

**Uniwersytet Śląski**  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**„Zastosowanie termografii jako metody wspomagającej monitorowanie organizmu w czasie wysiłku sportowego u profesjonalnych sportowców.”**

Mgr. Inż. Mariusz BINEK

Promotor:

**Prof. zw. dr hab. Zofia Drzazga**

**Katowice 2022**

## OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY

Ja, niżej podpisany:

imię (imiona) i nazwisko: Mariusz Tomasz Binek

autor rozprawy doktorskiej pt. Zastosowanie termografii jako metody wspomagającej monitorowanie organizmu w czasie wysiłku sportowego u profesjonalnych sportowców.

Oświadczam, że ww. praca doktorska:

- została przygotowana przeze mnie samodzielnie,
- nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tekst jednolity Dz. U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631, z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- nie zawiera danych i informacji, które uzyskałam w sposób niedozwolony, nie była podstawą nadania stopnia doktora nauk, dyplomu wyższej uczelni lub tytułu zawodowego ani mnie, ani innej osobie.

Oświadczam również, że treść pracy doktorskiej zapisanej na przekazanym przeze mnie jednocześnie nośniku elektronicznym jest identyczna z treścią zawartą w wydrukowanej wersji pracy.

**Jestem świadomy odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia**

Miejscowość, data: .....

Podpis autora pracy: .....

**Chcę serdecznie podziękować:**

Pani prof. dr hab. Zofii Drzazdze, promotorce mojej pracy, za wieloletnią współpracę w trakcie studiów, niesamowitą cierpliwość i ciągle motywowanie do dalszej pracy, oraz za wszystkie cenne rady i dyskusje, bez których praca ta nie mogła by zostać zrealizowana.

Pani prof. dr hab. Ilonie Pokorze za umożliwienie przeprowadzenia badań na Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach, nieocenioną pomoc w zrozumieniu sportowego aspektu pracy, oraz wszelkie dyskusje, wzbogacające moją wiedzę i tą pracę.

Rodzicom - za wsparcie i pomoc, które okazywali mi przez cały czas.

Oraz wszystkim osobą, które wspierały mnie na każdym kroku realizacji tej pracy.

## Streszczenie

Obrazowanie termiczne w przeciągu ostatnich kilkunastu lat stało się pożądanym sposobem obrazowania ciała sportowców w medycynie sportowej.

W pracy przedstawiam użyteczność metody obrazowania termicznego w analizie termicznej odpowiedzi ciał profesjonalnych sportowców poddanych eksperymentalnemu wysiłkowi, oraz zmian termoregulacyjnych w nich zachodzących. Przeprowadzono analizę polegającą na rozpatrzeniu wpływu wykonania eksperymentalnego wysiłku zależnie od zawodowo uprawianego sportu, stosowania zabiegów odnowy biologicznej w saunie fińskiej oraz płci badanych zawodników. W tym celu wykorzystana została kamera termowizyjna FLIR E60, obrazy termiczne zaś zostały wykonane przed, bezpośrednio po zakończeniu przez sportowców eksperymentalnego wysiłku na bieżni, jak i 10 minutowym odpoczynku.

Określone zostały różnice w temperaturze ciała jaką osiągają sportowcy uprawiający odmienne dyscypliny sportu tzn. biegi narciarskie oraz pływanie, w przypadku gdy został u nich zastosowany ten sam eksperymentalny wysiłek. Wyraźne różnice wystąpiły również w wartościach parametrów krwi sportowców, takich jak LDH, CK czy też hemoglobina.

Z kolei wpływ zastosowania zabiegów sauny fińskiej wykazał tylko nieznaczne zmiany w termoregulacji po zastosowaniu eksperymentalnego wysiłku. Bezpośrednio po wykonaniu ćwiczenia zmierzona temperatura osiąga niewiele wyższy poziom gdy została zastosowana odnowa biologiczna w saunie fińskiej, w porównaniu do danych uzyskanych bez takich zabiegów. Natomiast po 10 minutowej restytucji zaś efekt powrotu do temperatury początkowej jest nieznacznie spłycony gdy zawodnicy brali udział w sesjach sauny. Zmiany w parametrach fizjologicznych i hematologicznych również są niewielkie, jednak po zastosowaniu zabiegów odnowy biologicznej zaobserwowano wzrost objętość osocza krwi.

Obrazowanie termiczne wykazało również, że temperatura skóry nad mięśniami kończyn dolnych w spoczynku była istotnie wyższa u mężczyzn niż u kobiet. W odpowiedzi na wysiłek fizyczny przyrost temperatury skóry nad badanymi mięśniami był zaś istotnie wyższy u kobiet niż u mężczyzn. Co ciekawe po wykonaniu wysiłku sama temperatura ciał kobiet i mężczyzn nie różniła się. Kobiety w porównaniu z mężczyznami utrzymywały także dłużej podwyższoną temperaturę nad mięśniami kończyn dolnych po wysiłku. Test wysiłkowy wykazał także istotne różnice między płciami w niektórych parametrach

fizjologicznych, takich jak maksymalna objętość tlenowa ( $VO_{2max}$ ) i metaboliczny ekwiwalent energii (MET).

W najbliższym latach, stosowanie obrazowania termicznego w tworzeniu map termicznych ciał, monitorowaniu kontuzji i prewencji przed nimi, czy termofizjologii może stać się normą w świecie sportu.

## **Abstract**

In recent years, thermovision has become a very desirable way of imaging the body of athletes in sports medicine.

In this paper, I present the usefulness of the thermal imaging method in the thermal analysis of the body response of professional athletes subjected to experimental effort, and thermoregulatory changes in their bodies during exercise. An analysis was carried out to consider the impact of performing the experimental effort depending on the professionally practiced sport, the use of biological regeneration treatments in the Finnish sauna and the sex of the participants. For this purpose, the FLIR E60 thermal imaging camera was used. Thermal images were taken before, immediately after, and after a 10-minute rest, after the athletes had performed experimental treadmill exercise.

Significant differences in the body temperature achieved by athletes practicing different sports disciplines, i.e. ski-running and swimming, were determined when the same experimental effort was used. In this case, differences were observed when comparing the group of cross-country skiers and the group of swimmers. There were also significant differences in the values of blood parameters of athletes such as LDH, CK and haemoglobin.

In turn, the impact of the use of Finnish sauna treatments showed only slight changes in thermoregulation after the experimental effort, compared to the data obtained without such treatments. Immediately after performing the exercise, the measured temperature reaches a slightly higher level when wellness treatment in the Finnish sauna was applied compared to the data obtained without such treatment. However, after 10 minutes of restitution, the effect of returning to the starting temperature is slightly shallower when the athletes participated in the sauna sessions. Changes in physiological and hematological parameters were also small, however, an increase in blood plasma volume was observed after the use of sauna treatments.

Thermal imaging also showed that at rest, the temperature of the skin over the muscles of the lower extremities was significantly higher in men than in women. In response to physical exercise, the increase in skin temperature over the examined muscles zones was significantly higher in women than in men. Interestingly, after the exercise, the body temperature of men and women did not differ. Women also maintained elevated temperature over the each muscles zones of the lower limbs after exercise for a longer time than men. The exercise test also showed significant gender differences in some physiological parameters such as maximal oxygen uptake ( $VO_2$ ) and metabolic energy equivalent (MET).

In the coming years, the use of thermal imaging in the creation of thermal maps of bodies, monitoring and prevention of injuries, or thermophysiology, may become the norm in the sports.

## Spis treści

Streszczenie.....	4
Abstract.....	5
Spis skrótów używanych w pracy .....	8
Lista publikacji wchodzących w skład pracy doktorskiej.....	9
Założenia pracy .....	10
Cel pracy.....	14
Materiał i metodyka badań .....	15
Programy wykorzystane do obróbki termogramów .....	16
Analiza Statystyczna .....	17
Omówienie Wyników .....	19
Wnioski .....	28
Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej .....	29
Publikacja nr 1 .....	29
Publikacja nr 2 .....	42
Publikacja nr 3 .....	53
Oświadczenia autora i współautorów artykułów .....	68
Dorobek Naukowy.....	74
Bibliografia .....	76

## Spis skrótów używanych w pracy

IRT – obrazowanie termiczne w bliskiej podczerwieni (ang. *Infrared thermography*)

LA – stężenie mleczanu (ang. *Lactate concentration*)

CK – kinaza kreatynowa (ang. *Creatine Kinaze*)

LDH – dehydrogenaza mleczanowa (ang. *Lactate Dehydrogenase*)

VO<sub>2max</sub> – maksymalna objętość tlenowa (ang. *Maximal oxygen uptake*)

AT – próg mleczanowy (ang. *Anaerobic Threshold*)

MHA – średnia adaptacja termiczna (ang. *medium heat adaptation*)

UA – kwas moczowy (ang. *Uric acid*)

MET – metaboliczny ekwiwalent energii (ang. *Metabolic energy equivalent*)

W – średnia moc osiągnięta w czasie biegu

EE – wydatek energetyczny (ang. *Energy expenditure*)

Hb – hemoglobina (ang. *Hemoglobin*)

HR – puls (ang. *Heart rate*)

WR – obciążenie (ang. *Work load*)

V – prędkość na maksymalny pułapie tlenowym (ang. *Velocity*)

T1 – temperatura skóry przed wysiłkiem

T2 – temperatura skóry po wysiłku

T3 – temperatura skóry po okresie restytucji



## Lista publikacji wchodzących w skład pracy doktorskiej

Prezentowana rozprawa doktorska opiera się na serii 3 publikacji naukowych dotyczących metody obrazowania termowizyjnego ciał wysoko wyspecjalizowanych sportowców oraz analizy otrzymanych termogramów. Analizie poddano grupy biegaczy narciarskich (w 3 publikacjach) i pływaków (jedna publikacja). W skład serii publikacji wchodzi trzy prace:

1. Publikacja:

Z. Drzazga, **M. Binek**, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa **“A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise”**; in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>

2. Publikacja:

Z. Drzazga, **M. Binek**, I. Pokora **“Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?”**; in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>

3. Publikacja:

**M. Binek**, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora **„Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?”** ”; Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

## Założenia pracy

Metoda obrazowania termograficznego w podczerwieni (IRT – ang. *Infrared thermography*) jest znaną i akceptowaną w świecie metodą pomiaru temperatury. Początki jej użyteczności w badaniach medycznych szacuje się na lata 30 XX wieku (Verdasco, 2013), jednak same podstawy takie jak wykrycie promieniowania podczerwonego zostały za postulowane już na przełomie XVIII i XIX wieku przez Wiliama Herschela, który najpierw na podstawie obserwacji astronomicznych a następnie zaprojektowanego przez siebie eksperymentu wykazał różnice w promieniowaniu cieplnym w wiązce światła słonecznego (Herschel, 1800; Priego Quesada, 2017), tym samym wykrywając promieniowanie podczerwone. Rozwój badań nad odkryciem Herschela zawdzięczamy jego synowi Johnowi Herschelowi, który w następnych latach rozwinął myśl ojca. Jak również stworzył własny eksperyment, w którym otrzymał pierwszy obraz nazwany „termogramem”, termin ten jest używany po dzień dzisiejszy (Ring, 2006.). Następne lata przynosiły kolejne odkrycia, które przyczyniły się do powstania i rozwoju technologii termograficznej. Szczególnie ważne prawa takie jak: prawo Stefana-Boltzmana, prawo przesunięć Wiena oraz zaproponowany przez G. Kirhoffa opis promieniowania ciała doskonale czarnego, powstałe w XIX wieku i potwierdzone eksperymentem oraz prawem Plancka doprowadziły w następstwie odkryć do powstania i rozwoju detektorów promieniowania podczerwonego. Pierwszy detektor – bolometr, zaprojektowany został już w 1880 roku przez Langley’a, którego pomysł był rozwijany przez następne lata doprowadzając do tego, że możliwe było zmierzenie temperatury ciała krowy z około 400 metrów (Rogalski, 2002). Wynalezienie bolometru jest uważane za jedno z najważniejszych w kontekście rozwoju kamer termowizyjnych.

Duży rozwój w metodzie detekcji promieniowania cieplnego za pomocą termografii nastąpił podczas II wojny światowej, w czasie której w detektory wyposażone w fotopowielacze służyły snajperom do odnajdywania celów (Rogalski, 2002; Ring, 2012). W podobnym czasie powstały także detektory wykorzystujące z antymonku indu, chłodzone ciekłym azotem, które nie zdobyły popularności w militariach jednak stały się użyteczne w innych badaniach (Ring, 2006; Ring, 2012).

Rozwój technologii termograficznej jaki nastąpił w następnych dziesięcioleciach pozwolił na zapoczątkowanie używania jej również w medycynie. Pierwsze próby jej medycznego zastosowania miały miejsce już w latach 30 XX wieku, jednak do szerszego użytku została wprowadzona na początku lat 60 (Czerny, 1929; Skversky, 1964; Jones, 1998; Lahiri, 2012). Pierwsze oficjalne doniesienia dotycząca aplikacji termografii w medycynie

dotyczyły m.in. diagnozy chorób naczyń obwodowych (Skversky, 1964), wykrywania niedokrwiennych neuropatii (Marinacci, 1965) czy wykorzystania metody w położnictwie i ginekologii (Birnbbaum, 1964). W następnych latach, wraz z rozwojem jakości kamer termowizyjnych oraz analiz numerycznych otrzymywanych danych termicznych (Costello, 2013), wykorzystanie tego narzędzia rozpowszechniło się jeszcze bardziej co w następstwie doprowadziło do ustandaryzowania metody, opisaną przez Ring i Ammera w roku 2012 (Ring&Ammer, 2012), oraz podobnego przeglądu metody zaproponowanego przez Lahiriego (Lahiri, 2012). W pracach tych wykazano następujące zastosowania medyczne IRT w medycynie: ocena termoregulacji, ocena stanu psychicznego, zastosowania dermatologiczne, diagnostyka stanów zapalnych zapalenie stawów, wykrywanie raka piersi, badania przesiewowe gorączki, diagnostyka stomatologiczna, monitorowanie ciśnienia krwi, diagnostyka chorób reumatycznych, ocena fibromialgii, diagnostyka chorób wątroby, diagnostyka neuropatii cukrzycowej i zaburzeń naczyniowych, badanie uzupełniające w leczeniu nerek, zastosowania ginekologiczne, diagnostyka zespołu suchego oka i chorób oczu (Ring&Ammer, 2012; Lahiri, 2012). Za rok oficjalnego uznania obrazowania IRT za użyteczne narzędzie diagnostyczne uważa się powszechnie rok 1987, w którym metoda została zaakceptowana przez American Medical Council.

Zastosowanie IRT w naukach o sporcie datuje się na około 10 lat później niż początki jego stosowania w medycynie. Jednak początkowa ilość podejmowanych badań nie była duża, za pierwszą naukową dysertację na temat użycia IRT w sporcie uważa się artykuł z roku 1975 "Thermography in sport injuries and lesions of the locomotor system due to sport" Keyl'a i Lenharta'a, opublikowany w niemieckim czasopiśmie Fortschritte der Medizin (Keyl&Lenhart, 1975). Zdecydowany wzrost publikowanych badań z użyciem obrazowania termicznego nastąpił wraz z początkiem XXI wieku i trwa do dzisiaj. Ten wzrost zainteresowania metodą w środowisku sportowym tłumaczyć można zaletami termografii względem innych metod pomiarowych, gdyż jest ona kompletnie nieinwazyjna, nie wpływa na naturalną termoregulację ciała ludzkiego, a także w ostatnich latach stała się metodą stosunkowo tanią. Do najważniejszych pytań, na które staramy się odpowiedzieć za pomocą badań z użyciem IRT w sporcie należą:

- wykorzystanie metody w medycynie sportowej – kontrola kontuzji i prewencja przed nimi;
- pomiary temperatury stroi sportowych;
- pomiary temperaturowe u zwierząt hodowanych i trenowanych do celów sportowych;

- termofizjologia → badania termoregulacji ciała sportowców w czasie treningu jak i zawodów;
- rozwoju metodologii i samej metody, porównując wyniki z innymi technikami badawczymi.

Zdecydowanie największy udział w tematyce badawczej mają właśnie medycyna sportowa i termofizjologia, stanowiące łącznie 71% wszystkich publikacji (Priego Quesada, 2017).

Termoregulacja w ciele ludzkim jest definiowana jako całościowe reakcje fizjologiczne mające za zadanie utrzymać temperaturę wewnętrzną w granicach odchylenia o kilka dziesiątych stopnia Celsjusza od przyjętej temperatury 37°C, niezależnie od wykonywanych czynności i wpływu środowiska. Za koordynowanie tym procesem odpowiada głównie podwzgórze mózgu, które integruje bodźce temperaturowe pochodzące z termoreceptorów skóry, rdzenia oraz samego podwzgórza (Charkoudian, 2016; Kenny, 2010). Innymi czynnikami wpływającymi na termoregulację, tzw. czynniki nietermiczne, są np. pocenie się (Kenny, 2010). Ogólnie za wymianę ciepła odpowiadają procesy konwekcji, przewodzenia oraz wypromieniowywania. Rozważając jednak termoregulację w organizmach ludzkich koniecznym jest dodanie do nich proces pocenia się oraz oddychanie. Przy wykonywaniu wysiłku sam proces parowania potu ze skóry uważa się za główny mechanizm odprowadzania ciepła. Prowadzi on w efekcie do spadku temperatury skóry, przy czym za szybkość pocenia się odpowiadają, temperatura otoczenia, bezwzględna produkcja ciepła oraz intensywność podejmowanego wysiłku (Cramer, 2016). Również wilgotność powietrza wpływa na proces odparowywania potu, który jest do niej odwrotnie proporcjonalny (Cuddy, 2014). Utrata ciepła w czasie oddychania jest niewielka, jednak również może mieć wpływ na cały proces termoregulacji ciała. W tym przypadku ciepło tracone jest głównie przy wydechu poprzez mechanizmy konwekcji cieplnej i parowania, zaś jego utrata jest wyższa w zimnym i suchym otoczeniu (Cramer, 2016). Poznanie procesów termoregulacyjnych zachodzących w ciele sportowców podczas wysiłków jest niezwykle ważnym aspektem planowania treningów oraz ewaluacji ich wpływu na organizm. Może też pomóc w unikaniu kontuzji oraz dać istotne informacje jak zwiększyć wydajność organizmu. (Lim, 2008).

Dla sportów takich jak biegi narciarskie czy pływanie, będące jednym z najbardziej wymagających sportów, kładącym nacisk na wytrzymałość i wysoką wydajność mięśni, mapowanie termiczne wydaje się być przydatne do oceny wielu zmiennych, które mogą oddziaływać na sportowców. Można to wyraźnie zaobserwować między innymi w szeregu właściwości biochemicznych i hematologicznych, które w próbkach krwi pobranych w spoczynku, jak i po wysiłku, wykazują znaczne różnice między sportowcami, a osobami z

ogółu ludności. Najbardziej charakterystyczne odpowiedzi dają stężenie mleczanu (LA – ang. *Lactate concentration*) oraz aktywność kinazy kreatynowej (CK – ang. *Creatine kinase*) i dehydrogenazy mleczanowej (LDH – ang. *Lactate dehydrogenase*) (Banfi, 2012; Brancaccio, 2007). Pierwszy z nich odpowiada za zakwaszenie organizmu w czasie treningu, dwa kolejne zaś są markerami powstających podczas trwania wysiłku mikrouszkodzeń mięśniowych.

Narciarstwo biegowe to jeden z najbardziej wymagający sport wytrzymałościowy, który wymaga jednego z najwyższych wartości poboru tlenu. Najmocniej obciążane w czasie jego uprawiania są mięśnie nóg i kończyn górnych, co związane jest z ruchem wykonywanym podczas uprawiania sportu. Aby osiągnąć światowy poziom w zawodach, narciarze muszą sukcesywnie zwiększać czynniki fizjologiczne wpływające na prędkość maksymalną na nartach, takie jak siła mięśni i zdolność do generowania dużej mocy (Losnegard, 2011; Stoggl, 2011). Wydaje się też, że pomocne w osiągnięciu wybitnych rezultatów jest zwiększanie pojemności cieplnej ciała.

Analizy zmian temperatury skóry prowadzą do otrzymania bardzo ważnych diagnostycznie informacji, które po odpowiedniej interpretacji i implementacji do planów treningowych dają efekty w uzyskiwanych wynikach sportowych

## Cel pracy

Praca miała na celu ewaluację wpływu zaprojektowanego wysiłku eksperymentalnego na temperaturę ciała uczestników badań, w opisywanym przypadku – profesjonalnych sportowców, zależnie od określonych wcześniej zmiennych: rodzaju uprawianego sportu; zażywania odnowy biologicznej a także płci. Otrzymane wyniki obrazowania termicznego mogą być użyteczne w kontroli stanu fizjologicznego sportowców, jak również w przygotowaniu i rozwijaniu indywidualnych planów treningowych. Publikacje omawiają następujące problemy:

1. Określenie różnicy w odpowiedzi termicznej organizmu sportowców na eksperymentalny wysiłek, zależnie od typu uprawianego przez nich zawodowo sportu. Jako reprezentatywne sporty wybrano biegi narciarskie i pływanie, kryterium wyboru stanowiła zaś ich całkowicie inna naturalna charakterystyka zmęczeniowa, jak i środowisko w jakim zazwyczaj podejmowany jest wysiłek. W publikacji omawiającej powyższe zagadnienie określono również różnice w parametrach fizjologicznych, a także parametrach hematologicznych krwi pomiędzy grupami sportowców, zarówno przed jak i po wykonaniu treningu. Eksperyment wykazał zasadność wykorzystania eksperymentalnego wysiłku i jego efekt dla obu rozważanych sportów. Otrzymane dane pozwoliły również na głębszą ewaluację wpływu wysiłku na ludzki organizm.
2. Różnica w odpowiedzi termicznej na wykonanie tego samego wysiłku biorąc po uwagę płeć zawodników. Eksperyment uwzględnił grupę sportowców uprawiających zawodowo biegi narciarskie.
3. Wpływ zażywanej przez sportowców odnowy biologicznej, w tym przypadku sauny fińskiej, na charakterystykę temperaturową ciała uzyskiwaną w trakcie wysiłku eksperymentalnego. Przeanalizowano również wpływ adaptacji cieplnej na osiągnięte wyniki oraz na zmiany w termoregulacji zachodzące u badanych sportowców.

W ogólnym rozrachunku badania prowadzą do rozpowszechnienia zaproponowanych metod w środowisku sportowym, jak również rozszerzają znacząco wiedzę z zakresu termoregulacji organizmu profesjonalnych sportowców.

## Material i metodyka badań

Grupy badawcze zostały zrekrutowane spośród zawodników uprawiających sport wyczynowo – tj. biorących udział w zawodach międzynarodowych oraz będących studentami Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach. Grupa biegaczy narciarskich złożona była przez cały okres trwania badań z tych samych ochotników, zarówno wśród mężczyzn jak i kobiet. Ich liczba różniła się zależnie od dostępności zawodników na miejscu w chwili przeprowadzania eksperymentu. Grupa pływaków została wyselekcjonowana przez trenerów z najlepszych zawodników Katowickiego AWF-u, stąd wynika niewielka liczebność owej grupy.

Dla każdego z uczestników, przed przystąpieniem do udziału w eksperymencie przeprowadzone, zostały testy objętości maksymalnej tlenu ( $VO_{2max}$ ). Test ten umożliwił następnie dostosowanie wysiłku, tak aby przy wykonywaniu eksperymentalnego układu wysiłkowego wynosił on 80% ich wydolności tlenowej. Celem lepszego określenia indywidualnego obciążenia jakiemu zostali poddani poszczególni zawodnicy określono także ich próg mleczanowy (AT) – wyznaczony za pomocą pomiaru koncentracji mleczanów w próbce krwi pobranej w trakcie przebiegu testu poprzedzającego eksperyment. Próg mleczanowy wyznaczono jako punkt (obciążenie pracą), w którym ilość mleczanu we krwi wzrastała wykładniczo.

Do wykonania pomiarów użyto kamery termowizyjnej firmy FLIR System, model E60, o rozdzielczości przestrzennej 320×240 pikseli oraz czułości na poziomie 0,05K. Kamera została skalibrowana za pomocą ciała doskonale czarnego, a jej emisyjność ustalono między 0,97–0,98. Pomiaru zostały wykonane w zgodzie z ogólnie przyjętym Protokołem Glamorgane (Ammer, 2008), oraz z wytycznymi dla obrazowania termograficznego w sporcie i medycynie sportowej zaproponowanego przez Moreire (Moreira, 2017).

Układ eksperymentalny przyjęty w każdej z opisywanych publikacji został zaprojektowany w następujący sposób:

Wszyscy uczestnicy, po uprzednim określeniu indywidualnej wartości obciążenia, zostali poddani wysiłkowi eksperymentalnemu składającemu się z biegu na bieżni mechanicznej trwającemu jedną godzinę. Wysilek ten, przy zastosowaniu odpowiednio wyliczonych obciążeń, zapewniał zbliżony efekt zmęczeniowy w stosunku do pojedynczych jednostek treningowych stosowanych w przygotowaniu do zawodów. Wszyscy uczestnicy badania byli w momencie podjęcia wysiłku całkowicie zdrowi pod względem fizycznym a także nie stwierdzono u nich w przeszłości problemów kardiologicznych. Poinstruowano ich również,

aby w dniu eksperymentu oraz wieczorem dnia poprzedniego unikali używek taki jak alkohol, papierosy czy też kofeina; dużych posiłków, a także nie używali kosmetyków mogących spowodować zaburzenia pomiaru.

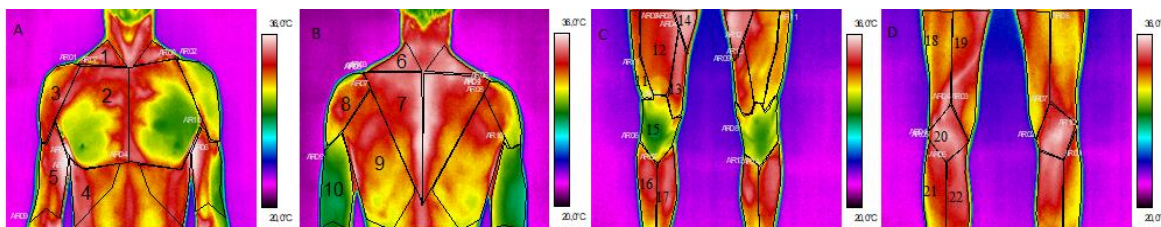
Przed samym wysiłkiem dokonane zostały pomiary somatyczne oraz spoczynkowe pomiary termograficzne każdej z badanej osób. Następnie uczestnicy wykonywali ćwiczenie eksperymentalne przez godzinę lub do odmowy jego kontynuacji ze względu na krańcowe wycieńczenie. Bezpośrednio po zejściu z bieżni po raz kolejny wykonywane były obrazowania termograficzne ciała, jak również uczestnikom pobierano krew celem wykonania badań hematologicznych. Po tym czasie sportowcy pozostawali w wyznaczonym pomieszczeniu odpoczywając przez 15 minut, po których ostatni raz zostali zeskanowani kamerą termowizyjną.

W publikacjach 1 i 3 układ wysiłkowy był wykonywany przez sportowców jednokrotnie, w ciągu jednego dnia pomiarowego. Zaś w drugiej publikacji, przez wzgląd na specyfikę badań, uczestnicy zostali poddani opisywanemu procesowi dwukrotnie, w pierwszej przed serią zabiegów odnowy biologicznej (kąpiele w saunie fińskiej), a następnie po serii tych zabiegów

### **Programy wykorzystane do obróbki termogramów**

Do opracowania obrazów termograficznych zastosowano program ThermoCam TM Researcher Pro 2.8 SR-3. Ciało każdego z uczestników podzielono na 22 obszary, odpowiadające obszarom na skórze, pod którymi przebiegały dane mięśnie. Sam algorytm podziału ciała został zapożyczony z publikacji „Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography” I. Fernandez-Cuevas (Fernandez-Cuevas, 2017). W oknie programu manualnie obrysowano strefy mięśniowe dla każdego badanego, z których następnie odczytano średni pomiar wartości temperatury oraz jej odchylenie standardowe. Przykładowe obrazy wraz z podziałem na strefy mięśniowe możemy zobaczyć na rysunku 1.





Rys. 1. Przykładowy obraz spoczynkowy ciała z podziałem na 22 strefy mięśniowe wg. publikacji [Fernandez-Cuevas]. Mięśniebrane pod uwagę w eksperymencie: 1. czworoboczny, 2. piersiowy wielki, 3. naramienny, 4. zębaty przedni, 5 biceps, 6 czworoboczny (część szyjna), 7 czworoboczny (część pleców), 8 tył naramiennego, 9 najszerszy grzbietu, 10 triceps, 11 obszerny boczny, 12 prosty uda, 13 obszerny przysródkowy, 14 mięśnie okolic kości łonowej, 15 kolano, 16 piszczelowy przedni, 17 płaszczkowaty, 18 dwugłowy uda, 19 pozostałe mięśnie uda, 20 kolano (tył), 21 brzuchaty łydki (głowa boczna), 22 brzuchaty łydki (głowa przysródkowa).

W badaniach nie dzielono mięśni ze względu na rozpatrywaną stronę ciała, ponieważ ze wstępnych pomiarów otrzymano wysoką zgodność pomiarów dla lewej i prawej części ciała. Wynik ten jest także zgodny z literaturą (Novotny, 2015).

## Analiza Statystyczna

Analizy statystyczne przeprowadzono w programie Statistica 12.

W pierwszym artykule wykorzystano do porównań zmiennych test Wilcoxona i sparowany testu t-Studenta. Współczynniki korelacji między dwiema zmiennymi obliczono zaś za pomocą macierzy korelacji Pearsona.

W kolejnej, drugiej pracy wszystkie dane sprawdzano pod kątem normalności testem Shapiro–Wilka, a następnie analizowano je testami t, jeśli zaś było to konieczne, nieparametrycznym testem Manna–Whitneya. Parametry temperatury analizowano przy użyciu jednoczynnikowej analizie wariancji dla powtarzanych pomiarów ANOVA. Jednorodność wariancji zweryfikowano testem Levena. Oszacowano również wielkość efektu grupowego w ocenie rozkładu temperatury powierzchniowej w ciele za pomocą testu ANOVA.

W publikacji 3, podobnie jak poprzednio zastosowano test t–Studenta i test Cochran–Coxa. Aby sprawdzić normalność rozkładu wykorzystano test Shapiro–Wilka oraz test jednorodności wariancji Levene’a. Do oceny wpływu płci i wysiłku na parametry fizjologiczne zastosowano jednokierunkową analizę wariancji z powtarzanymi pomiarami (ANOVA, płeć × ćwiczenia) oraz test *post hoc* Tukeya. Wielkość efektu z jednokierunkowej analizy ANOVA została obliczona ze względu na małą liczbę badanych osób w rozważanych

grupach. Zbadano również korelacje między parametrami fizjologicznymi a zmianami średniej temperatury skóry.

Istotność statystyczną dla wszystkich badań ustalono na  $p < 0,05$ .

## Omówienie Wyników

Specyficzność ćwiczeń przygotowywanych dla profesjonalnych sportowców jest bardzo ważną częścią planowania treningu, która może przyczynić się do zwiększenia wydolności organizmu oraz do polepszenia osiąganych przez zawodników rezultatów. Z tego powodu do sportu coraz obszerniej wprowadzane są metody analizy oparte na fizycznej analizie odpowiedzi ciała na bodźce treningowe (Hildebrand, 2012; Marins, 2015; Arfaoui, 2012). Wraz ze wzrostem użyteczności takich metod, jak obrazowanie termiczne wiedza o odpowiedzi termicznej ciała na wysiłek znacznie się rozszerza, dając możliwość szybkiej i nieinwazyjnej kontroli nad tym procesem. Co w przypadku sportowców pozwoli np. uniknąć kontuzji przeciążeniowych.

W mojej pracy doktorskiej chciałem omówić kilka problemów związanych z regulacją termiczną ciała występujących w trakcie wykonywania treningu wysiłkowego. W tym celu przeanalizowałem i porównałem wyniki obrazowania termicznego, a także pomiarów parametrów biochemicznych krwi i parametrów fizjologicznych ciała, profesjonalnych sportowców zrekrutowanych spośród studentów Katowickiej Akademii Wychowania Fizycznego, będących przy tym członkami drużyn narodowych w biegach narciarskich oraz pływaniu. Otrzymane przeze mnie dane termiczne opisane w 3 pracach mogą mieć istotny wpływ na planowanie treningów u tych zawodników oraz mogą stanowić część nowoczesnego systemu ewaluacji treningu.

Pierwszy artykuł (numer 1.) na liście: (Z. Drzazga, **M. Binek**, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa “**A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise**” in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>) przedstawia porównanie wpływu zaprojektowanego eksperymentalnego wysiłku na temperaturę oraz biochemie krwi dwóch grup sportowców o diametralnie innym ukierunkowaniu w codziennym treningu. Główną motywacją do podjęcia takich pomiarów było głębsze poznanie odpowiedzi termicznej ciała ludzkiego na obciążenie wysiłkowe. Otrzymane wyniki znacząco mogą wpływać również na sam proces konstruowania planów treningowych sportowców. Decydującą zaletą metody termograficznej jest niewątpliwie jej bezinwazyjność, co jest szczególnie istotne w sporcie na poziomie profesjonalnym. Wartym odnotowania jest fakt, iż porównania różnych sportowców niejednokrotnie występowały w literaturze, jednakże nie poruszano wcześniej zagadnień porównania efektu

termoregulacyjnego uzyskanego u sportowców z dwóch różnych grup wykonujących ten sam wysiłek.

W omawianym w publikacji eksperymencie pierwszą grupę badawczą stanowili biegacze narciarscy, drugą zaś pływacy. Grupy te wybrano celowo mając na uwadze diametralne różnice w naturalnym wysiłku wykonywanym przez zawodników w czasie praktykowania ich dziedzin sportów. Dlatego wybrano dwie różne grupy badawcze i poddano je identycznemu wysiłkowi eksperymentalnemu. Przy czym, obie grupy zbliżone były pod względem wieku jak i poziomu wytrenowania.

Praca opiera się na porównaniu wartości temperaturowych, biochemicznych i fizjologicznych otrzymanych dla poszczególnych grup, a także analizie korelacji pomiędzy nimi. Badania termograficzne przeprowadzone zarówno przed jak i po wysiłku pozwoliły na wyliczenie zmian w temperaturach otrzymanych nad każdą określoną strefą mięśniową. Uzyskane wyniki pokazały, że reakcja termiczna organizmu sportowców na wysiłek eksperymentalny jest silnie związana z typem uprawianego przez nich zawodowo sportu, co postulowano również wcześniej (Tanda, 2016; Roels, 2005). Ciekawą zależność wykazały również średnie różnice temperatur zmierzone po zakończeniu wysiłku, względem tych otrzymanych przed jego wykonaniem. Diametralnie odwrotne tendencje, tj. duże spadki temperatur w górnej części ciała u biegaczy narciarskich odpowiadają nieznacznym wzrostom temperatur w tej części ciała u pływaków, podczas gdy w dolnej części ciała nieznaczne spadki u biegaczy odpowiadają istotnym wzrostom temperatur u pływaków, dobitnie pokazują użyteczność termografii w planowaniu i kontroli jednostek treningowych profesjonalnych sportowców. Dodatkowo matematycznie wyliczyłem również temperaturę całego ciała dla poszczególnych uczestników. Oba przyjęte algorytmy obliczeniowe wykazały ogólną odwrotną tendencje w dystrybucji temperatury po wykonaniu wysiłku zależnie od uprawianego sportu. Potwierdzają one tym samym zasadność używania metody termograficznej. Informacje na temat przewodzenia cieplnego ciała w trakcie wysiłku uzyskane w doświadczeniu mają bardzo duże znaczenie w opracowywaniu modeli fizjologicznych sportowców.

Analizując parametry biochemiczne krwi pobranej od zawodników zarówno przed jak i po zakończeniu wysiłku, nie znalazłem różnic, jeśli chodzi o zakwaszenie organizmu czy koncentrację hemoglobiny. Nie znaczy to jednak, że pomiary takie nie są przydatne. Wręcz przeciwnie, dają wiele kluczowych informacji dla sportowców. W swojej pracy wykazałem zdecydowane różnice w poziomie występujących u sportowców markerów mikrouszkodzeń mięśniowych takich jak kineza keratynowa oraz dehydrogenaza mleczanowa. Zdecydowanie

mniejsza ich koncentracja występuję u pływaków niż u biegaczy narciarskich, zarówno przed jak i po eksperymentalnym wysiłku. Sugeruje to mniejszą podatność na mikrouszkodzenia tej grupy sportowców (tzn. pływaków). Co ciekawe, porównując sam przyrost wartości koncentracji tych parametrów w czasie wykonywania eksperymentalnego wysiłku różnic tych nie uzyskano, tzn. przyrosty tych markerów osiągnęły zbliżony poziom. W związku z powyższym, możliwe jest stwierdzenie, że przy założonym progu tlenowym obciążenia samo zmęczenie mięśni nie powinno zależeć od typu zawodowo uprawianego sportu. W parametrach fizjologicznych nie uzyskałem żadnych istotnych różnic między grupami, jednakże był to wynik spodziewany, założony przy planowaniu eksperymentu, mający na celu jak najdokładniejsze dopasowanie badanych grup badawczych.

W pracy przeprowadziłem również analizę korelacji między temperaturą, a danymi biochemicznymi i fizjologicznymi. Do ich zbadania wykorzystałem algorytm macierzy korelacji Pearsona. Ilość uzyskanych korelacji jest mała, co wydaje się być związane z niewielką ilością badanych, jednakże występują w nich wyraźne rozgraniczenia zależne od uprawianego przez ochotników profesjonalnie sportu. Silne korelacje z średniej temperatury nad mięśniami po wysiłku, liczone do parametrów fizjologicznych takich jak maksymalne obciążenie, czy maksymalny pobór tlenu występują zdecydowanie częściej w przypadku grupy pływaków niż w grupie biegaczy narciarskich. Wskazuje to na mniejszą specyficzność założonego eksperymentalnego wysiłku dla tych sportowców. Kolejno zbadalem współczynniki korelacji temperaturowej z procentową zawartością tłuszczu dla obu grup sportowców. Wyższe współczynniki korelacji w tym przypadku uzyskano w większości stref mięśniowych pływaków, w porównaniu z biegaczami narciarskimi. Zdecydowanie mniej korelacji znalazłem porównując parametry biochemiczne krwi ze średnią temperaturą nad mięśniami. Korelacje z koncentracją mleczanów – LA oraz poziomem dehydrogenazy mleczanowej – LDH występują rzadko, głównie u pływaków, i są silnie związane są z rozmieszczeniem włókien mięśniowych (wolno- i szybko- kurczliwe) występujących w danym mięśniu (w tym przypadku mięśnia brzuchatego łydki oraz mięśnia płaszczkowatego). Dane te, choć nieliczne, dostarczają wiele istotnych informacji i są pomocne zarówno w ocenie wydolności sportowców jak i planów treningowych.

Kolejnym problemem, którego analizy starałem się dokonać w trakcie omawianych badań był wpływ regularnych zabiegów odnowy biologicznej na temperaturę jaką uzyskują ciała sportowców podczas treningu (publikacja 2). Odnowa biologiczna jest niezbędna dla każdego profesjonalnego sportowca zarówno w czasie regeneracji po zawodach jak i w samym procesie treningowym dla zwiększenia jego wydolności. Dlatego konieczne jest dobre

poznanie jej wpływu na termoregulację ciała zawodników, co w efekcie pozwala dobrać odpowiednie zabiegi regeneracyjne. W tym miejscu zdecydowanie duże pole do zastosowania ma właśnie obrazowanie termowizyjne. Wybrany w drugiej pracy zabieg odnowy biologicznej – regularna kąpiel saunie fińskiej, jest szeroko stosowany zarówno w medycynie do leczenia zaburzeń sercowo-naczyniowych (Kihara, 2002,2004; Imamura 2001), jak i w sporcie (Pilch, 2013; Niewiadomy 2016). Wpływ sauny na ciało ludzkie opiera się głównie na zwiększeniu jego obciążenia termoregulacyjnego i krążeniowego. W celu utrzymania homeostazy termicznej organizm aktywnie odpowiada na mechanizmy termoregulacyjne. W sportach wymagających dużej wytrzymałości jest to efekt pożądany, a wystawienie zawodników na pasywne ogrzewanie w saunie pomaga w poprawie wydolności (Scoon, 2007; Ernst, 1986). Innym zbiegiem, który również jest uważany za korzystny jest między innymi krioterapia całego ciała.

W drugim artykule (Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora **“Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?”** in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>) podjąłem temat wpływu regularnego stosowania odnowy biologicznej w suchej saunie fińskiej na temperaturę skóry profesjonalnych biegaczy narciarskich, podczas wykonywania eksperymentalnego ćwiczenia wysiłkowego, jak również na uzyskiwane parametry fizjologiczne i hematologiczne. Analiza zagadnienia odnowy biologicznej jest konieczna dla rozwoju i wzrostu sportowego u zawodników, a jej głębsze poznanie dla mechanizmów termoregulacyjnych zachodzących w organizmie. Samo zastosowanie kąpeli w saunie fińskiej jest szeroko akceptowanym zabiegiem w medycynie sportowej. Wspomaga ona regenerację oraz podnosi wydolność organizmu. Jej wpływ na ciało ludzkie wiąże się bezpośrednio ze wzrostem zapotrzebowania krążeniowego i termoregulacyjnego – ciało dążąc do homeostazy wzmacnia swoje działania. Pozytywne skutki zastosowania tego sposobu odnowy biologicznej u sportowców trenujących sporty wytrzymałościowe, takie jak biegi narciarskie, wcześniej wiązano ze wzrostem objętości krwi w ciele (Scoon, 2007; Ernst, 1986), jednak zgodnie z uzyskanymi przeze mnie wynikami okazuje się, że owych pozytywnych skutków stosowanych zabiegów jest o wiele więcej. Protokół przeprowadzenia eksperymentalnego ćwiczenia pozostał tożsamy do tego zastosowanego w pierwszej publikacji, natomiast uzupełniono go o pomiar po 10 minutowym czasie restytucji mający na celu pokazanie powrotu organizmu do stanu spoczynkowego. Obrazowanie termograficzne zostało w tym przypadku przeprowadzone dla ochotników

dwukrotnie, najpierw przed serią zabiegów odnowy w saunie, a następnie po dwóch tygodniach ich stosowania.

Podobnie jak w przypadku omawianych uprzednio badań, uzyskano wyraźny spadek temperatury po zastosowaniu wysiłku eksperymentalnego nad mięśniami górnej części ciała, szczególnie pleców, podczas gdy w dolnej nastąpił niewielki jej wzrost nad danymi strefami mięśniowymi, istotny jedynie dla przodu kolan. Zależność ta zachowana zostaje także po zastosowaniu zabiegów w saunie, przy czym następuje jej pogłębienie tzn. osiągnięte temperatury są wyższe niż przed zabiegami odnowy biologicznej. Pomiar wykonany 10 minut po zakończeniu eksperymentalnego ćwiczenia wysiłkowego obrazujący powrót temperatury skóry do stanu równowagi wykazał dalszy jej spadek w górnych częściach ciała oraz pojawienie się tendencji spadkowych w partiach dolnych. Efekt ten w nieznacznie tylko pogłębionej formie (mało istotne przyspieszenie powrotu) utrzymuje się także po zastosowaniu odnowy w saunie fińskiej. Dla pełniejszego zobrazowania procesów termoregulacyjnych przeprowadzona została także analiza wyliczonych średnich zmian temperatur określonych jako różnice:  $\Delta T(T_2-T_1)$  oraz  $\Delta T(T_3-T_1)$ , gdzie za  $T_1$  przyjęto temperaturę spoczynkową przed wysiłkiem, za  $T_2$  temperaturę bezpośrednio po wysiłku, i za  $T_3$  temperaturę po 10 minutach restytucji. Zastosowanie MHA (ang. *medium heat adaptation* – średnia adaptacja termiczna) nie spowodowało żadnych istotnych różnic w charakterze zmian temperaturowych skóry  $\Delta T_{2-1}$  nad danymi strefami mięśniowymi w porównaniu z wynikami uzyskanymi bez jej zastosowania. Wpłynęło ono jednakowoż nieznacznie na amplitudę zmian temperaturowych części wybranych obszarów. Spłyceciu uległ efekt ochłodzenia w górnych partiach ciał zawodników, zaś pogłębieniu efekt wzrostu temperatury w partiach dolnych. Co ciekawe po czasie restytucji, wyliczając zmiany  $\Delta T_{3-1}$ , efekt zastosowania sauny staje się praktycznie niewidoczny – uzyskane wyniki osiągają bardzo zbliżony poziom. Interesujące wydaje się też zestawienie tych wyników z danymi otrzymanymi w badaniach efektu zastosowania krioterapii u tych samych sportowców. Wyniki analiz danych uzyskanych w czasie pomiarów po zabiegach krioterapii nie były publikowane wcześniej, jednak prezentowałem je na międzynarodowej konferencji w Rzymie CEEC-TAC5 & Medicta2019 (zaprezentowana prezentacja w suplemencie). W przypadku takiej odnowy biologicznej uwagę zwracają dość istotne zmiany w charakterze zmian temperaturowych w czasie restytucji po wysiłku w dolnej części ciała sportowców, porównując względem otrzymanych po zabiegach w saunie fińskiej. Mianowicie, zastosowanie zabiegów zimnem spowodowało przedłużanie efektu utrzymywania się

podwyższonej temperatury w wybranych w eksperymencie strefach mięśniowych (schemat taki sam jak w publikacji dotyczącej sauny). Można stąd wnioskować zmniejszenie aktywności termoregulacyjnej po krioterapii, względem zastosowania MHA.

Jeśli chodzi o parametry fizjologiczne, zastosowanie odnowy w saunie spowodowało u badanych sportowców nieznaczne zmiany w ich poziomie. Po serii zabiegów MHA puls sportowców był nieznacznie niższy niż przed ich wykonaniem zarówno w spoczynku jak i na szczycie wysiłku. Wiąże się to ze zwiększoną pojemnością cieplną ciała, do której organizm przystosował się w czasie odnowy biologicznej. Istotnym do odnotowania jest fakt, iż poziom poboru tlenu oraz wykonana praca mięśniowa pozostały na tym samym poziomie, niezależnie od zastosowania zabiegów. Powołując się ponownie na dane otrzymane po zabiegach krioterapii, gdzie nie dostrzega się wyraźnych różnic w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla zabiegów w saunie, mogę stwierdzić, iż zastosowanie odnowy biologicznej nie wpływa istotnie na parametry fizjologiczne organizmów ludzkich.

Przechodząc do analizy hematologicznej wykazałem, iż poziom koncentracji hemoglobiny nieznacznie się zmniejszył po zastosowaniu MHA. Podobny choć nieznacznie większy efekt ma również krioterapia. Jednak, co ciekawe, analizując metadane wykazałem, iż nastąpił pewien wzrost objętości osocza krwi, po zastosowaniu odnowy w postaci kąpieli w saunie fińskiej.

Podsumowując uzyskane wyniki, stwierdzono, iż zabiegi w saunie tylko nieznacznie wpłynęły na procesy termoregulacyjne, jak i zmiany w hematologii, u profesjonalnych biegaczy narciarskich. Wydaje się, że związane jest to z faktem, iż sportowcy uprawiający sporty wytrzymałościowe i przez to narażeni na endogenne obciążenie termiczne, mogą być mniej podatni na wpływ dodatkowych zabiegów adaptacji cieplnej. Jednakowoż wykazane zmiany generalnie dają pozytywne efekty i stanowią interesujący punkt wyjściowy do dalszych badań.

Niepublikowana wcześniej analiza danych biochemicznych parametrów krwi sportowców, pobranej w czasie eksperymentu, zarówno po zabiegach odnowy biologicznej w saunie jak i w kriokomorze, prezentowana na wspomnianej wcześniej konferencji, daje kolejne ciekawe spojrzenie na wpływ takowych zabiegów na organizmy sportowców. Obie zastosowane metody odnowy biologicznej spowodowały spadek poziomu kwasu moczowego (UA – *ang. Uric acid*) we krwi sportowców uzyskiwany po wykonaniu wysiłku, względem poziomu jaki uzyskiwano bez stosowania zabiegów. Co ciekawe, mimo tego, iż kriostymulacja spowodowała większy bezpośredni spadek objętości kwasu moczowego we krwi zarówno przed jak i bezpośrednio po eksperymentalnym wysiłku, to zabiegi w saunie



dały lepszy efekt w kwestii przyrostu jego objętości podczas ćwiczenia. Wydaje się, że zmniejszony, względem wyników uzyskiwanych po zastosowaniu wspomnianych zabiegów, przyrost UA związany jest ze zwiększoną odpornością cieplną organizmu po MHA.

Istotne wydają się także różnice w uzyskiwanych poziomach markerów mikrouszkodzeń LDH i CK po zastosowaniu różnych typów odnowy biologicznej. Zastosowanie zabiegów polegających na pasywnym ogrzewaniu organizmu spowodowało znaczny przyrost poziomu stężenia LDH we krwi nawet w spoczynku, w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla osób z nich nie korzystających, który po wysiłku jeszcze mocniej się pogłębił. Podobnie zachował się również poziom stężenia kinazy kreatynowej choć impact ten był mniejszy. Stosowanie zabiegów wykonywanych przy wykorzystaniu zimna (krioterapia) dało całkowicie odwrotne efekty. Stężenia zarówno LDH jak i CK, po ich zastosowaniu, zmalały względem poziomów uzyskiwanych, gdy zawodnik nie korzysta w ogóle z odnowy biologicznej. Co więcej, porównując przyrosty markerów mikrouszkodzeń jakie następują w czasie wykonania eksperymentalnego treningu zaobserwowałem ich zdecydowanie wyższy poziom po zabiegach w saunie niż w kriokomorze. Wyniki te sugerują, iż dla samego zdrowia i wytrzymałości mięśni sportowców bezpieczniejsza jest odnowa z wykorzystaniem ogólnego chłodzenia organizmu.

Ważnym aspektem w planowaniu treningu dla sportowców okazuje się także ich płeć, (co wykazano też w publikacji 3). Rozkład temperatury powierzchni ciała zależy od funkcji mikrokrążenia i może różnić się u osób o różnej masie ciała, składzie i powierzchni ciała, które bezpośrednio zależą od uwarunkowań biologicznych. Uważa się, że płeć może być niezależnym modulatorem funkcji naczynioruchowych i sudomotorycznych skóry podczas ekspozycji na ciepło (Shapiro, 1980; Inoue, 2005). Kobiety różnią się od mężczyzn swoją reakcją termiczną na egzogenne obciążenie cieplne i utratę ciepła, a także na endogenne obciążenie cieplne podczas ćwiczeń, ponieważ zazwyczaj mają większy stosunek powierzchni ciała do jego masy, wyższą zawartość podskórnej tkanki tłuszczowej, niższą wydolność wysiłkową i mniejszą objętość krwi (Kaciuba-Uscilko, 2001; Pokora 2000, 2003). Znany jest również fakt, iż kobiety generalnie mają niższą spoczynkową temperaturę ciała niż mężczyźni. Problem porównań termicznych „wzorów” skóry między płciami jest w literaturze szeroko poruszany zarówno dla wytrenowanych (Bouzas Marins 2015) jak i dla nietrenujących osób (Chudecka 2015; Neves 2017).

W trzeciej publikacji (M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora „**Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?**” Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 /

Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z> podjąłem próbę zbadania wpływu płci na termoregulację ciała w czasie ćwiczenia wysiłkowego oraz w czasie restytucji tuż po jego zakończeniu. Grupę badawczą ponownie stanowili profesjonalni biegacze narciarscy, przy czym tym razem w badaniu wzięły udział także kobiety. Sam schemat badania wysiłkowego nie różnił się od przedsięwziętego w poprzednich publikacjach z serii, jednak w obrazowaniu termicznym ograniczyłem się tylko do mięśni nóg, czyli tych które są najbardziej aktywne w trakcie wysiłku biegowego. Dodatkowo analizie porównawczej zostały poddane też ogólne cechy fizjologiczne i somatyczne uzyskiwane przez przedstawicieli danych grup płciowych. Zgodnie z założeniem, parametry somatyczne takie jak wzrost, waga, powierzchnia ciała, masa tłuszczowa organizmu czy masa beztłuszczowa organizmu różniły się znacznie między grupami i były niższe u kobiet (wyjątek stanowi średnia masa tłuszczu, którego zawartość była znacznie wyższa w grupie żeńskiej). Różnice występowały też w części parametrów fizjologicznych takich jak  $VO_{2max}$ , metaboliczny ekwiwalent energii (MET), średnia moc osiągnięta w czasie biegu (W) czy wydatek energetyczny (EE). Po treningu uzyskiwały one istotnie niższe poziomy w grupie kobiet niż w grupie mężczyzn, mimo iż przed jego wykonaniem nie różniły się. Efekt taki spowodowany jest zwiększoną intensywnością procesów metabolicznych, w tym metabolicznej produkcji ciepła u mężczyzn. Interesujące jest to, że zarówno puls maksymalny jak i zmierzony na progu tlenowym (AT) dla obu płci osiąga zbliżone wartości. Ponadto można zauważyć, że przyrosty poszczególnych parametrów fizjologicznych w czasie wykonywania eksperymentalnego wysiłku osiągały bardzo zbliżony poziom niezależnie od płci.

Analizując wyniki badań termograficznych zauważmy, że temperatury zmierzone nad 11 wybranymi strefami mięśniowymi u kobiet przed wykonaniem eksperymentalnego ćwiczenia wysiłkowego były istotnie niższe niż u mężczyzn, co jest zgodne z ogólnie przyjętą wiedzą. Bezpośrednio po wysiłku zmierzone wartości temperatury były wyższe w obu badanych grupach i co ciekawe nie różniły się istotnie statystycznie. Jednak generalnie to kobiety osiągały ciągle nieco niższą temperaturę na powierzchni skóry. Po 10 minutowym okresie odpoczynku zarejestrowano powolny powrót temperatur poszczególnych stref mięśniowych do poziomu sprzed wysiłku niezależnie od płci, jednak zachodził on szybciej w grupie męskiej.

Analizując zmiany temperaturowe zachodzące dla danych stref mięśniowych wyliczyłem średnie wartości przyrostu temperatur w pierwszej fazie eksperymentu (faza wysiłku), oraz średnie wartości ich spadków w fazie drugiej (restytucja). W wyniku tej

analizy wykazałem, iż zmiany temperatury skóry mierzone nad tymi samymi strefami mięśniowymi w odpowiedzi na eksperymentalny wysiłek bezpośrednio zależały od płci uczestników. Większy wzrost temperatury skóry bezpośrednio po zakończeniu ćwiczenia biegowego uzyskały kobiety, w porównaniu z wynikami uzyskanymi przez mężczyzn. Sugeruje to większy konwekcyjny transfer ciepła z głębszych tkanek na obwód organizmu u mężczyzn, co prowadzi do mniejszych wzrostów temperatury mięśni nieaktywnych.

Jednakże mimo zdecydowanie wyższych przyrostów temperatury u kobiet nie rejestrowano znaczących różnic w maksymalnej uzyskanej temperaturze, co prowadzi do wniosku, że różnice w aktywnym średnim przepływie krwi mogą nie być tak wyraźne między obiema płciami. Wnioski te są podobne do otrzymanych przez Kenny'ego i Jay'a w ich pracy badawczej (Kenny&Jay, 2007).

W okresie odpoczynku po wysiłku temperatura szybko powróciła do wartości początkowej u mężczyzn. Co ciekawe zależność taka nie wystąpiła u kobiet. W ich przypadku mimo spadku względem temperatury uzyskanej przy maksymalnym zmęczeniu nadal pozostawała ona podwyższona względem temperatury początkowej. Prawdopodobnie związane jest to z różnicą w rozmieszczeniu, ilości oraz aktywności gruczołów potowych oraz różnicy w odpowiedzi naczynioruchowej na zaprzestanie wykonywania wysiłku. Generalnie wiadome jest również, iż mężczyźni produkują większe ilości potu niż kobiety (Gagnon&Kenny, 2012; Ichinose-Kuwahara, 2010). Większe przyrosty temperatur otrzymane dla kobiet po wysiłku mogą być spowodowane przez zwiększone magazynowanie ciepła i jego wolniejszą wymianę niż u mężczyzn. Wynika to z dłuższego czasu latencji pocenia się i mniejszej wrażliwości tej odpowiedzi termoregulacyjnej na wzrost temperatury ciała (Bittel&Hennen, 1975). Również różnice w regulacji przepływu krwi przez skórę u kobiet i mężczyzn podczas wysiłku fizycznego wpływają na rozbieżności w reakcji jaką na jego wykonanie daje temperatura skóry. Duże wzrosty temperatur oraz przedłużone jej utrzymywanie się można powiązać z powysiłkowym zmniejszeniem oporu naczyniowego odpowiadającemu rozszerzeniu naczyń (Kenny&Jay, 2007; Tanda, 2016). Także wzrost stężenia tlenu azotu we krwi odgrywa ważną rolę w rozszerzaniu naczyń tętniczych skóry. Jego podwyższona ilość sprzyja wazodylatacji w obszarze poddanym wysiłkowi, co umożliwia zwiększony przepływ krwi i wzrost lokalnej temperatury (Johnson, 2010).

Otrzymane wyniki implikują potrzebę uzależniania planów treningowych u sportowców zależnie od ich płci. Pokazują również potrzebę rozwijania wykorzystania metod fizycznych, takich jak obrazowanie termiczne w zawodowym sporcie.

## **Wnioski**

Obrazowanie termiczne oraz powiązane z nim analizy statystyczne ukazują głęboki wgląd w procesy termoregulacyjne zachodzące w organizmie. Ich poznanie i analiza są niezwykle pomocne dla trenerów jak i profesjonalnych sportowców w ustalaniu planów treningowych oraz rozwoju sportowym.

Z przeprowadzonych badań biofizycznych jasno wynika również potrzeba różnicowania wysiłku wykonywanego podczas treningu specyficznie do uprawianego sportu, tak aby jego skuteczność była jak największa i najbardziej właściwa dla poszczególnych sportowców. Obrazowanie termiczne w tym miejscu jest użyteczne do walidacji treningu. Możemy również zauważyć przydatność metody w weryfikacji obciążeń stosowanych podczas jednostek treningowych. Badania wykazały, że ćwiczenie wytrzymałościowe na tym samym poziomie obciążenia tlenowego, może prowadzić do większych przegrzań u kobiet niż u mężczyzn.

Kolejny czynnik jaki wpływa na zmiany w termoregulacji organizmu i może, a nawet powinien, być weryfikowany za pomocą badań i analiz fizykochemicznych (termografii) to wpływ odnowy biologicznej na sportowców. W swojej pracy udowodniłem skuteczność metody w tym aspekcie na podstawie odnowy biologicznej w saunie.

Rozwój wykorzystania metody badań termowizyjnych oraz poszerzenie badań o kolejne grupy sportowców, zależnie od uprawianego przez nich sportu, przyczyni się do polepszenia wyników osiągniętych przez zawodników, jak również może zwiększyć ich bezpieczeństwo podczas wyczynowego uprawiania sportu.

## Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej

**Publikacja nr 1:** Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa (2018); “A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise”; Journal of Thermal Analysis and Calorimetry; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>

Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458

W tym artykule skupiłem się na weryfikacji zasadności zaprojektowanego doświadczenia, a także na skuteczności i wpływie zastosowania go u sportowców o całkowicie odmiennych naturalnych planach treningowych – biegaczach narciarskich i pływakach. Procedura badawcza polegała na powtarzanych pomiarach termowizyjnych zastosowanych przed jak i po godzinnym wysiłku, określonym jako bieg na bieżni mechanicznej z prędkością oznaczoną dla każdego uczestnika na poziomie maksymalnego pułapu tlenowego ( $VO_{2max}$ ), którego wartość wyznaczono w teście podjętym na kilka dni przed samym badaniem. W trakcie badań wykorzystywałem kamerę termowizyjną FLIR E60. Dodatkowo każdemu z uczestników, zarówno przed jak i po założonym wysiłku, zostały pobrane próbki krwi w celu zbadania zmian biochemicznych krwi zachodzących w czasie trwania eksperymentalnego wysiłku. Oznaczone zostały następujące elementy krwi: kinaza kreatynowa CK; poziom mleczanów LA; poziom dehydrogenazy mleczanowej LDH oraz poziom hemoglobiny Hb (ang. *Hemoglobin*). Dokonano również pomiaru odpowiednich parametrów fizjologicznych takich jak: puls HR (ang. *Heart rate*); obciążenie WR [W] (ang. *Work load*); obciążenie względne na kg [WR/kg] (ang. *Work load per kg*) jak również prędkość na maksymalnym pułapie tlenowym V [km/h] (ang. *Velocity*).

Do opracowania zmian rozkładu temperatur zastosowałem algorytm podziału ciała na strefy mięśniowe zgodny z ogólnie przyjętym podziałem zaproponowanym w publikacji „Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography” przez Fernandez–Cuevas et al. (Fernandez–Cuevas, 2014). Ciało każdego z badanych sportowców podzielone zostało na 22 strefy, zgodne z przebiegiem poszczególnych mięśni, nad powierzchnią których dokonałem pomiarów temperaturowych. W publikacji odnotowane zostało, iż kierunek zmian temperatury w górnej części ciała spowodowany wykonanym wysiłkiem, ma charakter odwrotny zależnie od uprawianego profesjonalnie sportu. Dla biegaczy narciarskich nastąpił znaczny, istotny statystycznie, spadek temperatur na całym

obszarze klatki piersiowej, pleców, a także kończyn górnych, podczas gdy dla pływaków temperatura w tych obszarach po zakończonym wysiłku nieznacznie wzrosła. W mięśniach kończyny dolnej występuje analogiczna sytuacja, jednakże tutaj niewielki spadek temperatur nad określonymi mięśniami u biegaczy narciarskich odpowiada znacznemu wzrostowi temperatur mierzonych nad tymi samymi strefami mięśniowymi u pływaków. W opracowaniu zastosowałem również dwa niezależne algorytmy określenia temperatury całego ciała. Podstawę do ich użycia stanowiły wcześniejsze publikacje w których autorzy udowodnili ich zasadność w wyliczaniu średniej temperatury całego ciała na podstawie obrazowania termicznego (Cholewka, 2016; Choi, 1997). Oba wykazały istotny statystycznie wzrost temperatury ciała podczas wykonywania eksperymentalnego wysiłku u pływaków oraz pewien zauważalny spadek temperatury u biegaczy narciarskich. Uzyskane metodami obliczeniowymi temperatury całego ciała są zgodne z wynikami uzyskanymi dla poszczególnych mięśni w każdym etapie eksperymentu.

Różnice w odpowiedzi temperaturowej na wykonany eksperymentalny wysiłek wydają się być związane z typem sportu uprawianym wyczynowo przez badanych. Podobne wnioski były opisywane wcześniej (Tanda, 2016; Merla, 2010; Ludwig, 2016) i wiążano je zarówno z adaptacją podskórnego przepływu krwi do danego treningu jak również z ogólnym przystosowaniem fizjologicznym i morfologicznym do uprawianego zawodowo sportu. Kolejną przyczyną zaobserwowanych różnic może być profil aktywności fizycznej uczestników badania oraz ich ogólna fizyczna sprawność. Zastosowany podczas badań, wysiłek eksperymentalny jest specyficzny dla biegaczy narciarskich, podczas gdy dla pływaków nie jest podstawową częścią jednostki treningowej (Roels, 2005).

Można zauważyć również, że sam proces pocenia się, będący głównym mechanizmem chłodzenia ciała dla biegaczy narciarskich, wyraźnie widoczny w opisywanym eksperymencie, traci swoje znaczenie w codziennej jednostce treningowej wykonywanej przez pływaków, co powoduje ich odmienną adaptację metaboliczną.

Analizując parametry fizjologiczne osiągnięte przez uczestników badania można zauważyć, że zarówno puls jak i wykonana praca nie różnią się znacznie między badanymi grupami. Jednakże skuteczność wykonania wysiłku oraz obciążenie aerobiczne jest mniejsze u pływaków – częściej zdarzało się, iż musieli przerwać wykonanie ćwiczenia przed czasem. Ponadto pewne różnice w dystrybucji wykazują markery mikrouszkodzeń mięśniowych LDH i CK, których poziomy są niższe zarówno przed wysiłkiem, jak i po jego wykonaniu, u pływaków niż u biegaczy narciarskich. Co jednak ciekawe przyrost wartości kinazy kreatynowej CK w obu grupach osiągnął podobny poziom, podczas gdy przyrost LDH był

zdecydowanie wyższy u biegaczy narciarskich. Różnice w powysiłkowych poziomach CK i LDH w osoczu mogą odzwierciedlać różnice w szybkości ich przenikania przez sarkolemmę (błonę komórkową miocytu) i różne stopnie uszkodzenia w różnych typach włókien mięśniowych. Ponadto dla biegaczy narciarskich wykazano mniejsze zakwaszenie ( $\Delta$ LA) pomimo zwiększonego obciążenia (WR i WR/kg) oraz dłuższego wysiłku. Różnice te sugerują wyższą wydolność aerobową u biegaczy narciarskich.

W artykule podjąłem również próbę znalezienia korelacji między średnią temperaturą skóry mierzoną nad poszczególnymi strefami mięśniowymi, a parametrami fizjologicznymi i biochemicznymi. Niestety, ogólna liczba takich korelacji jest znikoma, prawdopodobnie jest to spowodowane dość niewielką grupą badawczą. Wykazane zostały jednak pewne silne korelacje między parametrem WR i temperaturą dla najbardziej aktywnych w czasie ćwiczenia mięśni nóg u pływaków. Wcześniejsze artykuły (Formenti, 2013) sugerują, iż takie korelacje mogą być wynikiem niższej aktywności mięśni u słabiej wytrenowanych osób. W tym przypadku biegacze narciarscy w treningu biegowym uzyskują większą aktywność mięśni i przepływ krwi od pływaków.

Korelacje wartości temperatur nad danymi mięśniami z danymi biochemicznymi o istotnym statystycznie poziomie występują bardzo nielicznie. Duży wpływ na ich występowanie wydaje się mieć też typ włókien, z których zbudowany jest mięsień. Zaś, z morfologicznego punktu widzenia wykazane zostały jedynie silne korelacje procentowej zawartości tłuszczu z temperaturą uzyskaną nad strefami mięśniowymi u pływaków. Zależność ta nie występuje u biegaczy narciarskich.

Artykuł wykazał wyraźne różnice w dystrybucji temperatury skóry u sportowców uprawiających odmienne dyscypliny sportu w przypadku gdy zastosujemy u nich to samo ćwiczenie wysiłkowe na bieżni. Wyliczone korelacje dostarczają dodatkowych informacji na temat pracy mięśni w różnych dyscyplinach sportu i mogą być pomocne w ocenie wydolności sportowców jak i w opracowaniu planów treningowych.



# A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise

Zofia Drzazga<sup>1</sup> · Mariusz Binek<sup>1</sup> · Ilona Pokora<sup>2</sup> · Ewa Sadowska-Krępa<sup>3</sup>

Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018  
© The Author(s) 2018

## Abstract

This study was focused on the thermal mapping of skin over the selected muscle zones in two groups of elite athletes fully engaged in completely other sports performing about an hour running effort at individual AT intensity. Two groups of elite male athletes, a group of cross-country skiers (CS;  $N = 6$ ) and a group of elite endurance swimmers (SW;  $N = 4$ ), were investigated. Thermal images of sportsmen' body at front and from the rear were recorded before and about 1–2 min after exercise test using camera Flir Systems E60. Functional (heart rate, oxygen uptake, workload) as well as biochemical markers (activities of creatine kinase and lactate dehydrogenase, concentration of lactate and haemoglobin) were also assessed. The marked differentiation in skin temperature distribution in cross-country skiers and endurance swimmers subjected to the same endurance exercise on treadmill was observed. There was significant decrease in temperature in upper body temperature in CS group, while SW group revealed a significant increase in temperature of the lower limbs. The calculated total body skin temperature was also influenced by practicing training of elite athletes. Some significant correlations of physiological, biochemical and morphological parameters (% fat) with average temperature after exercise test were found for different muscle zones in swimmers and cross-country skiers. Statistical analysis showed that workload had the most impact on skin temperature changes, especially in swimmers. The results provide additional information on the muscle work in the different sport disciplines and may be helpful in efficiency evaluation of elite athletes.

**Keywords** IR thermal mapping · Training · Cross-country skiers · Swimmers · Muscles · Biochemical markers · Functional factors

## Introduction

Infrared thermography is a non-invasive and easy-to-perform method of imaging, and it is becoming useful in different modalities of clinical medicine including sports medicine [1–4]. The aim of medical infrared thermography (MIT) use in sports medicine is not to be a substitute for clinical examination, but to enhance and support it. It can be concluded that MIT is a reliable, low-cost detection tool that should be applied for pre-scanning athletes. Athletes are exposed to many physical stresses during training and competition season. Overuse reactions and so-called minor traumas are very frequent; therefore, early detection is critical to avoid injuries. Research suggests that the most beneficial application of MIT is the screening of individuals for overuse injuries [3]. Moreover, thermal imaging can give important information about state of sportsman health and recovery after different exercises. What is more,

✉ Zofia Drzazga  
zofia.drzazga@us.edu.pl

<sup>1</sup> Department of Medical Physics, A. Chełkowski Institute of Physics, The Silesian Centre for Education and Interdisciplinary Research, University of Silesia in Katowice, ul. 75 Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów, Poland

<sup>2</sup> Department of Physiological and Medical Sciences, Department of Physiology, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, ul. Mikołowska 72a, 40-065 Katowice, Poland

<sup>3</sup> Department of Physiological and Medical Sciences, Department of Biochemistry, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, ul. Mikołowska 72a, 40-065 Katowice, Poland



examined changes of temperature during training, can get impact of physical stress to temperature during this training. The skin thermal response depends on a number of specific physiological adjustments as body fluid homeostasis, cardiovascular fitness, muscle metabolism and athlete's health, which allow to establishing interesting applications in sport. In professional sport, many details as possible about athlete are needed. Using thermography can give as some more knowledge about muscle preservation [3, 4].

Endurance competitive sport such as skiing or swimming imposes substantial energy, mechanical, mental and emotional burdens on the human. This reflects, among other things, on a number of biochemical and haematological properties, which display significant differences between athletes and non-athletes in blood samples collected at rest and after exercise. Most prominent among these properties are lactate (LA) concentration and activities of creatine kinase (CK) and lactate dehydrogenase (LDH) [5, 6]. The post-exercise blood LA level is very useful indicator of both the extent of involvement of anaerobic processes during work and anaerobic work capacity in subjects. In turn, increase in plasma activities of CK and LDH due to their leakage from cell into the extracellular fluids is generally considered as being indicative of cellular damage. Therefore, a daily monitoring of training status takes place with measurement of these parameters in plasma [7–13].

Cross-country skiing is the most demanding sport aimed at endurance which requires one the highest peak oxygen uptake. However, to reach a world-class level in competitions skiers have increased other physiological factors affecting top speed on skis, such as muscular strength and the ability to generate high power [14, 15]. Anaerobic threshold related to oxidative capacity of muscle in young female cross-country skiers was discussed [13]. What's more biomechanical aspects of complex movement (double poling) were studied by EMG [16]. However, according to our knowledge correlations between thermal parameters and biochemical factors in athletes have not been analysed yet except for the lactate level. Lactate threshold against temperature during maximal aerobic test in athletes [11] and in capillary blood during post-exercise recovery in non-trained subjects [12] was reported.

On the other hand, thermography studies for swimmers were performed more often [17–20]. Purpose of quantifying the influence of the swimming style on the cartographies of cutaneous temperatures of a swimmer by infrared thermography was presented [17]. Temperature changes in particular skin areas in the course of front crawl swimming were evaluated [18]. An assessment of energetic-metabolic activity of selected muscles of upper extremities and body during breaststroke swimming through infrared

thermography was described taking into account sides of body [19]. Changes in infrared radiation and overloaded structures of the musculoskeletal system in swimmers were also detected [20]. However, we do not find any article comparing evaluation of skin temperature of athletes practicing endurance swimming and cross-country skiing taking into consideration physiological and biochemical factors also.

The aim of this study was to assess the skin temperature distribution in two groups of elite athletes: cross-country skiers and swimmers fully engaged in completely other sports as a response to the same exercise test (running on treadmill) as well as to analyse the impact of physiological and biochemical factors on skin temperature changes over the selected muscles. We would like using thermography to obtain temperature patterns characteristic for the elite sportsmen which could provide an information on body's adaptation to physical effort, efficiency of thermoregulatory system, enabling athletes to continue performing as their highest sport level.

## Materials and methods

### Subjects

Two groups of elite male athletes, a group of cross-country skiers (CS;  $N = 6$ ) and a group of elite endurance swimmers (SW;  $N = 4$ ) from Academic Sports Association (AZS) in the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education, volunteered to participate in this study. The cross-country skiers are the members of Polish National Team, and the swimmers are taking part in the world championships. The main limitation of our study is the small number of participants recruited from the elite athletes, especially swimmers.

All subjects were in the preparatory period of the annual training plan. They were informed of the purpose, possible risks and the benefits of the study before giving their written consent to participate. The study protocol conformed to the ethical guidelines of the World Medical Association Declaration of Helsinki and was approved by the Ethics Committee of the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Poland.

At the beginning of study, the subjects' body mass and composition and aerobic fitness were assessed. The basic characteristics of athletes are presented in Table 1.

### Procedure

In order to determine the aerobic fitness, the maximal oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ) and lactate threshold (AT) were determined directly, during  $VO_{2max}$  test. The  $VO_{2max}$  test

**Table 1** Athletes' characteristics

Parameters	Cross-country skiers, <i>N</i> = 6	Swimmers, <i>N</i> = 4
Age/years	23 ± 2.68	21.5 ± 2.08
BH/cm	179.07 ± 3.0	185.25 ± 4.57
BW/kg	73.47 ± 3.16	80.75 ± 6.73
BF/kg	5.3 ± 1.21	7.52 ± 5.56
VO <sub>2max</sub> /L min <sup>-1</sup>	4.68 ± 0.55	4.78 ± 0.31
VO <sub>2max</sub> /mL kg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>	64 ± 5.85	58 ± 8.48
BMI	22.93 ± 1.03	23.55 ± 2.08
% fat	7.23 ± 1.70	9.32 ± 6.63

Data are presented as mean ± SD

BH, body height; BW, body mass; BF, total body fat; VO<sub>2max</sub>, maximal oxygen uptake; BMI, body mass index

involved an incremental treadmill running to exhaustion: starting at 6 km h<sup>-1</sup>, 0% gradient with speed increasing by 2 km h<sup>-1</sup> every 3 min, until speed of 14 km h<sup>-1</sup>. Thereafter, the treadmill gradient has been increased by 2.5% every 3 min until volitional exhaustion. During the exercise test, heart rate (HR) (Polarelectro, Finland) and oxygen uptake (VO<sub>2</sub>) (was applied—open circuit spirometer, OXYCON, Jaeger, Germany) were measured and blood lactate concentration was determined. Lactate threshold (AT) was designated as the point (workload) at which blood lactate increased exponentially.

Two weeks after preliminary testing, all participants were tested again on a treadmill. A proper exercise test involved about an hour of running effort at individual AT intensity. Thermal images of sportsmen's body at front and from the rear (nine thermal images for each subject including head) were recorded using camera Flir Systems E60 with resolution of camera 320 × 240 pixels and with sensitivity 0.05 K before and about 1–2 min after the completion of exercise test (after exercise used consistently thereafter). All measurements were performed in a similar way to the Glamorgan Protocol including thermal imaging in its medical standards [21, 22]. The results were analysed by using a ThermoCAM TM Researcher Pro 2.8 SR-3 focusing on the muscle zones according to the model proposed by Fernández-Cuevas et al. [2].

Blood samples were drawn from the antecubital vein into test tubes anticoagulated with heparin at rest (0) and immediately following the run (T). Fresh plasma samples were assayed for activities of creatine kinase (CK, EC 2.7.3.2) and lactate dehydrogenase (LDH, EC 1.1.1.27), and concentration of lactate (LA), using diagnostic kits from Randox Laboratories (CK522, LD3818 and LC2389, respectively). Haemoglobin (Hb) was assayed by a standard cyan-methaemoglobin method using a diagnostic kit (HG980, Randox, UK).

All experiments were performed in a human functional testing laboratory, Katowice Academy of Physical

Education on treadmill H/P/Cosmos Pulsar at 19 ± 0.5 °C ambient temperature, 56 ± 3% relative humidity and 985 ± 5 hPa atmospheric pressure.

### Statistical analysis

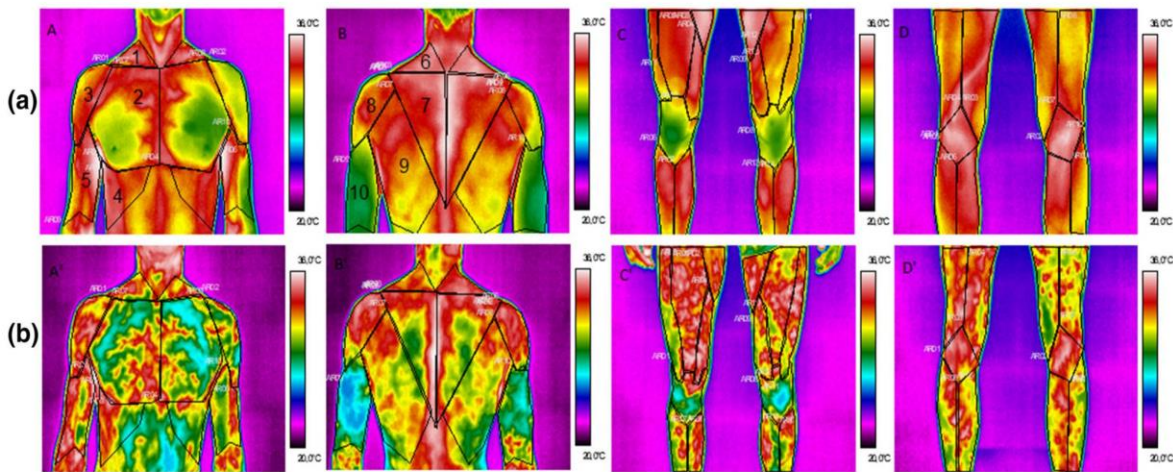
The results were analysed in Statistica 12. Variables' values were compared using a Wilcoxon and paired Student *t* test. Statistical significance was accepted at *p* < 0.05. Correlation coefficients between two variables were calculated using a Pearson-product moment correlation matrix.

### Results and discussion

This study used a running exercise model performed at individual anaerobic threshold to evaluate the contribution of physiological factors and biochemical markers in determining the changes in skin temperatures after exercise in cross-country skiers and endurance swimmers.

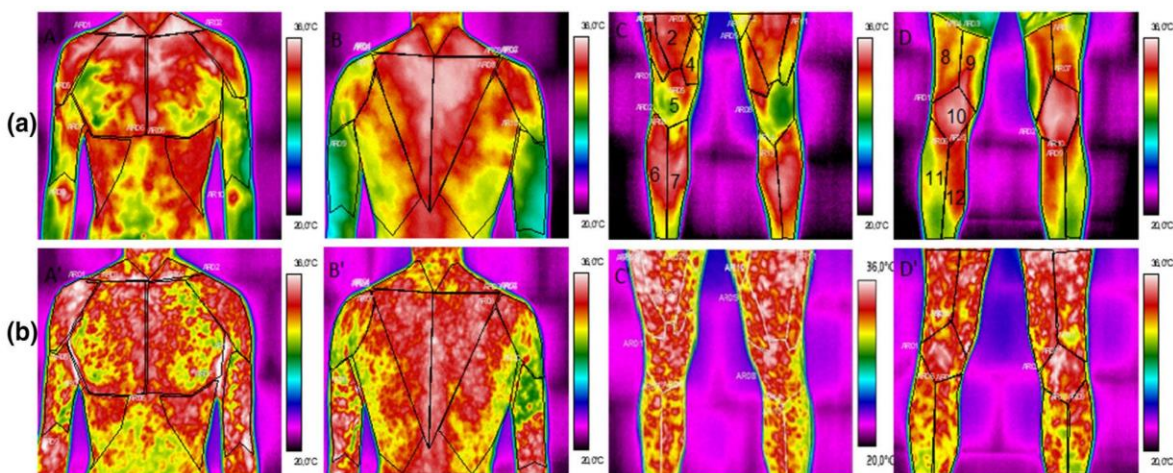
### Thermography assessment

Representative thermographs of body surface including upper and lower part, before and after running exercise for ski-runners and swimmers, are shown in Figs. 1 and 2, respectively. ROIs of interest including 22 muscle zones for each sportsman were taken into account. Thermographic recordings present a complex physiological response of the skin to similar exercise load at individual AT intensity of cross-country skiers and endurance swimmers. It should be noted that skin temperature changes of body surface due to exercise test were different in cross-country skiers and endurance swimmers. A marked drop of the temperature in upper part of body immediately after physical exertion in cross-country skiers unlike swimmers was observed. What is more, after exercise the upper part



**Fig. 1** Example thermograms of body surface for cross-country skiers in front A, A', C, C' and B, B', D, D' from back surface of body registered **a** before exercise, **b** after exercise test. 1 trapezius muscle,

2 pectoralis major, 3 deltoid muscle, 4 serratus anterior, 5 biceps brachii, 6 trapezius muscle (neck), 7 trapezius muscle (back), 8 rear of deltoid muscle, 9 latissimus dorsi, 10 triceps brachii



**Fig. 2** Example thermograms of body surface for swimmers in front A, A', C, C' and B, B', D, D' from back surface of body registered **a** before exercise, **b** after exercise test. 1 vastus lateralis, 2 rectus femoris, 3 muscles of pubic bone, 4 vastus medialis, 5 knee (at front),

6 tibialis anterior, 7 soleus, 8 biceps femoris, 9 remaining thin muscles, 10 knee (rear), 11 gastrocnemius caput laterale, 12 gastrocnemius caput mediale

of body in cross-country skiers was cooler than legs, while in swimmers skin temperature of the lower part of body was hotter than temperature of the upper part of body. Tanda [23] has evaluated the response of skin temperature to different types of running exercise on treadmill under controlled laboratory conditions. The author indicated a fall in total body skin temperature during the initial stage of running exercise, regardless of the type of work (with graded or constant load). In the case of constant load exercise, the skin temperature decreases at the beginning of the work, followed by a little increase over time. It is argued that the initial decline and the subsequent slight rise in skin temperature is the net result of the competition between the vasoconstrictor response, which lasts as long

as the exercise is continued, and the vasodilatory response initiated after cessation of exercise, induced by the increasing body temperature.

In this study, thermographic data indicated that skin response to exercise test was specific for the group of tested subjects. There was probably a difference in the blood distribution and sweat gland recruitment pattern or sweat output per gland during exercise in cross-country skiers and swimmers. In nearly all areas, left–right difference of temperature is not significant similar as in [19].

In order to get better insight into problem, differences in skin temperature measured before and after exercise test  $\Delta T_{sk}$  ( $\Delta T_{sk} = T_{skin \text{ after}} - T_{skin \text{ before}}$ ) for the selected muscle zones were calculated. Mean  $\Delta T_{sk}$  over the muscles

**Table 2** Mean  $\Delta T_{sk} \pm SD$  values of upper body muscle zones for elite swimmers and elite cross-country skiers as a response to running exercise

Muscle	Swimmers, $N = 4$		Cross-country skiers, $N = 6$	
	$\Delta T_{sk} \pm SD/^\circ C$	$p$	$\Delta T_{sk} \pm SD/^\circ C$	$p$
Forehead	0.58 $\pm$ 0.4	0.17	0.50 $\pm$ 1.5	0.32
Cheeks	<b>3.5 <math>\pm</math> 0.8</b>	<b>0.0004</b>	<b>2.89 <math>\pm</math> 1.4</b>	<b>0.0000</b>
Trapezius muscle	- 0.43 $\pm$ 0.4	0.25	- <b>1.48 <math>\pm</math> 0.9</b>	<b>0.0001</b>
Deltoid muscle	0.03 $\pm$ 0.6	0.90	- <b>1.46 <math>\pm</math> 1.4</b>	<b>0.004</b>
Pectoralis major	0.24 $\pm$ 0.4	0.40	- <b>2.06 <math>\pm</math> 1.3</b>	<b>0.0002</b>
Serratus anterior	0.26 $\pm$ 0.3	0.50	- <b>2.02 <math>\pm</math> 1.4</b>	<b>0.0001</b>
Abdomen	0.13 $\pm$ 0.4	0.75	- <b>2.61 <math>\pm</math> 1.3</b>	<b>0.0000</b>
Biceps brachii	0.56 $\pm$ 0.7	0.50	- <b>1.25 <math>\pm</math> 1.2</b>	<b>0.003</b>
Trapezius muscle (neck)	- 0.08 $\pm$ 0.3	0.26	- 0.48 $\pm$ 1.3	0.20
Rear of deltoid muscle	0.50 $\pm$ 0.6	0.25	- 0.2 $\pm$ 0.8	0.70
Trapezius muscle (back)	0.68 $\pm$ 0.6	0.15	- <b>0.66 <math>\pm</math> 0.7</b>	<b>0.002</b>
Latissimus dorsi	0.57 $\pm$ 0.5	0.42	- <b>0.93 <math>\pm</math> 1.0</b>	<b>0.0006</b>
Triceps brachii	0.79 $\pm$ 1.4	0.30	- 1.04 $\pm$ 2.2	0.15

Significant results of  $\Delta T_{sk}$  of muscles, according to a paired student  $t$  test, are in bold

**Table 3** Mean  $\Delta T_{sk} \pm SD$  values of lower body muscle zones for elite swimmers and elite cross-country skiers as a response to running exercise

Muscle	Swimmers, $N = 4$		Cross-country skiers, $N = 6$	
	$\Delta T_{sk} \pm SD/^\circ C$	$p$	$\Delta T_{sk} \pm SD/^\circ C$	$p$
Vastus lateralis	1.10 $\pm$ 0.7	0.1	- 0.01 $\pm$ 1.5	0.75
Rectus femoris	<b>1.53 <math>\pm</math> 0.9</b>	<b>0.049</b>	- 0.2 $\pm$ 1.9	0.55
Vastus medialis	- 0.19 $\pm$ 1.2	0.2	- 0.11 $\pm$ 1.2	0.5
Biceps femoris	<b>1.49 <math>\pm</math> 0.7</b>	<b>0.01</b>	- 0.46 $\pm$ 1.1	0.6
Remaining thigh muscles	<b>1.36 <math>\pm</math> 0.8</b>	<b>0.02</b>	- 0.37 $\pm$ 1.2	0.4
Knees (at front)	<b>2.63 <math>\pm</math> 0.7</b>	<b>0.01</b>	0.4 $\pm$ 2.3	0.5
Knees (rear)	0.54 $\pm$ 0.6	0.1	- 0.47 $\pm$ 1.3	0.1
Tibialis anterior	0.77 $\pm$ 0.6	0.15	- 0.02 $\pm$ 1.2	0.6
Soleus	<b>1.48 <math>\pm</math> 0.5</b>	<b>0.02</b>	0 $\pm$ 1.3	0.3
Gastrocnemius caput laterale	<b>1.20 <math>\pm</math> 0.6</b>	<b>0.004</b>	- 0.23 $\pm$ 0.9	0.6
Gastrocnemius caput mediale	<b>1.06 <math>\pm</math> 0.3</b>	<b>0.003</b>	- 0.17 $\pm$ 0.9	0.7

Significant results of  $\Delta T_{sk}$  of muscles, according to a paired student  $t$  test, are in bold

in upper part of body and lower limbs for both groups is listed in Tables 2 and 3, respectively.

It should be noted that temperature changes over specified muscle zones were relatively big and showed significant temperature increase in the lower limbs in SW in the range 1.06–2.63  $^\circ C$  and temperature drop in the upper part of body for CS in the range from - 0.66 to - 2.02  $^\circ C$ . However,  $\Delta T_{sk}$  of head (cheeks and forehead) due to running exercise was very similar in the both studied groups.

It should be noted that statistically significant drop of the temperature occurs only for upper part of body in the cross-country skiers and increase in the temperature for the lower limbs in the swimmers. These results indicate that practicing sports may affect the thermal map of skin over the muscles. Tanda [24], Merla et al. [25] and Ludwig et al. [26] documented the different temperature responses of

thighs, forearms and trunk as well as the presence of hyperthermal spots over the entire body during the recovery; these findings are likely to be related to the cutaneous blood flow adaptation to the specific exercise and probably participants' thermal activity profile—related to type of training adaptation. A type of sport can induce specific to the nature of the training activity physiological and morphological adaptations. Following training, the cardiovascular and thermoregulatory systems along with their components go through various adaptive changes. The nature of these systemic and organ adaptations is highly specific to a particular sport with respect to the type of conditioning and apparent stimuli to which the athlete is subjected [27]. The shape of the time distribution of skin temperature was different for the swimmers and cross-country runners participating in the constant AT load

exercise, but the start and the extent of the temperature rise during the recovery seem to be related to the individual grade of vasoregulation or body structure (affecting the core to skin thermal conductance), as documented in the Tanda's research [23, 24]. It is argued that this diversity of the individual response to running exercise may reflect a different level of physical fitness (e.g. aerobic capacity  $VO_{2max}$ ) and participants' physical activity profile (specificity of running exercise test for cross-country skiers but not for swimmers) was associated with a development of different types of training adaptations in elite cross-country skiers and swimmers. It was indicated that swimmers have very specific training adaptations even compared with triathletes [28].

The drop of skin temperature over the selected muscle zones of the upper part of body in CS subjects seems to be associated with cooling effect of sweat evaporation. Sweating is the most important thermoregulatory reaction by which heat balance is maintained following a rise in body temperature during exercise-induced heat load. Evaporation of sweat from the skin surface has a cooling effect because evaporation is an endothermic process. Moreover, there are more sweat glands in upper than lower part of body since the marked temperature drop because of exercise observed in cross-country skiers seems to be accepted. On the other hand, occurrence of a big amount of sweat can lead to disturbances in the real temperature associated with the change in muscle metabolism by exercise and consequently it may slightly distort the interpretation of the temperature distribution on the body surface. Decrease in skin temperature immediately after exercise (45-min endurance exercise; at 60%  $VO_{2max}$ ) [2] and during a graded exercise test [29] was reported. Marked drop of the skin temperature due to endurance training in normobaric hypoxia was also observed [30]. However, for swimmers training in water the sweating is not the main way to lose the heat since swimmers may have a little different adapted metabolism to such effort as running exercise what was observed during running exercise.

In order to increase the readability of skin temperature changes, whole body mean skin temperature was calculated. There are several possibilities to estimate whole body temperature [23, 31, 32]. In this paper, we decided to evaluate whole body temperature before and 1–2 min after exercise using two methods, the first according to model used in paper by Cholewka et al. [32] and the second based on the model proposed by Choi [31] and partly modified by Tanda [23].

In the first approximation, the mean temperature of whole body was evaluated using formula (1)

$$T_{sk} = 0.32T_{tibia} + 0.17T_{back} + 0.18T_{chest} + 0.14T_{arm} + 0.07T_{head} + 0.06T_{thigh} + 0.06T_{abdomen} \quad (1)$$

which is presented in Table 4 for the both elite skiers and swimmers.

In the next method, mean temperatures of all muscle zones possible to analyse from our thermographic images were taken into account ( $n = 27$ ). Unfortunately, we could not extract contribution of foot and hand skin temperature from our infrared measurements. However, one can see (Table 4) that results obtained from formula (2)

$$T_{sk} = \left( \sum_n T_{\text{mean muscle zone}} \right) / n \quad (2)$$

are very close to those obtained from formula (1).

The calculated total body skin temperatures after running exercise on treadmill show relatively small (0.6–0.8 °C) changes similarly as in studies reported in [23]. However, in our investigation whole body temperature depends on practicing training of elite athletes. It should be noted that  $T_{sk}$  indicates the same tendencies as the most muscle zones in upper part of body for CS and in lower part of body for SW, respectively. An evolution of total body skin temperature during running exercise on treadmill is compatible with regional temperature response taking into account only the before and after exercise skin temperature values. However, temporally monitoring the topography of whole body temperature as well as selected body surface temperatures seems to be important in the development of physiological models and heat flux analyses [23, 33].

## Physiological and biochemical measurements

Physiological parameters as well as biochemical parameters are collected in Table 5.

AT intensity exercise was performed longer with a greater power (WR and WR/kg) in the CS than SW group, whereas terminal lactate concentration achieved in this group was lower in comparison with the SW group (Table 5). However, in both groups an increase in CK activity was the same. These results may indicate that cross-country skiers have a better aerobic capacity than the SW group which allowed them to continue this effort with a smaller share of anaerobic metabolism.

Interesting are also observations on changes in plasma CK and LDH activities. Although there was a large variability in CK response among the all subjects, the time course of changes in the activities of this enzyme was similar in each group. The pretest LDH activities were comparable in both groups of subjects, whereas test performed by the swimmers resulted in a higher increment in LDH activity (21% increase) than in the cross-country skiers (18% increase). Post-exercise changes in LDH activity showed that plasma activity of this enzyme

**Table 4** Mean cutaneous whole body temperature  $T_{sk} \pm SD$  values for swimmers and cross-country skiers before and after running exercise

Method	Swimmers, $N = 4$			Cross-country skiers, $N = 6$		
	$T_{sk} \pm SD/^{\circ}C$			$T_{sk} \pm SD/^{\circ}C$		
	Before training	After training	$p$	Before training	After training	$p$
(1)	32.50 $\pm$ 0.45	33.23 $\pm$ 0.61	<b>0.009</b>	32.40 $\pm$ 0.70	31.73 $\pm$ 1.03	0.10
(2)	32.51 $\pm$ 0.37	33.30 $\pm$ 0.63	<b>0.009</b>	32.39 $\pm$ 0.69	31.85 $\pm$ 1.06	0.10

Significant differences of  $T_{sk}$  before and after treadmill exercise, according to a paired student  $t$  test, are shown in bold

**Table 5** Physiological and biochemical characteristics during exercise test

Variable	Cross-country skiers, $N = 6$	Swimmers, $N = 4$
HR <sub>T</sub> /beats min <sup>-1</sup>	182 $\pm$ 6.7	180.5 $\pm$ 8.2
WR <sub>T</sub> /W	295.6 $\pm$ 20.1	275.8 $\pm$ 2.9
WR/kg W <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	4.0 $\pm$ 0.08	3.43 $\pm$ 0.46
V <sub>T</sub> /km h <sup>-1</sup>	14.0	12.0
Total time of exercise/min	55.0 $\pm$ 10.5	35.0 $\pm$ 16.9
LA <sub>0</sub> /mM	1.2 $\pm$ 0.3	1.7 $\pm$ 0.6
LA <sub>T</sub> /mM	3.8 $\pm$ 0.8	5.13 $\pm$ 3.5
$\Delta$ LA/mM	2.6 $\pm$ 0.8	3.41 $\pm$ 3.01
CK <sub>0</sub> /U L <sup>-1</sup>	213.2 $\pm$ 13.5	79.6 $\pm$ 8
CK <sub>T</sub> /U L <sup>-1</sup>	283.9 $\pm$ 145	148.4 $\pm$ 50
$\Delta$ CK/U L <sup>-1</sup>	70.7 $\pm$ 70.19	68.8 $\pm$ 46
Hb <sub>0</sub> /g dL <sup>-1</sup>	15.9 $\pm$ 0.43	15.4 $\pm$ 0.3
Hb <sub>T</sub> /g dL <sup>-1</sup>	16.3 $\pm$ 0.51	16.4 $\pm$ 0.6
$\Delta$ Hb/g dL <sup>-1</sup>	0.45 $\pm$ 0.41	1.0 $\pm$ 0.6
LDH <sub>0</sub> /U L <sup>-1</sup>	323.3 $\pm$ 84	232.1 $\pm$ 47
LDH <sub>T</sub> /U L <sup>-1</sup>	382.6 $\pm$ 77.6	254.3 $\pm$ 56.2
$\Delta$ LDH/U L <sup>-1</sup>	59.4 $\pm$ 24.5	22.26 $\pm$ 15

HR<sub>T</sub>, terminal heart rate; WR<sub>T</sub>, terminal work load; WR/kg, terminal work load, per kg BM; V<sub>AT</sub>, velocity at AT during treadmill running; LA<sub>0</sub>, lactate concentration at the beginning of exercise; LA<sub>T</sub> terminal lactate concentration;  $\Delta$ LA, increase in lactate concentration during exercise test; CK<sub>0</sub>, creatine kinase activity before exercise test; CK<sub>T</sub>, creatine kinase activity achieved immediately after exercise test;  $\Delta$ CK, increase in creatine kinase activity during exercise; Hb<sub>0</sub>, Hb<sub>T</sub>, basal and terminal of the blood haemoglobin concentration, respectively;  $\Delta$ Hb, increase in the blood haemoglobin concentration during exercise test; LDH<sub>0</sub>, lactate dehydrogenase activity at the beginning of exercise; LDH<sub>T</sub>, lactate dehydrogenase activity achieved immediately after exercise test;  $\Delta$ LDH, increase in lactate dehydrogenate activity during exercise

response to exercise depended on the training status. Differences in post-exercise CK and LDH levels in plasma may reflect dissimilarities in the rates of penetration through the sarcolemma and different degrees of injury in distinct fibre types. Moreover, ski-runners exhibited less acidification ( $\Delta$ LA) despite the increased load (WR and WR/kg) and longer exercise.

**Correlations between temperature and physiological/biochemical markers**

Analysis of relationships of skin temperature with physiological and biochemical factors was focused on zones of the muscles that worked the most intensively while running

exercise was performed; there were vastus lateralis, biceps femoris, gastrocnemius, soleus in the lower part of body and biceps brachii and pectoralis major in the upper part of body, mainly [34, 35]. The calculated correlations between temperature and physiological as well as biochemical factors are presented in Table 6.

In general, a small number of correlations are found statistically significant that may be due to the small size of the groups studied. Nevertheless, it follows from Table 5 that temperature correlations with functional parameters such as WR<sub>T</sub> and VO<sub>2max</sub> can be strong and statistical significant ( $p < 0.05$ ) or show marked tendency ( $p \leq 0.1$ ) for some muscles of legs working intensively during experimental exercise performed on treadmill in

**Table 6** Correlations ( $r$ ) of physiological and biochemical parameters ( $VO_{2max}$ ,  $WR_T$ ,  $LA_T$ ,  $LDH_T$ ) with average temperature after exercise in selected muscle zones (shown for muscle zones when significant correlation at  $p \leq 0.05$  occurred for at least one of the studied groups)

Muscle	Group	$VO_{2max}/L \text{ min}^{-1}$		$WR_T/W$		$LA_T/mM$		$LDH_T/U \text{ L}^{-1}$	
		$r$	$p$	$r$	$p$	$r$	$p$	$r$	$p$
Rectus femoris	SW	-0.88	0.12	<b>-0.94</b>	<b>0.05</b>	-0.72	0.27	0.73	0.26
	CS	0.15	0.77	0.21	0.68	0.21	0.68	-0.04	0.93
Knees (at front)	SW	-0.22	0.67	0.02	0.96	0.68	0.13	-0.09	0.86
	CS	-0.85	0.14	<b>-0.94</b>	<b>0.05</b>	-0.76	0.23	0.76	0.23
Soleus	SW	-0.7	0.23	<b>-0.99</b>	<b>0.01</b>	-0.67	0.32	0.86	0.13
	CS	-0.37	0.46	-0.45	0.36	<b>0.87</b>	<b>0.02</b>	0.06	0.90
Biceps femoris	SW	-0.65	0.34	<b>-0.98</b>	<b>0.01</b>	-0.48	0.51	<b>0.92</b>	<b>0.05</b>
	CS	0.45	0.36	0.36	0.47	0.09	0.85	0.25	0.62
Remaining thigh muscles	SW	-0.56	0.43	<b>-0.99</b>	<b>0.01</b>	-0.57	0.42	<b>0.96</b>	<b>0.03</b>
	CS	0.21	0.68	0.17	0.73	0.38	0.45	0.25	0.63
Gastrocnemius caput mediale	SW	<b>-0.94</b>	<b>0.05</b>	-0.80	0.19	-0.52	0.47	0.53	0.46
	CS	0.11	0.83	0.25	0.63	-0.18	0.73	-0.09	0.85

Significant correlations ( $r$ ) between physiological and biochemical parameters and average skin temperature after exercise are shown in bold

swimmers, especially. Earlier negative high correlation between power set on bicycle ergometer and average body surface temperature of athletes during progressive test was reported [32]. The strong and statistically significant influence of aerobic fitness ( $VO_{2max}$ ) on the change in surface temperature of the upper limbs immediately after the exercise for athletes who professionally played volleyball was also reported [36]. It is known that changes in concentration of biochemical metabolic markers depend on the type, intensity and exercise duration as well as were related to individual subjects' adaptation to exercise and the aerobic fitness level. Previous studies have established these differences based on changes of the thermoregulatory processes depending on the physical level of the subject [37, 38]. Low-trained subjects release the heat worse than high-trained during exercise and maintain the heat longer time during the recovery process [39]. This is probably due to a higher muscle activation and blood flow in high-trained subjects.

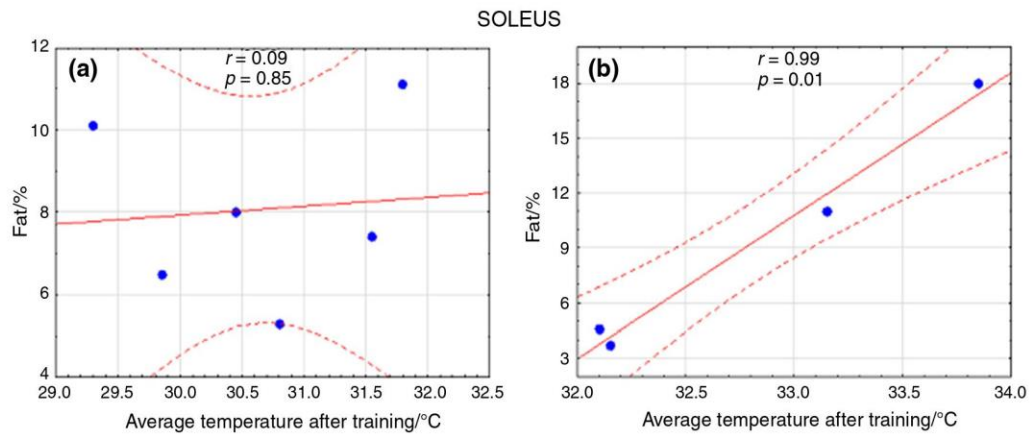
Temperature correlations with biochemical metabolic markers ( $LA_T$ ,  $LDH_T$ ) on significance level or tendency occur much less frequently than with physiological factors (Table 6) and are dependent on type of muscle. The studied muscles (especially soleus and gastrocnemius) differ significantly in the contribution of slow twitch (ST) and fast twitch (FT) fibres in the muscle structure which consequently implies differences in the metabolic characteristics of these muscles.

The lack of significant changes in skin temperature over leg muscles (Table 3) and practically negligible temperature correlations between physiological and biochemical markers in cross-country skiers unlike swimmers seems to

stem from the fact that CS group is characterised by higher running endurance capacity ( $VO_{2max}$ ) than SW group for which running effort is not as specific as for skiers.

Recently, it has been raised [40] that the temperature distribution at the skin is not directly related to physiological metabolism transforming chemical energy into work and heat. However, infrared radiation can be directly correlated with the temperature distribution of a defined body region [3]. Heat transported by blood is influenced by the gradient between temperature of core tissues and shell temperature represented by surrounding tissues. Peripheral tissues (e.g. fat depot under the skin, subcutaneous fat) may act as insulation layers varying in expansion in dependence of ambient temperature and individual human. A study of surface skin temperature distribution in relation to body composition indicated a lower skin temperature of most body surfaces in obese women [41] than women of normal body mass because the local skin temperatures are influenced by subcutaneous adiposity. Among our studied athletes, higher temperature correlation coefficients with fat content were obtained in the most muscle zones for swimmers unlike ski-runners (Fig. 3).

In human thermoregulatory behaviour, the skin as the thermal input for maintenance of heat balance and temperature regulation during exercise and rest can be considered [42]. Complex of thermal dynamic balance between heat dissipation through the radiation, convection and evaporation of sweat and heat production dependent on its intensity and effort is reflected in thermal imaging of surface skin body. Therefore, thermography is used as a fast, non-invasive method, which can provide indirect information on the body's adaptation to physical effort and



**Fig. 3** Correlations of fat/% against average temperature after training for the representative muscle of lower part of body in ski-runners (a) and swimmers (b) respectively

ability to remove excess heat from body. It was observed that CS group characterised better efficiency of the mechanisms responsible for heat removal (statistical drop of temperature of upper part of body due to evaporation unlike swimmers, see Tables 2 and 3) was more burdened during the exercise test and continued to exercise for a longer period of time, keeping heart rate close to swimmers).

## Conclusions

Our pilot study showed dissimilarities in skin temperature distribution in elite athletes with different sport skills subjected to the same endurance exercise on treadmill. Moreover, significant (though not many) correlations of physiological ( $WR_T$ ,  $VO_{2max}$ ), biochemical ( $LA_T$ ,  $LDH_T$ ) and morphological parameters (% fat) with average temperature after exercise test were found for different muscle zones in swimmers and cross-country skiers. These findings can provide additional information on the muscle work in the different sport disciplines and may be helpful in efficiency evaluation of athletes. However, further investigation is needed for validation of results.

**Acknowledgements** This study was supported by statutory funds of University of Silesia, Poland and partly by Grant Ministry of Science and Higher Education (Poland)/Nr0050/RS4/2016/54.

## Compliance with ethical standards

**Conflict of interest** The authors declare that they have no conflict of interest.

**Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give

appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

## References

- Marins JCB, Fernández-Cuevas I, Arnaiz-Lastras J, Fernandes AA, Sillero-Quintana M. Applications of infrared thermography in sports. A review. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*. 2015;15(60):805–24.
- Fernández-Cuevas I, Sillero-Quintana M, Garcia-Concepcion MA, Ribot-Serrano J, Gomez-Carmona P. Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography. *New Stud Athl*. 2014;29(1):57–71.
- Hildebrandt C, Zeilberger K, Francis E, Ring J, Raschner C. The application of medical infrared thermography in sports medicine. In: Zaslav KR, editor. *An international perspective on topics in sports medicine and sports injury*. InTech; 2012. ISBN: 978-953-51-0005-8. <http://www.intechopen.com/books/an-international-perspective-on-topics-in-sports-medicine-and-sports-injury/the-application-of-medical-infrared-thermography-in-sports-medicine>.
- Arfaoui A, Polidori G, Tair R, Popa C. Infrared thermography in sports activity. In: Prakash RV, editor. *Infrared thermography*. InTech; 2012. ISBN: 978-953-51-0242-7. <http://www.intechopen.com/books/infrared-thermography/infrared-thermography-in-sports-activity>.
- Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM. Creatine kinase monitoring in sport medicine. *Br Med Bull*. 2007;81–82:209–30.
- Banfi G, Lombardi G, Lubkowska A. Metabolic markers in sports medicine. *Adv Clin Chem*. 2012;56:1–54.
- Stanula A, Gabrys T, Szmatlan-Gabrys U, Rocznik R, Maszczyk A, Pietraszewski P. Calculating lactate anaerobic thresholds in sports involving different endurance preparation. *J Exerc Sci Fit*. 2013;11:12–8.
- Sprynarova S, Bass A, Mackova E, Vondra K, Vitek V, Teisinger J, Malkovska M. Changes in maximal aerobic power, aerobic capacity, and muscle enzyme activities at two stages of the annual training cycle in ski-runners. *Eur J Appl Physiol*. 1980;44:17–23.
- Mackova E, Melichna J, Vondra K, Jurimae T, Paul T, Novak J. The relationship between anaerobic performance and muscle metabolic capacity and fibre distribution. *Eur J Appl Physiol*. 1985;54:413–5.



10. Lindinger SJ, Holmberg H-C, Muller E, Rapp W. Changes in upper body muscle activity with increasing double poling velocities in elite cross-country skiing. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106:353–63.
11. Akimov EB, Son'kin VD. Skin temperature and lactate threshold during muscle work in athletes. *Hum Physiol.* 2011;37(5):621–8.
12. Adamczyk JG, Boguszewski D, Siewierski M. Thermographic evaluation of lactate level in capillary blood during post-exercise recovery. *Kinesiology.* 2014;46(2):186–92.
13. Rusko H, Rakkila P, Karvinen E. Anaerobic threshold, skeleton muscle enzymes and fiber composition in young female cross-country skiers. *Acta Phys Scand.* 1980;108:263–8.
14. Losnegard T, Mikkelsen K, Rfnestad BR, Halle J, Rud B, Raastad T. The effect of heavy strength training on muscle mass and physical performance in elite cross country skiers. *Scand J Med Sci Sports.* 2011;2:389–401.
15. Stöggl T, Müller E, Ainegren M, Holmberg H-C. General strength and kinetics: fundamental to sprinting faster in cross country skiing? *Scand J Med Sci Sports.* 2011;21:791–803.
16. Holmberg H-C, Lindinger S, Stöggl T, Eitzlmair E, Müller E. Biomechanical analysis of fubel poling in elite cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(5):807–18. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000162615.47763.C8>.
17. Zaidi H, Taär R, Fohanno S, Polidori G. The influence of swimming type on the skin-temperature maps of a competitive swimmer from infrared thermography. *Acta Bioeng Biomech.* 2007;9(1):47–51.
18. Ramadan W, Rybarova S, Zacha D, Novotny J Jr, Bernacikova M, Novotny J. Thermographic evaluation of muscle activity after front crawl swimming in young men. *Acta Bioeng Biomech.* 2017. <https://doi.org/10.5277/ABB-00924-2017-03>.
19. Novotny J, Rybarova S, Zacha D, Novotny J Jr, Bernacikova M, Ramadan W. The influence of breaststroke swimming on the muscle activity of young men in thermographic imaging. *Acta Bioeng Biomech.* 2015;17(2):121–9.
20. Rybarova S, Novotny J. Skin temperature changes of muscle regions in training swimmers. *J Hum Sport Exerc.* 2015;10(1):S192–7.
21. Ammer K. The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. *Thermol Int.* 2008;18(4):125–44.
22. Ring EFJ, Ammer L. The technique of infrared imaging in medicine. *Thermol Int.* 2000;10(1):7–14.
23. Tanda G. Total body skin temperature of runners during treadmill exercise. A pilot study. *J Therm Anal Calorim.* 2018;131:1967–77.
24. Tanda G. Skin temperature measurements by infrared thermography during running exercise. *Exp Therm Fluid Sci.* 2016;71:103–13.
25. Merla A, Mattei PA, Di Donato L, Romani GL. Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise. *Ann Biomed Eng.* 2010;38:158–63.
26. Ludwig N, Trecroci A, Gargano M, Formenti D, Bosio A, Rampinini E, Alberti G. Thermography for skin temperature evaluation during dynamic exercise, a case study on an incremental maximal test in elite male cyclist. *Appl Opt.* 2016;55(34):1–5. <https://doi.org/10.1364/AO.99.099999>.
27. Pokora I, Żebrowska A. Application of A Physiological Strain Index in evaluating responses to exercise stress—a comparison between endurance and high intensity intermittent trained athletes. *J Hum Kinet.* 2016;50(1):103–14.
28. Roels B, Schmitt L, Libicz S, Bentley D, Richalet J, Millet G. Specificity of  $VO_{2max}$  and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. *Br J Sports Med.* 2005;39(12):965–96.
29. Pokora I. Relationships between electromiographic characteristics, mechanical work efficiency and body temperatures during running exercise test in men. *J Hum Kinet.* 2004;11:3–5.
30. Drzazga Z, Cholewka A, Ciszek W, Czuba MC, Poprzęcki S. Body temperature depression to training exercise in normobaric hypoxia—primary studies. In: IFMBE proceedings, vol. 45; 2015, p. 232–235.
31. Choi JK, Miki K, Sagawa S, Shiraki K. Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography. *Int J Biometeorol.* 1997;41:68–75.
32. Cholewka A, Kasprzyk T, Stanek A, Sieroń-Stołyń K, Drzazga Z. May thermal imaging be useful in cyclist endurance tests? *J Therm Anal Calorim.* 2016;123:1973–9. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4662-5>.
33. Fernandes AA, Amorim PRS, Brito CJ, Siller-Quitana M, Marins JCB. Regional skin temperature response to moderate aerobic exercise measured by infrared thermography. *Asian J Sports Med.* 2016;7(1):e29243.
34. Thelen DG, Chumanov ES, Hoerth DM, Best TM, Swanson SC, Li L, Young M, Heiderscheid BC. Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37:108–14.
35. Hof AL, Nauta J, van der Knaap ER, Schallig MA, Struwe DP. Calf muscles work and segment energy changes in human treadmill walking. *J Electromyogr Kinesiol.* 1992;2(4):203–16. [https://doi.org/10.1016/1050-6411\(92\)90024-D](https://doi.org/10.1016/1050-6411(92)90024-D).
36. Chudecka M, Lubkowska A. The use of thermal imaging to evaluate body temperature changes of athletes during training and a study on the impact of physiological and morphological factors on skin temperature. *Hum Mov.* 2012;13(1):33–9.
37. Adamczyk JG, Olszewska M, Boguszewski D, Białoszewski D, Reaburn P. Is it possible to create a thermal model of warm-up? Monitoring of the training process in athletic decathlon. *Infrared Phys Technol.* 2016;76:555–9.
38. Boguszewski D, Adamczyk JG, Urbańska N, Mrozek N, Piejko K, Janicka M, Białoszewski D. Using thermal imaging to assess the effect of classical massage on selected physiological parameters of upper limbs. *Biomed Hum Kinet.* 2014;6:146–50.
39. Formenti D, Ludwig N, Gargano M, Gondola M, Dellerma N, Caumo A, Alberti G. Thermal imaging of exercise-associated skin temperature changes in trained and untrained female subjects. *Ann Biomed Eng.* 2013;41:863–71.
40. Ammer K. Can the source of metabolic heat be seen by infrared thermal imaging? Presented on XXI Meeting of the Polish Society of Medical Thermography Combined with The European Association of Thermology, Zakopane; 2017.
41. Chudecka M, Lubkowska A, Kempieńska-Podohordecka A. Body surface temperature distribution in relation to body composition in obese women. *J Therm Biol.* 2014;43:1–6.
42. Schlader ZJ, Stannard SR, Mundel T. Human thermoregulatory behaviour during rest and exercise—a prospective review. *Physiol Behav.* 2010;99(3):269–75.

**Publikacja nr 2:** Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora (2020); **“Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?”**; Journal of Thermal Analysis and Calorimetry; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>

Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458

W tym artykule skupiłem się na wpływie jaki wywiera powtarzany regularnie zabieg odnowy biologicznej w postaci kąpieli w suchej saunie Fińskiej, na temperaturę skóry sportowców zarówno przed wykonaniem eksperymentalnego wysiłku, bezpośrednio po jego zakończeniu, oraz po 10 minutowej restytucji.

Odnowa biologiczna z zastosowaniem sauny jest szeroko akceptowana jako zabieg wspomagający sportowców w dochodzeniu do pełni sprawności po zawodach (Scoon, 2007). Regularne zażywanie sauny zwiększa adaptacje ciała do wysokich temperatur, co manifestuje się poprawą kontroli czynności układu sercowo–naczyniowego, czyli zwiększoną objętością krwi, zmniejszeniem częstości pulsu oraz zmianami w działaniu autonomicznego układu nerwowego, który w następstwie przekierowuje wyrzut krwi z serca do łożysk naczyń włosowatych skóry i najbardziej aktywnych mięśni (Garrett, 2011; Periard, 2016). Te właściwości sugerują wysoką użyteczność takich zabiegów dla sportowców.

W przeprowadzonym eksperymencie grupę badawczą stanowiła grupa profesjonalnie trenujących biegaczy narciarskich, znajdujących się w przerwie między sezonowej. Przed eksperymentalnym testem wysiłkowym, dla każdego z zawodników określono indywidualny maksymalny pułap tlenowy w pre–teście, przeprowadzonym tydzień wcześniej. Sam eksperymentalny wysiłek składał się z godzinowego biegu na bieżni mechanicznej na określonym pułapie tlenowym i z maksymalną prędkością określoną dla uczestnika. Wysiłek ten został wykonany przez uczestników badania dwukrotnie, przed zastosowanie odnowy biologicznej, oraz powtórzony po serii kąpieli w Fińskiej saunie. Odnowa biologiczna w saunie składała się z 10 zabiegów ze średnią temperaturą wewnątrz sauny 90°C, wilgotnością 12%, trwających nie dłużej niż 45 minut, podzielonych na co najmniej 3 wejścia – co odpowiada średniej adaptacji cieplnej MHA. Przed i po wykonaniu ćwiczenia wysiłkowego każdemu uczestnikowi zostały wykonane serie zdjęć termograficznych oraz pobrana krew do badań biochemicznych. Schemat obrazowania termicznego został zachowany jak w poprzedniej publikacji – podział ciała na 22 strefy mięśniowe.

Wykonane obrazowanie termiczne wykazało, znaną z poprzedniej publikacji zależność znacznego spadku temperatury bezpośrednio po wykonaniu testu wysiłkowego dla mięśni

górnej partii ciała oraz nieznacznego jej podniesienia w obszarze mięśni nóg. Zależność ta pozostała zachowana niezależnie od stosowania zabiegów w saunie, niemniej jednak po odnowie biologicznej natężenie spadku temperatury staje się wyższe. Obrazowanie wykonane po 10 minutowym okresie restytucji, przed zastosowaniem odnowy biologicznej, wykazało dalszy spadek temperatury w górnych partiach ciała, po tym okresie zarejestrowano również spadek temperatur mierzonych nad mięśniami kończyn dolnych. Zastosowanie zabiegów w saunie spowodowało natomiast nieznacznie zwiększony spadek temperatur po restytucji w górnej partii ciała, względem pomiarów przeprowadzonych przed nimi. W przypadku mięśni kończyn zauważono, że zastosowanie MHA przedłuża nieznacznie utrzymywanie się podwyższonej temperatury. Przeprowadzona analiza średnich wartości temperaturowych mierzonych nad poszczególnymi strefami mięśniowymi pokazała statystycznie istotne spadki ich wartości nad mięśniami tułowia, szczególnie po stronie pleców, występujące niezależnie od zastosowania MHA. Zależność ta jest większa po okresie restytucji niż bezpośrednio po teście wysiłkowym. Dla stref mięśniowych opisanych na kończynie dolnej zmiany temperatury bezpośrednio po zakończeniu wysiłku mają charakter wzrostowy jednak jedyne istotne statystycznie przyrosty zaobserwowano dla kolana i mięśnia obszernego bocznego uda. Sam efekt przegrzania kończyn dolnych zaś był nieznacznie mocniejszy po zastosowaniu zabiegów MHA. Odwrotnie niż dla mięśni kończyn górnych nie zmierzono zmian istotnych statystycznie po okresie restytucji. Dla wszystkich otrzymanych istotnych statystycznie zmian temperaturowych przeprowadzono częściowy test eta-kwadrat  $\eta^2$ , który wykazał „średni” efekt wielkości grupy badawczej.

W celu pogłębienia analiz matematycznie wyliczono różnice temperatur nad strefami mięśniowymi uzyskanych bezpośrednio po wykonanym eksperymentalnym teście wysiłkowym, oraz po restytucji z temperaturą początkową, dla obu faz eksperymentu. Wartości obliczone:  $\Delta T_{2-1} = T_2 - T_1$  oraz  $\Delta T_{3-1} = (T_3 - T_1)$ , gdzie  $T_1$  – temperatura przed wysiłkiem,  $T_2$  – temperatura bezpośrednio po treningu,  $T_3$  – temperatura po 10 minutowej restytucji. Porównując otrzymane w ten sposób wyniki nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w zmianie temperatury jaka pojawia się bezpośrednio w wyniku wykonania wysiłku nad strefami mięśniowymi górnej części ciała, niezależnie od korzystania z zabiegów w saunie. Zauważalny jest jednak zwiększony przyrost temperatury nad mięśniami kończyn dolnych po adaptacji MHA aniżeli przed nią. Analizując zależności  $\Delta T_{3-1}$  zauważono, iż gradient temperatury nad mięśniami jest na prawie identycznym poziomie w obu częściach eksperymentu.

Generalnie, charakter zmian występujących w obu częściach eksperymentu jest ze sobą zgodny. Spadek temperatury w górnych partiach ciała jest związany z większą ilością znajdujących się na niej gruczołów potowych. Główna część odprowadzenia ciepła z ciała podczas trwania wysiłku zachodzi w mięśniach znajdujących się na plecach i klatce piersiowej (Ravanelli, 2018). Znaną zależnością jest zwiększenie produkcji potu po zakończonej aklimatyzacji do wyższych temperatur np. przez kąpiele w saunie. Odziaływanie takie jest związane ze zwiększeniem aktywności i czułości gruczołów potowych. MHA wywiera więc wpływ zarówno na centralne jak i peryferyjny ośrodek adaptacji, podczas gdy wysiłek wpływa głównie na najbardziej zewnętrzne zmiany w ukrwieniu (Candas, 1979; Kondo, 1999).

Zgodnie z dostępną literaturą adaptacja cieplna nie wywołuje żadnych efektów spoczynkowych u sportowców (Tyler, 2016). W eksperymencie wykazane zostało jednak, że zastosowane zabiegi MHA mają bardzo duży wpływ na temperaturę powierzchni skóry mierzoną nad danymi strefami mięśniowymi górnej części ciała. Uzyskane wyniki są zgodne z przyjętymi założeniami i opisanym poprzednio artykułem.

Poza zmianami temperatur zmierzone zostały również poziomy markerów fizjologicznych i hematologicznych. Dokonując analizy porównawczej uzyskanych wyników nie wskazano wśród nich żadnych istotnych statystycznie różnic. Niemniej jednak zarówno parametry fizjologiczne: tętno maksymalne HR, wykonana prac WR, czy pobór tlenowy  $VO_2$ , jak i hematologiczne – koncentracja hemoglobiny w odpowiednich fazach treningu ( $Hb_0$  – przed wysiłkiem;  $Hb_T$  – po zakończeniu wysiłku) po zastosowaniu MHA osiągały niższe wartości. Pewne zmiany zaobserwowano jednak w spoczynkowej objętości osocza krwi. Po serii zabiegów w saunie jej wartość wzrosła o 2,13%, co jest zgodne z innymi dotychczasowymi doniesieniami (Scoon, 2007) w badaniach przeprowadzonych na innej grupie sportowców.

Podsumowując zastosowanie odnowy biologicznej w postaci sauny Fińskiej ma niewielki wpływ na termoregulację występującą w organizmach profesjonalnych biegaczy narciarskich w odpowiedzi na wysiłek. Zarówno niewielki różnice w uzyskanych w obu fazach eksperymentu danych temperaturowych (tylko nieznacznie pogłębione efekty chłodzenia górnej części ciała oraz przegrzewania kończyn dolnych), jak i w parametrach fizjologicznych i hematologicznych potwierdzają ten fakt.



# Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?

Z. Drzazga<sup>1</sup> · M. Binek<sup>1</sup> · I. Pokora<sup>2</sup>

Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020  
© The Author(s) 2020

## Abstract

The aim of this study was to evaluate the influence of a series of ten Finnish dry sauna bathing on skin temperature following exercise test for elite cross-country skiers and test, if the regular sauna baths induce any changes in physiological or haematological parameters in elite athletes. Ten elite cross-country skiers ( $21.7 \pm 3.1$  years, height:  $1.79 \pm 0.025$  m, body mass:  $71.06 \pm 4.77$  kg) participated in this study. They performed two continuous exercise tests, before and after a series of ten sauna baths. During experiment, the superficial temperature distributions, physiological and haematological parameters were measured. The marked temperature drop was visible in upper body and smaller in lower part of body after exercise test. 10 min after experimental exercise test slow return of the skin temperature to pre-workout values was observed in lower limbs unlike upper part of body. Results of this study indicated that passive induced heat acclimation have a moderate, positive effect (above 2%) on plasma volume and a small impact on physiological and temperature responses to exercise in elite athletes. We conclude that ten Finnish dry sauna baths can induce weak changes in the superficial temperature distributions following exercise test, a certain decrease in resting heart rate and small increase in plasma volume in the elite cross-country skiers.

**Keywords** Thermal mapping · Sauna stimulation · Thermoregulation · Cross-country skiers · Physiological assay

## Introduction

Thermal imaging is a non-invasive method used to visualize human body temperature changes in response to physiological processes and may be useful to detect physiological and pathophysiological reactions related to the control of the skin temperature. Recently, this method is most often used to monitor individual muscles to detect overloads and injuries as well as to monitor the body temperature distributions during and after exercise [1–6]. A few reports also suggested that MIT (medical infrared thermography) may be useful for detection effectiveness of skin heating or cooling and as a convenient and effective diagnostic tool for detection of

peripheral vascular disorders [7]. It has been hypothesized that the MIT can provide excellent additional information about the existence of some differences in thermal behaviour of the skin after exercise, in athletes who were using a series of sauna baths.

In the field of physical activity and sport, it is important to optimize the recovery process of the athletes. Sauna bathing is a form of passive heat therapy which can be routinely used as a non-pharmacological treatment regimen in certain medical disorders such as cardiovascular diseases [8–10] or anorexia [11] to relieve symptoms and improve wellness.

Finnish sauna has a substantial effect on the whole human body. Alternate hot and cold conditions used in sauna bathing are considered to accelerate biomedical athletic recovery and are frequently used as therapies in sport, recreation and rehabilitation [12]. This treatment is supposed to help in regeneration as well as increase the overall efficiency of the athletes. Several studies have documented the positive effect of sauna on health of participant [13–16]. Influence of sauna on human body is mainly associated with an increase in the thermoregulatory and circulatory demands. In order to maintain thermal homeostasis, the body actively responds to the thermoregulatory mechanisms. For sports requiring high endurance, the

✉ Z. Drzazga  
zofia.k.drzazga@gmail.com

<sup>1</sup> University of Silesia in Katowice, Faculty of Science and Technology, The Silesian Centre for Education and Interdisciplinary Research, ul. 75 Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów, Poland

<sup>2</sup> Department of Physiological and Medical Sciences, Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Katowice, Poland

sauna is a complementary biological regeneration treatment. Regular exposure to passive heating (e.g. sauna) induces cardiovascular and sweating changes: positive heat adaptation. Scoon et al. [15] as well as Ernst et al. [17] showed that a 3-week post-exercise sauna bathing produced a worthwhile enhancement of endurance running performance, probably by increasing blood volume. Complete heat acclimation (HA) requires up to 14 days, but the systems of the body adapt to heat exposure at varying rates. The early adaptations (initial 1–5 days) involve an improved control of cardiovascular function, including expanded plasma volume, reduced heart rate and autonomic nervous system habituation which redirects cardiac output to skin capillary beds and active muscle. These adaptations contribute to improvements in cardiovascular stability, sweating capacity and thermoregulation processes that work in combination to improve physical capacities and sports performance in the heat [18, 19] and may also improve aerobic performance in cooler conditions up to 6% [20]. To date, heat acclimation has been achieved via both active strategies [20] and passive strategies [21] and as short (< 7 days)-, medium (8–14 days)-, and long (> 14 days)-term heat adaptation protocols [18]. Short-term heat acclimation may be the preferred regime for highly trained athletes, as it potentially provides less disruption of quality training [22], while medium-term protocols elicit greater physiological adaptations and performance improvements [23].

Cross-country skiing is one of the most demanding sports aimed at endurance which requires one of the highest aerobic fitness levels. For sports requiring high endurance, the sauna is a complementary biological regeneration treatment. The change associated with heat acclimation such as the hypervolemic response of the blood plasma due to a transient reduction in haemoglobin and haematocrit ratios is expected after HA. We also supposed that HA could affect normal thermal patterns in the study in which the athletes were exposed to constant exercise. For that reason, the aim of this study was to evaluate the influence of a series of ten Finnish dry sauna bathing on skin temperatures following exercise test for elite cross-country skiers. It is interesting to check if MHA induce bigger change in temperature distribution in muscles of upper or lower part of body. What is more, we try to study, if the regular sauna baths may lead to significantly reduced heart rate before or after experimental exercise as well as expanded plasma volume (PV), which could indicate the marked development of heat adaptation (MHA) in elite athletes.

## Materials and methods

### Subjects

The study group was elite male cross-country skiers ( $n=10$ ), recruited from sports associations (AZS) the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education who had similar training experience (> 10 years); age:  $21.7 \pm 3.1$  years, height:  $1.79 \pm 0.025$  m, body mass:  $71.06 \pm 4.77$  kg, max. oxygen uptake:  $\text{VO}_{2\text{max}} = 4.49 \pm 0.5$  L  $\text{min}^{-1}$ , BMI:  $22.43 \pm 1.54$  kg  $\text{m}^{-2}$ , body fat:  $8.11 \pm 3.22\%$ . Participants were instructed to avoid alcohol, smoking, caffeine, large meals, cosmetics before the assessment. Volunteers were in the transitional period (April/May) of the annual training plan. They were informed of the purpose, possible risks and the benefits of the study before giving their written consent to participate. The study protocol conformed to the ethical guidelines of the World Medical Association Declaration of Helsinki and was approved by the Ethics Committee of the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice. Subjects were excluded if they had a concurrent cardiovascular or respiratory disorder. Data from all completed measurements were analysed statistically.

### Preliminary study

The study protocol was divided into three visits to the laboratory. During the first visit, 1 week prior to the start of the experiment, all subjects performed a standard incremental exercise test to measure their individual aerobic capacity ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) and individual anaerobic threshold (PPA). PPA was determined for each participant. Details of preliminary testing for determining of the mentioned values were described in [5]. The PPA had been used to calculate target work rates for submaximal exercise testing, which were used during experimental tests.

### Experiment tests

The subjects performed the same continuous exercise test twice, before and after a series of ten sauna baths. Experimental continuous exercise test (EET test) consisted of ~60 min running with the intensity below the individual PPA lactate threshold (calculated individually for each athlete during the preliminary study) on treadmill H/P/Cosmos Pulsar at  $20 \pm 1$  °C ambient temperature,  $56 \pm 3\%$  relative humidity and  $985 \pm 5$  hPa atmospheric pressure, in a human functional testing laboratory, Academy of Physical Education in Katowice. To avoid the effects of diurnal variations of body temperature, exercise tests were always performed in the morning at the similar time. It should be noted that EET test consisted of ~60 min running seems to be correlated

with the working body parts in cross-country skiers what was reflected on the thermal map.

### Sauna baths

Subjects completed heat acclimation sessions consisting of ten Finnish sauna baths with a 2 days rest between 5 and 6 heat exposures (medium-term heat adaptation, MHA). Participants spent a total of 45 min in sauna (sauna bathing per day, an average temperature at face height  $90^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , and average relative humidity  $12 \pm 4\%$ ). This time was divided into three parts (each 15 min) and separated by two 4–6 min showers to cool the body. All sauna baths were always conducted in the afternoon at the same period.

First experimental exercise was performed before heat exposure (control). The second one was performed 12 h after completed the series of ten heat exposures (MHA).

### Thermal imaging

Thermal images were recorded in accordance with the Glamorgan Protocol [24] taking into consideration checklist directed at standardizing thermographic imaging in sports and exercise medicine [25]. Thermal maps of face, upper part of body at front and back, thighs, knees and calves at front and from the rear were taken for each participant before, immediately after exercise and at 10 min of recovery using camera Flir Systems E60 with resolution  $320 \times 240$  pixels, sensitivity 0.05 K. Camera was calibrated by black body, and the emissivity was set at the range of 0.97–0.98. During imaging, camera was positioned perpendicular to the region of interest at about 1 m distance between object and camera. The data ROI were analysed by using a ThermoCAM TM Researcher Pro 2.8 SR-3 focusing on the muscle zones following to the model proposed by Fernandez-Cuevas et al. [2].

### Physiological parameters

Before and during EET tests, heart rate (HR) (PE-3000 Sport-tester, Polar Inc., Finland) and oxygen uptake ( $\text{VO}_2$ ) (Oxycon RALPHA (Jaeger, Germany) were recorded every 10 min.

### Blood collections

Samples of venous blood for haemoglobin [Hb] and haematocrit [Hct] assessment were taken at rest before exercise tests (Rest) and immediately afterwards. To assay haemoglobin (Hb), standard cyan-methaemoglobin method was used. (HG980, Randox, UK). Changes in the concentration of haemoglobin (Hb) and haematocrit (Hct) were used to

determine the relative change in plasma volume described by Dill and Costill [26].

Statistical analysis was performed in Statistica 12 software. All data were checked for normality using Shapiro–Wilk test, and then, data were analysed using *t* tests, if it was necessary nonparametric Mann–Whitney test. Temperature parameters were analysed using one-way ANOVA repeated measurements. The homogeneity of variances was verified by Leven’ test. Statistical significance between the means was set at  $p < 0.05$ . The effect size was also estimated in assessment of surface temperature distribution in body using ANOVA test.

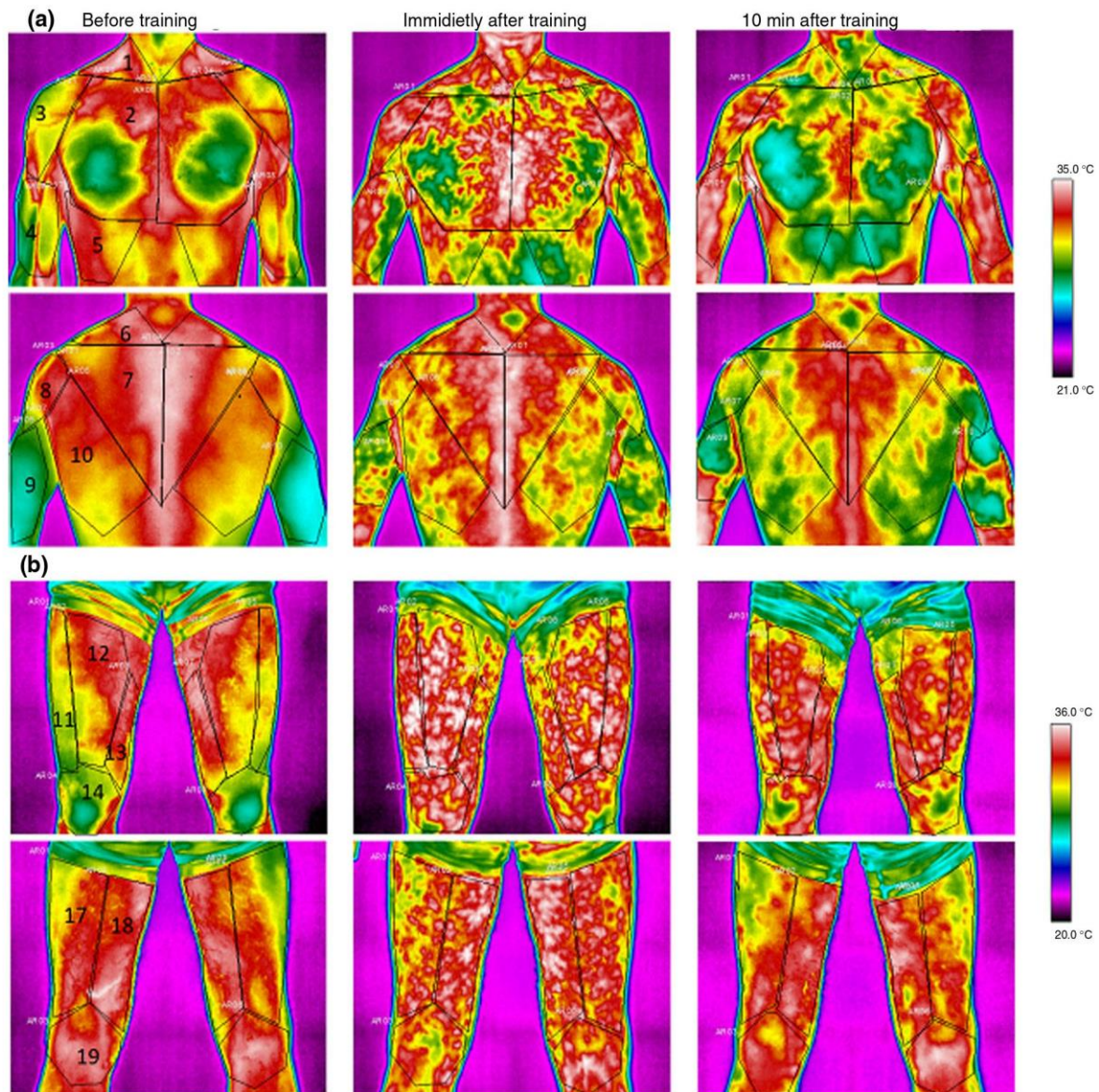
### Results

Example of thermographic recordings of body surface including upper and lower part, before, immediately after and 10 min after experimental exercise for ski-runners after 10 sauna bathing cycle (after MHA) is shown in Fig. 1.

One can see that skin temperature changes in response to exercise of upper and lower part of body shows different character. The marked temperature drop after experimental exercise was visible in upper body; in lower part of body, temperature changes were smaller and generally opposite. An explicit increase in temperature in thighs, knees was observed and weaker for calves. After 10 min recovery, the skin temperature of upper part of body decreased far, while the temperature of legs muscles slowly returned to pre-workout values.

Mean values of temperatures: T1—before exercise, T2—immediately after exercise, T3—10 min of recovery for selected muscle zones, before and after adaptation to heat are listed at Table 1. More statistical significant drops in skin temperature after EET test were found for rear upper part of body than upper part at front, especially after 10 min of recovery. It is interesting that after MHA we observed similar skin temperature decrease immediately after exercise. Significant increase in temperature in vastus lateralis and knee (at front) was obtained immediately after EET test, but it disappeared 10 min later. Moreover, it should be noted that partial eta-squared  $\eta_p^2$  was in range in “medium” effect size for significant changes of temperature (Table 1).

In order to get better insight into thermoregulation process, changes in skin body temperatures with respect to effort and restitution before and after adaptation to heat were analysed. Differences of mean skin temperature between temperature immediately after and before exercise  $\Delta T_{2-1} = T_2 - T_1$  as well as between temperature 10 min after and before exercise  $\Delta T_{3-1} = (T_3 - T_1)$  over selected muscle zones (21 ROIs) of sportsmen before and after sauna bathing cycle were calculated and presented in Fig. 2a, b. Change in skin temperature response to the effort before and after



**Fig. 1** Thermal mapping of upper body and things muscles during experimental exercise for sportsman after 10 sauna bathing cycle. Muscles of upper and lower part of body (front and rear) are presented (1—trapezius muscle, 2—pectoralis major, 3—deltoid muscle, 4—biceps brachii, 5—serratus anterior, 6—trapezius muscle (neck),

7—trapezius muscle (back), 8—rear of deltoid muscle, 9—triceps brachii, 10—latissimus dorsi, 11—vastus lateralis, 12—rectus femoris, 13—vastus medialis, 14—knee (at front), 17—biceps femoris, 18—rest of thigh muscle, 19—knee (rear)

adaptation to heat is weak. Figure 2 reveals certain, not significant differences in skin temperature  $\Delta T_{2-1} = T_2 - T_1$  over several muscles (Vastus lateralis, Rectus femoris, Knee (at front), Soleus). However, they disappeared with restitution period. Plots of  $\Delta T_{3-1}$  before and after MHA are nearly the same for the studied muscle zones beside trapezius muscle (back) and rear of deltoid muscle. Relatively, the biggest

change in temperature observed immediately after exercise in vastus lateralis and knee at front seems to be due to intensive activity of legs in cross-skiers. On the other hand, the deepening of temperature changes over trapezius muscle (back) and rear of deltoid muscle indicates increased cooling of the torso(back) by sweat evaporation caused by effort.

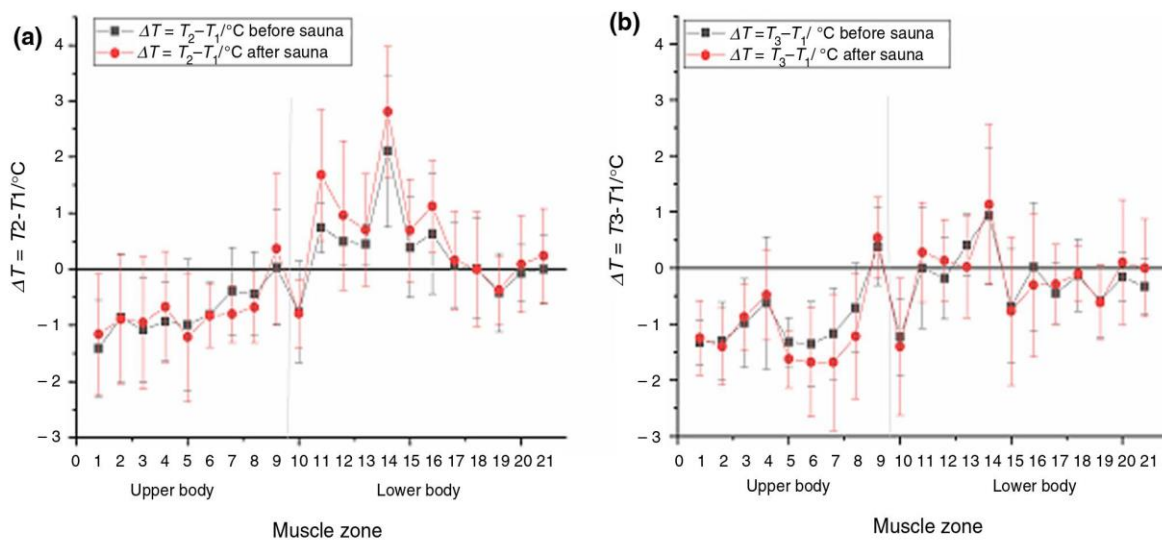
Physiological and haematological markers assessed at rest (0) and at the end ( $T$ ) of exercise test, before and after series of 10 sauna baths treatment are presented in Table 2.



**Table 1** Temperature values obtained in experiments T1—before exercise, T2—immediately after exercise, T3—after 10 min of restitution for selected muscle zones before and after sauna cycle

Muscle zone	Stage of experiment	Mean $T_1 \pm SD/^\circ\text{C}$	Mean $T_2 \pm SD/^\circ\text{C}$	Mean $T_3 \pm SD/^\circ\text{C}$
Trapezius muscle	Before	34.41 $\pm$ 0.58	<b>33.00 <math>\pm</math> 1.20</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.36$ )	<b>33.10 <math>\pm</math> 0.74</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.49$ )
	After	34.33 $\pm$ 0.59	33.17 $\pm$ 1.19	<b>33.08 <math>\pm</math> 1.34</b> ; $p=0.05$ ; ( $\eta_p^2=0.34$ )
Pectoralis major	Before	33.93 $\pm$ 0.72	33.07 $\pm$ 1.54	<b>32.60 <math>\pm</math> 1.05</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.34$ )
	After	34.03 $\pm$ 0.95	33.16 $\pm$ 1.04	32.63 $\pm$ 1.50
Serratus anterior	Before	33.79 $\pm$ 0.77	32.80 $\pm$ 1.41	<b>32.50 <math>\pm</math> 0.99</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.36$ )
	After	34.26 $\pm$ 0.93	33.05 $\pm$ 1.03	<b>32.64 <math>\pm</math> 1.46</b> ; $p=0.05$ ; ( $\eta_p^2=0.38$ )
Trapezius muscle (neck)	Before	34.52 $\pm$ 0.48	<b>33.71 <math>\pm</math> 0.59</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.36$ )	<b>33.2 <math>\pm</math> 0.83</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.50$ )
	After	34.56 $\pm$ 0.27	<b>33.73 <math>\pm</math> 0.58</b> ; $p=0.02$ ; ( $\eta_p^2=0.50$ )	<b>32.88 <math>\pm</math> 1.30</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.53$ )
Trapezius muscle (back)	Before	33.92 $\pm$ 0.32	33.53 $\pm$ 0.64	<b>32.80 <math>\pm</math> 0.80</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.50$ )
	After	34.55 $\pm$ 0.21	<b>33.75 <math>\pm</math> 0.69</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.42$ )	<b>32.86 <math>\pm</math> 1.49</b> ; $p=0.03$ ; ( $\eta_p^2=0.47$ )
Latissimus dorsi	Before	33.56 $\pm$ 0.44	32.80 $\pm$ 0.92	<b>32.30 <math>\pm</math> 0.68</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.53$ )
	After	33.91 $\pm$ 0.25	<b>33.12 <math>\pm</math> 0.59</b> ; $p=0.03$ ; ( $\eta_p^2=0.47$ )	<b>32.51 <math>\pm</math> 1.38</b> ; $p=0.04$ ; ( $\eta_p^2=0.42$ )
Biceps	Before	33.54 $\pm$ 0.66	<b>32.61 <math>\pm</math> 0.70</b> ; $p=0.05$ ; ( $\eta_p^2=0.32$ )	32.90 $\pm$ 0.77
	After	33.40 $\pm$ 0.38	32.73 $\pm$ 0.71	32.92 $\pm$ 0.58
Vastus Lateralis	Before	31.48 $\pm$ 0.49	32.23 $\pm$ 0.70	31.50 $\pm$ 0.99
	After	31.48 $\pm$ 1.01	<b>33.16 <math>\pm</math> 0.76</b> ; $p=0.02$ ; ( $\eta_p^2=0.51$ )	31.76 $\pm$ 1.17
Knee(at front)	Before	29.85 $\pm$ 0.81	<b>31.97 <math>\pm</math> 1.12</b> ; $p=0.01$ ; ( $\eta_p^2=0.54$ )	30.80 $\pm$ 1.04
	After	29.78 $\pm$ 0.65	<b>32.59 <math>\pm</math> 1.42</b> ; $p=0.00$ ; ( $\eta_p^2=0.66$ )	30.91 $\pm$ 1.52

Only results for muscles which statistical significant differences between  $T_2$  and  $T_1$  or  $T_3-T_1$  are listed ( $p \leq 0.05$  (bold) and partial eta-squared  $\eta_p^2 > 0.3$ )



**Fig. 2** Changes in skin body temperatures with respect to effort and restitution before and after adaptation to heat. 1—trapezius muscle, 2—pectoralis major, 3—deltoid muscle, 4—biceps brachii, 5—serratus anterior, 6—trapezius muscle(neck), 7—trapezius muscle (back), 8—rear of deltoid muscle, 9—triceps brachii, 10—latissimus dorsi,

11—vastus lateralis, 12—rectus femoris, 13—vastus medialis, 14—knee (at front), 15—tibialis anterior, 16—soleus, 17—biceps femoris, 18—rest of thigh muscle, 19—knee (rear), 20—gastrocnemius caput laterale, 21—gastrocnemius caput mediale

**Table 2** Physiological and haematological markers assessed at rest (0) and at the end (*T*) of exercise test, before (control) and after series of 10 sauna baths treatment (MHA)

Variable	Control	After MHA
HR <sub>rest</sub> /beats min <sup>-1</sup>	82.46 ± 12.93	76.42 ± 12.69
HR <sub>max</sub> /beats min <sup>-1</sup>	180.29 ± 11.63	177.7 ± 5.24
WR <sub>T</sub> /W	262 ± 25.19	260 ± 25.44
VO <sub>2</sub> /L min <sup>-1</sup>	3.58 ± 0.47	3.50 ± 0.62
ΔPV/%		+2.13 ± 1.15
Hb <sub>0</sub> /g dL <sup>-1</sup>	15.15 ± 1.01	14.75 ± 0.78
Hb <sub>T</sub> /g dL <sup>-1</sup>	15.77 ± 1.21	15.2 ± 0.69

HR<sub>rest</sub>—heart rate in rest state; HR<sub>max</sub>—terminal heart rate; WR<sub>T</sub>—terminal work rate; VO<sub>2</sub>—oxygen uptake; ΔPV%—change in plasma volume; Hb<sub>0</sub>, Hb<sub>T</sub>—basal and terminal of the blood haemoglobin concentration, respectively

Any statistical significant change was obtained in studied parameters. However, one should note a some decrease in HR<sub>rest</sub> and hemoglobin concentration after 10 sauna baths compared to control conditions. Moreover, calculation indicated that regular sauna baths can have a moderate, positive effect on resting plasma volume (ΔPV + 2.13%).

## Discussion

Results of this study indicated that passive heat acclimation (MHA) induced a certain impact on selected physiological/haematological parameters and skin temperature.

Prediction of EET test was that it strongly affected on skin temperature over muscles of lower and upper limbs. However, interesting and bigger changes occurred in torso, especially on back.

The drop of skin temperature over the selected regions of the upper part of body seems to be associated with cooling effect of sweat evaporation. Sweating is the most important thermoregulatory reaction by which heat balance is maintained following a rise in body temperature during endogenous exercise-induced heat load. During exercise, the highest evaporative heat loss following take place from back and chest [27], what was also observed in our study of cross-skiers.

It is known that heat dissipation, under conditions of exercise-thermal stress, is mediated primarily by evaporation of sweat. Heat acclimation has been shown to enhance sweat production by eliciting changes in the sensitivity of eccrine glands, total sweat output and distribution of gland activity. The physical training induces peripheral adaptations, while heat acclimation produces both peripheral and central modifications. It is suggested that repeated cutaneous heat stimulation may be essential to the development of central sudomotor changes [28, 29].

Untrained non-heat acclimated individuals are able to physiologically wet a maximum of approximately 72% of their skin surface. Increasing the number of sweat glands activated per surface area permit a more complete saturation of the skin surface and a great evaporation. Physiologically, the ability to achieve the better dynamics of sweating an improved acclimation status facilitated by a higher local sweating rate on both the arm and back mediated by a greater number of simultaneously activated sweat glands, which potentially facilitated an enhanced distribution of sweat on the skin surface and the attainment of greater rates of maximal evaporative heat loss [30].

Tyler et al. [31] have shown that resting temperature of skin is unaffected by HA of any duration, but HA has a large effect on reducing mean *T* skin during exercise. In our study, despite the lack of MHA effect on resting temperature (*T*<sub>r</sub>) there was a large effect of MHA on reducing mean superficial temperature over muscle zones after exercise in upper part of body (Table 1). According to our previous article, the marked skin temperature drop after similar exercise was visible in upper body in cross-country skiers and in swimmers in lower part of body [5], indicating that as changed to surface temperature distribution depends on the type of sport practiced.

It was reported that normal skin temperature pattern is affected for many hours after exercise more in some areas than others, depending on the activity of the structures below the ROI and, in a different way, according to the type of performed exercise [2]. Our studies show that repeated sauna baths a slight influence on the pattern of skin temperature changes with respect to effort and restitution in elite athletes. Character of plots of changes in skin body temperatures is the same, but its amplitude is slightly different Δ*T*<sub>2-1</sub> and Δ*T*<sub>3-1</sub> in the anterior part of lower extremities (knees, vastus lateralis) and for torso back (trapezius muscle neck and back), respectively (Fig. 2).

We also showed that regular sauna baths had a moderate, positive effect on increasing resting PV (+ 2.13%). Data from meta-analysis [32] indicated that the size of PV increase after HA was influenced by the number of days of heat exposure the hydration state of the person. In trained men, daily post-exercise sauna bathing for 10–15 thirty minute sessions over 2–3 weeks (80–100 °C, 10–20% RH) caused an increase plasma volume 7–18% [15].

The MHA did not alter VO<sub>2</sub>; however, some reduction in rest HR after MHA was observed by us (Table 2). Willmott et al. [33] indicated no statistically significant changes HR in resting or after short-term HA. However, a significant heart rate decreases of 4% (after twice daily heat stress exposure for 2 days) and 6% (after once daily heat exposure for 4 days) was demonstrated during exercise. These authors reported that HR adjustment was typically concurrent with hypervolemia.

Application of sauna bathing changes only a little thermoregulatory process in elite athletes. Probably, the endurance athletes are exposed to endogenous thermal load, potentially constraining adaptation to heat during training process [18–21]. There are relative small information about MHA effect on vasodilatation, vasoconstriction and sweat evaporation to exercise in professional athletes. Therefore, further studies are needed in order to understand the mechanisms of thermoregulation, especially taking into account thermal stimulations using in biological regeneration of sportsmen as well as in medical treatment.

The main limitation of our study was the small number of participants recruited from the elite athletes. The second limitation could be relatively large variability in body sensitivity on sauna baths among the subjects.

## Conclusions

We indicated that ten finnish dry sauna bathing had a weak impact on skin temperatures following exercise test in elite cross-country skiers. The marked drop of temperature was observed in upper part of body and was maintained during recovery. Apart from regular sauna baths induced small physiological and haematological changes, which were revealed in certain decrease in heart rate and a little increase in resting plasma volume in elite athletes.

Our research is to show that sauna treatment has little effect on the thermoregulation process in the cross-country skiers.

**Acknowledgements** This study was supported by statutory funds of University of Silesia in Katowice, Poland and also partly by grant Ministry of Science and Higher Education (Poland)/Nr0050/RS4/2016/54.

## Compliance with ethical standards

**Conflict of interest** The authors declare no conflicts of interest.

**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## References

1. Marins JCB, Fernandez-Cuevas I, Arnaiz-Lastras J, Fernandes AA, Sillero-Quintana M. Applications of infrared thermography in sports. A review. *Rev Int Med Cien Activ Fisica Deporte*. 2015;15(60):805–24.
2. Fernandez-Cuevas I, Sillero-Quintana M, Garcia-Concepcion MA, Ribot-Serrano J, Gomez-Carmona P. Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography. *New Stud Athl*. 2014;29(1):57–71.
3. Hildebrandt C, Zeilberger K, Francis E, Ring J, Raschner C. The application of medical infrared thermography in sports medicine. In: Zaslav KR, editor. *An international perspective on topics in sports medicine and sports injury*. Rijeka: InTech; 2012. ISBN 978-953-51-0005-8.
4. Arfaoui A, Polidori G, Taiar R, Popa C. Infrared thermography in sports activity. In: Prakash RV, editor. *Infrared thermography*. Rijeka: InTech; 2012. ISBN 978-953-51-0242-7.
5. Drzazga Z, Binek M, Pokora I, Sadowska-Krepa E. A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise. *J Therm Anal Calorim*. 2018;134:701–10. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>.
6. Cholewka A, Kasprzyk T, Stanek A, Sieroń-Stołyń K, Drzazga Z. May thermal imaging be useful in cyclist endurance tests? *J Therm Anal Calorim*. 2016;12:1155–62. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5453-3>.
7. Bagavathiappan S, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T, Raj B, Karunanithi R, Panicker TM, Korath MP, Jagadeesan K. Infrared thermal imaging for detection of peripheral vascular disorders. *J Med Phys*. 2009;34(1):43–7. <https://doi.org/10.4103/0971-6203>.
8. Kihara T, et al. Effects of repeated sauna treatment on ventricular arrhythmias in patients with chronic heart failure. *Circ J*. 2004;68:1146–51.
9. Kihara T, et al. Repeated sauna treatment improves vascular endothelial and cardiac function in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol*. 2002;39(5):754–9.
10. Imamura M, et al. Repeated thermal therapy improves impaired vascular endothelial function in patients with coronary risk factors. *JACC*. 2001;38(4):1083–8.
11. Vähäsöini A, Vazquez R, Birmingham CL, Gutierrez E. Unreported sauna use in anorexia nervosa: evidence from the worldwide-web. *Eat Weight Disord*. 2004;9:50. <https://doi.org/10.1007/BF03325045>.
12. Pilch W, Pokora I, Szyguła Z, Pałka T, Pilch P, Cisoń T, Malik L, Wiecha S. Effect of a single finnish sauna session on white blood cell profile and cortisol levels in athletes and non-athletes. *J Hum Kinet*. 2013;39:127–35. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0075>.
13. Niewiadomy P, Tiffert-Tłok J, Szuścik K, Stolecka-Warzecha A, Kwaśna K. Estimation of changes of lower limbs reactivity among mountain cyclist under the influence of sauna treatment. *Physiother Health Activ*. 2016;24:12–8. <https://doi.org/10.1515/pha-2016-0003>.
14. Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *J Therm Biol*. 2014;43:7–12.
15. Scoon GSM, Hopkins WG, Mayhew S, Cotter JD. Effect of post-exercise sauna bathing on the endurance performance of competitive male runners. *J Sci Med Sport*. 2007;10:259–62.
16. Periard JD, Racinais S, Sawka MN. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports. *Scand J Med Sci Sports*. 2015;25(Suppl 1):20–38.
17. Ernst E, Strziga P, Schmidlechner C, Magyarosy I. Sauna effects on hemorheology and other variables. *Arch Phys Med Rehabil*. 1986;67(8):526–9.

18. Garrett AT, Rehrer NJ, Patterson MJ. Induction and decay of short-term heat acclimation in moderately and highly trained athletes. *Sports Med.* 2011;41(9):757–71.
19. Periard JD, Travers GJS, Recinais S, Sawka MN. Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Auton Neurosci Basic Clin.* 2016;196:52–62.
20. Lorenzo S, Halliwill JR, Sawka MN, et al. Heat acclimation improves exercise performance. *J Appl Physiol.* 2010;109(4):1140–7.
21. Pallubinsky, et al. Thermophysiological adaptations to passive mild heat acclimation. *Temperature.* 2017;4(2):176–86. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1303562>.
22. Zurawlew MJ, Mee JA, Walsh NP. Post-exercise hot water immersion elicits heat acclimation adaptations in endurance trained and recreationally active individuals. *Front Physiol.* 2018;9:1824. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01824>.
23. Guy JH, Deakin GB, Edwards AM, et al. Adaptation to hot environmental conditions: an exploration of the performance basis, procedures and future directions to optimise opportunities for elite athletes. *Sports Med.* 2015;45(3):303–11.
24. Ammer K. The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. *Thermol Int.* 2008;18(4):125–9.
25. Moreira DG, et al. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: a Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *J Therm Biol.* 2017;69:155–62.
26. Dill DB, Costill DL. Calculation of percentage changes in volumes of blood, plasma, and red cells in dehydration. *J Appl Physiol.* 1974;37:247–8.
27. Taylor NA, Machado-Moreira CA. Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans. *Extrem Physiol Med.* 2013;2(1):4. <https://doi.org/10.1186/2046-7648-2-4>.
28. Candas V, Libert JP, Vogt JJ. Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating. *J Appl Physiol.* 1979;46:522–8.
29. Kondo N, Tominaga H, Shibasaki M, Aoki K, Koga S, Nishiyasu T. Thermoregulatory adaptation in humans and its modifying factors. *J Physiol.* 1999;515(Pt 2):591–8.
30. Ravanelli, et al. Maximum skin wettedness after aerobic training with and without heat acclimation. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50(2):299–307. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001439>.
31. Tyler CJ, Reeve T, Hodges GJ, Cheung SS. The effects of heat adaptation on physiology, perception and exercise performance in the heat: a meta-analysis. *Sports Med.* 2016;46:1699. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0538-5>.
32. Rahimi GRM, Albanaqi AL, Van der Touw T. Smart NA physiological responses to heat acclimation: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Sports Sci Med.* 2019;18(2):316–26.
33. Willmott AG, Gibson OR, Hayes M, et al. The effects of single versus twice daily short term heat acclimation on heat strain and 3000 m running performance in hot, humid conditions. *J Therm Biol.* 2016;56:59–67.

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

**Publikacja nr 3: M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora; (2021); „Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?”; Journal of Thermal Analysis and Calorimetry;**

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458

W tej publikacji omówiony został problem zależności zmian temperatury nad wybranymi strefami mięśniowymi występujący w następstwie wykonania wysiłku, od płci badanych profesjonalnych biegaczy narciarskich. Spoczynkowa temperatura powierzchni skóry u kobiet różni się istotnie od analogicznie zmierzonej u mężczyzn dla grupy zrekrutowanej spośród osób nie trenujących zawodowo (Chudecka, 2015; Neves, 2017), zależność ta nie była jednak badana wcześniej u profesjonalnych biegaczy narciarskich. W eksperymencie wykorzystany został ponownie układ doświadczalny przyjęty w poprzednich badaniach, tzn.: wysiłek eksperymentalny określony na 80% maksymalnego pułapu tlenowego, wykonywany przez godzinę na bieżni mechanicznej. Obrazowanie termiczne wykonano przed wysiłkiem eksperymentalnym, bezpośrednio po nim, oraz po 10 minutowym okresie odpoczynku, dla najbardziej pracujących w czasie jego wykonywania mięśni tj. mięśni kończyn dolnych. Dane fizjologiczne zostały określone w teście  $VO_{2max}$  jak również w czasie eksperymentalnego treningu. Przed rozpoczęciem testu eksperymentalnego, metodą bioimpedancyjną, zostały zbadane wartości masy tłuszczu u każdego uczestnika, beztłuszczowa masa ciała, jak również została wyliczona teoretyczna powierzchnia ciała oraz indeks BMI dla każdego ze sportowców. Grupa męska złożona była z 10 sportowców, żeńska zaś z 6 sportsmenek.

Do analizy obrazów termograficznych jak poprzednio użyty został program ThermaCAM TM Researcher Pro 2.8 SR-3, natomiast do ich zebrania posłużyła ponownie kamera FLIR E60.

Analiza statystyczna została przeprowadzana za pomocą programu Statistica 12, używając podstawowych testów: t-studenta oraz Cochran-Cox'a. Do sprawdzenia normalności rozkładu użyty został test Shapiro-Wilka, zaś do określenia homogeniczności wariancji test Levene'a. Dodatkowo do określenia wpływu płci i wykonanego wysiłku na fizjologiczne parametry uczestników wykorzystano jednoczynnikową analizę ANOVA z powtarzanymi pomiarami, jak również *post hoc* test Turkey'a. Przez wzgląd na niewielką liczbę uczestników badania został również określony tzw. „efekt grupy” zawarty w analizie

ANOVA. Ponadto określono korelacje pomiędzy parametrami fizjologicznym, a średnimi zmianami temperatury nad danymi strefami mięśniowymi, dla każdej z grup.

Dla parametrów somatycznych (waga, powierzchnia ciała, masa tłuszczu, masa ciała bez tłuszczu) uczestników uzyskane zostały wyniki różniące się istotnie między grupami płciowymi, co jest zgodne z ogólnie przyjętą wiedzą. Co ciekawe w wartościach parametrów fizjologicznych zmierzonych przed wykonaniem testu wysiłkowego nie znaleziono różnic pomiędzy grupami płciowymi. Znaczne różnice w poziomie tych parametrów pojawiają się jednak po zakończeniu wysiłku, zarysowując się szczególnie w grupie mężczyzn. Stosująca test jednoczynnikowy ANOVA otrzymane zostały istotne statystycznie różnice między płciami dla poboru tlenu podczas wysiłku ( $VO_2$ ), średniej mocy [W], metabolicznego ekwiwalentu energii (MET), oraz dla wydatku energetycznego (EE), co ciekawe nie uzyskano takich różnic dla pulsu (HR) oraz dla parametru mocy przeliczonego zarówno na masę ciała [W/BM] (ang. *Work load per body mass*) jak i na powierzchnię ciała [W/BSA] (ang. *Work load per body skin area*). Podobnie mają się zależności mierzone porównując między płciami przyrosty odpowiednich parametrów w czasie wykonywania wysiłku. Prawie wszystkie różnią się między sobą istotnie statystycznie, wyjątkami są parametry mocy i pulsu. Stosując analizę z zastosowaniem testu ANOVA dla powtarzanych pomiarów znalezione zostały istotne interakcje pomiędzy płcią i wysiłkiem a parametrami  $VO_2$ , MET oraz EE. Nie wykazano jednak żadnych korelacji pomiędzy parametrami fizjologicznym a zmianą średniej temperatury ciała nad danym obszarem mięśniowym. Otrzymane wyniki świadczą o tym, że intensywności procesów metabolicznych oraz produkcja ciepła ogólnie jest większa u mężczyzn niż u kobiet. Podobne efekty raportowano wcześniej (Gagnone&Kenny, 2012). Wyższy współczynnik  $VO_{2max}$  u biegaczy narciarskich częściowo można również wytłumaczyć większym naturalnym poziomem hemoglobiny we krwi oraz mniejszym udziałem tkanki tłuszczowej w kompozycji ciała (Sandbakk, 2012; Calbet, 2010).

Mierząc temperaturę nad wybranymi jedenastoma strefami mięśniowymi, stwierdzone zostało, iż przed wykonaniem eksperymentalnego wysiłku temperatura (T1) skóry kobiet jest wyraźnie mniejsza niż w przypadku grupy męskiej. Bezpośrednio po zakończeniu eksperymentalnego wysiłku temperatura skóry (T2) w obu badanych grupach wzrasta i osiąga zbliżony poziom. Natomiast po 10 minutowym odpoczynku zauważyć można powrót do początkowych wartości, który jednak wolniej przebiega u kobiet. Zależności między parametrami T1 u kobiet i mężczyzn są zgodne z ogólnie przyjętą wiedzą i występują zarówno dla wytrenowanych jak i niewytrenowanych osób (Davies, 1979; Chudecka, 2015; Bouzas marins, 2015), jednakże u osób otyłych różnice te mogą się zacierać (Neves, 2017).

Wzrost temperatury skóry nad mięśniami podczas wykonywania wysiłku wynika ze zwiększonego podskórnego przepływu krwi, który ma na celu ograniczenie wzrostu temperatury wewnętrznej. Poziom wzrostu temperatury jest większy u kobiet, co może być spowodowane szybszym przepływem krwi i większym przewodnictwem naczyniowym (Notley, 2017). Obserwowany efekt może być również powiązany z dłuższym utrzymywaniem się efektu podwyższonej temperatury po zakończeniu treningu u kobiet (Kenny&Jay; 2007). Z drugiej jednak strony przyzwyczajenie ciała do specyficznego treningu również ma pewien wpływ na obrazowanie termiczne podczas wysiłku (Tanda, 2016; Merla, 2010; Ludwig, 2016).

Aby głębiej rozwinąć problem wyliczone zostały różnice między temperaturami początkowymi i końcowymi uzyskanymi nad poszczególnymi strefami mięśniowymi w czasie eksperymentalnego wysiłku ( $\Delta T_{2-1}=T_2-T_1$ ), oraz między temperaturami początkowymi i wartościami temperatury uzyskanymi po 10 minutach odpoczynku po wykonaniu wysiłku ( $\Delta T_{3-1}=T_3-T_1$ ). Bezpośrednio po zakończeniu eksperymentalnego ćwiczenia zaobserwowano wzrost temperatury nad mięśniami  $\Delta T_{2-1}$ , znacznie wyraźniejszy u kobiet niż u mężczyzn. Następnie po 10 minutowym odpoczynku zarejestrowano spadek temperatury  $\Delta T_{3-1}$ , po którym obie grupy płciowe osiągnęły zbliżony poziom średnich temperatur nad strefami mięśniowymi. Implikuje to wniosek mówiący, że spadek temperatury w tym okresie był wyraźnie szybszy u mężczyzn. Warto również zaznaczyć, że wartości  $\Delta T_{3-1}$  w grupie mężczyzn osiągnęły wartości ujemne dla wszystkich stref mięśniowych, co nie miało miejsca w przypadku grupy kobiet gdzie wartości te ciągle pozostały dodatnie. W publikacji zależności te przedstawione są na wykresach temperaturowych. Analiza statystyczna wykazała, że mimo wyraźnych, istotnych statystycznie różnic w zmianach temperatur mierzonych nad poszczególnymi strefami mięśniowymi między płciami przed, jak i bezpośrednio po wysiłku, wartości zmiany temperatur uzyskane w czasie odpoczynku nie różnią się istotnie ( $\Delta T_{3-2}=T_3-T_2$ ).

Różnice w regulacji cieplnej skóry w czasie treningu mogą być związane z różnicami w dynamice pocenia się występującej między kobietami i mężczyznami. Podejście takie opisywane było wcześniej w literaturze. Rozmieszczenie jak i aktywność gruczołów potowych były analizowane w literaturze wcześniej (Marins, 2015). Zmiany w pojemności gruczołów potowych również mogą mieć wpływ na temperaturę skóry – mężczyźni produkują więcej potu (Gagnone&Kenny, 2012; Ichinose-Kuwahara, 2010). Podobnie wzrost temperatury obserwowany zaraz po zakończeniu wysiłku u kobiet może być powiązany z ich większą naturalną pojemnością cieplną oraz wolniejszą jego wymianą, co skutkuje dłuższym

czasem latencji pocenia oraz zmniejszoną wrażliwością procesów termoregulacyjnych (Bittel&Henane, 1975; Pokora, 2003).

W pracy wykazano zdecydowanie większe zmiany temperatury w czasie wykonywania wysiłku występujące u kobiet niż u mężczyzn. Zauważony została również przedłużony efekt przegrzania mięśni występujący w grupie żeńskich biegaczek narciarskich w czasie odpoczynku. Stąd możliwe jest, iż płeć w pewnym stopniu moduluje procesy termoregulacyjne występujące w odpowiedzi na zadany wysiłek u profesjonalnych biegaczy narciarskich. Uzyskane w publikacji różnice między płciami wydają się być związane z odmienną dynamiką pocenia się i zdolnością do odprowadzania ciepła przez odparowywanie potu. Jak również mogą być związane z różnicami w udziale rozszerzenia naczyń krwionośnych skóry w usuwaniu nadmiaru ciepła wytwarzanego przez aktywne mięśnie podczas wysiłku.





# Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?

M. Binek<sup>1</sup> · Z. Drzazga<sup>1</sup> · T. Socha<sup>2</sup> · I. Pokora<sup>3</sup>

Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021  
© The Author(s) 2021

## Abstract

The aim of study was to assess the skin temperature changes over selected muscles zones of the lower limbs following an exercise performed at similar relative external workload in 10 male and 6 female high-trained cross-country skiers. The first stage of experiment involved preliminary exercise to determine individual oxygen uptake  $VO_{2max}$  and anaerobic threshold. The second stage experimental exercise consisted of 60 min running on treadmill with 80% of determined  $VO_{2max}$ . Thermographic imaging of lower limbs was performed, before, immediately after exercise and during recovery. Physiological parameters:  $VO_2$ , MET—metabolic energy equivalent, heart rate and internal temperature were assessed at rest and at the end of exercise, respectively. Infrared thermography showed that at rest the skin temperature over lower limb muscles was significantly higher in men than in women. In response to exercise an increase in skin temperature over the studied muscles was significantly higher in women than men. Since was no significant difference in skin temperature in men and women after exercise. Before the test, no physiological parameter was significantly different in women and men. Exercise test revealed significant differences between men and women in some physiological parameters such as  $VO_2$  and MET. Our study showed that there are significant differences in lower limbs skin temperature between male and female at rest but not at the end of exercise test. Women in comparison with men had a greater increase in skin temperature in response to exercise and a persistence of elevated temperature over muscles of lower limbs after exercise.

**Keywords** Thermal mapping · Skin temperature · Gender · Lower limbs · Exercise

## Introduction

The local skin temperature is the result of the balance between metabolic heat production, heat dissipation to the environment and tissue temperature. This balance is mainly influenced by the internal body temperature, the ambient temperature and the complex relationship between

the dilation of blood vessels in the skin and perspiration, which facilitate heat exchange to the environment [1]. The skin plays very important role in thermoregulation. The distribution of body surface temperatures depends on microvascular function and may differ in individuals with different body mass, compositions and body surface area. It is thought that gender can be an independent modulator of skin vasomotor and sudomotor functions during heat exposure. Women differ from men in their thermal response to exogenous heat load and heat loss, as well as to endogenous heat load during exercise, as they typically have larger ratio of body surface to body mass, a higher subcutaneous adipose tissue content, a lower exercise capacity and a lower blood volume [2–4]. It has been indicated that compared to normal weight individuals, obese people show increased heat dissipation from the limbs (especially hands) and less heat dissipation from the abdomen [5]. Chudecka et al. showed that only in the area of the chest mean skin temperature was significantly higher in women than in men, while in the other areas of

✉ Z. Drzazga  
zofia.k.drzazga@gmail.com

<sup>1</sup> Department of Medical Physics, The Silesian Centre for Education and Interdisciplinary Research, A. Chełkowski Institute of Physics, University of Silesia in Katowice, Katowice, Poland

<sup>2</sup> Department of Exercise and Sport Performance, Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Katowice, Poland

<sup>3</sup> Department of Physiological-Medical Sciences, Institute of Sport Sciences, The Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Katowice, Poland

body surface, mean skin temperature ( $T_{sk\_mean}$ ) was significantly lower in women.

Several researchers have observed gender differences in autonomously controlled heat loss pathways (skin vasomotor and sudomotor activities) during heat exposure [6–10]. Nevertheless, it has been hypothesized that when assessed during compensated exercises, which elicits the same heat loss demand in participants, gender differences in thermoeffectors can be explained by differences in body surface area to body weight ratio [10]. In the post-exercise period, cutaneous blood flow and sweating return to pre-exercise levels despite a sustained increase in internal temperature, suggesting a change in thermoregulatory control. The temperature response in each part of the body can also vary during the recovery period because the trained muscular regions involved in movement exhibit a higher metabolic activity and a faster energetic and tissue recovery facilitated by their increased blood supply.

Many articles show that IRT (Infrared Thermography) as non-invasive and easy to perform method is useful in sports medicine to evaluation of skin temperature changes during and after endurance exercise [11–17]. In professional sport, as much information about the athletes as possible is needed, and thermal imaging allows to collect them because of skin thermal response depends on body fluid homeostasis, cardiovascular fitness, muscle metabolism and athlete's health. Some papers suggest that IRT can be useful to better plan an athlete's training [11–13]. In additional IRT screening of individual muscles can be useful to find overloads and injuries [14]. Marins et al. [13] presented a strong evidence supported differences in thermal characteristics between genders, regardless of the measurement techniques IRT.

Cross-country skiing is one of the most demanding sports with an emphasis on endurance and high muscle efficiency, mainly in the legs and upper limbs, so thermal mapping appears to be useful for assessing gender differences in athlete performance and gender differences in lower limb skin temperature after an exercise test. Analyses of skin temperature changes can have diagnostic value for sports performance [15]. Thermal mapping is a very useful, inexpensive, and rapid method to evaluate the changes in skin surface temperature [16], which can be also used to evaluate physiological regulatory mechanisms associated with exercise [17].

However, according to our knowledge, there is not any paper investigated this problem in cross-country skiers. We hypothesize that there are gender differences in lower limbs temperature in response to similar exercise in trained male and female subjects. The aim of study was to assess the distribution and skin temperature changes over selected muscles zones of the lower limbs in response to an exercise performed at similar relative external workload (Power [ $W\ kg^{-1}$ ]) in male and female high-trained cross-country skiers.

## Material and methods

### Subjects

Our research group consisted of 10 men ( $22 \pm 3.23$  years) and 6 women ( $23.7 \pm 3.15$  years) practicing cross-country skiing. They were healthy students of the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, and members of the Polish Cross-Country Skiing National Team. All of participants were healthy and had no cardiovascular disorders before. Participants were instructed to avoid alcohol, smoking, caffeine, large meals and cosmetics before the assessment. Volunteers were informed of the purpose, possible risks and the benefits of the study before giving their written consent to participate. The study protocol followed the ethical guidelines of the World Medical Association Declaration of Helsinki and was approved by the Ethics Committee of the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Poland [(Approval no. U2/2016)].

A week before the start of the experiment all the volunteers participated in standard incremental exercise test to determine the individual aerobic capacity ( $VO_{2max}$ ) and the individual anaerobic threshold (PPA). The  $VO_{2max}$  test consisted an running on treadmill exercise to exhausted, starting on 6 km/h and gradient set on 0% and successively increasing the pace and gradient of treadmill every 3 min until volitional exhaustion each participant. All details of used preliminary testing for determining of the mention values were analogical as in our earlier paper [11].

The PPA had been used to calculate target work rates for submaximal exercise testing, which were using during experimental test. The power value reached at PPA was used to calculate the target running speeds in the submaximal exercise test that was used during the experimental study. In main stage of study the subject performed experimental exercise (EET) consisted of 60 min running on treadmill treadmill at the intensity equal to 80% of their individual lactate threshold intensity. Research was performed in the Human Performance Laboratory at the Academy of Physical Education in Katowice on treadmill H/P (a Cosmed treadmill, Germany), at  $20 \pm 1$  °C ambient temperature,  $56 \pm 3\%$  relative humidity and  $985 \pm 5$  hPa atmospheric pressure.

### Measures

#### Somatic and physiological characteristics

Prior to the study, somatic parameters (body mass, and body composition), were assessed by the bioimpedance

method (InBody, Korea), and body surface area (BSA) as well as BSA/BM were calculated. At the beginning and at the end of exercise test oxygen uptake ( $\text{VO}_2$ ), minute ventilation ( $V_e$ ), aural canal temperature ( $T_{\text{au}}$ ) and heart rate (HR) were measured and metabolic energy equivalent (MET), amount of energy expended (EE) were calculated using a metabolic system (Cortex Metamax, Germany). Internal body temperature was measured from the auditory canal using an insulated, ear-molded plug and thermistor inserted into the external auditory canal (Ellab, E-val-Flex model 1.38, Denmark). Heart rate (HR) was recorded telemetry at 10-min intervals during exercise by using a sport-tester (Polar-1500PE, Finland).

## Thermal mapping

Thermal images were collected before, immediately after exercise and 10 min after exercise. For each participant were made six photographs of legs (3 at front and 3 from the rear) using camera Flir Systems E60, resolution of camera 320 X 240 pixels, sensitivity 0.05 K. Camera was calibrated by black body, the emissivity was set at the range of 0.97–0.98. Thermal images were made in accordance with the Glamorgan Protocol [18] and taking into consideration checklist directed at standardizing thermographic imaging in sports and exercise medicine Moreira et al. [16]. The results were analyzed by using a ThermoCAM TM Researcher Pro 2.8 SR-3, legs were divided into muscles zones according to model by Fernandez-Cuevas et al. [19].

## Statistical analysis

Results have been presented as arithmetic means ( $M$ ) with standard deviations (SD). Statistical analyses were performed in Statistica 12, using Student's  $t$  test and Cochran–Cox test. To check normality (Shapiro–Wilk test) and the homogeneity of variance test (Levene's  $F$  test) were performed. One-way repeated measures analysis of variance (ANOVA, sex  $\times$  exercise) was used to assess sex and exercise impact on physiological parameters, and post hoc Tukey's test. Effect size from One-way ANOVA was calculated because of small numbers groups of tested subjects. Correlations between physiological parameters and the mean skin temperature changes were also examined. Statistical significant was set at  $p < 0.05$ .

## Results

1. The somatic characteristics of the studied males and females are shown in Table 1. Statistical analysis of the examined characteristics showed that both groups were significantly different in body mass (BM), body surface

**Table 1** Demographic and anthropomorphic characteristics of study participants

Variable	M $\pm$ SD	M $\pm$ SD	$p$
	Men ( $n=10$ )	Women ( $n=6$ )	
Age/years	22 $\pm$ 3.23	23.7 $\pm$ 3.15	0.29
Body height/cm	180.5 $\pm$ 3.84	165.38 $\pm$ 8.17	0.00
Body mass/kg	73.76 $\pm$ 8.11	63.53 $\pm$ 4.92	0.004
BSA/m <sup>2</sup>	1.92 $\pm$ 0.12	1.70 $\pm$ 0.10	0.001
BMI/kg m <sup>2</sup>	22.6 $\pm$ 1.86	22.78 $\pm$ 1.44	0.84
FM/kg	6.32 $\pm$ 2.76	11.32 $\pm$ 1.62	0.00
FFM/kg	67.44 $\pm$ 6.81	52.31 $\pm$ 7.28	0.00

BSA body surface area, BMI body mass index, FM fat mass, FFM fat free body mass

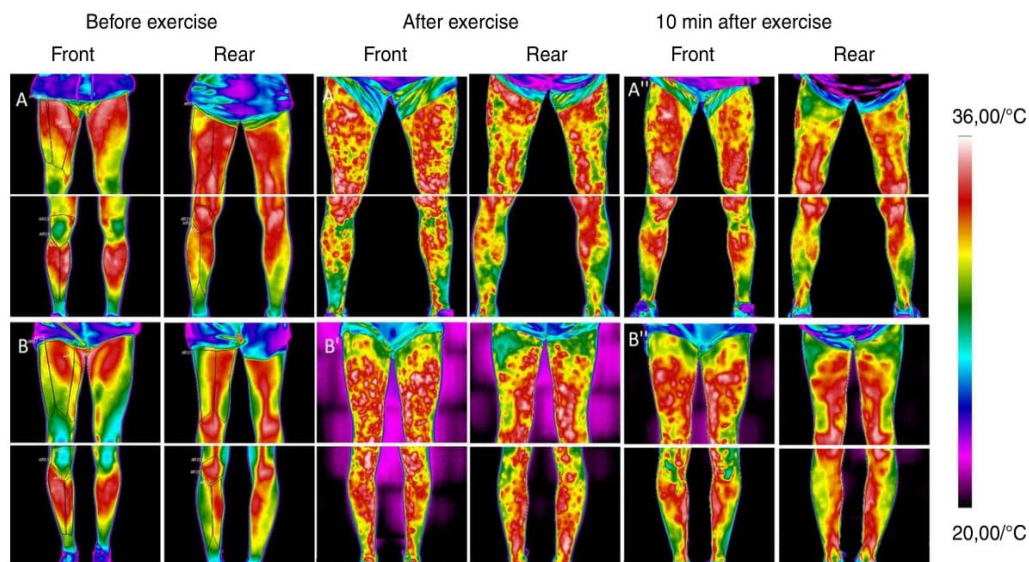
**Table 2** Physiological characteristics of participants at preliminary testing

Variable	$\bar{M} \pm \text{SD}$	$\bar{M} \pm \text{SD}$	$p$
	Men (10)	Women (6)	
$\text{VO}_{2\text{max}}/\text{mL kg}^{-1} \text{min}^{-1}$	65.67 $\pm$ 7.30	53.83 $\pm$ 4.96	0.00
$\text{HR}_{\text{max}}/\text{bs min}^{-1}$	191.44 $\pm$ 8.44	188.33 $\pm$ 11.52	0.55
$\text{Power}_{\text{max}}/\text{W}$	398.78 $\pm$ 53.34	302.33 $\pm$ 35.96	0.00
$\text{Power}_{\text{max}}/\text{W kg}^{-1}$	5.53 $\pm$ 0.57	4.84 $\pm$ 0.26	0.02
$V_{e\text{max}}/\text{L min}^{-1}$	13.99 $\pm$ 0.03	12.00 $\pm$ 0.00	0.00
$\text{HR}_{\text{AT}}/\text{bs min}^{-1}$	174.89 $\pm$ 7.75	178.00 $\pm$ 2.19	0.36
$V_{\text{AT}}/\text{km h}^{-1}$	13.33 $\pm$ 1.00	12.00 $\pm$ 0.00	0.01
$G\%_{\text{AT}}/\%$	9.44 $\pm$ 3.00	9.17 $\pm$ 1.29	0.84

$\text{VO}_{2\text{max}}$  maximal oxygen uptake,  $\text{HR}_{\text{max}}$  maximal heart rate,  $\text{HR}_{\text{AT}}$  heart rate at an anaerobic threshold,  $V_{e\text{max}}$  maximal pulmonary ventilation [ $\text{L min}^{-1}$ ],  $G\%_{\text{AT}}$  the treadmill inclination at an anaerobic threshold,  $V_{\text{AT}}$  run speed at an anaerobic threshold,  $\text{Power}_{\text{max}}$  maximal power

- area (BSA), fat mass (FM) and fat free mass (FFM) according to expectations.
2. The physiological parameters obtained in preliminary study were listed in Table 2. They indicated the substantial gender differences in physiological parameters such as  $\text{VO}_{2\text{max}}$ ,  $\text{Power}_{\text{max}}$ ,  $V_{e\text{max}}$ , (maximal pulmonary ventilation [ $\text{L min}^{-1}$ ]) and  $V_{\text{at}}$  (run speed at an anaerobic threshold) during preliminary test.

Response of body skin temperature to experimental exercise was demonstrated in thermal mapping (Fig. 1) and obtained temperatures over specified muscle zones were listed in Table 3. Figure 1 presents examples of the obtained thermographic images of front and rear of lower limbs for man and woman, respectively. Before exercise test registered temperatures were higher in man comparing to woman for all considered muscle zones. Directly after exercise an



**Fig. 1** Typical thermal images of front and rear lower limbs in each part of exercise. Part A—man before exercise; Part A'—man immediately after exercise; Part A''—man 10 min after exercise; part B—

woman before exercise; Part B'—woman after exercise; Part B''—woman 10 min after exercise

increase of temperature was observed in both groups of considered participants (A' and B' parts) However, 10 min after exercise skin temperature returned to initial level but faster in men than in women (A'' vs. B'').

Mean temperature values over muscle zones and over entire leg obtained before exercise ( $T_1$ ), immediately after exercise ( $T_2$ ) and after 10 min restitution ( $T_3$ ) as well as calculated changes of temperatures in response to exercise ( $\Delta T_{2-1} = T_2 - T_1$ , after 10 min restitution ( $\Delta T_{3-2} = T_3 - T_2$ ) and at the end of experiment procedure ( $\Delta T_{3-1} = T_3 - T_1$ ), were listed in Table 3 for male and female groups of cross-country skiers, respectively. It should be noted that skin temperature distribution in woman and man was different, especially before EET. The obtained temperatures for men were higher than for women, Table 3.

In response to exercise an increase of skin temperature ( $\Delta T_2 - T_1$ ) was observed in both groups, but higher rise in women than in men. Next, skin temperature dropped quicker in men than in women, caused nearly equalization of skin temperature values in both group after 10 min of recovery. Statistical analysis confirmed that skin temperatures of nearly all considered muscle zones (except tibialis anterior) in men differed statistically in comparison to women  $p < 0.05$  before EET but these temperature differences between woman and men disappeared after exercises.

There was no significant gender difference in the internal body temperature ( $T_{\text{int}}$ ) either at rest or at the end of exercise test (Fig. 2). However exercise test induced the marked increase of the internal body temperature in men as well as women.

Visualization of changes of temperature in response to exercise test and to complete experimental procedure for selected muscle zones of men and women was presented in Fig. 3.

It follows from Table 3 and Fig. 3 A and B that temperature differences after exercise and before ( $T_2 - T_1$ ) as well as temperature changes obtained after 10 min recovery ( $T_3 - T_1$ ) were markedly higher for women than for men. In addition, it should be noted that the values of temperature changes  $\Delta T_{3-1}$  became negative for most of muscles zones of men legs, unlike women (except GCM), Fig. 3b.

Statistical analysis showed that nearly all calculated  $\Delta T_{2-1}$  values (except muscles of rear thigh) and  $\Delta T_{3-1}$  values (except muscles of rear calf) were statistically significant different between gender groups,  $p < 0.05$ .

The physiological parameters of participants at the beginning and in response to the EET exercise test have been listed in Table 4. It was noticed that at the beginning of EET test, none of the examined indicators (i.e.,  $\text{VO}_2$ , HR, Power, Power  $\text{BM}^{-1}$ , MET, EE) differed statistically significantly between men and women. In contrast, exercise performance had an effect on the values of all assessed indices, wherein a stronger effect occurs in men than in women. One-way ANOVA test showed that statistical significant differences between men and women were obtained for: oxygen uptake ( $\text{VO}_2$ ), mean power [W], metabolic energy equivalent (MET) and energy expenditure (EE), unlike hearth rate (HR), Power [ $\text{W BSA}^{-1}$ ] and Power [ $\text{W BM}^{-1}$ ].

What is more, gender statistical significant differences due to experimental exercise were also obtained

**Table 3** Temperatures of individual leg muscles zones and their mean as well as temperature changes in response to exercise ( $\Delta T_{21}$ ), 10 min restitution ( $\Delta T_{32}$ ), and total experimental procedure ( $\Delta T_{31}$ ) for males and females

Muscle zones	Variable	Men (n = 10) M ± SD	Women (n = 6) M ± SD	p	F	$\eta^2p$
<i>Front side of legs</i>						
Vastus lateralis	$T_1/^\circ\text{C}$	31.62 ± 0.70	29.68 ± 0.43	0.00	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	32.36 ± 0.74	31.67 ± 0.40	0.05	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	31.60 ± 0.88	31.41 ± 0.91	0.68	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.74 ± 0.525	1.98 ± 0.52	0.00	94.61	0.87
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	-0.02 ± 1.10	1.73 ± 1.06	0.01	9.21	0.39
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.76 ± 0.35	-0.26 ± 0.45	0.39	0.78	0.05
Rectus femoris	$T_1/^\circ\text{C}$	32.16 ± 0.60	30.38 ± 0.33	0.00	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	32.44 ± 0.63	31.77 ± 0.91	0.09	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	31.97 ± 0.70	31.66 ± 0.90	0.45	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.28 ± 0.53	1.39 ± 0.73	0.00	28.31	0.66
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	-0.19 ± 0.75	1.28 ± 0.95	0.00	6.45	0.31
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.47 ± 0.23	-0.11 ± 0.30	0.35	0.93	0.06
Vastus medialis	$T_1/^\circ\text{C}$	32.32 ± 0.73	30.32 ± 0.71	0.00	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	32.78 ± 0.68	32.04 ± 0.82	0.07	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	32.51 ± 0.58	31.87 ± 0.85	0.09	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.45 ± 0.67	1.73 ± 0.95	0.01	29.29	0.68
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	0.19 ± 0.66	1.55 ± 1.29	0.01	12.96	0.48
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.27 ± 0.25	-0.18 ± 0.32	0.82	0.05	0.00
Knee (front)	$T_1/^\circ\text{C}$	29.77 ± 0.81	28.79 ± 0.73	0.03	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	31.68 ± 1.73	32.22 ± 0.62	0.47	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	30.78 ± 1.43	31.58 ± 1.05	0.25	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	1.91 ± 1.66	3.43 ± 0.57	0.05	56.94	0.80
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	1.01 ± 1.57	2.79 ± 1.07	0.03	27.03	0.66
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.90 ± 0.43	-0.64 ± 0.56	0.72	0.13	0.01
Tibialis anterior	$T_1/^\circ\text{C}$	31.60 ± 0.75	31.18 ± 0.59	0.27	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	31.67 ± 0.58	32.28 ± 0.69	0.08	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	30.72 ± 0.77	31.41 ± 1.00	0.14	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.08 ± 1.02	1.10 ± 0.55	0.04	6.69	0.32
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	-0.89 ± 1.04	0.23 ± 1.01	0.05	1.53	0.10
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.96 ± 0.34	-0.87 ± 0.44	0.88	0.02	0.00
Soleus	$T_1/^\circ\text{C}$	31.60 ± 0.69	30.64 ± 0.43	0.01	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	32.08 ± 0.85	32.58 ± 0.33	0.20	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	31.37 ± 0.83	31.71 ± 1.42	0.55	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.48 ± 1.10	1.93 ± 0.43	0.01	25.77	0.65
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	-0.23 ± 1.04	1.07 ± 1.26	0.04	2.07	0.12
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.71 ± 0.37	-0.87 ± 0.47	0.80	0.07	0.00
<i>Rear side of legs</i>						
Biceps femoris	$T_1/^\circ\text{C}$	32.03 ± 0.75	29.93 ± 0.32	0.00	–	–
	$T_2/^\circ\text{C}$	32.13 ± 0.80	30.73 ± 1.32	0.02	–	–
	$T_3/^\circ\text{C}$	31.57 ± 0.69	30.83 ± 0.86	0.08	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ\text{C}$	0.11 ± 0.79	0.80 ± 1.09	0.16	2.69	0.21
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ\text{C}$	-0.46 ± 0.68	0.89 ± 0.76	0.00	1.38	0.09
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ\text{C}$	-0.57 ± 0.31	0.09 ± 0.40	0.21	1.71	0.11

**Table 3** (continued)

Muscle zones	Variable	Men ( $n=10$ ) $M \pm SD$	Women ( $n=6$ ) $M \pm SD$	$p$	$F$	$\eta^2 p$
Remaining thighs muscle	$T_1/^\circ C$	$30.37 \pm 0.67$	$30.64 \pm 0.32$	0.00	–	–
	$T_2/^\circ C$	$32.48 \pm 0.82$	$31.62 \pm 1.18$	0.11	–	–
	$T_3/^\circ C$	$32.10 \pm 0.59$	$31.66 \pm 0.87$	0.25	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ C$	$0.11 \pm 1.02$	$0.97 \pm 1.06$	0.13	4.13	0.22
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ C$	$-0.27 \pm 0.67$	$1.03 \pm 0.73$	0.00	4.43	0.24
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ C$	$-0.38 \pm 0.25$	$0.05 \pm 0.33$	0.31	1.09	0.07
Knee (rear)	$T_1/^\circ C$	$32.95 \pm 0.49$	$31.51 \pm 0.42$	0.00	–	–
	$T_2/^\circ C$	$32.55 \pm 0.86$	$32.23 \pm 0.57$	0.44	–	–
	$T_3/^\circ C$	$32.14 \pm 0.61$	$31.74 \pm 0.81$	0.29	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ C$	$-0.40 \pm 0.77$	$0.73 \pm 0.28$	0.00	0.95	0.06
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ C$	$-0.81 \pm 0.63$	$0.23 \pm 0.98$	0.02	2.11	0.13
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ C$	$-0.42 \pm 0.27$	$-0.49 \pm 0.34$	0.86	0.03	0.00
Gastrocnemius caput mediale (GCM)	$T_1/^\circ C$	$32.10 \pm 0.51$	$30.85 \pm 0.75$	0.00	–	–
	$T_2/^\circ C$	$32.06 \pm 0.65$	$31.63 \pm 0.41$	0.16	–	–
	$T_3/^\circ C$	$31.62 \pm 0.67$	$31.22 \pm 0.89$	0.33	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ C$	$-0.04 \pm 0.56$	$0.77 \pm 0.91$	0.04	4.07	0.22
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ C$	$-0.48 \pm 0.76$	$0.38 \pm 1.05$	0.07	0.06	0.00
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ C$	$-0.44 \pm 0.31$	$-0.44 \pm 0.39$	0.99	0.00	0.00
Gastrocnemius caput laterale (GCL)	$T_1/^\circ C$	$32.03 \pm 0.70$	$30.57 \pm 0.17$	0.00	–	–
	$T_2/^\circ C$	$32.02 \pm 0.85$	$31.54 \pm 0.76$	0.28	–	–
	$T_3/^\circ C$	$31.42 \pm 0.46$	$31.10 \pm 1.13$	0.44	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ C$	$-0.01 \pm 0.62$	$0.98 \pm 0.92$	0.02	6.36	0.31
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ C$	$-0.61 \pm 0.62$	$-0.44 \pm 1.08$	0.69	6.25	0.31
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ C$	$-0.60 \pm 0.26$	$-0.40 \pm 0.34$	0.65	0.21	0.01
Leg (mean)	$T_1/^\circ C$	$31.87 \pm 0.52$	$30.41 \pm 0.36$	0.00	–	–
	$T_2/^\circ C$	$32.21 \pm 0.59$	$31.84 \pm 0.60$	0.26	–	–
	$T_3/^\circ C$	$31.62 \pm 0.48$	$31.47 \pm 0.87$	0.67	–	–
	$\Delta T_{21} = T_2 - T_1/^\circ C$	$0.34 \pm 0.63$	$1.44 \pm 0.52$	0.00	33.94	0.71
	$\Delta T_{31} = T_3 - T_1/^\circ C$	$-0.25 \pm 0.62$	$0.98 \pm 0.89$	0.01	3.69	0.21
	$\Delta T_{32} = T_3 - T_2/^\circ C$	$-0.59 \pm 0.22$	$-0.37 \pm 0.29$	0.56	0.35	0.02

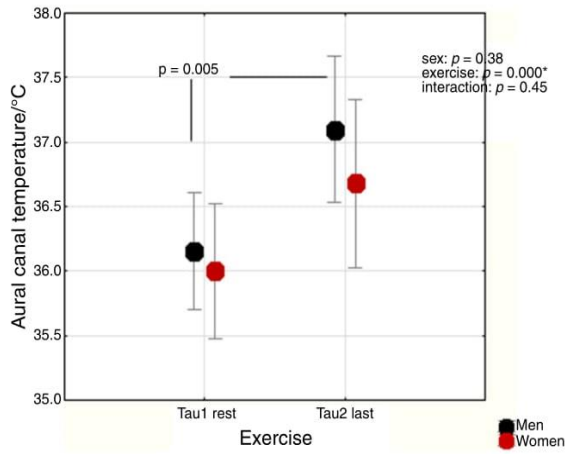
$T_1$ —temperature obtained before exercise;  $T_2$ —temperature obtained immediately after exercise;  $T_3$ —temperature obtained 10 min after exercise;  $\Delta T_{21} = T_2 - T_1$ —calculated temperature changes between end of exercise and start of exercise;  $\Delta T_{31} = T_3 - T_1$ —calculated temperature changes between end of restitution time and start of exercise;  $\Delta T_{32} = T_3 - T_2$ —calculated temperature changes between end of end of restitution time and end of exercise

for  $\Delta VO_2$ ,  $\Delta Power$  [W] and  $\Delta MET$  but no for  $\Delta Power$  [ $W \cdot BM^{-1}$ ],  $\Delta Power$  [ $W \cdot BSA^{-1}$ ] and  $\Delta HR$ .

In addition, the use of ANOVA systems with repeated measures made it possible to find interactions between gender and exercise performance, additionally (Table 4). There was a significant interaction between gender and effort on the  $VO_2$ , MET and EE values achieved in the research, according to expectations. However, no significant correlations were obtained between physiological parameters and the mean skin temperature changes.

## Discussion

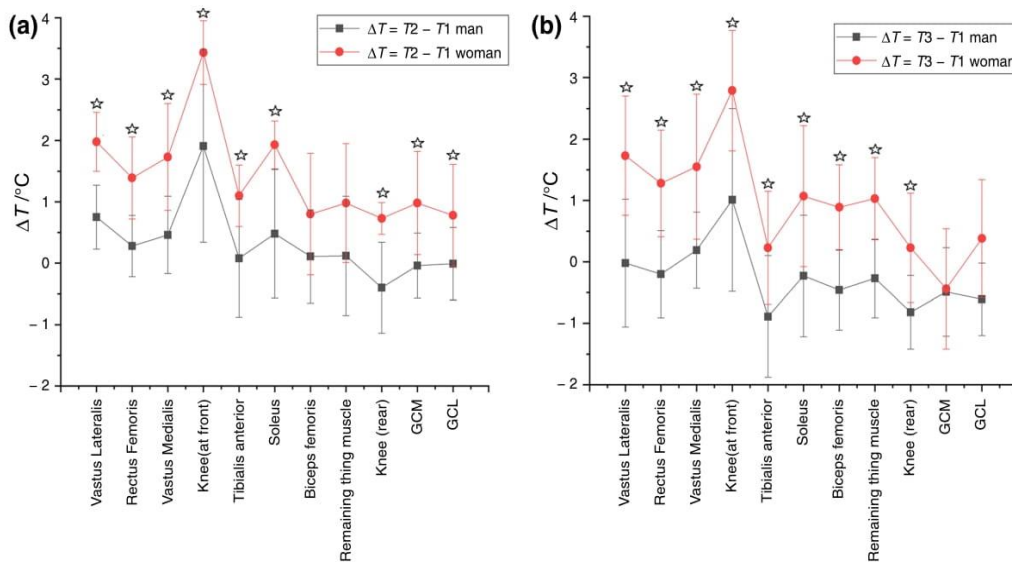
Metabolic energy expenditure is proportional to body mass during exercise such as treadmill walking [20]. The research assumed that all participants in this experiment would exercise with the same relative to BM, external workload. This work intensity should not result in differences in the metabolic heat production during exercise and thus in the total heat loss requirements. Hence, this



**Fig. 2** Internal (aural canal) temperature/°C at rest and at the end of exercise test (last) in male and female subjects

exercise test should not result inconsistent changes in body temperature in individuals of different body size and aerobic capacity [21–24]. In this research approach, it was planned to have greater certainty that sex differences in thermo-effector (skin) function would be due to changes and differences in participants' thermal and hemodynamic responses, and to a lesser extent by morphological differences. In addition, in this study work intensity was related to each participant's body surface area (area-specific work rate), as this approach was found to be most effective for obtaining equivalent changes in mean body temperature across morphologically diverse individuals [10].

Taking into account physiological characteristics of studied participants it is worth to noted that significant differences occurred in  $VO_2$ , MET and EE between male and female in response to exercise test performed at the similar external workload [ $W\ kg^{-1}$  and  $W\ m^{-2}$ ]. The higher oxygen uptake, MET and EE at the end of exercise test indicate, the intensity of metabolic processes and energy expenditure, including metabolic heat production were greater in men than in women. Gagnon and Kenny [9] elicited the same requirement for heat loss in males and females. The authors observed that whole-body sudomotor activity did not differ significantly between males and females during the two exercise periods (200, 250  $W\ m^{-2}$ ), becoming greater in males during the last exercise period equal to 300  $W\ m^{-2}$ ). Apart from, sex differences in local sudomotor activity were only evidenced at the highest requirement for heat loss employed. On the other hand, when both sexes exercised at the same percentage of  $VO_{2max}$ , it was generally found that females had lower end-exercise core temperature despite having lower sweat rates. However, both exercise protocols contained inherent methodological issues due to the fact that males and females were not matched for body mass. Analysis of the characteristics of our studied group revealed differences in body height, body weight, body surface area, BMI ratio, and the percentage and mass body composition between women and men. Notley et al. [10] indicated that individuals differing in body size, shape and composition appear to respond quantitatively differently to variations in both ambient and core temperatures, but the interrelations between morphological components and temperature regulation are complex.



**Fig. 3** Differences of temperature/°C for each muscle zones: **a**  $\Delta T_{2-1}$ —in response to exercise, **b**  $\Delta T_{3-1}$ —in response to complete experimental procedure, respectively

**Table 4** Physiological characteristics of study participants at the beginning and at the end of exercise test for men and women respectively

Variable	Men ( $n = 10$ ) $M \pm SD$	Women ( $n = 6$ ) $M \pm SD$	One-way ANOVA			ANOVA—systems with repeated measures		
			$p$	$F$	$\eta^2 p$	Sex: $F(s)$ $P$ $\eta^2 p$	Exercise: $F(s)$ $P$ $\eta^2 p$	Exercise*sex $F(s)$ $P$ $\eta^2 p$
$VO_{2\text{ start}}/\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$10.93 \pm 0.68$	$10.23 \pm 0.83$	0.53	0.4225	0.03	6.33	337.56	5.35
$VO_{2\text{ end}}/\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$52.07 \pm 5.47$	$41.00 \pm 10.62$	0.02	6.2726	0.33	0.022	0.00	0.037
$\Delta VO_2/\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	$40.78 \pm 2.47$	$31.00 \pm 3.02$	0.03	6.2881	0.33	0.33	0.96	0.29
$HR_{\text{ start}}/\text{bs} \cdot \text{min}^{-1}$	$84.44 \pm 4.90$	$85.83 \pm 6.00$	0.86	0.0321	0.00	0.037	762.17	0.46
$HR_{\text{ end}}/\text{bs} \cdot \text{min}^{-1}$	$184.22 \pm 2.79$	$180.83 \pm 3.41$	0.46	0.592	0.04	0.851	0.00	0.51
$\Delta HR/\text{bs} \cdot \text{min}^{-1}$	$99.78 \pm 4.36$	$96.00 \pm 5.34$	0.74	0.2998	0.02	0.00	0.98	0.03
Power <sub> start</sub> /W	$80.33 \pm 3.54$	$69.17 \pm .33$	0.06	3.9839	0.23	6.09	466.98	6.19
Power <sub> end</sub> /W	$283.67 \pm 13.43$	$230.50 \pm 16.44$	0.03	6.2704	0.33	0.03	0.00	0.03
$\Delta$ Power/W	$203.33 \pm 10.67$	$161.33 \pm 13.07$	0.03	6.1944	0.32	0.32	0.97	0.32
Power mass <sup>-1</sup> <sub> start</sub> /Wkg <sup>1</sup>	$1.09 \pm 0.01$	$1.07 \pm 0.02$	0.33	1.00	0.07	0.68	683.35	0.44
Power mass <sup>-1</sup> <sub> end</sub> /W kg <sup>1</sup>	$3.86 \pm 0.13$	$3.71 \pm 0.16$	0.47	0.56	0.04	0.42	0.00	0.52
$\Delta$ Power Mass <sup>-1</sup> /W kg <sup>-1</sup>	$2.77 \pm 0.13$	$2.64 \pm 0.16$	0.52	0.43	0.03	0.05	0.98	0.03
Power BSA <sup>-1</sup> /W (m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>	$146.45 \pm 11.08$	$132.01 \pm 13.39$	0.07	3.79	0.24			
MET <sub> start</sub>	$3.13 \pm 0.17$	$3.00 \pm 0.21$	0.63	0.2491	0.02	7.14	356.19	7.12
MET <sub> end</sub>	$14.74 \pm 0.69$	$11.73 \pm 0.85$	0.02	7.5455	0.37	0.02	0.00	0.02
$\Delta$ MET	$11.61 \pm 0.68$	$8.73 \pm 0.83$	0.02	7.1269	0.35	0.35	0.96	0.35
EE <sub> start</sub> /kcal d <sup>-1</sup>	$75.11 \pm 4.38$	$73.33 \pm 5.36$	0.80	0.0660	0.00	7.00	381.40	7.54
EE <sub> end</sub> /kcal d <sup>-1</sup>	$365.55 \pm 16.68$	$292.17 \pm 20.43$	0.02	7.7431	0.37	0.02	0.00	0.016
$\Delta$ EE/kcal d <sup>-1</sup>	$290.44 \pm 18.24$	$231.50 \pm 22.34$	0.06	4.1754	0.24	0.35	0.97	0.38

$VO_{2\text{ start}}$  oxygen uptake at beginning of exercise,  $VO_{2\text{ end}}$  oxygen uptake at the end of exercise,  $HR_{\text{ start}}$  heart rate at beginning of exercise,  $HR_{\text{ end}}$  heart rate at the end of exercise,  $MET_{\text{ start}}$  metabolic energy equivalent at beginning of exercise,  $MET_{\text{ end}}$  metabolic energy equivalent at the end of exercise,  $EE_{\text{ start}}$  energy expenditure at beginning of exercise,  $EE_{\text{ end}}$  energy expenditure at the end of exercise,  $BSA$  body surface area

Besides, gender differences may be associated with higher  $VO_{2\text{ max}}$  in the male cross-country skiers similar to other endurance athletes, which was partly explained by higher hemoglobin levels and lower body fat in men [25, 26]. However Jay et al. [27] indicated that large differences in  $VO_2$  peak between individuals do not influence changes in core temperature or sweating during exercise in a neutral climates, regardless of metabolic heat production, body mass, and BSA.

The thermographic records show the complex physiological response to exercise that involves the skeletal muscle (metabolism), the cardiovascular system (blood flow), the nervous system (central and peripheral) and the adrenergic system [15]. One of the main factors affecting the resting skin surface temperature under conditions of thermal comfort is vascular control.

Among the analyzed infrared thermography (IRT) parameters by us,  $T_1$  showed the strongest significant differences due to gender. Before exercise women were characterized by lower skin temperature than men what is in agreement with literature, e.g., Davies, Chudecka, Lubkowska [28, 29]. The lowest mean temperatures in obese women were observed

in the areas of the abdomen and thighs, corresponding to the areas with the greatest accumulation of body fat, and therefore suggesting that its insulating function hindered heat conduction at rest [5].

The lower skin temperature in female than in male was reported in trained athletes in morning and during the day, while at evening this differences disappeared [30]. In untrained individuals this relation was presumed to be related with body fat, BMI and gender [29, 31]. Another study confirmed this in children [32] and showed the distribution of body surface temperature was differed in boys and girls. However, in our study, the temperature in the lower limb muscles of the athletes increased after exercise, in contrast to the results presented by Dęmbiec-Bąk et al. [32] where the temperature in all parts of the children's bodies decreased. This may suggest a different response to exercise in children compared to trained adults. Our results of skin temperature for the lower extremities are consistent with those obtained by Chudecka et al. for men and women [9].

Dynamic exercise results increase metabolic heat production that in turn requires thermoregulatory skin blood flow to increase in order to limit the elevation in core temperature.



Kenny et al. [33] demonstrated that women show significantly greater and more prolonged elevations in post-exercise body temperatures and deep-to-superficial active and inactive muscle temperatures relative to men. According to Notley et al. [10], typical females displaying greater forearm blood flow and vascular conductance at rest and during work. On the other hand, adaptation of body to specified exercise may cause some changes in thermal mapping what was suggested earlier by, Tanda [34], Merla et al. [17] and Ludwig et al. [35].

In our work, we showed that exercise induces changes in skin temperature in all participants. Changes of skin temperature in response to exercise in the same muscle zones were depended on the gender of participants. A greater increase in skin temperature was obtained in women compared to men.

It follows from literature that the temperature changes during exercise depend on the type of muscle involved in the sport. Merla et al. [17] obtained that peripheral region (arms) were cooled faster than trunk and Duygu [36] showed differences in temperature response of quadriceps and hamstring in sailors after aerobic and anaerobic test. Drzazga et al. [11] reported that changes of skin temperature after exercise were different for swimmers and cross-country skiers for different muscle zones. Comparison of effect of exercise on skin temperature in trained and untrained female was presented by Formenti [37]. Tanda [34] pointed out a decrease of skin temperature in professional runners due to exercise suggesting that it was connected with vasoconstriction while rise temperature after training with vasodilation. Sex-related differences in end-exercise mean blood flow of the inactive triceps brachii were not observed in Kenny, and Jay [33]. The authors suggested a greater convective heat transfer from deeper tissues to the periphery in males leading to smaller elevations in inactive muscle temperature. Even though elevations in active muscle temperature tended to be greater in females at the end of exercise, no significant differences were found between the sexes, possibly suggesting a less prominent sex difference in active mean blood flow.

During the post-exercise recovery period, temperature returned quickly to bias in men unlike women. Marins et al. [13] observed a slower thermal progression in men compared to women. Such phenomena could be related with different distribution and activity of sweat glands in the both studied groups and differences in vasomotor response following the cessation of exercise. Differences in sweat glands capacity were described by Gagnon and Kenny, whose showed that males produces more sweat than females and also capacity of sweat glands is greater in men group than women [9]. Kuwahara et al. [8] also confirmed a greater increase in sweating rate in males than in females and suggested that the degree of training does not affect the difference in sweating between the genders. The increase in skin temperature in women observed in our experiment

immediately after exercise may be due to greater heat storage and slower heat exchange in women than in men, which is due to the greater latency time of sweating and the lower sensitivity of this thermoregulatory response to increases in body temperature as suggested by Bittel and Hennen [4, 38] well as Pokora and Gruzca [4].

An another way to understand differences in skin temperature response to exercise in men and women is through differences in the regulation of cutaneous blood flow. A greater rise of temperature prolonged in time after exercise in women was reported earlier by Kenny and Jay [33] who connected this result with post-exercise reduction in vascular resistance corresponding to vasodilation. A similar effect was obtained by Tanda [39] however only in preliminary studies. Physical exercise caused an increase in blood nitric oxide (NO), which plays an important role in the vasodilation of cutaneous arterioles. Given the need for local metabolic heat loss, NO could promote vasodilation in areas subjected to exercise through a mechanism called prolonged plateau NO-dependent vasodilation [40], allowing increased blood flow and causing an increase in local temperature, which was recorded by thermal imagers.

Therefore, differences in body morphology are of primary importance to understanding inter-individual variations in both passively and autonomically driven heat exchange in physically diverse, mixed-sex populations [1]. In addition, the significant gender differences in sweating dynamics and the ability to dissipate heat by sweat evaporation in men and women appear to be related to the fact that women utilize skin cutaneous vasodilation to a greater extent than men to dissipate heat [9].

## Conclusions

Thermal mapping showed that skin temperature of the lower limbs in female cross-country skiers was lower than in male, especially before exercise. Changes in skin temperature in response to exercise were significantly greater in women than in men, and higher skin temperature persisted in women during the recovery period. This may indicate that skin temperature regulation in response to exercise with similar external workload was modified by gender in high-trained cross-country skiers. The gender differences obtained in our study appear to be related to the different sweating dynamics and the ability to dissipate heat by sweat evaporation in men and women, as well as to differences in the contribution of skin vasodilation to the removal of excess heat generated by active muscles during exercise. In addition, gender of the respondents statistically significantly differentiated oxygen uptake ( $VO_2$ ), metabolic energy equivalent (MET) and amount of energy expended (EE) in contrast to HR and power mass<sup>-1</sup> index during the exercise test.

## Practical suggestions for coaches

Our study showed that thermography can be useful to plan specified training to individual persistence of athletes taking into account gender. Results suggested that female and male sportsmen may need a little different training plans, what is in line with results obtained in individuals performing other sports. This individual approach to training plans based on thermographic imaging is being implemented gradually at the Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice.

## Limitations

Our study has some limitations. We did not take into consideration the menstrual cycle of the female subjects when analyzing the data in the present study. Moreover, our research groups were relatively small, especially woman group.

One limitation of this study was the lack of quantification of fat tissue thickness in the studied muscles. This information would have facilitated our understanding of certain thermal skin responses on the lower limb areas.

## Declarations

**Conflict of interest** The authors declare no conflicts of interest.

**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## References

1. Taylor NAS, Notley SR. Morphological and physiological considerations for the modelling of human heat loss. *Theory Appl Heat Transf Humans*. 2018. <https://doi.org/10.1002/9781119127420.ch22>.
2. Kaciuba-Uscilko H, Grucza R. Gender differences in thermoregulation. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2001. <https://doi.org/10.1097/00075197-200111000-00012>.
3. Pokora I, Grucza R. Effects of low-carbohydrate diet on thermoregulatory responses to graded exercise in men. *Biol Sport*. 2000;17:275–88.
4. Pokora I, Grucza R. Influence of a low-carbohydrate diet on thermoregulatory responses to exercise in women during follicular and luteal phase of the menstrual cycle. *Biol Sport* 200; 17(1): 13–24.
5. Chudecka M, Lubkowska A, Kempnińska-Podohordecka A. Body surface temperature distribution in relation to body composition in obese women. *J Therm Biol*. 2014;43:1–6.
6. Shapiro Y, Pandolf KB, Avellini BA, Pimental NA, Goldman RF. Physiological responses of men and women to humid and dry heat. *J Appl Physiol*. 1980;49:1–8.
7. Inoue Y, Tanaka Y, Omori K, Kuwahara T, Ogura Y, Ueda H. Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *Eur J Appl Physiol*. 2005;94:323–32.
8. Ichinose-Kuwahara T, Inoue Y, Iseki Y, Hara S, Ogura Y, Kondo N. Sex differences in the effects of physical training on sweat gland responses during a graded exercise. *Exp Physiol*. 2010. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.053710>.
9. Gagnon D, Kenny GP. Does sex have an independent effect on thermoeffector responses during exercise in the heat? *J Physiol*. 2012;590(23):5963–73. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.240739>.
10. Notley SR, Park J, Tagami K, Ohnishi N, Taylor NAS. Variations in body morphology explain sex differences in thermoeffector function during compensable heat stress. *Exp Physiol*. 2017;102:545–62. <https://doi.org/10.1113/EP086112>.
11. Drzazga Z, Binek M, Pokora I, et al. A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise. *J Therm Anal Calorim*. 2018;134:701–10. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>.
12. Drzazga Z, Cholewka A, Ciszek W, Czuba MC, Poprzecki S. Body temperature depression to training exercise in normobaric hypoxia—primary studies. In: IFMBE proceedings; 2015; 45: pp. 232–235.
13. Marins JCB, Fernandez-Cuevas I, Arnaiz-Lastras J, Fernandes AA, Sillero-Quintana M. Applications of infrared thermography in sports. a review. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*. 2015;15(60):805–24.
14. Hreljac A. Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: a biomechanical perspective. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2005;16:651–67. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2005.02.002>.
15. Fröhlich M, Ludwig O, Kraus S, Felder H. Changes in skin surface temperature during muscular endurance indicated strain—an explorative study. *Int J Kinesiol Sports Sci*. 2014;2(3):23–7.
16. Moreira DG, Costello JT, Brito CJ, et al. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: a Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *J Therm Biol*. 2017;69:155–62. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.07.006>.
17. Merla A, Mattei PA, Di Donato L, Romani GL. Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise. *Ann Biomed Eng*. 2010;38:158–63. <https://doi.org/10.1007/s10439-009-9809-8>.
18. Ammer K. The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. *Thermol Int*. 2008;18(4):125–44.
19. Fernandez-Cuevas I, Sillero-Quintana M, Garcia-Conception MA, Ribot-Serrano J, Gomez-Carmona P. Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography. *New Stud Athl*. 2014;29(1):57–71.
20. Austin DM, Lansing MW. Body size and heat tolerance: a computer simulation. *Hum Biol*. 1986;58:153–69.
21. Gagnon D, Jay O, Lemire B, Kenny GP. Sex-related differences in evaporative heat loss: the importance of metabolic heat production. *Eur J Appl Physiol*. 2008;104:821–9.

22. Gagnon D, Dorman LE, Jay O, Hardcastle S, Kenny GP. Core temperature differences between males and females during intermittent exercise: physical considerations. *Eur J Appl Physiol.* 2009;105:453–61.
23. Schwiening CJ, Mason MJ, Thompson M. Absolute power, not sex, promotes perspiration. *Exp Physiol.* 2011;96:556–8.
24. Jay O. Unravelling the true influences of fitness and sex on sweating during exercise. *Exp Physiol.* 2014;99:1265–6.
25. Sandbakk Ø, Etnema G, Leirdal S, Holmberg H-C. Gender differences in the physiological responses and kinematic behaviour of elite sprint cross country skiers. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112:1087–94. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2063-4>.
26. Calbet JA, Joyner MJ. Disparity in regional and systemic circulatory capacities: do they affect the regulation of the circulation? *Acta Physiol.* 2010;199(4):393–406.
27. Jay O, Bain AR, Deren TM, Sacheli M, Cramer MN. Large differences in peak oxygen uptake do not independently alter changes in core temperature and sweating during exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2011. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00257.2011>.
28. Davies CTM. Thermoregulation during exercise in relation to sex and age. *Europ J Appl Physiol.* 1979;42:71–9. <https://doi.org/10.1007/BF00421907>.
29. Chudecka M, Lubkowska A. Thermal maps of young women and men. *Infrared Phys Technol.* 2015;69:81–7.
30. Bouzas Marins JC, Formenti D, Magno A, Costa C, de Andrade FA, Sillero-Quintana M. Circadian and gender differences in skin temperature in militaries by thermography. *Infrared Phys Technol.* 2015;71:322–8.
31. Neves EB, Salamunes ACC, de Oliveira RM, Stadnik AMW. Effect of body fat and gender on body temperature distribution. *J Therm Biol.* 2017;70:1–8.
32. Dębięc-Bąk A, Kuligowski T, Skrzek A. Analyzing thermoregulation processes in early school-age girls and boys through thermography. *J Therm Anal Calorim.* 2020;140:243–51. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08843-z>.
33. Kenny GP, Jay O. Sex differences in postexercise esophageal and muscle tissue temperature response. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2007. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00638.2006>.
34. Tanda G. Skin temperature measurements by infrared thermography during running exercise. *Exp Therm Fluid Sci.* 2016;71:103–13.
35. Ludwig N, Trecroci A, Gargano M, Formenti D, Bosio A, Rampinini E, Alberti G. Thermography for skin temperature evaluation during dynamic exercise, a case study on an incremental maximal test in elite male cyclist. *Appl Opt.* 2016;55(34):1–5. <https://doi.org/10.1364/AO.99.099999>.
36. Cerezci Duygu S, Ozunlu Pekiavas N, Uzun A, et al. Muscle skin temperature responses for hamstring and quadriceps to aerobic and anaerobic test conditions in Turkish olympic sailing athletes. *J Therm Anal Calorim.* 2019;136:2125–30. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7865-816>.
37. Formenti D, Ludwig N, Gargano M, Gondola M, Dellerma N, Caumo A, Alberti G. Thermal Imaging of exercise-associated skin temperature changes in trained and untrained female subjects. *Ann Biomed Eng.* 2013. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0718-x>.
38. Bittel J, Henane R. Comparison of thermal exchanges in men and women under neutral and hot conditions. *J Physiol.* 1975;250:475–89.
39. Tanda G. The use of infrared thermography to detect the skin temperature response to physical activity. *J Phys: Conf Ser.* 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012062>.
40. Johnson JM, Kellogg DL Jr. Local thermal control of the cutaneous circulation. *J Appl Physiol.* 2010;109:1229–38.

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

# Oświadczenia autora i współautorów artykułów

Prof. dr hab. Zofia Drzazga

Katowice, 28 maj 2022

Emerytowany profesor zw. Uniwersytetu Śląskiego  
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych  
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego

## Oświadczenie

Jako współautor następujących publikacji, wchodzących w skład rozprawy doktorskiej mgr Mariusza Binka:

- 1 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa (2018); A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to *endurance exercise* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>
- 2 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora (2019); Does repeated dry sauna bathing change *thermoregulation process in elite cross-country skiers?* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9> aa
- 3 M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora (2020); Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female *cross-country skiers?* in Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

oświadczam, że mój udział w powstawaniu tych prac polegał na opracowaniu koncepcji badań, weryfikacji uzyskanych wyników oraz współudziale w redagowaniu manuskryptów.

Oświadczam, że samodzielne i możliwe do wyodrębnienia części powyższych prac wykazują indywidualny wkład mgr Mariusza Binka przy: opracowaniu koncepcji badań, wykonaniu termogramów sportowców uczestniczących w badaniach, przetwarzaniu danych i ich analizie statystycznej oraz redagowaniu manuskryptów nr 1 – 3.



dr hab. Ilona Pokora, prof. AWF Katowice

Katowice, 30 maj 2022r.

Kierownik Zakładu Fizjologii,  
w Katedrze Nauk Fizjologiczno-Medycznych,  
Instytut Nauk o Sporcie, Akademia Wychowania Fizycznego im. Jerzego Kukuczki w  
Katowicach, ul Mikołowska 72a  
tel: 32 207-5136  
e-mail: [i.pokora@awf.katowice.pl](mailto:i.pokora@awf.katowice.pl)

### Oświadczenie

Jako współautor następujących publikacji, wchodzących w skład rozprawy doktorskiej  
mgr Mariusza Binka:

- 1 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa (2018); *A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>

*Oświadczam, że mój udział w powstawaniu tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań, nadzorze nad ich przeprowadzeniem, weryfikacji uzyskanych wyników oraz współudziale w redagowaniu manuskryptu.*

- 2 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora (2019); *Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>

*Oświadczam, że mój udział w powstawaniu tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań, nadzorze nad przeprowadzeniem i finansowaniem badań prowadzonych w ramach projektu RSA, Nr0050/RS4/2016/54, weryfikacji uzyskanych wyników oraz współudziale w redagowaniu manuskryptu.*

- 3 M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora (2020); *Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?* in Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

*Oświadczam, że mój udział w powstawaniu tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji badań, nadzorze i udziale w realizacji badań, weryfikacji uzyskanych wyników oraz współudziale w redagowaniu manuskryptu.*



### Oświadczenie

Jako współautor niżej wymienionej publikacji, wchodzącej w skład rozprawy doktorskiej mgr Mariusza Binka:

Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa (2018); *A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise* in *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year

oświadczam, że mój udział w powstawaniu tej pracy polegał głównie na nadzorowaniu merytorycznym pracy przed wysłaniem do redakcji czasopisma.

*Ewa Sadowska-Krępa*

Katowice, 9.06.2022

dr hab. Katowice. Teresa Socha prof. AWF  
Akademia Wychowania Fizycznego  
im. Jerzego Kukuczki w Katowicach  
Wydział Wychowania Fizycznego  
Katedra Sportów Indywidualnych

### Oświadczenie

Jako współautor poniższej publikacji mgr Mariusza Binka:

M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora (2020); *Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?* in Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

- Oświadczam, że mój udział w powstawaniu pracy polegał na:
1. Organizacji i pozyskiwaniu materiału badawczego,
  2. Zapewnieniu odpowiedniej rzetelności i merytorycznej spójności w interpretacji koncepcji badawczej.





Mgr inż. Mariusz Binek

Katowice, 01.06.2022r

Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych

Instytut Fizyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach

### Oświadczenie

Jako współautor następujących publikacji, wchodzących w skład mojej rozprawy doktorskiej

- 1 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora, E. Sadowska-Krepa (2018); *A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; Impact Factor (2018): 2,471; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>
- 2 Z. Drzazga, M. Binek, I. Pokora (2019); *Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?* in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>
- 3 M. Binek, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora (2020); *Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?* in Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

Oświadczam że mój udział w tworzeniu poszczególnych prac polegał na: pomocy przy opracowaniu koncepcji badań, wykonaniu pomiarów termograficznych, opracowaniu i analizie otrzymanych wyników, redagowaniu manuskryptu oraz przygotowaniu manuskryptu do druku w czasopiśmie.



## Dorobek Naukowy

### Artykuły:

1. Z. Drzazga, **M. Binek**, I. Pokora, E. Sadowska-Krępa “*A preliminary study on infrared thermal imaging of cross-country skiers and swimmers subjected to endurance exercise*”; in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Received: 11 January 2018 / Accepted: 16 April 2018; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7311-y>
2. Z. Drzazga, W. Ciszek, **M. Binek** “*Prenatal Zidovudine Treatment Modifies Early Development of Rat Osteoid – Confocal Microspectroscopy Analysis*”; in Journal of Fluorescence, Received: 19 June 2019 /Accepted: 27 August 2019. DOI: 10.1007/s10895-019-02429-6
3. Z. Drzazga, **M. Binek**, I. Pokora “*Does repeated dry sauna bathing change thermoregulation process in elite cross-country skiers?*”; in Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 3 July 2019 / Accepted: 4 May 2020 / Published online: 15 May 2020; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09783-9>
4. **M. Binek**, Z. Drzazga, T. Socha, I. Pokora „*Do exist gender differences in skin temperature of lower limbs following exercise test in male and female cross-country skiers?*”; Thermal Analysis and Calorimetry, Received: 12 November 2020 / Accepted: 24 August 2021; Impact Factor(2020): 4,626; Five year Impact Factor: 3,458; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11055-z>

### Wystąpienia ustne na konferencjach międzynarodowych:

1. **M. Binek**, Z. Drzazga, I. Pokora “*Thermal mapping of ski-runners during endurance training*”. XXI Meeting of the Polish Society of Medical Thermology Combined with the European Association of Thermology will hold in Zakopane ( HYRNY), Poland, 21 – 23th April, 2017
2. **M. Binek**, Z. Drzazga, I. Pokora “*Influence of wellness treatment (finish dry sauna) on the distribution of body temperature during endurance training.*” XXII Meeting of the Polish Society of Medical Thermology Combined with the European Association of Thermology will hold in Zakopane ( HYRNY), Poland, 13 – 15th April, 2018
3. **Mariusz Binek**, Zofia Drzazga, Ilona Pokora. „*Preliminary studies of impact of cryotherapy on thermal mapping of body during endurance training.*” XXIII Meeting

of the Polish Society of Medical Thermology Combined with The European Association of Thermology, Zakopane, 12-14 Kwietnia 2019r. <http://www.ptfm-slask.pl/wp-content/uploads/2019/01/XXIII-PTDTM-Zakopane-2019.pdf>

4. **Mariusz Binek**, Zofia Drzazga, Ilona Pokora, Ewa Sadowska- Krępa “*Comparison of effects of sauna and cryotherapy treatments on body temperature mapping in elite athletes*”, 5th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC5 & Medicta2019), Włochy, Rzym, 27-30 sierpnia 2019r. <http://www.ceec-tac.org/>

#### Konferencje krajowe:

1. **Mariusz Binek**, Zofia Drzazga, Ilona Pokora, Ewa Sadowska-Krępa „*Wpływ zabiegów krioterapii na obrazowanie termiczne ciała i oznaczenie parametrów biochemiczne u elitarnych sportowców wykonujących trening wytrzymałościowy*”, III Kongres Polskiego Towarzystwa Krioterapii, Wrocław, 16.05.2019r. <https://www.creator.wroc.pl/media/uploads/2019/05/III-Kongres-PTKrio-Info.pdf>

## Bibliografia

1. Vardasca R, Simoes R (2013) Current issues in medical thermography. In: Topics in medical image processing and computational vision. Springer, Berlin, pp 223–237
2. Herschel W (1800) Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun. By William Herschel, LL. D.F.R.S. Philos Trans R Soc Lond 90:284–292
3. Priego Quesada J.I. (ed.)(2017) Application of Infrared Thermography in Sports Science, Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering, DOI:10.1007/978-3-319-47410-6\_2
4. Ring EFJ (2006) The historical development of thermometry and thermal imaging in medicine. J Med Eng Technol 30:192–198. DOI:10.1080/03091900600711332
5. Rogalski A (2002) Infrared detectors: an overview. Infrared Phys Technol 43:187–210
6. Ring FJ, Jones BF (2012) Historical development of thermometry and thermal imaging in medicine. In: Biomedical signals, imaging, and informatics. CRC Press. Taylor and Francis, Boca Ratón, EEUU, pp 2–1, 2–6
7. Czerny M (1929) Über Photographie im Ultraroten. Z Für Phys 53:1–12. DOI:10.1007/BF01339378
8. Skversky NJ, Herring AB, Baron RC (1964) Thermography in Peripheral Vascular Diseases. Ann NY Acad Sci 121:118–134. DOI:10.1111/j.1749-6632.1964.tb13691.x
9. Jones BF (1998) A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine. IEEE Trans Med Imaging 17:1019–1027. DOI:10.1109/42.746635
10. Lahiri BB, Bagavathiappan S, Jayakumar T, Philip J (2012) Medical applications of infrared thermography: a review. Infrared Phys Technol 55:221–235
11. Marinacci AA (1965) Thermography in the detection of non-neurological imitators of peripheral nerve complexes; a preliminary report of ischemic (anoxic) neuropathy. Bull Los Angel Neurol Soc 30:1–11
12. Birnbaum SJ, Kliot D (1964) Thermography—obstetrical applications. Ann NY Acad Sci 121:209–222. DOI:10.1111/j.1749-6632.1964.tb13697.x
13. Costello J, Stewart IB, Selfe J et al (2013) Use of thermal imaging in sports medicine research: a short report: short article. Int SportMed J 14:94–98
14. Ring EFJ, Ammer K (2012) Infrared thermal imaging in medicine. Physiol Meas 33:R33–R46. DOI:10.1088/0967-3334/33/3/R33
15. Keyl W, Lenhart P (1975) Thermography in sport injuries and lesions of the locomotor system due to sport. Fortschr Med 93:124–126
16. Charkoudian N (2016) Human thermoregulation from the autonomic perspective. Auton Neurosci Basic Clin 196:1–2. DOI:10.1016/j.autneu.2016.02.007
17. Kenny GP, Journeay WS (2010) Human thermoregulation: separating thermal and nonthermal effects on heat loss. Front Biosci Landmark Ed 15:259–290
18. Cramer MN, Jay O (2016) Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. Auton Neurosci Basic Clin 196:3–13. DOI:10.1016/j.autneu.2016.03.001
19. Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC (2014) A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. J Therm Biol 43:7–12. DOI:10.1016/j.jtherbio.2014.04.002
20. Lim CL, Byrne C, Lee JK (2008) Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings. Ann Acad Med Singapore 37:347–353

21. Banfi G, Lombardi G, Lubkowska A. (2012) Metabolic markers in sports medicine. *Adv Clin Chem.* 56:1–54.
22. Brancaccio P, Maffulli N, Limongelli FM. (2007) Creatine kinase monitoring in sport medicine. *Br Med Bull.* 81–82:209–30.
23. Losnegard T, Mikkelsen K, Rønnestad BR, Halle J, Rud B, Raastad T. (2011) The effect of heavy strength training on muscle mass and physical performance in elite cross country skiers. *Scand J Med Sci Sports.* 2:389–401.
24. Stöggl T, Müller E, Ainegren M, Holmberg H-C. (2011) General strength and kinetics: fundamental to sprinting faster in cross country skiing? *Scand J Med Sci Sports.* 21:791–803
25. Ammer K (2008) The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body. *Thermol Int* 18:125–144.
26. Moreira DG, et al. (2017) Thermographic imaging in sports and exercise medicine: a Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature. *J Therm Biol.* 69:155–62.
27. Fernández-Cuevas I, Sillero-Quintana M, Garcia-Concepcion MA, Ribot-Serrano J, Gomez-Carmona P. (2014) Monitoring skin thermal response to training with infrared thermography. *New Stud Athl.* 29(1):57–71.
28. Novotny J, Rybarova S, Zacha D, Novotny J Jr, Bernacikova M, Ramadan W. (2015) The influence of breaststroke swimming on the muscle activity of young men in thermographic imaging. *Acta Bioeng Biomech.* 17(2):121–9.
29. Hildebrandt C, Zeilberger K, Francis E, Ring J, Raschner C. (2012) The application of medical infrared thermography in sports medicine. In: Zaslav KR, editor. *An international perspective on topics in sports medicine and sports injury.* InTech;. ISBN:978-953-51-0005-8.  
<http://www.intechopen.com/books/an-internationalperspective-on-topics-in-sports-medicine-and-sportsinjury/theapplication-of-medical-infrared-thermography-in-sports-medicine>.
30. Marins JCB, Fernández-Cuevas I, Arnaiz-Lastras J, Fernandes AA, Sillero-Quintana M. (2015) Applications of infrared thermography in sports. A review. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte.* 15(60):805–24.
31. Arfaoui A, Polidori G, Taiar R, Popa C. (2012) Infrared thermography in sports activity. In: Prakash RV, editor. *Infrared thermography.* InTech;. ISBN: 978-953-51-0242-7.  
<http://www.intechopen.com/books/infrared-thermography/infrared-thermography-insports-activity>.
32. Tanda G. (2016) Skin temperature measurements by infrared thermography during running exercise. *Exp Therm Fluid Sci.* 71:103–13.
33. Roels B, Schmitt L, Libicz S, Bentley D, Richalet J, Millet G. (2005) Specificity of VO<sub>2</sub>max and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. *Br J Sports Med.* 39(12):965–96.
34. Cholewka A, Kasprzyk T, Stanek A, Sieroń-Stoltny K, Drzazga Z. (2016) May thermal imaging be useful in cyclist endurance tests? *J Therm Anal Calorim.* 123:1973–9. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4662-5>.
35. Choi JK, Miki K, Sagawa S, Shiraki K. Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography. *Int J Biometeorol.* 1997;41:68–75.
36. Kihara T, et al. (2002) Repeated sauna treatment improves vascular endothelial and cardiac function in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol.* 39(5):754–9.

37. Kihara T, et al. (2004) Effects of repeated sauna treatment on ventricular arrhythmias in patients with chronic heart failure. *Circ J*.68:1146–51.
38. Imamura M, et al. (2001) Repeated thermal therapy improves impaired vascular endothelial function in patients with coronary risk factors. *JACC*.38(4):1083–8.
39. Pilch W, Pokora I, Szyguła Z, Pałka T, Pilch P, Cisoń T, Malik L, Wiecha S. (2013) Effect of a single finnish sauna session on white blood cell profile and cortisol levels in athletes and non-athletes. *J Hum Kinet*.39:127–35. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0075>.
40. Niewiadomy P, Tiffert-Tłok J, Szuścik K, Stolecka-Warzecha A, Kwaśna K. (2016) Estimation of changes of lower limbs reactivity among mountain cyclist under the influence of sauna treatment. *Physiother Health Activ*.24:12–8. <https://doi.org/10.1515/pha-2016-0003>.
41. Scoon GSM, Hopkins WG, Mayhew S, Cotter JD.(2007) Effect of postexercise sauna bathing on the endurance performance of competitive male runners. *J Sci Med Sport*.10:259–62.
42. Ernst E, Strziga P, Schmidlechner C, Magyarosy I.(1986) Sauna effects on hemorheology and other variables. *Arch Phys Med Rehabil*.67(8):526–9.
43. Shapiro Y, Pandolf KB, Avellini BA, Pimental NA, Goldman RF. (1980) Physiological responses of men and women to humid and dry by heat. *J Appl Physiol*. 49:1–8.
44. Inoue Y, Tanaka Y, Omori K, Kuwahara T, Ogura Y, Ueda H.(2005) Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *Eur J Appl Physiol*.94:323–32.
45. Kaciuba-Uscilko H, Gruzca R.(2001) Gender differences in thermoregulation. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. <https://doi.org/10.1097/00075197-200111000-00012>.
46. Pokora I, Gruzca R. (2000) Effects of low-carbohydrate diet on thermoregulatory responses to graded exercise in men. *Biol Sport*. 17:275–88.
47. Pokora I, Gruzca R (2003) Influence of a low-carbohydrate diet on thermoregulatory responses to exercise in women during follicular and luteal phase of the menstrual cycle. *Biol Sport* 17(1):13–24.
48. Bouzas Marins JC, Formenti D, Magno A, Costa C, de Andrade FA, Sillero-Quintana M.(2015) Circadian and gender differences in skin temperature in militaries by thermography. *Infrared Phys Technol*.71:322–8.
49. Chudecka M, Lubkowska A.(2015) Thermal maps of young women and men. *Infrared Phys Technol*.69:81–7.
50. Neves EB, Salamunes ACC, de Oliveira RM, Stadnik AMW.(2017) Effect of body fat and gender on body temperature distribution. *J Therm Biol*.70:1–8.
51. Kenny GP, Jay O.(2007) Sex differences in postexercise esophageal and muscle tissue temperature response. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00638.2006>.
52. Gagnon D, Kenny GP.(2012) Does sex have an independent effect on thermoeffector responses during exercise in the heat? *J Physiol*.590(23):5963–73. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.240739>.
53. Ichinose-Kuwahara T, Inoue Y, Iseki Y, Hara S, Ogura Y, Kondo N.(2010) Sex differences in the effects of physical training on sweat gland responses during a graded exercise. *Exp Physiol*. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.053710>.
54. Bittel J, Henane R.(1975) Comparison of thermal exchanges in men and women under neutral and hot conditions. *J Physiol*.250:475–89.
55. Johnson JM, Kellogg DL Jr.(2010) Local thermal control of the cutaneous circulation. *J Appl Physiol*.109:1229–38.

56. Merla A, Mattei PA, Di Donato L, Romani GL. (2010) Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise. *Ann Biomed Eng.* 38:158–63.
57. Ludwig N, Trecroci A, Gargano M, Formenti D, Bosio A, Rampinini E, Alberti G. (2016) Thermography for skin temperature evaluation during dynamic exercise, a case study on an incremental maximal test in elite male cyclist. *Appl Opt.*55(34):1–5. <https://doi.org/10.1364/AO.99.099999>.
58. Formenti D, Ludwig N, Gargano M, Gondola M, Dellerma N, Caumo A, Alberti G. (2013) Thermal imaging of exercise-associated skin temperature changes in trained and untrained female subjects. *Ann Biomed Eng.* 41:863–71.
59. Garrett AT, Rehrer NJ, Patterson MJ.(2011) Induction and decay of short-term heat acclimation in moderately and highly trained athletes. *Sports Med.*41(9):757–71.
60. Periard JD, Travers GJS, Recinais S, Sawka MN.(2016) Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Auton Neurosci Basic Clin.*196:52–62.
61. Ravanelli, et al.(2018) Maximum skin wettedness after aerobic training with and without heat acclimation. *Med Sci Sports Exerc.*50(2):299–307. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001439>.
62. Candas V, Libert JP, Vogt JJ. (1979) Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating. *J Appl Physiol.*46:522–8.
63. Kondo N, Tominaga H, Shibasaki M, Aoki K, Koga S, Nishiyasu T.(1999) Thermoregulatory adaptation in humans and its modifying factors. *J Physiol.*515(Pt 2):591–8.
64. Tyler CJ, Reeve T, Hodges GJ, Cheung SS.(2016) The effects of heat adaptation on physiology, perception and exercise performance in the heat: a meta-analysis. *Sports Med.*46:1699. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0538-5>.
65. Sandbakk O, Ettema G, Leirdal S, Holmberg H-C.(2012) Gender differences in the physiological responses and kinematic behaviour of elite sprint cross country skiers. *Eur J Appl Physiol.*112:1087–94. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2063-4>.
66. Calbet JA, Joyner MJ.(2010) Disparity in regional and systemic circulatory capacities: do they affect the regulation of the circulation? *Acta Physiol.*199(4):393–406.
67. Davies CTM. (1979) Thermoregulation during exercise in relation to sex and age. *Europ J Appl Physiol.*42:71–9. <https://doi.org/10.1007/BF00421907>.
68. Notley SR, Park J, Tagami K, Ohnishi N, Taylor NAS.(2017) Variations in body morphology explain sex differences in thermoeffector function during compensable heat stress. *Exp Physiol.*102:545–62. <https://doi.org/10.1113/EP086112>.