

Znaczenie termoregulacji dla wydolności fizycznej człowieka – czy zaburzenia regulacji temperatury wewnętrznej i jej percepcji przez korę mózgową mogą mieć wpływ na przebieg przewlekłej niewydolności serca?

The significance of thermoregulation to physical capacity in humans – can dysregulation of core body temperature and its cortical perception have impact on the course of chronic heart failure?

Robert Skalik^{1,2,3}, Ludmiła Borodulin-Nadzieja², Wojciech Woźniak^{1,2}, Marek Girek², Aureliusz Kosendiak⁴, Anna Janocha²

¹ Pracownia Fizjologii Wysiłku i Układu Krążenia, Pracownia Badań Psychomotorycznych, Akademia Medyczna, Wrocław

² Katedra i Zakład Fizjologii, Akademia Medyczna, Wrocław

³ Grupa Robocza Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego

⁴ Studium Wychowania Fizycznego i Sportu, Akademia Medyczna, Wrocław

Streszczenie

Dynamiczny rozwój badań nad patofizjologią przewlekłej niewydolności serca i fizjologią wysiłku pozwolił na lepsze zrozumienie mechanizmów prowadzących do objawów przetrenowania, upośledzenia wydolności fizycznej u sportowców wyczynowych, a także klinicznej manifestacji przewlekłej niewydolności serca. Mimo to wciąż pojawiają się liczne kontrowersje dotyczące związków pomiędzy termoregulacją, percepcją intensywności wysiłku fizycznego przez korę mózgową oraz obiektywnymi parametrami wydolnościowymi organizmu ocenianymi w badaniu ergospirometrycznym. Podwzgórze – główny ośrodek regulacji temperatury wewnętrznej człowieka, pozostaje w anatomicznym i funkcjonalnym związku z korą mózgową, ośrodkami regulacji układu naczyniowo-sercowego i oddechowego. Zaburzenie funkcjonowania tego swoistego układu naczyń połączonych na jakimkolwiek poziomie może przyczynić się do upośledzenia wydolności fizycznej. Niektórzy badacze zwracają szczególną uwagę na istotną rolę czynnika mentalnego oraz zaburzeń termoregulacji w percepcji nasilenia duszności u chorych z przewlekłą niewydolnością serca. Celem pracy jest przedstawienie ostatnich badań dotyczących wpływu termoregulacji oraz funkcjonowania kory mózgowej na wydolność fizyczną u sportowców wyczynowych i u chorych z przewlekłą niewydolnością serca.

Słowa kluczowe: termoregulacja, temperatura wewnętrzna, wydolność fizyczna, przewlekła niewydolność serca

Abstract

The vigorous development of investigations on pathophysiology of chronic heart failure and exercise physiology within recent years allowed for better understanding of mechanisms leading to overtraining, deconditioning and also clinical manifestation of cardiovascular dysfunction. Despite that there are many controversies concerning the links between thermoregulation, cortical perception of physical stress and cardiopulmonary parameters of exercise capacity both in athletes and patients with chronic heart failure. The hypothalamus – the main regulatory center of core body temperature in humans remains in anatomical and functional relationship with cerebral cortex, autonomic cardiovascular and respiratory centers that control cardiopulmonary system and exercise capacity. Some authors pay special attention to the role of mental factor in perception of severity of exercise intolerance by patients with chronic heart failure. Hence, the aim of the paper is to present the recent investigations and opinions on the significance of thermoregulation and cerebral cortex to physical capacity in athletes and patients with chronic heart failure.

Key words: thermoregulation, core body temperature, physical capacity, chronic heart failure

Kardiol Pol 2009; 67 (supl. 6): 449–454

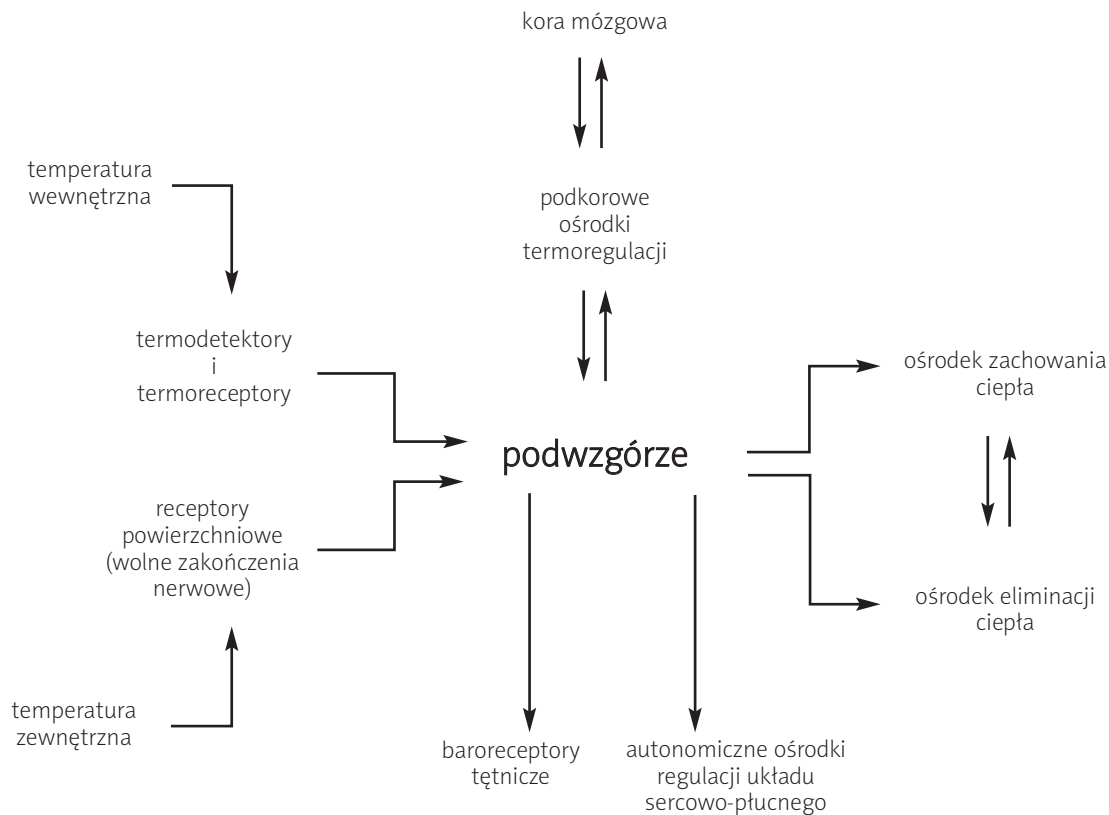
Adres do korespondencji:

dr n. med. Robert Skalik, Katedra i Zakład Fizjologii, Akademia Medyczna, ul. T. Chałubińskiego 10, 50-368 Wrocław,
tel.: +48 71 784 00 91, +48 606 742 344, e-mail: rskalik@fizjo.am.wroc.pl

Dynamiczny rozwój badań nad patofizjologią przewlekłej niewydolności serca w ciągu ostatnich lat pozwolił na lepsze zrozumienie mechanizmów prowadzących do wystąpienia objawów klinicznych istotnego upośledzenia funkcji skurczowej bądź rozkurczowej serca (aktywacja układów neurohumoralnych, zwiększona impulsacja z ergoreceptorów do ośrodka oddechowego, zaburzenia w układzie odpornościowym i hormonalnym) [1, 2]. W publikacjach dotyczących tego tematu badacze często zapominają o znaczeniu termoregulacji, temperatury wewnętrznej człowieka oraz percepcji jej zmian przez korę mózgową w trakcie wysiłku fizycznego u chorych z przewlekłą niewydolnością krążenia. Podwzgórze, które jest centralnym ośrodkiem regulacji temperatury wewnętrznej człowieka, pozostaje w anatomicznym i funkcjonalnym związku z korą mózgową oraz autonomicznymi ośrodkami regulującymi pracę układu sercowo-płucnego [3]. Układ krążenia jest więc głównym efektem działania mechanizmów termoregulacyjnych. Powoduje to, iż zaburzenia na którymkolwiek poziomie tego swoistego układu naczyń połączonych (mózgowie – podwzgórze – ośrodki pracy serca – ośrodek oddechowy) mogą decydować o pracy całości układu, a więc zaburzenia pracy układu sercowo-naczyniowego mogą modulować funkcję ośrodków korowych percepcji bodźca termalnego oraz podkorowych ośrodków termoregulacji i w ten sposób wpływać na subiektywne odczuwanie zmęczenia bądź duszności. Sta-

bilność temperatury wewnętrznej ciała jest warunkowana utrzymaniem równowagi pomiędzy procesami utraty i produkcji ciepła. Równowaga termiczna jest procesem dynamicznym, wymagającym ciągłej reakcji poszczególnych elementów układu termoregulującego na zmieniające się warunki temperaturowe otoczenia, a także na zmienną intensywność produkcji ciepła w trakcie procesów metabolicznych zachodzących w poszczególnych układach człowieka w odpowiedzi na wysiłek fizyczny. Temperatura wewnętrzna ciała człowieka (ang. *core body temperature*) odbierana jest przez termodetektory rozmieszczone w obrębie centralnego układu nerwowego, głównie w podwzgórze, pniu mózgu, rdzeniu kręgowym, mięśniach górnych dróg oddechowych, przewodzie pokarmowym oraz w obrębie otrzewnej. Informacje o aktualnej wysokości temperatury zewnętrznej i wewnętrznej docierają z termoreceptorów za pośrednictwem dróg nerwowych do ośrodków kontroli temperatury wewnętrznej w podwzgórze. Z kolei podwzgórze wysyła informację o aktualnych warunkach termicznych organizmu do autonomicznych ośrodków regulujących pracę układu sercowo-płucnego [4] (Rycina 1).

Głównym wyznacznikiem aktywacji poszczególnych mechanizmów efektorowych równowagi termicznej organizmu jest temperatura wewnętrzna. Wahania temperatury wewnętrznej decydują o pobudzeniu lub hamowaniu obwodowych mechanizmów odpowiadających za utratę bądź



Rycina 1. Fizjologiczne zależności pomiędzy termoregulacją a układem krążenia

zatrzymanie ciepła w organizmie. Temperatura wewnętrzna jest zwykle zbliżona do temperatury rektalnej i mieści się w zakresie 36–38°C. Temperatura w obrębie ust bądź na błonie bębenkowej jest zwykle o 0,7°C niższa od temperatury rektalnej [4]. W trakcie umiarkowanego wysiłku fizycznego w warunkach fizjologicznych temperatura wewnętrzna może wzrosnąć do 38–38,6°C, a podczas ciężkiego wysiłku może osiągnąć nawet wartość 38,6–40,0°C [4].

Szczególnie wiele uwagi poświęcono znaczeniu termoregulacji i termogenezy dla wydolności fizycznej organizmu w medycynie sportowej. W dotychczas przeprowadzonych badaniach nad wpływem wysiłku fizycznego na zmiany w układzie termoregulacyjnym u sportowców wyczynowych nie udało się jednak jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, czy zmiana temperatury wewnętrznej ciała w trakcie wysiłku fizycznego jest bezpośrednio związana z wydolnością fizyczną i czy w związku z tym może być wartościowym markerem adaptacji organizmu do wzmożonego wysiłku. Linnane i wsp. sugerują, że wzrost temperatury wewnętrznej o 1°C istotnie zwiększa wydolność na początku intensywnych ćwiczeń [5]. Z kolei inni badacze zwracają uwagę, że hipertermia może powodować zmniejszenie wydolności w trakcie intensywnego wysiłku, co wynika ze spadku wartości maksymalnego poboru tlenu ($VO_2 \max$) [6]. Co więcej, sam wzrost temperatury wewnętrznej jest czynnikiem wpływającym na zmęczenie zawodnika podczas wysiłku fizycznego, niezależnie od warunków temperaturowych otoczenia [7]. Z drugiej strony przypuszcza się, że inne czynniki, w tym osobnicze różnice w zawartości tkanki tłuszczowej, mogą również odpowiadać za szybszy wzrost temperatury tkanek przy danym poziomie metabolizmu w trakcie wysiłku [8]. Mimo tych wątpliwości nie jest wykluczone, że dynamika zmian temperatury wewnętrznej w trakcie wysiłku fizycznego, która odzwierciedla intensywność przemian metabolicznych oraz aktywność systemu termoregulacyjnego związanego czynnościowo z ośrodkami korowymi (czynnik psychologiczny), może być jednym z głównych czynników warunkujących stopień wydolności fizycznej człowieka, również u chorych z przewlekłą niewydolnością serca.

Drust i wsp. uważają, że upośledzona tolerancja wysiłku może nie być związana z akumulacją uznanych czynników metabolicznych w trakcie ćwiczeń fizycznych, lecz wynika z wpływu istotnego wzrostu temperatury wewnętrznej na funkcjonowanie kory mózgowej [9]. Travlos i wsp. nie obserwowali istotnego związku pomiędzy wzrostem temperatury wewnętrznej w trakcie wysiłku a sprawnością psychomotoryczną, jakkolwiek w pewnych przedziałach badanych temperatur temperatura wewnętrzna oraz średni czas reakcji na bodziec oceniany w testach psychomotorycznych były związane ze stopniem wytrenowania zawodników [10]. Badacze ci wykazali również, że u osób bardzo dobrze wytrenowanych istnieje pewna zależność pomiędzy subiektywną percepcją stopnia zmęczenia a częstotliwością akcji serca oraz temperaturą we-

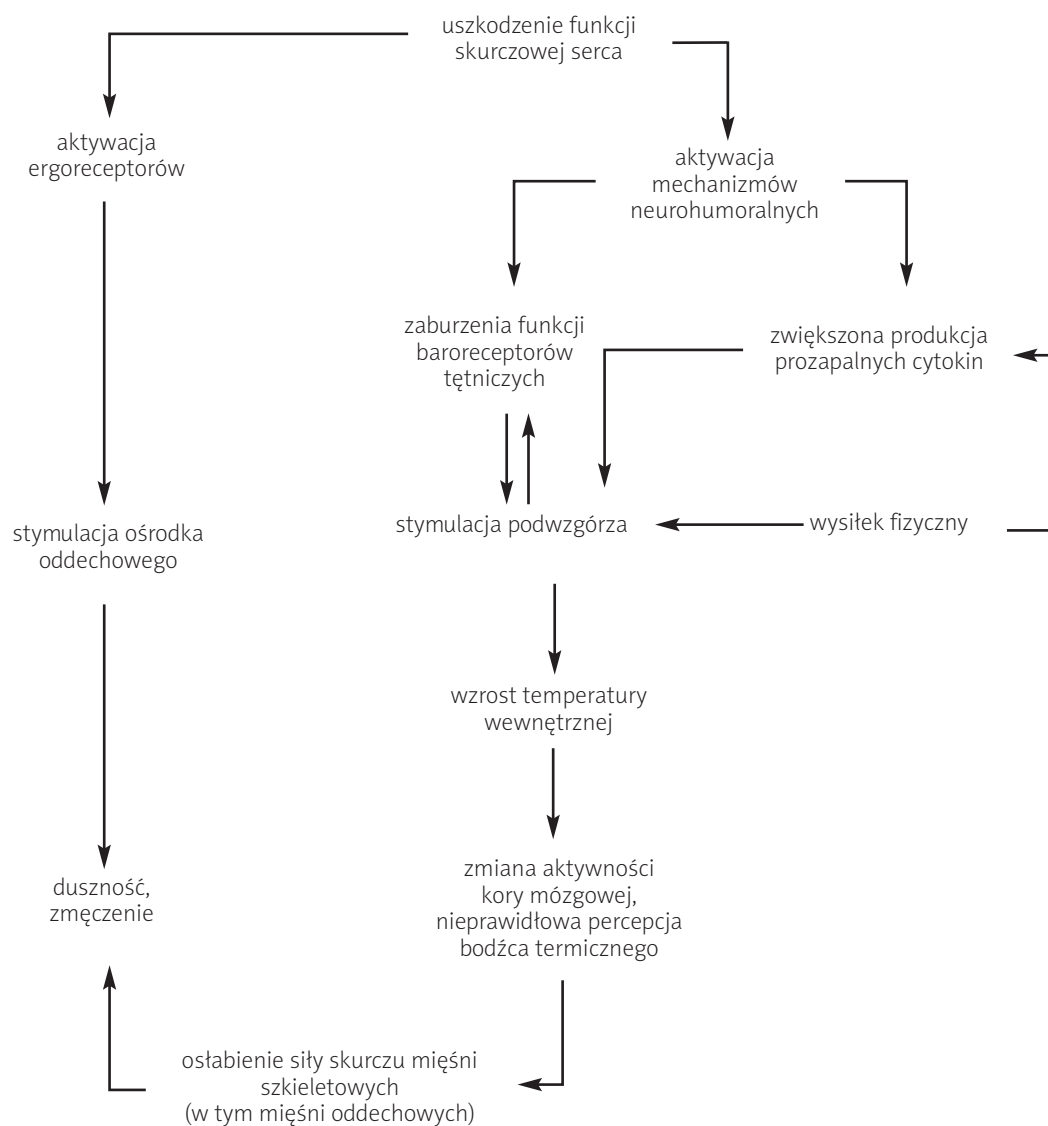
wnętrzną ciała [11]. W swojej najnowszej pracy Simmons i wsp. potwierdzili istotny wpływ wzrostu temperatury wewnętrznej na ocenę stopnia zmęczenia przez badanego (ang. *rate of perceived exertion*), jak również obiektywne parametry wydolności układu krążenia [12].

Według autorów pracy wzrost temperatury wewnętrznej ciała może się przyczyniać do pogorszenia funkcji poznawczych. W badaniach własnych przeprowadzonych w grupie sportowców wielkość, dynamika oraz moment wystąpienia maksymalnego wzrostu temperatury wewnętrznej ciała istotnie wpływały na funkcje poznawcze oraz wydolność ocenianą w trakcie badania ergospirometrycznego [13]. Wzrost temperatury wewnętrznej ciała w trakcie wysiłku był istotnie większy u osób z niższą wydolnością tlenową (*aerobic capacity*), a więc niższym maksymalnym poborem tlenu przez tkanki oraz gorszym wynikiem oceny funkcji poznawczych (czas reakcji na bodziec świetlny był u tych osób istotnie dłuższy) [13]. Nybo i wsp. potwierdzili w swoich badaniach obecność zmian w elektroencefalogramie u osób z istotnym wzrostem temperatury wewnętrznej ciała podczas wysiłku fizycznego [14].

Z kolei Thomas i wsp. wykazali, że istotny wzrost temperatury wewnętrznej i związana z tym zmniejszona aktywność korowa, a nie zmiany temperatury miejscowej w obrębie pracujących mięśni szkieletowych, odpowiadają za spadek siły skurczu mięśni szkieletowych w trakcie wysiłku [15]. Mimo tych obserwacji związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy zmianami w układzie krążenia, zmianą aktywności elektrycznej mózgu oraz nasileniem odczuwania zmęczenia przez sportowców i przez chorych z przewlekłą niewydolnością serca w warunkach wzrostu temperatury wewnętrznej (ang. *hyperthermia-induced central fatigue*) pozostaje niejasny i wymaga dalszych badań [16].

Zgodnie z wynikami badań Havenith i wsp. zmiana temperatury wewnętrznej człowieka w trakcie wysiłku fizycznego, podobnie jak liczba uderzeń serca na minutę, jest głównie determinowana przez maksymalne zużycie tlenu [17]. Według autorów pracy im większa jest wartość $VO_2 \max$ uzyskiwana w trakcie wysiłku fizycznego, a więc większa wydolność ogólna, tym mniejszego wzrostu temperatury wewnętrznej (*heat strain*) można się spodziewać [17]. Podczas długotrwałych wysiłków o charakterze wytrzymałościowym temperatura wewnętrzna stabilizuje się na podwyższonym poziomie po 30–40 min, przy czym jej wartość u danej osoby zależy od względnego obciążenia pracą, wyrażanego jako procent indywidualnego maksymalnego poboru tlenu [4]. Tak więc w zależności od wydolności fizycznej badani mogą osiągać wyższe lub niższe wartości temperatury wewnętrznej ciała, pomimo wykonywania pracy o takiej samej bezwzględnej intensywności [4].

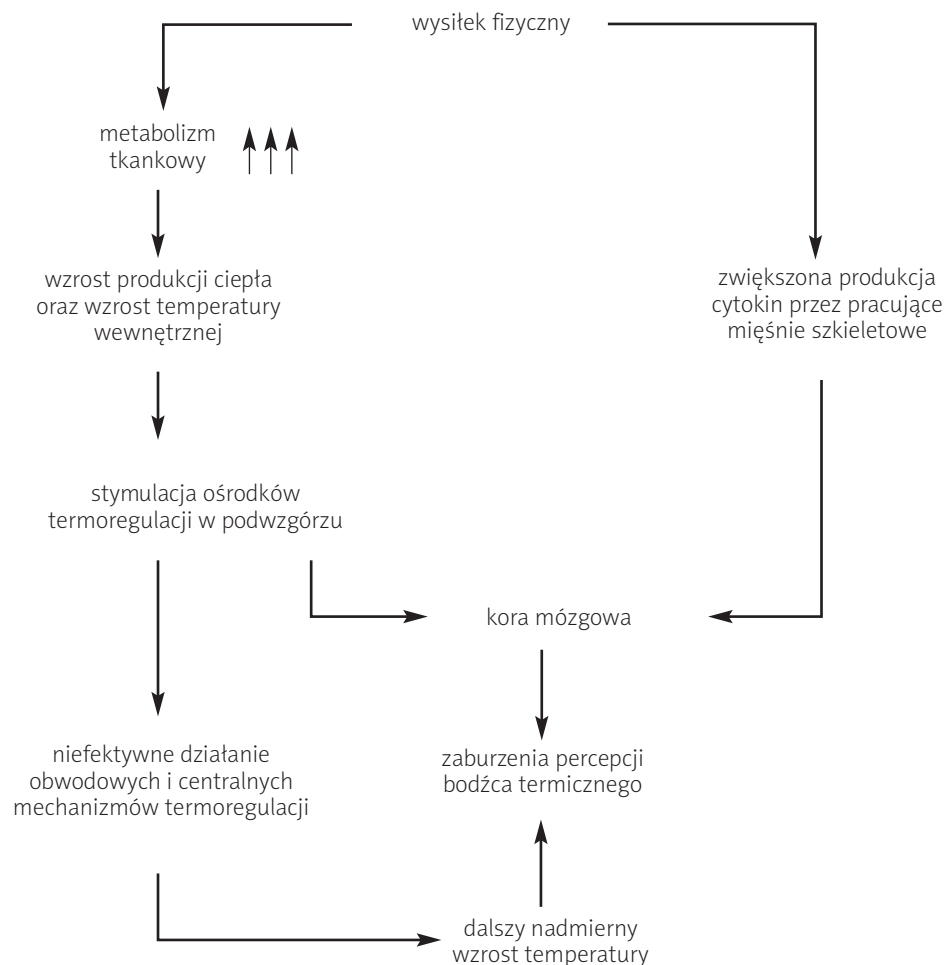
W trakcie wysiłku fizycznego dynamika produkcji ciepła ulega istotnemu zwiększeniu, co jest wynikiem nasilenia procesów metabolicznych dostarczających energię potrzebną dla skurczu mięśni szkieletowych. Wydolność fizyczna jest procesem złożonym i niezależnie od prawi-



Rycina 2. Mechanizm termoregulacji w przewlekłej niewydolności serca

dłowego funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego oraz mięśniowo-szkieletowego podlega istotnej modulacji przez takie uznane czynniki, jak intensywność przemian metabolicznych w trakcie wysiłku (przemiany tlenowe i beztlenowe), efektywność termoregulacji oraz czynniki psychologiczne. Można przypuszczać, że zmiana temperatury wewnętrznej pod wpływem wysiłku oraz jej percepcja przez korę mózgową człowieka jest również cechą osobniczą i w pewnych granicach niekoniecznie związaną bezpośrednio z obiektywną oceną wydolności ogólnej, jakkolwiek u osób z upośledzoną tolerancją wysiłku w przebiegu niewydolności serca dochodzi do zmian w transmisji bodźca termalnego i jego odbiorze przez podwzgórze i ośrodki korowe. Skotzko podkreśla istotną rolę czynnika psychicznego w percepcji stopnia nasilenia objawów niewydolności serca przez chorego [18].

Niektórzy badacze potwierdzają bezpośredni związek pomiędzy aktywnością ośrodka termoregulacji a odpowiedzią z baroreceptorów tętnicznych. Według Kamiya i wsp. wzrost temperatury wewnętrznej modyfikuje napięcie włókien współczulnych unerwiających mięśnie szkieletowe poprzez wpływ na odruch z baroreceptorów tętnicznych. Przypuszcza się, że jest to możliwe dzięki obecności bezpośrednich połączeń nerwowych pomiędzy układem termoregulacyjnym a elementami łuku odruchowego baroreceptorów [19]. Dotychczas przeprowadzone badania kliniczne i eksperymentalne potwierdzają istotny udział zaburzeń odruchu z baroreceptorów tętnicznych w patofizjologii schorzeń układu sercowo-naczyniowego, w tym choroby wieńcowej i przewlekłej niewydolności serca [20]. Badania eksperymentalne sugerują istotny udział odruchu z baroreceptorów tętnicznych w modulacji powierzchowne-



Rycina 3. Termoregulacja w przewlekłej niewydolności serca oraz u osób o niskiej wydolności fizycznej w trakcie wysiłku fizycznego

go przepływu naczyniowego będącego ważnym ogniwem termoregulacji [21]. Z kolei wg Charkoudiana włókna układu współczulnego odpowiadające za regulację przepływu skórno mają istotny udział w regulacji odruchu z baroreceptorów tętnicznych [22]. Aktywacja układu współczulnego odpowiada w 80–90% za wzrost przepływu przez naczynia skórne w trakcie zwiększonej termogenezy związanej z wysiłkiem fizycznym. Podczas hipertermii przepływ krwi w naczyniach skórnych wzrasta do 6–8 l/min, co oznacza, że istotny procent pojemności minutowej serca jest kierowany do skóry w warunkach istotnego wzrostu temperatury wewnętrznej ciała człowieka [4]. Regulacja przepływu krwi przez naczynia skórne jest więc ważnym ogniwem utrzymania homeostazy termoregulacyjnej i naczyniowo-sercowej w trakcie wysiłku fizycznego zarówno u osób zdrowych, jak i chorych z przewlekłą niewydolnością serca [13, 23].

Z kolei wg Nybo i wsp. obserwowany wzrost średniej temperatury ciała w trakcie wysiłku fizycznego jest czę-

ściowo spowodowany zwiększoną produkcją prozapalnych cytokin TNF- α i IL-10, których zwiększoną aktywność obserwuje się także u chorych z przewlekłą niewydolnością serca [24, 25]. Powyższe badania potwierdzają obecność wzajemnych relacji pomiędzy ośrodkami termoregulacji a neurohumoralnymi i immunologicznymi mechanizmami regulującymi pracę układu sercowo-naczyniowego zarówno w warunkach fizjologicznych, jak i w przebiegu niewydolności serca (Ryciny 2. i 3.).

Według Macka i wsp. istnieje istotna zależność pomiędzy układem termoregulacyjnym oraz sercowo-płucnym, szczególnie na poziomie aktywności neuronalnej [26]. Dotychczasowe badania eksperymentalne na zwierzętach wykazały dużą wrażliwość na zmiany temperatury wewnętrznej jądra olbrzymiokomórkowego istotnie związanego z regulacją czynności układu krążenia [4]. Wielu badaczy podkreśla znaczenie regularnego treningu fizycznego dla zwiększenia tolerancji organizmu na wzrost temperatury wewnętrznej w trakcie wysiłku. Według McLellana

zwiększona wydolność układu krążenia pod wpływem regularnego długotrwałego wysiłku fizycznego pozwala na znacznie większy wzrost temperatury wewnętrznej do momentu wystąpienia objawów zmęczenia [8]. Wzrost temperatury wewnętrznej podczas sesji treningowych może inicjować proces „przyzwyczajania” ośrodków korowych do nasilonego napływu bodźca termalnego [8]. Miyamoto i wsp. wykazali istotny pozytywny wpływ kontrolowanej ekspozycji chorych z przewlekłą niewydolnością serca na bodziec termalny (gorące kąpiele, sauna). Autorzy stwierdzali nie tylko istotną poprawę funkcji śródbłonna naczyniowego i parametrów hemodynamicznych serca, lecz również subiektywnie odczuwaną poprawę jakości życia chorych [27].

Piśmiennictwo

1. Wassermann K, Sue YD, Hansen JE, et al. Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications. *Lippincott Williams & Wilkins*, Philadelphia 2004; 2-67.
2. Ponikowski PP, Chua TP, Francis DP, et al. Muscle ergoreceptor overactivity reflects deterioration in clinical status and cardiorespiratory reflex control in chronic heart failure. *Circulation* 2001; 104: 2324-30.
3. Guyton AC, Hall JE. Textbook of Medical Physiology, 11th ed. *WB Saunders*, Philadelphia 2006; 1055-66.
4. Traczyk WZ, Trzebski A. Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej. *Wydawnictwo Lekarskie PZWL*, Warszawa 2004; 445-628.
5. Linnane DM, Bracken RM, Brooks S, et al. Effects of hyperthermia on the metabolic responses to repeated high-intensity exercise. *Eur J Appl Physiol* 2004; 93: 159-66.
6. González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, et al. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 1999; 86: 1032-9.
7. Gonzalez-Alonso J, Calbet JA, Nielsen B. Metabolic and thermodynamic responses to dehydration-induced reductions in muscle blood flow in exercising humans. *J Physiol* 1999; 15: 577-89.
8. McLellan TM. The importance of aerobic fitness in determining tolerance to uncompensable heat stress. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2001; 128: 691-70.
9. Drust B, Rasmussen P, Mohr M, et al. Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance. *Acta Physiol Scand* 2005; 183: 181-90.
10. Travlos AK, Marisi DQ. Elevation of core temperature and mental functioning. *Percept Mot Skills* 1996; 83: 219-25.
11. Travlos AK, Marisi DQ. Perceived exertion during physical exercise among individuals high and low in fitness. *Percept Mot Skills* 1996; 82: 419-24.
12. Simmons SE, Saxby BK, McGlone FP, et al. The effect of passive heating and head cooling on perception, cardiovascular function and cognitive performance in the heat. *Eur J Appl Physiol* 2008; 104: 271-80.
13. Skalik R, Woźniak W, Janocha A, et al. Effect of dynamics and timing of thermal response to incremental short lasting physical effort on cognitive functions and cardiopulmonary capacity in athletes. *Gazz Med Ital* (w druku).
14. Nybo L, Nielsen B. Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol* 2001; 91: 2017-23.
15. Thomas MM, Cheung SS, Elder GC, et al. Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. *J Appl Physiol* 2006; 100: 1361-9.
16. Nielsen B, Nybo L. Cerebral changes during exercise in the heat. *Sports Med* 2003; 33: 1-11.
17. Havenith G, Coenen JM, Kistemaker L, et al. The relative influence of body characteristics on humid heat stress response. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1995; 70: 270-9.
18. Skotzko CE. Symptom perception in CHF: (why mind matters). *Heart Fail Rev* 2009; 14: 29-34.
19. Kamiya A, Michikami D, Hayano J, et al. Heat stress modifies baroreflex function independently of heat-induced hypovolemia. *Jpn J Physiol* 2003; 53: 215-22.
20. Mousa TM, Liu D, Cornish KG, et al. Exercise training enhances baroreflex sensitivity by an angiotensin II-dependent mechanism in chronic heart failure. *J Appl Physiol* 2008; 104: 616-24.
21. Ryan KL, Taylor WF, Bishop VS. Arterial baroreflex modulation of heat-induced vasodilation in the rabbit ear. *J Appl Physiol* 1997; 83: 2091-7.
22. Charkoudian N. Skin blood flow in adult human thermoregulation: how it works, when it does not, and why. *Mayo Clin Proc* 2003; 78: 603-12.
23. Cui J, Arbab-Zadeh A, Prasad A, et al. Effects of heat stress on thermoregulatory responses in congestive heart failure patients. *Circulation* 2005; 112: 2286-92.
24. Nybo L, Nielsen B, Pedersen BK, et al. Interleukin-6 release from the human brain during prolonged exercise. *J Physiol* 2002; 542: 991-5.
25. Torre-Amione G. Immune activation in chronic heart failure. *Am J Cardiol* 2005; 95: 3C-8C.
26. Mack G, Nishiyasu T, Shi X. Baroreceptor modulation of cutaneous vasodilator and sudomotor responses to thermal stress in humans. *J Physiol* 1995; 483: 537-47.
27. Miyamoto H, Kai H, Nakaura H, et al. Safety and efficacy of repeated sauna bathing in patients with chronic systolic heart failure: a preliminary report. *J Card Fail* 2005; 11: 432-6.