

**EFFECTS OF HYPERBARIC EXPOSURE ON THE CARDIOVASCULAR SYSTEM. ROLE OF THE
AUTONOMOUS NERVOUS SYSTEM**

**WPLYW EKSPOZYCJI HIPERBARYCZNEJ NA UKŁAD SERCOWO - NĄCZYNIOWY.
ROLA AUTONOMICZNEGO UKŁADU NERWOWEGO**

**ВЛИЯНИЕ ГИПЕРБАРИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ НА СЕРДЕЧНОСОСУДИСТУЮ
СИСТЕМУ. РОЛЬ АВТОНОМНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ**

**EINFLUSS DER HYPERBAREN EXPOSITION AUF DAS HERZGEFÄßSYSTEM. ROLLE DES
AUTONOMEN NERVENSYSTEM**

**EFFECTOS DE LA EXPOSICIÓN HIPERBÁRICA SOBRE EL SISTEMA CARDIO VASCULAR. EL PAPEL DEL
SISTEMA NERVISIO AUTÓNOMO**

Sławomir Kujawski¹⁾, Joanna Słomko¹⁾, Monika Zawadka-Kunikowska¹⁾, Mariusz Kozakiewicz²⁾,
Jacek J. Klawe¹⁾, Małgorzata Tafil-Klawe³⁾, Paweł Zalewski¹⁾

¹⁾ Faculty of Hygiene, Epidemiology and Ergonomics, Department of Health Sciences, Nicolaus Copernicus Collegium Medicum, Bydgoszcz, Poland

¹⁾ Katedra Higieny, Epidemiologii i Ergonomii, Wydział Nauk o Zdrowiu, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy

²⁾ Department and Institute of Food Chemistry University of Nicolaus Copernicus Collegium Medicum in Bydgoszcz, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland

²⁾ Katedra i Zakład Chemii Środków Spożywczych, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

³⁾ Department of Physiology, Collegium Medicum in Bydgoszcz, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland

³⁾ Katedra Fizjologii, Collegium Medicum UMK w Bydgoszczy, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

ABSTRACT

Introduction

Among experienced divers, dive adaptation is seen as a modified pattern of physiological changes. This is reflected, inter alia, in the change in cardiovascular responses, therefore there is need to examine the role of the autonomic nervous system in cardiovascular response modulation after hyperbaric exposure.

Material and methods

Ten experienced divers took part in the study. The effects of hyperbaric exposure at 30 and 60 meters and interaction (depth x time) were measured. Changes in HR, RRI, CI and HRV values have been taken into analysis.

Results

Hyperbaric exposure at 30 meters significantly affected HFnu-RRI elevation and decrease of LFnu-RRI ($F = 42.92$, $p < 0.00001$), without significant affecting the HR, RRI and CI. Exposure to hyperbaric 60 m increased HR and CI ($F = 7.64$, $p = 0.01$ and $F = 4.89$, $p = 0.04$ respectively) and RRI ($F = 7.69$, $p = 0.01$), without significant impact on other variables. The influence of interaction (depth x time) was significant in all measured variables.

Conclusions

The results indicate that hyperbaric exposure at 60 meters affected HR, RRI, CI parameters, that were not significantly affected by hyperbaric exposure at 30 meters. On the other hand, the exposure at 30 meters showed a significant effect on the LFnu and HFnu HRV, which were not significantly affected by the exposure at 60 meters. Significant effect of time and depth interaction in each of the analyzed variables was observed.

Keywords: autonomic nervous system, hyperbaric chamber, diving.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2017 Vol. 61 Issue 4 pp. 33 - 42

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.1515/phr-2017-00020

Pages: 10, figures: 5, tables: 3

page **www of the periodical:** www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny
Original article

Termin nadesłania: 13.12.2016r.

Termin zatwierdzenia do druku: 03.04.2017r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Wstęp

Wśród doświadczonych nurków obserwuje się adaptację na nurkowanie w formie zmodyfikowanego wzoru zmian fizjologicznych na podejmowanie tej czynności. Przejawia się to między innymi w zmianie odpowiedzi czynności układu sercowo-naczyniowego, dlatego warto ocenić rolę autonomicznego układu nerwowego w modulacji reakcji układu sercowo-naczyniowego po ekspozycji na hiperbarię.

Materiał i metody

W badaniu udział wzięło dziesięciu doświadczonych w nurkowaniu mężczyzn. Zmierzono efekty ekspozycji na hiperbarię na 30 i 60 metrów oraz interakcji głębokość x czas. Zmiany wartości HR, RRI, CI, LF i HF HRV zostały wzięte pod uwagę.

Wyniki

Ekspozycja na hiperbarię na 30 metrów znacząco wpłynęła na podwyższenie się wartości HFnu-RRI i obniżenie się wartości LFnu-RRI ($F = 42.92$, $p < 0.00001$), bez znaczącego wpływu na wartości HR, RRI i CI. Ekspozycja na hiperbarię na 60 metrów wpłynęła wzrost HR i CI (odpowiednio ($F = 7.64$, $p = 0.01$ oraz ($F = 4.89$, $p = 0.04$)) oraz obniżenie się wartości RRI ($F = 7.69$, $p = 0.01$), bez istotnego wpływu na pozostałe zmienne. Wpływ interakcji czynników głębokość x czas był istotny we wszystkich mierzonych zmiennych.

Wnioski

Wyniki wskazują, że ekspozycja na hiperbarię na 60 metrów wpłynęła na zmianę takich parametrów jak HR, RRI, CI, na które ekspozycja na hiperbarię na 30 metrów nie miała istotnego wpływu. Natomiast, ekspozycja na 30 metrów wykazała istotny wpływ na LF i HF HRV, na które ekspozycja na 60 metrów nie miała istotnego wpływu. Uzyskano istotny efekt interakcji czasu i głębokości w każdej z analizowanych zmiennych.

Słowa kluczowe: autonomiczny układ nerwowy, komora hiperbaryczna, nurkowanie.

Введение

Среди опытных ныряльщиков отмечается адаптация к нырянию в форме модифицированного образца физиологических изменений на данное действие. Это проявляется, в том числе, в изменении ответа сердечнососудистой системы, поэтому стоит оценить роль автономной нервной системы в модуляции реакции сердечнососудистой системы после экспозиции на гипербарии.

Материал и методы

В исследовании приняли участие десять опытных ныряльщиков мужского пола. Были измерены эффекты экспозиции на гипербарии на 30 и 60 метров, а также взаимодействия глубина x время. Были приняты во внимание изменения значений HR, RRI, CI, LF и HF HRV.

Результаты

Экспозиция на гипербарии на 30 метров значительно повлияла на повышение показателя HFnu-RRI и снижение показателя LFnu-RRI ($F = 42.92$, $p < 0.00001$), без значимого влияния на показатели HR, RRI и CI. Экспозиция на гипербарии на 60 метров повлияла на рост HR и CI (соответственно ($F = 7.64$, $p = 0.01$), а также ($F = 4.89$, $p = 0.04$), и снижение значения RRI ($F = 7.69$, $p = 0.01$), без существенного влияния на остальные переменные. Влияние соотношения факторов глубина x время было существенным для всех измеряемых переменных.

Выводы

Выводы показывают, что экспозиция на гипербарии на 60 метров оказала влияние на изменение таких параметров, как HR, RRI, CI, на которые экспозиция на гипербарии на 30 метров не оказала значимого влияния. В то же время экспозиция на гипербарии на 30 метров оказала существенное влияние на LF и HF HRV, на которые экспозиция на 60 метров не имела значимого влияния. Получен значимый эффект соотношения времени и глубины для каждой из анализируемых переменных.

Ключевые слова: автономная нервная система, гипербарическая камера, ныряние.

Einleitung

Unter erfahrenen Taucher wird eine Adaptierung an das Tauchen in Form einer modifizierten Formel für physiologische Veränderungen an die Aufnahme dieser Tätigkeiten beobachtet. Das tritt unter anderen in der Veränderung der Antwort der Tätigkeit des Herzgefäßsystems in Erscheinung, darum lohnt es sich, die Rolle des autonomen Nervensystems bei der Modulierung der Reaktion des Herzgefäßsystems nach der hyperbaren Exposition zu bewerten.

Materialien und Methoden

An der Untersuchung nahmen zehn erfahrene männliche Taucher teil. Gemessen wurden die Effekte der hyperbaren Exposition auf 30 und 60 Metern sowie der Interaktion Tiefe x Zeit. Veränderungen der Werte HR, RRI, CI, LF und HF HRV wurden berücksichtigt.

Ergebnisse

Die hyperbare Exposition auf 30 Metern beeinflusste wesentlich eine Steigerung des Werts HFnu-RRI und eine Senkung des Werts LFnu-RRI ($F = 42.92$, $p < 0.00001$), ohne wesentlichen Einfluss auf die Werte HR, RRI und CI. Die hyperbare Exposition auf 60 Metern beeinflusste eine Steigerung von HR und CI (entsprechend ($F = 7.64$, $p = 0.01$ sowie ($F = 4.89$, $p = 0.04$)) sowie eine Senkung des Werts RRI ($F = 7.69$, $p = 0.01$), ohne wesentlichen Einfluss auf die übrigen Variablen. Der Einfluss der Interaktion der Faktoren Tiefe x Zeit war wesentlich bei allen gemessenen Variablen.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die hyperbare Exposition auf 60 Metern die Veränderung solcher Parameter wie HR, RRI, CI beeinflusst hat, auf die die hyperbare Exposition auf 30 Metern keinen wesentlichen Einfluss hatte. Hingegen wies die Exposition auf 30 Metern einen wesentlichen Einfluss auf LF und HF HRV auf, auf die die Exposition auf 60 Metern keinen wesentlichen Einfluss hatte. Es wurde ein wesentlicher Effekt der Interaktion der Zeit und der Tiefe in jeder der analysierten Variablen erzielt.

Schlüsselwörter: autonomes Nervensystem, Überdrucksack, Tauchen.

Introducción

Entre los buzos experimentados se observa una adaptación al buceo en forma de un patrón modificado de cambios fisiológicos para poder realizar dicha actividad. Esto se refleja, entre otras cosas, en el cambio en la respuesta cardiovascular, por lo que es importante evaluar el papel del sistema nervioso autónomo en la modulación de la respuesta del sistema cardiovascular tras la exposición a la hiperbaria.

Materiales y métodos

En el estudio participaron diez buceadores experimentados. Se midieron los efectos de la exposición a la hiperbaria a 30 y 60 metros y la interacción de profundidad x tiempo. Se tuvieron en cuenta los cambios en los valores HR, RRI, CI, LF y HF HRV.

Resultados

La exposición a la hiperbaria a 30 metros produjo un incremento significativo de los valores HFnu-RRI y disminuyó el valor LFnu-RRI ($F = 42.92$, $p < 0.00001$) sin afectar significativamente los valores HR, RRI y CI. La exposición a la hiperbaria a 60 metros produjo un incremento de los valores HR y CI (concretamente ($F = 7.64$, $p = 0.01$ y ($F = 4.89$, $p = 0.04$)) y una disminución del RRI ($F = 7.69$, $p = 0.01$) sin evidenciarse un impacto significativo en el resto de variables. La influencia de la interacción entre los factores profundidad x tiempo fue significativa en todas las variables observadas.

Conclusiones

Los resultados indican que la exposición a la hiperbaria a 60 metros produjo cambios en parámetros como HR, RRI, CI, que no sufrieron cambios significativos durante la exposición a la hiperbaria a 30 metros. Sin embargo, la exposición a la hiperbaria a 30 metros mostró cambios importantes en LF y HF HRV, que no sufrieron cambios significativos durante la exposición a 60 metros. Se observó un efecto significativo de las interacciones tiempo y profundidad en cada una de las variables analizadas.

Palabras clave: sistema nervioso autónomo, cámara hiperbárica, buceo.

WSTĘP

W zdrowym organizmie układy fizjologiczne dostosowują swoją aktywność wobec zmian zachodzących w środowisku zewnętrznym. Systematyczne podejmowanie danej czynności może doprowadzić do zmodyfikowania odpowiedzi układów fizjologicznych podczas wykonywania tejże aktywności. Na przykład, Hong i inni [1] opisali, że częstość akcji serca (*heart rate* - HR) u nurkujących kobiet z Korei zwanych „*haenyeo*” obniżyła się ze 101 (wartość spoczynkowa) do 60 uderzeń na minutę (40 sekund po zanurzeniu).

Co ciekawe, badanie z 2015 roku [2] odnotowało, że wartość HR w trakcie nurkowania była niższa u starszych w porównaniu do młodych kobiet. Tym niemniej, odnotowano około 20 % obniżenie się HR u całej grupy badanych podczas nurkowania ze wstrzymanym oddechem w morzu [2].

Za zaobserwowane zmiany w wartości HR może odpowiadać kilka różnych reakcji, intensywny skurcz obwodowych i trzewnych łożysk włosnaczyniowych oraz redukcja stopnia konsumpcji tlenu prowadzi do oszczędzania tlenu dla organów priorytetowych, takich jak mózg czy serce [3]. Osoby, które miały doświadczenie 7-10 latnie w nurkowaniu, podczas wstrzymania oddechu charakteryzowały się obniżonym poziomem zakwaszenia krwi i stresu oksydacyjnego w odpowiedzi na nurkowanie [4]. Wyniki badań na grupie 30 zdrowych mężczyzn pokazały, że do znaczących zmian wartości HR nie dochodzi podczas samego wstrzymania oddechu w normalnych warunkach [5].

Istotne obniżenie wartości HR doszło w warunkach, kiedy zasymulowano nurkowanie poprzez zanurzenie w zimnej wodzie podczas wstrzymania oddechu: w pierwszych 15 sekundach wartość HR obniżyła się z 108.97 do 81.77, w kolejnych 15 sekundach wartość ta jeszcze bardziej się obniżyła [5]. Co więcej, wyniki badań, w których zastosowano podobną metodę symulacji nurkowania poprzez zanurzenie w zimnej wodzie [6] wykazały początkowy wzrost HR podczas ekspozycji. Reakcja na nurkowanie nie będzie taka sama, kiedy nie dojdzie do wstrzymania oddechu podczas tej czynności [7].

Wyniki badań 25 nurków podczas nurkowania pokazują interesującą reakcję ze strony autonomicznego układu nerwowego (AUN) na nurkowanie i zanurzanie [8]. Z jednej strony nurkowanie zaktywowało zarówno komponent współczulny jak i przywspółczulny, z drugiej strony zanotowano wzrost wszystkich badanych parametrów określających zmienność zatokowego rytmu serca (*Heart Rate Variability* – HRV).

W związku z powyższym, warto zbadać odruch na nurkowanie (*diving reflex*) analizując reakcję autonomicznego układu nerwowego i układu sercowo-naczyniowego podczas ekspozycji na hiperbarię, w trakcie której uczestnicy będą mogli swobodnie oddychać. Na podstawie literatury zakładamy, że reakcja AUN i sercowo-naczyniowego układu będą odpowiadać w podobny sposób jak przy standardowym nurkowaniu w zimnym akwenu, mimo że ekspozycja w naszym badaniu będzie charakteryzowała się jedynie ekspozycją w komorze hiperbarycznej, w której panujący stopień kompresji odpowiadać będzie ciśnieniu na odpowiednich głębokościach podczas nurkowania w akwenu wodnym.

INTRODUCTION

In a healthy body, physiological systems can adapt their functions relative to changes in the external environment. Thus regular performance of a given activity, may lead to modified physiological system responses during the activity. For example, Hong et al [1] found that in female divers from Korea, called “*haenyeo*”, the average diver’s heart rate (HR) dropped from 101 (a value at rest) to 60 (40 seconds after immersion) beats per minute. Interestingly, a study from 2015 [2] noted that the HR value during diving was lower in older women versus young women. Nevertheless, a nearly 20% reduction in HR was noted for the entire group studied during breath-hold diving in the sea [2].

The observed changes in HR values may result from various reactions. For instance, intense vasoconstriction of peripheral and visceral capillary beds and a reduction in oxygen consumption might reserve oxygen for priority organs such as the brain or heart [3]. Subjects with 7–10 years of experience diving showed lower levels of blood acidity and oxidative stress in response to diving while holding their breath [4]. Test results of a group of 30 healthy men showed that significant changes in HR did not occur when breath holding under normal conditions [5].

A significant reduction in HR values was observed when diving was simulated by immersing in cold water with breath held: HR values dropped from 108.97 to 81.77 during first 15 seconds, and decreased even further during the subsequent 15 seconds [5]. Furthermore, results from a study using a similar method to simulate diving by immersion in cold water [6] demonstrated that an initial increase in HR occurs during exposure. However, the physiological reaction to diving is not the same when a diver’s breath is not held during the activity [7].

In a study of 25 divers, during diving, an interesting autonomic nervous system (AUN) reaction to the diving and immersion was observed [8]. Diving activated both the AUN sympathetic and parasympathetic components, but additionally increased all studied parameters relating to heart rate variability (HRV).

Considering the above, a study of the diving reflex is of interest, specifically analysing the reaction of the AUN and the cardiovascular system during exposure to hyperbaric conditions where the subjects can breathe freely. On the basis of previous reports, the authors assume that the AUN and cardiovascular system reactions will be similar to standard diving in cold water, even though in this study the exposure will be limited to exposure in a hyperbaric chamber, where the compression level will correspond to pressure at a relevant depth during diving in a water reservoir.

MATERIALS AND METHODS

Ten male subjects, with diving experience (from 2 to 12 years) participated in the study. The anthropometric data of the study participants is shown in Table No. 1. The subjects underwent exposure to the hyperbaric chamber twice. The first exposure lasted from 12:00 p.m. to 1:00 p.m. Volunteers were placed in the hyperbaric chamber and exposed to compression of 400 kPa. The exposure plateau was ca. 30 minutes, and it was followed by a gradual decompression. The decompression

MATERIAŁ I METODY

W badaniu udział wzięło dziesięciu mężczyzn, doświadczonych w nurkowaniu (zakres stażu 2-12 lat). Dane antropometryczne dotyczące uczestników badania przedstawione są w tabeli nr 1. Badani dwukrotnie zostali eksponowani w komorze hiperbarycznej. Pierwsza ekspozycja trwała od godziny 12 do 13. Ochothnicy zostali umieszczeni w komorze hiperbarycznej i sprężeni do ciśnienia 400 kPa. 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 [7].

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

Do analizy czynności AUN użyto systemu Task Force Monitor. Służy do nieinwazyjnych badań układu krążenia oraz czynnościowej oceny AUN. System składa się z następujących podjednostek: urządzenie do ciągłego pomiaru ciśnienia krwi, elektrokardiograf (EKG), kardiograf impedancyjny (IKG), urządzenie do oscylometrycznego pomiaru ciśnienia oraz pulsoksymetr.

Zastosowana metoda opisana jest szerzej gdzie indziej [8]. Uczestnicy byli badani czterokrotnie podczas jednego dnia: natychmiastowo przed i po ekspozycji na hiperbarię na 30 metrów oraz przed i po ekspozycji na 60 metrów. Wartości następujących wskaźników zostały wzięte pod uwagę w trakcie analizy statystycznej: HR, RRI (różnic odstępów RR (RR Interval – RRI), wskaźnik sercowy, (Cardiac Index – CI) wyznaczany jest przez stosunek rzutu serca do powierzchni ciała.

Pod uwagę wzięto również wartości przedstawiające wyniki analizy spektralnej HRV: niską częstotliwość (low frequency – LF) i wysoką częstotliwość (high frequency – HF) gęstości widma mocy. Składowa LF (0.04-0.15 Hz) i HF (0.15-0.4 Hz) były przedstawiane w jednostkach znormalizowanych (LFnu RRI, HFnu RRI) dla HRV.

pattern, following exposure to 400 kPa (0.4 MPa–0.3 MPa + 0.1 MPa atmospheric pressure), was the same pattern as used after diving at 33 meters, which corresponds to the pressure of 440 kPa. The breathing gas used during interventions in the hyperbaric chamber was normal air [7].

During the second exposure, at a depth of 60 meters, the compression time was 4 hours. The entire experiment lasted from 1:30 p.m. to 6:30 p.m., with a decompression time of 4 hours.

AUN function was analysed with the Task Force Monitor system, a device used for non-invasive studies of the cardiovascular system and functional evaluation of AUN. The system consists of the following subunits: a device for continuous blood pressure monitoring, an electrocardiograph (ECG), an impedance cardiograph (IKG), a device for oscillometric pressure measurements, and a pulse oximeter.

The specific method is described in detail in another report [8]. The subjects were examined four times during one day: immediately before and after exposure to hyperbaric conditions at 30 meters, and before and after exposure to hyperbaric conditions at 60 meters. During the statistical analysis, values of the following factors were taken into account: HR, RR interval (RRI), and the cardiac index (CI) relating the cardiac output to body surface area. Results of the HRV spectral analysis, the low frequency (LF) and high frequency (HF) of power spectral density, were also verified. The LF (0.04-0.15 Hz) and HF (0.15-0.4 Hz) components for HRV were presented in the standardised units (LFnu RRI, HFnu RRI).

Tab. 1

Subjects anthropometric data.

Dane antropometryczne uczestników badania.

i.d.	Age	Height [cm]	Weight	BMI	Years of diving experience
DIVE_001	29	190	92	25	4
DIVE_002	29	180	72	22	9
DIVE_003	31	178	75	24	2
DIVE_004	22	168	76	27	4
DIVE_005	33	191	94	26	8
DIVE_006	20	193	96	26	2
DIVE_007	37	183	80	24	12
DIVE_008	32	174	86	28	4
DIVE_009	25	176	86	28	5
DIVE_010	36	172	80	27	11
Mean	29	2	84	26	6

Do analizy danych użyto pakietu statystycznego STATISTICA 13.1 (StatSoft, Tulsa, OK). Test Shapiro-Wilka został użyty do analizy normalności rozkładu wartości analizowanych zmiennych. Test Levene'a posłużył do oceny jednorodności wariancji. Do analizy efektu czasu przy ekspozycji hiperbarycznej na 30 i 60 metrów użyto jednoczynnikowego testu ANOVA, zaś efekt interakcji (głębokość x czas) analizowano za pomocą dwuczynnikowego testu ANOVA.

WYNIKI

Analiza wyników wykazała, że wartość HR miała tendencję do nieznacznego spadku po ekspozycji na hiperbarię na głębokość 30 metrów, jednak tendencja ta nie była istotna statystycznie ($p > 0.05$). Natomiast efekt ekspozycji na 60 metrów wywołał odwrotne zmiany, zaobserwowany wzrost HR był istotny statystycznie ($F = 7.64$, $p = 0.01$). Interakcja czynników głębokość x czas, którą przedstawia rysunek nr 1, również okazała się istotna statystycznie ($F = 9.71$, $p = 0.004$).

Data was analysed with the statistical package STATISTICA 13.1 (StatSoft, Tulsa, OK). The Shapiro-Wilk test was used to analyse distribution normality for values of analysed variables. The equality of variances was verified with Levene's test. The separate effects hyperbaric exposures at 30 meters and 60 meters (before/after) was analysed with one-way ANOVA, and the interaction effect (depth x before/after) was verified with two-way ANOVA.

RESULTS

Analysis of the results showed that the HR value tended to decrease slightly following exposure to hyperbaric conditions at 30 meters, however, that tendency was not statistically significant ($p > 0.05$). Exposure to 60 meters, on the other hand, caused a reverse effect, and an observed HR increase was statistically significant ($F = 7.64$, $p = 0.01$). The interaction between depth and time factors, shown in Fig. No. 1, also proved to be statistically significant ($F = 9.71$, $p = 0.004$).

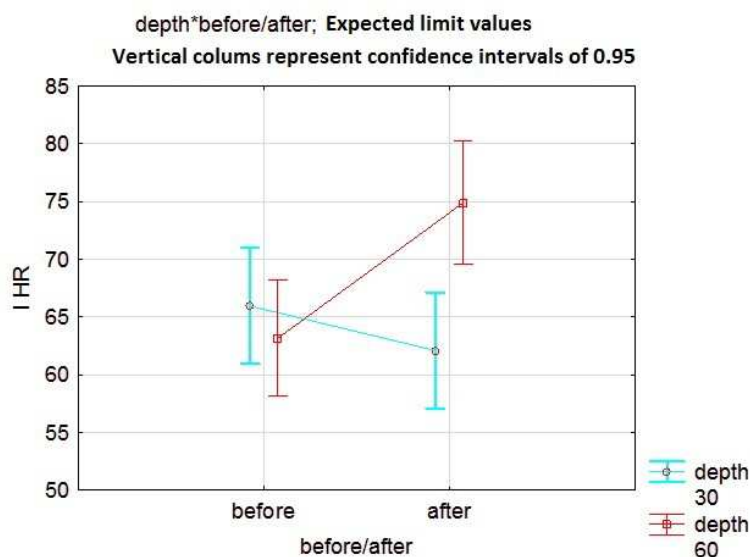


Fig. 1 Effect of depth and time on HR value.

Rys. 1 Wpływ interakcji czynników głębokość x czas na wartość HR.

Nie zaobserwowano istotnych zmian RRI w odpowiedzi na ekspozycję na hiperbarię na głębokość 30 metrów ($p > 0.05$). Natomiast w przypadku ekspozycji na 60 metrów zaobserwowano istotny statystycznie wpływ ekspozycji na RRI o odwrotnym kierunku niż miało to miejsce przy ekspozycji na 30 metrów ($F = 7.69$, $p = 0.01$). W przypadku wartości RRI, interakcja czynników głębokość x czas okazała się istotna ($F = 10.07$, $p = 0.003$) (rysunek nr 2).

No significant changes in RRI were observed in response to exposure to hyperbaric conditions at 30 meters ($p > 0.05$). During exposure to 60 meters, on the other hand, a statistically significant effect of the exposure on RRI was observed, in a direction opposite to that observed during exposure at 30 meters ($F = 7.69$, $p = 0.01$). For RRI values, the interaction between depth and time factors proved to be significant ($F = 10.07$, $p = 0.003$) (Fig. No. 2).

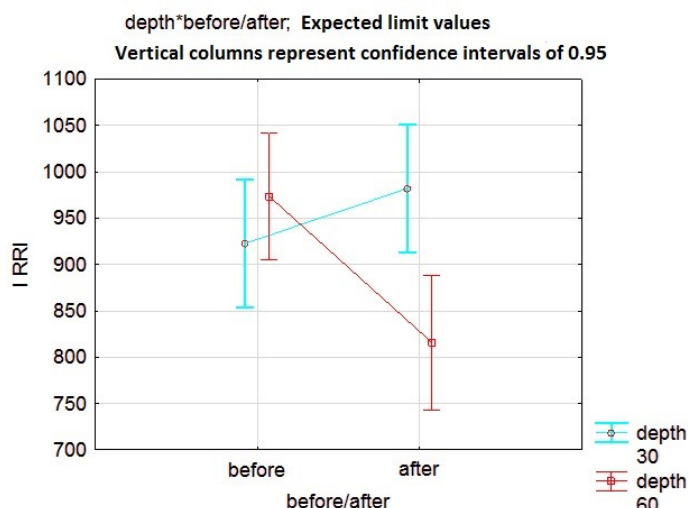


Fig. 2 Effect of depth and time on LFnu-RRI.

Rys. 2 Wpływ interakcji czynników głębokość x czas na wartość RRI.

Nie zaobserwowano istotnych zmian CI w odpowiedzi na ekspozycję na hiperbarię na głębokość 30 metrów ($p > 0.05$). Natomiast zaobserwowano istotny wzrost wartości CI po ekspozycji na 60 metrów ($F = 4.89$, $p = 0.04$). Dwuczynnikowa ANOVA wykazała istotną interakcję ($F = 6.9$, $p = 0.01$) (rysunek nr 3).

No significant changes in CI were observed in response to exposure to hyperbaric conditions at 30 meters ($p > 0.05$). On the other hand, a significant increase in the CI value was observed following exposure to 60 meters ($F = 4.89$, $p = 0.04$). A two-way ANOVA showed a significant interaction ($F = 6.9$, $p = 0.01$) (Fig. No. 3).

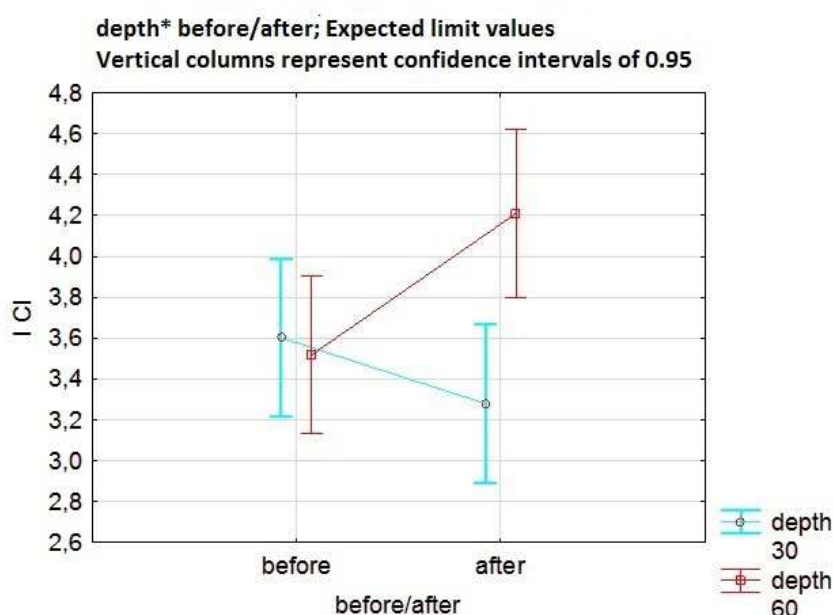


Fig. 3 Effect of depth and time on CI value.

Rys. 3 Wpływ interakcji czynników głębokość x czas na wartość CI.

Zmiany wartości LFnu-RRI przedstawia wykres nr 4. Wartość ta obniżyła się zarówno po ekspozycji na 30 jak i na 60 metrów; przy czym zmiana tej wartości po ekspozycji na 30 metrów była istotna statystycznie ($F = 42.92$, $p < 0.00001$). Po ekspozycji na 60 metrów zmiana ta nie osiągnęła istotności statystycznej ($p > 0.05$). Wpływ interakcji dwóch czynników (głębokość x czas) na LFnu-RRI okazał się być istotny statystycznie: ($F = 4.17$, $p < 0.05$).

Changes in LFnu-RRI values are shown in Chart No. 4. This value decreased following exposure both to 30 meters and 60 meters, where a change in this value following exposure to 30 meters was statistically significant ($F = 42.92$, $p < 0.00001$). Following exposure to 60 meters, this change did not reach statistical significance ($p > 0.05$). The effect of interaction between two factors (depth x time) on LFnu-RRI proved to be statistically significant ($F = 4.17$, $p < 0.05$).

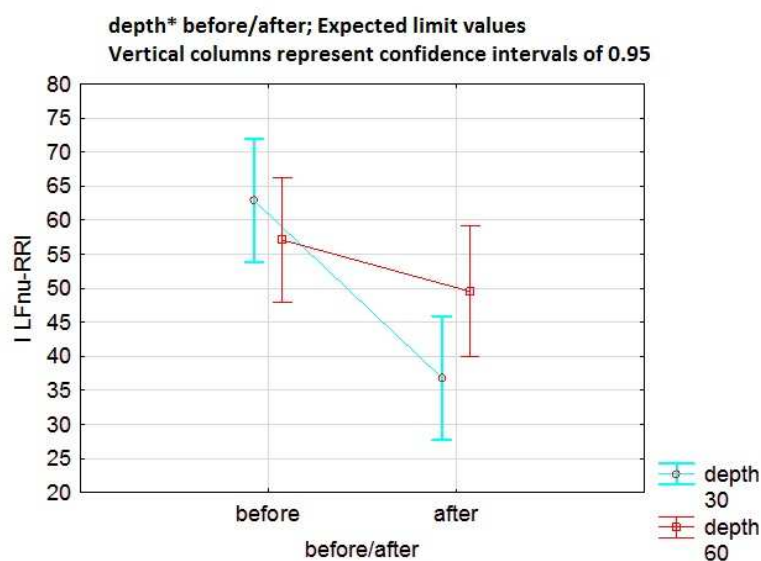


Fig. 4 Effect of depth and time on LFnU-RRl.

Rys. 4 Wpływ interakcji czynników głębokość x czas na LFnU-RRl.

Wartość HFnu-RRl wzrosła zarówno po ekspozycji na 30 jak i na 60 metrów; przy czym zmiana tej wartości po ekspozycji na 30 metrów była istotna statystycznie ($F = 42.92$, $p < 0.00001$). Zmiana wartości HFnu-RRl po ekspozycji na 60 metrów nie osiągnęła istotności statystycznej ($p > 0.05$). Dwuczynnikowa ANOVA wykazała istotną interakcję: ($F = 4.17$ $p < 0.05$) (rysunek nr. 5).

The HFnu-RRl value decreased following exposure both to 30 meters and 60 meters, where a change in this value following exposure to 30 meters was statistically significant ($F = 42.92$, $p < 0.00001$). A change in the HFnu-RRl following exposure to 60 meters did not reach statistical significance ($p > 0.05$). A two-way ANOVA showed a significant interaction: ($F = 4.17$ $p < 0.05$) (Fig. No. 5).

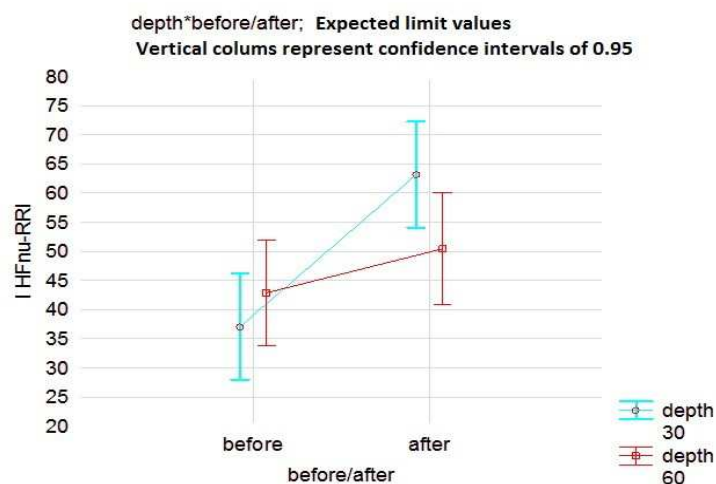


Fig. 5 Effect of depth and time on HFnu-RRl.

Rys. 5 Wpływ interakcji czynników głębokość x czas na HFnu-RRl.

Dynamika zmian wartości średnich przed i po ekspozycji na głębokość 30 i 60 metrów przedstawione są odpowiednio w tabeli nr 2 i 3. Zmienne, w których zaobserwowano istotne statystycznie różnice zaznaczone są gwiazdką (*).

The dynamics of changes in mean values before and after exposure to 30 meters and 60 meters are shown in Tables No. 2 and No. 3, respectively. Variables for which statistically significant changes were observed are marked with an asterisk (*).

Tab. 2

Changes in mean values of measured variables before and after exposure to 30 meters.

Różnice w wartościach średnich mierzonych zmiennych przed i po ekspozycji na 30 metrów.

Variable	Mean Before	Mean After
I HR	65,96	62,10
I RRI	922,60	981,84
I CI	3,60	3,28
I LFnu-RRI *	76,26	73,53
I HFnu-RRI *	23,74	26,47

Tab. 3

Changes in mean values of measured variables before and after exposure to 60 meters.

Różnice w wartościach średnich mierzonych zmiennych przed i po ekspozycji na 60 metrów.

Variable	Mean Before	Mean After
I HR *	63,165	74,897
I RRI *	973,323	816,062
I CI *	3,519	4,210
I LFnu-RRI	57,107	48,717
I HFnu-RRI	42,893	51,283

DYSKUSJA

Po ekspozycji na hiperbarię na głębokość 30 metrów zaobserwowano nieistotną tendencję do zmniejszenia się wartości HR i CI, przy jednoczesnym wzroście RRI. Co ciekawe, w przypadku ekspozycji na hiperbarię na głębokość 60 metrów zaobserwowano istotny wpływ interwencji, przy czym kierunek zmian był odwrotny niż w przypadku ekspozycji na 30 metrów: wartości HR i CI wzrosły, natomiast w przypadku RRI zanotowano spadek. Sugerowanie się tymi trzema parametrami mogłoby doprowadzić do wniosku, że pod wpływem ekspozycji na hiperbarię na głębokość 30 metrów zaktywowany został przywspółczulny komponent AUN.

Potwierdzałoby to znaczące obniżenie się komponentu niskiej częstotliwości RRI (LFnu-RRI) przy jednoczesnym podwyższeniu się HFnu-RRI. Wartość HFnu-RRI może odwzorowywać natężenie eferentnej aktywności nerwu błędnego [9], zatem wzór wszystkich zaobserwowanych zmian wskazywałby na wzmocniony komponent przywspółczulny pod wpływem ekspozycji na 30 metrów. W przypadku ekspozycji na 60 metrów, zaobserwowano istotne zmiany w parametrach HR, RRI i CI, przy czym warto zauważyć że kierunek tych zmian był odwrotny niż w przypadku ekspozycji na 30 metrów. Natomiast parametry dotyczące niskiej i wysokiej częstotliwości zatokowego rytmu serca miały tendencję do zmiany w ten sam sposób, co w przypadku ekspozycji na 30 metrów, efekt ten jednak nie był istotny statystycznie.

Jednoznacznie na podstawie uzyskanych danych trudno stwierdzić który komponent AUN był bardziej aktywny po ekspozycji na hiperbarię na 60 metrów, możliwym jest że wzrosła aktywność obydwu

DISCUSSION

Following exposure to pressure equivalent to 30 meters of depth, a non-significant tendency toward reduction in HR and CI values was observed, accompanied by a simultaneous increase in RRI. Interestingly, upon exposure to hyperbaric conditions equivalent to 60 meters, we observed a significant influence of intervention. The changes at 60 meters were in the reverse direction of changes observed during exposure to 30 meters: HR and CI values increased, while RRI dropped. Considering these three parameters, it might be concluded that exposure to the hyperbaric conditions at 30 meters activated the parasympathetic component of the AUN.

This would be confirmed by a significant reduction in the low frequency component of RRI (LFnu-RRI) with a simultaneous increase in HFnu-RRI. The HFnu-RRI value may reflect the intensity of the efferent activity of the vagus nerve [9], such that the pattern of all observed changes would indicate an increased parasympathetic component following exposure to pressures equivalent to 30 meters of depth. Upon exposure to 60 meters, significant changes in HR, RRI, and CI were observed, and in the reverse direction of changes observed at 30 meters. Parameters related to the low and high frequency of sinus rhythm tended to change in the same direction as during exposure to 30 meters, however this effect was not statistically significant.

Based on the current data, it is difficult to say which AUN component was more active following exposure to hyperbaric conditions at 60 meters; it is possible that activity of both components increased, similar to observations in other studies [10]. Higher levels of compression could result in a stronger venous return, which may activate atrial B-type stretch receptors that

komponentów, jak to miało miejsce w przypadku innych badań [8].

Jednoznacznie na podstawie uzyskanych danych trudno stwierdzić który komponent AUN był bardziej aktywny po ekspozycji na hiperbarię na 60 metrów, możliwym jest że wzrosła aktywność obydwu komponentów, jak to miało miejsce w przypadku innych badań [10]. Większy stopień hiperbarii może skutkować silnym powrotem żylnym, co z kolei może spowodować aktywację przedsionkowych mechanoreceptorów typu B (atrial B-type stretch receptors), które odruchowo aktywują układ współczulny u przywspółczulny. Silny powrót żylny prowadzi do zwiększonego rozciągnięcia przedsionków i aktywacji odruchu Bainbridge'a wywołującego tachykardię.

Co więcej, w niniejszym badaniu nie uwzględniono wartości parametrów biochemicznych, które również mogły mieć istotny wpływ na modulację parametrów układu sercowo-naczyniowego, zwłaszcza że ekspozycja na hiperbarię na 60 metrów trwała łącznie 4 godziny. Ponadto, ograniczeniem niniejszego badania mógłby być fakt, że na podstawie uzyskanych danych nie można określić zmian w czynnościach AUN podczas ekspozycji na hiperbarię, jedynie ich stan zaraz przed i po ekspozycji.

WNIOSKI

Ekspozycja na hiperbarię na głębokość 30 metrów spowodowała zwiększenie dosercowej aktywności układu przywspółczulnego. Ekspozycja na hiperbarię na głębokość 60 metrów równocześnie zmieniła dosercową aktywność współczulną i przywspółczulną. Taka reakcja AUN wpłynęła na funkcje układu sercowo-naczyniowego aktywując receptory odruchu Bainbridge'a.

activate the sympathetic and parasympathetic systems via a reflex path. A strong venous return leads to increased atrial stretch and activation of the Bainbridge reflex, causing tachycardia.

In this study, values of biochemical parameters were not taken into account, which could also have a significant effect on modulation of the cardiovascular system parameters, especially considering the fact that the exposure to hyperbaric conditions at 60 meters lasted 4 hours in total. An additional limitation of this study could be that the currently obtained data more precisely describe changes in AUN function immediately before and after the exposure, rather than during the exposure to hyperbaric conditions.

CONCLUSIONS

The exposure to hyperbaric conditions at 30 meters resulted in increased intracardiac activity of the parasympathetic system. Exposure to hyperbaric conditions at 60 meters modified both sympathetic and parasympathetic activity. This AUN activity influenced the cardiovascular function, activating the Bainbridge reflex receptors.

REFERENCES

1. Hong SK, Song SH, Kim PK, Suh CS. Seasonal observations on the cardiac rhythm during diving in the Korean ama. *J Appl Physiol.* 1967 Jul;23(1):18-22;
2. Lee JY, Lee HH, Kim S, Jang YJ, Baek YJ, Kang KY. Diving bradycardia of elderly Korean women divers in cold seawater: a field report. *Ind Health.* 2016;54(2):183-90. doi: 10.2486/indhealth.2015-0043. Epub 2015 Dec 1;
3. Elsner R, Gooden B. Diving and asphyxia. A comparative study of animals and man. *Monogr Physiol Soc.* 1983;40:1-168;
4. 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;
5. Rajdeep PL, Patel RK, Patel D. Heart rate change of healthy volunteers in a simulated dive experiment. *Int J Med Sci Public Health.* 2014 18, 0-57;
6. Smolinska M, Malinowski K, Zajackowski S, Wierzbna TH. Multiple baseline approach to predict the heart rate response to simulated diving in young adults. In *Cardiovascular Oscillations (ESGCO), 2014 May 8th Conference of the European Study Group on*, 217-218. IEEE;
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. *Eur J Appl Physiol.* 2000 Dec;83(6):566-72. DOI:10.1007/s004210000317;
8. Zalewski P, Słomiński K., Klawe J, Tafił-Klawe M. Functional assessment of the autonomous nervous system with the use of Task Force Monitor. *Acta Bio-Optica et Informatica Medica. Inżynieria Biomedyczna.* 2008 14(3),228-234;
9. Lombardi F, Malliani A, Pagani M, Cerutti S. Heart rate variability and its sympatho-vagal modulation. *Cardiovasc Res.* 1996 Aug;32(2):208-16.
10. Schipke JD, Pelzer M.. Effect of immersion, submersion, and scuba diving on heart rate variability. *Br J Sports Med.* 2001 Jun;35(3):174-80;

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
pzalewski@cm.umk.pl

