



REDAKTOR DZIAŁU
dr n. med.
Sebastian Szmit,
I Katedra i Klinika
Kardiologii
Warszawski
Uniwersytet
Medyczny
oraz Klinika
Onkologii
Wojskowy Instytut
Medyczny
w Warszawie
e-mail: s.szmit@
gmail.com

Maksymalne pochłanianie tlenu warunkowane jest funkcją układu krążenia, układu oddechowego oraz pracą układu mięśniowego. Wysiłek trwający dłużej niż 30 minut charakteryzuje się intensywnością niższą od poziomu na progu mleczanowym. Dlatego VO_2 na tzw. progu beztlenowym (VO_{2AT}) najlepiej odzwierciedla rzeczywistą wydolność sportowca. Aerobowy (wytrzymałościowy) trening fizyczny doprowadza do zmniejszenia wysiłkowego stężenia mleczanów w osoczu, jednocześnie przesuwając próg beztlenowy w prawo, czyli odsuwa go w czasie. Artykuł przedstawia przypadek wybitnego wyczynowego sportowca, który prowadził intensywny półroczny trening zgodnie z wytycznymi uzyskanymi na podstawie wyniku ergospirometrii. Podczas ćwiczeń nie przekraczał progu beztlenowego, co skutkowało bardzo istotną poprawą wydolności aerobowej.

Sebastian Szmit

Trening a wydolność fizyczna organizmu – VO_{2maks} oraz VO_{2AT}

Paweł Balsam, Sebastian Szmit, Grzegorz Opolski

Adres:

I Katedra i Klinika Kardiologii, Warszawski Uniwersytet
Medyczny

Adres do korespondencji:

dr n. med. Sebastian Szmit
I Katedra i Klinika Kardiologii
Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego
oraz Klinika Onkologii Wojskowego Instytutu
Medycznego w Warszawie
e-mail: s.szmit@gmail.com

Wydolność fizyczna jest parametrem zmiennym, na który wpływ mogą mieć aktualny stan zdrowia, spożywane pokarmy, przyjmowane leki, ale w największym stopniu trening fizyczny. Parametrami, które mogą posłużyć do obiektywnej oceny aktualnego wytrenowania, są: VO_{2maks} , czyli maksymalne pochłanianie tlenu oraz VO_{2AT} – pochłanianie tlenu na progu beztlenowym.

Maksymalne pochłanianie tlenu (tzw. pułap tlenowy) może być uwarunkowany następującymi czynnikami:

- ze strony układu krążenia: pojemnością minutową serca, ciśnieniem krwi, zawartością hemoglobiny we krwi, powinowactwem hemoglobiny do tlenu;
- ze strony układu oddechowego: stosunkiem wentylacji do perfuzji, minutową wentylacją płuc;
- ze strony układu mięśniowego: przepływem krwi przez pracujące mięśnie oraz stopniem rozbudowania krążenia w obrębie mięśni poprzecznie prążkowanych;

- metabolizmem mięśni poprzecznie prążkowanych, zależnym od masy mięśni, liczby mitochondriów i aktywności enzymów oksydacyjnych.

Wartość VO_{2maks} wyrażana jest w ml/kg/min. U zdrowych osób waha się w zakresie 15-85 ml/kg/min. Wartości niższe obserwuje się głównie u osób z cechami niewydolności krążeniowo-oddechowej. Wartości powyżej 50 ml/kg/min dotyczą osób bardzo aktywnych fizycznie w codziennym życiu. Przekroczenie wartości 70 ml/kg/min jest zarezerwowane raczej dla profesjonalnych sportowców osiągających sukcesy międzynarodowe.

Wysiłek fizyczny, który wykorzystuje pełną moc przemian tlenowych (praca przy VO_{2maks}), może trwać maksymalnie 5-8 minut. Każdy dłuższy wysiłek wymaga ograniczenia jego nasilenia w celu wydłużenia pracy. Wysiłki trwające dłużej (powyżej 30 minut) charakteryzują się intensywnością niższą od poziomu na progu mleczanowym (LT). Dlatego też VO_2 na progu beztlenowym (VO_{2AT}) najlepiej odzwierciedla rzeczywistą wydolność sportowca. VO_{2maks} jest znacznie wyższy w grupie biegaczy krótko- i średniodystansowych niż w grupie maratończyków. To maratończycy jednak osiągają większą prędkość biegu na progu beztlenowym, dzięki czemu mogą pokonywać cały wysiłek, wykorzystując przemiany tlenowe.

Na podstawie zmian dotyczących stężenia kwasu mlekowego we krwi oraz zmian pH można wyróżnić następujące typy wysiłków [1]:

- Krótkotrwałe (maksymalne), których czas trwania przeważnie nie przekracza 60 s (bieg na krótkich dystansach – 100-200 m), a głównym źródłem energii są procesy beztlenowe, które polegają na rozpadzie fosfokreatyny oraz glikogenu mięśniowego. Pierwszym etapem jest rozpad fosfokreatyny do obojętnej kreatyny oraz fosforanów nieorganicznych. Po krótkim czasie następuje znaczna aktywacja glikolizy beztlenowej, której wynikiem jest

wzrost stężenia mleczanów oraz zakwaszenia środowiska wewnątrzkomórkowego. W opisanych warunkach dochodzi do wypływu mleczanów, fosforanów oraz jonów potasu z komórki. Skutkiem tego jest zakwaszenie osocza.

- Wysiłki średniodługie (15-30 minut) i krótkotrwałe przedłużone (1-15 minut), w trakcie których dochodzi do przekroczenia progu mleczanowego. Głównym substratem energetycznym w tych procesach są węglowodany. Ze względu na rozwijającą się kwasicę, następuje stopniowe zużywanie wodorowęglanów osoczowych. Stopień zakwaszenia zależy od intensywności wysiłku oraz dynamiki jej narastania.

- Wysiłki długotrwałe (wielogodzinne), podczas których zachodzą głównie procesy tlenowe. W większości przypadków nie dochodzi do zakwaszenia organizmu. Ograniczenie trwania wysiłku nie jest związane z ograniczonym dostępem tlenu. Czynnikiem ograniczającym czas trwania wysiłku może być liczba dostępnych substratów energetycznych.

Wytrzymałościowy trening fizyczny może wpływać na tempo rozwoju kwasicy podczas wysiłku. W wyniku odpowiednio zaplanowanego schematu ćwiczeń można doprowadzić do poprawy tolerancji wysiłków podprogowych oraz do wydłużenia czasu trwania przemian tlenowych. Wynika to najprawdopodobniej z poprawy czynności układu sercowo-naczyniowego oraz wzrostu przepływu krwi przez mięśnie. Wynikiem powyższych zmian jest zwiększenie dostępności tlenu w tkance mięśniowej.

Aerobowy (wytrzymałościowy) trening fizyczny doprowadza do zmniejszenia wysiłkowego stężenia mleczanów w osoczu, a jednocześnie przesuwając próg beztlenowy w prawo, czyli odsuwa go w czasie. Następuje to w wyniku zmniejszenia glikogenolizy oraz zmniejszenia uwalniania mleczanów. Jednocześnie obserwowany jest podwyższony wychwyty mleczanów przez narządy.

TABELA 1 Wyniki testu wysiłkowego wykonanego przed sesją treningową (listopad 2008 r.)

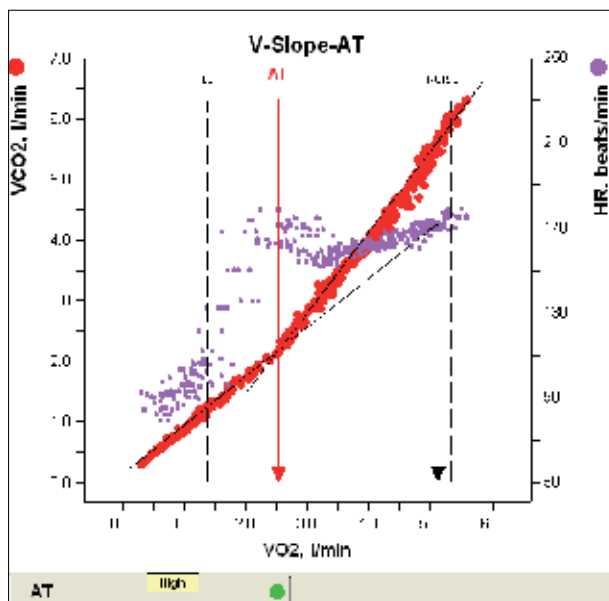
Parametr	Jednostka	Wynik	Wynik szacowany	% Wyniku szacowanego	Status
Czas	s	16:14	>6:00	–	–
Obciążenie	W	478	221	216	Wysoki
V_{CO_2}	l/min	6,0	3,9	154	Wysoki
VO_2	l/min	5,3	3,0	179	Wysoki
VO_2/kg	ml/(kg×min)	59,3	36,1	164	Wysoki
V_{AT}	ml/(kg×min)	32,1	18,6	172	Wysoki
V_{AT}/VO_2	%	54	50-70	90	Prawidłowy
RCP/ VO_2	%	96	80-90	113	Wysoki
RER	-	1,12	1,07-1,25	97	Prawidłowy
HR	Uderzenia/min	176	179	98	Prawidłowy
HRR	Uderzenia/min	3	<10	–	Prawidłowy
O_2 Pulse	100 ml/(uderzenie×kg)	33,8	19,0	178	Wysoki
Ciśnienie skurczowe	mm Hg	160	180-230	78	Niski
Ciśnienie rozkurczowe	mm Hg	100	70-90	125	Wysoki
VE	l/min	156	118	132	Wysoki
Vt	l	4,19	3,01	139	Wysoki
Bf	l/min	37	40	93	Prawidłowy
BR	l/min	51,2	>15,0	–	Prawidłowy

Opis przypadku

Odpowiednio zaplanowany trening może doprowadzić do znacznego wzrostu wydolności. Taką sytuację obserwowaliśmy u zawodowego kajakarza. Czterdziestojednoletni mężczyzna, wielokrotny mistrz Polski podjął decyzję o startach w zawodach w klasie Masters. Rozpoczął przygotowania w listopadzie 2008 r. Wykonał sercowo-płucny test wysiłkowy na urządzeniu ZAN 680 z wykorzystaniem protokołu SPORT z liniowym przyrostem obciążenia (tab. 1). W wyniku zwracały uwagę bardzo dobre wyjściowe parametry wydolności sercowo-płucnej: szczytowe pochłanianie tlenu VO_{2peak} 59,3 ml/kg/min, co stanowi 164% normy, natomiast pochłanianie tlenu na progu beztlenowym VO_{2AT} wynosiło 32,1 ml/kg/min, czyli 172% normy wyliczonej dla zdrowego mężczyzny w podobnym wieku (ryc. 1).

Kajakarz otrzymał zalecenia dotyczące treningu na granicy progu beztlenowego (ryc. 2). Dzięki indywidualnemu treningowi jest możliwe najbardziej optymalne wydłużenie procesów tlenowych (odsunięcie w czasie/przesunięcie w prawo momentu wystąpienia progu beztlenowego).

Sportowiec prowadził intensywny półroczny trening wspomagany rejestracją tętna za pomocą sportowego zegarka pomiarowego (ryc. 3, 4). Harmonogram treningów cechował się dużą częstotliwością i różnorodnością ćwiczeń. Kajakarz trenował według następującego schematu: bieg, siłownia – trening wytrzymałościowy, siłownia – trening ogólnorozwojowy, pływanie kajakiem, gra w ko-

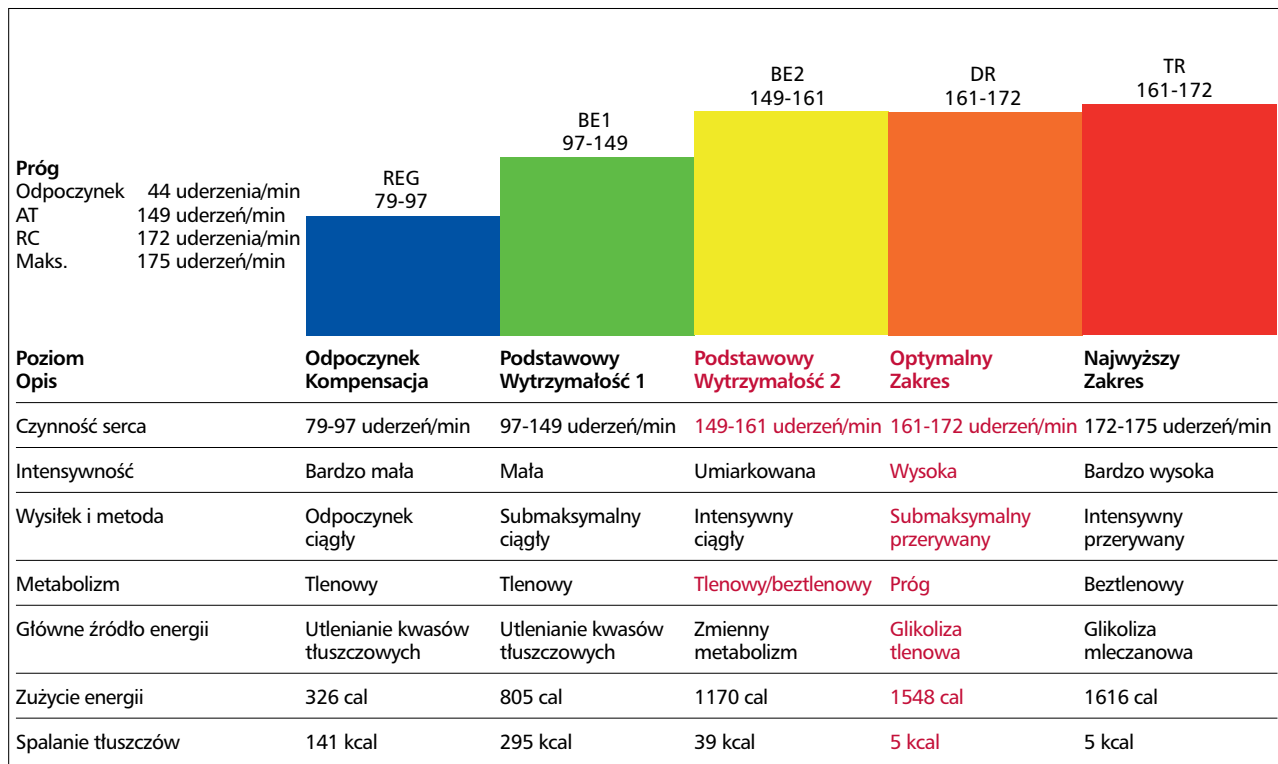


RYCINA 1

Metoda V_{slope} służąca do wyznaczania progu beztlenowego. Ocena progu beztlenowego w listopadzie 2008.

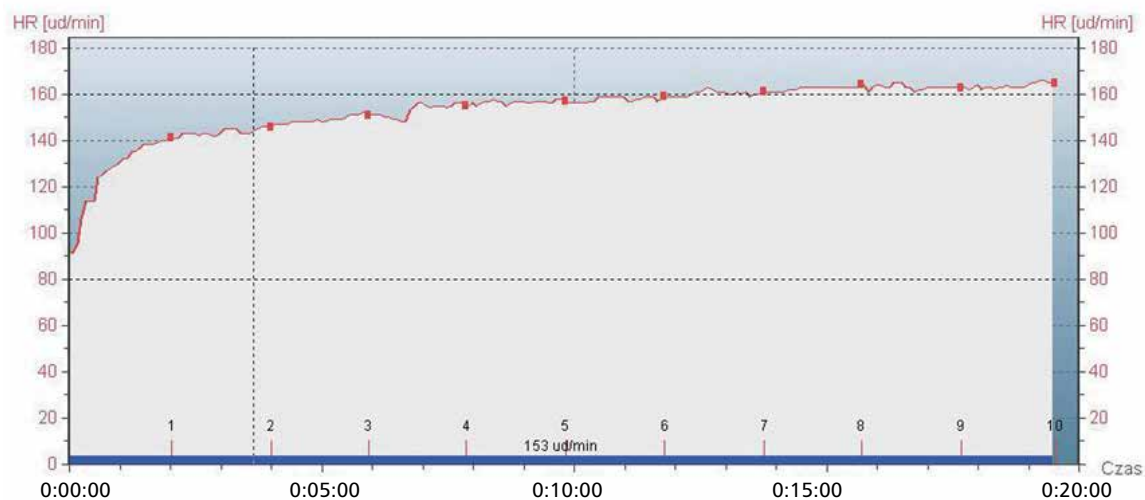
zykówkę. Celem było utrzymanie tętna na poziomie, w którym w przybliżeniu występował próg beztlenowy w trakcie ergospirometrii.

Kajakarz prowadził trening zgodnie z wytycznymi uzyskanymi na podstawie wyniku ergospirometrii. Pod-



RYCINA 2

Zalecenia dotyczące treningu na progu beztlenowym. Tętno w zakresie 149-161/min to wysiłek fizyczny wykonywany z wykorzystaniem przemian tlenowych i beztlenowych. Tętno do zakresu 97-149/min zapewnia najbardziej skuteczny trening pod względem przemian tlenowych. Tętno 172/min to wysiłek wyłącznie beztlenowy. Poniżej rytmowi serca przypisany poziom spalania tłuszczów i poziom wykorzystania energii w kcal.

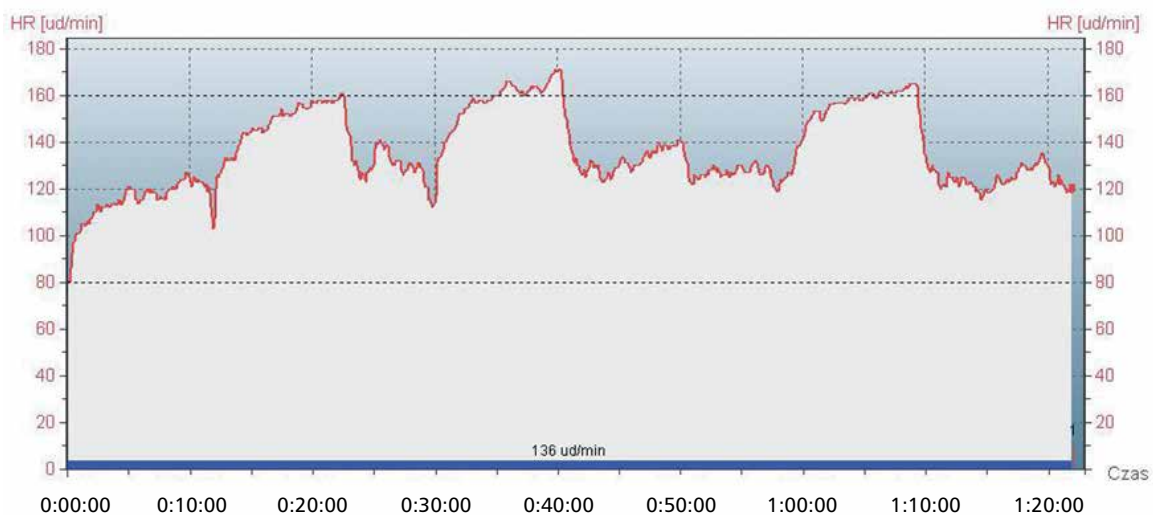


Wartość pod kursorem:
 Czas: 0:03:40
 HR: 144 uderzeń/min
 Wskaźnik kalorii: 1077 kcal/60 min

Dane sportowca		Data	2009-05-19	HR średnia	153 uderzeń/min	Limit 1	80-160
Ćwiczenie	2009-05-19 18:47	Godzina	18:47:10	HR maks	166 uderzeń/min	Limit 2	80-160
Dyscyplina	Bieg	Czas trwania	0:19:32,4			Limit 3	80-160
Adnotacja	ExeSet4			Zaznaczenie	0:00:00-0:19:30 (0:19:30,0)		

RYCINA 3

Zapis częstości rytmu serca podczas biegania. Maksymalne zarejestrowane tętno wynosiło 166/min, średnia częstość 153/min.



Wartość pod kursorem:
 Czas: 0:00:00
 HR: 81 uderzeń/min
 Wskaźnik kalorii: 0 kcal/60 min

Dane sportowca		Data	2009-04-13	HR średnia	136 uderzeń/min	Limit 1	80-160
Ćwiczenie	2009-04-13 16:23	Godzina	16:23:35	HR maks	171 uderzeń/min	Limit 2	80-160
Dyscyplina	Pływanie na kajaku	Czas trwania	1:22:04,4			Limit 3	80-160
Adnotacja	ExeSet4			Zaznaczenie	0:00:00-1:22:00 (0:22 00,0)		

RYCINA 4

Zapis częstości rytmu serca podczas pływania na kajaku. Maksymalne zarejestrowane tętno wynosiło 171/min, średnia częstość 136/min. Widoczne przyspieszenia pracy serca odpowiadają końcowym odcinkom przy dopływniu do mety odcinka.

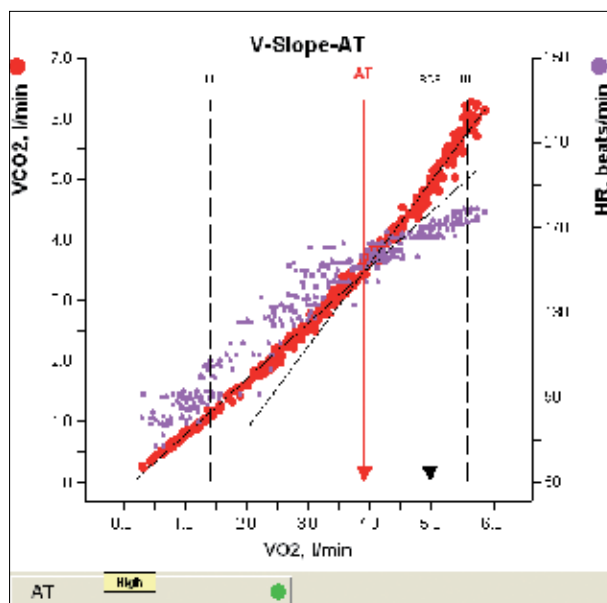
TABELA 2 Wynik sercowo-płucnego testu wysiłkowego wykonanego w maju 2009 r.

Parametr	Jednostka	Wynik	Wynik szacowany	% Wyniku szacowanego	Status
Czas	s	16:51	>6:00	–	–
Obciążenie	W	478	219	218	Wysoki
VCO ₂	l/min	6,0	3,9	155	Wysoki
VO ₂	l/min	5,6	3,0	189	Wysoki
VO ₂ /kg	ml/(kg×min)	62,1	35,8	173	Wysoki
V _{AT}	ml/(kg×min)	39,1	18,5	211	Wysoki
V _{AT} /VO ₂	%	66	50-70	109	Prawidłowy
RCP/VO ₂	%	89	80-90	105	Prawidłowy
RER	–	1,07	1,07-1,25	92	Niski
HR	Uderzenia/min	177	178	99	Prawidłowy
HRR	Uderzenia/min	1	<10	–	Prawidłowy
O ₂ Pulse	100ml/(uderzenie×kg)	35,0	18,9	185	Wysoki
Ciśnienie skurczowe	mm Hg	170	180-230	83	Niski
Ciśnienie rozkurczowe	mm Hg	80	70-90	100	Prawidłowy
VE	l/min	165	117	141	Wysoki
Vt	l	4,19	3,01	139	Wysoki
Bf	1/min	39	40	99	Prawidłowy

czas ćwiczeń nie przekraczał progu beztlenowego, co doprowadziło do znacznej poprawy wydolności aerobowej (tab. 2 – wyniki badania przeprowadzonego w maju 2009 roku). Odnotowano poprawę szczytowego pochłaniania tlenu: VO_{2peak} 62,1 ml/kg/min po rozpoczęciu intensywnych treningów vs VO_{2peak} 59,3 ml/kg/min przed treningiem prowadzonym zgodnie z wytycznymi uzyskanymi na podstawie wyniku ergospirometrii. Najbardziej spektakularna poprawa nastąpiła jednak w zakresie pochłaniania tlenu na progu beztlenowym. Po fazie treningowej VO_{2AT} wynosiło 39,1 ml/kg/min (211% normy), w porównaniu do VO_{2AT} 32,1 ml/kg/min rejestrowanym przed rozpoczęciem fazy treningowej (ryc. 5). Nastąpiło znaczne wydłużenie procesów tlenowych, przesunięcie progu beztlenowego w prawo (ryc. 6).

Omówienie

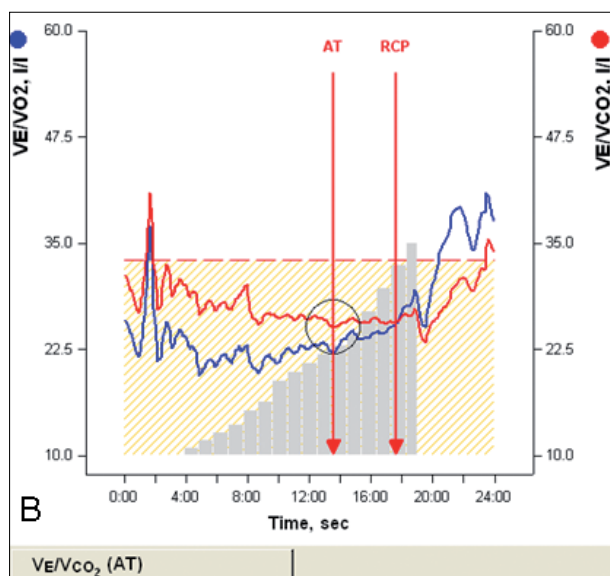
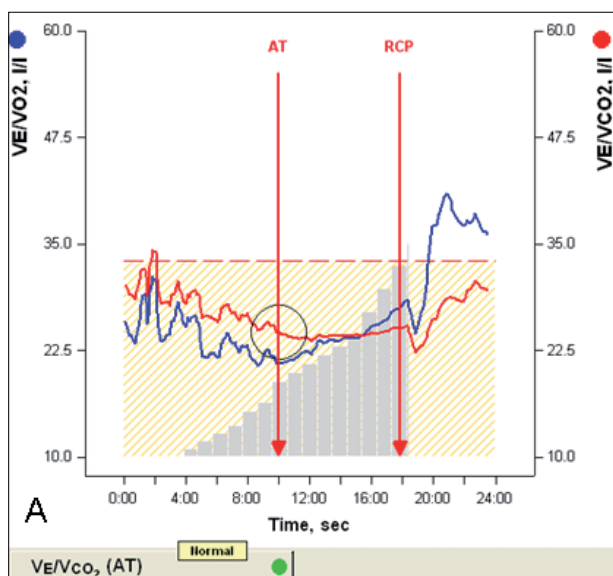
Nawet po krótkim treningu fizycznym szybko udaje zauważyć się większą zdolność pochłaniania tlenu, nawet na początku wysiłku [2]. Podczas wysiłków umiarkowanych lub trwających nie dłużej niż 3 minuty fakt ten można wytłumaczyć większą zdolnością fosforylacji oraz większą zdolnością pozyskiwania energii z reakcji przemian fosfokreatyny [3,4]. Pozostaje jednak pytanie, co gwarantuje dalszy wzrost zdolności pochłaniania tlenu podczas dłuższego treningu [5]. W pracy Phillipsa i wsp. [6] wykazano, że wzrost zdolności pochłaniania tlenu koreluje ze zmniejszeniem produkcji mleczanów oraz mniejszą koncentracją fosfokreatyny w mięśniach (PCr). Ponadto wartości mleczanów mierzone w trakcie wysiłku były wyższe niż w spoczynku ($p < 0,01$), chyba że sportowiec trenował dłużej niż 30 dni (ryc. 7). Odnotowywano istotne różnice w stężeniach mleczanów porównując wy-


RYCINA 5

Metoda V_{slope} wykorzystywana do wyznaczania progu beztlenowego (AT). Nastąpiło przesunięcie AT w prawo. Badanie przeprowadzone w maju 2009 r.

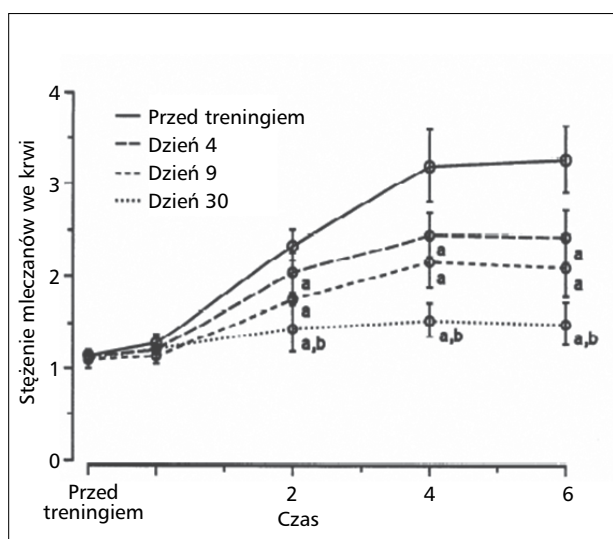
niki z badaniem sprzed fazy treningowej ($p < 0,01$) oraz między dniem 4 a 9 fazy treningowej ($p < 0,01$).

Mechanizm patofizjologiczny tych zmian nie jest dokładnie poznany. Postuluje się hipotezę, że zwiększony przepływ naczyniowy może powodować większe dostarczanie tlenu do mitochondriów mięśni obwodowych przy submaksymalnych wysiłkach [7-9]. Mechanizm korzystnych zmian funkcji błon mitochondrialnych wymaga dalszych badań naukowych. Wydaje się pewne, że wzrost zdolności pochłaniania tlenu jest związany ze spadkiem produkcji mleczanów podczas regularnego treningu



RYCINA 6

Przesunięcie w prawo wentylacyjnego progu beztlenowego wyznaczanego metodą VE/VO_2 przed fazą treningową (A) i po fazie treningowej (B). Istotny wzrost VE/VO_2 (linia niebieska) przy braku wzrostu VE/VCO_2 (linia czerwona) następuje istotnie później w czasie po zastosowaniu intensywnego treningu.



RYCINA 7

Wpływ treningu fizycznego na istotne zmiany stężenia mleczanów we krwi podczas wysiłku o wzrastającym obciążeniu. Wartości mleczanów mierzone podczas wysiłku były wyższe niż w spoczynku ($p < 0,01$), chyba że sportowiec trenował dłużej niż 30 dni. a – istotne różnice w porównaniu z badaniem przed fazą treningową ($p < 0,01$); b – istotne różnice między dniem 4 a 9 fazy treningowej ($p < 0,01$). Zmodyfikowana na podstawie Phillips i wsp.

[10,11], a wraz z czasem trwania treningu następują korzystne zmiany funkcji mitochondriów, wzrasta potencjał oksydacyjny aktywnych mięśni [12].

Podsumowanie

Medycyna i sport są nierozdzielnie ze sobą związane. Sercowo-płucny test wysiłkowy (ergospirometria) wykorzystywany w procesie kwalifikacji do transplantacji serca

w grupie pacjentów ze schyłkową niewydolnością serca, może również służyć profesjonalnym sportowcom światowej klasy. Odpowiednio zaplanowany indywidualny trening pozwoli znacznie poprawić wydolność organizmu, nie prowadząc do objawów przemęczenia metabolicznego mięśni. W przypadku opisanego sportowca najbardziej wymiernym sukcesem nawiązanej współpracy było zdobycie kolejnego tytułu mistrza Polski w maratonie kajakarskim w maju 2009 roku.

Piśmiennictwo:

- Górski J, et al.: Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2006, wyd. 2.
- Green HJ, Cadefau J, Cusso R, Ball-Burnett M, Jamieson G: Metabolic adaptations to short term training are expressed early in submaximal exercise. *Can J Physiol Pharmacol* 1995, 73: 474-482.
- Cadefau J, Green HJ, Cusso R, Ball-Burnett M, Jamieson G: Coupling of muscle phosphorylation potential to glycolysis during work after short-term training. *J Appl Physiol* 1994, 76: 2586-2593.
- Green HJ, Helyar R, Ball-Burnett M, Kowalchuk N, Symon S, Farrance B: Metabolic adaptations to training precede changes in muscle mitochondrial capacity. *J Appl Physiol* 1992, 72: 484-491.
- Green HJ, Jones S, Ball-Burnett ME, Smith D, Livesey J, Farrance BW: Early muscular and metabolic adaptations to prolonged exercise training in humans. *J Appl Physiol* 1991, 70: 2032-2038.
- Phillips SRI, Green HJ, MacDonald MJ, Hughson RL: Progressive effect of endurance training on VO_2 kinetics at the onset of submaximal exercise. *J Appl Physiol* 1995, 79 (6): 1914-1920.
- Cochrane JE, Hughson RL: Computer simulation of O_2 transport and utilization mechanisms at the onset of exercise. *J Appl Physiol* 1992, 73: 2382-2388.