POLISH HYPERBARIC RESEARCH 3(60)2017
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

WPŁYW EKSPOZYCJI HIPERBARYCZNEJ NA NATYCHMIASTOWĄ I ODROCZONĄ ZMIANĘ WARTOŚCI TEMPERATURY GŁĘBOKIEJ I JEJ OKOŁODOBOWYCH ZMIAN

Sławomir Kujawski[1)], Joanna Słomko[1)], Monika Zawadka-Kunikowska[1)], Mariusz Kozakiewicz[2)], Jacek J. Klawe[1)], Małgorzata Tafil-Klawe[3)], Paweł Zalewski[1)]

[1)] Katedra Higieny, Epidemiologii i Ergonomii, Wydział Nauk o Zdrowiu, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy
[2)] Katedra i Zakład Chemii Środków Spożywczych, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
[3)] Katedra Fizjologi, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

STRESZCZENIE

Reakcja na nurkowanie może objawić się zmianą wartości temperatury głębokiej, spowodowaną wieloukładową odpowiedzią ze strony organizmu na zmianę środowiska zewnętrznego. W odpowiedzi na wielokrotnie powtarzane może dojść do chronicznej, fizjologicznej adaptacji reagowania układów organizmu na niniejszą zmianę. Obserwuje się to między innymi w funkcjach organizmu doświadczonych nurków podczas nurkowania. Celem niniejszego badania jest określenie wpływu ekspozycji hiperbarycznej na natychmiastową i odroczoną zmianę wartości temperatury głębokiej jak i jej okołodobowych zmian w grupie trzech doświadczonych nurków. Podczas kompresji na 30 oraz na 60 metrów wartości temperatury głębokiej ciała wykazywały tendencję do wzrostu. Następnie, wartości temperatury głębokiej ciała u nurków poddawanych dekompresji wykazywały tendencję do obniżania się. Wszystkie różnice w wartości temperatury głębokiej uzyskanej przez grupę nurków w poszczególnych punktach czasowych w niniejszym badaniu były nieistotne statystycznie.
Słowa kluczowe: nurkowanie, temperatura głęboka ciała.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2017 Vol. 60 Issue 3 pp. 37 - 48
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.1515/phr-2017-00013
Strony: 12, rysunki: 5, tabele: 3
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 13.12.2016r.
Termin zatwierdzenia do druku: 03.04.2017r.

WSTĘP

Homeostatyczna regulacja poziomu temperatury głębokiej ciała jest jednym z kluczowych mechanizmów niezbędnych do przeżycia. Jednakże, pojęcie poziomu temperatury wymaga precyzyjnego określenia miejsca pomiaru [1]. Przykładowo, zakres temperatury mierzonej w tym samym czasie w jamie ustnej wynosił 33.2–38.2 C, odbytniczy: 34.4–37.8 C, a wartość uzyskana z pomiaru powiecrzchniowego; w dole pachowym: 35.5–37.0 C [2].

Jedną z metod mierzenia temperatury głębokiej ciała jest zastosowanie systemu telemetrii bezprzewodowej, w którym pomiar odbywa się na podstawie sygnału z połykanego czujnika. Co ciekawe, najczęściej wykorzystywaną metodą pomiaru w badaniach dotyczących wysiłku fizycznego jest metoda odbytnicza, aczkolwiek wskaźnik ten zmienia się z opóźnieniem do zmian w intensywności wysiłku czy temperatury krwi centralnej, dlatego ten rodzaj pomiaru jest uznawany za adekwatny jedynie w stanie spoczynku [1,3].

Interestujący jest pomiar temperatury głębokiej ciała podczas nurkowania. Zmiany wartości tego parametru podczas nurkowania mogą wynikać pośrednio ze skutków działania mechanizmów, które przyczyniają się do oszczędzania zapasów tlenu u nurkujących ludzi. Zarówno intensywny skurcz obwodowych i trzewnych łożysk włośniczkowych oraz jak i zmniejszenie zużycia tlenu prowadzi do oszczędzania tlenu dla organów priorytetowych, takich jak mózg czy serce [4]. Zwiększony przepływ krwi w tętnicy szyjnej jest zgodny z interpretacją, że strumień krwi jest przekierowywany z krążenia obwodowego do krążenia mózgowego [5].

W odpowiedzi na wielokrotnie powtarzane zmiany środowiska zewnętrznego może dojść do chronicznej, fizjologicznej adaptacji reagowania organizmu na niniejszą zmianę. Na przykładzie wykazano, że osoby, które miały doświadczenie 7-10 letnie w nurkowaniu, podczas wstrzymania oddechu miały obniżony poziom zakwaszenia krwi i stresu oksydacyjnego w odpowiedzi na nurkowanie [6]. Co ciekawe, reakcja na nurkowanie nie będzie taka sama, kiedy nie dojdzie do wstrzymania oddechu podczas tej czynności [7].

Celem niniejszego badania jest określenie wpływu ekspozycji na warunki hiperbaryczne na natychmiastową i odroczoną zmianę wartości temperatury głębokiej i jej okołodobowych zmian w grupie trzech doświadczonych nurków.

MATERIAŁ I METODY

W badaniu udział wzięło trzech mężczyzn, doświadczonych w nurkowaniu (zakres stażu 2-9 lat). Dane antropometryczne dotyczące uczestników badania przedstawione są w tabeli nr 1. Podczas pierwszej doby protokołu badani dwukrotnie zostali wystawieni na ekspozycję w komorze hiperbarycznej. W tabeli nr 2 przedstawiona jest oś czasu przedstawiająca przebieg badania. Pierwsza doba zawierała dwie ekspozycje na hiperbarię. Pierwsza ekspozycja trwała od godziny 12 do 13. Ochotnicy zostali umieszczeni w komorze hiperbarycznej i sprężeni do ciśnienia 400kPa. Plateau ekspozycji wynosiło ok. 30 minut po czym nastąpiła stopniowa dekompresja, po ekspozycji na 400 kPa (0,4 M Pa – 0,3 M Pa + 0 ,1 M Pa ciśnienie atmosferyczne), stosowano dekompresję jak po nurkowaniu na głębokości 33 metrów, co równe jest ciśnieniu 440 kPa. W komorze hiperbarycznej w trakcie interwencji jako mieszaninę oddechową wykorzystano powietrze [8].

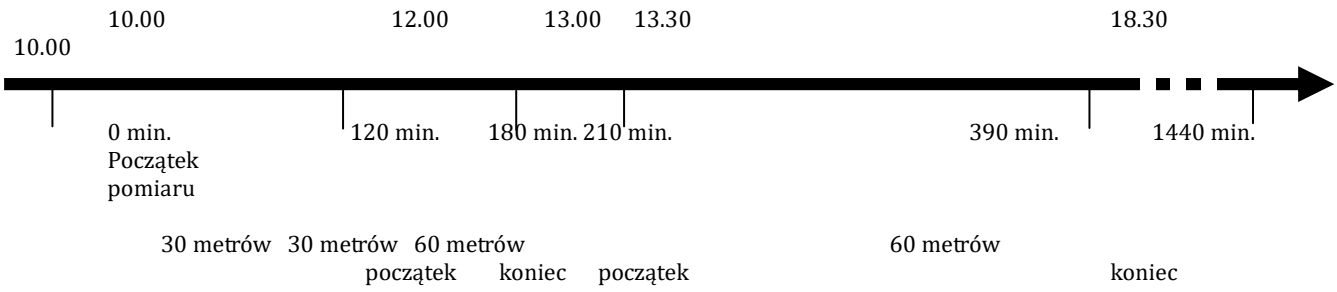
W trakcie drugiej ekspozycji na głębokość 60 metrów, całość trwała od 13.30 do 18.30, czas dekompresji wynosił 4 godziny.

Tab. 1

Opis pacjentów.

i.d.	**wiek**	**wysokość ciała**	**masa ciała**	**BMI**	**staż nurkowy**
DIVE_001	29	1,90	92	25,48	4
DIVE_002	29	1,80	72	22,22	9
DIVE_003	31	1,78	75	23,67	2

Doba I. Dzień ekspozycji na hiperbarię.



Doba II Dzień kontrolny

Rys. 1 Linia czasu opisująca interwencję.

Do pomiaru temperatury głębokiej ciała użyty został System Vital Sense autorstwa firmy Mini Mitter, obecnie Philips Respironics (Vital Sense, Mini Mitter Co. Inc., Bend Oregon, USA), który jest atestowanym urządzeniem wykorzystywanym do zdalnego pomiaru wewnętrznej i zewnętrznej temperatury ciała. System ten złożony jest z dwóch składników: mobilnego monitora, który służy do nagrywania, przechowywania i eksportu danych cyfrowych zmierzonych wartości temperatury oraz ze zdalnej kapsuły - Core Body Temperature Capsule (CBTC). CBTC transmituje zmierzone podstawowe wartości temperatury ciała w postaci sygnału radiowego. Badana osoba połyka kapsułkę, popijając małą ilością ciepłej wody.

Po około jednej minucie urządzenie jest w stanie dokonać pierwszego pomiaru temperatury głębokiej ciała, emitując sygnały radiowe w 15 sekundowych interwałach, średnia wartość z czterech następujących po sobie pomiarów zapisywana jest w pamięci monitora. Zdalna kapsułka jest odporna na działanie enzymów trawiennych i jest wydalana z organizmu pacjenta bez skutków ubocznych lub wpływu na funkcje układu trawiennego pacjenta [9,10]. Do zalet tej metody należą: możliwość uzyskania ciągłego pomiaru głębokiej temperatury ciała, możliwość odnotowania dynamicznych zmian w poziomie głębokiej temperatury ciała występujących w rytmie około-dobowym oraz powtarzalność i wiarygodność otrzymanych wyników [11]. Podczas pierwszej doby, kilkanaście minut przed godziną 10.00, uczestnicy połknęli kapsułki. Gdy zachodziła taka potrzeba, badanym podawana była kolejna kapsułka, tak aby utrzymać ciągłość pomiaru. Braki danych uzupełniano wartościami średnimi z ostatnich 3 pomiarów.

Do analizy wyników użyto zmodyfikowany rytmometr Cosinor. Użyty algorytm jest oparty na metodzie najmniejszych kwadratów, aby dopasować falę sinusoidalną do szeregu czasowego, następnie wykonywana jest nieparametryczna analiza stopnia obarczenia odkrycia błędem typu I poprzez losowe tasowanie wartości szeregu czasowego pochodzących z danych źródłowych, aby następnie ponownie ocenić dopasowanie krzywej cosinor. Poprzez metodę iteratywną (symulację Monte-Carlo) możliwe jest określenie stopnia prawdopodobieństwa statystycznego obarczenia odkrycia błędem typu I. Dopasowanie krzywej cosinor zostało dokonane zgodnie z metodą analizy cosinor serii czasowej, tak jak opisano to przez Nelson i in. [12]. Zastosowany algorytm jest zmodyfikowaną wersją przedstawionego przez Storch i innych [13], udostępniony dzięki uprzejmości Ian David Blum [14].

Zastosowanie tego typu modelowania danych ułatwia ich interpretację przez przedstawienie kilku kluczowych parametrów okołodobowego rytmu wartości poziomu temperatury głębokiej. Następujące parametry mogą zostać wyliczone za pomocą użytej metody:

M – MESOR, (Midline Statistic Of Rhythm, a rhythm-adjusted mean) średnia wartość cyklu,

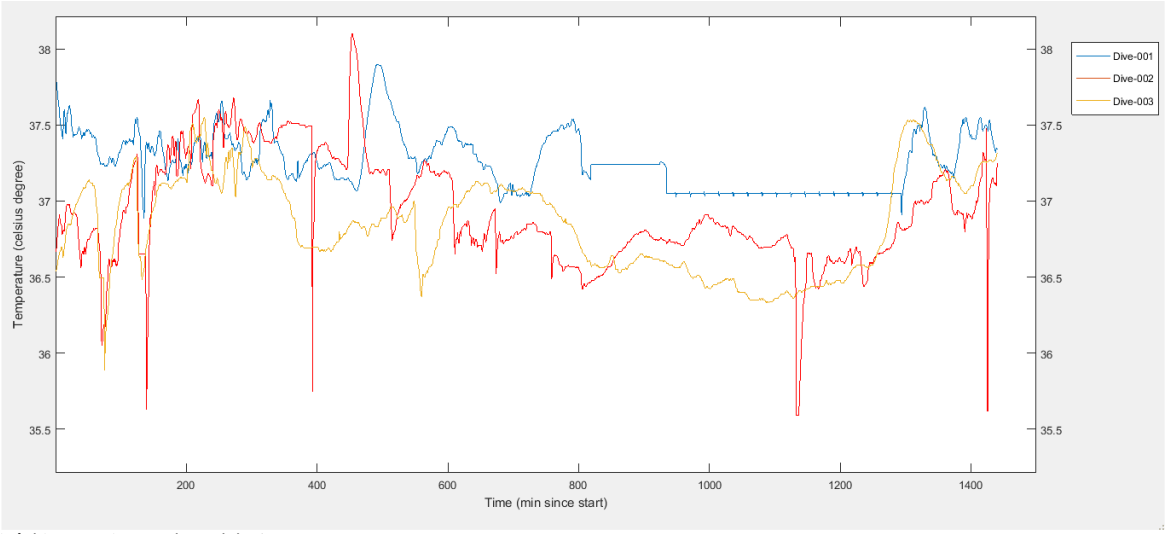
Amp – amplituda, połowa odległości między szczytami krzywej dopasowania,

Phi – Akrofaza, punkt czasowy cyklu, charakteryzujący się najwyższą amplitudą (wyrażone w radianach)RSS – resztowa suma kwadratów, mierzona odchyleniem krzywej dopasowania od pierwotnego kształtu fali.

Do analizy danych użyto pakietu statystycznego STATISTICA 13.1 (StatSoft, Tulsa, OK) oraz MATLAB **(**MATLAB and Statistics Toolbox Release 2007a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States). Porównanie wyników uzyskanych w I i II dobie dokonano testem kolejności par Wilcoxona.

WYNIKI

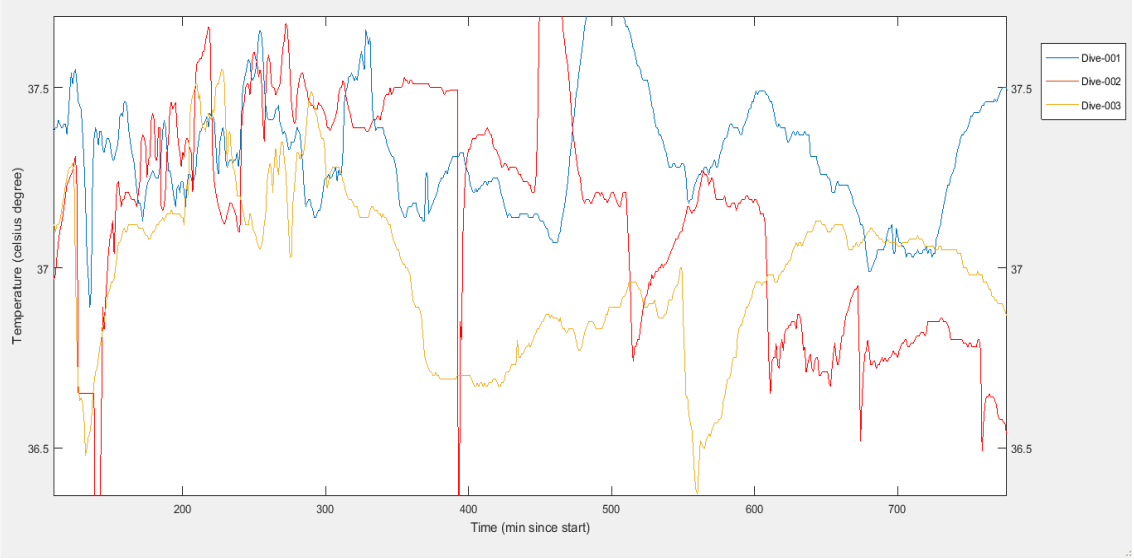
Rys. 2 przedstawia wartość temperatury głębokiej z I doby, w trakcie której doszło do dwóch ekspozycji na hiperbarię. Łączny czas pomiaru przedstawiony na wykresie wynosił 1440 minut. Uczestnik nr 1 charakteryzował się najwyższą średnią wartością temperatury okołodobowej.



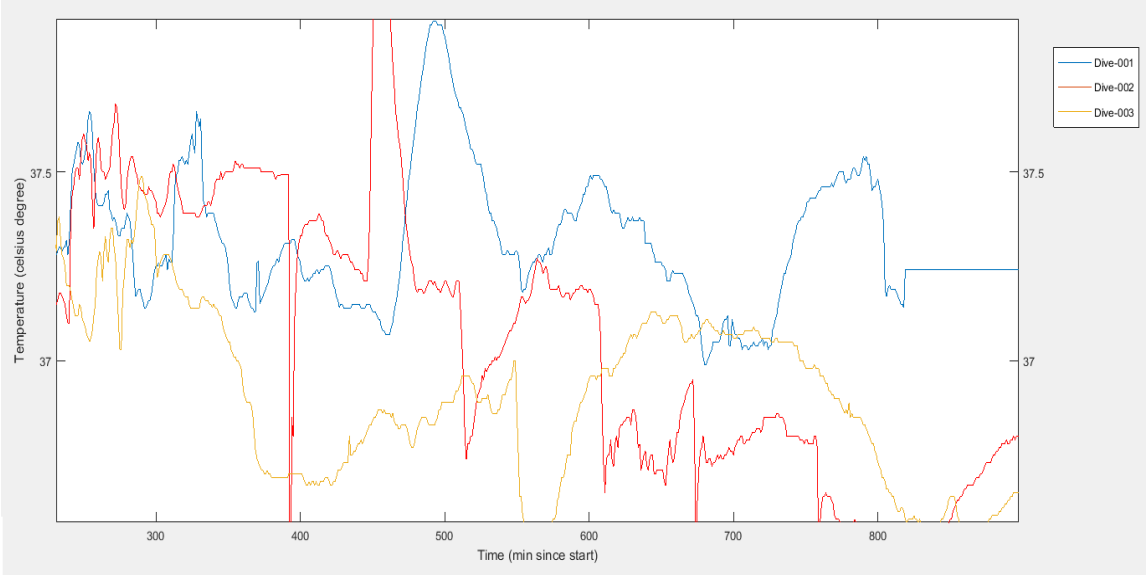
Rys. 2 Wartości temperatury w ciągu dnia 1.

Rys. 3 przedstawia czas w którym poddano uczestników doświadczenia ekspozycji hiperbarycznej – 30 metrów. Widoczny jest niewielki wzrost temperatury głębokiej ciała w pierwszych minutach ekspozycji u wszystkich trzech uczestników, następnie wartość się znacznie obniżyła. Najniższe wartości temperatury głębokiej przypadały pomiędzy 11 a 18 minutą ekspozycji hiperbarycznej. Następnie, wartości temperatury wzrastały, od osiągnięcia najniższej wartości do końca ekspozycji charakteryzowały się dużą zmiennością.

Rys. 4 pokazuje zmiany wartości temperatury głębokiej podczas ekspozycji hiperbarycznej na 60 metrów. Zmiany wartości temperatury zachodziły wolniej, niż w przypadku ekspozycji na 30 metrów.

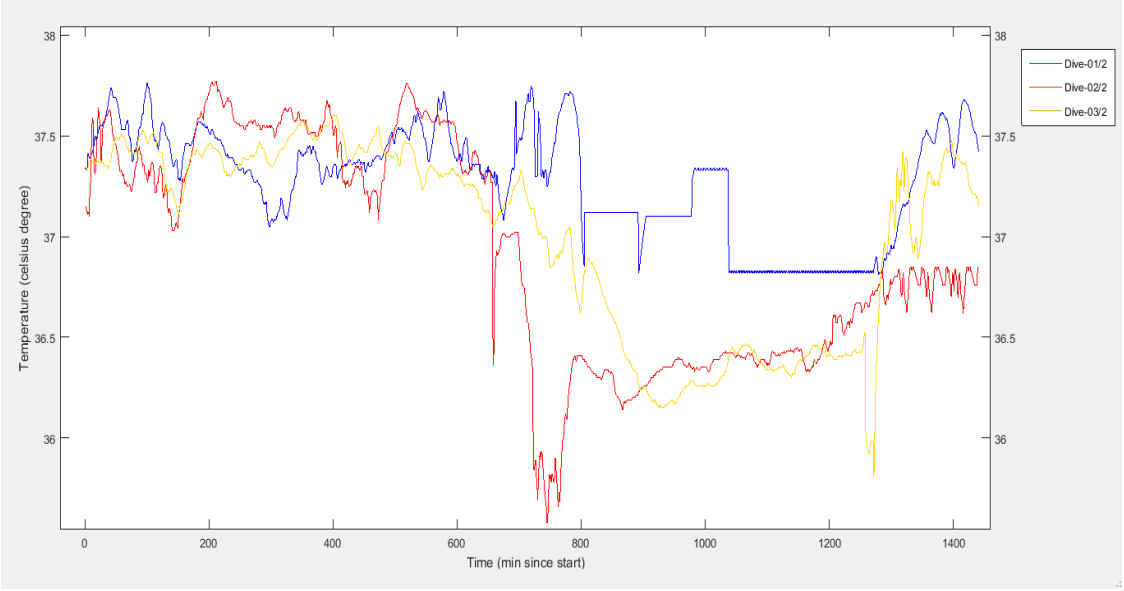


Rys. 3 Dzień I czas hiperbarii 30 metrów.



Rys. 4 Dzień I czas hiperbarii 60 metrów.

Rys. 5 ukazuje zmiany temperatury głębokiej podczas drugiej doby. W tym czasie uczestnicy nie byli poddani żadnej interwencji. W porównaniu do Rys. 2, Rys. 4. pokazuje wyraźniejszą różnicę pomiędzy średnimi wartościami temperatury głębokiej ciała uczestników podczas drugiej części doby (godzina 10.00 wieczorem do 10.00 rano, co przypada na minuty pomiaru: 720-1440): wartości te były niższe u wszystkich trzech uczestników, niż podczas pierwszej części doby.



Rys. 5 Wartości temperatury w czasie drugiego dnia.

Tabela nr 2. przedstawia wartości pochodzące z analizy metodą cosinor poszczególnych uczestników z pierwszej doby, w trakcie której dokonano ekspozycji hiperbarycznej oraz z drugiej doby. Test kolejności par Wilcoxona wykazał, że wartości te nie różniły istotnie statystycznie ($p > 0,05$) u uczestników badania między pierwszą a drugą dobą.

Tab. 2

Wyniki analizy cosinor dla poszczególnych pacjentów.

	Dive_01	Dive_02	Dive_03	Dive_01/2	Dive_02/2	Dive_03/2
M	37.26	36.93	36.85	37.27	36.92	36.99
Amp	0.13	0.35	0.26	0.23	0.68	0.61
phi	-1.42	-1.43	-1.08	-1.61	-1.28	-1.35
RSS	36.29	89.11	97.32	64.07	88.84	57.40

Tabela nr. 3 przedstawia wartości pochodzące z analizy metodą Cosinor dla całej grupy (n = 3) badanych. Wartości pomiaru temperatury głębokiej charakteryzowały się wyższą średnią wartością cyklu podczas II doby, podczas której uczestników nie poddano żadnym interwencjom. Wartości amplitudy jak i resztkowej sumy kwadratów były niższe podczas II doby. Wartość akrofazy wskazuje, że przedział czasowy w którym zanotowano najwyższe wartości temperatury różnił się między I a II dobą, natomiast nie były to różnice istotne statystycznie ($p > 0,05$).

Tab. 3

Wyniki analizy cosinor dla całej grupy.

zmienna	I doba	II doba
MESOR	37.2612	37.2729
Amplituda	0.139085	0.234665
Akrofaza	-1.42005	-1.6121
RSS	36.2916	64.075

Tabela nr 4. ukazuje wartości temperatury głębokiej pojedynczych uczestników: wartości maksymalną i minimalną uzyskaną oraz wartość średnią w poszczególnym punktach czasowych w trakcie I doby. Jak widać, taka metoda nie ukazuje pełni dynamiki zmian mierzonej wartości: wyłącznie w przypadku pierwszego pacjenta najniższa wartość wystąpiła podczas ekspozycji hiperbarycznej (14 minuta zejścia na 30 metrów), ponadto, w przypadku efektów pierwszej ekspozycji nie widać początkowego, nieznacznego wzrostu temperatury. Wyniki ukazują, że 15 minut po wejściu do komory wartość temperatury głębokiej obniżyła się u wszystkich uczestników, najbardziej u uczestnika nr. 2. Wartość maksymalna u uczestnika nr. 1 wystąpiła o godzinie 18.11, u uczestnika nr 2 o godzinie 17.36, zaś u uczestnika nr. 3 o godzinie 13.46.

Tab. 4

Wyniki pomiarów temperatury głębokiej w wybranych punktach czasowych podczas I doby.

	min	max	12.00	12.15	13.00	13.30	14.30-15.00	16.30	17.30	18.30	19.00
Dive_01	36,89	37,9	37,37	36,89	37,26	37,49	37,05	37,35	37,37	37,54	37,28
Dive_02	35,59	38,1	37,26	33,88	37,39	37,58	37,38	37,31	38,09	36,95	37,06
Dive_03	35,81	37,55	37,28	36,48	37,11	37,47	37,03	36,69	36,85	36,94	36,91
Średnia	36,09	37,85	37,30	35,75	37,25	37,51	37,15	37,12	37,44	37,14	37,08

DYSKUSJA

Zbyt wiele badań nadal polega na braniu pod uwagę podczas analizy wyłącznie wartości z jednej, ustalonej pory doby lub z dwóch poszczególnych punktów czasowych oddalonych od siebie na linii czasu o 12 godzin [15]. Taka metoda może nie oddać w pełni dynamiki zmian mierzonego parametru w ciągu cyklu okołodobowego, zwłaszcza jeżeli jest to pomiar ciągły, charakteryzujący się dużą gęstością czasową oraz gdy dwa brane pod uwagę podczas analizy punkty czasowe zostaną wyznaczone w momentach, w których uzyskana krzywa zmierzała do osiągnięcia swojego minimum lub maksimum [15].

Brak pomiaru subiektywnie odczuwanej temperatury należy zaliczyć do ograniczeń niniejszego badania. U uczestników badania zmiana temperatury otoczenia doprowadziła w pierwszej kolejności do zmiany subiektywnego odczucia temperatury a dopiero później do zmiany poziomu temperatury mierzonej na powierzchni skóry [16]. Warto byłoby zbadać przebieg zmian subiektywnie odczuwanej i głębokiej temperatury podczas ekspozycji na hiperbarię u nurków.

Wartości temperatury głębokiej u nurków poddanych ekspozycji hiperbarycznej na 30 i 60 metrów zmieniały się na wzór temperatur gazów poddanych kompresji i ekspansji adiabatycznej: podczas kompresji wartość temperatury gazu (w przypadku niniejszego badania było to powietrze) wzrasta, natomiast przy adiabatycznej ekspansji wartość temperatury obniża się [17].

Podczas ekspozycji na 60 metrów duży powrót żylny krwi wyciśniętej z naczyń skórnych, charakteryzującej się niższą temperaturą, w konsekwencji prowadzi do obniżenia temperatury głębokiej.

Czemu podczas ekspozycji na 30 metrów nastąpił tak szybki spadek temperatury? Czemu na 60 metrów wyglądało to inaczej? Czy wiązało się to z szybkością stopnia kompresji czy z czymś innym? Czemu w pierwszej fazie kompresji na 30 metrów nastąpił nagły wzrost temperatury, a później spadek?

WNIOSKI

Wszystkie różnice w odnotowanych wartościach temperatury głębokiej uzyskanej przez grupę nurków (n=3) w poszczególnych punktach czasowych w niniejszym badaniu były nieistotne statystycznie. Podczas kompresji zarówno na 30 oraz na 60 metrów wartości temperatury głębokiej ciała wykazywały tendencję do wzrostu. Następnie, wartości temperatury głębokiej ciała u nurków poddawanych dekompresji wykazywały tendencję do obniżania się. W przypadku ekspozycji hiperbarycznej na głębokość 60 metrów wartości temperatury głębokiej ciała zmieniały się łagodniej, niż to miało

miejsce w przypadku ekspozycji na 30 metrów. Co więcej, szybkość kompresji i dekompresji w przypadku ekspozycji hiperbarycznej na głębokość 60 metrów również była niższa niż w przypadku ekspozycji na głębokość 30 metrów.

BIBLIOGRAFIA

1. Brengelmann GL. Dilemma of body temperature measurement. Man in Stressful Environments, Shiraki K, Yousef MK. Springfield, IL: CC Thomas Publishers. 1987 5-22;
2. Sund-Levander M, Forsberg C, Wahren LK. Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review. Scand J Caring Sci. 2002 Jun;16(2):122-8;
3. Blatteis CM. Methods of body temperature measurement. Physiology and pathophysiology of temperature regulation. River Edge, NJ: World Scientific Publishing. 1998 273-9;
4. Elsner R, Gooden B. Diving and asphyxia. A comparative study of animals and man. Monogr Physiol Soc. 1983;40:1-168;
5. Pan AW, He J, Kinouchi Y, Yamaguchi H., Miyamoto H. Blood flow in the carotid artery during breath-holding in relation to diving bradycardia. Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1997;75(5):388-95. DOI:10.1007/s004210050177;
6. Joulia F, Steinberg JG, Wolff F, Gavarry O, Jammes Y. Reduced oxidative stress and blood lactic acidosis in trained breath-hold human divers. Respir Physiol Neurobiol. 2002 Oct 23;133(1-2):121-30;
7. Andersson J, Schagatay E, Gislén A, Holm B. Cardiovascular responses to cold-water immersions of the forearm and face, and their relationship to apnoea Respir Physiol Neurobiol. 2002 Oct 23;133(1-2):121-30;
8. Słomko J, Kozakiewicz M, Klawe JJ, Tafil-Klawe M, Siermontowski P, Zalewski P. Circadian Rhythm of Core Body Temperature (Part II): Hyperbaric Environment Influence on Circadian Rhythm of Core Body Temperature. Polish Hyperbaric Research. 2016 Dec 1;57(4):19-25. DOI: 10.1515/phr-2016-0022;
9. McKenzie JE, Osgood DW. Validation of a new telemetric core temperature monitor. J Therm Biol. 2004, 29(7), 605-611;
10. Zalewski P, Klawe JJ, Buszko K, Tafil-Klawe M, Łukowicz M. Daily measurement of internal and external body temperature with the use of VitalSense system. Acta Bio-Optica et Informatica Medica, 2008, *2*, 14;
11. Byrne C, Lim CL. The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications. Br J Sports Med. 2007 Mar;41(3):126-33. Epub 2006 Dec 18. DOI:10.1136/bjsm.2006.026344;
12. Nelson W, Tong YL, Lee JK, Halberg F. Methods for cosinor-rhythmometry. Chronobiologia, 1979, 6(4), 305;
13. Storch KF, Paz C, Signorovitch J, Raviola E, Pawlyk B, Li T, Weitz CJ. Intrinsic circadian clock of the mammalian retina: importance for retinal processing of visual information. Cell, 2007, 130(4), 730-741;
14. Ian David Blum. Cosinor-FDR. https://github.com/storchlab, 2014;
15. Cornelissen G. Cosinor-based rhythmometry. Theor Biol Med Model. 2014 Apr 11;11:16. doi: 10.1186/1742-4682-11-16. doi: 10.1186/1742-4682-11-16;
16. Xiong J, Lian Z, Zhou, X, You J, Lin Y. Effects of temperature steps on human health and thermal comfort. Building and Environment, 2015, 94, 144-154;
17. Moran MJ. Engineering thermodynamics. In The CRC Handbook of Mechanical Engineering, Second Edition. 2004, CRC Press, 271.

dr hab. n. o zdr. dr n. med. Paweł Zalewski
Katedra Higieny, Epidemiologii i Ergonomii,
Wydział Nauk o Zdrowiu, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy
ul. M. Curie Skłodowskiej 9
85-094 Bydgoszcz
p.zalewski@cm.umk.pl