial variations to a standarized cold stress*, J. Appl. Physiol., 12, 1, 9-12.
- Ajzenštat B. A., 1973, *Bioklimatičeskij atlas srednej Azji*, Gidrometeoizdat, Moskwa.
- 1974, *Metod opredelenija termoizolacionnyh svojstv odeždy obespecivajuscih sostojanie teplovogo komforta*, Trudy SARNIGMI, 20, 17-26.
- 1986, *Health and the heat balance of the human body*, [w:] *Climate and human health*, Proc. Symp. Leningrad, 1, 170-181.
- Ajzenštat B. A., Denisov J. M., Karpaceva O. F., 1974, *Matematičeskaja model' termo-regulacii celoveka pri stacionarnykh uslovijah v zavisimosti ot meteorologičeskikh faktorov*, Trudy SARNIGMI, 20, 3-16.
- Aschoff J., Biebach H., Heise A., Schmidt T., 1974, *Day-night variation in heat balance*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, Londyn, 147-173.
- Auliciems A., Freitas C. R., de, 1976, *Cold stress in Canada. A human climate classification*, Int. J. Biomet., 20, 4, 287-294.
- Beaumont W., van, Bullard R. W., 1965, *Sweating: Direct influence of skin temperature*, Science, 147, 3664, 1465-1467.
- Beeson E. J. G., 1978, *The CSI lamp as a source of radiation for solar simulation*, Light. Res. Technol., 10, 3, 164-166.
- Behling K., Bleichert A., Kitzing J., Ninow S., Scarperi M., Scarperi S., 1971, *An analog model of thermoregulation during rest and exercise*, Int. J. Biomet., 15, 2-4, 212-216.
- Blanc J., le, 1975, *Man in the cold*, Ch. C. Thomas Publ., Springfield.
- Bligh J., Johnson G., 1973 *Glossary of terms for thermal physiology*, J. Appl. Physiol., 35, 6, 941-961.
- Błażejczyk K., 1984a, *Bioklimatyczna klasyfikacja klimatów lokalnych z zastosowaniem do badań uzdrowisk*, Czas. Geogr., 55, 4, 491-505.
- 1984b, *Podstawy bioklimatycznego kartowania uzdrowisk*, Probl. Uzdrow., 1/2, 128-136.
- 1984c, *Zróżnicowanie klimatu lokalnego zlewni Szczawnika (Beskid Sądecki)*, [w:] *Problematyka meteorologiczna i hydrologiczna małych zlewni rzecznych*, Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe, Wrocław, 19-23.
- 1985, *The method of biotopoclimatic mapping of mountains health resorts*, [w:] *12 International Conference on Carpathian Meteorology*, Beograd, Abstr., 39-40.
- 1987a, *Heat balance and physiological reactions of the human organism in selected weather types*, [w:] *13 International Conference on Carpathian Meteorology*, 2, Bușteni, Romania, Proc., 599-606.
- 1987b, *Bilans cieplny ciała człowieka w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych*, Probl. Uzdrow. 11/12, 25-35.
- 1988a, *Klimatyczno-fizjologiczna charakterystyka wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem w wybranych typach krajobrazu nizinnego*, Przegl. Geogr., 60, 3, 353-366.
- 1988b, *Zróżnicowanie biotopoklimatyczne Ciechocinka*, Probl. Uzdrow., 5/6, 49-61.
- 1988c, *Human skin temperature in different climatic zones*, [w:] *Symposium on Human Biometeorology*, Štrbske Pleso, High Tatras, Czechoslovakia, Proc., 30-39.
- 1990a, *Podstawy wydzielania biotopoklimatów w skali szczegółowej*, [w:] *Problemy współczesnej topoklimatologii*, Conf. Pap. IGiPZ PAN, 4, 166-174.

- 1990b, *Zróźnicowanie biotopoklimatyczne wybranych typów krajobrazu*, [w:] *Problemy współczesnej topoklimatologii*, Conf. Pap. IGiPZ PAN, 4, 175-187.
- 1990c, *Mapa biotopoklimatów województwa katowickiego*, [w:] T. Kozłowska-Szczęśna, *Zmiany klimatu województwa katowickiego pod wpływem działalności człowieka*, Prace i Stud. Ośr. Dokum. Fizjogr. PAN, 18, 343-368, zał. 2.
- 1991a, *Heat balance of the human body in different weather conditions in North-East Poland (the problem of thermal stress)*, Grana, 30, 277-280.
- 1991b, *Wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem w niektórych typach krajobrazu pojeziernego*, masz., arch. Zakł. Klimat IGiPZ PAN, Warszawa.
- 1991c, *Zróźnicowanie biotopoklimatyczne południowej części Wysoczyzny Ciechanowskiej*, Acta Univ. Wratisl., Prace Inst. Geogr., Ser. A, 5, 83-89.
- 1992, *Wpływ urbanizacji terenu na lokalne warunki bioklimatyczne (na przykładzie woj. katowickiego)*, Zesz. IGiPZ PAN, 6, 15-28.
- Błażejczyk K., Grzybowski J., 1993a, *Znaczenie klimatotwórcze małych powierzchni wodnych w krajobrazie pojeziernym Suwalskiego Parku Krajobrazowego*, Ekol. Pol. (w druku).
- 1993b, *Charakterystyka topoklimatów krajobrazu pojeziernego na przykładzie Suwalskiego Parku Krajobrazowego*, Zesz. Inst. Ekol. PAN, (w druku).
- Błażejczyk K., Krawczyk B., 1991, *Influence of climatic conditions on the heat balance of the human body*, Int. J. Biomet., 35, 103-106.
- Błażejczyk K., Krawczyk B., Skoczek J., 1992, *Badania topoklimatyczne i mikroklimatyczne w różnych strefach klimatycznych*, Zesz. IGiPZ PAN, 5.
- Błażejczyk K., Nilsson H., Holmer I., 1993, *Solar heat load on man (review of different methods of estimation)*, Int. J. Biomet., (w druku).
- Breckenridge J. R., Goldman R. F., 1971, *Solar heat load in man*, J. Appl. Physiol., 31, 5, 659-663.
- 1977, *Effect of clothing on bodily resistance against meteorological stimuli*, [w:] S. W. Tromp (red.), *Progress in human biometeorology*, II, 194-208.
- Brobeck J. R., 1965, *Exchange, control and regulation*, [w:] W. S. Yamamoto (red.), *Physiological controls and regulations*, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 1-13.
- Brown R. D., Gillespie T. J., 1986, *Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model*, Int. J. Biomet., 30, 1, 43-52.
- Brumštejn V. I., 1950, *Poteri vlagi celovekom v pokoje pri različnoj temperature vozduha*, Gig. i Sanit., 15, 12, 12-18.
- Budyko M. I., 1959, *O teplovom balansie żyvych organizmov*, Izv. AN SSSR, Ser. geogr., 2, 29-35.
- 1971, *Klimat i žizn*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Budyko M. I., Cicenko G. V., 1960, *Klimatičeskie faktory teploščuščeniija čeloveka*, Izv. AN SSSR, Ser. geogr., 3, 3-11.
- Burt J. E., O'Rourke P. A., Terjung W. H., 1982a, *The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature*, Modeling considerations, Int. J. Biomet., 26, 1, 3-23.
- 1982b, *The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature. Man in an urban environment*, Int. J. Biomet., 26, 1, 25-35.
- 1982c, *The relative influence of selected cloud types and amounts on human energy budgets and skin temperature*, Int. J. Biomet., 26, 2, 99-114.
- Cabanac M., 1980, *Physiological signals for thermal comfort*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*. Wrocław Techn. Univ. Press-Elsevier, Amsterdam, 181-193.
- Cena K., 1974, *Radiative heat loss from animals and man*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount, (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, London, 33-58.
- Cicenko G. V., 1967, *Radiacionnyj balans poverhnosti tela celoveka v različnyh klimatičeskikh uslovijah na territorii SSSR*, Trudy GGO, 193, 122-129.
- Clark J. A., Cena K., 1976, *Solar and thermal radiative heat loads in the energy balance of man*, Int. Mech. Engin., 5, 3, 75-78.
- Clark J. A., Cena K., Monteith J. L., 1973, *Measurements of the local heat balance of animal coats and human clothing*, J. Appl. Physiol., 35, 5, 751-754.
- Clark J. A., McArthur A. J., Monteith J. L., Wheldon A. E., 1980, *The physics of the microclimate*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Wrocław Techn. Univ. Press-Elsevier, Amsterdam, 13-28.

- Clark R. P., 1980, *Human skin temperature and convective heat loss*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Wroclaw Techn. Univ. Press-Elsevier, Amsterdam, 57-78.
- Clark R. P., Edholm O. G., 1985, *Man and his thermal environment*, E. Arnold Publ., London.
- Clarke J. F., Bach W., 1971, *Comparison of the comfort conditions in different urban and suburban microenvironments*, Int. J. Biomet., 15, 1, 41-54.
- Consolazio C. F., Matoush le Roy O., Nelson R. A., Torres J. B., Isaac G. J., 1963, *Environmental temperature and energy expenditures*, J. Appl. Physiol., 18, 1, 65-68.
- Downey J. A., Huckaba C. E., Darling R. C., 1971, *The effect of skin and central cooling on human thermoregulation*, Int. J. Biomet., 15, 2-4, 171-175.
- Elizondo R. S., Bullard R. W., 1971, *Local determination of sweating and the assessment of the „Set point“*, Int. J. Biomet., 15, 2-4, 273-280.
- Elnas S., Holmer I., Olesen B. W. (red.), 1985, *Arbetsplatsens klimat. Matning och bedömning*, Arbete och Hals, 43.
- Fanger P. O., 1974, *Komfort cieplny*, Arkady, Warszawa.
- Folk G. E. Jr., 1980, *Climatic change and acclimatization*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Wroclaw Techn. Univ. Press-Elsevier, Amsterdam, 157-168.
- Freitas C. R., de, 1985, *Assessment of human bioclimate based on thermal response*, Int. J. Biomet., 29, 2, 97-119.
- 1990, *Recreation climate assessment*, Int. J. Clim., 10, 1, 89-103.
- Freitas C R., de, Ryken M. G. 1989, *Climate and physiological heat strain during exercise*, Int. J. Biomet., 33, 157-164.
- Garden J. W., Wilson I. D., Rasch P. J., 1966, *Acclimatization of healthy young adult males to a hot-wet environment*, J. Appl. Physiol., 21, 2, 665-669.
- Gavhed D., Holmer I., 1989a, *Protection against cold by winter clothing during moderate activity*, [w:] 3rd Scandinavian Symposium on Protective Clothing Against Chemicals and Other Health Risks (NOKOBETEF III), Gausdal, Norge, Proc., 137-140.
- 1989b, *Thermoregulatory responses of fireman to exercise in the heat*, Eur. J. Appl. Physiol, 59, 115-122.
- Givoni B., 1976, *Man, climate and architecture*, Applied Sci. Publ., London.
- Givoni B., Beldings H. S., 1965, *Effektivnost' ohlazdenija pri isparenii pota*, [w:] *Biometeorologija*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 198-206.
- Givoni B., Goldman R. F., 1973, *Predicting effects of heat acclimatization on heart rate and rectal temperature*, J. Appl. Physiol., 35, 6, 875-879.
- Goldman R. F., 1980, *Evaluating the effects of clothing on the wearer*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Wroclaw Techn. Univ. Press-Elsevier, Amsterdam, 41-56.
- 1988, *Standards for human exposure to heat*, [w:] I. B. Mekjavic, E. W. Banister, J. B. Morrison (red.), *Environmental ergonomics*, Taylor and Francis Publ., London, 99-129.
- Gregorczyk M., 1966, *Cieplny wpływ promieniowania słonecznego na człowieka*, Przegl. Geofiz., 11, 2, 119-128.
- Hammel H. T., 1965, *Neurons and temperature regulation*, [w:] W. S. Yamamoto (red.), *Physiological controls and regulations*, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 71-97.
- Hammer N., Koch E., Rudel E., 1986, *Die Beurteilung der thermischhygrischen Befindlichkeit des Menschen nach verschiedenen Methoden*, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 36, 3-4, 343-355.
- Hanawa K., Yorimoto A., Igawa S., Kita H., 1985, *Body temperature and thermal sensation during exercise under wind*, Int. J. Biomet., 29, 4, 373.
- Hardy J. D., 1965, *The „set-point“ concept in physiological temperature regulation*, [w:] W. S. Yamamoto (red.), *Physiological controls and regulations*, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 98-116.
- Hendler E., Crosbie R., Hardy J. D., 1958, *Measurement of heating of the skin during exposure to infrared radiation*, J. Appl. Physiol., 12, 2, 177-185.
- Henneman D. H., Bunker J. P., Brewster W. R., 1958, *Immediate metabolic response to hypothermia in man*, J. Appl. Physiol., 12, 2, 164-168.
- Hensel H., 1981, *Thermoreception and temperature regulation*, Acad. Press, London.
- Hey E. N., 1974, *Physiological control over body temperature*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, London, 77-95.

- Holmer I., 1988, *Assessment of cold stress in terms of required clothing insulation – IREQ*, Int. J. Ind. Ergon., 3, 159-166.
- 1989a, *Recent trends in clothing physiology*, Scand. J. Work. Envir. Health, 15, (suppl. 1), 58-65.
 - 1989b, *Evaporative heat exchange in clothing*, [w:] H. Tokura (red.), *Clothing comfort studies*, Jap. Res. Assoc. Textile, Osaka, 223-244.
 - 1989c, *Body cooling with ice for warm-water diving operations*, Undersea Biomed. Res., 16, 6, 471-479.
- Holmer I., Gavhed D., 1990, *Physiological determinants of thermoneutrality in cold*, [w:] *IV International Conference on Environmental Ergonomics*, Austin, USA, Proc., 38-40.
- Houdas Y., Ring E. F. J., 1982, *Human body temperature, its measurements and regulations*, Plenum Press, New York.
- Hoppe P., 1982, *Physikalische Prinzipien in der Biometeorologie*, Promet Met. Fortbild., 3/4, 4-9.
- 1984, *Die Energiebilanz des Menschen*, Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München, 49.
- Iampietro P. F., Bas D. E., Buskirk E. R., 1958, *Heat exchange of nude men in the cold: effect of humidity, temperature and wind speed*, J. Appl. Physiol., 12, 3, 351-356.
- Ingram D. L., Mount L. E., 1975, *Man and animals in hot environments*, Springer-Verlag, Berlin.
- ISO 7730, *Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, Int. Org. Stand., Genewa.
- ISO/DIS 7933, *Hot environments – analytical determination of thermal stress*, Int. Org. Stand., Genewa.
- ISO 8996, *Ergonomics – determination of metabolic heat production*, Int. Org. Stand., Genewa.
- ISO/DIS 9920, *Ergonomics of the thermal environment – estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of clothing assemblies*, Int. Org. Stand., Genewa.
- ISO/CD 11079, *Evaluation of cold environments. Determination of required clothing insulation*, Int. Org. Stand., Genewa.
- Jendritzky G., 1982, *Zum thermischen Wirkungskomplex des Menschen*, Promet Met. Fortbild., 3/4, 33-42.
- 1990, *Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten*, [w:] H. Schirmer (red.), *Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen*, Akad. f. Raumforschung u. Landesplanung, 114, Hannover, 7-69.
- Jendritzky G., Menz G., 1986, *Bioclimatic maps of heat exchange of the human being in different scales*, [w:] *Climate and human health*, Proc. Symp. Leningrad, 2, 107-114.
- Jendritzky G., Nübler W., 1981, *A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms*, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 29, 4, 313-326.
- Jendritzky G., Sievers U., 1986, *Numerical simulation of the thermal environment of the human being in street canyons*, [w:] *Climate and human health*, Proc. Symp. Leningrad, 2, 172-179.
- Jokl M. V., 1982, *Standard layers – a new criterion of the thermal insulation properties of clothing*, Int. J. Biomet., 26, 1, 37-48.
- Kaciuba-Uściłko M., 1990, *Termoregulacja*, [w:] A. Tkaczyk (red.), *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej*, PZWŁ, Warszawa.
- Kaleta Z., 1971, *Regulacja temperatury ciała*, [w:] *Fizjologia człowieka*, PZWŁ, Warszawa, 821-829.
- Kenney W. L., 1985, *A review of comparative responses of men and women to heat stress*, Envir. Res., 37, 1, 1-11.
- Klonowicz S., Kozłowski S., 1970, *Człowiek a środowisko termiczne*, PZWŁ, Warszawa.
- Koch E., Rudel E., 1988, *The human sensitivity on high mountains – a comparison between an energy balance model and the cooling power*, [w:] *Symposium on Human Biometeorology*, Štrbske Pleso, High Tatras, Czechoslovakia, Proc., 193-201.
- Kozłowska-Szczęśna T. (red.), 1985, *Metody badań bioklimatu człowieka*, Probl. Uzdrow., 1/2.
- Kozłowska-Szczęśna T., 1987a, *Typy bioklimatu Polski*, Probl. Uzdrow., 5/6, 37-47.
- 1987b, *Types of bioclimate in Poland*, Geogr. Pol., 53, 135-140.
- Kozłowski S., 1986, *Granice przystosowania*, WP, Warszawa.
- Krawczyk B., 1977, *Temperatura skóry człowieka jako wskaźnik bioklimatyczny*, [w:] T. Kozłowska-Szczęśna (red.), *Problemy bioklimatologii uzdrowskiej, cz. II*, Dokum. Geogr., 4, 69-77.
- 1978, *Próba zastosowania metody bilansu cieplnego ciała człowieka do oceny bioklimatu uzdrowskiego*, Probl. Uzdrow., 9/10, 275-279.

- 1979, *Bilans cieplny ciała człowieka jako podstawa podziału bioklimatycznego obszaru Iwonicza*, Prace Geogr. IGI PAN, 131.
- 1980, *Bilans cieplny ciała człowieka jako podstawa kartowania na potrzeby bioklimatologii*, [w:] M. Kluge (red.), *Metody opracowań topoklimatycznych*, Dokum. Geogr., 3, 57-65.
- 1983, *Topoclimatic investigations of health resorts*, Geogr. Pol., 45, 47-58.
- 1984a, *The structure of the heat balance of the human body at the Polish coast of the Baltic Sea*, Z. Met., 34, 3, 175-183.
- 1984b, *Struktura bilansu cieplnego ciała człowieka na wybrzeżu Bałtyku*, [w:] T. Kozłowska-Szczęśna (red.), *Problemy bioklimatologii uzdrowskowej*, cz. V, Dokum. Geogr., 1/2, 103-115.
- 1988, *Uciążliwość warunków biotermicznych w Polsce*, Probl. Uzdrow., 9/10, 83-94.
- 1993, *Bilans cieplny ciała człowieka jako podstawa typologii i oceny bioklimatu Polski*, Prace Geogr. IGI PAN, 160 (w druku).
- Krawczyk B., Błażejczyk K., 1991, *Wstępne badania bilansu cieplnego ciała człowieka na pustyni Kara-Kum*, Przegl. Geogr., 63, 1/2, 143-154.
- Kravcik B., Błażejčik K., Begov J., Ščerbak E., 1991, *Issledovanie teplovogo balansa tela celoveka na pustynie Karakumy*, Probl. Osvojenija Pustyn', 5, 58-65.
- Kreider M. B., Buskirk E. R., Bass D. E., 1958, *Oxygen consumption and body temperature during the night*, J. Appl. Physiol. 12, 3, 361-366.
- Krys S. A., Brown R. D., 1990, *Radiation absorbed by a vertical cylinder in complex outdoor environments under clear sky conditions*, Int. J. Biomet., 34, 1, 69-75.
- Lee D. H. K., 1980, *Seventy-five years of searching for a heat index*, Envir. Res., 22, 331-356.
- Liopo T. N., Cicenکو G. V., 1971, *Klimaticeskie uslovija i teplovoe sostojanie celoveka*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Malchaire J. B., 1991, *Predicted sweat rate in fluctuating thermal conditions*, Eur. J. Appl. Physiol., 63, 282-287.
- Marinov V. K., 1961, *Edin nov metod za opredelanie na komponentite na toplinnia balans na čobesko tialo, katose uzpolzuvat' klimatični*, Hydrol. i Met., 5, 57-67.
- Marinov V. K. (red.), 1971, *Atlas kurortno rajoniranje na NR Bulgarija*, Sofia.
- McLean J. A., 1974, *Loss of heat by evaporation*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, London, 19-32.
- Menz G., 1990, *Mikroskalige bioklimatologische Geländeaufnahme mit Satellitendaten*, [w:] H. Schirmer (red.), *Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen*, Akad. f. Räumforschung u. Landesplanung, 114, Hannover, 70-80.
- Milan F. A., Hannon J. P., Evonuk E., 1963, *Temperature regulation of eskimos, indians and caucasians in a bath calorimeter*, J. Appl. Physiol., 18, 2, 378-382.
- Mitchell D., 1974, *Convective heat transfer from man and other animals*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, Londyn, 59-75.
- 1977, *Physical basis of thermoregulation*, [w:] D. Robertshaw (red.), *International review of physiology*, 15, Environmental physiology II, Univ. Park. Press, 1-21.
- Monteith J. L., 1974, *Specification of the environment for thermal physiology*, [w:] J. L. Monteith, L. E. Mount (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, Londyn, 1-18.
- Morgan D. L., Baskett R. L., 1974, *Comfort of man in the city. An energy model of man-environment coupling*, Int. J. Biomet., 18, 3, 184-198.
- Nadel E. R., 1985, *Recent advances in temperature regulation during exercise in humans*, Fed. Proc., 44, 7, 2286-2292.
- Narębski J., 1980, *Termoregulacja*, [w:] *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej*, PZWL, Warszawa, 282-294.
- Nielsen B., 1990, *Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects*, Eur. J. Appl. Physiol., 60, 6, 452-456.
- Nielsen B., Nielsen S. L., Petersen F. B., 1972, *Thermoregulation during positive and negative work at different environmental temperatures*, Acta. Physiol. Scand., 85, 2, 249-257.
- Nielsen B., Kassow K., Aschengreen F. E., 1988, *Heat balance during exercise in the sun*, Eur. J. Appl. Physiol., 58, 189-196.
- Nielsen R., Endrusick T. L., 1990a, *Sensations of temperature and humidity during alternative work/rest and the influence of underwear knit structure*, Ergonomics, 33, 2, 221-234.
- 1990b, *Thermoregulatory response to intermittent exercise are influenced by knit structure of underwear*, Eur. J. Appl. Physiol., 60, 15-25.

- Nielsen R., Gavhed D., Nilsson H., 1989a, *Thermal function of clothing assemble during work: dependency on inner clothing layer fit*, *Ergonomics*, 32, 12, 1581-1594.
- 1989b, *Skin temperature and evaporation are influenced by fit of inner clothing layer*, [w:] J. B. Mercer (red.), *Thermal physiology*, Elsevier, Amsterdam, 525-530.
- Nishi Y., 1980, *Measurements of thermal balance of man*, [w:] K. Cena, J. A. Clark (red.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Wroclaw Techn. Univ. Press–Elsevier, Amsterdam, 271-284.
- Nishi Y., Gonzalez R. R., Gagge A. P., 1978, *Clothing insulation as a biometeorological parameter during rest and exercise*, *Int. J. Biomet.*, 22, 3, 177-190.
- Nishimura K., Isoda N., Kobayashi Y., 1978, *Physiological and psychological responses*, *Int. J. Biomet.*, 22, 329-330.
- Oksenič I. G., 1981, *Aridnyj klimat Turkmenistana i vozdejstvie ego na čeloveka*, Ylym, Ašhabad.
- Paszyński J., 1980, *Metody sporządzania map topoklimatycznych*, [w:] M. Kluge (red.), *Metody opracowań topoklimatycznych*, *Dokum. Geogr.*, 3, 5-27.
- 1983, *Les méthodes d'établissement des cartes topoclimatiques*, *Geogr. Pol.*, 45, 35-45.
- PN–85/N–08013, *Środowisko termiczne umiarkowane. Określanie wskaźników PMV, PPD i wymagań dotyczących komfortu termicznego*, Polski Kom. Norm. Miar i Jakości, Warszawa.
- Popoczko P., 1990, *Ciepło a życie. Zarys termofizjologii zwierząt*, PWN, Warszawa.
- Povolockaja N. P., 1975a, *Klassifikacija pogody i ocenka teplovogo sostojanija čeloveka pri klimatolečenii i otdyhe v rajone Kavkazskih Mineralnyh Vod*, [w:] A. Novikov (red.), *Voprosy medicinskoj klimatologii i klimatoterapii bolnyh na kurortah*, Inst. Kurort., Piatigorsk, 16-23.
- 1975b, *Ispolzovane metoda teplovogo balansa v dozimetrii solnečnyh i vozdušnyh vann*, A. Novikov (red.), *Voprosy medicinskoj klimatologii i klimatoterapii bolnyh na kurortah*, Inst. Kurort., Piatigorsk, 64-77.
- Raynaud J., Martineaud J. P., Bhatnagar P. P., Vieillefond H. V., Durand J., 1976, *Body temperature during rest and exercise in residents and sojournes in hot climate*, *Int. J. Biomet.*, 20, 4, 309-317.
- Rewerski W., Kozłowski S., Korolkiewicz Z., Wróblewski T. E., 1972, *Termoregulacja: fizjologia, patologia i farmakologia*, PZWL, Warszawa.
- Rowell L. B., Brengelmann G., Murray J. A., Kroning K. K., Kusumi F., 1969, *Human metabolic responses to hyperthermia during mild to maximal exercise*, *J. Appl. Physiol.* 26, 4, 395-402.
- Schofield C., 1985, *An annotated bibliography of source material for basal metabolic rate*, *Hum. Nutr.: Clin. Nutr.*, 39 C, suppl. 1, 42-91.
- Schofield W. N., 1985, *Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous works*, *Hum. Nutr.: Clin. Nutr.*, 39 C, suppl. 1, 5-41.
- Scholander P. F., Hammel H. T., Lange Andersen K., Loyning Y., 1958, *Metabolic acclimation to cold in man*, *J. Appl. Physiol.*, 12, 1, 1-8.
- Skoczek J., Krawczyk B., Błażejczyk K., 1990, *Warunki topoklimatyczne i biotopoklimatyczne okresu letniego w dolinie Toły (Chentej, Mongolia)*, *Przegl. Geogr.*, 62, 1/2, 121-136.
- Skrzypski J., 1981, *Bilans cieplny ciała człowieka podczas kąpieli słonecznych*, *Probl. Uzdrow.*, 9/12, 95-106.
- 1989, *Zastosowanie analizy bilansu cieplnego ciała człowieka zmodyfikowaną metodą Fangera do oceny bioklimatu i termicznych warunków klimatoterapii*, *Probl. Uzdrow.*, 7/8.
- Smolander J., 1987, *Circulatory and thermal adjustments to dynamic exercise in different combinations of ambient temperature, air humidity and clothing*, *Publ. Univ. Kuopio, Medicine, Orig. Rep.*, 1, 1-93.
- Smolander J., Ilmarinen R., Korhanen O., Pyykko I., 1987, *Circulatory and thermal responses of men with different training status to prolonged physical work in dry and humid heat*, *Scand. J. Work. Envir. Health*, 13, 1, 37-46.
- Smolander J., Louhevaara V., Tuomi T., Korhanen O., Jaakkola J., 1984, *Cardiorespiratory and thermal effect of wearing gas protective clothing*, *Int. Arch. Occup. Envir. Health*, 54, 261-270.
- Sołtyński K., 1988, *Calkowita, efektywna i podstawowa izolacja odzieży*, *Prace CIOP*, 139, 157-163.
- Steadman R. G., 1979a, *The assessment of sultriness, Part I – A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science*, *J. Appl. Met.*, 18, 7, 861-873.

- 1979b, *The assessment of sultriness Part II – Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature*, J. Appl. Met., 18, 7, 874-885.
- Stetson J. B., (red.), 1967, *Metabolism*, 5, 2, Little, Brown and Co. (Inc.), Boston.
- Stoker J. B., Kappagoda C. T., Thenabadu P. N., Linden R. J., 1973, *A simple method for measurement of oxygen consumption*, J. Appl. Physiol., 35, 5, 748-750.
- Strange-Petersen E., Vejby-Christiansen H., 1973, *Effect of body temperature on steady state ventilation and metabolism*, Acta Physiol. Scand., 89, 3, 342-351.
- Strydom N. M., Wyndham C. H., Williams C. G., Morrison J. F., Bredell G. A., Benade A. J., von Rahden M., 1966, *Acclimatization to humid heat and role of physical conditioning*, J. Appl. Physiol., 21, 2, 636-642.
- Sylwanowicz W., Michajlik A., Ramotowski W., 1989, *Anatomia i fizjologia człowieka*, PZWL, Warszawa.
- Tamura T., Tomizawa M., 1991, *Skin wettedness and evaporative heat resistance of clothing*, 2-nd International Symposium on Clothing Comfort Studies, Mt. Fuji, Japan, Proc., 3-20.
- Terjung W. H., 1966, *Physiological climates of the conterminous United States: A bioclimate classification based on man*, Ann. Ass. Am. Geogr., 56, 1, 141-179.
- 1969, *The city-man system in urban energy balance climatology*, Proc. Ass. Am. Geogr., 1, 145-148.
- 1970, *Urban energy balance climatology: A preliminary investigations of the city-man system in downtown Los Angeles*, Geogr. Rev., 60, 1, 44-53.
- 1974, *Energy balance between atmosphere and living organisms*, [w:] S. W. Tromp (red.), *Progress in biometeorology*, 1, 1, Elsevier, Amsterdam, 55-58.
- Terjung W. H. et al., 1970, *The energy balance climatology of a city-man system*, Ann. Ass. Am. Geogr., 60, 3, 466-492.
- Terjung W. H., Louie S. S.-F., 1971, *Potential solar radiation climates of man*, Ann. Ass. Am. Geogr., 61, 3, 481-500.
- Terjung W. H., O'Rourke P. A., 1983, *Energy budget changes caused by varying solar angles, cloud scenarios, and air temperature in contrasting landscapes*, Int. J. Biomet., 27, 1, 3-16.
- Tuller S. E., 1975, *The energy budget of man: variations with aspect in a downtown urban environment*, Int. J. Biomet., 19, 1, 2-13.
- Underwood C. R., Ward E. J., 1966, *The solar radiation area of man*, Ergonomics, 9, 2, 155-168.
- Vitte N. K., Petryn N. M., 1952, *Izmenenie teploprodukcji celoveka v rozlicnyh uslovijah temperatury vozduha v pokoje i pri vypolnenii fizičeskoj raboty*, Vrach. Delo, 10, 913-916.
- Webb P., 1971, *Metabolic heat balance data for 24-hour period*. Int. J. Biomet., 15, 2-4, 151-155.
- Wenneberg L. A., Ekstrom N. A., Adler F. O., Malm G. E., Mikiver M., Olsson G. E., 1973, *Energy balance and change in body weight and body water in man during a 2-day cold exposure*, J. Appl. Physiol., 35, 4, 477-479.
- Winslow C. E. A., Herrington L. P., Gagge A. P., 1937, *Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures*, Am. J. Physiol., 120, 1, 1-22.
- Wood J. E., Bass D. E., Iampietro P. F., 1958, *Responses of peripheral veins of man to prolonged and continuous cold exposure*, J. Appl. Physiol., 12, 3, 357-360.
- Wyndham C. H., Strydom N. B., Benade A. J. S., Rensburg J. A. van, 1973, *Limiting rates of work for acclimatization at high wet bulb temperatures*, J. Appl. Physiol., 35, 4, 454-458.
- Yoshimura H., Morimoto T., 1974, *Seasonal variations of basal metabolism and body fluid*, [w:] S. W. Tromp (red.), *Progress in biometeorology*, 1, 1, Elsevier, Amsterdam, 549-556.
- Young K. C., 1979, *The influence of environmental parameters on heat stress during exercise*, J. Appl. Met., 18, 7, 886-897.

DODATEK 1. Wykaz stosowanych symboli i ich wymiary
APPENDIX 1. List of symbols and units

| Symbol (Symbol) | Charakterystyka (Characteristic) | Wymiar (Unit) |
|---|---|--------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Parametry meteorologiczne (meteorological parameters) | | |
| Ta | temperatura powietrza (air temperature) | °C |
| T | temperatura powietrza (air temperature) | K |
| Tg | temperatura powierzchni gruntu (ground temperature) | °C |
| ea | prężność pary wodnej (vapour pressure) | hPa |
| f | wilgotność względna powietrza (relative humidity of air) | % |
| Q | natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego (na powierzchnię poziomą) (intensity of direct solar radiation at horizontal plane) | W m ⁻² |
| D | natężenie rozproszonego promieniowania słonecznego (na powierzchnię poziomą) (intensity of diffuse solar radiation) | W m ⁻² |
| r | natężenie odbitego promieniowania słonecznego (na powierzchnię poziomą) (intensity of reflected solar radiation) | W m ⁻² |
| N | zachmurzenie (w skali 0-1) (cloudiness in 0-1 scale) | bezwymiarowe (nondimension) |
| c | współczynnik charakteryzujący rodzaj chmur: (coefficient of cloud type) 0,15-0,2 – wysokie (Ci, Cc) 0,3 – wysokie (Cs) 0,4-0,5 – średnie (Ac, As) 0,5-0,6 – piętrowe (Cu, Cb) 0,7-0,8 – niskie (Sc, St, Ns) | bezwymiarowy (nondim.) |
| ap | ciśnienie atmosferyczne (air pressure) | hPa |
| v | prędkość wiatru (wind speed) | m · s ⁻¹ |
| v' | prędkość ruchu człowieka (velocity of man motion) | m · s ⁻¹ |

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|-------------------------------|
| Parametry fizyczne (physical parameters) | | |
| h | wysokość Słońca (Sun altitude) | ° |
| s | współczynnik emisyjności = 0,95 (emissivity coefficient) | bezwymiarowy (nondim.) |
| σ | stała Stefana-Boltzmana = $5,7 \cdot 10^{-8}$ (Stefan-Boltzman constant) | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ |
| Cp | pojemność cieplna powietrza (specific heat of air) | $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| Lh | ukryte ciepło parowania (latent heat of vaporization of water) | $J \cdot g^{-1}$ |
| e | podstawa logarytmu naturalnego (base of natural logarithm) | |
| Parametry fizjologiczne (physiological parameters) | | |
| Ts | średnia ważona temperatura skóry (mean skin temperature) | °C |
| es | prężność pary wodnej na powierzchni skóry (vapour pressure at skin surface) | hPa |
| a | średnie albedo skóry i odzieży = 0,3 (mean albedo of skin and clothing) | bezwymiarowe (nondim.) |
| w | współczynnik charakteryzujący stopień uwilgotnienia skóry (coefficient of skin wettedness) | bezwymiarowy (nondim.) |
| Parametry wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem (parameters of man-environment heat exchange) | | |
| he d | współczynnik ewaporacyjnego przenoszenia ciepła (coef. of evaporative heat transfer) | $W \cdot m^2 \cdot hPa^{-1}$ |
| hc d | współczynnik konwekcyjnego przenoszenia ciepła (coef. of convective heat transfer) | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| d | współczynnik dyfuzji turbulencyjnej (coef. of turbulent diffusion) | bezwymiarowy (nondim.) |
| d' | współczynnik pojemności cieplnej odzieży (coef. of heat capacity of clothing) | bezwymiarowy (nondim.) |
| Irc | współczynnik osłabienia przepływu ciepła przez odzież (dla konwekcji, radiacji i promieniowania słonecznego) (reducing coef. of heat transfer by clothing for convection and radiation) | bezwymiarowy (nondim.) |
| Ie | współczynnik osłabienia przepływu ciepła przez odzież (dla ewaporacji) (reducing coef. of heat transfer by clothing for evaporation) | bezwymiarowy (nondim.) |
| Icl | termoizolacyjność odzieży (clothing insulation) | clo |
| M | wielkość metabolizmu (metabolism) | $W \cdot m^{-2}$ |
| R' | promieniowanie słoneczne pochłonięte przez człowieka nie ubranego (solar radiation absorbed by unclothed man) | $W \cdot m^{-2}$ |
| R | promieniowanie słoneczne pochłonięte przez człowieka ubranego (solar radiation absorbed by clothed man) | $W \cdot m^{-2}$ |
| L | wymiana ciepła na drodze promieniowania długofalowego (radiacja) (heat exchange by long-wave radiation) | $W \cdot m^{-2}$ |
| Rs | saldo promieniowania dla powierzchni ciała w pełnym zakresie widma (net radiation – short and long wave) | $W \cdot m^{-2}$ |

| 1 | 2 | 3 |
|-----|--|------------------|
| C | konwekcyjna wymiana ciepła (na drodze turbulencyjnego unoszenia ciepła jawnego) (convective heat exchange) | $W \cdot m^{-2}$ |
| E | ewaporacyjna wymiana ciepła (na drodze turbulencyjnego unoszenia ciepła utajonego podczas parowania potu) (evaporative heat exchange) | $W \cdot m^{-2}$ |
| Res | respiracyjna wymiana ciepła (związana z oddychaniem) (respiratory heat exchange) | $W \cdot m^{-2}$ |
| K | kondukcyjna wymiana ciepła (na drodze przewodzenia) (conductive heat exchange) | $W \cdot m^{-2}$ |
| W | ciepło związane z pracą mięśni (work load) | $W \cdot m^{-2}$ |
| S | wzrost lub ubytek zawartości ciepła w organizmie (saldo wymiany ciepła) (net heat storage — surplus of deficit) | $W \cdot m^{-2}$ |
| MTE | Maksymalnie dopuszczalny czas przebywania w danych warunkach środowiskowych (maximal time of exposure) | min |

DODATEK 2. Przykład płachty obliczeniowej stosowanej w programach LOTUS i EXCEL do obliczania bilansu cieplnego człowieka

APPENDIX 2. Exemple of LOTUS/EXCEL worksheet used for the calculation of the human heat balance

Przygotowując płachtę obliczeniową należy przeznaczyć:

- wiersz 1 – na ogólne informacje o zbiorze danych,
- wiersz 2 – na nagłówki poszczególnych danych wejściowych i obliczanych parametrów,
- wiersz 3 – na algorytmy poszczególnych parametrów i wartości danych wejściowych,
- wiersz 4 i następane – na obliczenia strumieni wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem.

Jeśli nie dysponujemy danymi dotyczącymi temperatury powierzchni gruntu (T_g), należy wpisać w to miejsce wartość równą temperaturze powietrza (T_a). Przy wpisywaniu wysokości słońca należy zwrócić uwagę, że w kolumnie oznaczonej h ($^{\circ}$) wpisujemy pełne stopnie wysokości słońca, a kolumnie h ($'$) – minuty.

Ponieważ w modelu MENEX istnieje możliwość stosowania szacunkowych procedur obliczania temperatury skóry i pochłoniętego promieniowania słonecznego, dlatego w płachcie obliczeniowej przewidziano dla każdego wzoru (pełnego i uproszczonego) oddzielną kolumnę (Q, R i S dla T_s oraz AD, AE i AF dla R'). Zależnie od wielkości dodatkowych parametrów różnicujących należy skopiować algorytm tylko w odpowiedniej kolumnie; w pozostałych kolumnach dotyczących T_s i R' należy wpisać zero.

Poniższa tabela zawiera optymalny układ kolejnych kolumn, ich nagłówki i algorytmy poszczególnych składników bilansu cieplnego człowieka przebywającego w warunkach niestacjonarnych. Dokonując obliczeń dla warunków stacjonarnych, gdy istnieje konieczność bilansowania wymiany ciepła przez zmiany temperatury skóry lub termoizolacyjności odzieży, można przesunąć kolumny zawierające te parametry na koniec płachty, aby wygodniej było obserwować zmiany salda wymiany ciepła przy podstawianiu kolejnych wartości T_s lub I_{cl} .

| Kolumna (Column) | Nagłówek (Title) | Algorytm (Algorithm) |
|---------------------|---------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| A | Stanowisko | |
| B | Data | |
| C | Godzina | |
| D | | |
| E | T_a | (temperatura powietrza) |
| F | v | (prędkość wiatru) |
| G | v | (prędkość ruchu człowieka) |
| H | e_a | (prężność pary wodnej w powietrzu) |
| I | ap | (ciśnienie atmosferyczne) |
| J | f | (wilgotność względna powietrza) |
| K | N | (wielkość zachmurzenia) |
| L | c | (współczynnik oznaczający rodzaj chmur) |

| 1 | 2 | 3 |
|----|---------------------------|--|
| M | Tg | (temperatura powierzchni gruntu) |
| N | Icl | (termoizolacyjność odzieży) |
| O | M | (metabolizm) |
| P | Ts | (temperatura skóry – zmierzona) |
| Q | Ts (dla $v < 4$) | $0,294 * E3 + 0,0012 * J3 + 1,12 * (1 - K3) - 0,077 * F3 + 26,1$ |
| R | Ts (dla $v > 4$) | $0,267 * E3 + 0,001 * J3 + 1,1 * (1 - K3) - 0,074 * F3 + 25,1$ |
| S | Ts (dla $Q \approx 0$) | $0,293 * E3 + 0,0012 * J3 - 0,077 * F3 + 26,0$ |
| T | Ts' | $P3 + Q3 + R3 + S3$ |
| U | w | $(1,031 / (37,5 - T3)) - 0,065$ |
| V | es | $@EXP(0,058 * T3 + 2,003)$ |
| W | h (°) | (wysokość Słońca – stopnie) |
| X | h (') | (wysokość Słońca – minuty) |
| Y | c*N | $L3 * K3$ |
| Z | Q | (bezpośrednie promieniowanie słoneczne) |
| AA | D | (rozproszone promieniowanie słoneczne) |
| AB | r | (odbite promieniowanie słoneczne) |
| AC | R' | $0,7 * (0,36 * AA3 + (0,49 - 0,005 * (W3 + X3/60)) * AB3 +$ $(1 / @TAN((W3 + X3/60) * @PI/180)) * (0,25 - 0,001 * (W3 + X3/60))) * Z3)$ |
| AD | R' (dla $c * N < 0,3$) | $(@LN(W3 + X3/60) - 1,1) / 0,015$ |
| AE | R' (dla $c * N 0,3-0,6$) | $@EXP(0,051 * (W3 + X3/60) + 2,34)$ |
| AF | R' (dla $c * N > 0,6$) | $2,21 * (W3 + X3/60) - 6,8$ |
| AG | R1 | $AC3 + AD3 + AE3 + AF3$ |
| AH | he | $E3 * (-0,00002 * I3 + 0,00006 * E3 + 0,011) + 0,02 * I3 - 0,773$ |
| AI | $4 s \sigma T^3$ | $0,056 * E3 + 4,48$ |
| AJ | $s \sigma T^4$ | $0,95 * 0,000000057 * (273 + E3)^4$ |
| AK | hc | $-0,04 * E3 + 0,013 * I3 - 0,503$ |
| AL | hc d' | $AK3 * 0,53 / N3$ |
| AM | hc d | $AK3 * @SQRT(F3 + G3)$ |
| AN | Irc | $AL3 / (AL3 + AM3 + AI3)$ |
| AO | Ie | $AL3 / (AL3 + AM3)$ |
| AP | C | $AK3 * @SQRT(F3 + G3) * (E3 - T3) * AN3$ |
| AQ | E | $AH3 * @SQRT(F3 + G3) * (H3 - V3) * U3 * AO3 - (0,42 * (O3 - 58) - 5,04)$ |
| AR | L | $(AI3 / 2 * (M3 - E3) - 0,5 * AI3 * (0,254 - 0,005 * H3) *$ $(1 - Y3) + AI3 * (E3 - T3)) * AN3$ |
| AS | Res | $E3 * (0,0005 * J3 + 0,112) + (0,013 * J3 - 9,653) + 0,147$ |
| AT | R + M | $AG3 * AN3 + O3$ |
| AU | S | $AT3 + AP3 + AQ3 + AR3 + AS3$ |
| AV | MTE | $5400 / @ABS(AU3)$ |

Symbolem @ oznaczono funkcje stałe programów LOTUS I EXCEL.

DODATEK 3. Program mikrokomputerowy modelu MENEX (wersja 1.0)

Appendix 3. Microcomputer program of the MENEX model (version 1.0)

```
PROGRAM MENEX_Model;
```

```
{ Program komputerowy Modelu Wymiany Ciepła pomiędzy Człowiekiem a
Otoczeniem (MENEX) napisany w języku TURBO PASCAL 6.0, dostosowany do
kompilowania na mikrokomputerach IBM/PC: Program służy do wyznaczenia
składowych bilansu cieplnego człowieka przebywającego w terenie
otwartym, przy różnej aktywności fizycznej i rodzaju odzieży; może być
stosowany dla warunków stacjonarnych i niestacjonarnych }
```

```
USES Crt;
```

```
VAR
```

```
Ta,Ts,ap,v,f,ea,Tg,Icl,M.v0,v1,Ta1,vu,sol,sol1,
dat0.dat,Q,D,Ref,h,h1,h2,N,cl,sr0,sr,
hc,he,Irc,Ie,w,es,s1,s2.ctg.cn,vu0,R0,Ts0,Ts1,Ts2,
R1,R.C.E.L,Res,S,MTE,Cu.Eu.Lu.Su,Cp,Ep,Lp: Real;
answer.dane,ask:Char;
```

```
PROCEDURE InputData; { Dane wejściowe }
```

```
BEGIN
```

```
Write('Temperatura powietrza      (°C): '); ReadLn(Ta);
Write('Wiglotność względna powietrza (%): '); ReadLn(f);
Write('Prężność pary wodnej        (hPa): '); ReadLn(ea);
Write('Prędkość wiatru              (m/s): '); ReadLn(v);
Write('Ciśnienie powietrza          (hPa): '); ReadLn(ap);
Write('Temperatura gruntu           (°C): '); ReadLn(Tg);
Write('Zachmurzenie                  (w skali 0-1): '); ReadLn(N);
Write('Rodzaju chmur : '); WriteLn;
Write('brak chmur [0]\Cirrocumulus-Cirrus [2]\Cirrostratus [3]\');
Write('Alto cumulus [4]\Altostratus [5]\Cumulus-Cumulonimbus [6]\');
Write('Stratocumulus-Stratus [7]\ Nimbostratus [8]\ mgła [9] : ');
ReadLn(cl);
Write('Promieniowanie słoneczne (W/m²): '); WriteLn;
Write(' - Bezpośrednie (przy braku danych -1): '); ReadLn(Q);
Write(' - Rozproszone: '); ReadLn(D);
Write(' - Odbite: '); ReadLn(Ref);
Write('Wysokość słońca - (stopnie): '); ReadLn(h1);
Write(' - (minuty): '); ReadLn(h2); WriteLn;
Write('Warunki insolacyjne stanowiska: '); WriteLn;
```

```

Write('miejsce: nasłonecznione [1] \ zacienione [2]'); ReadLn(sol);
WriteLn;
Write('Temperatura skóry (°C), (przy braku danych 0)'); ReadLn(Ts0);
Write('Metabolizm (W/m²): '); ReadLn(M);
Write('Termoizolacyjność odzieży (clo): '); ReadLn(Icl);
Write('Prędkość poruszania się człowieka (m/s): '); ReadLn(v0);
WriteLn; WriteLn;
{ Liczenie parametrów pomocniczych }
Ts1:=Ts0*1; v1:=v+v0;
hc:=0.013*ap-0.04*Ta-0.503;
he:=Ta*(0.00006*Ta-0.00002*ap+0.011)+0.02*ap-0.773;
s1:=0.056*Ta+4.48;
s2:=0.95*0.000000057*((273+Ta)*(273+Ta)*(273+Ta)*(273+Ta));
h:=(h1+h2/60);
IF (h<2) THEN ctg:=0 ELSE ctg:=COS(h*PI/180)/SIN(h*PI/180);
cn:=N*cl*0.1; sol1:=sol*1; R0:=Q*1;
IF (R0>=0) THEN
  R1:=(0.36*D+(0.49-0.005*h)*Ref+ctg*(0.25-0.001*h)*Q)*0.7;
IF (h<=3) THEN R1:=0;
IF (R0<0) AND (cn<0.31) AND (sol1=1) THEN R1:=((LN(h)-1.1)/0.015);
IF (R0<0) AND (cn>0.3) AND (cn<0.61) AND (sol1=1) THEN
  R1:=(EXP(0.051*h+2.34));
IF (R0<0) AND (cn>0.6) AND (sol1=1) THEN R1:=(2.21*h-6.8);
IF (R0<0) AND (cn<0.31) AND (sol1=2) THEN
  R1:=(LN(h)-1.1)/0.015)*0.35;
IF (R0<0) AND (cn>0.3) AND (cn<0.61) AND (sol1=2) THEN
  R1:=(EXP(0.051*h+2.34))*0.58;
IF (R0<0) AND (cn>0.6) AND (sol1=2) THEN R1:=(2.21*h-6.8)*0.83;
IF (Ts1>0) THEN Ts:=Ts0/1;
IF (Ts1=0) AND (R<10) AND (v1>0) THEN
  Ts2:=0.293*Ta+0.0012*f-0.077*v+26;
IF (Ts1=0) AND (R>=10) AND (v1<=4) THEN
  Ts2:=0.294*Ta+0.001*f+1.12*(1-N)-0.08*v+26.03;
IF (Ts1=0) AND (R>=10) AND (v1>4) THEN
  Ts2:=0.267*Ta+0.001*f+1.1*(1-N)-0.074*v+25.1;
IF (Ts1=0) AND (sol1=2) THEN Ts:=Ts2*0.96;

```



```
IF (Ts1=0) AND (sol1=1) THEN Ts:=Ts2;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE Storage; { Liczenie salda wymiany ciepła }
```

```
BEGIN
```

```
Irc:=(hc*(0.53/Icl))/((hc*(0.53/Icl))+(hc*SQRT(v1))+s1);
```

```
Ie:=(hc*(0.53/Icl))/(hc*(0.53/Icl)+hc*SQRT(v1));
```

```
es:=EXP(0.058*Ts+2.003);
```

```
IF Ts>36.5 THEN w:=1 ELSE w:=1.031/(37.5-Ts)-0.065;
```

```
R:=R1*Irc;
```

```
C:=hc*SQRT(v1)*(Ta-Ts)*Irc;
```

```
E:=he*SQRT(v1)*(ea-es)*w*Ie-(0.42*(M-58)-5.04);
```

```
L:=(0.5*s1*(Tg-Ta)-0.5*s2*(0.254-0.005*ea)*(1-cn)+s1*(Ta-Ts))*Irc;
```

```
Res:=Ta*(0.0005*f+0.112)+(0.013*f-9.653)+0.147;
```

```
S:=M+R+C+E+L+Res;
```

```
MTE:=5400/ABS(S); WriteLn;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE Result; { Wyniki }
```

```
BEGIN
```

```
Write('Data \ Godzina \ Stanowisko: '); ReadLn(dane); WriteLn;
```

```
WriteLn('Wartości poszczególnych strumieni ciepła:'); WriteLn;
```

```
WriteLn('Pochłonięte promieniowanie słoneczne (w W/m2): ', R:4:1);
```

```
WriteLn('Wymiana ciepła przez unoszenie (w W/m2): ', C:4:1);
```

```
WriteLn('Straty ciepła na parowanie (w W/m2): ', E:4:1);
```

```
WriteLn('Promieniowanie długofalowe (w W/m2): ', L:4:1);
```

```
WriteLn('Straty ciepła na oddychanie (w W/m2): ', Res:4:1);
```

```
WriteLn;
```

```
WriteLn('Zmiana zawartości ciepła w organizmie (w W/m2): ', S:4:1);
```

```
WriteLn('Temperatura skóry (w °C): ', Ts:2:1);
```

```
WriteLn('Termoizolacyjność odzieży (clo): ', Icl:2:1);
```

```
WriteLn('Metabolizm (w W/m2): ', M:3:0);
```

```
WriteLn; WriteLn;
```

```
IF dat=2 THEN
```

```
Write('Maksymalnie dopuszczalny czas przebywania (min): ',MTE:5:0);
```

```
WriteLn; WriteLn;
```

```
IF dat=2 THEN Write('<> Warunki biotermiczne ');
```

```
IF (dat=2) AND (S>=-20) AND (S<=20) AND (R<=15) THEN
```

```

Write('oszczędzające <>');
IF (dat=2) AND (S>=-45) AND (S<-20) AND (R>15) OR
   (dat=2) AND (S>20) AND (S<=45) AND (R<=30) OR
   (dat=2) AND (S>=-20) AND (S<=20) AND (R>15) THEN
Write('lekkobciążające <>');
IF (dat=2) AND (S<-45) AND (S>-90) AND (R>15) OR
   (dat=2) AND (S>20) AND (S<=45) AND (R>30) OR
   (dat=2) AND (S>45) AND (S<90) AND (R<=30) OR
   (dat=2) AND (S<-20) AND (S>=-45) AND (R<=15) THEN
Write('obciążające <>');
IF (dat=2) AND (S>45) AND (S<=90) AND (R>30) OR
   (dat=2) AND (S<-45) AND (S>=-90) AND (R<=15) THEN
Write('silnie obciążające <>');
IF (dat=2) AND (S>90) THEN
Write('groźące przegrzaniem organizmu <>');
IF (dat=2) AND (S<-90) THEN
Write('groźące wychłodzeniem organizmu <>'); WriteLn;
IF dat=2 THEN Write('* Dominujące odczucie cieplne - ');
IF (dat=2) AND (S<-15) THEN Write('zimno *');
IF (dat=2) AND (S>=-15) AND (S<-5) THEN Write('chłodno *');
IF (dat=2) AND (S>=-5) AND (S<=15) THEN Write('komfortowo *');
IF (dat=2) AND (S>15) AND (S<=35) THEN Write('ciepło *');
IF (dat=2) AND (S>35) AND (S<=55) THEN Write('gorąco *');
IF (dat=2) AND (S>55) THEN Write('bardzo gorąco *'); WriteLn;
Write('Dalsze obliczenia ? : T \ N '); ReadLn(answer);
END;
PROCEDURE Balance; { Bilansowanie wymiany ciepła dla warunków
                    stacjonarnych przez zmiany temperatury skóry,
                    termoizolacyjności odzieży lub obciążenia pracą }
BEGIN
WriteLn('Saldo wymiany ciepła ', S:4:1); WriteLn;
WriteLn('Czy chcesz zmienić Ts, Icl lub M: T \ N ?'); ReadLn(ask);
WHILE (ask='T') OR (ask='t') DO BEGIN
Write('Nowa temperatura skóry '); ReadLn(Ts);
Write('Nowa termoizolacyjność odzieży '); ReadLn(Icl);
Write('Nowy metabolizm '); ReadLn(M);

```



```

Storage;
WriteLn('Saldo wymiany ciepła ', S:4:1); WriteLn;
WriteLn('Czy chcesz zmienić Ts, Icl lub M: T \ N ?');
  ReadLn(ask);
  IF (ask='N') OR (ask='n') THEN Result;
END;
END;
PROCEDURE TopoClimate; { Obliczanie strumieni ciepła metoda
                        uproszczoną }
BEGIN
  Write('Temperatura powietrza (°C): '); ReadLn(Ta1);
  Write('Prędkość wiatru      (m/s): '); ReadLn(vu);
  WriteLn; WriteLn;
  Write('Warunki środowiskowe : '); WriteLn;
  WriteLn('                zabudowa-plaża [1] ');
  WriteLn('                otwarte pole-łąka [2] ');
  WriteLn('położenie słońca < 5° nad horyzontem [3] ');
  Write('                las-park [4] '); ReadLn(sr0);
  WriteLn; WriteLn;
  Write('Typ środowiska geograficznego : '); ReadLn(dane);
  sr:=sr0*1; vu0:=vu*1;
  IF (sr<3) AND (vu0<=4) THEN Cu:=2.39*Ta1-2.91*vu-74.18;
  IF (sr<3) AND (vu0<=4) THEN Lu:=0.95*Ta1+3.14*vu-44.61;
  IF (sr<3) AND (vu0<=4) THEN Eu:=-0.87*Ta1-1.46*vu-0.77;
  IF (sr<3) AND (vu0<=4) THEN Su:=2.76*Ta1-4.77*vu-29.78;

  IF (sr<3) AND (vu0>4) THEN Cu:=2.4*Ta1-2.9*vu-84.2;
  IF (sr<3) AND (vu0>4) THEN Lu:=0.9*Ta1+3.1*vu-43.6;
  IF (sr<3) AND (vu0>4) THEN Eu:=14.2-1.37*Ta1-2.46*vu;
  IF (sr<3) AND (vu0>4) THEN Su:=2.3*Ta1-0.5*vu-35.32;

  IF (sr>2) THEN Cu:=2.36*Ta1-8.24*vu-66.2;
  IF (sr>2) THEN Lu:=0.77*Ta1+5.63*vu-43.02;
  IF (sr>2) THEN Eu:=-0.32*Ta1-4.1*vu-5.51;
  IF (sr>2) THEN Su:=3.34*Ta1-1.48*vu-51.16;

```

```

Cp:=100*Cu/(Cu+Lu+Eu);
Lp:=100*Lu/(Cu+Lu+Eu);
Ep:=100*Eu/(Cu+Lu+Eu); WriteLn; WriteLn;

Write('Wymiana ciepła przez unoszenie: (w W/m²) = ', Cu:4:1);
Write('; (w %) = ', Cp:2:1); WriteLn;
Write('Straty ciepła na parowanie: (w W/m²) = ', Eu:4:1);
Write('; (w %) = ', Ep:2:1); WriteLn;
Write('Promieniowanie długofalowe (w W/m²) = ', Lu:4:1);
Write('; (w %) = ', Lp:2:1); WriteLn; WriteLn;
WriteLn('Zmiana zawartości ciepła w organizmie (w W/m²)=', Su:4:1);
WriteLn;
Write('<> Warunki biotermiczne ');
IF sr>2 AND Su>=-20 AND Su<=20 THEN Write('oszczędzające <>');
IF sr<=2 AND Su>-45 AND Su<=20 OR sr>=2 AND Su>20 AND Su<=45 THEN
  Write('lekkobciążające <>');
IF sr<3 AND Su>=-90 AND Su<=-45 OR sr=1 AND Su>20 AND Su<=45 OR
  sr>=2 AND Su>45 AND Su<=90 OR sr>=3 AND Su<=-20 AND Su>=-45 THEN
  Write('obciążające <>');
IF sr=1 AND Su>45 AND Su<=90 OR sr>=3 AND Su<-45 AND Su>=-90 THEN
  Write('silnie obciążające <>');
IF Su<-90 THEN Write('groźące wychłodzeniem organizmu <>');
IF Su>90 THEN Write('groźące przegrzaniem organizmu <>'); WriteLn;
  Write('* Dominujące odczucie cieplne - ');
IF (Su<-15) THEN Write('zimno *');
IF (Su>=-15) AND (Su<-5) THEN Write('chłodno *');
IF (Su>=-5) AND (Su<=15) THEN Write('komfortowo *');
IF (Su>15) AND (Su<=35) THEN Write('ciepło *');
IF (Su>35) AND (Su<=55) THEN Write('gorąco *');
IF (Su>55) THEN Write('bardzo gorąco *'); WriteLn; WriteLn;

Write('Dalsze obliczenia ?: T \ N '); ReadLn(answer);
END;
PROCEDURE UnStationary; {Bilans cieplny dla warunków niestacjonarnych}
BEGIN
  InputData; Storage; Result;

```



```

END;
PROCEDURE Stationary; { Bilans cieplny dla warunków stacjonarnych }
BEGIN
  InputData; Storage; Balance;
END;
{ Program główny }
BEGIN
  answer:='t';
  WHILE (answer='T') OR (answer='t') DO BEGIN
    Write(Chr(12)); ClrScr;
    WriteLn('          MENEX          '); WriteLn;
    WriteLn('Model Wymiany Ciepła pomiędzy Człowiekiem a Otoczeniem');
    WriteLn('Obliczenia dla warunków: '); WriteLn;
    Write('          stacjonarnych [0] '); WriteLn;
    Write('          niestacjonarnych [1] '); WriteLn;
    Write('          metodą uproszczoną [2] '); ReadLn(dat0);
    dat:=dat0+1;
    IF dat=2 THEN UnStationary;
    IF dat=1 THEN Stationary;
    IF dat=3 THEN TopoClimate;
    WriteLn; WriteLn; IF (answer='N') OR (answer='n') THEN
    WriteLn('Dziękuję za pracę z programem MENEX');
  END;
END.

```

HEAT EXCHANGE BETWEEN MAN AND HIS SURROUNDINGS IN DIFFERENT KINDS OF GEOGRAPHICAL ENVIRONMENT

Summary

The man-environment heat exchange is one of the main processes influences proper functioning of the organism. It is studied by physiologists as well as by bioclimatologists. Most of previous physioclimatological investigations were performed in climatic chambers. On the other hand bioclimatological researches were at first used with general, comparative studies of the human heat balance in different regions or seasons.

The present study based on physioclimatological investigations performed outdoors in different weather and climatic conditions as well as in different types of geographical environment. The aims of this study are:

- 1) Characteristic of man-environment heat exchange in different weather conditions and in different climatic zones.
- 2) Estimation of spatial differentiation of the human heat balance in the local scale.
- 3) Comparison of man-environment heat exchange with different clothing insulation.
- 4) Evaluation of thermal sensations and heat load in man in different environmental conditions.

The problem of solar radiation absorbance was also studied with the use of an ellipsoid model of the human body.

Field investigations of the human body heat balance were performed in the following climatic zones: maritime, temperate warm and temperate cool (North-East Poland and central Sweden), continental, temperate cool (central Mongolia), dry subtropical (South Turkmenistan – Kara kum desert) and tropical monsoon (central Vietnam). Meteorological elements (solar radiation, air temperature and humidity, wind speed, cloudiness as well as ground temperature) and skin temperature in subjects were measured simultaneously.

Heat exchange between man and his surroundings was calculated for unstationary conditions (i.e. with temporary fluctuations of meteorological parameters and mean skin temperature) with the use of the following general equation:

$$M + R + C + E + L + Res = S,$$

where M is metabolic heat production, R – absorbed solar radiation, C – convective heat exchange, E – heat loss by evaporation, L – heat exchange by long-wave radiation, Res – respiratory heat loss, S – net heat storage (i.e. change of body heat content).

Measurements of skin temperature were conducted in subjects in standing relaxed posture. Thus constant value of metabolism ($70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) was taken for the calculation of the human heat balance. Absorbed solar radiation was estimated with the use of new equation worked out for the ellipsoid model of the human body.

Obtained results allow to define some general conclusions.

– During calm weather with small cloudiness heat loss by long-wave radiation predominates within air temperature range $< 30^\circ\text{C}$ (see fig. 4.13A, 4.14A).

– During windy weather radiative heat loss is very small; with air temperature $< 25^\circ\text{C}$ convective heat loss predominates and with $T_a > 25^\circ\text{C}$ evaporative heat loss is the biggest (see fig. 4.13B, C, 4.14B, C).

– With high air temperature evaporative heat loss slightly decreases as an effect of intensive sweat evaporation which causes decrease of skin temperature (see fig. 4.13B, C).

– With air temperature higher than skin temperature income of heat by convection is observed (see fig. 4.12B).

– In studied climatic zones some differences of solar radiation absorption are noticed; it is relatively high in continental climate of Mongolia. In dry climate of Kara kum desert, where ground air layer is dust, income of solar radiation is relatively small (see tab. 4.8, 4.9).

– In climatic zones with small humidity of the air evaporative heat loss is considerably bigger than in a humid climates (see tab. 4.8, 4.9).

– The biggest differentiation of heat exchange in the local scale is observed in termoneutral conditions with small wind speed and cloudiness.

– The most intensive heat load in man is noticed inside urban areas as well as in deep, closed negative forms of terrain (see tab. 4.10).

– Insulation and colour of clothing are very important factors of heat exchange; they strongly influence intensity of particular heat fluxes as well as the rate of net heat storage and thermal sensations of man (see fig. 4.6 and tab. 4.11).

Analysis of the heat balance of man is the most complex method estimating thermal state of the organism in different environmental conditions. For its wide applying in bioclimatological researches a new model of man-environment heat exchange (MENEX) is proposed. The MENEX model includes all basis meteorological, climatological and physiological parameters as well as the clothing factor (see fig. 5.1). It is adapted for unstationary as well as for stationary conditions of heat exchange and may be used in many branches of bioclimatological studies (see fig. 5.2).

With general evaluation of bioclimate the stationary option of MENEX model is useful. The following indices should be used in this purpose: skin temperature or clothing insulation required for balancing the heat gains and losses as well as predicted net heat storage, which can occur with define clothing assemble and activity and with constant skin temperature.

The heat load in man caused by weather or other environmental factors in the unstationary conditions should be defined by the physiological quantity of net heat storage (i.e. change of body heat content) as well as by absorbed solar radiation (see table 4.12). The maximal time of exposure and structure of heat losses fluxes are the additional characteristics of the human heat balance.

The MENEX model could be applied for evaluation of heat load in man in different weather and climate conditions with varied activity and work load, for bioclimatological studies in the local scale as well as for forecasting of the thermal state of the organism.

Translated by Author

PRACE GEOGRAFICZNE IGiPZ PAN

140. Dziewoński K., Korcelli P. (red.), *Studia nad migracjami i przemianami systemu osadniczego w Polsce*, 1981, s. 267, 63 il., zł 82,—
141. Rościszewski M., Mashbits Y. S., Siemek Z. (red.), *Third World, geographical problems of development. Proceedings of the III Polish-Soviet Seminar*, Warsaw, September 1979, 1981, s. 121, zł 50,—
142. Słupik J., *Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych*, 1981, s. 98, 34 il., 10 fot., zł 32,—
143. Froehlich W., *Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej*, 1982, s. 144, 68 il., 17 fot., zł 120,—
144. Rościszewski M. (red.), *Różnicowanie się i nowe podziały światowej przestrzeni społeczno-gospodarczej*, 1983, s. 96, 13 il., zł 50,—
145. Baumgart-Kotarba M., *Kształtowanie koryt i teras rzecznych w warunkach zróżnicowanych ruchów tektonicznych (na przykładzie wschodniego Podhala)*, 1983, s. 145, 39 il., 13 fot., zł 110,—
146. Drozdowski E., *Stratygrafia i geneza osadów zlodowacenia wistulian w północnej części dolnego Powiśla*, 1986, s. 90, 22 il., 25 fot., zł 150,—
147. Kostrowicki A. S. (red.), *Studium geoekologiczne rejonu jezior wigierskich*, 1988, s. 134, 23 il., zł 210,—
148. Eberhardt P., *Regiony wyludniające się w Polsce*, 1989, s. 141, 10 map, zł 750,—
149. Szulc H., *Morfogenetyczne typy osiedli wiejskich na Pomorzu Zachodnim*, 1988, s. 138, 36 il., 3 mapy, zł 300,—
150. Leszczycki S., *Badania geograficzne nad osadnictwem w południowej Anatolii*, 1987, s. 113, 7 il., 45 fot., zł 230,—
Kawecka-Endrukajtis B., Tuszyńska-Rękawek H., *Spis zawartości Prac Geograficznych 1-150 (1954-1987)*, s. 43.
151. Rykiel Z. (red.), *Struktury i procesy społeczno-demograficzne w regionie katowickim*, 1988, s. 148, 31 il., zł 650,—
152. Korcelli P., Gawryszewski A. (red.), *Współczesne przemiany regionalnych systemów osadniczych w Polsce*, 1989, s. 176, 35 il.
153. Bogacki M. (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski południowo-wschodniej*, 1990, s. 145.
154. Dziewoński K., *Koncepcje i metody badawcze z dziedziny osadnictwa*, 1990, s. 288.
155. Kotarba A. (red.), *System denudacyjny Polski*, 1991, s. 223, 81 il.
156. Kostrowicki A. S., *System „człowiek—środowisko” w świetle teorii ocen*, 1992, s. 115, 7 il.
157. Babiński Z., *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, 1992.
158. Matuszkiewicz J. M., *Krajobrazy roślinne i regiony geobotaniczne Polski*, 1993, s. 107, 24 il., 2 mapy.

WAŻNIEJSZE DOSTRZEŻONE BŁĘDY DRUKU

| Str. | Wiersz | Jest | Powinno być |
|------|------------|----------|-------------|
| 9 | 9 od góry | ryc. 1.2 | ryc. 1.3 |
| 9 | 9 od dołu | ryc. 1.3 | ryc. 1.2 |
| 72 | 8 od góry | wild | wide |
| 91 | 1 od dołu | 1992 | 1993 |
| 95 | 21 od góry | 1991 | 1990 |
| 99 | 9 od góry | 1991 | 1990 |

A. Błażejczyk, Wymiana ciepła..

PL ISSN 0373-6547
ISBN 83-04-04170-7

<http://rcin.org.pl>

K. BŁAŻEJCZYK: WYMIANA CIEPŁA POMIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM