

**mgr Tomasz Janus**

psycholog

VI rok Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich

Wydział Psychologii, SWPS Uniwersytet Humanistycznospołeczny

nr indeksu: 681/ISD/2014

**Funkcjonowanie poznawcze w warunkach narkozy azotowej. Ocena różnic procesów poznawczych przy ekspozycji na hiperbarię powietrzną w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych.**

**Rozprawa doktorska**

**pod kierunkiem dr hab. Michała Olszanowskiego, prof. Uniwersytetu SWPS**

Badania finansowane ze środków SWPS Uniwersytetu Humanistycznospołecznego w ramach grantu numer WP/2018/B/27

**Warszawa, 2022**

**Słowa kluczowe: narkoza azotowa, narkoza gazowa, psychologia poznawcza**

**Obszar nauk społecznych, dziedzina nauk społecznych, psychologia**



*But I, being poor, have only my dreams,  
I have spread my dreams under your feet,  
Tread softly because you tread on my dreams.*

William Butler Yeats  
irlandzki poeta, dramaturg i filozof



## Spis treści

1 Streszczenie. . . . .	14
2 Wprowadzenie. . . . .	15
2.1 Ryzyko związane z aktywnością podwodną. Narkoza azotowa. . . . .	16
2.2 „Suche” ekspozycje hiperbaryczne. . . . .	17
2.3 Rodzaje nurkowania. . . . .	19
2.3.1 Nurkowanie z zatrzymanym oddechem (freediving) . . . . .	20
2.3.2 Nurkowanie powietrzne. . . . .	20
2.3.3 Nurkowanie mieszkowe. . . . .	20
2.3.4 Nurkowania satutowane. . . . .	21
2.4 Narkoza azotowa a funkcjonowanie psychiki. . . . .	22
3 Uwaga - zarys teorii. . . . .	23
3.1 Uwaga - wprowadzenie. . . . .	23
3.2 Przeszukiwanie pola percepcyjnego. . . . .	26
3.2.1 Przeszukiwanie pola percepcyjnego - przegląd wybranych badań. . . . .	28
3.2.2 Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie procesu przeszukiwania. . . . .	29
4 Funkcje wykonawcze (funkcje zarządcze) - przerzutność, hamowanie dominującej reakcji i odświeżanie informacji w pamięci roboczej. . . . .	31
4.1 Hamowanie. . . . .	31
4.2 Przerzutność. . . . .	32
4.3 Odświeżanie informacji w pamięci roboczej (pamięci operacyjnej) . . . . .	32
4.4 Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie działania funkcji wykonawczych. . . . .	33
5 Pamięć - zarys teorii. . . . .	34
5.1 Procesy pamięciowe. . . . .	35

5.2	Warunki środowiska zewnętrznego i wewnętrznego wpływające na proces zapamiętywania i przypominania - pamięć zależna od kontekstu i pamięć zależna od stanu. ....	37
5.3	Zjawisko interferencji proaktywnej. ....	38
5.4	Efekt pierwszeństwa i świeżości. ....	38
5.5	Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie funkcjonowania pamięci długotrwałej. ....	38
6	Funkcjonowanie psychomotoryczne. ....	40
7	Biofizyczne i patofizjologiczne aspekty narkozy azotowej. ....	41
7.1	Jednostki ciśnienia. ....	41
7.2	Ciśnienie otoczenia w warunkach podwodnych. ....	41
7.3	Ciśnienie parcjale gazu. ....	42
7.4	Azot. ....	43
7.5	Prawo Henryego. ....	44
7.6	Przemiana izochoryczna. ....	44
7.7	Potencjał narkotyczny gazów - Teoria Meyera-Overtona. ....	45
7.8	Wpływ hiperbarycznego azotu na aktywność neuronalną. ....	46
7.9	Prawo Daltona (prawo ciśnień cząstkowych). Gazy obojętne, dwutlenek węgla i tlen. Narkoza gazów obojętnych. ....	46
8	Narkoza azotowa - wprowadzenie do zagadnienia. ....	48
8.1	Narkoza azotowa a alkohol. ....	48
8.2	Graniczne wartości ciśnienia otoczenia od których może wystąpić narkoza azotowa. ....	49
8.3	Objawy narkozy azotowej. ....	50
8.4	Wybrane czynniki wpływające na nasilenie upośledzenia funkcjonowania pod wpływem narkozy azotowej. ....	53

8.5 Narkoza „komorowa”, a narkoza „podwodna”	54
8.5.1 Lęk i stres w warunkach komory hiperbarycznej i w warunkach podwodnych.	56
8.5.2 Narkoza „komorowa”, a narkoza „podwodna” - podsumowanie.	59
9 Wpływ narkozy azotowej na wybrane składowe aparatu psychicznego człowieka.	60
9.1 Funkcjonowanie psychomotoryczne a narkoza azotowa.	60
9.1.1 Wstęp.	60
9.1.2 Kwarenda.	60
9.1.3 Funkcjonowanie psychomotoryczne a narkoza azotowa - analiza wniosków z badań.	60
9.1.4 Potencjalne obszary badań.	62
9.2 Uwaga a narkoza azotowa.	63
9.2.1 Kwarenda.	63
9.2.2 Uwaga wzrokowa a narkoza azotowa - analiza badania Brebecka i in. (2017).	63
9.2.3 Potencjalne obszary badań.	64
9.3 Funkcje wykonawcze a narkoza azotowa.	66
9.3.1 Kwarenda.	66
9.3.2 Funkcje wykonawcze a narkoza azotowa - analiza badania Steinberga i Doppelmayra (2017)	67
9.3.3 Potencjalne obszary badań.	67
9.4 Funkcjonowanie pamięci w warunkach narkozy azotowej.	68
9.4.1 Kwarenda.	68
9.4.2 Funkcjonowanie pamięci w warunkach „suchych” ekspozycji hiperbarycznych.	69

9.4.2.1	Badanie Fowlera i Acklesa (1975) . . . . .	69
9.4.2.2	Badanie Philpa i in. (1989) . . . . .	73
9.4.2.3	Badanie Tetzlaffa i in. (1998) . . . . .	76
9.4.3	Funkcjonowanie pamięci długotrwałej w warunkach podwodnych. . . . .	77
9.4.4	Potencjalne obszary badań. . . . .	79
9.5	Wpływ narkozy azotowej na inne aspekty funkcjonowania człowieka. . . . .	82
10	Wybrane zagadnienia związane z planowaniem badań w warunkach nadciśnienia. . . . .	83
10.1	Podstawy teorii dekompresji. . . . .	83
10.1.1	Nurkowania bezdekompresyjne i nurkowania dekompresyjne. . . . .	85
10.1.2	Choroba dekompresyjna. . . . .	86
10.2	Przemiana izotermiczna. . . . .	88
10.3	Uraz ciśnieniowy płuc (barotrauma płuc) . . . . .	89
11	Ogólna metodologia badań nad narkozą azotową. . . . .	91
11.1	Wprowadzenie. . . . .	91
11.2	Badania w komorze hiperbarycznej. . . . .	91
11.3	Badania w warunkach podwodnych. . . . .	92
11.4	Badania z użyciem podtlenku azotu. . . . .	93
11.5	Liczebność grup badawczych. . . . .	94
11.6	Charakterystyka osób badanych. . . . .	94
11.7	Grupy kontrolne. . . . .	95
11.8	Warunki eksperymentu - parametry ciśnienia otoczenia i stężenia podtlenku azotu. . . . .	96
11.9	Podwójnie ślepa próba. Maskowanie i odkłamanie. . . . .	96



11.10	Ogólna metodologia badań nad narkozą azotową - podsumowanie i implikacje praktyczne. ....	97
12	Modele środowiskowe. ....	103
13	Metodologia badań własnych. ....	106
13.1	Główny cel badań. ....	106
13.2	Schematy badawcze. ....	109
13.2.1	Badanie 1. ....	110
13.2.2	Badanie 2a i 2b. ....	111
13.2.3	Badanie 3a i 3b. ....	111
13.2.4	Badanie 4. ....	111
13.2.5	Badanie 5. ....	112
13.3	Operacjonalizacja mierzonych zmiennych poznawczych. ....	112
13.4	Pamięć długotrwała - procedura wyboru słów do badania. ....	113
13.5	Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Kolorowy Test Połączeń - charakterystyka narzędzia. ....	113
13.5.1	Wybór CTT do badania wpływu narkozy azotowej na proces przeszukiwania i działanie funkcji wykonawczych. ....	115
13.5.2	Modyfikacje CTT na potrzeby eksperymentów w warunkach nadciśnienia. ....	116
13.5.3	CTT-1 A i CTT-2 A - charakterystyka błędów. ....	117
13.6	Test Zegarków - charakterystyka narzędzia. ....	119
13.7	Test Liczb Losowych - charakterystyka narzędzia. ....	120
14	Badanie 1 - badania pretestowe. ....	121
14.1	Cel badania. ....	121
14.2	Osoby badane. ....	122

14.3 Plan badawczy. ....	124
14.4 Procedura badawcza. ....	125
14.5 Analizy statystyczne. ....	125
14.6 Wyniki. ....	126
14.7 Wnioski z Badania 1. ....	130
15 Badanie 2a i 2b - badania eksperymentalne w warunkach komory hiperbarycznej. ....	131
15.1 Cel badania. ....	131
15.2 Hipotezy badawcze. ....	132
15.3 Osoby badane. ....	134
15.4 Plan badawczy. ....	135
15.4.1 Badanie 2a - schemat badawczy. ....	135
15.4.2 Badanie 2b - schemat badawczy. ....	135
15.5 Procedura badawcza. ....	136
15.6 Profil dekompresyjny (profil nurkowania) ....	138
15.7 Analizy statystyczne. ....	139
15.8 Wyniki. ....	139
15.8.1 Normobaria (pamięć - Pretest 1) vs. hiperbaryczne powietrzne (pamięć - Badanie 2a) ....	142
15.8.2 Normobaria (pamięć - Pretest 2) vs. hiperbaryczne powietrzne (pamięć - Badanie 2b) ....	145
15.8.3 Normobaria (uwaga intensywna - Pretest 3) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga intensywna - Badanie 2a) ....	148
15.8.4 Normobaria (uwaga ekstensywna - Pretest 5) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga ekstensywna - Badanie 2a) ....	149

15.8.5 Normobaria (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Pretest 1 + Pretest 2) vs. hiperbaryczne powietrzne (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Badanie 2b) . . . . .	150
15.8.6 Normobaria (uwaga ekstensywna - Pretest 5) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga ekstensywna - Badanie 2b) . . . . .	152
15.9 Interpretacja wyników i dyskusja. . . . .	153
15.9.1 Pamięć długotrwała. . . . .	153
15.9.1.1 Liczba odpamiętanych słów. . . . .	153
15.9.1.2 Liczba błędnie odpamiętanych słów . . . . .	156
15.9.1.3 Walencja emocjonalna odpamiętanego materiału. . . . .	157
15.9.4 Uwaga intensywna i ekstensywna. . . . .	161
15.9.5 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze. . . . .	163
15.9.6 Funkcjonowanie grafomotoryczne. . . . .	167
16 Badanie 3a i 3b: badania grup kontrolnych (helioks - 20% O <sub>2</sub> i 80% He, 5 ATA) . . . . .	168
16.1 Cel badania. . . . .	168
16.2 Hipotezy badawcze. . . . .	169
16.3 Osoby badane. . . . .	171
16.4 Plan badawczy. . . . .	175
16.5 Procedura badawcza. . . . .	175
16.6 Profil dekompresyjny (profil nurkowania) . . . . .	177
16.7 Analizy statystyczne. . . . .	177
16.8 Wyniki. . . . .	177
16.8.1 Hiperbaryczne powietrze (Badanie 2a) vs. helioks (Badanie 3a) . . . . .	177
16.8.2 Hiperbaryczne powietrze (Badanie 2b) vs. helioks (Badanie 3b) . . . . .	181
16.8.3 Normobaria (pamięć - Pretest 1) vs. helioks (pamięć - Badanie 3a) . . . . .	186

16.8.4 Normobaria (pamięć - Pretest 2) vs. helioks (pamięć - Badanie 3b) . . .	188
16.8.5 Normobaria (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Pretest 1 + Pretest 2) vs. helioks (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Badanie 3b) . .	190
16.9 Interpretacja wyników i dyskusja. . . . .	191
16.9.1 Uwaga intensywna i ekstensywna. . . . .	191
16.9.2 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - normobaria vs. helioks. . . . .	192
16.9.3 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - normobaria vs. helioks vs. hiperbaryczne powietrze. . . . .	196
16.9.4 Pamięć długotrwała. . . . .	199
16.9.4.1 Liczba błędnie odpamiętanych słów. . . . .	200
16.9.4.2 Walencja emocjonalna odpamiętanego materiału. . . . .	200
16.9.4.3 Liczba odpamiętanych słów. . . . .	206
17 Model lęk-stres-narkoza. . . . .	208
17.1 Funkcjonowanie pamięci w ujęciu modelu lęk-stres-narkoza. . . . .	213
17.2 Funkcjonowanie pamięci długotrwałej w ujęciu modelu lęk-stres-narkoza- środowisko - podsumowanie. . . . .	217
18 Ograniczenia metodologiczne badań pamięciowych. . . . .	220
19 Badanie 4 - badanie pretestowe w warunkach podwodnych. . . . .	222
19.1 Cel badania i hipotezy badawcze. . . . .	222
19.2 Osoby badane. . . . .	222
19.3 Plan badawczy. . . . .	222
19.4 Procedura badawcza. . . . .	222
19.5 Analizy statystyczne i wyniki. . . . .	223
19.6 Wnioski i implikacje praktyczne. . . . .	223
20 Badanie 5 - badanie eksperymentalne w warunkach podwodnych. . . . .	227

20.1 Cel badania. ....	227
20.2 Hipotezy badawcze. ....	228
20.3 Osoby badane. ....	228
20.4 Plan badawczy. ....	229
20.5 Procedura badawcza. ....	232
20.6 Analizy statystyczne. ....	233
20.7 Wyniki. ....	234
20.8 Interpretacja wyników i dyskusja. ....	236
21 Ograniczenia metodologiczne badań przeprowadzonych w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych. ....	241
22 Zakończenie. ....	242
23 Bibliografia. ....	246

## **Streszczenie**

Narkoza azotowa jest stanem upośledzenia psychomotorycznego i poznawczego spowodowanego ekspozycją na zwiększone ciśnienie otoczenia, z użyciem mieszanin oddechowych zawierających azot. Zjawisko to jest związane z wysyceniem tkanki mózgowej azotem, z następującą depresją ośrodkowego układu nerwowego. Do narkozy może dojść w trakcie zarówno nurkowań rekreacyjnych, jak i podczas licznych aktywności zawodowych. Narkoza azotowa stanowi istotne ryzyko błędów popełnianych w warunkach hiperbarycznych, które mogą skutkować zagrożeniem zdrowia i życia.

Na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej wykonano obszerny przegląd piśmiennictwa dotyczącego zagadnienia, a także przeprowadzono szereg badań w warunkach normobarycznych, w komorze hiperbarycznej, a także w warunkach podwodnych. W trakcie eksperymentów oceniano pamięć długotrwałą - ogólną liczbę odpamiętanych słów, liczbę odpamiętanych słów, które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania, a także charakter odpamiętanego materiału pod kątem walencji emocjonalnej. Użyto również baterii testów ewaluujących uwagę wzrokową i funkcje wykonawcze.

W toku badań potwierdzono wcześniej uzyskane wyniki o podatności procesu kodowania na zaburzenia spowodowane narkozą azotową. Po raz pierwszy stwierdzono, że materiał werbalny zapamiętany w warunkach normobarycznych może być gorzej przypominany w nadciśnieniu, w granicach dopuszczalnych głębokości dla nurkowań powietrznych. Nie stwierdzono, aby odpamiętywanie słów, które nie pojawiły się w materiale do zapamiętania stanowiło istotną komponentę zaburzeń procesów pamięciowych. Zaobserwowano z kolei szczególną podatność słów neutralnych na zaburzenia spowodowane narkozą. Potwierdzono, że wszystkie funkcje wykonawcze są wrażliwe na wpływ narkozy. Wreszcie, uzyskane wyniki sugerują istnienie różnic w funkcjonowaniu uwagi i działaniu funkcji wykonawczych, w zależności od tego czy ekspozycja na nadciśnienie ma miejsce w warunkach komory hiperbarycznej czy w środowisku podwodnym.

## 2 Wprowadzenie

Psychologia jako nauka bada funkcjonowanie i wzajemne relacje różnych składowych aparatu psychicznego człowieka. Absolutną większość badań z zakresu psychologii eksperymentalnej przeprowadzono w typowych warunkach środowiskowych (temperatura pokojowa, normalne ciśnienie, powietrze jako czynnik oddechowy itd.). We wspomnianych badaniach warunek „normalności” lub „typowości” otoczenia (pod względem fizykochemicznym) jest milcząco przyjmowany jako pewnik - w bardzo niewielu artykułach pojawia się informacja o temperaturze czy ciśnieniu, które panowało w dniu eksperymentu w sali laboratoryjnej. W wielu przypadkach wpływ warunków otoczenia na funkcjonowanie człowieka można uznać za pomijalny, należy jednak pamiętać, iż czynniki takie jak: wysoka temperatura otoczenia w nieklimatyzowanej sali w czy niskie ciśnienie atmosferyczne panujące w dniu badania mogą być ukrytymi zmiennymi zakłócającymi. Przykładowo, Pilcher, Nadler i Busch (2002) opublikowali metaanalizę badań dotyczących wpływu wysokiej i niskiej temperatury na funkcjonowanie poznawcze człowieka. Autorzy stwierdzili, że czynności poznawcze ulegają istotnemu zaburzeniu już w temperaturze otoczenia wynoszącej 32°C. Power i in. (2011) w swoim badaniu dowiedli, że zanieczyszczenie środowiska (spowodowanego przez ruch uliczny - niewielka zmiana składu czynnika oddechowego) negatywnie wpływa na funkcjonowanie aparatu poznawczego u badanych powyżej 50 roku życia (autorzy do badania użyli między innymi MMSE - *Mini-Mental State Examination*). Sato, Inagaki, Kusui, Yokosuka i Ushida (2019) w badaniu na modelu zwierzęcym (myszy) zaobserwowali zmianę aktywności neuronalnej w obrębie jądra przedśionkowego przy spadku ciśnienia otoczenia o 40 hektopaskali (40 hPa). Autorzy sugerują, że podobna zmiana aktywności w obrębie ośrodkowego układu nerwowego (pień mózgu) może mieć wpływ na spadek samopoczucia i wydajności indukowany niskim ciśnieniem otoczenia u ludzi. Podsumowując, nieznaczne fluktuacje parametrów fizykochemicznych otoczenia mogą w istotny sposób wpływać na funkcjonowanie somatyczne i psychiczne.

Człowiek nie przebywa jednak wyłącznie w typowych (normalnych) warunkach środowiskowych. W czasie licznych aktywności zawodowych lub rekreacyjnych może dochodzić do ekspozycji na ekstremalne i nienaturalne czynniki zewnętrzne. Nasz gatunek jest ewolucyjnie przystosowany do życia w dość wąskim zakresie parametrów fizykochemicznych otoczenia, takich jak temperatura, składniki mieszaniny oddechowej, ciśnienie otoczenia itd., co implikuje fakt, że nawet niewielkie i typowe dla danego klimatu zmiany w obrębie tych

czynników mogą wpływać na przebieg procesów fizjologicznych czy poznawczych. Każda nienaturalnie duża zmiana wspomnianych parametrów może z kolei implikować następstwa patofizjologiczne. Psycholodzy badają wpływ ekstremalnych czynników środowiskowych, na przykład wpływ bardzo niskich i bardzo wysokich ciśnień otoczenia, na funkcjonowanie różnych składowych aparatu psychicznego. Tego typu badania są prowadzone zarówno w warunkach rzeczywistych (np. Base Camp, Mount Everest, 5300 metrów nad poziomem morza (Griva i in., 2017) czy 60 metrów pod powierzchnią wody (Baddeley i Flemming, 1967) lub też w specjalnych konstrukcjach mających na celu indukowanie ciśnienia otoczenia panującego na danej wysokości czy głębokości (odpowiednio: komory hipobaryczne (De Bels i in., 2019) i komory hiperbaryczne (Fowler i Ackles, 1975)). Wspominany rodzaj badań ma na celu odpowiedź na pytanie: „które zmienne psychiczne są wrażliwe na nienaturalnie duże zmiany danego czynnika środowiskowego?”. Wnioski z omawianego nurtu badań psychologicznych służą do optymalizacji szkolenia między innymi pilotów, alpinistów, himalaistów i żołnierzy wojsk specjalnych (warunki skrajnie niskiego ciśnienia), a także pływaczy i pracowników wykonujących swoje obowiązki zawodowe w warunkach bardzo wysokiego ciśnienia. Konkluzje z tego rodzaju badań naukowych mogą mieć istotny wpływ na maksymalizację bezpieczeństwa w trakcie przebywania w nienaturalnych i zagrażających zdrowiu i życiu warunkach zewnętrznych. W niniejszej rozprawie doktorskiej postanowiono zbadać wpływ wysokiej wartości ciśnienia otoczenia na funkcjonowanie psychiczne człowieka.

## **2.1 Ryzyko związane z aktywnością podwodną. Narkoza azotowa.**

Nurkowanie poza zagrożeniami typowymi dla aktywności podwodnej takimi jak tonięcie czy hipotermia (wychłodzenie) jest związane z niebezpieczeństwami wynikającymi z ekspozycji na zwiększone ciśnienie otoczenia (Piechocki i Janus, 2015). Jednym z takich niebezpieczeństw jest narkoza azotowa, której wpływ na funkcjonowanie wybranych aspektów aparatu poznawczego człowieka stanowi temat niniejszej rozprawy. Narkoza azotowa (pot. upojenie głębinowe, ekstaza głębin, efekt Martini, ang. *nitrogen narcosis*, pot. ang. *rapture of the depths*, *Martini effect*) to zespół zmian somatycznych i psychicznych spowodowanych oddychaniem mieszaninami oddechowymi zawierających azot, w trakcie ekspozycji na nadciśnienie (Krzyżak, 2006). Upraszczając - im głębiej zanurza się pod wodę płucone (a więc im bardziej wzrasta ciśnienie otoczenia), używając do tego celu mieszanin oddechowych zawierających azot, tym więcej azotu rozpuszcza się w jego ciele, co powoduje depresję



ośrodkowego układu nerwowego i globalne pogorszenie funkcjonowania poznawczego i psychomotorycznego. Narkoza azotowa w trakcie nurkowań w zakresie tzw. limitów głębokościowych (maksymalnych dopuszczalnych głębokości dla danej mieszanki oddechowej) nie powoduje np. utraty przytomności, która mogłaby prowadzić do tonięcia. Zagrożające z kolei są następstwa nieprawidłowych działań, opóźnienie działań i/lub brak działań pod wpływem narkozy azotowej (za: Grover i Grover, 2014; Clark, 2015). Według niektórych źródeł nawet 6-9% podwodnych zgonów u płetwonurków jest spowodowanych przez błędy popełnione w stanie narkozy (za: Grover i Grover, 2014). Należy także wspomnieć o trudnych do oszacowania kosztach związanych z błędami popełnianymi w trakcie pracy w warunkach hiperbarycznych (zarówno w trakcie nurkowań podwodnych, jak i podczas ekspozycji „suchych” (ang. *dry chamber exposure*), na przykład w warunkach komór hiperbarycznych), z akcjami ratunkowymi, hospitalizacją, repatriacjami medycznymi, czy rentami w przypadku nieletalnych wypadków nurkowych. Na szczególną uwagę zasługują potencjalne błędy (i ich powikłania) popełnione przez personel medyczny w trakcie terapeutycznych/ratunkowych sprężeń w komorze hiperbarycznej. Wszystkie te czynniki sprawiają, że warto badać zagadnienie jakim jest narkoza azotowa, między innymi celem maksymalizacji bezpieczeństwa i minimalizacji szeroko pojętych kosztów przebywania ludzi w warunkach nadciśnienia.

## 2.2 „Suche” ekspozycje hiperbaryczne

Należy wspomnieć, że termin „nurkowanie”, zarówno w środowisku płetwonurków, jak i w piśmiennictwie naukowym dotyczącym tego zagadnienia, odnosi się zarówno do podwodnej aktywności człowieka, jak i do przywoływanych powyżej ekspozycji „suchych” (Krzyżak, 2006). „Suche” ekspozycje hiperbaryczne odbywają w komorach hiperbarycznych lub innych konstrukcjach, które zostaną skrótowo omówione w niniejszym rozdziale. Podstawowa wiedza z tego zakresu jest niezbędna, aby rozumieć gdzie może dochodzić do rozwoju narkozy azotowej, a także aby wiedzieć gdzie i jak wykonuje się większość badań z zakresu wpływu narkozy azotowej na funkcjonowanie poznawcze i psychomotoryczne.

Komora hiperbaryczna jest stalową konstrukcją w kształcie cylindra, która umożliwia tzw. tlenoterapię hiperbaryczną (ang. HBO lub HBOT, *hyperbaric oxygen therapy*) lub leczenie rekompresyjne (ang. *recompression therapy*) - leczenie tlenem i/lub powietrzem w warunkach zwiększonego ciśnienia otoczenia (Piechocki, Janus i Nielepiec-Jałosńska 2012; Chin, Joo,

Ninokawa, Popa i Covington, 2017). Wskazania, przeciwwskazania i powikłania tlenoterapii hiperbarycznej autor szczegółowo opisuje między innymi w artykule „*Tlenoterapia hiperbaryczna - wskazania, przeciwwskazania i powikłania. Opis pierwszych w Polsce ćwiczeń postępowania w stanach nagłych związanych z leczeniem tlenem hiperbarycznym*” (Piechocki, Janus, Żyła i Gałązkowski, 2015). Jak już wspomniano, na narkozę azotową (ze wszelkimi tego konsekwencjami) narażony jest personel lekarsko-pielęgniarski przebywający w komorach hiperbarycznych w trakcie sprężen terapeutycznych. Przykładowo, pacjenci zatruci tlenkiem węgla są sprężani do ciśnienia 2,5 atmosfery absolutnej (ATA), a płuwonurkowie po wypadkach nurkowych do ciśnienia 6 ATA (co odpowiada głębokości odpowiednio 15 i 50 metrów pod powierzchnią wody)<sup>1</sup> (Piechocki i in., 2012; Chin i in., 2017). Co istotne z punktu widzenia niniejszej rozprawy - w komorach hiperbarycznych można prowadzić badania naukowe z zakresu wpływu narkozy azotowej na funkcjonowanie psychiczne człowieka.

W warunkach „suchej” hiperbarii pracują także robotnicy w dzwonach nurkowych (specjalistycznych konstrukcjach, które są wypełniane sprężonym powietrzem umożliwiając tym samym pracę pod wodą) i w TBM (ang. *Tunnel Boring Machine* - maszyna służąca do drążenia tuneli). Przykładowo w trakcie budowy II linii warszawskiego metra (przy pomocy TBM) robotnicy pracowali w warunkach 3,7 atmosfery absolutnej (ATA), co odpowiada głębokości 27 metrów pod powierzchnią wody (Piechocki i Janus, w trakcie publikacji). W trakcie budowy tunelu łączącego duńskie wyspy (ang. *Great Belt Tunnel*) trzystu dwudziestu robotników uczestniczyło łącznie w 9018 pracach w warunkach nadciśnienia, będąc narażonym na ciśnienie do 3,91 ATA (co odpowiada głębokości do 29,1 metra pod powierzchnią wody) (Andersen, 2002). W ramach *The Western Scheldt Tunneling Project* (Holandia), robotnicy pracowali w warunkach 3,9-4,4 ATA (ciśnienie panujące na głębokości 29-34 m pod powierzchnią wody) (Van Rees Vellinga, Verhoeven, Van Dijk i Sterk, 2016). Wreszcie - zwiększone ciśnienie otoczenia panuje w habitatach, podwodnych konstrukcjach umożliwiających płuwonurkom wypoczynek i przygotowanie się do pracy w trakcie wielodniowych prac podwodnych (Crosson, 1993).

Aby zrozumieć kiedy dochodzi do rozwoju narkozy azotowej i aby poznać specyfikę prowadzenia badań naukowych w warunkach nadciśnienia, należy posiadać podstawową wiedzę z zakresu typów współcześnie wykonywanych nurkowań. Wspomniane zagadnienie zostanie pokrótce omówione w następnym akapicie.

---

<sup>1</sup> Przedstawiona informacja jest znacznie uproszczona. W praktyce stosuje się różne tzw. tabele dekompresyjne, w zależności od stanu pacjenta (por. Kot, 2018).

### 2.3 Rodzaje nurkowania

Nurkowanie jest dużo starsze niż nasz gatunek (łac. *homo sapiens sapiens*). Archeolodzy twierdzą, że już człowiek neandertalski (neandertalczyk, łac. *homo sapiens neanderthalensis* lub *homo neanderthalensis*) nurkował na wstrzymanym oddechu w celu zdobycia pożywienia (Krzyżak, 2006). Omówienie bogatej (i niejednokrotnie tragicznej) historii nurkowania wykracza poza zakres niniejszej rozprawy doktorskiej. Można się z nią zapoznać czytając między innymi wielokrotnie cytowaną w tej pracy książkę *Medyna Nurkowa* (Krzyżak, 2006). Pojedyncze, istotne fakty, kluczowe dla pełnego przedstawienia tematu rozprawy zostaną umieszczone w odpowiednich akapitach.

Nurkowanie może się odbywać zarówno w celach rekreacyjnych, jak i zawodowych. Profesjonalne nurkowania są wykonywane na potrzeby prac inżynieryjno-budowlanych, a także w celach naukowych (biologia, speleologia, geologia, archeologia powodna itd.), ratunkowych (grupy poszukiwawczo-ratownicze w obrębie Straży Pożarnej lub innych jednostek), bojowych (grupy płetwonurkowe w obrębie wojsk specjalnych), saperskich itd. Warto zwrócić uwagę, iż nurkowanie jest coraz popularniejszym sposobem rekreacji, jednakże brakuje precyzyjnych danych dotyczących liczby ludzi uprawiających ten sport. W 2013 roku obliczono, iż na świecie było około 6 milionów płetwonurków, którzy regularnie nurkowali (Diving Equipment and Marketing Association, 2013). Dziś może być ich znacznie więcej, co jest związane z coraz większą dostępnością i niższą ceną sprzętu, większą liczbą instruktorów i coraz większą liczbą tzw. nurkowisk (opisanych miejsc do nurkowania). Co roku wzrasta także liczba profesjonalnych (zawodowych) nurkowań.

Obecnie nurkowanie można podzielić na cztery typy. Podziału tego można dokonać w zależności od tego czy ma miejsce oddychanie sprężonymi gazami w warunkach nadciśnienia czy nie, a w przypadku oddychania sprężonym czynnikiem oddechowym - w zależności od jego typu (składu) i czasu pobytu w nadciśnieniu. Wyróżnić można: nurkowanie na zatrzymanym oddechu (ang. *freediving*), nurkowanie powietrzne, nurkowanie mieszankowe i nurkowanie saturowane (Olszański i Siermontowski, 2003; Krzyżak, 2006).

Innym podziałem może być podział na: nurkowanie rekreacyjne - tj. hobbystyczne/sportowe, wykonywane w absolutnej większości z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego i nurkowanie techniczne - tj. długotrwałe, głębokie i skomplikowane logistyczne nurkowania z użyciem różnych sztucznych mieszanin oddechowych, wymagające doskonałego przygotowania teoretycznego, sprzętowego i proceduralnego.

Skrótowa charakterystyka sprzętu nurkowego (aparaty oddechowe i skafandry nurkowe) zamieszczono w Załączniku 1. Jakkolwiek znajomość sprzętu używanego do nurkowania nie jest niezbędna do podstawowego zrozumienia zjawiska narkozy azotowej, pozwala jednak na zapoznanie się z pewnymi trudnościami metodologicznymi, które są związane z badaniem omawianego zagadnienia.

Poniżej zostaną skrótkowo omówione rodzaje współcześnie wykonywanych nurkowań, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości lub braku możliwości wystąpienia narkozy azotowej w trakcie ekspozycji na nadciśnienie.

### **2.3.1 Nurkowanie z zatrzymanym oddechem (freediving)**

Jak już wspomniano, nurkowanie z zatrzymanym oddechem jest historycznie pierwszą techniką nurkowania, wykonywaną bez jakiegokolwiek aparatu oddechowego. W trakcie nurkowań na zatrzymanym oddechu nie występuje zjawisko narkozy azotowej (brak oddychania pod wodą sprężonymi mieszaninami oddechowymi zawierającymi azot).

### **2.3.2 Nurkowanie powietrzne**

Nurkowanie ze sprężonym powietrzem jako czynnikiem oddechowym jest obecnie najczęstszym rodzajem nurkowania. Nurkowanie z użyciem sprężonego powietrza jest związane z ryzykiem rozwoju narkozy azotowej, która stanowi temat niniejszej rozprawy doktorskiej. W tym miejscu warto dodać, iż PADI (ang. *Professional Association of Diving Instructors*) ustalił dla zrzeszonych płetwonurków limit głębokości nurkowań rekreacyjnych na 40 metrów (5 ATA), a CMAS (fr. *Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques*) na 50 metrów pod powierzchnią wody (6 ATA).

### **2.3.3 Nurkowanie mieszankowe**

Nurkowania mieszankowe to nurkowania z użyciem sztucznych mieszanin oddechowych. Najpopularniejszymi z nich są mieszaniny azotowo-tlenowe (pl. nitroks, ang. *nitrox* od *nitrogen-oxygen* lub EAN<sup>2</sup>, *enriched air nitrox*), mieszaniny helowo-tlenowe (pl. helioks, ang. *heliox* od *helium-oxygen*) i mieszaniny helowo-tlenowo-azotowe (pl. trimiks, ang. *trimix*). W określonych sytuacjach mieszaniny te mają przewagę nad nurkowaniem z użyciem sprężonego powietrza (Olszański i Siermontowski, 2003; Krzyżak, 2006). Nurkowanie z

---

<sup>2</sup> Powszechnie przyjmuje się oznaczenie EANxx, gdzie „xx” oznacza procentowy udział tlenu w mieszaninie oddechowej (np. EAN32, co oznacza mieszaninę składającą się z 32% tlenu i 68% azotu).

użyciem sztucznych mieszanin oddechowych zawierających azot (nitroks, trimiks) jest związane z ryzykiem rozwoju narkozy azotowej.

#### **2.3.4 Nurkowania saturowane**

Nurkowania saturowane są rodzajem nurkowań zawodowych, które wykonuje się w przypadku konieczności wykonywania długotrwałych prac podwodnych lub badań naukowych na dużych głębokościach. Upraszczając - od pewnej głębokości cykliczne nurkowania w celu wykonania określonej pracy lub obserwacji badawczej są bardzo drogie, nieefektywne i uciążliwe dla płetwonurka, ze względu na długotrwałe procedury dekompresyjne (procedury „wynurzeniowe”). W przebiegu nurkowania saturowanego, płetwonurkowie przez kilka dni lub tygodni mieszkają pod wodą w tzw. habitacie, który opuszczają aby wykonać określone zadanie. W habitacie panuje ciśnienie odpowiadające ciśnieniu panującemu na głębokości na jakiej ma być wykonana dana praca lub obserwacja badawcza (Krzyżak, 2006). Ten typ nurkowania wykonuje się również przy użyciu (między innymi) sztucznych mieszanin oddechowych zawierających azot, co stanowi ryzyko rozwoju narkozy azotowej (Logie i Baddeley, 1983). Warto dodać, iż Abraini, David, Vallée i Risso (2016) wyliczyli, że teoretyczna, maksymalna głębokość jaką człowiek mógłby osiągnąć wynosi ~1000 metrów (~101 atmosfer absolutnych). Do chwili obecnej, w trakcie nurkowania saturowanego, udało się sprężyć człowieka w komorze hiperbarycznej do ciśnienia 71,1 ATA (co odpowiada głębokości 701 metrów pod powierzchnią wody) (Lafay, Barthelemy, Comet, Frances i Jammes, 1995).

Podsumowując powyższe rozważania - liczne grupy zawodowe są narażone na działanie wysokiego ciśnienia otoczenia, a ponad 6 milionów płetwonurków regularnie uprawia nurkowania rekreacyjne. Absolutna większość nurkowań odbywa się z użyciem mieszanin oddechowych zawierających azot, co stanowi ryzyko rozwoju narkozy azotowej. Stan narkozy może być predyktorem wypadków nurkowych stanowiących zagrożenie dla zdrowia i życia. Nie bez znaczenia są również błędy lub zaniechania popełnione w trakcie wykonywania zadań zawodowych w warunkach nadciśnienia, ze szczególnym uwzględnieniem błędów medycznych popełnionych przez personel lekarsko-pielęgniarski w trakcie ekspozycji leczniczych w komorach hiperbarycznych. Z tego powodu warto badać zagadnienie narkozy azotowej, aby optymalizować szkolenie, maksymalizować bezpieczeństwo i zredukować koszty związane z pobytem w nienaturalnych i zagrażających warunkach hiperbarycznych.

## 2.4 Narkoza azotowa a funkcjonowanie psychiki

Ze stosunkowo niewielkiej liczby badań naukowych można wyciągnąć wniosek, że narkoza azotowa może mieć wpływ na prawie każdą składową aparatu psychicznego człowieka. Narkoza może wpływać na motywację do wykonania zadania (por. Adolfson i Muren, 1965), procesy emocjonalne (por. Löfdahl, Andersson i Bennett, 2013), czynności psychomotoryczne (por. Poulton, Carpenter i Catton, 1963), funkcjonowanie poznawcze (por. Steinberg i Doppelmayer, 2017), a także na „zachowanie jako całość” (ang. *behavior*; por. Behnke, Thomson i Motley, 1935). W niniejszej rozprawie doktorskiej postanowiono zbadać wpływ hiperbarycznego azotu na wybrane czynności poznawcze, istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa w trakcie przebywania w warunkach nadciśnienia (pamięć długotrwała, uwaga wzrokowa i funkcje wykonawcze). Wybór wspomnianych zmiennych był motywowany także bardzo niewielką liczbą badań z zakresu psychologii eksperymentalnej, które oceniałyby przywoływane zmienne. Co równie ważne, część badań z zakresu funkcjonowania pamięci długotrwałej została przeprowadzona przy użyciu nieoptymalnej metodologii badawczej, co stanowiło asumpt do ich replikacji (z użyciem zmodyfikowanej metodologii).

Uwaga wzrokowa (ze szczególnym uwzględnieniem przeszukiwania pola percepcyjnego), funkcje wykonawcze i pamięć długotrwała będą stanowić zmienne badane w trakcie eksperymentów przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej i z tego powodu w dalszej części tekstu umieszczono zarys teoretyczny dotyczący wspomnianych funkcji poznawczych (uwzględniający również specyfikę narzędzi badawczych użytych w eksperymentach). Testy oceniające proces przeszukiwania będą jednocześnie testami wymagającymi pewnych czynności manualnych i w związku z tym, osobny akapit zostanie poświęcony czynnościom psychomotorycznym.

### 3 Uwaga - zarys teorii

#### 3.1 Uwaga - wprowadzenie

Uwaga (ang. *attention*) jest funkcją poznawczą odpowiedzialną za selekcjonowanie informacji ważnych od informacji nieważnych i/lub dystrakcyjnych. Uwaga odpowiada także za ukierunkowanie i ocenę ilości zasobów poznawczych niezbędnych do zrealizowania danego zadania, podtrzymywanie zaangażowania poznawczego, a także odpowiedni przebieg procesów poznawczych. Jednocześnie system ten ma za zadanie zapobieganie „przeładowaniu poznawczemu”, które może być spowodowane przez nadmiar bodźców. Uwaga ogranicza liczbę odbieranych informacji, przez co zmniejsza wysiłek związany z podejmowaniem niektórych działań. W przypadku gdy organizm ludzki reagowałby na wszystkie docierające do niego sygnały, jego zachowanie byłoby niezwykle chaotyczne i dezadaptacyjne - istniało by ryzyko bardzo szybkiego „przeładowania poznawczego”, niepotrzebnej straty energii, a także wysokie prawdopodobieństwo przeoczenia ważnego bodźca (zarówno zewnętrznego, jak i wewnętrznego) (Maruszewski, 2016; Nęcka, Orzechowski i Szymura, 2017). W tym miejscu warto dodać, iż na stopień zaangażowania uwagi w dane czynności wpływa proces automatyzacji (Maruszewski, 2016). Automatyzacja (ang. *automation*) jako proces polega na wzroście poziomu (jakości) wykonania danej czynności (psychomotorycznej lub poznawczej) poprzez jej wielokrotne wykonywanie (przy zachowanej spójności bodziec-reakcja) (Szymura, Słabosz, 2002). Wyróżnia się uwagę słuchową (ang. *auditory attention*) i uwagę wzrokową (ang. *visual attention*), jednakże w warunkach nie-laboratoryjnych oba komponenty uwagi ze sobą ściśle współpracują (Maruszewski, 2016).

Należy wspomnieć, iż informacje są selekcjonowane już na poziomie aparatu sensorycznego. Organizm ludzki w toku ewolucji wyspecjalizował się w odbieraniu niektórych bodźców, przy jednoczesnym ignorowaniu lub nieprzetwarzaniu innych. Przykładowo, narząd wzroku odbiera pewien bardzo wąski zakres fal elektromagnetycznych, a mózg w toku ewolucji wykształcił schemat informowania o charakterze bodźców które spostrzegamy. Oznacza to, iż ostatecznie człowiek otrzymuje informację, iż dany obiekt jest „żółty”, jednak nie otrzymuje informacji, że jest na przykład „żółty z domieszką barw ze spektrum ultrafioletowego”<sup>3</sup>. Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku na przykład zmysłu słuchu (człowiek słyszy

---

<sup>3</sup> Cudzysłów został użyty ze względu na fakt, iż w sensie fizycznym kolory nie istnieją do momentu, aż człowiek nie spojrzy na jakiś obiekt - dana część materii wydziela/odbija pewną wiązkę fotonów, którą mózg (w odpowiednim, wąskim zakresie spektrum) interpretuje jako dany kolor.

bardzo wąski zakres ze spektrum fal akustycznych) czy zmysłu dotyku (informacje są odbierane i interpretowane gdy nacisk na skórę przekracza pewien krytyczny poziom) (Maruszewski, 2016). Omawiane zagadnienie jest bardzo ważne z punktu widzenia przebywania w nienaturalnych warunkach środowiskowych. Przykładowo, w wodzie, wraz ze wzrostem głębokości, coraz większe spektrum światła widzialnego zostaje pochłonięte, co sprawia, iż do aparatu sensorycznego płetwonurka docierają tylko wybrane, a także nienaturalne „wyblakłe” kolory. Analogicznie sytuacja wygląda w przypadku zmysłu słuchu - dźwięk w wodzie rozchodzi się około cztery razy szybciej, co sprawia, iż płetwonurek może mieć trudności z lokalizacją źródła dźwięku (Krzyżak, 2006). Podsumowując, funkcjonowanie procesów uwagowych może być zaburzone w trakcie pobytu w nienaturalnych warunkach środowiskowych już na poziomie aparatu sensorycznego, za co odpowiadają zmienione właściwości fizyczne otoczenia. Zagadnienie to zostanie rozwinięte w dalszej części tekstu.

Pole uwagi może zostać podzielone na pole centralne i pole peryferyjne (Maruszewski, 2016). Przykładowo, w sytuacji gdy człowiek idzie chodnikiem i jednocześnie czyta wiadomości przy użyciu telefonu komórkowego - w centrum jego uwagi (pole centralne) jest smartfon. Znaczna część bodźców, które znajdują się w polu peryferyjnym nie spowoduje zogniskowania pola uwagi centralnej w innym miejscu, jednakże część z nich posiada taki potencjał. Posługując się dalej przykładem czytania wiadomości przy użyciu telefonu komórkowego - bodziec potencjalnie zagrażający, który znajduje się w polu peryferyjnym, na przykład szybko zbliżający się samochód (ruch jest cechą analizowaną priorytetowo, por. dalsza część tekstu) może spowodować przeniesienie na niego pola uwagi centralnej (por. także *cocktail party phenomenon* w przypadku uwagi słuchowej) (Wood i Cowan, 1995; Nęcka i in., 2017).

Jednocześnie warto zwrócić uwagę na zakres uwagi (rozpiętość pola percepcyjnego), a przez to poziom przetworzenia bodźców. Uwaga może być skupiona (zogniskowana) w jednym miejscu lub też może obejmować duży obszar, co wiąże się z odpowiednio wysokim lub niskim poziomem przetworzenia informacji (tzw. uwaga intensywna i ekstensywna) (Kolańczyk, 1991). Przełączanie uwagi ekstensywnej w intensywną (proces ogniskowania) lub intensywnej w ekstensywną może być zarówno adaptacyjne, jak i dezadaptacyjne. Przykładem może być adaptacyjna koncentracja na wymagającym zadaniu (uwaga intensywna) vs. błąd fiksacji (ang. *fixation error*; por. Bracco, Videllier i Ramadori, 2009) na jednym aspekcie zadania i pomijanie innych, czasem krytycznie ważnych informacji (uwaga „zbyt” intensywna). Przykładowo, przyczyną katastrofy lotniczej, która miała miejsce w Stanach Zjednoczonych w 1978 roku,



było „zawężenie poznawcze” pilotów na jednej kontrolce i niezwracanie uwagi na niewielki poziom paliwa (National Transport Safety Board, 1978). Więcej informacji na ten temat umieszczono w Załączniku 2.

Należy także wspomnieć o czujności uwagi - procesie przedłużonej koncentracji uwagi nastawionej na wyszukanie określonego typu bodźców (Nęcka i in., 2017). Długotrwała koncentracja zasobów uwagowych prowadzi do spadku sprawności detekcji bodźców (Maruszewski, 2016).

Następnym wartym wspomnienia aspektem jest dyskusja dotycząca zasobów uwagi w przypadku wykonywania więcej niż jednego zadania jednocześnie („podzielność uwagi”). Kahneman (1973) w swoim modelu uwagi zakłada istnienie jednej puli zasobów uwagi - wykonywanie jednego zadania zawsze pogarsza wykonywanie drugiego. W opozycji do tej teorii stoi model Navona i Gophera (1979), który zakłada, że zasoby uwagowe są rozdzielone na konkretne modalności (wzrokowe, słuchowe i czuciowe). Wykorzystanie całych zasobów przeznaczonych dla danej modalności nie wpływa na ograniczenie zasobów przeznaczonych dla innej modalności.

Należy także wspomnieć, że konkretnych czynności poznawczych nie należy omawiać bez zaznaczenia interakcji pomiędzy różnymi składowymi aparatu psychicznego człowieka. Przykładowo, procesy pamięciowe wpływają na funkcjonowanie uwagi (i odwrotnie). Doskonale znane informacje nie wywołują skupienia uwagi (proces habituacji<sup>4</sup>). Analogicznie - uwaga może nie zostać skupiona na informacjach całkowicie sprzecznych z dotychczasową wiedzą, ze względu na ryzyko silnego konfliktu w obrębie procesów poznawczych i „przeładowania poznawczego”. Na funkcjonowanie uwagi wpływają także emocje - jeśli dana czynność powoduje pojawienie się istotnego napięcia emocjonalnego, na jej wykonanie zostaną przeznaczone większe zasoby uwagi. Jednakże warto wspomnieć, iż niektóre zaburzenia psychiczne (np. zaburzenia lękowe czy zaburzenia obsesyjno-kompulsyjne) mogą powodować dysfunkcyjne ogniskowanie uwagi na lęku i/lub na ruminacjach, co może istotnie interferować z wykonywanym zadaniem (Maruszewski, 2016).

---

<sup>4</sup> Przykładem procesu habituacji może być dźwięk sygnalizujący wystąpienie błędu w trakcie używania programu komputerowego. W przypadku pierwszego wystąpienia charakterystycznego dźwięku nastąpi koncentracja zasobów poznawczych użytkownika (sygnał alarmowy). Jednakże gdy okaże się, że sygnalizowany przez program błąd, który występuje w trakcie wykonywania ściśle określonej, powtarzalnej czynności nie powoduje negatywnych implikacji, uwaga w pewnym momencie przestanie być przełączana na zagadnienie potencjalnie zagrażającego błędowi.

W tym miejscu warto także rozróżnić zjawisko lęku i zjawisko strachu. Dokonanie tego podziału jest kluczowe w celu trafnej interpretacji wyników uzyskanych przed, w trakcie i po ekspozycji hiperbarycznej. Lęk jest spowodowany wyobrażeniami (na przykład tym, co się stanie w trakcie hipotetycznej, negatywnej i/lub zagrażającej sytuacji), natomiast strach pojawia się w przypadku realnego zagrożenia dla jednostki. Lęk może dezadaptacyjnie ogniskować uwagę (a przez to uszczuplać zasoby) na negatywnych myślach lub doznaniach płynących z ciała i uruchamiać serię kosztownych energetycznie mechanizmów radzenia sobie, strach natomiast powoduje adaptacyjne skupienie uwagi na realnie zagrażającym bodźcu (por. Buss, 2001).

Ostatnim czynnikiem, który może wpływać na funkcjonowanie uwagi (jak i każdej z omawianych poniżej składowych aparatu poznawczego) jest osobista motywacja jednostki, co także należy brać pod uwagę w trakcie projektowania eksperymentu (wysoka motywacja przy świadomości dotyczącej bycia sprawdzanym/obserwowanym i chęci wykonania zadania jak najlepiej vs. niska motywacja w przypadku gdy badany został niejako „zmuszony” do wzięcia udziału w badaniu) (Maruszewski, 2016). Należy także pamiętać, iż sama sytuacja eksperymentalna i wspomniana świadomość bycia obserwowanym/ocenianym, a także celowe lub przypadkowo wprowadzone zmienne (zmienne zakłócające) mogą wpływać na wykonanie przez badanego zadania (por. zjawisko zagrożenia stereotypem) (Bedyńska i Dreszer, 2006).

Niezmiernie ważnym aspektem optymalnego funkcjonowania uwagowego jest proces przeszukiwania pola percepcyjnego. Ze względu na fakt, iż zmienna ta będzie oceniana w trakcie badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy - zostanie ona scharakteryzowana w następnych akapitach. Przerzutność jako kolejna istotna funkcja uwagowa również zostanie omówiona poniżej, w trakcie omawiania funkcji wykonawczych.

### **3.2 Przeszukiwanie pola percepcyjnego**

Przeszukiwanie pola percepcyjnego (ang. *visual search*), można zdefiniować jako funkcję poznawczą umożliwiającą aktywne skanowanie środowiska w celu znalezienia konkretnego bodźca (spośród innych bodźców i/lub dystraktorów) (Treisman i Gelade, 1980). Poszukiwany obiekt może być określony jedną cechą (np. określony kolor) lub też koniunkcją wielu cech, na przykład określony kolor i określony rozmiar i określony kształt ( $p \wedge q \wedge r$ ). W przypadku gdy przeszukiwanie jest oparte na jednej cesze, obecność dystraktorów zwykle nie stanowi istotnej przeszkody. Przykładem może być przeszukiwanie pola percepcyjnego w celu lokalizacji niebieskich kwadratów, które znajdują się w otoczeniu kwadratów czerwonych.

Wyjątkiem może być jednak sytuacja, gdy dystraktor jest bardzo podobny do bodźca poszukiwanego. Wykazano, iż czas potrzebny na znalezienie danego obiektu zależy od liczby cech, które go charakteryzują, a także od tego jak bardzo bodziec dystrakcyjny jest podobny do bodźca, który osoba badana miała znaleźć (Treisman i Gelade, 1980; Nęcka i in., 2017). Wyszukiwane obiekty nie muszą jednakże stanowić koniunkcji cech (tj.  $p \wedge q$ ). Przeszukiwanie może się odbywać na zasadzie dysjunkcji: „p lub q”, „bądź p, bądź q”, „albo p, albo q” ( $p \vee q$ ). Warto także zwrócić uwagę, iż możliwe jest przeszukiwanie, które łączy w sobie koniunkcję i dysjunkcję, na przykład:  $(p \wedge q) \vee (r \wedge s)$ . W przypadku przeszukiwania przy pomocy koniunkcji cech ma miejsce przeszukiwanie sekwencyjne, a w przypadku przeszukiwania na zasadzie dysjunkcji - przeszukiwanie równoległe (Maruszewski, 2016).

Przeszukiwanie pola percepcyjnego może mieć charakter ekstensywny lub intensywny. Tryb ekstensywny charakteryzuje się szybkim tempem i mniejszą poprawnością selekcji informacji, co jest związane z płytkim poziomem przetwarzania materiału. Tryb intensywny z kolei, ze względu na głęboki poziom przetwarzania informacji, cechuje się wolniejszym tempem wykonania zadania i większą poprawnością detekcji. W tym miejscu warto również przywołać zagadnienie efektu przetargu szybkość-poprawność (ang. *speed-accuracy trade off*) - im większa szybkość wykonania zadania (warunkowana w tym przypadku płytszym poziomem przetworzenia informacji), tym mniejsza jego poprawność (Spieser, Servant, Hasbroucq i Burle, 2017; Ross, Czernecka i Szymura, 2011). Przeszukiwanie w trybie intensywnym jest przetwarzaniem sekwencyjnym (ograniczonym do następujących po sobie kolejnych bodźcach), natomiast przeszukiwanie w trybie ekstensywnym jest raczej holistyczne (obejmujące całe pole percepcyjne) (Ross i in., 2011). Aby zobrazować zagadnienie przeszukiwania pola percepcyjnego w trybie ekstensywnym i intensywnym warto przywołać eksperyment Ross i in. (2011), w trakcie którego użyto Testu Zegarków Marcjusza Moronia i Testu Gwiazdek autorstwa Czerneckiej, Ross i Szymury. Test Zegarków jest testem wydrukowanym na arkuszu A4, na którym umieszczono czterysta małych tarcz zegarowych w układzie: dwadzieścia rzędów, w każdym po dwadzieścia tarcz. Badany ma za zadanie w ciągu dwóch minut przeszukać arkusz testowy w celu lokalizacji zegarków przedstawiających konkretną godzinę. Początek i charakter przeszukiwania jest odgórnie ustalony - badany ma przeszukiwać pole percepcyjne od pierwszego do ostatniego rzędu, od lewej do prawej strony (tak jakby czytał). Po upływie dwóch minut osoba badana ma za zadanie zaznaczyć ostatnią analizowaną przez siebie ikonę. Test bada szybkość przetwarzania bodźców, liczbę poprawnych detekcji, liczbę fałszywych alarmów (liczbę fałszywych detekcji) i liczbę ominięć.

Test Zegarków wydaje się być dobrą miarą przeszukiwania pola percepcyjnego w intensywnym trybie przetwarzania. Drugi z testów (Test Gwiazdek) bada z kolei sprawność przeszukiwania pola percepcyjnego w trybie ekstensywnym. Test jest także wydrukowany na kartce formatu A4, na której umieszczono czterysta osiemdziesiąt gwiazdek. Badany patrząc na rozmieszczenie bodźców ma wrażenie przypadkowości umieszczenia gwiazdek, jednakże w rzeczywistości arkusz jest podzielony na osiemdziesiąt sektorów (każdy sektor zawiera sześć różnych gwiazdek). Osoba badana ma za zadanie w ciągu jednej minuty zlokalizować jak najwięcej gwiazdek spełniających kryteria wyszukiwania, mając przy tym dowolność w zakresie charakteru przeszukiwania pola percepcyjnego. Jedynym obostrzeniem jest początek przeszukiwania od środka arkusza (zaznaczonego symbolem „+”). W cytowanym eksperymencie rozwiązanie Testu Gwiazdek przebiegało szybciej - badani przetwarzali średnio 4,9 bodźców/sekundę w Teście Gwiazdek vs. 3,1 bodźców/sekundę w Teście Zegarków (Ross i in., 2011).

### **3.2.1 Przeszukiwanie pola percepcyjnego - przegląd wybranych badań**

W chwili pisania niniejszego akapitu, w wyszukiwarce PubMed przy użyciu kryterium wyszukiwania: tytuł + *visual search* znaleziono 1954 artykuły (najstarszy z 1948 roku). Omówienie tak dużej liczby wniosków z badań wykracza poza ramy niniejszej rozprawy doktorskiej. Z tego powodu zostaną skrótowo scharakteryzowane wybrane kierunki badań dotyczące omawianego zagadnienia. Ze względu na fakt, iż we wnętrzu komory hiperbarycznej nie wolno używać sprzętu elektronicznego niecertyfikowanego do pracy w warunkach nadciśnienia, nie znaleziono ani jednego badania z użyciem okulografu. Z tego powodu zrezygnowano z analizy piśmiennictwa analizującego ruch gałek ocznych.

Jednym z ważniejszych wniosków z badań wydaje się być fakt, iż niektóre bodźce znajdujące się w polu widzenia są uprzywilejowane względem innych. Przykładowo, bodźcem priorytetowym jest ruch (McLeod, Driver, Dienes i Crisp, 1991) i „nagłość” pojawienia się obiektu w polu widzenia (ang. *abrupt onset*) (Jonides i Yantis, 1988; Yantis i Hillstrom, 1994). Pierszeństwo analizy przez aparat poznawczy omawianych bodźców wydaje się spójne z paradygmatem psychoewolucyjnym - brak priorytetowości wspomnianych bodźców jest nieadaptacyjny, gdyż mogłoby narazić jednostkę na istotne straty. Innym uprzywilejowanym poznawczo bodźcem mogą być twarze. Simpson, Mertins, Yee, Fullerton i Jakobsen (2014) w swoim badaniu pokazywali uczestnikom eksperymentu szablon z wieloma ułożonymi symetrycznie kolorowymi zdjęciami. Zadaniem badanych było wyszukanie odpowiednio:

ludzkich twarzy, „twarzy” zwierząt, samochodów, a także motyli. Autorzy wykazali, że osoby badane wyszukiwały szybciej zdjęcia przedstawiające twarze człowieka, niż „twarze” zwierząt<sup>5</sup>. Warto również zacytować badanie które przeprowadzili Lobue i DeLoache (2008), w którym wykazano, iż dzieci w wieku przedszkolnym, a także dorośli wyszukiwali zagrażające bodźce (węże) szybciej niż bodźce niezagrażające (kwiaty, żaby i gąsienice), co również należy traktować jako adaptacyjną zdobycz ewolucyjną (która jednak w obecnych czasach ma marginalne znaczenie dla przetrwania). Innymi aspektami, które mogą mieć wpływ na przeszukiwanie mogą być także (choć nie tylko): „przestrzenność” bodźców (obecność bodźców trójwymiarowych vs. bodźców dwuwymiarowych) (Purcell i Stewart, 1991), symetria w relacji wyszukiwany obiekt-dystraktory (Wolfe i Friedman-Hill, 1992) czy rotacja bodźców (Müller i von Mühlennen, 1999).

### **3.2.2 Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie procesu przeszukiwania**

Proces przeszukiwania może być upośledzony zarówno poprzez naturalne procesy starzenia się, jak i przez na przykład choroby neurodegeneracyjne. Badania wykazały, iż osoby starsze istotnie gorzej przeszukują pole percepcyjne niż osoby młodsze. Może mieć to związek z między innymi: starzeniem się narządu wzroku (Harpur, Scialfa i Thomas, 1995; Kramer, Hahn, Irwin i Theeuwes, 1999), narastającymi wraz z wiekiem trudnościami w ignorowaniu informacji nieważnych (Rabbitt, 1965) czy wydłużonym czasem reakcji na bodźce (Lorenzo-López, Amenedo, Pascual-Marqui i Cadaveira, 2008). Do chwili obecnej przeprowadzono kilkanaście badań oceniających wpływ demencji, choroby Alzheimera i choroby Parkinsona na zdolność do przeszukiwania pola percepcyjnego (Parasuraman, Greenwood i Alexander, 1995; Greenwood, Parasuraman i Alexander, 1997; Filoteo, Williams, Rilling i Roberts, 1997; Mendez, Cherrier i Cymerman, 1997; Lubow, Dressler i Kaplan, 1999; Parasuraman, Greenwood i Alexander, 2000; Rösler i in., 2000; Tales i in., 2002; Tales, Muir, Jones, Bayer i Snowden, 2004; Cormack, Gray, Ballard i Tovée, 2004; Tales, Haworth, Nelson, Snowden i Wilcock, 2005; Rösler, Mapstone, Hays-Wicklund, Gitelman i Weintraub, 2005; Hao i in., 2005; Horowitz, Choi, Horvitz, Côté i Mangels, 2006; Uc i in., 2006; Mannan, Hodgson, Husain i Kennard, 2008; Laudate i in., 2012; Verleger i in., 2014; Landy i in., 2015). Przykładowo, Uc

---

<sup>5</sup> Niezwykle ciekawym zjawiskiem jest rozpoznawanie przez nasz umysł złożonych obiektów, które nie są twarzą, jako twarz, co spowodowało powstanie niezliczonej ilości iluzji optycznych. Fenomen ten można wytłumaczyć także przy użyciu paradygmatu psychoewolucyjnego - „fałszywy alarm” w postaci „dostrzeżenia” twarzy tam gdzie jej nie ma jest w konsekwencji mniej kosztowne, niż niewykrycie twarzy potencjalnego wroga.

i in. (2006) oceniali przeszukiwanie wzrokowe i rozpoznawanie znaków drogowych u kierowców z chorobą Parkinsona ( $N = 71$ ). W porównaniu do grupy kontrolnej ( $N = 151$ ), kierowcy z chorobą Parkinsona rozpoznawali mniej znaków drogowych, co w oczywisty sposób może istotnie wpłynąć na bezpieczeństwo drogowe. Tales i in. (2005) stwierdzili, że pacjenci cierpiący na chorobę Alzheimera ( $N = 12$ ) i pacjenci z łagodnym, amnestycznym zaburzeniem funkcji poznawczych ( $N = 13$ ) wypadają w testach przeszukiwania pola percepcyjnego istotnie gorzej niż grupa kontrolna ( $N = 20$ ). Pacjenci z chorobą Alzheimera z kolei wykazywali większe deficyty niż pacjenci z łagodnym zaburzeniem funkcji poznawczych (ang. *mild cognitive impairment*). Tales i in. (2004) stwierdzili, że istotnie gorsze wyniki w testach przeszukiwania u pacjentów z chorobą Alzheimera mogą wynikać zarówno z zaburzeń przerzutności uwagi (por. następny akapit), jak i z upośledzenia procesu przetwarzania poznawczego bodźców (przetwarzania pod kątem kryteriów przeszukiwania).

Przeszukiwanie pola percepcyjnego może być również zaburzone przez używki. Przykładowo, Moskowitz, Ziedman i Sharma (1976) wykazali, że alkohol upośledza proces przeszukiwania. Jest to istotna konkluzja, gdyż działanie narkozy azotowej bywa czasem porównywane do depresyjnego wpływu alkoholu na ośrodkowy układ nerwowy (por. dalsza część tekstu). Możliwym jest więc, iż przeszukiwanie jest funkcją poznawczą wrażliwą na zaburzenia w przypadku ekspozycji hiperbarycznej przy oddychaniu czynnikiem oddechowym zawierającym azot.

#### **4 Funkcje wykonawcze (funkcje zarządcze) - przerzutność, hamowanie dominującej reakcji i odświeżanie informacji w pamięci roboczej**

Funkcje wykonawcze (funkcje zarządcze, ang. *executive functions*) stanowią zespół funkcji poznawczych odpowiedzialnych za poznawczą kontrolę zachowania. Miyake i in. (2000) wyróżnili następujące funkcje wykonawcze: hamowanie dominującej reakcji (ang. *inhibition of prepotent responses, inhibition*), przerzutność (ang. *mental set shifting, shifting*), a także odświeżanie informacji w pamięci roboczej (ang. *information updating and monitoring, updating*). Poniżej zamieszczono skrótową charakteryzację wspomnianych zmiennych.

##### **4.1 Hamowanie**

Jak już wspomniano, ze względu na ogrom docierających do jednostki bodźców, aparat poznawczy musi dysponować odpowiednimi mechanizmami selekcji informacji. Jednym z nich jest proces hamowania, który ma na celu utrudnienie dostępu do informacji nieistotnych (które mogłyby interferować z danymi niezbędnymi do wykonania zadania), a także ograniczanie zbędnych czynności poznawczych i/lub behawioralnych (których wykonywanie mogłoby spowodować zjawisko „interferencji zasobowej”) (Nęcka i in., 2017).

Proces hamowania dominującej reakcji w sytuacji konfliktowej może być badany przy użyciu na przykład Testu Stroopa (Stroop, 1935), który został wykorzystany w jednym badaniu przeprowadzonym w warunkach nadciśnienia (por. dalsza część tekstu). Istotą testu jest rozbieżność semantyczno-kolorystyczna słów przedstawianych osobie badanej (Steinberg i Doppelmayer, 2017). Ze względu na fakt, iż proces czytania jest wysoce zautomatyzowany, czytanie słów zwykle zajmuje mniej czasu niż rozpoznawanie barw. Nazywanie kolorów w przypadku, gdy badany ma do czynienia ze wspomnianą powyżej niezgodnością znaczeniowo-kolorystyczną zajmuje o wiele więcej czasu, w porównaniu do sytuacji, gdy niezgodność nie występuje. Zjawisko to jest związane jest z koniecznością hamowania silnie zautomatyzowanej czynności, a także koniecznością nazwania koloru tuszu (który jest niespójny pod względem znaczeniowo-kolorystycznym), biorąc pod uwagę fakt, iż w procesie nauki czytania (a więc w procesie jego automatyzacji) istotną rolę pełni (do pewnego stopnia) proces ignorowania „warstwy wizualnej słowa” (na przykład czcionki, jej koloru czy wielkości), przy jednoczesnym zwracaniu uwagi na treść. Im silniejszymi i skuteczniejszymi mechanizmami kontroli poznawczej (ang. *cognitive control*) dysponuje dana osoba badana, tym proces hamowania dominującej reakcji w sytuacji konfliktowej zajmuje mniej czasu (Nęcka i in., 2017).

## 4.2 Przerzutność

Przerzutność jako proces polega na przełączaniu ogniska uwagowego z jednego zadania/bodźca na drugi (trzeci itd.) lub też z danego procesu poznawczego na inny. Zmiana charakteru wykonywania zadania jest kosztowne zarówno energetycznie, jak i czasowo - aparat poznawczy potrzebuje czasu, aby dostosować się do na przykład nowych kryteriów selekcji informacji. Jednocześnie zmiana charakteru wykonywania zadania może powodować ryzyko wystąpienia błędu (Nęcka i in., 2017). Rogers i Monsell (1995) ukuli termin „*task-set*”, który jest odpowiednio ustrukturyzowanym zestawem operacji poznawczych niezbędnych do wykonania zadania. Jako że różne zadania wymagają różnych *task-setów* - pomiędzy wykonywaniem zadań musi nastąpić ich (mniejsza lub większa) rekonfiguracja.

## 4.3 Odświeżanie informacji w pamięci roboczej (pamięci operacyjnej)

Pamięć robocza (ang. *working memory*) jest systemem, w którym wykonywane są bieżące operacje poznawcze. System ten w koncepcji Baddeleya (1992) składa się z czterech komponentów. Centralny systemu wykonawczy (ang. *central executive*) spełnia funkcję zarządczą - jest odpowiedzialny za koncentrowanie uwagi, odpowiednie rozdzielanie zasobów uwagowych, decydowanie o poziomie przetworzenia bodźców, a także za przełączanie uwagi. Pętla fonologiczna (pętla artykulacyjna, ang. *phonological loop*) jest odpowiedzialna za przetwarzanie informacji werbalnych, szkicownik wzrokowo-przestrzenny (ang. *visuospatial sketchpad*) odpowiada za przetwarzanie informacji wzrokowych, a bufor epizodyczny (ang. *episodic buffer*) spełnia rolę krótkotrwałego magazynu informacji dotyczących zdarzeń.

Pamięć operacyjna ma bardzo ograniczoną pojemność (por. Cowan, 2010) i krótko przechowuje informacje. Ze względu na dynamikę procesów poznawczych - część informacji musi być usuwana, a część aktualizowana, aby sprostać wymaganiom zadania i zapobiec zjawisku przeciążenia pamięci operacyjnej (Maruszewski, 2016). Czynności te (wprowadzanie nowych informacji i usuwanie informacji zbędnych lub przekazywanie danych do pamięci długotrwałej) składają się na proces odświeżania w pamięci roboczej.



#### 4.4 Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie działania funkcji wykonawczych

Mechanizmy kontrolne przetwarzania informacji znajdują się w przednich płatach czołowych. Upośledzenie funkcjonowania omawianej części mózgu (zespół czołowy, ang. *frontal syndrome*) w przebiegu na przykład nowotworów, urazów czaszkowo-mózgowych, udarów mózgu czy chorób neurodegeneracyjnych zakłóca funkcjonowanie wszelkich operacji poznawczych (Nęcka i in., 2017). Przykładem pacjenta z zespołem czołowym może być wielokrotnie opisywany w literaturze psychologicznej przypadek Phineasa Gage'a - brygadzisty pracującego w przedsiębiorstwie budującym linie kolejowe. Gage uległ wypadkowi w pracy - metalowy pręt przebił jego czaszkę na wylot (uszkadzając między innymi płaty czołowe) (Maruszewski, 2016). Objawami zespołu czołowego mogą być: zmniejszona aktywność, brak spontaniczności, abulia (niemożność podejmowania decyzji i inicjowania działania), apatia (zmniejszona wrażliwość na bodźce emocjonalne i fizyczne), a także nadaktywność z zaburzeniami uwagi i trudnościami w hamowaniu impulsywnego zachowania (ang. *global hyperactivity with distractibility-impulsivity-disinhibition*). Innymi składowymi zespołu mogą być również: persewacje i zachowania stereotypowe, konfabulacje, anosognozja (niezdolność do zdania sobie sprawy z choroby) lub anozodiaforia (podwyższony nastrój lub obojętność emocjonalna w stosunku do własnej choroby), zaburzenia w obrębie zachowań społecznych i seksualnych (rozhamowanie) czy zaburzenia kontroli mikcji (oddawania moczu) (Godefroy, 2003). Szczególnymi przykładami zespołu czołowego byli pacjenci po zabiegach lobotomii orbitofrontalnej (chirurgicznego uszkodzenia płatów czołowych jako metody „leczenia” niektórych zaburzeń psychicznych w przeszłości) (Staudt, Herring, Gao, Miller i Sweet, 2019).

Naturalne procesy starzenia się mózgu mogą również negatywnie wpływać na działanie funkcji wykonawczych (Kennedy i Raz, 2009; Mac Kay, 2016). Przykładowo, Adrian, Moessinger, Charles i Postal (2019) stwierdzili, iż umiejętność prowadzenia samochodu spada wraz z postępującym procesem starzenia się, a czynnikiem, który może na to wpływać jest pogłębiające się upośledzenie procesu hamowania (ang. *inhibition*).

Użytki takie jak alkohol również mogą zaburzać działanie funkcji wykonawczych, a szczególnie podatne wydaje się być hamowanie (Day, Kahler, Ahern i Uraina, 2015). Sugeruje to, iż także inne czynniki działające depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, do których należy między innymi narkoza azotowa, mogą negatywnie wpływać na działanie funkcji zarządczych.

## 5 Pamięć - zarys teorii

Pamięć jest funkcją poznawczą, która umożliwia (w sposób świadomy lub nieświadomy) rejestrację informacji z następową możliwością ich odtworzenia. Pamięć, jako proces, składa się z trzech elementów: kodowania<sup>6</sup> (zmiana bodźców w ślady pamięciowe) (ang. *encoding*), przechowywania i odtwarzania<sup>7</sup> (ang. *retrieval*) (Maruszewski, 2016; Nęcka i in., 2017).

Pamięć można podzielić według czasu przechowywania w niej informacji. Wyróżnić można zatem: pamięć ultrakrótką (sensoryczną, ang. *sensory memory*, *ultra-short-term memory*) obejmującą różne modalności zmysłowe (np. pamięć ikoniczna - wzrokowa czy echoiczna - słuchowa), pamięć krótkotrwałą (ang. STM, *short-term memory*) i pamięć trwałą/długotrwałą (ang. LTM, *long-term memory*). Informacje przekazywane są pomiędzy wspomnianymi rodzajami pamięci w sposób sekwencyjny. Dane z pamięci ultrakrótkiej są przekazywane do pamięci krótkotrwałej, którą można utożsamiać z pamięcią operacyjną. Z powodu niewielkiej pojemności pamięci roboczej, informacje muszą zostać przekazane do pamięci trwałej lub zostać usunięte (zapomniane). Z drugiej strony, aby jednostka uzyskała dostęp do danej (bardzo ograniczonej, zgodnie z zasadą ekonomii poznawczej) części pamięci trwałej, informacje muszą zostać przekazane do pamięci operacyjnej, która, jak już wspomniano, ma znacznie ograniczoną pojemność. W modelu Cowana pamięć operacyjna jest zaktywizowaną częścią pamięci długotrwałej i jest w stanie pomieścić 4 elementy (ang. „*chunks*” - kęsy/porcje) (Cowan, 2010). Przegląd teorii dotyczący pojemności i czasu przechowywania informacji we wspomnianych rodzajach pamięci wykracza poza ramy niniejszej rozprawy doktorskiej. Najogólniej można przyjąć, iż czas przechowywania informacji w pamięci krótkotrwałej waha się w przedziale kilka-kilkanaście sekund, a oszacowana wartość zależy od metodologii badawczej (na przykład od tego, czy badany stosował powtórki wewnętrzne w celu utrzymania informacji w pamięci operacyjnej czy procedura eksperymentalna uniemożliwiała ich stosowanie). Szybkość przesyłu informacji pomiędzy pamięcią krótko- a długotrwałą oszacowano na od 0,1 do 1 bita/sekundę.

---

<sup>6</sup> Należy zwrócić uwagę na różnicę między kodowaniem informacji, a zapamiętywaniem. Kodowanie jest procesem automatycznym na który jednostka ma stosunkowo niewielki wpływ, w przeciwieństwie do procesu zapamiętywania, przy którym jednostka może dostosować strategię poznawczą do charakteru zadania (o ile sytuacja lub procedura eksperymentalna na to pozwala, por. dalsza część tekstu) (Maruszewski, 2016).

<sup>7</sup> W polskim piśmiennictwie spotyka się także określenia: wydobywanie, odzyskiwanie lub przypominanie.

Pamięć długotrwałą można podzielić na: pamięć semantyczną (ang. *semantic memory*; pamięć o faktach), pamięć epizodyczną (ang. *episodic memory*; pamięć o wydarzeniach<sup>8</sup>) i pamięć proceduralną (ang. *procedural memory*, *muscle memory*, *motor memory*; pamięć dotyczącą sposobu wykonywania różnych czynności). Innym podziałem może być również podział na pamięć deklaratywną (ang. *declarative memory*), zawierającą informacje możliwe do przywołania w postaci werbalnej i pamięć niedeklaratywną (ang. *non-declarative memory*), w skład której wchodzi zbiór nawyków - od bardzo prostych odruchów rdzeniowych do złożonych czynności automatycznych, które mogą ujawnić się w przypadku wystąpienia konkretnych bodźców lub potrzeb (Maruszewski, 2016).

### 5.1 Procesy pamięciowe

Jak już wspomniano, pamięć, jako proces, składa się z trzech elementów, do których należą: kodowanie, przechowywanie i odtwarzanie.

Proces kodowania, pod kątem tego jak dobrze dana porcja informacji zostanie zapamiętana, zależy od właściwości materiału i szybkości docierania do jednostki (co przekłada się na szybkość odświeżania informacji w pamięci roboczej, a także możliwość przenoszenia informacji do pamięci trwałej). Istotnymi czynnikami wpływającymi na jakość zapamiętywania są: charakter danych, stopień organizacji i sensowności, możliwości zgrupowania słów w kategorie naturalne lub kategorie tworzone *ad hoc*<sup>9</sup>, stopień walencji emocjonalnej i objętość materiału. Nie mniej istotne są również: związki danych informacji z posiadaną już wiedzą lub ze schematami poznawczymi (całkowita zgodność/częściowa zgodność/całkowita niezgodność), a także stopień „poznawczego uprzywilejowania” (na przykład informacje nowe i te, które jednostka uważa za ważne (adaptacyjne) mają większą szansę na bycie zapamiętanym). Proces kodowania zależy jest także zmiennych psychofizycznych jednostki w danej chwili (np. stopnia pobudzenia emocjonalnego czy dyspozycji psychofizycznej w dniu badania), motywacji czy stosowanych przez jednostkę strategii poznawczych (oraz tego czy jednostka sama wybrała strategię poznawczą czy strategia poznawcza została jej celowo lub przypadkowo narzucona przez badacza, w związku z zastosowaną metodologią). W tym miejscu warto również przywołać prawo Foucault, które mówi, iż:  $t = kl^2$ , gdzie:  $t$  - czas uczenia się,  $k$  - stała,  $l$  - długość szeregu.

---

<sup>8</sup> Szczególną postacią pamięci epizodycznej jest pamięć autobiograficzna dotycząca wydarzeń z życia jednostki (Maruszewski, 2016).

<sup>9</sup> Kategorie *ad hoc* to kategorie tworzone na potrzeby wykonania zadania (Maruszewski, 2016).

Proces przechowywania informacji ma miejsce od momentu zapamiętania materiału, aż do jego odtworzenia. W trakcie procesu przechowywania do części informacji jednostka może utracić dostęp, co może być zarówno adaptacyjne, jak i dezadaptacyjne. Warto zwrócić uwagę, iż wydobywanie informacji z pamięci może zmienić charakter przechowywanych danych. Wspominana sytuacja może mieć miejsce zarówno w trakcie przypominania konkretnego materiału, jak również przy wydobywaniu informacji, które zostały zakodowane w „pobliskich” elementach sieci poznawczej.

Odtwarzanie może angażować dwa rodzaje pamięci: pamięć związaną z rozpoznawaniem (ang. *recognition memory*) i pamięć związaną z przypominaniem (ang. *recall memory*). Przykładem procesu przypominania związanego z rozpoznawaniem może być odpowiedź na pytanie: „czy znasz osobę ze zdjęcia? (tak/nie)” lub „czy dane słowo pojawiło się w uprzednio prezentowanej liście słów? (tak/nie)”<sup>10</sup>. Pamięć związana z przypominaniem jest z kolei aktywowana w przypadku próby sformułowania odpowiedzi na dane pytanie, opierając się przy tym na wiedzy deklaratywnej (bez możliwości posiłkowania się rozpoznaniem typu: widziałem/nie widziałem, znam/nie znam itd.). Wydaje się, iż rozpoznawanie, w porównaniu do przypominania jest mniej wymagające poznawczo. Warto jednak zwrócić uwagę, iż w realnym życiu bardzo często wspomniane procesy zachodzą łącznie (Maruszewski, 2016).

W kontekście tematyki niniejszej rozprawy doktorskiej, na szczególną uwagę zasługuje omówienie właściwości środowiska i „stanu wewnętrznego” jednostki na proces zapamiętywania i przypominania materiału, co zasługuje na osobne omówienie i zostanie scharakteryzowane w następnym podrozdziale.

W tym miejscu należy także wspomnieć o metodologii badań pamięciowych. W eksperymentach osobom badanym prezentuje się różny materiał do zapamiętywania. Może być to materiał: werbalny (ocenia się pamięć słów, ang. *verbal memory*) lub niewerbalny (ocenia się pamięć np. numerów lub kształtów (ang. *shape memory*)) (por. van Wijk i Meintjes, 2014). Materiał może prezentować (np. dyktować lub pokazywać) badacz<sup>11</sup> lub też osoba badana może się sama z nim zapoznać (por. Philp, Fields i Roberts, 1989; Brebeck i in.,

---

<sup>10</sup> Aby uniknąć definiowania tego rodzaju pamięci na zasadzie *circulus in definiendo* („pamięć związana z rozpoznawaniem polega na rozpoznawaniu...”) zdecydowano o wskazaniu przykładu działania wspomnianego rodzaju pamięci.

<sup>11</sup> Badacz może także celowo lub niecelowo (przypadkowo) ograniczać możliwość stosowania powtórek wewnętrznych. Powtórki wewnętrzne (ang. *rehearsals*) mają za zadanie utrzymanie materiału w pamięci roboczej (co przekłada się na większe możliwości przeniesienia materiału do pamięci trwałej) (Maruszewski, 2016).

2017). Faza przypominania może występować bezpośrednio po zaprezentowaniu materiału (ang. *immediate recall*) lub też po pewnym (czasem bardzo długim) interwale czasowym od jego zaprezentowania (ang. *delayed recall*) (por. Biersner, 1972; Fowler, 1973). W przypadku słów możemy mieć do czynienia ze swobodnym przypominaniem (ang. *free recall*) lub też z odtwarzaniem przy obecności „podpowiedzi” lub odtwarzaniem brakującego słowa z uprzednio prezentowanej pary słów (ang. *cued recall*) (por. Hobbs, Higham i Kneller, 2014).

## **5.2 Warunki środowiska zewnętrznego i wewnętrznego wpływające na proces zapamiętywania i przypominania - pamięć zależna od kontekstu i pamięć zależna od stanu**

Ze względu na charakter niniejszej pracy dwa zjawiska pamięciowe: pamięć zależna od kontekstu (ang. *context-dependent memory*, *context-dependent learning*) i pamięć zależna od stanu (ang. *state-dependent memory*, *state-dependent learning*) zasługują na osobny akapit. W trakcie fazy zapamiętywania i fazy przypominania występuje zależność od tożsamego lub różnego zewnętrznego kontekstu i sytuacji (ang. *external surroundings*), a także od tożsamego lub różnego „stanu świadomości”. W badaniu Goddena i Baddeleya (1975) słowa zapamiętane w wodzie były lepiej odtwarzane w wodzie, niż na lądzie i odwrotnie (pamięć zależna od kontekstu). Goodwin, Powell, Bremer, Hoine i Stern (1969) wykazali, że słowa zapamiętane pod wpływem alkoholu są również lepiej przypominane pod jego wpływem, w porównaniu do sytuacji gdy osoba badana była wolna od wpływu tej substancji (pamięć zależna od stanu). Do podobnych wniosków doszli Steinberg i Summerfield (1957) przeprowadzając badanie z użyciem 30% podtlenku azotu.

Podsumowując, zapamiętany materiał jest tym lepiej przypominany, im bardziej faza przypominania przypomina fazę zapamiętywania (zarówno w kontekście czynników zewnętrznych, jak i wewnętrznych). Jako, że oba wspomniane związki (alkohol i podtlenek azotu) powodują odpowiednio: stan upojenia i stan narkozy (stany w których występuje depresja ośrodkowego układu nerwowego) - można wysnuć hipotezę, iż zjawisko pamięci zależnej od stanu występuje również pod wpływem narkozy azotowej. Możliwym jest również, iż materiał zapamiętany w warunkach komory hiperbarycznej będzie lepiej przypominany w identycznych warunkach, w porównaniu do sytuacji gdy zapamiętywanie miało miejsce poza komorą, a przypominanie w komorze, a także w sytuacji odwrotnej.

### **5.3 Zjawisko interferencji proaktywnej**

Ze względu na fakt, iż badania pamięciowe prowadzone w warunkach nadciśnienia cechuje dość duży stopień złożoności (por. dalsza część tekstu), w niektórych przypadkach nie można wykluczyć wpływu interferencji proaktywnej (ang. *proactive interference*, *proactive inhibition*) na wyniki testów pamięciowych. Omawiane zjawisko polega na zaburzeniu procesu nabywania i konsolidacji nowych informacji, pod wpływem wcześniej zapamiętanych danych (Nęcka i in., 2017). Przykładowo, zapamiętywanie i przypominanie następujących po sobie kolejnych list słów może być zaburzone nie tylko poprzez zmienną niezależną (np. stężenie alkoholu we krwi czy wysokie ciśnienie parcjalne azotu), jak również poprzez podobieństwo semantyczne zapamiętywanych kolejno list słów.

### **5.4 Efekt pierwszeństwa i świeżości**

Kolejnym efektem pamięciowym kluczowym z punktu widzenia niniejszej rozprawy doktorskiej, który może niezamierzenie wpływać na wyniki testów pamięciowych, jest efekt pierwszeństwa i świeżości (ang. *primacy effect*, *recency effect*). Efekt ten ujawnia się w trakcie przypominania, które następuje bezpośrednio po zaprezentowaniu materiału (ang. *immediate recall*) i polega na tym, że badani zapamiętują dużą liczbę słów z początku i końca listy, przy jednocześnie niewielkiej liczbie słów ze środka listy. Warto dodać, iż odtwarzanych jest więcej słów z końca, niż z początku przedstawionego materiału. Efekt ten jest związany z faktem, iż słowa z początku listy zostały przeniesione do pamięci trwałej, a z końca znajdują się w pamięci krótkotrwałej (w pamięci operacyjnej). Efekt ten nie występuje, gdy osoby badane znają długość szeregu, które mają zapamiętać (badani mogą wtedy zastosować optymalną strategię pamięciową) (Maruszewski, 2016).

### **5.5 Wybrane czynniki wpływające na zaburzenie funkcjonowania pamięci długotrwałej**

Do chwili obecnej opisano wiele czynników, które mogą zaburzać funkcjonowanie pamięci długotrwałej. Należą do nich między innymi: naturalne procesy starzenia się (Larrabee i Crook, 1994), choroby neurologiczne i neurodegeneracyjne (Daulatzai, 2013; Arlt, 2013), urazy czaszkowo-mózgowe (Vakil, 2005), czy incydenty naczyniowo-mózgowe (np. udary mózgu) (Al-Qazzaz, Ali, Ahmad, Islam i Mohamad, 2014).

Analogicznie do wspomnianych powyżej zmiennych poznawczych (tj. do przeszukiwania i funkcji wykonawczych), które są wrażliwe na upośledzenie funkcjonowania pod wpływem alkoholu, procesy pamięciowe również mogą być zaburzone przez wspomnianą

substancję. Saults, Cowan, Sher i Moreno (2007) wykazali, że alkohol może upośledzać działanie pętli fonologicznej. Negatywny wpływ na strategie mające utrzymać informacje w obrębie pamięci roboczej (na powtórki wewnętrzne) może zaburzać przekazywanie informacji do pamięci długotrwałej. Nelson, McSpadden, Fromme i Marlatt (1986) stwierdzili, że w porównaniu do grupy kontrolnej, która nie spożywała alkoholu, podanie badanym etanolu (w dawce 1 ml/kg) powoduje upośledzenie przypominania informacji zapisanych w pamięci semantycznej (pytania z zakresu wiedzy ogólnej). Jako, że zarówno alkohol, jak i narkoza azotowa działają depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy (OUN), prawdopodobnym jest, iż hiperbaryczny azot również może zaburzać zarówno zapamiętywanie informacji, jak i ich przypominanie (zarówno w sekwencji: przypominanie w stanie narkozy materiału zapamiętanego w nienarkotycznych warunkach, przypominanie w warunkach narkozy materiału zapamiętanego pod wpływem hiperbarycznego azotu, a także przypominanie w warunkach normobarycznych (brak narkozy) materiału zapamiętanego w hiperbarii).

## 6 Funkcjonowanie psychomotoryczne

Funkcjonowanie psychomotoryczne (ang. *psychomotor functioning, perceptual-motor functioning*) jest zbiorczym pojęciem w skład którego wchodzi zorganizowana i celowa aktywność mięśniowa (motoryczna), w odpowiedzi na bodźce wewnętrzne i/lub zewnętrzne (środowiskowe), które zostały przetworzone w ramach funkcjonowania poznawczego (Wetherell, 1997).

Ze względu na charakter niniejszej pracy warto zwrócić uwagę, iż istnieją liczne czynniki, które mogą upośledzać czynności psychomotoryczne. Można je podzielić na te u podłoża których występuje dysfunkcja ośrodkowego układu nerwowego (tymczasowa lub trwała), a także te, które są powodowane przez czynniki obwodowe. Do tych ostatnich należą między innymi choroby nerwowo-mięśniowe (np. miastenia; Hoffmann i in., 2015), choroby przebiegające z atrofią (zanikiem) mięśni (Wadman i in., 2018) czy stany w przebiegu których dochodzi do uszkodzenia nerwów obwodowych (Hughes, 2002). Do trwałych zaburzeń ośrodkowego układu nerwowego, które mogą mieć wpływ na czynności psychomotoryczne zalicza się między innymi zmiany strukturalne mózgowia w przebiegu na przykład naturalnych procesów starzenia się (Seidler i in., 2010) czy urazów mózgowia (Fujimoto i in., 2004). Funkcjonowanie psychomotoryczne może być również zaburzone czasowo poprzez wpływ licznych substancji chemicznych na mózg. Wpływ alkoholu czy leków z grupy benzodiazepin, które wykazują depresyjne działanie na OUN jest dobrze zbadanym czynnikiem wpływającym na czynności psychomotoryczne (Hindmarch, 1980; Brumback, Cao i King, 2007). Możliwym jest, iż depresyjny wpływ narkozy azotowej na aktywność neuronalną również może być predyktorem zaburzeń omawianej zmiennej.



## **7 Biofizyczne i patofizjologiczne aspekty narkozy azotowej**

W poniższych akapitach przedstawiono podstawowe zagadnienia z zakresu fizyki gazów, biofizyki i patofizjologii. Ich omówienie jest niezbędne do zrozumienia patogenezy narkozy azotowej i jej możliwych, zagrażających zdrowiu i życiu, następstw. Wiedza ta jest również potrzebna do poznania specyfiki prowadzenia badań w warunkach nadciśnienia, ich ograniczeń i potencjalnych powikłań.

### **7.1 Jednostki ciśnienia**

Ciśnienie otaczające człowieka w jego naturalnym, lądowym środowisku to ciśnienie atmosferyczne, które na poziomie morza jest równe 101325 Pa (1013,25 hPa). Rozważania dotyczące nadciśnienia oparte o tego typu system metryczny są jednak mało czytelne i z tego powodu w niniejszej pracy będzie stosowana jednostka „ATA” (atmosfera absolutna).

Ciśnienie ( $p$ ) może być określane względem próżni doskonałej, której  $p = 0$  i nazywane ciśnieniem absolutnym (bezwzględny). Dla określenia warunków normalnych (warunki normobaryczne/normobaria) odpowiadających ciśnieniu otoczenia na powierzchni (na lądzie) przyjęto określenie „1 ATA” (jedna atmosfera absolutna). Nadciśnieniem (hiperbarią, hyperbarią) określane będą warunki w których ciśnienie bezwzględne jest wyższe niż w normobarii (Cholewka, Liszka i Walentek, 2006). Dwukrotnie wyższe ciśnienie otoczenia, w porównaniu do warunków normobarycznych, będzie oznaczane jako „2 ATA”, trzykrotnie wyższe - „3 ATA” itd.

### **7.2 Ciśnienie otoczenia w warunkach podwodnych**

Wraz ze wzrostem głębokości pod powierzchnią wody ciśnienie otoczenia liniowo rośnie. Całkowite ciśnienie panujące w cieczy jest sumą ciśnienia hydrostatycznego (ciśnienia jakie wywiera ciecz na dany obiekt na danej głębokości) i ciśnienia zewnętrznego, oddziałującego na ciecz na głębokości 0 metrów (na powierzchni). Opisywaną zależność można opisać w postaci prostego wzoru:  $p_c = p_o + p_h$ , gdzie:  $p_c$  - całkowite ciśnienie panujące w cieczy na danej głębokości,  $p_o$  - ciśnienie zewnętrzne działające na daną ciecz (ciśnienie atmosferyczne),  $p_h$  - ciśnienie hydrostatyczne. Na każde 10 metrów zanurzenia w wodzie, ciśnienie działające na ciało wzrasta o 1 ATA<sup>12</sup>. Na 10 metrach pod powierzchnią wody panuje

---

<sup>12</sup> Jest to w pewnym stopniu uproszczenie: w miarę zanurzania się ciśnienie hydrostatyczne wzrasta o 1 ATA co 9,75 m w wodzie słonej i co 10 m w wodzie słodkiej. W niniejszej pracy przyjęto założenie, że ciśnienie otoczenia rośnie o 1 ATA, niezależnie od charakteru zbiornika wodnego w którym przeprowadzono badanie.

więc ciśnienie: 1 ATA (ciśnienie na powierzchni wody) + 1 ATA (ciśnienie jakie wywiera na obiekt woda na głębokości 10 metrów) = 2 ATA.

Całkowite ciśnienie panujące w wodzie na danej głębokości można wyliczyć także ze wzoru:  $p_c = p_o + \frac{h}{10}$ , gdzie:  $p_c$  - całkowite ciśnienie panujące w cieczy,  $p_o$  - ciśnienie zewnętrzne działające na daną ciecz (ciśnienie atmosferyczne),  $h$  - głębokość zanurzenia. Przykładowo, jeśli badanie eksperymentalne zostało przeprowadzone na głębokości 41 metrów pod powierzchnią wody, całkowite ciśnienie oddziałujące na osobę badaną, zgodnie ze wzorem przytoczonym powyżej, wynosi:  $p_c = p_o + \frac{h}{10} \rightarrow p_c = 1 + \frac{41}{10} \rightarrow p_c = 1 + 4,1 \rightarrow p_c = 5,1$  ATA (Lewandowski, 2006; Krzyżak, 2006). Dla jasności wyводу w dalszej części pracy będzie podawana informacja czy badanie przeprowadzono w warunkach komory hiperbarycznej czy w warunkach podwodnych. Opisywane będzie zarówno ciśnienie całkowite jakie przyjęto w fazie eksperymentalnej danego badania, jak i odpowiadająca mu głębokość w metrach pod powierzchnią wody (w przypadku gdy badanie przeprowadzono w komorze hiperbarycznej).

Podsumowując, znajomość wspomnianych zależności jest kluczowa dla zrozumienia metodologii badawczej, a także wniosków z eksperymentów przeprowadzanych w warunkach nadciśnienia. Badania te są prowadzone zarówno w warunkach hiperbarii „suchej”, jak i w warunkach podwodnych. W przypadku badań przeprowadzanych w komorze hiperbarycznej ciśnienie otoczenia jest prostym zwielokrotnieniem wartości „1 ATA” (ciśnienia panującego na powierzchni). W przypadku ekspozycji podwodnej całkowite ciśnienie panujące w cieczy na danej głębokości jest sumą ciśnienia atmosferycznego (1 ATA), a także ciśnienia jakie wywiera na ciało woda na danej głębokości. Jakikolwiek próby porównywania lub ekstrapolacji wyników badań prowadzonych przy różnych wartościach nadciśnienia i/lub w różnych warunkach środowiskowych, powinny się odbywać w oparciu o przeliczenie do jednostki jaką jest atmosfera absolutna (ATA) (por. dalsza część tekstu).

### 7.3 Ciśnienie parcjalne gazu

Ciśnieniem parcjalnym nazywamy ciśnienie wywierane przez dany składnik mieszaniny oddechowej, w hipotetycznej sytuacji, gdy związek chemiczny lub pierwiastek sam zajmowałby objętość całej mieszaniny gazowej (Cholewka i in., 2006; Lin, 2012). Znając skład powietrza: azot - ~78,08%, tlen - ~20,95%, argon - ~0,93%, dwutlenek węgla - ~0,03%, neon, hel, krypton, wodór, ksenon i ozon - ~0,003%, można wyliczyć jakie ciśnienie parcjalne wywiera każdy ze składników atmosfery (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 2019).

Ciśnienie parcjalne dla danego gazu można wyliczyć z prostego wzoru:  $P_g = p \frac{R_g}{100}$ , gdzie:  $P_g$  - ciśnienie cząstkowe (parcjalne) składnika mieszaniny gazowej,  $p$  - ciśnienie całkowite mieszaniny gazowej,  $R_g$  - procentowy udział objętościowy składnika mieszaniny gazowej (Krzyżak, 2006; Cholewka i in., 2006). Przykładowo, ciśnienie parcjalne azotu (~78%), w warunkach normobarii (1 ATA) wynosi:  $P_{N_2} = 1 \text{ ATA} \frac{78}{100} \rightarrow P_{N_2} = 0,78 \text{ ATA}$ .

Co bardzo istotne w kontekście niniejszej rozprawy doktorskiej, w miarę wzrostu ciśnienia otoczenia proporcjonalnie wzrastają ciśnienia parcjalne wszystkich składników mieszaniny gazowej. Przykładowo w przypadku dwukrotnego zwiększenia ciśnienia powietrza ciśnienie cząstkowe azotu również wzrośnie dwukrotnie:  $P_{N_2} = 2 \text{ ATA} \frac{78}{100} \rightarrow P_{N_2} = 2 \text{ ATA} \times 0,78 \rightarrow P_{N_2} = 1,56 \text{ ATA}$  (Cholewka i in., 2006; Lin, 2012). Zjawisko to jest jednym z czynników odpowiedzialnych za rozwój narkozy azotowej. Zrozumienie omawianej zależności jest również kluczowe przy interpretacji wyników z badań w których dwie grupy badanych oddychały dwiema różnymi mieszaninami oddechowymi, które zawierały różną procentową zawartość azotu (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia; por. dalsza część tekstu).

#### 7.4 Azot

Jak już wspomniano, absolutna większość nurkowań odbywa się z użyciem powietrza, którego głównym składnikiem jest azot (ang. *nitrogen*,  $N_2$ ), co sprawia, iż przy większości ekspozycji hiperbarycznych może dochodzić do rozwoju narkozy azotowej. Azot w stanie wolnym (w warunkach normalnych<sup>13</sup>) jest gazem obojętnym i organoleptycznie niewyczuwalnym - jest bezbarwny, bezwonny i pozbawiony smaku. Jest także fizjologicznie nieczynny - tkanki człowieka nie metabolizują azotu, jednakże nagromadzenie tego pierwiastka w organizmie w trakcie ekspozycji na zwiększone ciśnienie otoczenia może spowodować rozwój narkozy (Krzyżak, 2006; Konarski, 2012). Warto dodać, że pomimo faktu, iż stan „oszołomienia i euforii” w trakcie pobytu w warunkach zwiększonego ciśnienia otoczenia (przypominający upojenie alkoholowe) opisano po raz pierwszy w 1826 roku, naukowcy potrzebowali aż 109 lat aby udowodnić, że to azot jest odpowiedzialny za to zjawisko (Behnke i in., 1935; Unsworth, 1966).

---

<sup>13</sup> Temperatura wrzenia azotu wynosi -195°C (Walsh, Tharratt i Offerman, 2010).

## 7.5 Prawo Henryego

Znajomość prawa Henryego jest kluczowa dla zrozumienia w jaki sposób dochodzi do rozwoju narkozy azotowej. Rozpuszczalność gazu w cieczy zależy od ciśnienia otoczenia, a także od współczynnika rozpuszczalności danego gazu. Zgodnie z omawianym prawem, wraz ze wzrostem ciśnienia otoczenia, przy oddychaniu czynnikiem oddechowym zawierającym azot, coraz większa ilość tego pierwiastka (a także innych gazów) ulega rozpuszczeniu w osoczu, a następnie dystrybucji w organizmie (w tkankach).

Warto także zwrócić uwagę, iż rozpuszczalność gazów w cieczach rośnie wraz ze spadkiem i maleje wraz ze wzrostem temperatury cieczy (krwi; Cholewka i in., 2006), co ma znaczenie przy interpretacji wyników z badań przeprowadzonych w warunkach komór hiperbarycznych, a także na wodach zimnych i ciepłych. Jako że wychłodzenie organizmu w trakcie nurkowań w zimnych wodach implikuje większą rozpuszczalność azotu we krwi - należy w takich warunkach spodziewać się bardziej nasilonej narkozy, w porównaniu do nurkowań w trakcie których utrzymywana jest normotermia (temperatura normalna ustroju) (por. dalsza część tekstu).

Więcej informacji o prawie Henryego, wraz z jego graficznym przedstawieniem zamieszczono w Załączniku 3.

## 7.6 Przemiana izochoryczna

Przemiany gazowe opisują przemiany zmiennych termodynamicznych: ciśnienia ( $p$ ), objętości ( $V$ ) i temperatury ( $T$ ) gazu. Zmiana jednego parametru pociąga za sobą zmianę dwóch pozostałych. Znajomość dwóch praw termodynamicznych (przemiany izochorycznej i izotermicznej) jest niezbędna dla zrozumienia metodologii badań w nadciśnieniu, ich ograniczeń i potencjalnych powikłań. Jest także ważna przy interpretacji i wyciąganiu wniosków z badań przeprowadzonych w warunkach nadciśnienia.

Przemiana izochoryczna opisuje zależność ciśnienia ( $p$ ) i temperatury ( $T$ ). Przy stałej objętości gazu ( $V = \text{const}$ ) temperatura rośnie wprost proporcjonalnie do ciśnienia otoczenia ( $\uparrow p \rightarrow \uparrow T$ ). Przy spadku ciśnienia ma miejsce sytuacja odwrotna ( $\downarrow p \rightarrow \downarrow T$ ). Działanie przemiany izochorycznej można odczuć w trakcie zwiększania i zmniejszania ciśnienia w komorze hiperbarycznej (objętość komory jest stała,  $V = \text{const}$ ). W trakcie zwiększania ciśnienia (w trakcie kompresji/presuryzacji) wzrasta temperatura powietrza w komorze, a w trakcie zmniejszania ciśnienia (w trakcie dekompresji/depresuryzacji) temperatura maleje. Warto zwrócić uwagę, iż w warunkach podwodnych ma miejsce sytuacja odwrotna - wraz ze

wzrostem głębokości (a więc wraz ze wzrostem ciśnienia) temperatura spada (Krzyżak, 2006; Bogusz, Garbarczyk i Krok, 2010; Cross i Plunkett, 2008). Wzrost lub spadek temperatury otoczenia implikuje rozpuszczalność gazów we krwi, co może skutkować różnym nasileniem narkozy azotowej. Narażenie na istotnie zmniejszoną temperaturę otoczenia może multiplikować upośledzenie funkcjonowania spowodowanego narkozą azotową (por. Lee, Watkins, Marshall, Dascombe i Foster, 2015) w mechanizmie wzrostu rozpuszczalności gazów we krwi. Z drugiej strony, narażenie na wysoką temperaturę otoczenia w trakcie ekspozycji na nadciśnienie indukowane w komorze hiperbarycznej również może negatywnie wpływać na wykonywanie testów (Hancock i Vasmatazidis, 2003). Wszystkie te czynniki sprawiają, iż różnic w funkcjonowaniu w normobarii, w warunkach hiperbarii „suchej”, a także w warunkach podwodnych nie należy tłumaczyć jednoczynnikowo (wyłącznie przez pryzmat wpływu narkozy azotowej). Zagadnienie to zostanie rozwinięte w dalszej części tekstu.

### **7.7 Potencjał narkotyczny gazów - Teoria Meyera-Overtona**

Każdą tkankę znajdującą się w organizmie człowieka można opisać (w znacznie uproszczony sposób) za pomocą dwóch zmiennych: procentowej zawartości wody i procentowej zawartości tłuszczu. Rozpuszczalność danego gazu jest większa dla tkanek z większą komponentą tłuszczową i mniejsza dla tkanek z większą komponentą wodną (Krzyżak, 2006; Cholewka i in., 2006). Znajomość tego zagadnienia jest kluczowa dla zrozumienia teorii Meyera-Overtona, która w uproszczony sposób tłumaczy potencjał narkotyczny gazów.

Teoria Meyera-Overtona (reguła Meyera-Overtona) mówi, iż narkotyczny potencjał gazu jest wprost proporcjonalny do jego rozpuszczalności w lipidach (tłuszczach) i odwrotnie proporcjonalny do rozpuszczalności w wodzie. Im dany gaz lepiej rozpuszcza się w tłuszczach, a gorzej w wodzie tym jego efekt narkotyczny silniejszy. Wszystkie gazy obojętne (poza helem i neonem) wykazują działanie narkotyczne w warunkach hiperbarii (Bennett i Rostain, 2003; Krzyżak, 2006). Potencjał narkotyczny gazów określa się w stosunku do azotu, dla którego przyjęto wartość 1. Mniej narkotyczny jest na przykład hel z potencjałem 0,6, a bardziej narkotyczny - argon (2,3), dwutlenek węgla (20) i ksenon (25,6), co jest spójne ze wspomnianą powyżej teorią dotyczącą wzrostu potencjału narkotycznego wraz ze wzrostem lipofilności danego gazu (Krzyżak, 2006). Współczynniki rozpuszczalności gazów w wodzie i oleju (uszeregowane rosnąco, zgodnie z potencjałem narkotycznym) zostały zamieszczone w Załączniku 4. Co istotne z punktu widzenia niniejszej rozprawy doktorskiej, hel wchodzący w skład mieszaniny helowo-tlenowej (helioks, 20% O<sub>2</sub>, 80% He) nie wywołuje mierzalnej

narkozy. Badani oddychający helioksem w nadciśnieniu są więc optymalną grupą kontrolną dla powietrznych ekspozycji hiperbarycznych (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia).

### **7.8 Wpływ hiperbarycznego azotu na aktywność neuronalną**

Azot wykazuje szczególne powinowactwo do struktur układu nerwowego, oddziałując z lipidami błon komórkowych (zaburzając w ten sposób funkcjonowanie układu nerwowego), co może objawiać się efektem narkotycznym (Konarski, 2012). Warto jednak podkreślić, iż mechanizm powstawania narkozy azotowej nie został w pełni poznany (Krzyżak, 2006). Przy pewnej wartości ciśnienia parcjalnego azotu ( $ppN_2$ , ang. *partial pressure of nitrogen*) prawdopodobnie dochodzi do spowolnienia przewodzenia impulsów w obrębie ośrodkowego układu nerwowego (Fowler, Pang i Mitchell, 1992). Steinberg i Doppelmayr dowiedli, że różne części kory mózgowej mogą być różnie podatne na hiperbaryczny azot. Wiadomo również, że młodsze ewolucyjnie części mózgowia odpowiedzialne za czynności poznawcze wcześniej (przy mniejszym  $ppN_2$ ) i w większym stopniu ulegają zaburzeniu, niż starsze ewolucyjnie rejony odpowiedzialne za proste funkcje motoryczne (Kiessling i Maag, 1962).

Podsumowując całość dotychczasowych rozważań, a także zawężając definicję narkozy azotowej i dostosowując ją do charakteru niniejszej pracy - narkoza azotowa jest stanem upośledzenia funkcjonowania psychomotorycznego i poznawczego związanego z działaniem wysokiego ciśnienia parcjalnego azotu, które powstaje w trakcie ekspozycji hiperbarycznej, przy oddychaniu czynnikiem oddechowym zawierającym azot (Clark, 2015). Od pewnej krytycznej wartości wysycenia ośrodkowego układu nerwowego azotem dochodzi do depresji OUN, objawiającej się globalnym upośledzeniem funkcjonowania.

### **7.9 Prawo Daltona (prawo ciśnień cząstkowych). Gazy obojętne, dwutlenek węgla i tlen.**

#### **Narkoza gazów obojętnych**

Kolejnym, z punktu widzenia niniejszej pracy, kluczowym prawem gazowym jest prawo Daltona (ang. *Dalton's law*), które mówi, iż w zamkniętej przestrzeni całkowite ciśnienie danej mieszaniny gazów jest równe sumie ciśnień parcjalnych jakie wywierałyby w tej samej objętości  $V$  i temperaturze  $T$  poszczególne składniki mieszaniny (Lin, 2012). W przypadku powietrza zastosowanie prawa Daltona pozwala stwierdzić, iż:  $P_{\text{powietrza}} = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{Ar} + P_{CO_2} + P_{Ne} + P_{He} + P_{Kr} + P_{H_2} + P_{Xe} + P_{O_3}$ .

W przypadku n-krotnego wzrostu ciśnienia otoczenia, n-krotnie wzrastają ciśnienia parcjalne poszczególnych gazów. W sytuacji dwukrotnego wzrostu ciśnienia powietrza zachodzi następująca zależność:

normobaria:  $P_{\text{powietrza}} = P_{\text{N}_2} + P_{\text{O}_2} + P_{\text{Ar}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{Ne}} + P_{\text{He}} + P_{\text{Kr}} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{Xe}} + P_{\text{O}_3}$

2 ATA:  $2 P_{\text{powietrza}} = 2 P_{\text{N}_2} + 2 P_{\text{O}_2} + 2 P_{\text{Ar}} + 2 P_{\text{CO}_2} + 2 P_{\text{Ne}} + 2 P_{\text{He}} + 2 P_{\text{Kr}} + 2 P_{\text{H}_2} + 2 P_{\text{Xe}} + 2 P_{\text{O}_3}$ .

W chwili obecnej wiadomo, iż za narkozę odpowiedzialny jest głównie azot, jednakże w piśmiennictwie zwraca się także uwagę na wpływ wysokich ciśnień parcjalnych (cząstkowych) innych gazów takich jak wodór, argon, dwutlenek węgla czy ksenon. Z tego powodu narkoza azotowa jest w niektórych opracowaniach traktowana szerzej - jako narkoza gazów obojętnych (ang. IGN, *inert gas narcosis*) lub narkoza gazowa (Krzyżak, 2006; Clark, 2015). Podsumowując, mając na uwadze powyżej omawiane prawa fizyczne - narkoza gazów obojętnych jest spowodowana łącznym wpływem wysokich ciśnień parcjalnych gazów, które mają potencjał narkotyczny (zgodnie z teorią Meyera-Overtona). W niniejszej pracy, dla uproszczenia, stosowany będzie termin „narkoza azotowa”.

Graficzne przedstawienie składu powietrza (a więc i ciśnień parcjalnych wywieranych przez poszczególne gazy) zawiera Załącznik 5. Więcej informacji o gazach obojętnych, a także o dwutlenku węgla i tlenie, jak również o ich potencjale narkotycznym znajduje się w Załączniku 6.

## 8 Narkoza azotowa - wprowadzenie do zagadnienia

### 8.1 Narkoza azotowa a alkohol

Stan narkozy azotowej jest porównywany do wpływu intoksykacji alkoholem etylowym. W środowisku płetwonurków znane jest „prawo Martini” (ang. *Martini's law*), które mówi, że każde 10 metrów głębokości (w trakcie nurkowania z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego) działa jak 100 mililitrów wytrawnego Martini wypitego na czczo (Krzyżak, 2006). Warto jednak zwrócić uwagę, że istnieją liczne różnice w profilu działania alkoholu i hiperbarycznego azotu, a więc „moc predykcyjna” wspomnianego twierdzenia jest wątpliwa. Narkoza azotowa pojawia się bardzo szybko po osiągnięciu danej głębokości i równie szybko ustępuje wraz ze spadkiem ciśnienia parcjalego azotu (ośrodkowy układ nerwowy szybko wysyca się azotem i szybko odsyca się z tego pierwiastka)<sup>14</sup>. Przy stałym ciśnieniu otoczenia, po osiągnięciu całkowitego (lub względnie stabilnego) wysycenia krwi azotem, dalsza ekspozycja hiperbaryczna nie powoduje pogłębienia narkozy - badani przebywający od jednej do pięciu godzin w warunkach hiperbarycznych osiągalni takie same wyniki w testach jak osoby, które przebywały w nadciśnieniu przez piętnaście minut (Poulton, Catton i Carpenter, 1964). Objawy intoksykacji alkoholowej pojawiają się z pewnym opóźnieniem, a ich ustępowanie trwa nieraz godzinami. Doświadczenie narkozy azotowej nie jest związane z nieprzyjemnymi reperkusjami związanymi z nagromadzeniem toksycznych metabolitów (jak w przypadku alkoholu).

Niemniej jednak porównanie objawów narkozy azotowej do wpływu etanolu nie jest całkowicie nieuzasadnione. Uogólniając, w obu przypadkach występuje początkowo faza pobudzenia i ekscytacji, a następnie (wraz z przyjmowaniem kolejnych dawek alkoholu lub wraz ze zwiększeniem ciśnienia parcjalego azotu) następuje depresja ośrodkowego układu nerwowego i spowolnienie aktywności umysłowej przebiegające z opóźnieniem reakcji na bodźce słuchowe i wzrokowe (Adolfson, 1956; Unsworth, 1966; Krzyżak, 2006). Adolfson i Muren (1965) porównują zaburzenie sprawności motorycznej pod wpływem narkozy azotowej do niezborności ruchowej w przebiegu upojenia alkoholowego. W warunkach komory hiperbarycznej, wraz z postępującą narkozą azotową pismo staje się coraz bardziej rozwlekłe i

---

<sup>14</sup> Warto jednakże dodać, iż Balestra, Lafère i Germonpré (2012) wykazali, że pewne symptomy narkozy azotowej mogą się utrzymywać pewien okres czasu po osiągnięciu warunków normobarycznych (por. dalsza część tekstu).



niewyraźne. Upośledzenie wykonywania czynności precyzyjnych jest spowodowane zamaszystością ruchów.

Alkohol i narkoza azotowa (w zależności od warunków otoczenia i dawki etanolu lub ciśnienia parcjalnego azotu) może powodować zarówno stany euforyczne, jak i dysforyczne. Warto dodać, że istnieją różnice pomiędzy narkozą indukowaną w komorze hiperbarycznej (ryzyko narkozy „euforycznej”), a narkozą podwodną (ryzyko narkozy „dysforycznej”) (Hobbs, 2008), co zostanie szczegółowo omówione w dalszej części tekstu.

Łagodna/umiarkowana narkoza azotowa sama w sobie, podobnie jak łagodne/umiarkowane upojenie alkoholowe nie jest związane z ryzykiem dla zdrowia lub życia. Zagrożające może być natomiast wykonywanie, zaniechanie lub opóźnienie wykonania danych czynności pod wpływem alkoholu lub hiperbarycznego azotu. Więcej informacji o różnicach pomiędzy stanem po spożyciu alkoholu, a narkozą azotową umieszczono w Załączniku 7.

Niektórzy autorzy, jak np. Clark (2015) podają również, iż stan narkozy azotowej może także przypominać wpływ leków z grupy benzodiazepin lub marihuany. W literaturze pojawiają się także porównania wpływu narkozy azotowej do stanu hipoksji (niedotlenienia), początkowej fazy znieczulenia do operacji czy wpływu środków psychodelicznych (Bennett i Rostain, 2003). Brakuje jednak w piśmiennictwie artykułów, które porównywałyby wpływ wspomnianych czynników i narkozy azotowej na funkcjonowanie psychiki. Niektórzy badacze przyjmują założenie, że podtlenek azotu ( $N_2O$ ) podawany w warunkach normobarycznych wykazuje bardzo podobny profil działania do hiperbarycznego azotu, co skłania ich do badania „narkozy azotowej” za pomocą wspomnianego gazu. Więcej informacji o badaniach z użyciem  $N_2O$  znajduje się w dalszej części tekstu.

Podsumowując, utożsamianie wpływu alkoholu z wpływem narkozy azotowej na funkcjonowanie psychiki nie jest w pełni trafne, jednakże może stanowić poznawczy punkt odniesienia na wstępnym etapie rozważań nad narkozą azotową.

## **8.2 Graniczne wartości ciśnienia otoczenia od których może wystąpić narkoza azotowa**

Stopień nasilenia objawów narkozy azotowej zależy między innymi od wartości ciśnienia otoczenia (por. prawo Henryego) i procentowego udziału azotu w czynniku oddechowym (por. prawo Daltona). Im owo ciśnienie jest większe i im większy procent azotu znajduje się w składzie mieszaniny oddechowej, tym bardziej nasilonych objawów można się spodziewać. Niemniej, ze względu na złożoność natury narkozy azotowej nie należy przyjmować założenia, że jest to zależność idealnie liniowa. Powszechnie przyjmuje się, iż

objawy narkozy azotowej mogą się pojawić przy oddychaniu powietrzem<sup>15</sup> przy ciśnieniu 4 ATA (ciśnienie odpowiadające ciśnieniu panującemu na głębokości 30 metrów pod powierzchnią wody), a więc przy ciśnieniu parcjalnemu azotu (ppN<sub>2</sub>) powyżej 3,12 ATA (Olszański i Siermontowski, 2003; Clark, 2015). Niektórzy autorzy wykazali, iż narkoza azotowa może wystąpić już przy ciśnieniu 2 ATA (komora hiperbaryczna; Poulton i in., 1963; Poulton i in., 1964) lub nawet 1,5 ATA (warunki podwodne; Dalecki, Bock i Schulze, 2012) (ciśnienia panujące na głębokości odpowiednio 10 i 5 metrów pod powierzchnią wody). Tego typu rozbieżności w piśmiennictwie mogą wynikać z faktu, iż różni autorzy, przyjmując różną metodologię, w różnych warunkach badawczych, badali różne zmienne, które wykazywały mierzalne upośledzenie przy konkretnej wartości nadciśnienia. Warto dodać, że po raz pierwszy narkoza azotowa została opisana w 1826 roku przy ekspozycji na ciśnienie 3 ATA (ciśnienie panujące na głębokości 20 metrów pod powierzchnią wody) (Unsworth, 1966).

### **8.3 Objawy narkozy azotowej**

Behnke i in. (1935) w trakcie eksperymentalnego sprężenia dziewięciu badanych w komorze hiperbarycznej przy ciśnieniu 3-4 ATA (komora hiperbaryczna, odpowiednik ciśnienia panującego na 20-30 metrach pod powierzchnią wody) zaobserwowali u uczestników eksperymentu euforię i wzmożoną potrzebę mówienia (narkoza „euforyczna”), a także opóźnienie reakcji na bodźce, trudności ze skupieniem uwagi na zadaniu, błędy w działaniach arytmetycznych, zaburzenie poczucia czasu i upośledzenie wykonywania czynności psychomotorycznych. Przy 10 ATA (90 metrów pod powierzchnią wody) u jednego z badanych wystąpiło otępienie, a u innych zniesienie odruchów nerwowo-mięśniowych.

Adolfson i Muren (1965) przeprowadzili serię testów w komorze hiperbarycznej przy ciśnieniu 4, 7, 10 i 13 ATA (odpowiednio: 30, 60, 90 i 120 metrów pod powierzchnią wody). Badacze wykazali, że zarówno czynności psychomotoryczne, jak i poznawcze (oceniane przy pomocy wykonywania obliczeń arytmetycznych) wykazują postępujące (liniowe) upośledzenie wraz ze wzrostem ciśnienia otoczenia, jednakże od pewnej granicznej wartości ciśnienia parcjalnemu azotu coraz większe pogorszenie funkcjonowania jest obserwowane przy coraz mniejszym wzroście ciśnienia. Adolfson i Muren (1965) badali także czynności poznawcze przy użyciu metody wolnych skojarzeń. Osoby badane miały za zadanie w ustalonym czasie

---

<sup>15</sup> Jak już wspomniano, zjawisko narkozy azotowej występuje także przy oddychaniu między innymi nitroksenem czy trimiksem (sztucznymi mieszaninami oddechowymi składającymi się odpowiednio: z tlenu i azotu, a także z tlenu, helu i azotu).

wymienić jak najwięcej skojarzeń ze słowem kluczowym. Autorzy eksperymentu stwierdzili, że liczba wolnych skojarzeń spada wraz ze wzrostem ciśnienia otoczenia. Badacze zwrócili uwagę, iż nie istnieje typowy zestaw objawów, typowa kolejność ich wystąpienia czy charakterystyczna dla danego ciśnienia intensywność danych zachowań. U badanych obserwowano euforię lub stan przypominający manię, rozhamowanie (co sugeruje upośledzenie procesu hamowania), agresję, irytację lub zachowania typowe dla stanów psychotycznych. Adolfson i Muren (1965) zwrócili także uwagę na występujące u uczestników eksperymentu trudności z koncentracją, zaburzenia pamięci (u jednego badanego wystąpiła całkowita niepamięć okresu pobytu w warunkach 13 ATA) i zaburzenia percepcji czasu (niektórzy badani sądzili, że pobyt przy ciśnieniu 13 ATA trwał kilka sekund, inni, że kilka godzin, podczas gdy ekspozycja trwała 13-15 minut). Od pewnej wartości ciśnienia otoczenia osoby badane nie były w stanie zrozumieć lub wykonać poleceń eksperymentatora (powtarzali je za eksperymentatorem, ale nie wykonywali ich). Jeden z badanych doświadczył „uczucia lewitacji”, inni zgłaszali zmiany w zakresie odbioru bodźców wzrokowych i słuchowych.

Według niektórych źródeł, w warunkach komory hiperbarycznej, można zaobserwować charakterystyczny obraz osoby, która wykonuje zadania powoli, popełnia błędy, będąc jednocześnie „pewną siebie, hałaśliwą i lekkomyślną”. Jakość wykonania danego zadania spada wraz ze wzrostem ciśnienia otoczenia - pojawia się coraz większa liczba błędów, a czasy reakcji na dane polecenia są coraz dłuższe. W skrajnych przypadkach może dojść do braku reakcji na instrukcje badacza (Unsworth, 1966; Krzyżak, 2006).

Clark (2015) w swojej pracy pisze, iż na głębokości 0-10 m pod powierzchnią wody (w dalszej części tekstu: m ppw) (1-2 ATA) zwykle nie stwierdza się objawów narkozy azotowej, jednakże mogą również wystąpić subtelnie zaznaczone zmiany zachowania. Przy ciśnieniu panującym na 10-30 m ppw (2-4 ATA) może wystąpić upośledzenie wykonywania niećwiczonych wcześniej zadań i upośledzenie rozumowania. W zakresie 30-50 m ppw (4-6 ATA) obserwuje się opóźnienie reakcji na bodźce słuchowe i wzrokowe, błędy w obliczeniach matematycznych, niepamięć, wzmożoną pewność siebie, śmiech (w warunkach komory hiperbarycznej - narkoza „euforyczna”) lub lęk (w warunkach zimnej wody - narkoza „dysforyczna”). Na głębokości 50-70 m ppw (6-8 ATA) pojawia się splątanie, halucynacje, istotne opóźnienie reakcji na bodźce, niekontrolowany śmiech/histeria (w warunkach komory hiperbarycznej) lub przerażenie (w warunkach zimnej wody). Przy nurkowaniach na głębokość 70-90 m ppw z użyciem powietrza (8-10 ATA) może wystąpić otępienie, całkowita utrata orientacji i możliwości rozumowania, całkowita niepamięć, a przy 90 i więcej m ppw (10 i

więcej ATA) - zaburzenia świadomości (do śpiączki włącznie) i śmierć (w mechanizmie tonięcia - przyp. autor). Olszański i Siermontowski (2003) z kolei podają, iż do 50 m ppw (do 6 ATA) występuje euforia, błędy w obliczeniach matematycznych, spowolnienie reakcji na bodźce zmysłowe i spadek sprawności manualnej. Od 50 do 70 m ppw (od 6 do 8 ATA) zauważalne jest pobudzenie lub przygnębienie, zaburzenia orientacji dotyczącej miejsca i czasu, a także senność. W zakresie od 70 do 90 m ppw (od 8 do 10 ATA) wstępuje histeria, halucynacje, otępienie, utrata przytomności i śmierć (również w mechanizmie tonięcia - przyp. autor).

Warto jednakże zwrócić uwagę, że dokładne, enumeracyjne przyporządkowanie objawów/konkretnych zaburzeń funkcjonowania do danego ciśnienia otoczenia jest niemożliwe. Narkoza azotowa indukowana w warunkach „suchej” hiperbarii różni się od „podwodnej” narkozy azotowej (co zostanie szczegółowo omówione w dalszej części tekstu). Nie jest możliwym zatem przygotowanie jednego zestawienia „typowych objawów” dla tych dwóch warunków środowiskowych. Na nasilenie narkozy azotowej wpływa również między innymi użyta do nurkowania mieszanina oddechowa (poprzez procentowy udział azotu w czynniku oddechowym). Należałoby przygotować zatem co najmniej kilka tego typu zestawień, uwzględniających różne parametry ekspozycji hiperbarycznej (środowisko - warunki komory hiperbarycznej vs. warunki podwodne, różne mieszaniny oddechowe itd.). Wspomniane opracowania nie są w pełni spójne z piśmiennictwem dotyczącym zagadnienia, a także zawierają wiele zmiennych, które nigdy nie zostały zbadane, są wątpliwie zoperacjonalizowane lub pochodzą wyłącznie z obserwacji dokonywanych przez różnych badaczy lub samych pletwonurków. Co równie istotne - opracowania uwzględniają pewne wartości ciśnienia otoczenia, które znacznie przekraczają tzw. limity głębokościowe (maksymalne głębokości nurkowania zalecane przez federacje nurkowe, które mogą być bezpiecznie osiągnęte przy użyciu danej mieszaniny oddechowej, por. dalsza część tekstu). Cytowane opracowania Clarka (2015) oraz Olszańskiego i Siermontowskiego (2003) należy więc traktować wyłącznie pogładowo, pamiętając, że zawierają one wiele uogólnień i uproszczeń. Analogicznie do wniosków z poprzedniego akapitu - omawiane zestawienia mogą stanowić poznawczy punkt odniesienia na wstępnym etapie rozważań nad narkozą azotową. Zagadnienia związane z zapobieganiem silnej narkozie azotowej zamieszczono w Załączniku 8.

#### **8.4 Wybrane czynniki wpływające na nasilenie upośledzenia funkcjonowania pod wpływem narkozy azotowej**

Opisano wiele czynników powodujących przyspieszenie pojawienia się i/lub nasilenie objawów narkozy azotowej. Zaliczyć do nich można: zmęczenie i zły stan psychofizyczny, lęk i stres (por. dalsza część tekstu), spożycie alkoholu przed nurkowaniem i/lub przyjęcie innych substancji psychoaktywnych i/lub leków o działaniu depresyjnym na ośrodkowy układ nerwowy. Jak już wspomniano, istotnym czynnikiem nasilającym narkozę może być wychłodzenie organizmu (obniżenie temperatury krwi powoduje jej większe wysycenie azotem, gdyż spadek temperatury cieczy implikuje większą rozpuszczalność gazów). Należy także wspomnieć, że wysiłek fizyczny w trakcie nurkowania przyspiesza wystąpienie narkozy (wzrost liczby uderzeń serca na minutę, a także zwiększenie siły skurczu mięśnia sercowego powoduje szybszą dystrybucję azotu do mózgowia)<sup>16</sup> (Unsworth, 1966; Olszański i Siermontowski, 2003; Krzyżak, 2006; Konarski, 2012).

Z drugiej strony, w dotychczas opublikowanych badaniach nie wykazano aby na globalne upośledzenie funkcjonowania pod wpływem narkozy azotowej miała wpływ budowa ciała czy ogólna sprawność fizyczna (Kneller i Hobbs, 2013; van Wijk i Meintjes, 2014a; Tikkinen i Siimes, 2015). Tylko w jednym badaniu wykazano różnice międzypłciowe - Brebeck i in. (2017) stwierdzili, że kobiety zapamiętywały więcej słów w teście badającym pamięć krótko- i długotrwałą (por. dalsza część tekstu).

Ze względu na charakter pracy, warto zwrócić szczególną uwagę na interakcję lęku i narkozy, a także stresu i narkozy. Mears i Cleary (1980), Hobbs i Kneller (2011), Kneller, Higham i Hobbs (2012), a także Van Wijk i Meintjes (2014b) wykazali, że wysoki poziom lęku istotnie wpływa na pogorszenie funkcjonowania psychomotorycznego i poznawczego w warunkach narkozy azotowej. Zależności takiej nie stwierdzili z kolei Van Wijk i Meintjes (2014a) i Van Wijk, Martin i Meintjes (2017). Szczegółowe omówienie metodologii i wniosków z badań nad wpływem lęku na upośledzenie funkcjonowania spowodowanego narkozą azotową znajduje się w Załączniku 9.

Ekspozycja hiperbaryczna powoduje wzmożoną stymulację adrenergiczną (pobudzenie układu współczulnego; Zarezadeh i Azarbayjani, 2014). Wpływ stresu na funkcjonowanie poznawcze w warunkach normobarycznych jest stosunkowo dobrze poznany (por. np. McEwen

---

<sup>16</sup> Adolfson (1956) badał zręczność i czynności poznawcze (za pomocą testu arytmetycznego) u badanych w stanie spoczynku i w trakcie wysiłku fizycznego. Wykazał on, że upośledzenie czynności poznawczych i psychomotorycznych następuje w warunkach narkozy azotowej (komora hiperbaryczna) dużo szybciej gdy wykonywaniu tych czynności towarzyszy wysiłek fizyczny.

i Sapolsky, 1995; Sandi, 2013), jednakże ekstrapolacja wyników uzyskanych w normobarii na warunki hiperbaryczne może być nietrafna (inny charakter stresorów). Warto zwrócić uwagę, że dysponujemy jednym badaniem, które sugeruje, iż narkoza indukowana podtlenkiem azotu może redukować wpływ stresu na funkcjonowanie pamięci długotrwałej (Russell i Steinberg, 1955). Jakkolwiek badanie zostało przeprowadzone w warunkach ekspozycji na normobaryczny N<sub>2</sub>O, a nie na hiperbaryczny azot, możliwym jest, iż oddziaływania stresu na funkcjonowanie poznawcze i psychomotoryczne w trakcie ekspozycji na wysokie ciśnienia parcjalne azotu nie należy rozpatrywać jako czynnika, który addytywnie lub multiplikacyjnie pogłębia upośledzenie funkcjonowania. Wspomiane zagadnienie wymaga jednak empirycznego zbadania.

### **8.5 Narkoza „komorowa”, a narkoza „podwodna”**

Baddeley (1966) przeprowadził dwa eksperymenty, w trakcie których przy użyciu prostego testu psychomotorycznego oceniał zręczność (ang. *manual dexterity*) uczestników badania. W pierwszym z nich badał płetwonurków na powierzchni wody, na trzech i trzydziestu m ppw ( $N = 12$ ), a w drugim oceniał badanych w trakcie ekspozycji hiperbarycznej w komorze ( $N = 18$ ; w jednym i drugim środowisku w trakcie badań panowało ciśnienie: 1, 1,3, 4 ATA). Autor wykazał, że upośledzenie zręczności badanych jest istotnie większe w warunkach podwodnych, w porównaniu do ekspozycji hiperbarycznej w komorze.

Istnieje wiele czynników, które mogą tłumaczyć różnice w wynikach uzyskanych w tych dwóch warunkach eksperymentalnych. Funkcjonowanie człowieka opiera się między innymi na danych pozyskanych z narządów zmysłów, które ewolucyjnie są przystosowane do odbierania wrażeń zmysłowych w warunkach lądowych. W środowisku podwodnym na upośledzenie funkcjonowania ma wpływ narkoza azotowa (od pewnej wartości ciśnienia parcjalnego azotu), wraz ze specyficznymi, nienaturalnymi dla człowieka warunkami otoczenia. Zaliczyć do nich można między innymi deprivację sensoryczną, tj. ograniczenie pola widzenia przez maskę nurkową, ograniczoną widoczność (zmniejszenie przezierności wody przy złych warunkach nurkowych), ograniczenie wrażeń słuchowych czy zubożenie odbioru bodźców z ręki (w szczególności przy założonych rękawicach nurkowych i/lub w warunkach nurkowania w zimnej wodzie, por. Załącznik 1).

Należy także zwrócić uwagę na fakt innych właściwości fizycznych wody (w stosunku do powietrza), które implikują zaburzenia funkcjonowania aparatu sensorycznego. Zaliczyć

do nich można: odbiór „wyblakłych” kolorów<sup>17</sup>, zaburzenia postrzegania (upośledzona ocena odległości - w wodzie przedmioty wydają się większe i bliżej położone<sup>18</sup>) i zaburzenia percepcji słuchowej (dźwięk w wodzie rozchodzi się około cztery razy szybciej niż na lądzie i z tego powodu płetwonurek może mieć problemy z lokalizacją źródła dźwięku). Co równie ważne, zaburzeniom może ulegać propriocepcja (czucie głębokie - zmysł ułożenia części ciała względem siebie). Istotne zmiany w obrębie czucia głębokiego mogą powodować możliwość utraty orientacji przestrzennej. Z uwagi na fakt, że woda jest około 800 razy bardziej gęsta niż powietrze, płetwonurek, aby pokonać opór wody, musi spożytkować więcej energii na wykonanie danego ruchu (nienaturalny wysiłek fizyczny, w szczególności przy obecności prądów wodnych). Pod wodą istnieje również konieczność kontroli pływalności („unoszenia się” w wodzie), za pomocą zmian objętości czynnika oddechowego w płucach, w kamizelce nurkowej (ang. BCD, *buoyancy control device*), a także w suchym skafandrze (por. Załącznik 1). Przy zachowaniu neutralnej pływalności (ang. *neutral buoyancy*) możliwym jest doświadczenie uczucia nieważkości, porównywanego do przebywania w warunkach mikrogravitacji (analogicznego do przebywania w warunkach kosmicznych lub w trakcie lotu parabolicznego; por. Karmali i Shelhamer, 2008). Wreszcie - należy zwrócić uwagę na „przeszkody mechaniczne” do których należą elementy wyposażenia nurkowego (między innymi kamizelka nurkowa, butle, rękawice czy obecność węży, por. Załącznik 1), które mogą negatywnie wpływać na wykonywanie różnych czynności pod wodą (Baddeley, 1966; Ono i O'Reilly, 1971; Davis, Osborne, Baddeley i Graham, 1972; Fowler, 1973; Banks, Berghage i Heaney, 1979; Hobbs i Kneller, 2011). Wszystkie wymienione powyżej czynniki mogą wpływać na międzysrodowiskowe różnice w funkcjonowaniu poznawczym i psychomotorycznym.

Warto jednakże zwrócić uwagę, iż przy doskonałych warunkach do nurkowania (nurkowanie w ciepłych i przeziernych wodach) zaburzenie funkcjonowania mierzone testami psychomotorycznymi może być bardzo zbliżone do zaburzeń psychomotorycznych stwierdzonych przy tożsamym ciśnieniu w komorze hiperbarycznej (Baddeley, De Figueredo, Curtis i Williams, 1968). W badaniach Philpa i in. (1989) (komora hiperbaryczna, 4,6 ATA)

---

<sup>17</sup> Wraz ze wzrostem głębokości pochłanianiu (absorpcji) ulegają w kolejności kolory: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski i fioletowy (por. Załącznik 10).

<sup>18</sup> Warto także dodać, że narkoza azotowa wpływa na odruch przedsionkowo-oczny (ruch gałek ocznych w przeciwnym kierunku do ruchu głowy, który pozwala skupiać wzrok w jednym miejscu), co także może mieć wpływ na funkcjonowanie w warunkach nadciśnienia (Hamilton, Porlier, Landolt, Fraser i Fowler, 1986; Hamilton, Laliberte, Heslegrave i Khan, 1993).

i Hobbsa i Knellera (2009) (37-40 m ppw, co odpowiada 4,7-5 ATA) badacze stwierdzili taki sam stopień upośledzenia pamięci (mierzonego zdolnością do odtwarzania zapamiętanych słów).

### **8.5.1 Lęk i stres w warunkach komory hiperbarycznej i w warunkach podwodnych**

Jak już wspomniano, w trakcie ekspozycji w warunkach komory hiperbarycznej (w zakresie dopuszczalnych limitów głębokościowych) istnieje większe prawdopodobieństwo rozwoju narkozy „euforycznej”, niż „dysforycznej”. Analogicznie, w trakcie nurkowań w ciepłych i przejrzystych wodach spodziewać się należy raczej narkozy o typie „euforycznym”. Przeciwnie, nurkowanie w trudnych warunkach (wody zimne i mało przejrzyste) stanowi czynnik ryzyka rozwoju narkozy „dysforycznej”. Poza czynnikami wymienionymi w poprzednim akapicie, wydaje się, że poziom lęku i stresu mogą być kolejnymi zmiennymi, które powodują różnice w wynikach uzyskanych w trakcie badań w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych (Hobbs i Kneller, 2011), co sprawia, że międzyśrodowiskowa ekstrapolacja wyników może być nietrafna.

Zarezadeh i Azarbayjani (2014) mierzyli poziom kortyzolu przed i po nurkowaniu na wodach otwartych. Nurkowania odbywały się na głębokość 1, 10, 20 i 30 m ppw (odpowiednio: 1,1, 2, 3 i 4 ATA). Badacze zauważyli następujące trendy: im głębsze nurkowanie ma wykonać pletwonurek, tym większe stężenie kortyzolu we krwi, a także im głębsze nurkowanie było wykonywane tym większe stężenie tego hormonu po wynurzeniu. Co więcej, poziom kortyzolu był istotnie wyższy po zakończeniu nurkowań, w porównaniu do poziomu występującego przed wejściem do wody. Odmienne wyniki uzyskali badacze, którzy przeprowadzili eksperymenty w warunkach „suchej” ekspozycji hiperbarycznej w komorze. W badaniu Lunda i in. (1999) poziom kortyzolu w trakcie pobytu w nadciśnieniu był istotnie niższy niż przed sprężeniem. Tikkinen, Hirvonen, Parkkola i Siimes (2011) stwierdzili istotny spadek poziomu kortyzolu po dekompresji (po wynurzeniu), w porównaniu do pomiaru dokonanego przed sprężeniem. Wspomniane wyniki badań stanowią kolejny argument przemawiający przeciwko możliwości ekstrapolacji wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na warunki podwodne (i odwrotnie). Jak już wspomniano, nieznany jest wpływ interakcji stresu i narkozy, jednakże mając na uwadze powyżej przedstawione dane można postawić hipotezę, że stres w różny sposób (poprzez jego różne nasilenie) wpływa na upośledzenie funkcjonowania w warunkach ekspozycji „suchych” i w warunkach podwodnych. Podsumowując, różny poziom kortyzolu, który występuje w różnych środowiskach (ekspozycja „sucha” vs. ekspozycja podwodna)



wyduje się być kolejnym czynnikiem, który może wpływać na różnice w funkcjonowaniu poznawczym i psychomotorycznym płetwonurków wykonujących nurkowania w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych.

W tym miejscu warto przywołać pracę, którą opublikował Weltman, Smith i Egstrom (1971). Autorzy przeprowadzili badanie w warunkach komory hiperbarycznej, w którym wykazali, że sama symulacja przebywania w warunkach nadciśnienia ma potencjał lękotwórczy i stresogenny. Poprzez manipulacje eksperymentalne, na przykład poprzez użycie dźwięku odpowiadającego pracy sprężarek („syczenie”) czy przez ręczną manipulację manometrem wskazującym ciśnienie otoczenia, badacze wytworzyli w uczestnikach eksperymentu przekonanie, iż znajdują się w warunkach nadciśnienia rzędu 2,8 ATA (18 m ppw). Omawiane zabiegi, wraz z przebywaniem w bardzo ograniczonej przestrzeni komory hiperbarycznej (z której nie można natychmiast się wydostać) wystarczyły do wyindukowania lęku u uczestników badania, który był istotnie wyższy niż w grupie kontrolnej (badanej poza komorą). Zaobserwowano również istotne międzygrupowe różnice w częstości pracy serca - osoby badane w warunkach komory hiperbarycznej miały istotnie wyższe tętno.

Wynik cytowanego badania można wytłumaczyć poprzez pryzmat psychoewolucyjny. W dzisiejszych czasach zachowania spełniające kryteria fobii specyficznej są rozpatrywane w kategoriach zaburzenia psychicznego. Fobia specyficzna jest dezadaptacyjna - może dezorganizować zachowanie i powodować istotne klinicznie cierpienie. Jednakże w odległych czasach nagłe i krótkotrwałe pobudzenie układu współczulnego przy zagrażającym bodźcu lub też bodźcu niezagrażającym (ale podobnym do zagrażającego) było bardziej korzystne niż niezauważenie lub zbagatelizowanie bodźca zagrażającego (Buss, 2001). Buss (2001) w swojej książce pisze: *(...) w dużych miastach trudno o węża, roi się natomiast od samochodów. Wiele dowodów wskazuje na to, że u ludzi łatwiej pojawia się lęk przed zagrożeniami, które były powszechne w dawnych czasach, niż występującymi obecnie. Rzadko słychać, by ktoś lękał się samochodów, pistoletów, gniazdek elektrycznych czy papierosów, ponieważ z perspektywy ewolucyjnej są to zagrożenia stosunkowo świeżej daty - zbyt świeżej, aby w procesie doboru naturalnego wykształciły się mechanizmy lękowe. Fakt, że więcej mieszkańców miast zgłasza się do psychiatry z powodu lęku przed węzami niż przed samochodami albo gniazdkami elektrycznymi jest odbiciem zagrożeń, z jakimi stykali się nasi przodkowie* (s. 112-113).

Omawiając ewolucyjną spuściznę w postaci częstych w społeczeństwie fobii specyficznych warto przywołać dwie fobie, które mogą mieć istotne znaczenie w kontekście nurkowania. Zarówno agorafobia (lęk przed otwartą przestrzenią), jak i klaustrofobia (lęk przed

znacznie ograniczonymi, zamkniętymi pomieszczeniami) mogą być tłumaczone jako wykształcona w toku ewolucji preferencja do unikania miejsc z których nie można łatwo salwować się ucieczką (Buss, 2001). Osoby, które cierpią z powodu klaustro- i/lub agorafobii nie powinny wykonywać żadnych nurkowań (pytania o nietolerancję zamkniętych lub otwartych przestrzeni pojawiają się w kwestionariuszach medycznych wypełnianych przed nurkowaniami).

Lęk przed zamkniętymi lub otwartymi przestrzeniami nie musi jednak przebierać skrajnej formy (fobii). Może przybierać formę „rezydualną”, mniej nasiloną, która stanowi w chwili obecnej nieadaptacyjną pozostałość ewolucyjną. Wydaje się, iż nurkowanie w warunkach podwodnych może powodować lęk w mechanizmie lękotwórczego potencjału zarówno otwartej i nieograniczonej, jak i jednocześnie zamkniętej przestrzeni, z której nie można natychmiast się wydostać (wynurzyć się). Płetwonurek może zostać „przytłoczony” ogromem przestrzeni dookoła niego, szczególnie w trakcie wykonywania podwodnych, głębokich nurkowań, gdy następuje utrata kontaktu wzrokowego zarówno z taflą wody, jak i z dnem. Pomimo ogromnej przestrzeni brakuje jednak potencjalnych miejsc do ukrycia się (komponenta agorafobiczna). Świadomość niemożności natychmiastowego wynurzenia się na powierzchnię wody (kojarząca się z naturalnym dla człowieka środowiskiem i z bezpieczeństwem) spowodowana możliwością wystąpienia stanów zagrożenia zdrowia i życia, które mogą wystąpić po zbyt szybkim wynurzeniu (por. dalsza część tekstu) tworzy natomiast komponentę klaustrofobiczną. Z drugiej strony, ekspozycje hiperbaryczne w komorze są związane z przebywaniem w bardzo ograniczonej i zamkniętej powierzchni, której szybkie opuszczenie również może okazać się niemożliwe.

Rozważyć należy zatem hipotezę, iż komponenta klaustro- i/lub agorafobiczna mogą być jednymi ze składowych odpowiedzialnych za genezę lęku w trakcie ekspozycji hiperbarycznych i przez to istotnie wpływać na funkcjonowanie poznawcze i psychomotoryczne w warunkach hiperbarii. Istotnie różny lęk powstały w różnych mechanizmach może również stanowić o międzyśrodowiskowych rozbieżnościach w omawianych zmiennych.

### **8.5.2 Narkoza „komorowa”, a narkoza „podwodna” - podsumowanie**

Przebywanie w nienaturalnych dla człowieka środowiskach powoduje lęk i stres poprzez świadomość możliwych zagrożeń. Co więcej, zmienne te mogą zostać zmnożone przez nieadaptacyjną (w chwili obecnej) spuściznę ewolucyjną (komponenta klaustro- i agorafobiczna).

Istnieją liczne zmienne, które przyspieszają wystąpienie i/lub pogłębiają narkozę azotową. Upośledzenie funkcjonowania człowieka w warunkach nadciśnienia nie może być zatem tłumaczone jednoczynnikowo, wyłącznie przez pryzmat narkozy (grupa eksperymentalna) lub jej braku (grupa kontrolna), bez uwzględnienia między innymi różnic środowiskowych i sytuacyjnych występujących w różnych grupach badawczych. Z tego powodu ekstrapolacja wyników uzyskanych w dwóch różnych środowiskach (komora hiperbaryczna vs. warunki podwodne) jest kontrowersyjna.

Co więcej, należy postawić pytanie o rzetelność analiz i wyprowadzonych wniosków z badań w których wyniki grupy hiperbarycznej (np. badanej w komorze) są porównywane do normobarycznej grupy kontrolnej. Opisywana sytuacja (niezachowanie kanonu jedynej różnicy) występuje w absolutnej większości badań dotyczących narkozy azotowej. Wydaje się zatem, iż optymalną grupą kontrolną jest grupa oddychająca nienarkotyczną mieszaniną helowo-tlenową (helioks), która jest eksponowana na tożsame ciśnienie otoczenia (tożsamą głębokość) co grupa eksperymentalna.

Warto podkreślić, iż na narkozę azotową należy patrzeć holistycznie i interdyscyplinarnie - somatyczne następstwa narkozy implikują zmiany psychiczne i odwrotnie (Jennings, 1968). Zagadnienia związane z narkozą azotową należą do nauki z pogranicza między innymi medycyny, psychologii, biofizyki czy ergonomii (a w przyszłości, po pokonaniu licznych trudności logistycznych, również neuronauki).

## **9 Wpływ narkozy azotowej na wybrane składowe aparatu psychicznego człowieka**

### **9.1 Funkcjonowanie psychomotoryczne a narkoza azotowa**

#### **9.1.1. Wstęp**

Jak już wspomniano, testy oceniające proces przeszukiwania, które będą wykonywane na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej będą jednocześnie testami wymagającymi pewnych czynności manualnych. Z tego powodu poniżej przedstawiono wnioski z eksperymentów w trakcie których oceniano funkcjonowanie psychomotoryczne w warunkach narkozy azotowej.

#### **9.1.2 Kwarenda**

W chwili pisania niniejszej rozprawy doktorskiej w wyszukiwarce EBSCO i PubMed przy użyciu kryteriów wyszukiwania: tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” i tytuł/abstrakt „*inert gas narcosis*”, a także podczas analizy piśmiennictwa zamieszczonego w artykułach dotyczących zagadnienia znaleziono czternaście badań eksperymentalnych oceniających wpływ narkozy azotowej na funkcjonowanie psychomotoryczne.

#### **9.1.3 Funkcjonowanie psychomotoryczne a narkoza azotowa - analiza wniosków z badań**

Poulton i in. (1963) i Petri (2003) wykazali, że upośledzenie czynności psychomotorycznych w warunkach komory hiperbarycznej może wystąpić już przy ciśnieniu 2 ATA (co odpowiada głębokości 10 m ppw). W innym badaniu (Tikkinen, Parkkola i Siimes, 2013) nie stwierdzono wpływu tak łagodnej hiperbarii na omawianą zmienną. Z drugiej strony, Philp i in. (1989) badając płetwonurków w komorze hiperbarycznej przy ciśnieniu 4,6 ATA (36 m ppw) nie wykazali aby wspomniana wartość nadciśnienia wpływała na zręczność.

Warto ponownie przywołać badanie Baddeleya (1966) w trakcie którego przy użyciu prostego testu psychomotorycznego była oceniana zręczność (ang. *manual dexterity*) uczestników badania. W pierwszym eksperymencie badano płetwonurków na powierzchni, na trzech i na trzydziestu metrach pod powierzchnią wody ( $N = 12$ ), a w drugim oceniano badanych w trakcie ekspozycji hiperbarycznej w komorze ( $N = 18$ ; przy tożsamym ciśnieniu otoczenia: 1, 1,3, 4 ATA). Badacz stwierdził istotne wydłużenie czasu wykonywania zadań w warunkach podwodnych.

Poulton i in. (1964) stwierdzili, że narkoza azotowa upośledzała wykonywanie czynności psychomotorycznych tylko wtedy, gdy były one wykonywane po raz pierwszy w hiperbarii. Dzięki wcześniejszemu treningowi w warunkach normobarycznych, ekspozycja na 3,5 ATA (co odpowiada głębokości 25 m ppw) nie wpływała na efektywność wykonania zadania. Kiessling i Maag (1962), a także Biersner, Hall, Linaweaver i Neuman (1978) zaobserwowali, że jakość wykonywanych czynności pod wpływem narkozy jest odwrotnie proporcjonalna do ich trudności. Na wykonywanie zadań psychomotorycznych w warunkach narkozy azotowej wpływa również dyspozycja psychofizyczna. Badani, którzy deklarowali, że są bardziej zmęczeni i mniej szczęśliwi byli mniej podatni na upośledzenie funkcjonowania psychomotorycznego, niż ci którzy byli mniej zmęczeni i bardziej szczęśliwi (Biersner i in., 1978).

Poulton i in. (1964) nie zaobserwowali korelacji pomiędzy wiekiem badanych, a stopniem upośledzenia czynności psychomotorycznych (komora hiperbaryczna, 2, 2,5 i 3,5 ATA, co odpowiada 10, 15 i 25 m ppw). Odmienne wyniki uzyskali Tikkinen i Siimes (2015), którzy wykazali, że młodszy nurkowie byli bardziej podatni na narkozę azotową (stwierdzano u nich dłuższe czasy reakcji na bodźce; eksperyment przeprowadzono w komorze hiperbarycznej przy ciśnieniu 6 ATA, co odpowiada 50 m ppw). Nie stwierdzono, aby płeć miała wpływ na czas reakcji w warunkach narkozy (Jakovljević, Vidmar i Mekjavic, 2012), jednakże należy zwrócić uwagę, iż wspomniany wniosek postawiono na podstawie badania przeprowadzonego z użyciem 30% N<sub>2</sub>O (co stawia pod znakiem zapytania możliwość ekstrapolacji wyników na warunki narkozy azotowej).

Od pewnej wartości ciśnienia otoczenia obserwuje się u badanych wydłużenie czasu reakcji na bodźce, spadek zręczności (ang. *dexterity*) i koordynacji wzrokowo-przestrzennej, a także wzrost liczby popełnianych błędów. U części badanych stwierdzano również brak możliwości wykonania zadania (Kiessling i Maag, 1962; Frankenhaeuser, Graff-Lonnevig i Hesser, 1963; Davis i in., 1972; Moeller, Chattin, Rogers i Ryack, 1981; Meckler i in., 2014).

Podsumowując, dolna granica ciśnienia otoczenia przy której stwierdzono zaburzenia funkcjonowania psychomotorycznego zależy zarówno od zastosowanej metodologii badawczej, jak i od warunków w jakich przeprowadzono badania (komora hiperbaryczna vs. warunki podwodne). Co istotne, nie należy ekstrapolować wyników badań oceniających funkcjonowanie psychomotoryczne, które zostały przeprowadzone w warunkach komór hiperbarycznych na ekspozycje podwodne i odwrotnie (Baddeley, 1966).

Warto dodać, iż z cytowanych powyżej badań wynikają implikacje praktyczne. Przykładowo, należy tak dalece jak jest to możliwe upraszczać procedury wykonywane w warunkach hiperbarycznych, a także regularnie je ćwiczyć, zarówno w warunkach normo-, jak i hiperbarycznych (Kiessling i Maag, 1962; Poulton i in., 1964; Biersner i in., 1978).

#### **9.1.4 Potencjalne obszary badań**

Do chwili obecnej nie przeprowadzono ani jednego badania w którym oceniano by funkcjonowanie psychomotoryczne w trakcie ekspozycji hiperbarycznej z użyciem helioksu (nienarkotycznej mieszaniny oddechowej składającej się z tlenu i helu). Wiadomym jest, iż za upośledzenie funkcjonowania psychomotorycznego w warunkach nadciśnienia odpowiada interakcja narkozy azotowej i czynników środowiskowych (zewnętrznych) (Baddeley, 1966). Wspominany model może być jednak niepełny, gdyż nie uwzględnia czynników wewnętrznych, takich jak lęk i stres, które występują w trakcie ekspozycji hiperbarycznych. Wspominane zmienne mogą być różnie nasilone zarówno w zależności od środowiska badawczego (warunki komory hiperbarycznej vs. warunki podwodne) (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011; Hobbs i Kneller, 2011; Zarezadeh i Azarbayjani; 2014), jak i w zależności od czynnika oddechowego użytego do nurkowania. Narkoza indukowana podtlenkiem azotu może redukować lęk i stres (Russell i Steinberg, 1955), teoretycznie więc można się spodziewać różnego poziomu przywoływanych zmiennych w przypadku ekspozycji na hiperbarię powietrzną (narkoza) i hiperbarię helioksovą (brak narkozy). Różny poziom lęku i stresu może różnie wpływać na czynności psychomotoryczne (por. Metz, 2007; Nieuwenhuys i Oudejans, 2012) w różnych warunkach środowiska zewnętrznego (por. dalsza część tekstu).

Brak grup kontrolnych w postaci ekspozycji na hiperbaryczny helioks (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia co powietrzna grupa eksperymentalna) należy traktować jako niezachowanie kanonu jedynej różnicy i uchybienie metodologiczne omawianych powyżej badań. Warunki normo- i hiperbaryczne różną się pod wieloma względami, a obecność lub brak narkozy azotowej stanowi tylko jeden z czynników. W celu oceny wpływu środowiska badawczego, stresu (helioks), jak i interakcji narkozy azotowej i stresu (hiperbaria powietrzna) optymalnie należałoby prowadzić badania w warunkach normobarycznych, hiperbaryczno-powietrznych i hiperbaryczno-helioksovych, zarówno podczas „suchych” ekspozycji na nadciśnienie w komorze, jak i podczas badań podwodnych. Poniżej szczegółowo opisano podjęte w niniejszej rozprawie doktorskiej kierunki badań własnych.

## 9.2 Uwaga a narkoza azotowa

Funkcjonowanie w warunkach „suchej” hiperbarii opiera się zarówno na uwadze wzrokowej, jak i słuchowej. Z drugiej strony, w warunkach podwodnych, ze względu na charakter środowiska, ma miejsce w zasadzie korzystanie wyłącznie z uwagi wzrokowej. W obu środowiskach płetwonurkowie mogą wykonywać czynności precyzyjne (wymagające intensyfikacji uwagi i głębokiego przetworzenia bodźców), jak i te, które wymagają operowania szerszym polem percepcyjnym (wymagające ekstensyfikacji uwagi). Prawidłowe funkcjonowanie procesów uwagowych jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa, jak i powodzenia wykonywanych działań w warunkach nadciśnienia.

Jak już wspomniano, warunki hiperbaryczne mogą wpływać na procesy uwagowe już na poziomie aparatu sensorycznego. Kolejnym czynnikiem zaburzającym funkcjonowanie uwagi jest narkoza azotowa. Informacje dotyczące oddziaływania wysokich ciśnień parcjalnych azotu na omawianą zmienną, które można znaleźć w piśmiennictwie, ograniczają się jednakże do lakonicznych opisów zachowania badanych w trakcie eksperymentu. Wspomniane opisy można znaleźć w starszych artykułach, które często miały po części charakter obserwacyjno-opisowy. Przykładowo, Behnke i in. (1935) zaobserwowali bliżej nieokreślone trudności ze skupieniem uwagi na wykonywanym zadaniu. Jako, że wnioski z omawianych badań mają charakter bardzo ogólny, niemożliwym jest stwierdzenie, które elementy aparatu uwagowego są podatne na narkozę azotową.

### 9.2.1 Kwardenda

W chwili pisania niniejszej rozprawy doktorskiej w wyszukiwarce EBSCO i PubMed przy użyciu kryteriów wyszukiwania: tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” i tytuł/abstrakt „*inert gas narcosis*”, a także podczas analizy piśmiennictwa zamieszczonego w artykułach dotyczących zagadnienia znaleziono jedno badanie eksperymentalne oceniające wpływ narkozy azotowej na procesy uwagowe.

### 9.2.2 Uwaga wzrokowa a narkoza azotowa - analiza badania Brebecka i in. (2017)

Brebeck i in. (2017) zastosowali Test Łączenia Cyfr (ang. *Number Connection Test*), który polega na jak najszybszym połączeniu ze sobą cyfr/liczb (od 1 do 90). Test bada czynności psychomotoryczne, długotrwałą uwagę wzrokową, przeszukiwanie wzrokowe, a także szybkość poznawczą (ang. *cognitive processing speed*; szybkość z jaką dana osoba

reaguje na bodźce). Autorzy zbadali płetwonurków ( $N = 108$ , 70 mężczyzn, 38 kobiet), którzy oddychali powietrzem lub nitroksiem (mieszaniną tlenu i azotu o zwiększonej ilości tlenu i zredukowanej ilości azotu w stosunku do powietrza - EAN28, 28%  $O_2$ , 72%  $N_2$ ) w trakcie nurkowań na wodach otwartych (morze, 24 m ppw, co odpowiada ciśnieniu 3,4 ATA). Ciśnienia parcjalne azotu ( $ppN_2$ ) były więc w tych dwóch grupach badawczych różne (przy tożsamej głębokości nurkowania), co warunkowało różne nasilenie narkozy ( $ppN_{2\text{powietrze}} = 2,65$  ATA vs.  $ppN_{2\text{nitroks}} = 2,44$  ATA). Badani wykonywali test klęcząc na dnie, a jego rozpoczęcie sygnalizował badacz, który odkrywał dłonią cyfrę „1”. W przypadku wystąpienia błędu (nieprawidłowego połączenia ze sobą cyfr/liczb) eksperymentator sygnalizował to badanemu za pomocą gestu<sup>19</sup>. Koniec testu następował po zaznaczeniu liczby „90” lub po upływie 4 minut.

Badacze nie wykazali istotnych różnic pomiędzy grupami w Teście Łączenia Cyfr zarówno pod względem czasu wykonania, jak i liczby popełnionych błędów. Autorzy zwracają jednakże uwagę na silną tendencję (oryg. *strong trend*) w kierunku mniejszej liczby błędów które zostały popełnione w grupie nitroksowej (powietrze: 15 błędów vs. nitroks: 9 błędów,  $p > ,05$ ).

Wpływ narkozy azotowej na funkcjonowanie przerzutności (jako składowej procesów uwagowych) zostanie omówiony w dalszej części tekstu, podczas analizy innego badania.

### 9.2.3 Potencjalne obszary badań

Brebeck i in. (2017) porównywali ze sobą dwie grupy płetwonurków oddychających w warunkach podwodnych dwiema różnymi mieszaninami oddechowymi (powietrze vs. nitroks, przy tym samym ciśnieniu otoczenia). Jakkolwiek badanie jest bardzo wartościowe - zostało przeprowadzone na dużej grupie (jak na specyfikę badań w nadciśnieniu, por. dalsza część tekstu) i stanowi źródło wiedzy o różnicach w funkcjonowaniu poznawczym pod wodą przy oddychaniu dwiema mieszaninami oddechowymi o różnej zawartości azotu, to jednak brak grupy kontrolnej nie pozwala wyciągnąć jakichkolwiek wniosków o potencjalnych różnicach dotyczących procesu przeszukiwania pomiędzy warunkami kontrolnymi i warunkami narkozy azotowej. Brak danych kontrolnych nie pozwala na weryfikację hipotez czy przeszukiwanie przy wspomnianych ciśnieniach parcjalnych azotu ( $ppN_2$ ) nie jest zaburzone, czy też

---

<sup>19</sup> W artykule nie znaleziono informacji o czynniku oddechowym, którym oddychał eksperymentator. Sądzić można, iż było to powietrze lub nitroks, ze względu na fakt, iż w badaniu używano wspomnianych mieszanin oddechowych. Użycie czynnika oddechowego zawierającego w swoim składzie azot sprawia, iż osoba eksperymentatora również była w stanie narkozy azotowej, co potencjalnie mogło wpływać na jakość nadzoru nad wykonaniem testu.



przeszukiwanie przy tych poziomach ppN<sub>2</sub> jest zaburzone w stosunku do grupy kontrolnej, ale nie ma istotnych różnic w wykonaniu testu przy oddychaniu dwoma różnymi czynnikami oddechowymi (o różnym udziale procentowym azotu). Podsumowując, badanie sugeruje, że oddychanie mieszaniną oddechową o mniejszym procentowym udziale azotu, w porównaniu do powietrza, może mieć potencjalne korzyści (mniejsza liczba błędów na poziomie tendencji statystycznej w grupie nitoksowej), jednakże nie pozwala na oszacowanie dolnej granicy ciśnienia parcjalnego azotu przy której może dochodzić do upośledzenia procesu przeszukiwania. Co więcej, badanie wykonano tylko w jednym środowisku badawczym (warunki podwodne), co nie pozwala na zbadanie międzyśrodowiskowych (środowisko wodne vs. środowisko komory hiperbarycznej) różnic w funkcjonowaniu przeszukiwania. Należy więc przeprowadzić badanie eksperymentalne w warunkach „suchej” hiperbarii powietrznej i w warunkach podwodnych, z grupą kontrolną, optymalnie oddychającą helioksem (zachowując tym samym kanon jedynej różnicy).

Do chwili obecnej nie oceniano wpływu narkozy azotowej na wykonywanie zadań wymagających intensyfikacji uwagi (niewielkie pole percepcyjne, głębokie przetworzenie bodźców), jak i ekstensyfikacji uwagi (większy zakres pola percepcyjnego, płytsze przetwarzanie bodźców).

Jak już wspomniano, z procesami uwagowymi wiąże się także efekt przetargu szybkość-poprawność (ang. *speed-accuracy trade off*) (Spieser i in., 2017; Ross i in., 2011). Do chwili obecnej nie analizowano wpływu wspomnianego efektu na charakter wykonania testów pod wpływem narkozy azotowej. Wykazano, iż wyższe wykształcenie może do pewnego stopnia kompensować upośledzenie funkcjonowania poznawczego wywołanego narkozą azotową (van Wijk i Meintjes, 2014). Przywoływane w dalszej części tekstu badanie Hobbsa i in. (2014) stanowi dowód na to, że płetwonurkowie mogą stosować różne techniki mające na celu poznawczą kompensację wpływu narkozy azotowej. Nie jest jednak jasne czy osoby będące pod wpływem narkozy mogą np. kompensacyjnie spowalniać wykonanie testu w celu zniwelowania zaburzonego funkcjonowania procesu przeszukiwania (większa poprawność kosztem mniejszej szybkości). Użyty przez Brebecka i in. (2017) Test Łączenia Cyfr, polegający na łączeniu punktów (ocenie zmienne: czas wykonania, liczba poprawnych detekcji, liczba popełnionych błędów) lub jego odpowiednik wydaje się być dobrą miarą wystąpienia lub braku kompensacyjnego efektu szybkość-poprawność w trakcie wykonywania zadania wymagającego przeszukiwania.

### 9.3 Funkcje wykonawcze a narkoza azotowa

Zdolność do hamowania dominującej, impulsywnej i automatycznej reakcji jest jednym z kluczowych czynników warunkujących bezpieczeństwo nurkowania, ze względu na fakt, iż w środowisku hiperbarycznym wymagana jest świadoma i precyzyjna kontrola zachowania. W wymagających poznawczo, niespodziewanych i/lub niebezpiecznych sytuacjach prawidłowe działanie funkcji wykonawczych musi gwarantować nie tylko szybkość, ale i odpowiednią reakcję. Przykładowo, w przypadku wyczerpania się czynnika oddechowego w butli nurkowej pętlonurek musi powstrzymać silny i automatyczny odruch zatrzymania resztek mieszaniny oddechowej zalegającej w płucach z następowym, gwałtownym wynurzeniem się. Opisywane zachowanie może spowodować groźne dla zdrowia i życia konsekwencje (por. dalsza część tekstu). Omawiana sytuacja, pomimo swojego dramatyzmu, wymaga określonego, skoordynowanego i sekwencyjnego działania opierającego się na świadomej i ścisłej kontroli poznawczej (w zależności od sytuacji - skorzystanie z alternatywnego źródła powietrza partnera nurkowego lub stosunkowo powolne wynurzenie się z ciągłym wypuszczaniem powietrza z płuc).

Kolejnym gwarantem bezpieczeństwa jest szybka adaptacja do zmieniających się warunków otoczenia, w skład której wchodzi umiejętność przełączania się z wykonywania jednego zadania na drugie, a także aktualizowanie informacji przechowywanych w pamięci roboczej. Przykładowo, w warunkach podwodnych pętlonurek musi stale monitorować wiele zmiennych do których zaliczyć należy między innymi: analizowanie aktualnej głębokości, ilości mieszaniny oddechowej w butli/butlach (swoich, jak i należących do partnera/partnerów nurkowych), kierunku/kursu pływnięcia, pozycji względem punktów nawigacyjnych itd. Odpowiednie współdziałanie omawianych procesów - przełączanie się pomiędzy poszczególnymi zadaniami przy jednoczesnym hamowaniu niektórych reakcji, wraz z ciągłym aktualizowaniem informacji znajdujących się w pamięci roboczej odpowiada za kontrolę zachowania, planowanie, wypracowywanie decyzji i radzenie sobie z nowymi sytuacjami (Steinberg i Doppelmayr, 2017).

#### 9.3.1 Kwarenda

W chwili pisania niniejszej rozprawy doktorskiej w wyszukiwarce EBSCO i PubMed przy użyciu kryteriów wyszukiwania: tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” i tytuł/abstrakt „*inert gas narcosis*”, a także podczas analizy piśmiennictwa zamieszczonego w artykułach

dotyczących zagadnienia znaleziono jedno badanie eksperymentalne oceniające wpływ narkozy azotowej na funkcje wykonawcze.

### **9.3.2 Funkcje wykonawcze a narkoza azotowa - analiza badania Steinberga i**

#### **Doppelmayra (2017)**

Steinberg i Doppelmayr (2017) przeprowadzili badanie na grupie 20 pletwonurków rekreacyjnych (niezawodowych, 16 mężczyzn i 4 kobiety). Eksperyment został przeprowadzony w trzech warunkach środowiskowych: na lądzie, a także na głębokości 5 i 20 m ppw (odpowiednio: 1,5 ATA i 3 ATA, wody basenowe o temperaturze 26°C, powietrze jako czynnik oddechowy). Badanie było nowatorskie pod względem metodologicznym - autorzy jako pierwsi na świecie (i jedyni do chwili obecnej) użyli wodoodpornego tabletu z ekranem dotykowym. Bateria użytych testów obejmowała: zmodyfikowany Test Stroopa (ang. *Stroop test*), a także dwa testy oceniające odpowiednio przerzutność (ang. *Number/letter test*) i odświeżanie informacji w pamięci roboczej (ang. *2-back test*). Szczegółowy opis testów użytych w badaniu został zamieszczony w Załączniku 11.

Istotne upośledzenie funkcjonowania poznawczego zaobserwowano jedynie w trakcie wykonywania Testu Stroopa na głębokości 20 metrów (3 ATA). Autorzy oszacowali upośledzenie kontroli hamowania (ang. *inhibitory control ability*) o około 9% w stosunku do grup kontrolnych (w odniesieniu do grupy badanej na lądzie i w warunkach podwodnych na głębokości 5 m ppw).

### **9.3.3 Potencjalne obszary badań**

Steinberg i Doppelmayr (2017) omawiając wyniki swojego eksperymentu zasugerowali, iż różne sieci neuronalne (ang. *neural networks*) odpowiedzialne za różne funkcje wykonawcze mogą być różnie podatne na wpływ hiperbarycznego azotu. Mając na uwadze fakt, że hamowanie jako jedyna spośród ocenianych funkcji wykonawczych uległo upośledzeniu, wydaje się, iż omawiana zmienna jest szczególnie podatna na wpływ narkozy azotowej. Ujmując zagadnienie inaczej: Steinberg i Doppelmayr (2017) wykazali, że hamowanie, w porównaniu do przerzutności i odświeżania informacji w pamięci roboczej ulega zaburzeniu przy mniejszym ciśnieniu parcjalnym azotu.

Warto jednak zwrócić uwagę, iż omawiane badanie przeprowadzono na głębokości 20 m ppw (3 ATA). Otwartym pozostaje pytanie czy pozostałe funkcje wykonawcze (odświeżanie informacji w pamięci roboczej i przerzutność) ulegną upośledzeniu przy wyższych ciśnieniach

parcjalnych azotu występujących w zakresie dopuszczalnych limitów głębokościowych dla nurkowań z użyciem powietrza (40 m ppw = 5 ATA według federacji nurkowej PADI i 50 m ppw = 6 ATA wg CMAS).

Przywoływane badanie cechuje się umiarkowaną trafnością ekologiczną. Eksperyment został przeprowadzony na „bezpiecznych”, ciepłych i doskonale przeziernych wodach basenowych. Jakkolwiek wspomniana praca ma ogromną wartość, należy ten fakt uwzględniać przy wyciąganiu wniosków, a także przy próbie ekstrapolacji wyników na realne warunki podwodne.

Należy więc przeprowadzić badanie oceniające działanie funkcji wykonawczych przy wyższych ciśnieniach parcjalnych azotu celem odpowiedzi na pytanie czy odświeżanie informacji w pamięci roboczej i przerzutność są zmiennymi podatnymi na wpływ narkozy azotowej występującej przy nurkowaniach wykonywanych na aktualnie dopuszczalne głębokości. Aby zachować kanon jedynej różnicy, grupa kontrolna powinna oddychać nienarkotyczną mieszaniną helowo-tlenową (helioks), przy tożsamym ciśnieniu otoczenia co grupa eksperymentalna. Należy również przeprowadzić badanie na wodach otwartych, gdyż na wykonanie testów w realnych warunkach nurkowych mają wpływ czynniki niewystępujące na wodach basenowych. Istotna jest również ocena międzyśrodowiskowych różnic w działaniu funkcji wykonawczych (komora hiperbaryczna vs. warunki podwodne).

#### **9.4 Funkcjonowanie pamięci w warunkach narkozy azotowej**

Zaburzenia funkcjonowania pamięci spowodowane narkozą azotową zostały po raz pierwszy opasane w 1930 roku u płetwonurków wojskowych po nurkowaniu powietrznym na głębokość 91 m ppw (10,1 ATA) (Damant, 1930, za: Philp i in., 1989). Philp i in. (1989) określają zaburzenia pamięci („*amnesia*”) jako „*hallmark of IGN*” (s. 443) (dosłownie: niepamięć jest cechą charakterystyczną narkozy azotowej; IGN - *inert gas narcosis*, szersze ujęcie pojęcia „narkoza azotowa” - przyp. autor). Zdanie to można interpretować jako podkreślenie wyjątkowej podatności struktur mózgowych odpowiedzialnych za pamięć na hiperbaryczny azot.

##### **9.4.1 Kwarenda**

W chwili pisania niniejszej rozprawy doktorskiej w wyszukiwarce EBSCO i PubMed przy użyciu kryteriów wyszukiwania: tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” i tytuł/abstrakt „*inert gas narcosis*”, a także podczas analizy piśmiennictwa zamieszczonego w artykułach

dotyczących zagadnienia znaleziono sześć badań eksperymentalnych oceniających wpływ narkozy azotowej na pamięć długotrwałą. Trzy badania przeprowadzono w warunkach „suchych” ekspozycji hiperbarycznych, a cztery w warunkach podwodnych. Ze względu na fakt, iż badania pamięciowe, które będą prowadzone na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej zostaną przeprowadzone w komorze hiperbarycznej poniżej zostanie omówiona szczegółowa metodologia i wnioski z badań komorowych. Badania pamięciowe przeprowadzone w warunkach podwodnych zostaną opisane skrótowo, w dalszej części tekstu.

#### **9.4.2 Funkcjonowanie pamięci w warunkach „suchych” ekspozycji hiperbarycznych**

Spośród omawianych w niniejszej rozprawie zmiennych poznawczych, badanie funkcjonowania pamięci długotrwałej w warunkach nadciśnienia jest najbardziej wymagające pod względem metodologicznym. Z tego powodu poniżej przedstawiono szczegółową analizę metodologii i wniosków z badań oceniających pamięć długotrwałą w warunkach powietrznych, „suchych” ekspozycji hiperbarycznych. Badania zostaną omówione chronologicznie, zgodnie z datą publikacji. Jednocześnie wyszczególnione zostaną uchybienia metodologiczne, a także zostaną poddane krytyce niektóre wnioski wysnute przez autorów, celem określenia potencjalnych obszarów dalszych kierunków badań pamięciowych.

##### **9.4.2.1 Badanie Fowlera i Acklesa (1975)**

Fowler i Ackles (1975) przeprowadzili trzy eksperymenty w warunkach komory hiperbarycznej. Do badania włączono ochotników z *Defence and Civil Institute of Environmental Medicine* (Kanada), w skład których wchodził zarówno doświadczeni płetwonurkowie wojskowi, jak i personel laboratoryjny, który miał niewielkie doświadczenie obejmujące przebywanie w warunkach nadciśnienia. Co istotne, warunkami kontrolnymi dla powietrznych grup badawczych były ekspozycje hiperbaryczne z użyciem helioksu (20% O<sub>2</sub>, 80% He, 8,6 ATA i 10 ATA, co odpowiada głębokości 76 i 90 m ppw).

W trakcie pierwszego eksperymentu badacze sprawdzali czy narkoza azotowa zaburza organizację materiału w sieciach semantycznych (ang. *memory organization*). Osoby badane ( $N = 12$ ) miały za zadanie zapamiętać słowa (18 słów, każde prezentowane przez okres 2 sekund), które były zgrupowane w kategorie (części ciała, kwiaty, ptaki, ryby, drzewa, kraje, nazwy stanów (USA), kolory i rasy psów). Badani zapamiętywali i odpamiętywali listy słów w

normobarii, a następnie dwukrotnie w warunkach hiperbarycznych (8,6 ATA<sup>20</sup>). Natychmiast po zaprezentowaniu materiału zadaniem badanych było wypisanie w ciągu jednej minuty jak najwięcej zapamiętanych słów (ang. *immediate free recall*). W warunkach nadciśnienia, w trakcie zapamiętywania i przypominania drugiej listy połowa badanych oddychała powietrzem, a druga połowa helioksem, po czym następowała zamiana czynnika oddechowego<sup>21</sup>, z następowym zapamiętywaniem i przypominaniem trzeciej listy.

Badacze stwierdzili, że liczba przypominanych słów w trakcie oddychania powietrzem w warunkach nadciśnienia była istotnie mniejsza w porównaniu do warunków normobarycznych i hiperbaryczno-helioksowych. Nie wykazano aby narkoza azotowa zaburzała organizację materiału w sieciach semantycznych. Co istotne, liczba odpamiętanych słów w warunkach: normobaria vs. helioks była mniejsza w warunkach helioksowych, jednakże różnica nie była istotna. Autorzy uważają, że w środowisku hiperbarii helioksowej badani mogli odczuwać stres związany z ekspozycją na nadciśnienie (szczególnie mniej doświadczeni badani), który mógł upośledzać funkcjonowanie pamięci.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę, iż badacze zatytułowali swój artykuł: „*Effect of hyperbaric air on long-term memory organization and recall*”. We wstępie Fowler i Ackles napisali: „(nitrogen narcosis - przyp. autor) *does prevent the storage of the information in long term memory (...). In addition to these findings there was some indication, on the basis of an indirect measure, that memory organization may also be disrupted by hyperbaric air. This effect could constitute a second source of disruption in LTM (...)*” (s. 655). Zastosowana metodologia badawcza - prezentowanie list słów i odpamiętywanie, które miało miejsce natychmiast po zakończeniu zapamiętywania materiału, pozwala wątpić czy wyłącznie pamięć długotrwała była jedyną badaną zmienną. Ze względu na fakt, badani mieli do zapamiętania 18 słów (każde słowo było prezentowane przez okres 2 sekund), a faza przypominania następowała bezpośrednio po zaprezentowaniu ostatniego słowa z listy należy sądzić, iż badanymi zmiennymi była zarówno pamięć krótko-, jak i długotrwała. Część słów z początku listy mogło zostać przeniesione do pamięci trwałej, ale ostatnie słowa z listy mogły się znajdować jeszcze w pamięci krótkotrwałej. Autorzy nie podają również informacji czy badani znali długość szeregu do zapamiętania. W przypadku gdy osoby badanie nie otrzymały wspomianej

---

<sup>20</sup> Prezentacja słów w warunkach nadciśnienia odbyła się po okresie jednej minuty od zakończenia kompresji (sprężania do docelowego ciśnienia), celem „zaznajomienia” badanych z warunkami panującymi w nadciśnieniu, a także w celu uzyskania stabilnego wysycenia krwi azotem.

<sup>21</sup> Celem ustalenia względnie stabilnej równowagi gazowej w ustroju po zmianie czynnika oddechowego „okres aklimatyzacji” („*acclimatization period*”) trwał 3 minuty.

informacji mógł wystąpić efekt pierwszeństwa i świeżości. Efekt ten nie występuje, gdy osoby biorące udział w eksperymencie znają wcześniej liczbę słów, którą będą musieli zapamiętać (Maruszewski, 2016). Poinformowanie lub brak poinformowania badanych może istotnie wpływać na liczbę zapamiętanych słów z różnych części listy, co może przekładać się na wynik, jak również na jego interpretację. Co więcej, badani nie zostali przed rozpoczęciem eksperymentu poinformowani, że słowa były zgrupowane w kategorie, co wraz z pokazywaniem słów w określonych interwałach czasowych przez badaczy nie pozawalało na zastosowanie przez osoby badane optymalnych dla nich strategii pamięciowych. Z kolei w trakcie kolejnych sekwencji zapamiętywanie-przypominanie, które miały miejsce w warunkach nadciśnienia badani wiedzieli już, że prezentowane słowa grupują się w kategorie naturalne. Wszystkie te zarzuty metodologiczne, nie pozwalają na wysnucie wniosków o zaburzeniu wyłącznie pamięci długotrwałej przez narkozę azotową. Omawiany eksperyment nie pozwala również na stwierdzenie, która część procesu pamięciowego (zapamiętywanie/przypominanie) ulega upośledzeniu. Badanie pozwala wysnuć wniosek, iż „proces pamięciowy jako całość” jest zaburzony w warunkach hiperbarii powietrznej przy ciśnieniu 8,6 ATA<sup>22</sup>, w porównaniu do warunków hiperbarii helioksovej i normobarii. Co bardzo istotne, autorzy zwrócili uwagę na fakt, iż w środowisku hiperbarycznym mogą występować pozanarkotyczne czynniki upośledzające funkcjonowanie poznawcze (stres).

W trakcie drugiego eksperymentu celem badaczy była ocena wpływu hiperbarycznego azotu na pamięć, z tą różnicą, iż badani mieli za zadanie zapamiętywać, a następnie przypominać „sparowane ze sobą” (ang. *cued*) słowa. Badani ( $N = 12$ ), podobnie jak w trakcie pierwszej części eksperymentu zapamiętywali listy słów w warunkach normobarycznych, a następnie dwukrotnie w warunkach hiperbarycznych (10 ATA). Po zaprezentowaniu słów (przez okres 3 sekund na parę) badani mieli za zadanie powtórzyć je dwukrotnie na głos. Po okresie 2 minut od zakończenia prezentowania materiału osoby biorące udział w eksperymencie przypominały materiał w ciągu 2 minut (ang. *free recall, uncued recall*), po czym następowała kolejna faza przypominania, w trakcie której stosowano podpowiedź - jedno z dwóch słów (ang. *cue-word, cued recall*). W trakcie pobytu w nadciśnieniu podczas zapamiętywania i dwukrotnego przypominania drugiej listy połowa badanych oddychała powietrzem, a druga połowa helioksem, po czym miała miejsce zamiana czynnika

---

<sup>22</sup> Badacze raz podają wartość 8,6 ATA, a raz 10 ATA.

oddechowego i następowała kolejna sekwencja zapamiętywanie-przypominanie-przypominanie.

Z powodów technicznych wyniki badanych oddychających powietrzem zostały utracone, podobnie jak wyniki 3 badanych, którzy oddychali helioksem. W eksperymencie ujawniła się tendencja dotycząca przypominania przez badanych mniejszej liczby słów w warunkach nadciśnienia (helioks), jednakże różnica uzyskana w warunkach: normobaria vs. hiperbaria helioksowa była nieistotna (*uncued recall*: normobaria - 4 vs. helioks 10 ATA - 3, *cued recall*: normobaria - 8 vs. helioks 10 ATA - 6). Autorzy nie podają interpretacji tego wyniku, jednakże wydaje się, podobnie jak w przypadku pierwszego eksperymentu, iż badani w warunkach nadciśnienia mogli odczuwać stres, który mógł wpływać na funkcjonowanie pamięci.

W trakcie trzeciego eksperymentu przeprowadzono dwa sprężenia w komorze - połowa badanych ( $N = 6$ ) w trakcie pierwszego sprężenia oddychała powietrzem, a druga połowa helioksem, a trakcie drugiego sprężenia następowała zamiana czynnika oddechowego. Do badania pamięci użyto dwóch list składających się z 14 „sparowanych” (ang. *cued*) słów. Osoby badane miały za zadanie zapamiętać jak najwięcej słów w warunkach normobarycznych. Prezentacja list odbywała się na tych samych zasadach jak w drugim eksperymencie, z tym wyjątkiem, że listy pokazywano trzykrotnie. Po fazie zapamiętywania następowała presuryzacja (sprężenie) komory do ciśnienia 10 ATA (co odpowiada głębokości 90 m ppw). Minutę po osiągnięciu docelowego ciśnienia uczestnicy eksperymentu dwukrotnie odpamiętywali słowa - najpierw miało miejsce *uncued recall* (swobodne przypominanie), a następnie *cued recall* (przypominanie z uwzględnieniem podpowiedzi - jednego słowa z pary).

Osoby badane oddychające powietrzem w nadciśnieniu odpamiętywały istotnie mniej słów niż badani oddychający helioksem (*uncued recall*: powietrze 10 ATA - 5 vs. helioks 10 ATA - 7; *cued recall*: powietrze 10 ATA - 6 vs. helioks 10 ATA - 10).

Autorzy sugerują dwie hipotezy tłumaczące uzyskane wyniki: narkoza azotowa zaburza proces odpamiętywania lub też narkoza azotowa zaburza konsolidację śladu pamięciowego (ang. *memory trace consolidation*).

Podsumowując, pomimo licznych uchybień metodologicznych bardzo ważnym wnioskiem z badań Fowlera i Acklesa (1975) jest stwierdzenie, iż za upośledzenie funkcjonowania poznawczego w warunkach nadciśnienia odpowiadają również czynniki pozanarkotyczne, do których można zaliczyć między innymi stres. Wspominana zmienna mogła odpowiadać na mniejszą liczbę słów zapamiętanych w warunkach hiperbarii



helioksowej, w porównaniu do warunków normobarycznych. Podkreślić należy jednak, iż stwierdzona różnica nie osiągnęła poziomu istotności statystycznej. Omawiany cykl badań był również pierwszym eksperymentalnym potwierdzeniem, iż pamięć jest zmienną poznawczą wrażliwą na działanie wysokich ciśnień parcjalnych azotu. Niemniej, badania przeprowadzono przy ciśnieniach znacznie przekraczających aktualne limity głębokościowe (maksymalne głębokości nurkowań) przy użyciu powietrza jako czynnika oddechowego. Badania prowadzono przy ciśnieniach 8,6 ATA i 10 ATA (co odpowiada głębokości 76 i 90 m ppw). Obecnie obowiązujące limity powietrznych nurkowań wynoszą 5 ATA (40 m ppw) wg PADI i 6 ATA (50 m ppw) wg CMAS, co sprawia, że badania te nie dostarczają informacji o funkcjonowaniu pamięci w zakresie głębokości obecnie wykonywanych nurkowań z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego.

#### **9.4.2.2 Badanie Philpa i in. (1989)**

Philp i in. (1989) przeprowadzili eksperyment, w trakcie którego oceniali odtwarzanie słów natychmiast po zaprezentowaniu materiału (ang. *immediate free recall*), jak i przypominanie po pewnym czasie od fazy zapamiętywania (ang. *delayed free recall*). Osobami badanymi byli płetwonurkowie ( $N = 24$ , mężczyźni), uczestniczący w zaawansowanym kursie nurkowym, legitymujący się doświadczeniem obejmującym zarówno sprzężenia w komorze, jak i nurkowania podwodne. Badanie przeprowadzono w komorze hiperbarycznej przy ciśnieniu 4,6 ATA (ciśnienie panujące na głębokości 36 m ppw). Badanym prezentowano 7 list po 15 słów każda, a słowa eksponowano w czasie dwóch sekund. Po zaprezentowaniu każdej listy badani mieli za zadanie przez minutę wypisać jak najwięcej zapamiętanych słów (ang. *immediate free recall*). Pomiędzy kolejnymi sekwencjami: prezentacja materiału-przypominanie następowała trzydziestosekundowa przerwa. Następnie, po dwóch minutach od zakończenia fazy przypominania ostatniej listy uczestnikom eksperymentu polecono wypisać w czasie pięciu minut jak najwięcej słów, które zostały zaprezentowane im w toku całego badania (ang. *delayed free recall*). Grupą kontrolną była ta sama grupa badanych, która wykonywała tożsame testy pamięciowe przed i po ekspozycji hiperbarycznej (w warunkach normobarycznych, we wnętrzu komory). Autorzy nie użyli nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej (helioksu) jako grupy kontrolnej z powodu braku funduszy, a także „z powodów logistycznych” („*For financial and logistical reasons, we decided not to use helium controls at depth to eliminate possible effects of pressure per se.*”, s. 444).

Zapamiętywanie słów w warunkach hiperbarycznych było związane z istotnie gorszym „natychmiastowym” odtwarzaniem słów (ang. *immediate free recall*) z początku listy (od pierwszego do piątego słowa z 15 słów), podczas gdy przypominanie słów ze środka (6-10 słowo) i z końca listy (11-15 słowo) było niezaburzone. Liczba odpamiętanych słów w trakcie „odroczonego” odtwarzania (ang. *delayed free recall*), w porównaniu do grupy kontrolnej, była o około połowę mniejsza (grupa kontrolna:  $M = 14,7\%$ ,  $SD = 2,95$  vs. warunki narkozy azotowej:  $M = 7\%$ ,  $SD = 2,38$ ).

Badacze interpretują istotnie mniejszą liczbę zapamiętanych słów w trakcie “natychmiastowego” odtwarzania przez pryzmat wpływu hiperbarycznego azotu na pętlę fonologiczną („*impairment of immediate free recall in the primacy region by compressed air could be because of interference with the articulatory loop.*”, s. 445). Wydaje się jednak, iż warto rozszerzyć interpretację tego wyniku. Wpływ hiperbarycznego azotu na pętlę fonologiczną może wynikać z zaburzeń odświeżania informacji (ang. *updating*), nie można jednakże wykluczyć, że istotną rolę może mieć również wpływ narkozy na liczbę powtórek wewnętrznych (ang. *rehearsals*). Warto ponownie przywołać badanie Saults i in. (2007), którzy wykazali, iż alkohol może negatywnie wpływać na strategie pamięciowe mające na celu utrzymanie informacji w pamięci roboczej. W badaniu Fowlera, Hendriksa i Porliera (1987), w porównaniu do grupy kontrolnej, liczba powtórek wewnętrznych w trakcie zapamiętywania materiału była istotnie mniejsza w grupie oddychającej 35% podtlenkiem azotu. Jakkolwiek profil działania alkoholu, podtlenku azotu i hiperbarycznego azotu jest różny, wszystkie te czynniki działają depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, co sprawia, iż wyniki badań nad wpływem alkoholu i  $N_2O$  na funkcjonowanie pamięci mogą stać się hipotezami dotyczącymi wpływu narkozy azotowej na omawianą zmienną. Możliwym jest również, iż wyniki te można interpretować przez pryzmat upośledzenia przesyłu informacji z pamięci krótkotrwałej do pamięci trwałej i/lub zaburzenia kodowania informacji w sieciach semantycznych pamięci trwałej. Jak już wspomniano, narkoza azotowa prawdopodobnie powoduje spowolnienie przewodzenia impulsów w obrębie ośrodkowego układu nerwowego (Fowler i in., 1992).

Podsumowując, wpływ hiperbarycznego azotu spowodował, iż badani, w porównaniu do warunków kontrolnych, zapamiętali istotnie mniejszą liczbę słów z początku listy i nieistotnie różną liczbę słów ze środka czy z końca listy. Skłania to do wniosku, iż odświeżanie informacji w pamięci roboczej nie było zaburzone (brak wpływu narkozy azotowej na zapamiętywanie słów z końca listy). Możliwym jest zatem, że narkoza azotowa zaburza przesył informacji z pamięci krótkotrwałej do pamięci trwałej (badani zapamiętali istotnie mniej słów

z początku listy) i/lub kodowanie materiału w sieciach semantycznych i/lub organizację materiału (czego z kolei nie wykazali w swoim badaniu cytowani powyżej Fowler i Ackles (1975)).

Warto zwrócić uwagę, że badacze pokazywali osobom biorącym udział w eksperymencie słowa przez okres 2 sekund. Tego typu prezentacja materiału nie pozwala badanemu na zastosowanie optymalnej dla niego strategii pamięciowej, jak również istotnie ogranicza możliwość stosowania przez niego powtórek wewnętrznych. Co więcej, prezentowanie słów w określonych interwałach czasowych jest sytuacją laboratoryjną, nie występującą raczej ani w codziennym życiu, ani w trakcie nurkowania. W artykule nie pojawia się również informacja czy badani zostali poinformowani o całościowym planie eksperymentalnym. Brak takowej informacji również mógł być czynnikiem wpływającym na niemożność zastosowania optymalnej strategii poznawczej w trakcie wykonywania zadań pamięciowych. Ujawnienie się efektu pierwszeństwa i świeżości sugeruje również, iż osoby biorące udział w eksperymencie nie znali długości szeregu, który będą zapamiętywać. Ze względu na stopień skomplikowania procedury badawczej, nie można także wykluczyć, iż wpływ na wyniki badań miało zjawisko interferencji proaktywnej.

Badacze sugerują, że informacje „głęboko zakodowane” w sieciach semantycznych mogą być mniej podatne na działanie hiperbarycznego azotu, niż informacje zakodowane „mniej głęboko” („*deeply encoded material (is - przyp. autor) unlikely to be affected by low levels of IGN (Inert Gas Narcosis - przyp. autor). Incidental but important observations made during the course of a task may be more shallowly encoded and therefore more vulnerable.*”, s. 445). Z badania można także wyciągnąć wniosek, iż narkoza azotowa występująca przy ciśnieniu 4,6 ATA upośledza kodowanie informacji, podczas gdy pamięć krótkotrwała jest niezaburzona. Eksperyment nie dostarcza natomiast wniosków o wpływie hiperbarycznego azotu na odpamiętywanie materiału.

Warto również zwrócić uwagę, iż grupa kontrolna była badana w normobarii, która istotnie różni się od środowiska hiperbarycznego (niezachowanie kanonu jedynej różnicy). Cytowanych wyników nie należy zatem interpretować przez wyłącznie przez pryzmat wpływu narkozy azotowej, na co zwracają uwagę autorzy artykułu („*For financial and logistical reasons, we decided not to use helium controls at depth to eliminate possible effects of pressure per se.*”, s. 444). W przytaczanym zdaniu wybrzmiewa hipoteza, że istnieją pozanarkotyczne czynniki wpływające na funkcjonowanie w warunkach nadciśnienia, jednakże ujmowanie ich określeniem „*possible effects of pressure per se*” wydaje się być nadmiernie redukcjonistyczne.

### 9.4.2.3 Badanie Tetzlaffa i in. (1998)

Tetzlaff i in. (1998) przeprowadzili eksperyment w warunkach komory hiperbarycznej przy ciśnieniu 1,5 ATA (grupa kontrolna,  $N = 12$ ) i 6 ATA (grupa eksperymentalna,  $N = 12$ ). Uczestnicy eksperymentu (doświadczeni wojskowi pracownicy komory hiperbarycznej, mężczyźni) mieli za zadanie zapamiętać listę słów, a następnie odtworzyć ją po pewnym czasie (ang. *delayed free recall*). Badani zapamiętywali i odtwarzali listy słów w schematach: zapamiętywanie przy miernym nadciśnieniu (1,5 ATA) i przypominanie na tej samej głębokości → zapamiętywanie przy miernym nadciśnieniu i przypominanie na głębokości (6 ATA) → zapamiętywanie na głębokości i przypominanie na głębokości, a także zapamiętywanie na głębokości i przypominanie przy miernym nadciśnieniu (1,5 ATA). Do badania użyto czterech list z których każda zawierała po 15 słów. Warto zwrócić uwagę, iż ze względu na specyficzną grupę badawczą do list nie włączono słów o konotacjach morskich i militarnych (np. łódź, morze itd.). Materiał do zapamiętania był prezentowany w formie wizualnej, a słowa eksponowano przez okres czterech sekund. Po zakończeniu prezentacji listy następowała pięciominutowa przetrwa, a następnie badani przez okres jednej minuty mieli za zadanie wypisać jak najwięcej słów. Pomiędzy fazą zapamiętywania i fazą przypominania, a także pomiędzy prezentacjami kolejnych list badani przez jedną minutę wykonywali zadanie dystrykcyjne, za wyjątkiem okresu podczas którego miała miejsce kompresja (sprężanie do docelowego ciśnienia) lub dekompresja (rozprężanie do warunków normobarycznych). Aby zredukować wpływ środowiska zewnętrznego na funkcjonowanie pamięci (pamięć zależna od kontekstu) wszystkie testy pamięciowe odbywały się w komorze hiperbarycznej. Siedmiokrotnie badano poziom kortyzolu we krwi, a także monitorowano czynność serca. Warto dodać, że test pamięciowy rozpoczynał się minutę po osiągnięciu docelowego ciśnienia (celem uzyskania względnie stabilnego wysycenia azotem). Ze względów bezpieczeństwa badani z grupy eksperymentalnej oddychali 100% tlenem przez 10 minut po dekompresji (aby przyspieszyć eliminację resztkowego azotu z organizmu).

Badacze wykazali, że odtwarzanie słów było istotnie gorsze gdy materiał był przyswajany w warunkach 6 ATA, tj. gdy faza zapamiętywania i przypominania miała miejsce na głębokości, a także gdy zapamiętywanie miało miejsce na głębokości, a przypominanie w warunkach miernego nadciśnienia. Poziom kortyzolu obniżał się w toku trwania eksperymentu, jednakże nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy grupą kontrolną i eksperymentalną.

Korelacja: poziom kortyzolu/funkcjonowanie pamięci była nieistotna. Czynność serca spadała po kompresji i podczas dekompresji w grupie eksperymentalnej<sup>23</sup>.

Autorzy tłumacząc wyniki podają, iż narkoza azotowa zaburza zarówno proces zapamiętywania, jak i przypominania („*These results are taken as evidence that inert gas narcosis may interfere with encoding and/or retrieval of verbal information (...)*”, s. 161). Wydaje się jednak, iż wniosek o zaburzeniu przypominania materiału w warunkach narkozy (6 ATA) jest nieuprawniony - badacze nie zaobserwowali istotnie gorszego odpamiętywania słów na głębokości, które zostały zapamiętane w przy ciśnieniu 1,5 ATA. Hobbs i Kneller (2009), a także Hobbs i in. (2014) również nie stwierdzili aby sekwencja zapamiętywanie normobaria/mierna hiperbaria i przypominanie przy docelowym ciśnieniu otoczenia była zanurzona (por. dalsza część tekstu). Wydaje się więc, iż narkoza azotowa występująca w trakcie komorowej ekspozycji hiperbarycznej zaburza zapamiętywanie materiału w warunkach 6 ATA. Prezentowane wyniki można również tłumaczyć przez większą podatność procesu zapamiętywania niż przypominania na zaburzenia spowodowane narkozą.

Ze względu na stopień złożoności procedury badawczej (zapamiętywanie czterech list słów w trakcie jednego badania), nie można wykluczyć wpływu interferencji proaktywnej na zapamiętywanie w kolejnych fazach eksperymentu. Kolejnymi zarzutami metodologicznymi mogą być: brak użycia helioksu do badania grupy kontrolnej (niezachowanie kanonu jedynej różnicy) i uniemożliwienie badanym stosowania optymalnych dla nich strategii pamięciowych (słowa pokazywał badacz przez okres czterech sekund). W artykule nie pojawia się również informacja czy badani zostali poinformowani przed badaniem o całościowym planie eksperymentalnym. Brak takowej informacji również mógł być czynnikiem wpływającym na niemożność zastosowania optymalnej strategii poznawczej.

#### **9.4.3 Funkcjonowanie pamięci długotrwałej w warunkach podwodnych**

Ekstrapolacja wyników badań oceniających funkcjonowanie poznawcze z warunków ekspozycji „suchych” na warunki podwodne (i odwrotnie) jest, ze względu na liczne różnice fizjologiczne, psychologiczne i środowiskowe, kontrowersyjna (por. dalsza część tekstu). Niemniej, mając na uwadze tematykę pracy, a także z powodu niewielkiej liczby badań przeprowadzonych w warunkach komory hiperbarycznej postanowiono również przedstawić

---

<sup>23</sup> Warto jednakże zwrócić uwagę, iż monitorowanie czynności serca w warunkach hiperbarycznych, jako pośredniego wskaźnika poziomu stresu jest nietrafne. Czynność serca zmienia się wraz ze zmianą ciśnienia otoczenia (spada wraz ze wzrostem ciśnienia) (Al-Waili i in., 2006).

wnioski z eksperymentów podwodnych, w trakcie których oceniano funkcjonowanie pamięci długotrwałej.

Hobbs i Kneller (2009) oceniali przypominanie słów w zależności od warunków ich zapamiętania. Badanie przeprowadzono na głębokościach 0-10 i 37-40 m ppw (odpowiednio: 1-2 ATA i 4,7-5 ATA;  $N = 20$ , 18 mężczyzn, 2 kobiety). Analogicznie do cytowanego powyżej badania Tetzlaffa i in. (1998) badani zapamiętywali i odtwarzali listy słów w schematach: zapamiętywanie na powierzchni/niewielkiej głębokości i przypominanie na tej samej głębokości → zapamiętywanie na powierzchni/niewielkiej głębokości i przypominanie na głębokości → zapamiętywanie na głębokości i przypominanie na głębokości, a także zapamiętywanie na głębokości i przypominanie na powierzchni/niewielkiej głębokości. Badacze wykazali, że przypominanie na głębokości (w warunkach narkozy azotowej), jak i na powierzchni/niewielkiej głębokości jest istotnie gorsze, gdy zapamiętywanie ma miejsce przy ciśnieniu 4,7-5 ATA (37-40 m ppw).

Hobbs i Kneller (2015) w replikacji swojego eksperymentu uzyskali analogiczne wyniki. Autorzy zbadali 60 płetwonurków w warunkach płytkiej (4-9 m ppw) i głębokiej (34-40 m ppw) wody, co odpowiada ciśnieniu 1,4-1,9 i 4,4-5 ATA. Przypominanie zarówno na głębokiej, jak i na płytkiej wodzie było istotnie upośledzone gdy zapamiętywanie słów miało miejsce w warunkach 4,4-5 ATA. Grupy, które zapamiętywały i przypominały słowa na głębokiej wodzie, a także zapamiętywały na głębokiej i przypominały na niewielkiej głębokości pod powierzchnią wody nie różniły istotnie się między sobą. Wyniki omawianych badań są więc spójne z wynikami jakie uzyskał Tetzlaff i in. (1998).

Hobbs i in. (2014) badali płetwonurków w warunkach podwodnych na głębokości 1-11 (1,1-2,1 ATA) i 33-42 m ppw (4,3-5,2 ATA). Badacze prezentowali osobom biorącym udział w eksperymencie zalaminowane kartki z listą słów do zapamiętania, po czym badano „*judgements-of-learning*” (prawdopodobieństwo, że badani będą w stanie przypomnieć sobie dane słowo w trakcie odtwarzania). Następnie, po wykonaniu zadania dystrykcyjnego (prosty test psychomotoryczny) uczestnicy eksperymentu oceniali subiektywny wpływ narkozy na ich funkcjonowanie, odtwarzali słowa zapisując je na specjalnej tabliczce, a także oceniali jak bardzo są przekonani, że odtworzone słowo faktycznie było prezentowane w materiale do zapamiętania. W trakcie drugiego eksperymentu podwodnego (przeprowadzonego na głębokości 1-11 i 34-41 m ppw, co odpowiada 1,1-2,1 ATA i 4,4-5,1 ATA) zastosowano identyczną metodologię, z tym wyjątkiem, że badacze prezentowali pary słów, a uczestnicy eksperymentu mieli za zadanie przypomnieć sobie „sparowane” słowo po tym jak

prezentowano jedno z dwóch słów (ang. *cued recall*). Najważniejszym wnioskiem z badania wydaje się być fakt, iż osoby które są świadome, że ich funkcjonowanie poznawcze może być zaburzone przez narkozę azotową mogą stosować różnorodne techniki kompensacyjne (np. dłuższe wykonywanie zadań).

Na zakończenie warto ponownie przywołać eksperyment, który przeprowadził Brebeck i in. (2017). Badanie oceniało funkcjonowanie poznawcze w trakcie podwodnych nurkowań z użyciem powietrza i nitroksu (28% O<sub>2</sub>, 72% N<sub>2</sub>), bez uwzględnienia grupy kontrolnej. W trakcie analizy wyników testu badającego pamięć długotrwałą oceniano liczbę poprawnie i błędnie odpamiętanych słów (ang. *number of correct items/number of incorrect items*). Badani z grupy nitroksowej popełniali istotnie mniej błędów w teście badającym pamięć długotrwałą, nie wykazano natomiast istotnych różnic w funkcjonowaniu pamięci krótkotrwałej. Możliwym jest zatem, iż narkoza azotowa wywołuje zjawisko zniekształceń pamięciowych objawiających się zmianą formy odpamiętywanych słów (np. „samotny” zamiast „samotność”) i/lub „przypominaniem” słów, które nie występowały na liście słów do zapamiętania. Brak grupy kontrolnej nie pozwala jednak na weryfikację wspomnianych hipotez. Autorzy nie podali również informacji o charakterze błędów jakie popełnili badani oddychający powietrzem lub nitrokssem.

#### **9.4.4 Potencjalne obszary badań**

Jakkolwiek nie zostało to zbadane - wydaje się, iż proste, wysoce zautomatyzowane czynności psychomotoryczne związane z techniką nurkowania, które są zakodowane w pamięci proceduralnej raczej nie ulegają zaburzeniu w warunkach umiarkowanej narkozy azotowej występującej w limitach głębokościowych dla płetwonurków używających powietrza jako czynnika oddechowego. W badaniu które przeprowadził Philp i in. (1989) nie wykazano wpływu nadciśnienia rzędu 4,6 ATA na funkcjonowanie pamięci krótkotrwałej. Z drugiej strony, przy tym samym ciśnieniu otoczenia stwierdzono zaburzenia funkcjonowania pamięci długotrwałej. Skłania to do wniosku, iż pamięć długotrwała jest bardziej wrażliwa na zaburzenia spowodowane wysokimi ciśnieniami parcjalnymi azotu, niż pamięć krótkotrwała. Do tożsamyh wniosków doszedł Brebeck i in. (2017). Wydaje się zatem, iż badanie pamięci proceduralnej i krótkotrwałej jest niezasadne.

Również w innych przywołanych powyżej badaniach (Fowler i Ackles, 1975; Tetzlaff i in., 1998; Hobbs i Kneller, 2009; Hobbs i Kneller, 2015) stwierdzono upośledzenie funkcjonowania pamięci długotrwałej (dokładnie: pamięci słów) w warunkach narkozy

azotowej. W żadnym z eksperymentów nie wykazano aby narkoza wpływała na trafność rozpoznań (ang. *recognition memory*), czy dane słowo pojawiło się w liście słów do zapamiętania czy nie (Philp i in., 1989; Tetzlaff i in., 1998; Hobbs i Kneller, 2009). Oznacza to, że pamięć związana z przypominaniem (ang. *recall memory*) jest bardziej podatna na wpływ hiperbarycznego azotu.

Badania pamięciowe, które zostały przeprowadzone w warunkach komory hiperbarycznej (Fowler i Ackles, 1975; Philp i in., 1989; Tetzlaff i in., 1998) cechują się jednak licznymi uchybieniami metodologicznymi. Cechą wspólną omawianych eksperymentów jest fakt, że słowa, które mieli zapamiętywać badani były prezentowane kolejno, w trakcie określonego interwału czasowego. Jak już wspomniano, omawiana sytuacja uniemożliwia badanym zastosowanie optymalnej dla nich strategii poznawczej. Co równie ważne, prezentowanie kolejnych słów, które mają zostać zapamiętane jest sytuacją laboratoryjną, nie mającą odzwierciedlenia ani w codziennym życiu, ani w przebiegu nurkowania. Nie jest również jasne czy badacze prowadzący eksperymenty w warunkach „suchej” hiperbarii informowali osoby badane o całościowym planie eksperymentalnym, w szczególności o długości szeregu do zapamiętania. Jak już wspomniano, wiadomym jest, iż poinformowanie lub brak poinformowania osób biorących udział w badaniu o liczbie słów do zapamiętania wpływa na charakterystykę odpamiętanego materiału (por. Maruszewski, 2016). Płetwonurek w absolutnej większości przypadków zna charakter zadania, jest zaznajomiony z profilem nurkowania (który warunkuje długość fazy zapamiętywania i przypominania, a także interwały zapamiętywanie-przypominanie), a materiał do zapamiętania jest dostępny w całości. Dzięki temu możliwe jest dostosowanie optymalnej strategii pamięciowej do charakteru wykonywanego zadania. Podsumowując, dotychczas opublikowane badania oceniające funkcjonowanie pamięci długotrwałej, ze względu na zastosowaną metodologię, cechuje niska trafność ekologiczna. Nie mniej istotnym zarzutem metodologicznym wspomnianych badań jest fakt, iż osoby badane zapamiętywały kolejno wiele listów słów. Nie można zatem upośledzenia pamięci długotrwałej tłumaczyć wyłącznie przez pryzmat narkozy azotowej, gdyż istotną rolę może pełnić również interferencja proaktywna. Warto dodać, iż tylko w jednym badaniu (Fowler i Ackles, 1975) użyto nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej (helioks) w celu uzyskania wyników kontrolnych, co stawia pod znakiem zapytania rzetelność analiz i wniosków z pozostałych dwóch badań (Philp i in., 1989; Tetzlaff i in., 1998).

Należy więc rozważyć przeprowadzenie badania eksperymentalnego w trakcie którego zniwelowane zostaną wspomniane uchybienia metodologiczne. Aby zwiększyć trafność



ekologiczną metodologią badania pamięci długotrwałej powinna umożliwiać osobom badanym wybór optymalnej dla nich strategii poznawczej, co można uzyskać poprzez informowanie osób biorących udział w eksperymencie o całościowym planie badawczym, ze szczególnym uwzględnieniem długości trwania fazy zapamiętywania, przypominania i interwału zapamiętywanie-przypominanie. Dodatkowo, materiał do zapamiętania powinien zostać przedstawiony w całości. Aby zminimalizować ryzyko interferencji proaktywnej warto rozważyć uproszczenie schematu badawczego (tj. zredukować liczbę sekwencji zapamiętywanie-przypominanie). Co równie ważne, badanie powinno być przeprowadzone przy docelowym ciśnieniu otoczenia, mieszczącym się w granicach aktualnie obowiązujących limitów głębokościowych. Dysponujemy również danymi sugerującymi, iż w warunkach nadciśnienia występują pozanarkotyczne czynniki upośledzające funkcjonowanie, do których można zaliczyć między innymi stres (Biersner i Cameron, 1970; Fowler i Ackles, 1975). Aby zachować kanon jedynej różnicy należy wyniki powietrznej grupy eksperymentalnej porównywać do wyników uzyskanych w trakcie nurkowań przy użyciu nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej (helioks), przy tożsamym ciśnieniu otoczenia. Podsumowując, wydaje się, iż najistotniejszym potencjalnym obszarem badań dotyczących funkcjonowania pamięci długotrwałej w warunkach ekspozycji „suchych” jest próba oszacowania dolnej granicy ciśnienia parcjalego azotu, która upośledza procesy pamięciowe (pamięć związaną z przypominaniem). Metodologia takiego badania powinna zapewniać należytą trafność ekologiczną (tj. przypominać zadania pamięciowe mające miejsce w trakcie realnych nurkowań).

Fowler i Ackles (1975) stwierdzili, iż stres występujący w warunkach hiperbarii helioksovej w niewielkim stopniu w porównaniu do wpływu narkozy azotowej (obecnej przy tożsamym ciśnieniu otoczenia) zaburza funkcjonowanie pamięci. Warto jednakże zwrócić uwagę, iż Biersner i Cameron (1970) stwierdzili istotne upośledzenie pamięci w trakcie ekspozycji na hiperbaryczny helioks przy ciśnieniu 19 ATA (co odpowiada głębokości 180 m ppw). Omawiany wniosek z badań może być więc trafny dla ekspozycji do pewnego ciśnienia otoczenia. Minimalne, graniczne ciśnienie otoczenia, które istotnie wpływa na funkcjonowanie pamięci w warunkach hiperbarii helioksovej jest nieznane, co stanowi asumpt do przeprowadzenia badawczego nurkowania przy użyciu mieszaniny helowo-tlenowej, przy znacznie mniejszym ciśnieniu otoczenia.

Do chwili obecnej tylko w jednym badaniu (Brebeck i in., 2017) oceniano wpływ narkozy azotowej na powstawanie zniekształceń pamięciowych (tj. na przypominanie słów w

zmienionej formie lub też „przypominanie” słów niewystępujących na liście słów do zapamiętania). Do chwili obecnej brakuje badań, które oceniałyby wspomniany parametr przy odniesieniu wyników do grupy kontrolnej.

Wiadomym jest, iż stres może oddziaływać na procesy pamięciowe. Wpływ wspomnianej zmiennej może powodować między innymi zmianę charakteru odpamiętanego materiału pod kątem liczby słów o danej walencji emocjonalnej (Kirschbaum, Wolf, May, Wippich i Hellhammer, 1996; Lupien i in., 1997; Buchanan i Lovallo, 2001; Tops i in., 2003; Wolf, Schommer, Hellhammer, McEwen i Kirschbaum, 2001; Jelici, Geraerts, Merckelbach i Guerrieri, 2004; Kuhlmann, Piel i Wolf, 2005; analiza cytowanych badań jest dostępna w Załączniku 12). Dotychczas nie przeprowadzono ani jednego badania oceniającego wpływ narkozy azotowej na liczbę odpamiętanych słów o danej walencji emocjonalnej. Analogicznie, nie dysponujemy danymi dotyczącymi wpływu stresu spowodowanego ekspozycją na nadciśnienie podczas nurkowań helioksoowych na charakterystykę odpamiętanego materiału (pod kątem rozkładu słów o walencji pozytywnej, neutralnej i negatywnej). Należy zatem przeprowadzić badania, które mogłyby pomóc wypełnić omawiane luki w wiedzy.

## **9.5 Wpływ narkozy azotowej na inne aspekty funkcjonowania człowieka**

Dla pełnego przedstawienia zagadnienia narkozy azotowej, w Załącznikach 13, 14 i 15 zamieszczono przegląd literatury dotyczący: wpływu substancji psychoaktywnych, leków psychotropowych, hiperkapnii (ponadnormatywnej ilości CO<sub>2</sub> we krwi) i zatrucia tlenkiem węgla na nasilenie narkozy azotowej. W Załącznikach 16 i 17 skrótowo zostały omówione wyniki badań dotyczących interakcji wychłodzenia (hipotermii) i narkozy azotowej, a także wpływu narkozy na percepcję bólu. Zagadnienie roli cyklicznych ekspozycji hiperbarycznych na potencjalne polepszenie funkcjonowania w warunkach narkozy azotowej, a także wpływ narkozy na funkcje poznawcze inne niż pamięć, uwaga i funkcje wykonawcze został omówiony w Załącznikach 18 i w Załączniku 19.

## **10 Wybrane zagadnienia związane z planowaniem badań w warunkach nadciśnienia**

Badania prowadzone w warunkach hiperbarycznych są bezpieczne, o ile są odpowiednio planowane, przeprowadzane i nadzorowane. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione podstawowe aspekty dotyczące przygotowywania planów eksperymentalnych. Skrótowo zostaną również zarysowane potencjalne powikłania ekspozycji na nadciśnienie. Przystawienie wspomnianych treści jest niezbędne do zrozumienia specyfiki badań przeprowadzanych w warunkach nadciśnienia, a także ich ograniczeń.

### **10.1 Podstawy teorii dekompresji**

Pierwszym zjawiskiem wymagającym omówienia, które jest kluczowe zarówno do pełnego zrozumienia patomechanizmu powstawania narkozy azotowej, jak i do planowania bezpiecznych ekspozycji hiperbarycznych jest zjawisko nasycania i odsycania się tkanek różnymi gazami pod wpływem odpowiednio wzrostu i spadku ciśnienia otoczenia.

Zgodnie z prawem Henrygo, eksperymentator i badani w trakcie ekspozycji hiperbarycznej pochłaniają znaczącą ilość azotu (im wyższe ciśnienie otoczenia, tym większa rozpuszczalność gazów we krwi i tym wyższe nasycenie różnych tkanek azotem). Pochłanianie azotu przez tkanki ma miejsce zarówno w trakcie sprężania (wzrostu ciśnienia/kompresji), jak i podczas przebywania przy docelowym ciśnieniu otoczenia (przy *plateau* ciśnieniowym). Przywoływane prawo fizyczne implikuje również fakt, iż w trakcie każdego wynurzenia się (podczas każdej depresuryzacji/dekompresji) spadek ciśnienia otoczenia powoduje spadek rozpuszczalności gazów w cieczy. W trakcie dekompresji ma miejsce to samo zjawisko fizyczne, które występuje w trakcie odkręcania butelki z gazowanym napojem. Gwałtowny spadek ciśnienia nad lustrem cieczy lub gwałtowna zmiana ciśnienia otoczenia powoduje powstawanie pęcherzyków gazu (odpowiednio: w butelce - dwutlenku węgla, a w organizmie - we krwi i innych tkankach - między innymi azotu). Podsumowując, w trakcie kompresji krew napływająca do płuc nasycy się różnymi gazami, które następnie są rozprowadzane po ustroju, a w trakcie dekompresji ma miejsce zjawisko odwrotne - krew transportuje powstałe pęcherzyki gazowe, które są eliminowane podczas oddychania. Ujmując zagadnienie możliwie najogólniej i możliwie najprościej - przy odpowiednim profilu „wynurzeniowym” (profilu dekompresyjnym) powstałe pęcherzyki azotu są nieme klinicznie - nie powodują objawów chorobowych gdyż płuca są w stanie wydalić z organizmu ich nadmiar. Analogicznie do odkręcania butelki z gazowanym napojem - jej odpowiednie odkręcanie (powolne i „skokowe”) najpewniej nie spowoduje „eksplozji” napoju.

Istnieją liczne determinanty wpływające na szybkość nasycania i odsycania się różnych tkanek, które opisuje teoria dekompresji (ang. *decompression theory*). Modelowanie matematyczne wysycania i odsycania tkanek różnymi gazami stanowi podstawę planowania eksperymentów w warunkach nadciśnienia, które w pierwszej kolejności muszą być bezpieczne, a w dopiero w dalszej - przynosić wymierne korzyści naukowe. Poniżej przedstawiono podstawowe informacje z omawianego zakresu.

W przypadku organizmów żywych szybkość nasycania i odsycania się danej tkanki zależy między innymi od stopnia jej aktywności metabolicznej i unaczynienia. W bogato unaczynionych tkankach o wysokim stopniu metabolizmu (tzw. „tkanki szybkie”: mózg, mięsień sercowy, nerki, wątroba) omawiane zjawiska zachodzą szybciej niż w tkankach mniej aktywnych metabolicznie, w których odległości komórka-naczynie krwionośne mogą być większe (tzw. „tkanki wolne”: kości, ścięgna, więzadła, tkanka tłuszczowa). Co bardzo istotne, krew (która jest tkanką płynną przenoszącą gazy) nasycy i odsycy się z azotu najszybciej (Krzyżak, 2006). Zjawiska te odpowiadają za fakt, iż narkoza azotowa pojawia się szybko przy wzroście ciśnienia otoczenia do pewnego krytycznego poziomu i równie szybko ustępuje, wraz ze spadkiem ciśnienia. Znajomość omawianych praw jest również kluczowa dla zrozumienia, że różne tkanki w organizmie człowieka nie nasycają gazami się przy danych parametrach ekspozycji hiperbarycznej (ciśnienie, czas przebywania w nadciśnieniu) do identycznych stężeń. Niezmiernie ważnym zatem jest aby zaprojektować eksperyment przy użyciu zaawansowanych modeli matematycznych tak, aby wszystkie tkanki odsycyły się z azotu w trakcie spadku ciśnienia w zakresie pewnego, bezpiecznego zakresu wartości (por. dalsza część tekstu).

Podsumowując, w trakcie planowania eksperymentów w warunkach normobarycznych badacz dostosowuje warunki badawcze do planu badania. W przypadku badań w nadciśnieniu plan badawczy jest zależny od profili nurkowań (tj. od szybkości kompresji, docelowego ciśnienia otoczenia, czasu przebywania w hiperbarii itd.), które są tak planowane, aby zapewnić należyty poziom bezpieczeństwa. Z tego powodu jakiegokolwiek próby stworzenia planu eksperymentalnego muszą być poprzedzone licznymi konsultacjami ze specjalistami z zakresu teorii dekompresji (tj. z instruktorami nurkowania technicznego, a także z lekarzami i technikami pracującymi w ośrodkach hiperbarycznych).

### 10.1.1 Nurkowania bezdekompresyjne i nurkowania dekompresyjne

Nurkowania można podzielić na nurkowanie bezdekompresyjne (ang. *no-decompression dive*) i nurkowanie dekompresyjne (ang. *decompression dive*). Nurkowania bezdekompresyjne cechuje stosunkowo krótki czas ekspozycji na nadciśnienie, który warunkuje mierne lub średnie nasycenie tkanek azotem. Nurkowanie te wymagają pod koniec wyłącznie powolnego wynurzania się i nie wymagają żadnych innych specjalistycznych procedur<sup>24</sup>. Nurkowania dekompresyjne z kolei, ze względu na znaczne nagromadzenie azotu (i innych gazów) w ustroju, spowodowane długotrwałą ekspozycją hiperbaryczną, wymagają pod koniec zarówno powolnego wynurzenia się, jak i wykonywania przerw w wynurzaniu się (tj. wykonania przystanków dekompresyjnych<sup>25</sup>) na ściśle określonych głębokościach i przez ściśle określony czas, według wcześniejszych obliczeń. Przystanki dekompresyjne mogą okazać się niezbędne, aby płuca zdążyły wydalić nadmiar azotu, którego kumulacja (w postaci nadmiaru powstałych pęcherzyków gazowych) może stanowić ryzyko dla zdrowia i życia pletwonurka (Krzyżak, 2006). Porównując omawiane zagadnienia do wspomnianego przykładu odkręcania butelki z gazowanym napojem - odkręcanie butelki po raz pierwszy (która dodatkowo została wstrząśnięta) wymaga wykonania tej czynności powoli i „skokowo” (wysokie wysycenie napoju dwutlenkiem węgla - analogicznie do wysokiego wysycenia tkanek azotem w trakcie długotrwałego nurkowania). Z kolei jej powtórne odkręcenie wymaga wyłącznie wykonania tej czynności odpowiednio wolno (średnie nasycenie napoju CO<sub>2</sub> - analogicznie do średniego wysycenia tkanek azotem w trakcie krótkotrwałego nurkowania). Zaznaczyć należy, iż omawiane zagadnienie zostało przedstawione w bardzo uproszczony sposób. Do czynników decydujących czy będą wymagane przystanki dekompresyjne zalicza się nie tylko czas ekspozycji na nadciśnienie, ale także głębokość nurkowania, szybkość kompresji, rodzaj używanej mieszaniny oddechowej itd.

Zrozumienie podziału na nurkowania bezdekompresyjne i dekompresyjne jest niezbędne celem poznania specyfiki badań w nadciśnieniu, ich ograniczeń i potencjalnych powikłań. Krótkie, bezdekompresyjne ekspozycje hiperbaryczne istotnie ograniczają czas, w którym można przeprowadzić testy. Co więcej, krótkotrwałe przebywanie w nadciśnieniu nie zapewnia również należytego marginesu czasowego w przypadku nieprzewidzianych trudności związanych z realizacją planu badawczego. Długotrwałe, dekompresyjne nurkowania

---

<sup>24</sup> Zwyczajowo jednak, dla zwiększenia bezpieczeństwa, wykonuje się jeden przystanek dekompresyjny (ang. *safety stop*), tj. przerwę w wynurzaniu, na głębokości 5 m ppw, która trwa 3 minuty.

<sup>25</sup> W trakcie przystanków dekompresyjnych czasem używa się różnych sztucznych mieszanin oddechowych lub tlenu, celem przyspieszenia eliminacji azotu z ustroju.

charakteryzują się dłuższym czasem w trakcie którego można wykonywać badania, jednakże są bardzo skomplikowane pod względem logistycznym.

Podsumowując, eksperymenty przeprowadzane w nadciśnieniu muszą być planowane przy użyciu zaawansowanych modeli matematycznych, a także odpowiednio nadzorowane, optymalnie z procedurą „wzajemnego, krzyżowego sprawdzenia” (ang. *cross-check*, por. dalsza część tekstu), aby zagwarantować bezpieczeństwo procedury badawczej. Należy również zadbać o odpowiednie zabezpieczenie medyczne tego rodzaju badań, z uwzględnieniem personelu medycznego posiadającego wiedzę i doświadczenie obejmujące postępowanie w stanach zagrożenia zdrowia i życia spowodowanych ekspozycją na nadciśnienie. Warto dodać, iż w Polsce jest bardzo niewielu specjalistów zajmujących się medycznymi aspektami powikłań ekspozycji hiperbarycznych.

Na zakończenie tej części warto wspomnieć, iż badanie grupy eksperymentalnej w warunkach komory hiperbarycznej, które zostanie przeprowadzone na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej, będzie powietrznym nurkowaniem dekompresyjnym. Dodatkowo badacz będzie oddychał 100% tlenem w trakcie dekompresji aby móc bezpiecznie wykonać nurkowania badawcze dwa dni z rzędu. Nurkowania podwodne będą powietrznymi nurkowaniem bezdekompresyjnymi<sup>26</sup>, za wyjątkiem trzech nurkowań, które zostaną przeprowadzane w fazie pretestowej (nurkowania z użyciem trimiksu hipoksycznego<sup>27</sup>, ze skomplikowaną dekompresją). Grupy kontrolne będą badane w warunkach komory hiperbarycznej przy użyciu helioksu (20% O<sub>2</sub>, 80% He) w trakcie nurkowania dekompresyjnego. W artykułach dotyczących narkozy azotowej charakterystyka profili nurkowych zajmuje zwykle 3-4 zdania. Niemniej, warto pamiętać, iż za tak niewielką objętością tekstu kryje się ogromna praca interdyscyplinarnego zespołu.

### **10.1.2 Choroba dekompresyjna**

Zbyt szybkie wynurzenie się i/lub nieodpowiednia dekompresja (nieodpowiednie procedury „wynurzeniowe”) stanowi ryzyko rozwoju stanów chorobowych, które mogą zagrażać zdrowiu i życiu płetwonurków lub pracowników wykonujących swoje obowiązki w warunkach nadciśnienia. W omawianych sytuacjach gwałtowne tworzenie się pęcherzyków

---

<sup>26</sup> Dla zwiększenia bezpieczeństwa będą wykonywane wspomniane „*safety stops*” - przystanki trwające 3 minuty, wykonywane na głębokości 5 metrów pod powierzchnią wody.

<sup>27</sup> Trimiks hipoksyczny jest mieszaniną tlenowo-helowo-azotową, ze zredukowaną ilością tlenu w stosunku do powietrza atmosferycznego (na potrzeby badania pretestowego będzie używany trimiks z 10-12% zawartością O<sub>2</sub>).

azotu przekracza możliwości ich eliminacji z ustroju poprzez płuca, co powoduje objawy chorobowe powstałe między innymi w mechanizmie niedokrwienia tkanek przez okluzję („zatknie”) naczyń krwionośnych pęcherzykami gazowymi. Omawiany stan jest nazywany chorobą dekompresyjną (DCS, ang. *decompression sickness*, historycznie - choroba kesonowa, ang. *caisson disease*). Objawy DCS i ich nasilenie zależą od ilości i miejsca ulokowania pęcherzyków azotu w ustroju (Piechocki i Janus, 2015).

Podsumowując całość dotychczasowych rozważań - aby zapobiec rozwojowi choroby dekompresyjnej przed ekspozycją hiperbaryczną planuje się nurkowanie z użyciem zaawansowanych modeli matematycznych, a w trakcie ekspozycji na nadciśnienie ściśle monitoruje się przestrzeganie planu nurkowego, z uwzględnieniem takich zmiennych jak: głębokość/ciśnienie, czas przebywania w hiperbarii, prędkość wynurzenia itd. Optymalnie nadzór powinien mieć postać przynajmniej dwuosobowego „wzajemnego, krzyżowego sprawdzenia” (ang. *cross-check*). W przypadku długotrwałych i/lub głębokich nurkowań wykonuje się również przystanki dekompresyjne. W dzisiejszych czasach dostępne są programy komputerowe, które pomagają zaplanować bezpieczne nurkowanie, a także komputery nurkowe (w formie „zegarków” na rękę), które pozwalają na monitorowanie przebiegu nurkowania i ułatwiają bezpieczne wynurzenie.

Warto zwrócić uwagę, że płetwonurek pod wpływem narkozy azotowej może nie przestrzegać planu nurkowania, nie monitorować ilości pozostałego czynnika oddechowego (w warunkach podwodnych) czy też popełnić błędy w trakcie dekompresji lub nawet całkowicie jej zaniechać, narażając się na ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej (Konarski, 2012).

Do chwili obecnej tylko w jednym artykule opisującym eksperymentalne sprężenie w celu badania wpływu narkozy na funkcjonowanie psychiczne opisano powikłanie ekspozycji na nadciśnienie. Behnke i in., (1935) po dekompresji (po wynurzeniu i osiągnięciu normobarii), stwierdzili u badanych drażliwość, zmęczenie i senność, które ustąpiły po podaży tlenu (tlen przyspiesza eliminację azotu z organizmu). Informacje zawarte w artykule sugerują, iż eksperyment był powikłany wystąpieniem choroby dekompresyjnej (typu neurologicznego). Warto jednakże zwrócić uwagę, że w czasie przeprowadzania badania (1935 rok) procedury dekompresyjne (procedury „wynurzeniowe”) były jeszcze niedoskonałe. Niemniej, przykład ten pokazuje, że należy dołożyć wszelkich starań aby badania w warunkach nadciśnienia były przede wszystkim bezpieczne, a dopiero w dalszej kolejności - aby przynosiły wymierne korzyści naukowe.

## 10.2 Przemiana izotermiczna

Jak już wspomniano, przemiany gazowe opisują przemiany zmiennych termodynamicznych: ciśnienia ( $p$ ), objętości ( $V$ ) i temperatury ( $T$ ) gazu. Zmiana jednego parametru implikuje zmianę dwóch pozostałych.

Przemiana izotermiczna ( $T = \text{const}$ , zmiana  $p$  i  $V$ ) (prawo Boyle'a-Mariotte'a, prawo Boyle'a, rzadko: prawo Mariotte'a; ang. *Boyle-Mariotte law*, *Boyle's law*, *Mariotte's law*) opisuje zależność objętości i ciśnienia. Objętość ( $V$ ) danej masy gazu jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia otoczenia ( $p$ ) ( $\uparrow p \rightarrow \downarrow V$ , a także  $\downarrow p \rightarrow \uparrow V$ , przy założeniu, że temperatura układu jest stała). W warunkach normobarii ciśnienie zewnętrzne (atmosferyczne) jest równe ciśnieniu w uchu środkowym, które jest upowietrzoną strukturą anatomiczną. Wraz ze wzrostem ciśnienia zewnętrznego, spada objętość gazów w przestrzeni ucha środkowego ( $\uparrow p \rightarrow \downarrow V$ ), co jest odczuwane początkowo jako dyskomfort, a następnie jako ból. Istnieje zatem konieczność wyrównania ciśnienia w uchu środkowym w toku ekspozycji hiperbarycznej. W zależności od środowiska badawczego stosuje się w tym celu różne techniki. W trakcie badań w warunkach podwodnych i w komorach hiperbarycznych można stosować próbę Valsalvy, polegającą na wdmuchiwananiu powietrza z płuc do nosa przy zamkniętych ustach i zaciśniętych skrzydełkach nosa. W trakcie eksperymentów w komorze hiperbarycznej dopuszczalne jest także wykonywanie ruchów żuchwą, żucie gumy do żucia czy picie wody. Niezwykle ważnym jest aby uczestnicy badań w warunkach naciśnienia rozumieli konieczność komunikowania eksperymentatorowi dyskomfortu/bólu związanego z niemożnością wyrównania ciśnienia w uchu środkowym. Należy także przeprowadzić odprawę przed badaniem w trakcie której zostaną przypomniane podstawowe sposoby wyrównywania ciśnienia, a także sposób zakomunikowania trudności z uzupełnieniem objętości gazu we wspomnianej strukturze anatomicznej. Wzrost ciśnienia w komorze hiperbarycznej jest związany z hałasem i z tego powodu należy opracować system gestów dzięki którym możliwa będzie komunikacja pomiędzy osobą badaną a eksperymentatorem. W warunkach podwodnych komunikacja odbywa się za pomocą tzw. znaków nurkowych (wystandaryzowanych gestów).

Niemożność wyrównania ciśnienia we wspomnianej strukturze anatomicznej grozi powikłaniami (do perforacji („pęknięcia”) błony bębenkowej włącznie, por. Bove, 2014), co powoduje konieczność przerwania badania i odpowiednio: wyprowadzenie osoby badanej z komory hiperbarycznej (poprzez system śluz, por. dalsza część tekstu) lub wynurzenie (w przypadku badań prowadzonych w warunkach podwodnych). Z tego powodu należy



rekrutować do badań osoby z dużym doświadczeniem nurkowym, a także obligatoryjnie przeprowadzać badanie lekarskie w dniu eksperymentu.

W trakcie fazy sprężania lub rozprężania może u badanych wystąpić również ból zęba/zębów. Chociaż dokładny patomechanizm omawianego zjawiska nie został w pełni wyjaśniony wydaje się, iż istotną rolę mogą mieć źle wykonane plombi i uwięźnięcie powietrza pomiędzy zębem, a wypełnieniem. W trakcie zmian ciśnienia dochodzi do zmian objętości gazu, co jest odczuwane jako dotkliwy ból (Bove, 2014). Analogicznie do niemożności wyrównania ciśnienia w uchu środkowym - ból zęba/zębów w trakcie ekspozycji hiperbarycznej może powodować konieczność przerwania eksperymentu.

Jakkolwiek omawiane w niniejszym akapicie treści nie są bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej z zakresu psychologii poznawczej, pozwalają na poznanie niewielkiej części trudności logistycznych związanych z prowadzeniem badań w warunkach nadciśnienia.

### **10.3 Uraz ciśnieniowy płuc (barotrauma płuc)**

Zgodnie z omawianą powyżej przemianą termodynamiczną ( $\downarrow p \rightarrow \uparrow V$ ), wynurzenie się przez płetwonurka bez wypuszczenia czynnika oddechowego z płuc (wynurzenie się na zatrzymanym oddechu, po uprzednim wykonaniu wdechu pod wodą, zwykle w przebiegu paniki) może skutkować urazem ciśnieniowym płuc (barotraumą płuc, ang. PBT, *pulmonary barotrauma*). Wzrost objętości gazu może spowodować rozerwanie mięszu płucnego lub nawet drzewa oskrzelowego (Bogusz i in., 2010; Cross i Plunkett, 2008; Lin, 2012; Bove, 2014). Jest bardzo mało prawdopodobnym, aby do urazu ciśnieniowego płuc doszło w przypadku eksperymentalnych sprężeń w komorze hiperbarycznej, jednakże uraz ciśnieniowy płuc jest możliwym powikłaniem ekspozycji podwodnej, co sprawia, iż do badań podwodnych należy rekrutować płetwonurków o odpowiednio wysokich kwalifikacjach nurkowych (co istotnie zmniejsza liczbę badanych, którzy mogą zostać włączeni do eksperymentów). Do urazu ciśnieniowego płuc może również dojść w pod wpływem narkozy azotowej (w przypadku popełnienia błędu i/lub zbagatelizowania procedur w przebiegu narkozy „euforycznej” czy paniki wywołanej narkozą „dysforyczną”).

Podsumowując całość rozważań, eksperymenty w warunkach nadciśnienia powinny być planowane z należytą dbałością, a także konsultowane na każdym etapie ze specjalistami z zakresu teorii dekompresji, aby uniknąć potencjalnie niebezpiecznych powikłań. Kolejnym

istotnym czynnikiem jest rekrutacja badanych o odpowiednio wysokich kwalifikacjach nurkowych, a także bardzo dokładne omówienie planu badania z osobami biorącymi udział w eksperymencie (w pierwszej kolejności - ze szczególnym uwzględnieniem aspektów dotyczących bezpieczeństwa). Badania muszą być nadzorowane przez personel medyczny legitymujący się wiedzą i doświadczeniem dotyczącym postępowania w stanach nagłych spowodowanych ekspozycją na nadciśnienie.

Narkoza azotowa jest predyktorem wypadków nurkowych, które mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia płetwonurków. Warto ponownie podkreślić, iż według niektórych źródeł nawet 6-9% zgonów u płetwonurków jest spowodowanych przez narkozę (za: Grover i Grover, 2014; Clark, 2015). Więcej informacji na temat wpływu narkozy azotowej na przebieg nurkowania znajduje się w Załączniku 20.

## **11 Ogólna metodologia badań nad narkozą azotową**

### **11.1 Wprowadzenie**

Badania nad narkozą azotową można podzielić na trzy główne typy: badania w komorze hiperbarycznej, badania w warunkach podwodnych i badania z użyciem normobarycznego podtlenu azotu (N<sub>2</sub>O). W niniejszym rozdziale zostaną pokrótce scharakteryzowane wspomniane środowiska badawcze, a także ograniczenia metodologiczne związane z prowadzeniem badań w warunkach nadciśnienia. Poniższa charakterystyka stanowi również rozwinięcie zagadnień związanych z planowaniem i przeprowadzaniem badań w hiperbarii.

### **11.2 Badania w komorze hiperbarycznej**

Najliczniejszą grupą badań są badania prowadzone w warunkach komory hiperbarycznej (Behnke i in., 1935; Adolfson, 1956; Kiessling i Maag, 1962; Poulton i in., 1963; Frankenhaeuser i in., 1963; Poulton i in., 1964; Adolfson i Muren, 1965; Bennett, Poulton, Carpenter i Catton, 1967; Weltman i in., 1971; Adolfson, Goldberg i Berghage, 1972; Fowler, 1973; Fowler i Ackles, 1975; Whitaker i Findley, 1977; Biersner i in., 1978; Jones, Jennings, Adolfson i Hesser, 1979; Banks i in., 1979; Moeller i in., 1981; Vaernes i Darragh, 1982; Philp i in., 1989; Rogers i Moeller, 1989; Hamilton i Porlier, 1989; Abraini i Joulia, 1992; Hamilton, Laliberté i Fowler, 1995; Mekjavić, Savić i Eiken, 1995; Tetzlaff i in., 1998; Petri, 2003; Sparrow, Mathieu, Wattel, Lancry i Neviere, 2000; Kowalski i in., 2012; Tikkinen i in., 2013; Löfdahl i in., 2013; Meckler i in., 2014; van Wijk i Meintjes, 2014a; van Wijk i Meintjes, 2014b; Tikkinen i Siimes, 2015; Van Wijk i in., 2017).

Najważniejszym ograniczeniem metodologicznym badań prowadzonych w komorach jest, ze względu na ryzyko zapłonu/pożaru/wybuchu, niemożność prowadzenia badań z użyciem sprzętu elektronicznego niecertyfikowanego do pracy w nadciśnieniu. Z tego powodu badania muszą ograniczać się do arkuszy papierowych i/lub prostych urządzeń badających funkcje psychomotoryczne.

Istotną kwestią dla uczestników eksperymentu może być dyskomfort związany z przebywaniem w warunkach bardzo ograniczonej przestrzeni, z której nie można się natychmiast wydostać. Z tego powodu należy wykluczyć z grup badawczych osoby, które deklarują istotną nietolerancję niewielkich i zamkniętych pomieszczeń.

Wadą eksperymentów w komorze ciśnieniowej jest wysoka cena i liczne trudności logistyczne, na przykład konieczność prowadzenia badań pomiędzy planowymi sprężeniami terapeutycznymi czy ryzyko przerwania eksperymentu w przypadku przyjęcia do ośrodka hiperbarycznego pacjenta w stanie zagrożenia zdrowia/życia wymagającego natychmiastowego wdrożenia tlenoterapii hiperbarycznej lub leczenia rekompresyjnego.

### **11.3 Badania w warunkach podwodnych**

Z powodu znacznych trudności metodologicznych w chwili obecnej dysponujemy niewielką liczbą badań przeprowadzonych pod wodą (Baddeley i Flemming, 1967; Baddeley i in., 1968; Davis i in., 1972; Synodinos, 1976; Mears i Cleary, 1980; Zander i Morrison, 2008; Hobbs, 2008; Hobbs i Kneller, 2009; Hobbs i Kneller, 2011; Kneller i in., 2012; Balestra i in., 2012; Kneller i Hobbs, 2013; Hobbs i in., 2014; Hobbs, 2014; Steinberg i Doppelmayr, 2017; Brebeck i in., 2017; Germonpré, Balestra, Hemelryck, Buzzacott i Lafère, 2017).

Eksperymenty w warunkach podwodnych można prowadzić na wodach otwartych lub wodach basenowych. Wody basenowe umożliwiają standaryzację pomiaru, jednakże uzyskane wyniki cechuje umiarkowana trafność ekologiczna. Z drugiej strony, nurkowanie na wodach otwartych zapewnia najdalej idący realizm sytuacyjny, jednakże standaryzacja pomiaru jest znacznie utrudniona, a kontrolna zmiennych wpływających na wykonanie testów (takich jak np. temperatura czy przezierność wody) jest niemożliwa.

Warto także dodać, że komunikacja pomiędzy eksperymentatorem a osobą/osobami badanymi pod wodą jest znacznie ograniczona i opiera się na zestawie umówionych gestów (znaków nurkowych) i/lub komunikatów pisanych na specjalnych tabliczkach. Płetwonurkowie bardzo rzadko korzystają z masek pełnotwarzowych (obejmujących całą twarz) i systemu łączności, który umożliwia komunikację werbalną. Z tego powodu osoby badane muszą być doskonale zaznajomione z planem badawczym przed rozpoczęciem nurkowania.

Z oczywistych powodów do badań używa się zalaminowanych testów, tablic z rysikami lub prostych urządzeń badających czynności psychomotoryczne<sup>28</sup>, analogicznie więc do badań w komorze hiperbarycznej - warunki eksperymentu znacznie ograniczają możliwości badawcze.

---

<sup>28</sup> Wyjątkiem jest omawiany we wcześniejszej części pracy eksperyment Steinberga i Doppelmayra (2017), w trakcie którego użyto wodoodpornego tabletu.

Badania w warunkach podwodnych są także obarczone ryzykiem typowym dla aktywności podwodnej (tonięcie, wychłodzenie itd.).

#### **11.4 Badania z użyciem podtlenku azotu**

W chwili obecnej dysponujemy stosunkowo nieliczną grupą badań z użyciem podtlenku azotu ( $N_2O$ ) (Fowler, White, Wright i Ackles, 1980; Fowler, White, Holness i Ackles, 1982; Fowler, Hamilton i Porlier, 1986; Hamilton in., 1986; Fowler i in., 1987; Hamilton, Laliberté i Heslegrave, 1992; Hamilton i in., 1993; Fowler i Adams, 1993; Jakovljević i in., 2012).

Badania z użyciem  $N_2O$  są dużo tańsze od badań prowadzonych w warunkach hiperbarycznych i mogą pozwolić uniknąć licznych trudności metodologicznych lub logistycznych. W trakcie eksperymentów z użyciem podtlenku azotu możliwe jest używanie sprzętu elektronicznego (komputery, tablety, EEG itd.), jednakże do tej pory nie opublikowano ani jednego raportu z takiego badania.

Zdecydowaną wadą użycia normobarycznego  $N_2O$  jest jednak brak realizmu sytuacyjnego czy brak odczuwalnego wpływu zwiększonego ciśnienia na ciało badanego. Otwartym pozostaje zatem pytanie, czy badania z użyciem podtlenku azotu można uznać za komplementarne do badań przeprowadzonych w środowisku hiperbarycznym (warunki komory hiperbarycznej, warunki podwodne), a także jak dalece można międzyśrodkowo ekstrapolować uzyskane wyniki. Jakkolwiek oba typy narkozy (narkoza azotowa i narkoza wywołana podtlenkiem azotu) działają depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, mechanizmy odpowiedzialne za ich powstanie są inne, co sprawia, iż utożsamianie wpływu  $N_2O$  z wpływem hiperbarycznego azotu może być nietrafne. W chwili obecnej dysponujemy nielicznymi badaniami porównującymi narkozę wywołaną normobarycznym podtlenkiem azotu z narkozą azotową spowodowaną ekspozycją hiperbaryczną (Biersner, Hall, Neuman i Linaweaver, 1977; Fowler, Granger, Ackles, Holness, Wright i 1983; Biersner, 1987; Turle-Lorenzo, Zouani i Risso, 1999). Niemniej, niektórzy autorzy twierdzą, że wpływ podtlenku azotu na funkcjonowanie człowieka jest bardzo zbliżony (lub czasem nawet identyczny) do wpływu narkozy azotowej (Fowler i in., 1980). Więcej informacji o badaniach porównujących ekspozycję na  $N_2O$  i hiperbaryczne powietrze zamieszczono w Załączniku 21. W Załączniku 22 zamieszczono również przykładowe badania z wpływu podtlenku azotu na zachowania zwierząt.

## 11.5 Liczebność grup badawczych

Grupy eksperymentalne i kontrolne w badaniach nad narkozą azotową są zwykle niewielkie. Mała liczebność prób badawczych jest związana między innymi z wysokimi kosztami badań czy trudnościami w rekrutacji osób do eksperymentów. W analizowanym piśmiennictwie, w trakcie badań w komorze hiperbarycznej grupy badawcze liczyły od sześciu (Rogers i Moeller, 1989) do stu trzydziestu dziewięciu uczestników (van Wijk i Meintjes, 2014a; van Wijk i Meintjes, 2014b). Do badań w warunkach podwodnych zrekrutowano od ośmiu (Baddeley i Flemming, 1967; Germonpré i in., 2017) do stu dwudziestu pięciu uczestników (Hobbs i Kneller, 2011). Paradoksalnie, najmniej liczne grupy badawcze występują w badaniach z użyciem podtlenku azotu. Liczebności grup badawczych, w odniesieniu do konkretnych badań zostały umieszczone w Załączniku 23.

## 11.6 Charakterystyka osób badanych

Uczestnicy eksperymentów legitymują się różnym doświadczeniem związanym z przebywaniem w warunkach hiperbarycznych. Część badanych jest pletwonurkami zawodowymi lub uprawia nurkowanie rekreacyjnie, a część pracuje jako atencenci<sup>29</sup> w komorach hiperbarycznych. Badane są także osoby bez jakiegokolwiek uprzedniego doświadczenia z hiperbarią (zarówno bez doświadczenia w nurkowaniu w warunkach podwodnych lub też bez doświadczenia w wykonywaniu nurkowań „suchych”).

Brebeck i in. (2017) zwracają uwagę na niedoreprezentowanie kobiet w grupach badawczych. Sytuacja ta jest podyktowana mniejszą liczbą kobiet, które nurkują (tylko około 1/3 pletwonurków rekreacyjnych stanowią kobiety). Autorzy piszą wprost, iż omawiane uchybienie metodologiczne może spowodować „*overlooking one-third of recreational divers*” (pominięcie/przeoczenie grupy około 30% pletwonurków rekreacyjnych) (s. 2). Jak już wspomniano, nie wykazano (z jednym wyjątkiem, Brebeck i in., 2017) aby płeć wpływała w jakikolwiek sposób na charakter przebiegu narkozy azotowej (Kneller i Hobbs, 2013; Hobbs i in., 2014; van Wijk i Meintjes, 2014a). Niemniej, należy podkreślić, iż różnice w funkcjonowaniu poznawczym kobiet i mężczyzn są stosunkowo dobrze poznane (por. np. Robert, Savoie, 2006).

Jedynymi czynnikami, które są wspólne dla wszystkich badań są: doskonałe zdrowie uczestników badania (z eksperymentów wyłącza się osoby z istotną historią chorobową) i wiek

---

<sup>29</sup> Atendentem (w polskich warunkach) jest pielęgniarz lub pielęgniarka anestezjologiczna.

badanych (do grup kontrolnych i eksperymentalnych włącza się tylko osoby dorosłe, wykluczając jednocześnie osoby >50 roku życia). Ze względu na ryzyko malformacji płodu nie bada się kobiet ciężarnych. Warto podkreślić, że przy tak nielicznych i tak zróżnicowanych grupach badawczych uśrednienie wariancji wewnątrz- lub międzygrupowej może być problematyczne.

### **11.7 Grupy kontrolne**

W badaniach z użyciem komór hiperbarycznych grupy kontrolne są badane w warunkach normobarycznych lub hiperbarycznych. Przykładowo, w badaniu Rogersa i Moellera (1989) dane kontrolne uzyskano przy ciśnieniu 1,3 ATA, a w badaniu Sparrowa i in. (2000) - 1,5 ATA. Badanie grupy kontrolnej w warunkach hiperbarycznych standaryzuje warunki eksperymentu - oddychanie powietrzem przy ciśnieniu 1,3 ATA nie powoduje narkozy azotowej (lub bardziej precyzyjnie - wpływ azotu prawdopodobnie można uznać za pomijalny), a badani doświadczają nieco mniej nasilonych, ale bardzo podobnych efektów fizjologicznych (np. wpływ zwiększonego ciśnienia na objętość gazów w uchu środkowym). Przy 1,5 ATA (w warunkach podwodnych) obserwuje się już jednak subtelne objawy narkozy azotowej, które wpływają na wykonywanie testów (Dalecki i in., 2012). Badania w warunkach normobarycznych można prowadzić w przestrzeni komory hiperbarycznej (celem niwelacji np. efektu pamięci zależnej od kontekstu).

Optymalnym rozwiązaniem wydaje się być użycie mieszanin helowo-tlenowych (helioks - mieszania 20% O<sub>2</sub> i 80% He) przy tożsamym ciśnieniu otoczenia co powietrzna grupa eksperymentalna (Fowler i in., 1983; Hamilton i in., 1989). Mieszaniny helowo-tlenowe przy ciśnieniach do których spręża się badanych w eksperymentach z użyciem powietrza, nie powodują zmian w funkcjonowaniu poznawczym czy psychomotorycznym (Bennett i in., 1967), co zapewnia zachowanie kanonu jedynej różnicy. Helioks jest jednak bardzo drogi i niezwykle trudno dostępny, a jego użycie w eksperymencie może być niemożliwe z powodów logistycznych. Do przykładowych trudności związanych z użyciem tej mieszaniny oddechowej należą między innymi: brak możliwości zrecrutowania pletwonurków z uprawnieniami do wykonywania głębokich nurkowań z użyciem helioksu, brak doświadczenia zespołu badawczego w planowaniu, zabezpieczaniu i przeprowadzaniu ekspozycji helioksowych czy brak odpowiedniej infrastruktury (instalacji) w komorze hiperbarycznej, która umożliwiałaby sprężenie helioksowe itd. (Grover i Grover, 2014).

W badaniach w warunkach podwodnych grupa kontrolna może być badana na lądzie, na powierzchni wody lub też na nieznaczej głębokości (por. Baddeley i Flemming, 1967; Mears i Cleary, 1980). Aby zniwelować wpływ różnicy środowisk (ląd/woda) na wynik pomiaru preferowane jest prowadzenie badań z grupą kontrolną na powierzchni wody lub niewielkiej głębokości (Hobbs i in., 2014). Warto jednak zwrócić uwagę, że warunki panujące blisko tafli wody różnią się od warunków panujących na dnie. Przykładowo, zarówno przejerność jak i temperatura wody spada wraz ze wzrostem głębokości. Co więcej, przy powierzchni mogą także występować fale, prądy wodne itd. Różnice w uzyskanych wynikach nie mogą być zatem tłumaczone wyłącznie przez pryzmat wpływu narkozy azotowej (Fowler, 1972). Optymalnym rozwiązaniem jest użycie helioksu przy tożsamej głębokości na której badana jest grupa eksperymentalna.

W badaniach z użyciem podtlenku azotu grupa kontrolna oddycha normobarycznym powietrzem (por. Hamilton i in., 1993).

### **11.8 Warunki eksperymentu - parametry ciśnienia otoczenia i stężenia podtlenku azotu**

W badaniach nad narkozą azotową używa się bardzo różnych parametrów ciśnienia otoczenia lub stężenia podtlenku azotu. W trakcie eksperymentów w komorze hiperbarycznej stosowano ciśnienie od 2 ATA (10 m ppw) (Poulton i in., 1963; Poulton i in., 1964; Bennett i in., 1967; Petri, 2003) do aż 19 ATA (180 m ppw) (Adolfson i in., 1972). Dla porównania, badania w warunkach podwodnych są prowadzone zwykle na dwóch różnych głębokościach: od powierzchni wody do około 10 m ppw (1-~2 ATA) i od około 30 do około 40 m ppw (~4-~5 ATA). Wyjątkiem jest badanie Baddeleya i Flemminga (1967), którzy przeprowadzili swój eksperyment na głębokości 3 i 60 metrów pod powierzchnią wody (odpowiednio: 1,3 i 7 ATA). Tabele ukazujące docelowe ciśnienia otoczenia w analizowanych badaniach zostały umieszczone w Załącznikach 24 i 25. Stężenie N<sub>2</sub>O, którego użyto w dotychczas przeprowadzonych badaniach zamieszczono w Załączniku 26.

### **11.9 Podwójnie ślepa próba. Maskowanie i odkłamanie**

W badaniach nad wpływem alkoholu na funkcjonowanie poznawcze osoby badane otrzymują napój alkoholowy lub placebo (por. np. Nelson i in., 1986). W trakcie badań w warunkach nadciśnienia jako „placebo” może być wykorzystana ekspozycja na nienarkotyczny czynnik oddechowy (helioks). Jednakże w warunkach komory hiperbarycznej czy pod wodą, w trakcie nurkowań z użyciem masek pełnotwarzowych (które umożliwiają komunikację



głosową), tego typu zabieg ma jednak niewielką szansę powodzenia, ze względu na fakt, iż hel znacząco zmienia wysokość głosu (powoduje „głos Kaczora Donalda” - badani bardzo szybko zorientują się jaką mieszaniną gazową oddychają).

Do chwili obecnej tylko w jednym badaniu (Brebeck i in., 2017) osoby biorące udział w eksperymencie nie zostały poinformowane czy będą oddychały w warunkach podwodnym powietrzem czy nitroksenem (28% O<sub>2</sub>, 72% N<sub>2</sub>). Co więcej, w trakcie omawianego badania również eksperymentator nie wiedział jakim czynnikiem oddechowym oddychają badani (wiedziały to wyłącznie osoby napelniające butle nurkowe). Jakkolwiek badania z podwójnie ślepa próbą (ang. *double-blind study*) są wartościowe pod względem metodologicznym, otwartym pozostaje pytanie czy potencjalne korzyści (walory metodologiczne) nie wpływają w sposób istotny na bezpieczeństwo osób biorących udział w eksperymencie.

W warunkach nadciśnienia przeprowadzenie badania z instrukcją maskującą jest znacznie utrudnione. Płetwonurkowie przed przystąpieniem do eksperymentu są świadomi, iż oceniane będzie funkcjonowanie danej zmiennej (np. długotrwałej pamięci słów) pod wpływem narkozy azotowej. Co więcej, ze względu na fakt, iż w warunkach nadciśnienia nie wolno używać sprzętu niecertyfikowanego do pracy w hiperbarii, testy oceniające czynności poznawcze są prostymi zadaniami polegającymi na np. wyszukiwaniu kolejnych cyfr/liczb (Brebeck i in., 2017), wykonywaniu działań arytmetycznych (Davis i in., 1972) czy zapamiętywaniu i przypominaniu materiału (Tetzlaff i in., 1998). W omawianych warunkach niezmiernie trudno jest przeprowadzenie procedurę maskowania.

### **11.10 Ogólna metodologia badań nad narkozą azotową - podsumowanie i implikacje praktyczne**

Badania nad narkozą azotową starają się odpowiedzieć na pytanie czy dana funkcja poznawcza lub psychomotoryczna przy danym ciśnieniu otoczenia jest lub nie jest zaburzona. Przykładowo, przy ekspozycji na hiperbarię powietrzną rzędu 6 ATA (50 m ppw) warunkach komory hiperbarycznej (a więc przy ppN<sub>2</sub> = 4,86 ATA) upośledzeniu ulega kodowanie informacji (ang. *encoding*) w pamięci długotrwałej (Tetzlaff i in., 1998). Otwartym pozostaje jednakże pytanie o orientacyjną, dolną granicę ciśnienia parcjalnego azotu (ppN<sub>2</sub>), które zaburza wspomnianą składową procesu pamięciowego. Co więcej, nieznaną jest wspomniana dolna granica ppN<sub>2</sub> zarówno w trakcie ekspozycji podwodnej, jak i podczas hiperbarycznej ekspozycji „suchej”.

Innym przykładem eksperymentu oceniającego funkcjonowanie poznawcze może być badanie Steinberga i Doppelmayra (2017), którzy sprawdzali, które funkcje wykonawcze (zgodnie podziałem zaproponowanym przez Miyake i in., 2000) są podatne na wpływ narkozy azotowej (badanie na wodach basenowych z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego, które zostało przeprowadzone na głębokości 20 m ppw). W warunkach 3 ATA nie stwierdzono istotnego wpływu narkozy na odświeżanie informacji w pamięci roboczej. Oznacza to, iż również nieznana jest orientacyjna, dolna granica ciśnienia otoczenia przy której dochodzi do zaburzenia tej funkcji (która jednak z całą pewnością ulegnie upośledzeniu przy odpowiednio wyższym ciśnieniu parcjalnemu azotu). Kwestią wymagającą rozstrzygnięcia jest pytanie czy narkoza azotowa może negatywnie wpływać na funkcjonowanie omawianej zmiennej, w trakcie nurkowań w granicach aktualnie obowiązujących limitów głębokościowych.

Oszacowanie orientacyjnych, granicznych wartości ciśnień otoczenia (a więc granicznych wartości ppN<sub>2</sub>), które istotnie upośledzają dane zmienne poznawcze lub psychomotoryczne ma bezpośrednie implikacje praktyczne między innymi dla optymalizacji szkolenia, wyznaczania limitów głębokościowych dla płetwonurków, w zależności od ich kwalifikacji i używanych mieszanin oddechowych, a także zwiększenia dla bezpieczeństwa i jakości wykonywanych prac w warunkach nadciśnienia. Warto ponownie zwrócić uwagę, iż nawet 6-9% podwodnych zgonów u płetwonurków jest spowodowanych poprzez następstwa działań (nieprawidłowe działanie, opóźnienie działania lub jego brak) pod wpływem narkozy azotowej (za: Grover i Grover, 2014).

W trakcie badań nad narkozą azotową, badane są *de facto* trzy różne zjawiska: „podwodna” narkoza azotowa, „sucha” narkoza azotowa (indukowana w komorze hiperbarycznej) i narkoza „podtlenkowa” (mająca miejsce w warunkach ekspozycji na normobaryczny podtlenek azotu). Patrząc przez pryzmat wyłącznie prawa Henryego (przez pryzmat biofizyczny) - narkoza „komorowa” nie różni się od narkozy „podwodnej” (zakładając m.in. tożsamą temperaturę i ciśnienie otoczenia, a także identyczną mieszaninę oddechową używaną do nurkowania). Jednakże, jak już wspomniano, liczne międzyśrodkowe różnice mogą wpływać na charakter i przebieg narkozy w komorze i pod wodą. W warunkach „suchej” hiperbarii spodziewać się można raczej narkozy „euforycznej”, a w warunkach podwodnych (przy złych warunkach nurkowych) raczej narkozy „dysforycznej” (Hobbs i Kneller, 2011). Pod wodą może dochodzić do nasilenia narkozy w mechanizmie spadku temperatury krwi (wzrost rozpuszczalności azotu), a w warunkach komory hiperbarycznej za pogłębienie zaburzeń funkcjonowania poznawczego może wpływać wysoka temperatura otoczenia itd.

Ekstrapolacja wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na realne warunki podwodne (i odwrotnie) wzbudza wiele kontrowersji (Baddeley, 1966)<sup>30</sup>. Analogicznie, nie jest pewne na ile trafnie można ekstrapolować wyniki uzyskane przy pomocy podtlenku azotu na funkcjonowanie we wspomnianych środowiskach. Nieliczne badania porównujące narkozę „podtlenkową” i narkozę azotową nie pozwalają (nawet w przybliżeniu) oszacować międzysrodowiskowego przelicznika ( $x \% N_2O$  odpowiada  $x ppN_2$ ).

W chwili obecnej w badaniach nad narkozą azotową panuje chaos związany z badaniem różnych zmiennych poznawczych i psychomotorycznych, przy różnym ciśnieniu otoczenia, w różnych warunkach środowiskowych (komora hiperbaryczna/warunki podwodne - wody słodkie, wody morskie, wody basenowe). Co więcej, badania są prowadzone przy użyciu różnych mieszanin oddechowych zawierających różny skład procentowy azotu, a w przypadku badań z użyciem podtlenku azotu - przy użyciu różnego stężenia procentowego  $N_2O$ . Podkreślić należy także fakt istotnych różnic metodologicznych dotyczących badania grupach kontrolnych (normobaria, nieznaczna hiperbaria powietrzna, użycie hiperbarycznych mieszanin helowytlenowych). Grupy eksperymentalne są zwykle nieliczne i niejednokrotnie zróżnicowane wewnętrznie. Wymienione czynniki rzadko kiedy umożliwiają porównywanie wyników. Co więcej, z nielicznymi wyjątkami (np. Hobbs i Kneller, 2015), badania nie są replikowane.

Pomimo faktu, iż rekreacyjnie nurkuje coraz więcej osób, a także wykonuje się coraz więcej profesjonalnych prac w warunkach nadciśnienia - rocznie są publikowane pojedyncze artykuły oryginalne ze wspomnianego zakresu, lub też nie są publikowane żadne prace (2015: 0; 2016: 1; 2017: 4; 2018: 1; 2019: 2; 2020: 0, 2021: 2; badania wyszukano przy pomocy bazy PubMed, tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” i tytuł/abstrakt „*inert gas narcosis*”). Za tak niewielką liczbę publikacji odpowiada kilka czynników. Wspomnieć należy między innymi, iż aby zajmować się narkozą azotową psycholog (lub też badacz zajmujący się inną dziedziną) musi w stopniu co najmniej ponadpodstawowym opanować fizykę gazów i teorię dekompresji (teorie omawiające dystrybucję azotu i innych gazów w organizmie w trakcie ekspozycji hiperbarycznej, co pozwala na zaprojektowanie i przeprowadzenie bezpiecznego badania). Co więcej, eksperymentator musi znać sprzęt nurkowy, charakter obecnie wykonywanych nurkowań i używanych przy nich mieszanin oddechowych. Naukowiec musi również mieć dostęp do odpowiedniej infrastruktury (komora hiperbaryczna), odpowiednich specjalistów

---

<sup>30</sup> Co więcej, upośledzenie funkcjonowania spowodowane narkozą azotową może być również mniej nasilone na wodach basenowych (doskonałe warunki nurkowe), w porównaniu do akwenów naturalnych w trakcie nurkowań przy trudnych warunkach nurkowych (np. wody zimne i mało przeziernie) (Baddeley i in., 1968).

(lekarz posiadający wiedzę z zakresu medycyny nurkowej i hiperbarycznej, technik przeprowadzający sprężenie w komorze itd.), a także do specyficznej grupy badawczej (płetwonurkowie o odpowiednio wysokich kwalifikacjach nurkowych).

Należy także dodać, iż badania nad narkozą azotową (z powodu licznych trudności logistycznych na które badacz zwykle nie ma wpływu<sup>31</sup>) mogą wzbudzać liczne kontrowersje metodologiczne i czasem rażąco odbiegać od metodologicznych „złotych standardów”, które zostały wypracowywane dekadami przez autorów zajmujących się „normobaryczną” psychologią eksperymentalną. Wspomnieć należy na przykład użycie do badań wyłącznie prostych testów papierowych (z jednym wspomnianym wcześniej wyjątkiem; Steinberg i Doppelmayr, 2017), bardzo małe grupy badawcze (również z nielicznymi wyjątkami), brak badacza lub jakiegokolwiek osoby legitymującej się wykształceniem psychologicznym w trakcie badania (badania podwodne), brak badań z powtarzalnym pomiarem, brak badań z zastosowaniem podwójnie ślepej próby (wyjątek: Brebeck i in., 2017) czy instrukcji maskującej i odkłamaniem, a także brak badań z grupą kontrolną (przy badaniach porównujących funkcjonowanie poznawcze przy oddychaniu dwiema różnymi mieszaninami oddechowymi; Brebeck i in., 2017) itd.

Wyraźnie podkreślić należy brak możliwości przeprowadzania badań w warunkach „suchej” hiperbarii przy użyciu sprzętu elektronicznego, gdyż ze względu na wysokie ciśnienia parcjalne tlenu istnieje ryzyko zapłonu i wybuchu wewnątrz komory (Janus i Piechocki, 2017). Do chwili obecnej przeprowadzono tylko jedno badanie z użyciem wodoodpornego tabletu (badanie na wodach basenowych) (Steinberg i Doppelmayr, 2017). Warunki badawcze narzucają konieczność przeprowadzania prostych testów pamięciowych, testów psychomotorycznych czy testów dostępnych w formie arkuszy papierowych (lub testów naniesionych na specjalne tabliczki nurkowe do których jest dołączany rysik umożliwiający pisanie pod wodą). Kolejnym czynnikiem, który narzuca określoną metodologię badawczą jest konieczność zaplanowania badania dostosowując go do parametrów ekspozycji hiperbarycznej, która warunkuje nasycanie i usuwanie z organizmu azotu (lub innego gazu, np. helu). Krótkie ekspozycje hiperbaryczne istotnie ograniczają czas, w którym można przeprowadzić badanie, dłuższe są związane z czasochłonnymi i uciążliwymi procedurami dekompresyjnymi (powolne i stopniowe („skokowe”) wynurzenie w celu utrzymania poziomu azotu we krwi w bezpiecznym zakresie, przy użyciu zaawansowanych modeli matematycznych

---

<sup>31</sup> Co więcej, w absolutnej większości przypadków psycholog prowadzący badania w ośrodku hiperbarycznym jest gościem, który korzysta z szeroko pojętej przychylności kierownika i pracowników ośrodka (ze wszelkimi tego przywilejami i ograniczeniami).

obliczających nasycanie i odsycanie tkanek). Badacz zajmujący się „normobaryczną” psychologią poznawczą planując eksperyment dostosowuje warunki badawcze do planu badania, jednakże środowisko hiperbaryczne wymusza dostosowanie planu eksperymentalnego do precyzyjnie określonych (co do sekund) i nieprzekraczalnych ograniczeń czasowo-ciśnieniowych. Eksperymenty w komorze hiperbarycznej wymagają znacznych nakładów finansowych i są związane z licznymi trudnościami logistycznymi, do których należą na przykład konieczność prowadzenia badań pomiędzy planowymi sprężeniami terapeutycznymi, ryzyko przerwania eksperymentu w przypadku przyjęcia do ośrodka hiperbarycznego pacjenta w stanie zagrożenia zdrowia/życia wymagającego natychmiastowego wdrożenia tlenoterapii hiperbarycznej (na przykład pacjenta zatrutego tlenkiem węgla) czy konieczność zapewnienia nadzoru lekarza, który posiada specjalistyczną wiedzę z zakresu medycyny nurkowej i hiperbarycznej, a także obecności certyfikowanego technika obsługującego komorę itd.

Należy także wspomnieć o trudnościach w doborze badanych do grupy eksperymentalnej. Zakładając, iż badania prowadzi się w 12-miejscowej komorze hiperbarycznej (tak, jak w trakcie badań na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej - w komorze Haux Starmed 2200 (HAUX-LIFE-SUPPORT, Niemcy), znajdującej się w szpitalu MSW w Warszawie) - jedno miejsce zajmuje badacz, a pozostałe 11 - uczestnicy eksperymentu. Niezwykle ciężko jest zrekrutować 11 płetwonurków-ochotników, którzy spełniają ustalone kryteria wieku, nie występują u nich przeciwwskazania do przebywania w warunkach hiperbarii powietrznej, mają wymagane certyfikaty dopuszczające do nurkowań głębokich<sup>32</sup>, legitymują się odpowiednim doświadczeniem i którzy pojawią się w jednym miejscu i w jednym czasie. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej w przypadku planowania i rekrutacji badanych do grupy kontrolnej, badanej przy użyciu mieszanin helowo-tlenowych (por. dalsza część tekstu). Wszystkie te czynniki sprawiają, iż badania eksperymentalne z zakresu funkcjonowania poznawczego w warunkach narkozy azotowej charakteryzują się znacznie niższą liczebnością osób badanych od współcześnie publikowanych badań z zakresu psychologii poznawczej (Janus i Piechocki, 2017). Przykładowo, Löfdahl i in. (2013) przeprowadził swoje badanie na 20 ochotnikach, Van Wijk i in. (2017) - na 21, Kowalski i in. (2012) - na 22, a Tetzlaff i in. (1998) - na 24 badanych. Podsumowując, badania nad narkozą azotową są (w całym światowym piśmiennictwie oryginalnym) pewnym kompromisem

---

<sup>32</sup> Terminem „nurkowanie głębokie” określa się nurkowania poniżej 18 m ppw (a więc powyżej 2,8 ATA).

pomiędzy dążeniem do optymalnej metodologii, a technicznymi i logistycznymi ograniczeniami specyficznego środowiska badawczego.

## 12 Modele środowiskowe

Mając na uwadze całość dotychczasowych rozważań, poniżej zamieszczono porównanie warunków panujących w czterech środowiskach badawczych: w normobarii, w „suchej” hiperbarii powietrznej, „suchej” hiperbarii helioksowej, a także w warunkach podwodnych (przy używaniu dwóch różnych mieszanin oddechowych). W każdym z omawianych środowisk hiperbarycznych wyszczególniono stresory, a także czynniki wpływające lub potencjalnie wpływające na funkcjonowanie poznawcze i psychomotoryczne. We wszystkich warunkach badawczych wspólnymi zmiennymi są: kondycja psychofizyczna badanych w dniu eksperymentu, motywacja do wykonania zadania, a także stres związany z sytuacją eksperymentalną. W normobarii istotnymi zmiennymi wpływającymi na wykonywanie testów są typowe fluktuacje środowiska fizykochemicznego (np. niskie ciśnienie otoczenia, wysoka temperatura w sali eksperymentalnej itd.).

## Grafika 1

Model przedstawiający czynniki wpływające lub potencjalnie wpływające na funkcjonowanie poznawcze i psychomotoryczne w różnych środowiskach hiperbarycznych

HIPERBARIA HELIOKSOWA (w warunkach komory hiperbarycznej):	<ul style="list-style-type: none"><li>• stres związany z ekspozycją hiperbaryczną,</li><li>• stres związany z przebywaniem w nowym środowisku - w warunkach "suchej" hiperbarii (w porównaniu do dobrze znanych płetwonurkom warunków podwodnych; nie dotyczy płetwonurków legitymujących się doświadczeniem obejmującym liczne ekspozycje hiperbaryczne w komorze),</li><li>• ograniczona, zamknięta przestrzeń, z której nie można natychmiast się wydostać (klaustrofobiczna komponenta lęku),</li><li>• stres cieplny (wysoka temperatura otoczenia) w trakcie kompresji i <i>plateau</i> ciśnieniowego,</li><li>• ekspozycja na istotny spadek temperatury (dekompresja),</li><li>• hałas w trakcie kompresji i dekompresji,</li><li>• zmiana charakterystyki bodźców słuchowych (wzrost gęstości czynnika oddechowego wraz ze zwiększeniem ciśnienia otoczenia).</li></ul>
HIPERBARIA POWIETRZNA (w warunkach komory hiperbarycznej):	<ul style="list-style-type: none"><li>• stres związany z ekspozycją hiperbaryczną,</li><li>• stres związany z przebywaniem w nowym środowisku - w warunkach "suchej" hiperbarii (w porównaniu do dobrze znanych płetwonurkom warunków podwodnych; nie dotyczy płetwonurków legitymujących się doświadczeniem obejmującym liczne ekspozycje hiperbaryczne w komorze),</li><li>• ograniczona, zamknięta przestrzeń, z której nie można natychmiast się wydostać (klaustrofobiczna komponenta lęku),</li><li>• stres cieplny (wysoka temperatura otoczenia) w trakcie kompresji i <i>plateau</i> ciśnieniowego,</li><li>• ekspozycja na istotny spadek temperatury (dekompresja),</li><li>• hałas w trakcie kompresji i dekompresji,</li><li>• zmiana charakterystyki bodźców słuchowych (wzrost gęstości czynnika oddechowego wraz ze zwiększeniem ciśnienia otoczenia),</li><li>• <b>narkoza azotowa (pomijalna przy grupach kontrolnych badanych w warunkach miernej hiperbarii).</b></li></ul>
WARUNKI PODWODNE (przy oddychaniu powietrzem lub helioksem):	<ul style="list-style-type: none"><li>• stres związany z ekspozycją hiperbaryczną,</li><li>• stres związany z ekspozycją podwodną,</li><li>• nieograniczona, otwarta przestrzeń, z której nie można natychmiast się wydostać (wynurzyć się; klaustro- i agorafobiczna komponenta lęku),</li><li>• stres związany z ekspozycją na zimno (w Polsce – zwykle niska temperatura wody),</li><li>• nienaturalne dla człowieka warunki środowiskowe:<ul style="list-style-type: none"><li>→ deprywacja sensoryczna: ograniczenie pola widzenia przez maskę nurkową, zmniejszona widzialność pozioma i pionowa (niska przezierność wody przy złych warunkach nurkowych), ograniczenie odbioru bodźców z aparatu słuchowego, narządu wzroku („wyblakłe” kolory) i mechanoreceptorów skórnych (w szczególności przy założonych rękawicach nurkowych i/lub podczas nurkowania w zimnej wodzie),</li><li>→ zaburzenia postrzegania: upośledzona ocena odległości i wielkości, zaburzenia percepcji słuchowej (problemy z lokalizacją źródła dźwięku) i propriocepcji (czucia głębokiego - zmysłu ułożenia części ciała względem siebie),</li></ul></li><li>• konieczność kontroli pływalności („unoszenia się” w wodzie),</li><li>• wysiłek fizyczny w trakcie nurkowania,</li><li>• konieczność jednoczesnej kontroli wielu parametrów nurkowania (długość nurkowania, czas bezdekompresyjny, głębokość, pozostała ilość mieszaniny oddechowej itd.),</li><li>• konieczność kontroli położenia partnera nurkowego lub eksperymentatora,</li><li>• upośledzenie motoryki spowodowane „przeszkodami mechanicznymi” (kombinezon nurkowy, rękawice, opór stawiany przez wodę, ruch wody - fale, prądy wodne itd.),</li><li>• retencja (zwiększenie ilości) dwutlenku węgla we krwi (który mnoży narkozę azotową),</li><li>• <b>narkoza azotowa (niewystępująca przy nurkowaniach z użyciem helioksu; pomijalna przy grupach kontrolnych badanych na niewielkiej głębokości).</b></li></ul>



Podsumowując, istnieją liczne różnice fizjologiczne, psychologiczne i środowiskowe pomiędzy warunkami występującymi w normobarii, w różnych typach „suchej” hiperbarii i w warunkach podwodnych. Z tego powodu międzyśrodowiskowa ekstrapolacja badań jest kontrowersyjna. Aby zachować kanon jedynej różnicy, grupa kontrolna powinna być badana przy tożsamym ciśnieniu otoczenia (na tożsamej głębokości) co powietrzna grupa eksperymentalna, z użyciem nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej (helioks).

## **13 Metodologia badań własnych**

### **13.1 Główny cel badań**

Mając na uwadze powyższe rozważania, postanowiono przeprowadzić cykl badań w czterech warunkach eksperymentalnych: w normobarii, w warunkach “suchej” hiperbarii indukowanej w komorze hiperbarycznej - z użyciem powietrza, a następnie nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej i pod wodą (przy pomocy sprężonego powietrza). Poszczególne fazy badań zostały przedstawione w poniższej tabeli, zgodnie z kolejnością ich przeprowadzenia. Dla jasności wyводу dalszej części pracy badania zostały ponumerowane od 0 do 5 (zgodnie z chronologią ich przeprowadzenia), a także w trzech przypadkach (ze względu na dwie grupy badawcze) - podzielono je na badanie “a” i badanie “b”.

## Tabela 1

Skrótowe przedstawienie charakterystyki badań i środowisk badawczych w których przeprowadzono eksperymenty

Numer badania	Skrótowa charakterystyka badania
Badanie 0a	Procedura walidacyjna autorskich testów oceniających funkcjonowanie uwagi intensywnej i ekstensywnej (warunki normobaryczne)
Badanie 0b	Badanie mające na celu określenie optymalnej metodologii badawczej: badanie z powtarzaniem pomiaru vs. badanie w schemacie międzygrupowym (warunki normobaryczne)
Badanie 1	Badania pretestowe (warunki normobaryczne)
Badanie 2a i 2b	Badania eksperymentalne w warunkach komory hiperbarycznej (hiperbaria powietrzna, 5 ATA = 40 m ppw)
Badania 3a i 3b	Badania grup kontrolnych (nienarkotyczna hiperbaria helioksova - 20% O <sub>2</sub> i 80% He, 5 ATA = 40 m ppw)
Badanie 4	Badania pretestowe (warunki podwodne, ~30 m ppw = ~4 ATA z użyciem powietrza i ~105 m ppw = ~11,5 ATA z użyciem trimiksu hipoksycznego <sup>33</sup> )
Badanie 5	Badanie eksperymentalne w warunkach podwodnych (30 m ppw = 4 ATA z użyciem powietrza)

Celem eksperymentów wykonanych w środowisku komory hiperbarycznej jest poszerzenie wiedzy na temat specyficznych zmian w funkcjonowaniu poznawczym (obejmującym pamięć długotrwałą, uwagę intensywną i ekstensywną, przeszukiwanie pola percepcyjnego, a także funkcje wykonawcze), zarówno w trakcie ekspozycji powietrznej (w

<sup>33</sup> 10-12% O<sub>2</sub>, reszta: hel i azot (w różnych stężeniach).

trakcie której występuje narkoza azotowa), jak i podczas oddychania nienarkotyczną mieszaniną helowo-tlenową. Podkreślić należy, iż do chwili obecnej tylko w jednym badaniu przeprowadzonym w warunkach hiperbarii helowo-tlenowej zbadano funkcjonowanie jednej czynności poznawczej – pamięci długotrwałej (Fowler i Ackles, 1975). Wpływ ekspozycji hiperbarycznej z użyciem mieszaniny helowo-tlenowej na pozostałe z wymienionych zmiennych nigdy nie zostały zbadane.

Faza eksperymentalna, której celem jest ewaluacja funkcjonowania pamięci długotrwałej w warunkach narkotycznych replikuje pracę Fowlera i Acklesa (1975), a także Tetzlaffa i in. (1998) i kontynuuje badania pamięciowe w warunkach hiperbarii powietrznej i hiperbarii helowo-tlenowej, w oparciu o zoptymalizowaną metodologię badawczą (między innymi badani będą mieli możliwość stosowania optymalnej dla nich strategii pamięciowej i powtórek wewnętrznych). Dysponujemy wstępnymi danymi, które sugerują występowanie zjawiska zniekształceń materiału werbalnego spowodowanego narkozą azotową (Brebeck i in., 2017), co wymaga dalszych badań. Nieznany jest wpływ stresu (występujący w trakcie nurkowań z użyciem mieszaniny helowo-tlenowej), jak i interakcji stres-narkoza (która ma miejsce w trakcie hiperbarycznych ekspozycji powietrznych) na zapamiętywanie słów o określonej walencji emocjonalnej. Wspomniane zagadnienia stanowiły asumpt do przeprowadzenia badań pamięciowych.

Ewaluacja wpływu narkozy azotowej na uwagę intensywną i ekstensywną, a także ocena wystąpienia efektu przetargu szybkość-poprawność (jako mechanizmu kompensacyjnego) ma na celu wypełnienie luki w dotychczasowym stanie wiedzy na ten temat. Część eksperymentalna obejmująca wykonanie baterii testów angażujących przeszukiwanie wzrokowe i funkcje wykonawcze replikuje pracę Brebecka i in. (2017) w innym środowisku badawczym i przy użyciu innych mieszanin oddechowych (powietrze i nienarkotyczna mieszanina helowo-tlenowa, zamiast powietrza i EAN<sup>34</sup>).

Zastosowanie hiperbarii helowo-tlenowej (podczas której nie występuje narkoza azotowa), jako warunków kontrolnych dla powietrznej ekspozycji hiperbarycznej, zapewnia kanon jedynej różnicy (te same warunki - zarówno środowiskowe, jak i psychiczne, jedyną różnicą jest obecność lub brak narkozy). Wspomnieć należy, iż w zaledwie jednym badaniu (oceniającym pamięć długotrwałą) zastosowano mieszaninę helowo-tlenową do pozyskania danych kontrolnych (Fowler i Ackles, 1975). W pozostałych eksperymentach grupa kontrolna

---

<sup>34</sup> Mieszanina oddechowa ze zredukowaną ilością azotu i większą ilością tlenu (w stosunku do powietrza).

była badana w normobarii lub w warunkach nieznacznej hiperbarii (która nie indukowała mierzalnej narkozy). Wynika to z faktu, iż mieszaniny helowo-tlenowe są bardzo drogie i trudno dostępne. Co więcej, bardzo niewielka część płetwonurków posiada uprawnienia do wykonywania nurkowań z użyciem wspomnianego czynnika oddechowego.

Porównanie wyników uzyskanych w środowisku hiperbarii powietrznej i w warunkach hiperbarii helowo-tlenowej ma na celu poznanie izolowanego wpływu narkozy na badane zmienne poznawcze. Włączenie do analizy warunków normobarycznych (w schemacie normobaria vs hiperbaryczne powietrze), ma na celu dyskusję nad metodologią badań nad narkozą azotową i trafnością wniosków z dotychczas przeprowadzonych eksperymentów (pomiędzy środowiskiem normobarycznym, a hiperbarycznym występują znaczne odmienności, a istotne różnice międzygrupowe nie powinny być tłumaczone wyłącznie jednoczynnikowo, przez pryzmat wpływu wyłącznie narkozy azotowej). Porównanie wyników uzyskanych w normobarii i hiperbarii helowo-tlenowej pozwoli oszacować wpływ na poznanie czynników takich jak stres i trudne warunki środowiskowe (między innymi hałas, przebywanie w ciasnej, zamkniętej przestrzeni czy wysoka temperatura otoczenia).

Badanie przeprowadzone pod wodą (z użyciem sprężonego powietrza) jest replikacją eksperymentu Brebecka i in. (2017), którego celem jest optymalizacja metodologii i pozyskanie danych z uwzględnieniem grupy kontrolnej. Co więcej, nie są znane międzyśrodowiskowe różnice w zakresie funkcjonowania poznawczego. W celu zbadania przywołanego zagadnienia, ocenione zostanie przeszukiwanie i działanie funkcji wykonawczych w dwóch warunkach hiperbarycznych, które indukują narkozę azotową – w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych, w trakcie nurkowań z użyciem powietrza.

### **13.2 Schematy badawcze**

Poniżej zamieszczono ogólną charakterystykę schematów badawczych, za wyjątkiem procedury badania walidacyjnego (Badanie 0a) i badania mającego na celu określenie optymalnej metodologii badawczej (badanie z powtarzaniem pomiarem vs. badanie w schemacie międzygrupowym - Badanie 0b), które zostały szczegółowo omówione w Załączniku 27.

### 13.2.1 Badanie 1

Badanie 1 miało charakter pięciu badań pretestowych, które przeprowadzono w warunkach normobarycznych na grupie 69 badanych. Schematy eksperymentalne poszczególnych pretestów zostały przedstawione w poniższej tabeli.

#### Tabela 2

Schematy badawcze zastosowane podczas Badania 1 (cykl normobarycznych badań pretestowych)

Nazwa badania	Liczebność grupy	Schemat badawczy
Pretest 1	$N = 19$	Zapamiętywanie listy słów (lista A) → zadanie dystrakcyjne → przypominanie listy słów (interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut) → wykonanie dwóch testów oceniających funkcje wykonawcze i proces przeszukiwania pola percepcyjnego → zapamiętywanie listy słów (Lista B), zadanie dystrakcyjne → przypominanie listy słów (interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut)
Pretest 2	$N = 19$	Schemat badawczy tożsamy ze schematem Pretestu 1, za wyjątkiem zmiany kolejności zapamiętywanych i przypominanych list słów (zapamiętywanie i przypominanie Listy B, a następnie zapamiętywanie i przypominanie Listy A)
Pretest 3	$N = 11$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi intensywnej (Arkusz 1)
Pretest 4	$N = 11$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi intensywnej (Arkusz 2)
Pretest 5	$N = 9$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi ekstensywnej

### **13.2.2 Badanie 2a i 2b**

Badanie 2 miało charakter dwóch eksperymentów, które będą oznaczane w dalszej części pracy jako Badanie 2a i Badanie 2b. Eksperymenty przeprowadzono w warunkach komory hiperbarycznej na grupie 22 badanych w trakcie sprężeń z użyciem powietrza do ciśnienia 5 ATA (40 m ppw).

Plan badań w warunkach hiperbarii powietrznej opierał się na schemacie: zapamiętywanie-normobaria → sprężanie do ciśnienia 5 ATA → przypominanie-hiperbaria (5 ATA), wykonanie dwóch testów w warunkach nadciśnienia (5 ATA) → zapamiętywanie-hiperbaria (5 ATA) i odpowiednio: dekompresja → przypominanie-normobaria lub częściowa dekompresja → wykonanie testu w warunkach nieznaczonej hiperbarii (2,2 ATA) → dalsza dekompresja i przypominanie słów w warunkach normalnych.

Badania 2a i 2b różniły się od siebie kolejnością list słów do zapamiętania (odpowiednio: Lista A → Lista B lub Lista B → Lista A), testami wykonywanymi w trakcie *plateau* ciśnieniowego (5 ATA: testy oceniające funkcjonowanie uwagi intensywnej i ekstensywnej lub testy oceniające funkcje wykonawcze i proces przeszukiwania pola percepcyjnego), a także obecnością lub brakiem dodatkowego testu oceniającego uwagę ekstensywną w warunkach miernej hiperbarii (2,2 ATA).

### **13.2.3 Badanie 3a i 3b**

Na Badanie 3 składały się dwa eksperymenty, które będą oznaczane w dalszej części pracy jako Badanie 3a i Badanie 3b. Eksperymenty przeprowadzono w warunkach komory hiperbarycznej na grupie 17 badanych w trakcie sprężeń z użyciem mieszaniny helowo-tlenowej (helioks), która nie powoduje narkozy azotowej. Badania zostały przeprowadzone przy tożsamym ciśnieniu otoczenia (5 ATA) i przy tożsamym schemacie badawczym co Badania 2a i 2b.

### **13.2.4 Badanie 4**

Badanie 4 było podwodnym badaniem pretestowym przeprowadzonym na grupie 6 badanych. Celem pretestu była optymalizacja procedury badawczej, tak aby możliwe było przeprowadzenie testów oceniających funkcje wykonawcze i przeszukiwanie pola percepcyjnego w warunkach podwodnych. Badania wykonano pod wodą na dwóch różnych głębokościach: ~30 m ppw (~4 ATA,  $N = 3$ ) i ~105 m ppw (~11,5 ATA,  $N = 3$ ).

### 13.2.5 Badanie 5

Badanie 5 miało charakter badania eksperymentalnego przeprowadzonego na grupie 11 płetwonurków podczas nurkowań na głębokość 30 m ppw (4 ATA), w trakcie których oceniano działanie funkcji wykonawczych i przeszukiwania pola percepcyjnego.

Podsumowując, mając na uwadze chronologię badań, pretesty i eksperymenty przeprowadzono w warunkach normobarycznych (Badanie 0a, 0b i 1), w komorowej hiperbarii powietrznej (Badanie 2a i 2b), w komorowej hiperbarii helioksovej (Badanie 3a i 3b), a także w warunkach podwodnych (Badanie 4 i 5). W normobarii, w „suchej” hiperbarii powietrznej, a także w „suchej” hiperbarii helioksovej wykonano testy oceniające długotrwałą pamięć słów, uwagę intensywną i ekstensywną, a także funkcjonowanie przeszukiwania pola percepcyjnego i działanie funkcji wykonawczych. W warunkach podwodnych przeprowadzono testy oceniające funkcje wykonawcze i przeszukiwanie wzrokowe. Graficzne przedstawienie schematów badań grup pretestowych (Pretest 1 i Pretest 2), profili dekompresyjnych (profilu nurkowań w komorze hiperbarycznej), a także schematów badań komorowych grup eksperymentalnych (Badanie 2a i 2b) i komorowych grup kontrolnych (Badanie 3a i 3b) nałożonych na profil dekompresyjny są zawarte w Załącznikach 28, 29, 30 i 31.

W następnym akapicie zostanie przedstawiona operacjonalizacja mierzonych zmiennych poznawczych, wraz z opisem narzędzi badawczych.

### 13.3 Operacjonalizacja mierzonych zmiennych poznawczych

Opierając się na przedstawionych we wcześniejszych częściach pracy potencjalnych obszarach badań, w trakcie eksperymentów prowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej oceniano funkcjonowanie pamięci długotrwałej (ang. *long-term memory*). Do ewaluacji wspomnianej zmiennej posłużyły listy słów - badana była pamięć słów (ang. *verbal memory*) i pamięć związana z przypominaniem (ang. *recall memory*). Odpamiętywanie materiału miało charakter odroczonego, swobodnego przypominania (ang. *delayed free recall*), bez użycia jakichkolwiek podpowiedzi czy wskazówek (ang. *uncued recall*).

Oceniane były również funkcje wykonawcze (ang. *executive functions*) w ujęciu Miyake i in. (2000): przetrzutność (ang. *shifting*), hamowanie dominującej reakcji (ang. *inhibition*) i odświeżanie informacji w pamięci roboczej (ang. *updating*), a także przeszukiwanie pola wzrokowego (ang. *visual search*). W tym celu użyto polskich adaptacji testów CTT-1 A i CTT-2 A (ang. *Color Trail Test - CTT*, Kolorowy Test Połączeń w wersji A).



Badano również funkcjonowanie uwagi wzorkowej (ang. *visual attention*) w ujęciu uwagi intensywnej i ekstensywnej autorstwa Kolańczyk (1991). Do oceny uwagi intensywnej użyto autorskiego i zwalidowanego Testu Zegarków, który został oparty na Teście Zegarków Marcjusza Moronia. Do ewaluacji uwagi ekstensywnej stworzono autorski Test Liczb Losowych, który został oparty i zwalidowany w oparciu o Test Gwiazdek Czerneckiej i in. (Ross i in., 2011).

Szczegółowy opis narzędzi badawczych zostanie przedstawiony w następnych akapitach.

### **13.4 Pamięć długotrwała - procedura wyboru słów do badania**

Na potrzeby eksperymentu przygotowano dwie listy (Lista A i Lista B) po 30 słów każda, w skład których wchodziło po 10 wyrazów o pozytywnej walencji emocjonalnej, 10 o neutralnej i 10 o negatywnej (por. Załącznik 32, Załącznik 33, Załącznik 34 i Załącznik 35). Listy słów stworzono używając do tego celu *Nencki Affective Word List* (NAWL) (Riegel i in., 2015). Szczegółowy opis opracowywania list zamieszczono w Załączniku 36. Obie listy wydrukowano w pionowej orientacji używając czcionki Times New Roman (rozmiar 30, kolor czarny, interlinia 1,5). Pierwszą literę wszystkich słów zapisano używając wielkiej litery. Słowa umieszczono w dziesięciu rzędach (po trzy słowa w rzędzie), oddzielono przecinkami i wyśrodkowano.

### **13.5 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Kolorowy Test Połączeń - charakterystyka narzędzia**

Kolorowy Test Połączeń (*Color Trail Test* - CTT) jest testem służącym do diagnozy neuropsychologicznej w zakresie uszkodzeń i dysfunkcji mózgu lub do prowadzenia badań naukowych (D'Elia, Satz, Uchiyama i White, 2012). Wspominane narzędzie badawcze doczekało się polskiej normalizacji ( $N = 400$ , wiek: 18-69 lat) (Łojek i Stańczak, 2012) i jest dostępne w dwóch wersjach: CTT-1 A i CTT-2 A. W CTT-1 A liczby nieparzyste znajdują się w różowych kółkach, a parzyste w żółtych. Zadaniem badanego jest jak najszybsze połączenie kółek ponumerowanych od 1 do 25 (zgodnie z rosnącym szeregiem liczbowym). W CTT-2 A każda liczba występuje dwukrotnie - raz w różowym, raz w żółtym kółku. Zadaniem badanego jest także jak najszybsze narysowanie linii łączących ponumerowane kółka, dodatkowo przy uwzględnieniu naprzemienności kolorów. Test jest dwustronny: na pierwszej stronie znajduje się zadanie próbne, na drugiej - zadanie właściwe. Kolory są widziane także przez osoby ze

ślepotą barw - w tym przypadku różowe kółka są postrzegane jako ciemne, a żółte jako jasne. Choć zapewne nie było to intencją autorów, ze względu na użyte kolory, testy mogą być używane do badań w warunkach podwodnych.

Omawiane narzędzia badawcze charakteryzują się wysoką czułością w kontekście wykrywania zaburzeń uwagi i funkcji wykonawczych. Jednocześnie warto zwrócić uwagę, iż testy są mało specyficzne - ocenianych jest jednocześnie wiele zmiennych poznawczych. CTT-1 A bada: utrzymywanie uwagi wzrokowej, przeszukiwanie wzrokowe i zdolności psychomotoryczne (grafomotoryczne). CTT-2 A ocenia te same zmienne co CTT-1 A, jak również: podzielność uwagi (jednoczesne śledzenie ciągu liczbowego i odpowiedniej sekwencji kolorów) i porządkowanie materiału (Lavoie, Thibault i O'Connor, 2007; D'Elia i in., 2012). Łojek i Stańczak (2012) dodają, że CTT-2 A bada także przerzutność uwagi (zmiana charakteru przeszukiwania - z przeszukiwania koloru żółtego na różowy lub odwrotnie, przy zachowaniu rosnącego szeregu cyfr/liczb), sekwencyjne przetwarzanie informacji i zdolność do monitorowania własnego zachowania. Co więcej, podczas wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A badany musi hamować zachowanie polegające na łączeniu ze sobą cyfr, które nie spełniają założenia rosnącego ciągu liczbowego, a w CTT-2 A osoba badana musi dodatkowo hamować łączenie następujących po sobie cyfr/liczb, które nie spełniają kryterium umieszczenia ich w kółkach o odpowiednich kolorach. W trakcie wykonywania CTT-1 A badany musi ciągle odświeżać informacje w pamięci roboczej dotyczące uprzednio zaznaczonej cyfry/liczby, a w CTT-2 A dodatkowo musi także odświeżać informacje dotyczące koloru kółka w którym znajdowała się ostatnia cyfra/liczba. Chociaż nie zostało to wprost ujęte ani w podręczniku do testów, ani w polskiej adaptacji, wydaje się także, iż wspomniane narzędzia badają szybkość reakcji na bodziec (zarówno czas „poznawczy” (ang. *cognitive processing speed*), jak i czas „motoryczny”). W podręczniku do testów i w polskiej adaptacji zawarte są normy czasowe między innymi dla określonych grup wiekowych.

Warto również zwrócić uwagę, iż CTT-1 A ocenia wykonywanie tylko jednego zadania - przeszukiwanie arkusza i wyszukiwanie kolejnej, większej o 1 cyfry/liczby. CTT-2 A sprawdza natomiast wykonywanie zadania podwójnego (wyszukiwanie cyfr/liczb przy zachowaniu rosnącego szeregu i naprzemienne wyszukiwanie koloru żółtego lub różowego). W CTT-1 A przeszukiwanie ma charakter jednocechowy, natomiast w CTT-2 A jest dwucechowe, łączące w sobie koniunkcję i dysjunkcję:  $(p \wedge q) \vee (p \wedge r)$ , gdzie: p - rosnący

szereg cyfrowy, q - cyfra w żółtym kółku, r - cyfra w różowym kółku<sup>35</sup>. Wydaje się, iż CTT nie zawiera bodźców, które byłyby uprzywilejowane poznawczo względem innych (tj. bodźców priorytetowych). Testy składają się z liczb parzystych i nieparzystych, które znajdują się w różowych i żółtych kółkach, badany ma więc do czynienia nieruchomymi bodźcami neutralnymi. Wszystkie obiekty są umiejscowione na jednej płaszczyźnie (brak zróżnicowania na plan bliższy i dalszy), są dwuwymiarowe, nie występuje także symetria w relacji bodziec poszukiwany-bodziec dystrakcyjny, ani jakakolwiek rotacja przestrzenna. Na zakończenie należy dodać, iż bodziec poszukiwany jest podobny do bodźca dystrakcyjnego.

Warto wspomnieć, że istnieje możliwość obliczenia wskaźnika zakłóceń (WZ) zgodnie ze wzorem:

$$WZ = \frac{\text{czas potrzebny na wykonanie CTT-2 A} - \text{czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A}}{\text{czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A}}$$

Wskaźnik zakłóceń informuje o wydłużeniu czasu potrzebnego do wykonania zadania o większym stopniu złożoności poznawczej (CTT-2 A). Jako że CTT-2 A mierzy dodatkowo kilka wspomnianych powyżej zmiennych, WZ może informować o zakłóceniu tych procesów. Przykładowo, WZ = 1 oznacza, że badany potrzebował dwa razy więcej czasu aby wykonać CTT-2 A, w porównaniu do CTT-1 A.

Skrótowy przegląd dotychczas opublikowanych badań z użyciem omawianych narzędzi zawiera Załącznik 37.

W eksperymentach przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy użyto oryginalnych testów CTT-1 A i CTT-2 A w wersji dla dorosłych. Testy zakupiono w Pracowni Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego (ul. Belwederska 6a, Warszawa).

### **13.5.1 Wybór CTT do badania wpływu narkozy azotowej na proces przeszukiwania i działanie funkcji wykonawczych**

Jak już wspomniano, użycie do badań w warunkach komory hiperbarycznej niecertyfikowanego do pracy w nadciśnieniu sprzętu elektronicznego, ze względu na ryzyko zapłonu, pożaru i/lub wybuchu, jest zabronione. W chwili pisania niniejszej rozprawy doktorskiej nie było możliwości zastosowania tabletu, komputera czy okulografu (ang. *eye-tracker*) przystosowanego do pracy w hiperbarii i z tego powodu wybrano test naniesiony na

---

<sup>35</sup> Bardziej precyzyjnie:  $p \wedge [(\sim q \Rightarrow r) \vee (\sim r \Rightarrow q)]$  - rosnący ciąg liczbowy i [[jeśli nie-żółty to różowy) lub (jeśli nie-różowy to żółty)].

arkusz papierowy. Ze względu na obostrzenia czasowe dotyczące przebywania w warunkach hiperbarycznych (im dłuższy czas spędzony przy określonej wartości nadciśnienia, tym dłuższa i bardziej uciążliwa dekompresja) procedura testowa nie mogła być długotrwała. Również z tego powodu, ze względu na prostotę i możliwość szybkiego wykonania wybrano CTT. Przeprowadzenie testu, łącznie z podaniem instrukcji, rozwiązaniem zadania próbnego i wykonaniem zadania głównego zajmuje w normobarii nie więcej niż 5 minut (Łojek i Stańczak, 2012). Warto także zwrócić uwagę, iż CTT jest podobny do Testu Łączenia Cyfr (ang. *Number Connection Test*), którego użył w badaniach podwodnych Brebeck i in. (2017).

### **13.5.2 Modyfikacje CTT na potrzeby eksperymentów w warunkach nadciśnienia**

Autorzy CTT zalecają, aby test rozwiązywać na blacie stołu, jednak ze względu na warunki badawcze (wnętrze komory hiperbarycznej) będzie on wykonywany na twardych podkładach (typu clipboard), które badani będą trzymali na kolanach. W warunkach podwodnych testy zostaną wykonane w trakcie zawisu w toni<sup>36</sup>, na platformie<sup>37</sup> (w pozycji klęczącej lub leżącej) lub przy linie (służącej do zanurzania i wynurzania się; por. Załącznik 38). W celu przeprowadzenia eksperymentu w warunkach podwodnych, oryginalne testy zostaną zalaminowane z użyciem przezroczystej folii. Badani będą umieszczać je na plastikowych, nieprzemakalnych clipboardach, a następnie będą rozwiązywać test przy pomocy specjalnych markerów służących do pisania pod wodą (por. załącznik 39).

Najważniejszą modyfikacją będzie jednak fakt, iż zdecydowano się przeprowadzić test grupowo, podczas gdy autorzy zalecają wykonywanie indywidualne (osoba badana wykonuje test, a osoba nadzorująca na bieżąco sprawdza poprawność jego wykonania). Modyfikacja ta musiała zostać wprowadzona, gdyż zakładając pięciominutowy czas na przeprowadzenie badania dla jednej osoby, dziesięcioosobowa grupa eksperymentalna byłaby badana w warunkach komory hiperbarycznej przez pięćdziesiąt minut (przy 5 ATA), co znacząco i nieakceptowalnie wydłużyłoby i skomplikowało procedurę dekompresji (procedurę „wynurzeniową”). Tak długotrwała dekompresja uniemożliwiłaby przeprowadzenie badania zarówno ze względów logistycznych, jak i finansowych. Rodziłoby się również pytanie, w jaki sposób osoby uczestniczące w eksperymencie, ale nie badane w danej chwili miałyby spędzać czas, aby uniknąć uciążliwej i nużącej monotonii czy narastającego zmęczenia (trudne warunki środowiskowe - między innymi wysoka temperatura otoczenia), które w istotny sposób

---

<sup>36</sup> Zawieszenie w toni polega na utrzymywaniu stałej głębokości zanurzenia (bez przemieszczania się do przodu).

<sup>37</sup> Platforma jest podwodną, płaską konstrukcją używaną między innymi do treningu płetwonurków.

mogłyby wpływać na wykonanie zadania (niekontrolowana zmienna zakłócająca). Jak wspomniano, procedura badawcza musi być krótkotrwała, aby zminimalizować ryzyko przerwania eksperymentu z powodu przyjęcia do ośrodka hiperbarycznego pacjenta wymagającego tlenoterapii hiperbarycznej lub leczenia rekompresyjnego ze wskazań nagłych (na przykład pacjenta zatrutego tlenkiem węgla). Co więcej, badacz obecny w komorze hiperbarycznej również będzie pod wpływem narkozy azotowej, co rodzi uzasadnione pytanie o możliwość trafnej interpretacji wykonania testu przez osobę badaną. Wreszcie - w trakcie eksperymentów z użyciem mieszaniny helowo-tlenowej (helioks), badanie będzie musiało być nadzorowane przez eksperymentatora znajdującego się poza komorą, między innymi z powodu braku uprawnień do wykonywania głębokich nurkowań z użyciem wspomnianej mieszaniny oddechowej. Z tego powodu liczba błędów i czas wykonania CTT-1 A i CTT-2 A będzie oceniana *post-factum*, w trakcie sprawdzania arkuszy testowych i oglądania filmów z eksperymentów. Badania będą nagrywane kamerą, która stanowi wyposażenie komory hiperbarycznej (Badanie 2a i 2b), telefonem komórkowym przez pomocnika eksperymentatora przebywającego na zewnątrz komory (Badanie 3a i 3b), a także kamerą przystosowaną do nagrywania w warunkach podwodnych (kamera Go Pro z osłoną, GoPro, Inc., USA) (Badanie 4 i 5). W warunkach podwodnych, w zależności od licznych zmiennych, badania będą przeprowadzone w schemacie 1:1, 2:1, 2:2 i 3:1, gdzie pierwsza cyfra oznacza liczbę badanych, a druga - liczbę instruktorów nurkowych/eksperymentatorów. Do osób wszystkich osób uczestniczących w eksperymentach, niezależnie od warunków środowiskowych, zostanie skierowana prośba o wykonanie wyraźnego, umówionego wcześniej gestu natychmiast po zakończeniu wykonywania testu.

### **13.5.3 CTT-1 A i CTT-2 A - charakterystyka błędów**

Charakterystykę błędów, które badani będą mogli popełnić w trakcie rozwiązywania testów zawiera poniższa tabela.

### Tabela 3

Charakterystyka możliwych do popełnienia błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A

Nazwa błędu	Opis błędu
CTT-1 A prawie błąd	Inicjalizacja połączenia pomiędzy niewłaściwymi kółkami, z następowym połączeniem z właściwym kółkiem
CTT-2 A prawie błąd	Jak wyżej (por. Załącznik 40)
CTT-1 A błąd poprawiony	Połączenie niewłaściwych kólek (np. 1 z 3), które zostało zauważone i poprawione (por. Załącznik 41)
CTT-1 A błąd niepoprawiony	Połączenie niewłaściwych kólek (np. 1 z 3), które nie zostało zauważone i poprawione
CTT-2 A błąd kolejności poprawiony	Połączenie dwóch kólek przy niezachowaniu rosnącego ciągu liczbowego, które zostało zauważone i poprawione
CTT-2 A błąd kolejności niepoprawiony	Połączenie dwóch kólek przy niezachowaniu rosnącego ciągu liczbowego, które nie zostało zauważone i poprawione
CTT-2 A błąd koloru poprawiony	Połączenie dwóch kólek o niewłaściwych kolorach (np. połączenie żółtego kółka z cyfrą 3 z żółtym kółkiem z cyfrą 4 pomimo, iż powinno nastąpić połączenie z różowym kółkiem z cyfrą 4), które zostało zauważone i poprawione (por. Załącznik 42)

CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony

Połączenie dwóch kólek o niewłaściwych kolorach (np. połączenie żółtego kółka z cyfrą 3 z żółtym kółkiem z cyfrą 4 pomimo, iż powinno nastąpić połączenie z różowym kółkiem z cyfrą 4), które nie zostało zauważone i poprawione (por. Załącznik 43)

---

Warto dodać, iż wykonanie testów całkowicie niezgodnie z instrukcją spowoduje brak włączenia danego wyniku do analizy.

### **13.6 Test Zegarków - charakterystyka narzędzia**

W celu oceny wpływu narkozy azotowej na funkcjonowanie uwagi intensywnej (Kolańczyk, 1991), przygotowano autorską modyfikację Testu Zegarków autorstwa Marcjusza Moronia. Oryginalny test bada szybkość przetwarzania bodźców, liczbę prawidłowych detekcji, liczbę fałszywych detekcji, a także liczbę ominięć (liczbę niezauważonych bodźców sygnałowych). Wspominane narzędzie badawcze wydaje się być dobrą miarą przeszukiwania pola percepcyjnego w intensywnym trybie przetwarzania (Ross i in., 2011). Autorska modyfikacja Testu Zegarków na potrzeby badania polegała na opracowaniu arkusza A4 z 200 tarczami zegarowymi, które zostały uszeregowane w 20 rzędów zawierających po 10 tarcz. Tarcze zegarowe (pokazujące pełne godziny) zostały umieszczone na arkuszu w sposób losowy, przy użyciu generatora liczb losowych (stworzono dwa zbiory liczb, każdy składający się z 200 elementów). Przygotowano dwa arkusze testowe, w których bodźcami wyszukiwanymi przez badanych będą: godzina 5.00 (Arkusz 1) i godzina 7.00 (Arkusz 2). Arkusz 1 i Arkusz 2 zostały umieszczone w Załączniku 44. Więcej informacji na temat procedury przygotowania testu zamieszczono w Załączniku 45.

Podobnie jak w przypadku oryginalnego testu, zadaniem osoby badanej jest przeszukiwać arkusz testowy od lewej do prawej strony i od pierwszego do ostatniego rzędu w poszukiwaniu tarczy zegarowej wskazanej przez badacza (z koniecznością jej zaznaczenia). Czas na wykonywanie zadania został skrócony do jednej minuty. Po upływie wspomnianego czasu, osoba badana (na sygnał eksperymentatora) ma za zadanie zaznaczyć ostatnią analizowaną przez siebie tarczę. Istotnym jest podkreślenie, iż wybór narzędzia badawczego był nieprzypadkowy - płetwonurek w trakcie nurkowania w warunkach podwodnych

monitoruje wskazania analogowej tarczy manometru w celu wychwycenia konkretnych wartości, które są związane z ustalonym planem nurkowym (np. zawraca do brzegu lub łodzi przy 100 bar, rozpoczyna wynurzanie przy 50 bar itd.). W przypadku nurkowań technicznych (tj. bardzo głębokich, długotrwałych i skomplikowanych logistycznie nurkowań z użyciem wielu butli i różnych mieszanin oddechowych) płetwonurek musi monitorować wskazania nawet kilku manometrów.

Modyfikacje oryginalnego Testu Zegarków Marcjusza Moronia były niezbędne w celu umożliwienia ich wykonania w trakcie jednonumutowego przystanku dekompresyjnego (2,2 ATA). Niemniej, ostatecznie zrezygnowano z przeprowadzenia badania w trakcie przerwy w wynurzaniu (na głębokości odpowiadającej 2,2 ATA) ze względu na fakt, iż wykonanie w krótkim odstępie czasowym Arkusza 1 (5 ATA) i Arkusza 2 (2,2 ATA) uaktywnia proces automatyzacji, który istotnie wpływa na wykonanie drugiego testu (por. Załącznik 27).

### **13.7 Test Liczb Losowych - charakterystyka narzędzia**

W celu oceny wpływu narkozy azotowej na uwagę ekstensywną (Kolańczyk, 1991), opracowano Test Liczb Losowych. Narzędzie badawcze zostało oparte na Teście Gwiazdek autorstwa Czerneckiej i in. (Ross i in., 2011). Na arkusz A4 naniesiono zbiór 928 cyfr stworzonych przez generator liczb losowych (cyfry 0-9, przy stałym prawdopodobieństwie wystąpienia danej cyfry), a następnie losowo usunięto 75% z nich. Zadaniem badanego będzie w ciągu dwudziestu sekund zaznaczyć jak najwięcej cyfr „9”, rozpoczynając przeszukiwanie od ikony „START” (znajdującej się na środku arkusza). Badani będą informowani, iż czasu na wykonanie zadania jest niewiele, a także będzie się ich zachęcać do „globalnego” i „całościowego” przeszukiwania arkusza, co będzie miało na celu aktywizację przeszukiwania w trybie ekstensywnym. Test Liczb Losowych został opracowany z uwagi na fakt, iż Test Gwiazdek nie spełnił pokładanych w nim oczekiwań (por. Załącznik 27). Grafikę przedstawiającą Test Liczb Losowych umieszczono w Załączniku 46. Jak już wspomniano, autorskie adaptacje testów zostały poddane procedurom walidacyjnym, których szczegółowy opis zamieszczono w Załączniku 27.



## 14 Badanie 1 - badania pretestowe

### 14.1 Cel badania

Celem badania była ocena możliwości wykonania baterii testów w warunkach normobarycznych w schemacie: zapamiętywanie listy słów (75 sekund) → przypominanie (75 sekund; interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut) → wykonanie dwóch arkuszy testowych (CTT-1 A i CTT-2 A) → zapamiętywanie drugiej listy słów (75 sekund) → przypominanie (75 sekund; interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut). Ze względu na nieprzekraczalne limity czasowe dotyczące pobytu w warunkach 5 ATA (maksymalnie 10 minut, por. dalsza część tekstu) zaistniała konieczność ewaluacji możliwości przeprowadzenia planowanego schematu badawczego (w szczególności od fazy przypominania materiału, przez wykonanie CTT-1 A i CTT-2 A, aż do fazy zapamiętywania kolejnej listy słów, które będą miały miejsce w warunkach hiperbarycznych). Warto zwrócić uwagę, iż wspomniany okres czasu powinien uwzględniać zarówno czas jaki badani potrzebują na wykonanie testów, jak i czas który jest wymagany do wydobycia testów z kopert, wysłuchania instrukcji przypominających, zabezpieczenia wyników w kopertach i zmiany arkuszy testowych. Nie mniej istotne jest również pozostawienie pewnego marginesu bezpieczeństwa na rozwiązanie potencjalnych problemów, które mogą wyniknąć w trakcie realizacji planu badawczego podczas pobytu w warunkach 5 ATA.

Poza oceną możliwości przeprowadzenia badania w zakładanym schemacie, koncepcja badania pretestowego zakładała trening (automatyzację) i optymalizację wykonywania procedury badawczej przez eksperymentatora, wraz z jednoczesnym pomiarem czasu zarówno kolejnych faz schematu badawczego, jak i czasu całego badania przy użyciu dwóch stoperów mechanicznych. Trening ten był kluczowy ze względu na fakt, iż eksperymentator będzie znajdował się w komorze hiperbarycznej podczas badań w warunkach hiperbarii powietrznej (narażenie na narkozę azotową<sup>38</sup>).

Celem badania było również pozyskanie wyników, które posłużyły do oceny potencjalnych różnic dotyczących parametrów wykonania dwóch arkuszy testowych autorskiej wersji Testu

---

<sup>38</sup> W tym miejscu warto ponownie przywołać eksperyment, który przeprowadził Poulton et al. (1964). Badacze wykazali, że narkoza azotowa upośledzała wykonywanie czynności psychomotorycznych tylko wtedy, gdy były one wykonywane po raz pierwszy w hiperbarii. Dzięki wcześniejszemu treningowi w warunkach normobarycznych, ekspozycja na 3,5 ATA (co odpowiada głębokości 25 m ppw) nie wpływała na efektywność wykonania zadania.

Zegarków (Arkusz 1 vs. Arkusz 2; por. Załącznik 27 i 45), jak również uzyskanie wyników, które następnie zostaną porównane z wynikami grup hiperbaryczno-powietrznych (Badanie 2a i 2b), celem określenia wstępnej charakterystyki wpływu narkozy azotowej na badane zmienne poznawcze.

## **14.2 Osoby badane**

Na etapie fazy badań pretestowych nie znano dokładnych charakterystyk grup, które będą badane w nadciśnieniu i z tego powodu przeprowadzono wywiad środowiskowy dotyczący zależności pomiędzy wiekiem i odpowiednim doświadczeniem nurkowym (które będzie stanowiło jedno z kryteriów włączenia badanych do hiperbarycznych grup eksperymentalnych). Osoby badane dobierano do grup pretestowych dbając, tak dalece jak to możliwe, aby charakterystyka zmiennych takich jak wiek, płeć i wykształcenie była zbliżona do potencjalnych, przyszłych grup eksperymentalnych. Doświadczenie nurkowe nie było czynnikiem, które warunkowało włączenie badanego do fazy pretestowej (badanych rekrutowano niezależnie od tego czy są płetwonurkami czy nie).

Do Badania 1 zrekrutowano łącznie 69 badanych. Charakterystykę poszczególnych grup pretestowych przedstawia poniższa tabela.

**Tabela 4**

Charakterystyka grup pretestowych

Nazwa fazy badawczej (pretestowej)	Liczba badanych	Płeć badanych	Wiek badanych	Wykształcenie badanych
Pretest 1	$N = 19$	11 mężczyzn i 8 kobiet	18-38 lat; $M = 30,68$ , $SD = 4,8$	16 badanych: wyższe wykształcenie, 2: średnie, 1: podstawowe
Pretest 2	$N = 19$	11 mężczyzn i 8 kobiet	24-40 lat; $M = 32,52$ , $SD = 4,74$	16 badanych: wyższe wykształcenie, 3: średnie
Pretest 3	$N = 11$	8 mężczyzn i 3 kobiety	30-51 lat; $M = 36,9$ , $SD = 6,34$	11 badanych: wyższe wykształcenie
Pretest 4	$N = 11$	7 mężczyzn i 4 kobiety	28-42 lata; $M = 33,72$ , $SD = 5,08$	11 badanych: wyższe wykształcenie
Pretest 5	$N = 9$	7 mężczyzn i 2 kobiety	25-47 lat; $M = 37,11$ , $SD = 7,8$	9 badanych: wyższe wykształcenie

Dwóch badanych (Pretest 1 i 2) było z wykształcenia psychologami (niepracującymi w zawodzie), a pięciu - studentami psychologii, jednakże żaden z nich nie był wcześniej zaznajomiony ze specyfiką testów CTT-1 A i CTT-2 A. Dla wszystkich osób badanych język polski był językiem ojczystym. Ewaluacja badanych pod kątem braku przeciwwskazań do wykonywania testów obejmowała wypełnienie ankiety kwalifikacyjnej (por. Załącznik 47).

### 14.3 Plan badawczy

Charakterystyka schematów badawczych grup pretestowych została przedstawiona w poniższej tabeli.

**Tabela 5**

Schematy badań pretestowych

Nazwa fazy badawczej (pretestowej)	Liczba badanych	Schemat badawczy
Pretest 1	$N = 19$	Zapamiętywanie listy słów (lista A) → zadanie dystrakcyjne*, przypominanie listy słów (interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut) → wykonanie dwóch testów oceniających funkcje wykonawcze i proces przeszukiwania pola percepcyjnego (CTT-1 A i CTT-2 A) → zapamiętywanie listy słów (Lista B), zadanie dystrakcyjne* → przypominanie listy słów (interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 minut)
Pretest 2	$N = 19$	Schemat badawczy tożsamy ze schematem Pretestu 1, za wyjątkiem zmiany kolejności zapamiętywanych i przypominanych list słów (zapamiętywanie i przypominanie Listy B, a następnie zapamiętywanie i przypominanie Listy A)
Pretest 3	$N = 11$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi intensywnej (Test Zegarków Arkusz 1)
Pretest 4	$N = 11$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi intensywnej (Test Zegarków Arkusz 2)
Pretest 5	$N = 9$	Wykonanie testu oceniającego funkcjonowanie uwagi ekstensywnej (Test Liczb Losowych)

\*Jako zadanie dystrakcyjne pomiędzy zapamiętywaniem i przypominaniem materiału (Pretest 1 i 2) wybrano grę komputerową, która angażowała proste funkcje psychomotoryczne (*Space Invaders*; <http://www.pacxon4u.com/space-invaders/>).

Graficzne przedstawienie schematu badawczego Pretestu 1 i Pretestu 2 zostało zamieszczone w Załączniku 28.

#### **14.4 Procedura badawcza**

Przed rozpoczęciem badań przewidzianych dla Pretestu 1 i Pretestu 2 została przeprowadzona prelekcja dotycząca schematu badawczego. Badani z grup pretestowych 3-5 zostali przed wykonaniem testów poinformowani o sposobie ich wykonania. Pretest 1 i Pretest 2 przeprowadzono w salach komputerowych należących do Uniwersytetu SWPS, a badania z Pretestów 3, 4 i 5 wykonano w miejscach dogodnych dla osób badanych.

Osoby biorące udział w pretestach zostały poproszone, aby clipboardy (w które były wpięte testy) były trzymane na kolanach, podobnie jak będzie to miało miejsce w grupach eksperymentalnych badanych w komorze hiperbarycznej (Badania 2a, 2b, 3a i 3b). Zarówno testy, jak i listy słów do zapamiętania umieszczono w opisanych, papierowych kopertach formatu C4. W kopertach z listami słów umieszczono także po jednej kartce formatu A4, która posłużyła do zapisu słów w trakcie fazy przypominania. Aby zminimalizować różnice pomiędzy fazą zapamiętywania a przypominania, słowa prezentowane w fazie zapamiętywania wydrukowano na arkuszu A4 przy użyciu czarnej czcionki, a w fazie przypominania badani zapisywali słowa używając czarnego długopisu (niwelacja efektu pamięci zależnej od kontekstu).

Za zgodą osób badanych, pomocnik eksperymentatora nagrywał Pretest 1 i Pretest 2 telefonem komórkowym, gdyż, jak już wspomniano, czas wykonania testów CTT-1 A i CTT-2 A, a także liczbę błędów zdecydowano się mierzyć oraz liczyć *post-factum*. Do osób badanych skierowano prośbę o podniesienie ręki natychmiast po zakończeniu wykonywania testu. Pomiaru czasu trwania poszczególnych faz, jak i całego badania dokonywano przy użyciu dwóch stoperów mechanicznych, podobnie jak w grupach eksperymentalnych badanych w warunkach komory hiperbarycznej.

#### **14.5 Analizy statystyczne**

Celem oceny różnic międzygrupowych wykonano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Analizy statystyczne opracowano w programie IBM SPSS Statistics (IBM Corporation, USA).

## 14.6 Wyniki

Charakterystykę parametrów wykonania testów pamięciowych zamieszczono w poniższych tabelach.

**Tabela 6**

Charakterystyka zapamiętanych słów z Listy A

Badana zmienna (Lista A)	<i>M</i>	<i>M</i>
	Pretest 1	Pretest 2
Liczba zapamiętanych słów	9,89 (3,58)	7,52 (2,73)
Liczba zapamiętanych słów o pozytywnej walencji emocjonalnej	4,15 (1,46)	3,52 (1,46)
Liczba zapamiętanych słów o neutralnej walencji emocjonalnej	2,84 (1,57)	2,21 (1,18)
Liczba zapamiętanych słów o negatywnej walencji emocjonalnej	2,89 (1,69)	1,78 (1,35)
Liczba błędnie odpamiętanych słów*	1,47 (1,42)	1,36 (1,3)

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Liczba słów, które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania

Mając na uwadze Listę A, grupy badane w ramach Pretestu 1 i Pretestu 2 różniły się od siebie istotnie w zakresie ogólnej liczby zapamiętanych słów (bez względu na walencję emocjonalną; [ $F(1, 36) = 5,23; p < ,05$ ]). Stwierdzono również istotne międzygrupowe różnice w liczbie odpamiętanych słów negatywnych ([ $F(1, 36) = 4,91; p < ,05$ ]). Nie stwierdzono z kolei istotnych międzygrupowych różnic w liczbie odpamiętanych słów pozytywnych ([ $F(1, 36) = 1,76; p > ,05$ ]) i neutralnych ([ $F(1, 36) = 1,95; p > ,05$ ]), ani w liczbie słów które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania ([ $F(1, 36) = 0,05; p > ,05$ ]).

**Tabela 7**

Charakterystyka zapamiętanych słów z Listy B

Badana zmienna (Lista B)	<i>M</i>	<i>M</i>
	Pretest 1	Pretest 2
Liczba zapamiętanych słów	8,73 (3,21)	8,47 (3,18)
Liczba zapamiętanych słów o pozytywnej walencji emocjonalnej	2,21 (1,27)	2,36 (1,21)
Liczba zapamiętanych słów o neutralnej walencji emocjonalnej	2,78 (1,81)	2,26 (1,55)
Liczba zapamiętanych słów o negatywnej walencji emocjonalnej	3,73 (1,72)	3,84 (1,83)
Liczba błędnie odpamiętanych słów	2,36 (1,6)	1,42 (1,21)

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

Nie stwierdzono istotnych międzygrupowych różnic w ogólnej liczbie zapamiętanych słów z Listy B [ $F(1, 36) = 0,06; p > ,05$ ]. Grupy nie różniły się również istotnie pod kątem odpamiętanych słów pozytywnych [ $F(1, 36) = 0,15; p > ,05$ ], neutralnych [ $F(1, 36) = 0,92; p > ,05$ ] i negatywnych [ $F(1, 36) = 0,03; p > ,05$ ]. Grupy pretestowe różniły się z kolei liczbą odpamiętanych słów, które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania [ $F(1, 36) = 4,2; p < ,05$ ].

Badani wykonujący CTT-1 A i CTT-2 A w ramach Pretestu 1 i 2 ( $N = 38$ ) potrzebowali średnio 36,94 sekund ( $SD = 15,61$ ) na rozwiązanie CTT-1 A i średnio 70,13 sekund ( $SD = 17,13$ ) na ukończenie CTT-2 A. W poniższej tabeli przedstawiono charakterystykę błędów, które zostały popełnione w trakcie wykonywania wspomnianych testów.

**Tabela 8**

Charakterystyka błędów popełnionych w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A przez grupę normobaryczną (Pretest 1 + Pretest 2,  $N = 38$ )

Typ błędu	Liczba błędów
CTT-1 A prawie błąd	1
CTT-2 A prawie błąd	1
CTT-1 A błąd poprawiony	1
CTT-1 A błąd niepoprawiony	0
CTT-2 A błąd kolejności poprawiony	0
CTT-2 A błąd kolejności niepoprawiony	1
CTT-2 A błąd koloru poprawiony	4
CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony	4
Niewykonanie CTT-1 A	0
Niewykonanie CTT-2 A	0
CTT-1 A całkowita niezgodność z instrukcją wykonania testu	0
CTT-2 A całkowita niezgodność z instrukcją wykonania testu	0

Charakterystykę parametrów wykonania Testu Zegarków Arkusz 1 i 2 (Pretest 3: Arkusz 1;  $N = 11$  + Pretest 4: Arkusz 2;  $N = 11$ ) zamieszczono w poniższej tabeli.



**Tabela 9**

Wyniki testów oceniających uwagę intensywną

Typ testu	Parametr wykonania	<i>M</i>
Test Zegarków Arkusz 1	Liczba poprawnych detekcji	15,45 (2,62)
Test Zegarków Arkusz 1	Liczba ominięć	2,27 (1,1)
Test Zegarków Arkusz 1	Liczba fałszywych detekcji	0,18 (0,4)
Test Zegarków Arkusz 1	Liczba przeanalizowanych bodźców	165,63 (27,48)
Test Zegarków Arkusz 2	Liczba poprawnych detekcji	13,45 (2,25)
Test Zegarków Arkusz 2	Liczba ominięć	1,9 (1,75)
Test Zegarków Arkusz 2	Liczba fałszywych detekcji	0,09 (0,3)
Test Zegarków Arkusz 2	Liczba przeanalizowanych bodźców	150,9 (39,15)

---

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

Badani wykonujący Test Liczb Losowych (Pretest 5,  $N = 9$ ) zaznaczyli poprawnie średnio 16,33 cyfr ( $SD = 3,39$ ), pomijając średnio 8,66 bodźców ( $SD = 3,39$ ). Nie wystąpiła ani jedna fałszywa detekcja.

## 14.7 Wnioski z Badania 1

Jak już wspomniano, ze względu na nieprzekraczalny czas, który można spędzić przy docelowym ciśnieniu otoczenia (5 ATA → 10 minut) istniała konieczność ewaluacji czy plan eksperymentalny jest możliwy do bezpiecznej i całościowej realizacji. Przeprowadzenie Pretestu 1 i 2, a następnie analiza materiału filmowego z badań potwierdziła, iż część schematu eksperymentalnego, który polegał na przypominaniu materiału, wykonaniu testów CTT-1 A i CTT-2 A, a następnie zapamiętywaniu kolejnej listy słów, wraz odpowiednim marginesem czasu niezbędnym do wydobywania testów z kopert, wysłuchania instrukcji przypominających, zabezpieczenia wyników w kopertach i zmiany arkuszy testowych, jest możliwa do zrealizowania w czasie 10 minut. Złożoność badania, wraz z koniecznością precyzyjnej oceny czasu zarówno całego eksperymentu, jak i jego poszczególnych faz, przy jednoczesnym ryzyku istotnego wpływu narkozy azotowej na osobę badacza wymuszała trening (automatyzację) przeprowadzania eksperymentu. Wielokrotne nadzorowanie przebiegu badań pretestowych (Pretest 1 i 2), wraz z równoczesnym monitorowaniem wspomnianych czasów przy użyciu dwóch stoperów mechanicznych pozwoliło na wypracowanie i utrwalenie optymalnego sposobu testowania (np. przekazywania instrukcji testowych w odpowiedni i wystandaryzowany sposób). Co równie istotne, pozyskano wyniki, które pozwoliły na ocenę wykonania dwóch arkuszy autorskiego Testu Zegarków (por. Załącznik 27 i Załącznik 45). Uzyskano także dane, które zostaną porównane z wynikami grup hiperbaryczno-powietrznych (Badanie 2a i 2b), celem określenia wstępnej charakterystyki wpływu narkozy azotowej na badane zmienne poznawcze.

## **15 Badanie 2a i 2b - badania eksperymentalne w warunkach komory hiperbarycznej**

### **15.1 Cel badania**

Celem Badania 2a i 2b było poszerzenie wiedzy na temat specyficznych zmian w funkcjonowaniu poznawczym (obejmującym takie zmienne jak: pamięć długotrwała, uwaga intensywna i ekstensywna w ujęciu Kolańczyk (1991), przeszukiwanie pola percepcyjnego i funkcje wykonawcze) w warunkach hiperbarii powietrznej (5 ATA) indukowanej w komorze hiperbarycznej. Jak już wspomniano, wyniki uzyskane w trakcie ekspozycji na hiperbaryczne powietrze zostaną porównane z wynikami uzyskanymi w normobarii (Badanie 1 - cykl badań pretestowych), celem określenia wstępnej charakterystyki wpływu narkozy azotowej na badane funkcje poznawcze.

Badania pamięciowe, oparte na zmodyfikowanym (zredukowanym) schemacie badawczym Tetzlaffa i in. (1998) kontynuowały ocenę funkcjonowania pamięci długotrwałej w warunkach komorowej hiperbarii powietrznej. W trakcie eksperymentu przeprowadzonego przez wspomnianych badaczy, osoby badane zapamiętywały i przypominały słowa w następujących konfiguracjach: zapamiętywanie i przypomnianie w warunkach miernej hiperbarii (1,5 ATA) → zapamiętywanie w warunkach 1,5 ATA i przypomnianie na głębokości (6 ATA = 50 m ppw) → zapamiętywanie i przypomnianie na głębokości (6 ATA), a także zapamiętywanie na głębokości (6 ATA) → przypomnianie w warunkach miernej hiperbarii (1,5 ATA). Ze względu na stopień złożoności procedury badawczej, nie można wykluczyć wpływu interferencji proaktywnej na zapamiętywanie słów w kolejnych fazach eksperymentu i z tego powodu zdecydowano o zbadaniu pamięci długotrwałej (pamięci słów) w schemacie: zapamiętywanie na powierzchni → przypomnianie na głębokości (5 ATA = 40 m ppw) → zapamiętywanie na głębokości (5 ATA) → przypomnianie na powierzchni. Zredukowanie schematu badawczego Tetzlaffa i in. (1998) wynikało również z konieczności ograniczenia czasu pobytu w warunkach 5 ATA. Warto ponownie wspomnieć, iż im dłuższy czas spędzony w nadciśnieniu, tym dłuższa i bardziej uciążliwa procedura dekompresyjna.

Badanie pamięciowe przeprowadzone na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej miało na celu także udoskonalenie metodologii badawczej użytej w trakcie cytowanego eksperymentu. W badaniu Tetzlaffa i in. (1998) eksperymentator prezentował badanym słowa przez okres czterech sekund. Wspominany sposób prezentacji materiału nie pozwala na zastosowanie przez badanych optymalnych dla nich strategii pamięciowych. Zapamiętywanie kolejnych słów prezentowanych przez określony czas jest sytuacją, która nie odpowiada

zarówno absolutnej większości zadań pamięciowych występujących w codziennym życiu, jak również nie odpowiada realnym warunkom używania pamięci w nadciśnieniu, co sprawia, że cytowane badanie charakteryzuje się umiarkowaną trafnością ekologiczną.

Celem badania było również oszacowanie dolnej granicy ciśnienia parcjalnego azotu ( $ppN_2$ ), które upośledza przypominanie i zapamiętywanie materiału warunkach nadciśnienia, a także próba oceny występowania zjawiska zniekształceń pamięciowych spowodowanych narkozą azotową. Zbadany został również wpływ narkozy na charakterystykę odpamiętanego materiału, pod kątem jego walencji emocjonalnej.

Badania dotyczące uwagi intensywnej i ekstensywnej są nowatorskie - wypełniają lukę w dotychczasowym stanie wiedzy na ten temat. Testy oceniające przeszukiwanie pola percepcyjnego i działanie funkcji wykonawczych kontynuują pionierskie prace Brebecka i in. (2017) i Steinberga i Doppelmayra (2017), mając na celu odpowiednio: porównanie uzyskanych wyników (przeszukiwanie pola percepcyjnego) z grupą kontrolną i zbadanie działania funkcji wykonawczych w warunkach hiperbarii powietrznej przy wyższym ciśnieniu otoczenia (5 ATA).

W dotychczas opublikowanym piśmiennictwie dotyczącym narkozy azotowej nie analizowano wpływu efektu przetargu szybkość-poprawność (ang. *speed-accuracy trade off*) na charakter wykonania testów. Hobbs i in. (2014) wykazali, iż płetwonurkowie mogą stosować różne techniki mające na celu poznawczą kompensację wpływu narkozy azotowej. Nie jest jednak jasne czy osoby będące pod wpływem narkozy mogą np. kompensacyjnie spowalniać wykonanie testu w celu zniwelowania zaburzonego funkcjonowania procesu przeszukiwania (większa poprawność kosztem mniejszej szybkości). Wpływ efektu szybkość-poprawność będzie analizowany przy użyciu baterii testów oceniających uwagę intensywną i przeszukiwanie pola percepcyjnego.

## 15.2 Hipotezy badawcze

Celem bardziej klarownego przedstawienia hipotez badawczych, grupy zapamiętujące w normobarii i przypominające materiał w warunkach hiperbarycznych (5 ATA) będą oznaczane jako „NH”, a grupy zapamiętujące w hiperbarii (5 ATA) i przypominające słowa w warunkach normalnych jako „HN”.

Zamierzeniem niniejszych eksperymentów będzie weryfikacja następujących hipotez badawczych:

**H<sub>1</sub>** Liczba odpamiętanych słów w warunkach hiperbarycznych (5 ATA), które zostały zapamiętane w warunkach normalnych (1 ATA), w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej nie będzie istotnie różna.

**H<sub>2</sub>** Liczba odpamiętanych słów w warunkach normalnych (1 ATA), które zostały zapamiętane w warunkach hiperbarycznych (5 ATA), w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej będzie istotnie mniejsza.

**H<sub>3</sub>** Liczba błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania) w grupie eksperymentalnej NH będzie istotnie większa, niż w normobarycznej grupie kontrolnej.

**H<sub>4</sub>** Liczba błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania) w grupie eksperymentalnej HN będzie istotnie większa, niż w normobarycznej grupie kontrolnej.

**H<sub>5</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej NH będą pamiętali mniej słów neutralnych, a więcej słów nacechowanych emocjonalnie (negatywnych i pozytywnych), w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej.

**H<sub>6</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej HN będą pamiętali mniej słów neutralnych, a więcej słów nacechowanych emocjonalnie (negatywnych i pozytywnych), w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej.

**H<sub>7</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej będą wykonywali Test Zegarków (w warunkach 5 ATA) istotnie wolniej w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej (badani wiedząc, że są pod wpływem narkozy azotowej będą kompensacyjnie spowalniać wykonywanie testu, aby w ten sposób zniwelować zaburzone funkcjonowanie uwagi).

**H<sub>8</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej (w warunkach 5 ATA) będą popełniali mniej błędów polegających na ominięciu bodźca sygnałowego w trakcie wykonywania Testu Zegarków, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej (wolniejsze, kompensacyjne wykonywanie testu).

**H<sub>9</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej (w warunkach 5 ATA) zaznaczą istotnie mniej bodźców sygnałowych w trakcie wykonywania Testu Liczb Losowych, niż badani z normobarycznej grupy kontrolnej.

**H<sub>10</sub>** Parametry wykonania Testu Liczb Losowych przez badanych z grupy eksperymentalnej w trakcie dekompresji (w trakcie przystanku dekompresyjnego przy ciśnieniu 2,2 ATA) nie będzie istotnie różne od wykonania testu przez normobaryczną grupę kontrolną.

**H<sub>11</sub>** Czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A i CTT-2 A przez grupę eksperymentalną (w warunkach 5 ATA) będzie istotnie dłuższy, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej (badani wiedząc, że są pod wpływem narkozy azotowej będą kompensacyjnie spowalniać wykonywanie testu, aby w ten sposób zniwelować zaburzone przeszukiwanie pola percepcyjnego).

**H<sub>12</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej (w warunkach 5 ATA) będą popełniali mniej błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej (wolniejsze, kompensacyjne rozwiązywanie testu).

### 15.3 Osoby badane

Na potrzeby eksperymentu zostali zrekrutowani doświadczeni płetwonurkowie ( $N = 22$ ). Do badania włączono 21 płetwonurków rekreacyjnych (niezawodowych) i jednego płetwonurka zawodowego (instruktor nurkowania). Jeden badany (płetwonurek rekreacyjny), posiadał doświadczenie obejmujące „suche” ekspozycje w komorze (lekarz pracujący w ośrodku hiperbarycznym; szacunkowa liczba sprężeń: ~60).

Osoby badane podzielono w sposób losowy na dwie równoliczne grupy ( $N = 11$ ), co było związane z dopuszczalną liczbą osób, które może pomieścić używana w trakcie eksperymentu dwunastomiejscowa komora hiperbaryczna (jedno miejsce przeznaczono dla eksperymentatora). Do Badania 2a włączono 9 mężczyzn i 2 kobiety w wieku 26-43 lat ( $M = 35,27$ ,  $SD = 5,53$ ), z szacunkową liczbą nurkowań podwodnych od 4 do 400 ( $M = 142,18$ ,  $SD = 143,05$ ), a do Badania 2b 9 mężczyzn i 2 kobiety, w wieku 30-44 lat ( $M = 36,9$ ,  $SD = 3,93$ ), z szacunkową liczbą nurkowań podwodnych od 40 do 1000 ( $M = 222,72$ ,  $SD = 294,34$ ). Wszyscy badani mieli wyższe wykształcenie, za wyjątkiem jednego (Badanie 2a, wykształcenie średnie). Żaden z badanych nie był psychologiem lub studentem psychologii. Dla wszystkich uczestników eksperymentu język polski był językiem ojczystym. Dla poszczególnych planowanych porównań wykonano analizy czułości uwzględniające wielkość próby. Do obliczeń wykorzystano program G\*Power 3.1, przyjmując próg mocy 80% ( $1 - \beta = 0,80$ ) i  $\alpha = 0,05$ . Krytyczne wartości siły efektu prezentuje Tabela 10.

Z badania wyłączono osoby z istotną przeszłością chorobową, ze szczególną dbałością o wykluczenie osób, które chorowały lub chorują, przyjmują leki lub przeszli zabiegi operacyjne, które stanowią przeciwwskazania względnie i bezwzględnie do przebywania w warunkach hiperbarycznych. Procedurę rekrutacji badanych pod kątem odpowiedniego stanu zdrowia (dla wszystkich hiperbarycznych badań pretestowych i eksperymentalnych) opisano w Załączniku 48.

#### **15.4 Plan badawczy**

Plan badań w warunkach hiperbarii powietrznej opierał się na schemacie: zapamiętywanie-normobaria → przypominanie-hiperbaria → wykonanie dwóch testów w warunkach nadciśnienia → zapamiętywanie-hiperbaria i odpowiednio: przypominanie-normobaria lub wykonanie testu w warunkach nieznaczej hiperbarii, a następnie przypominanie słów w warunkach normalnych.

Badania 2a i 2b różniły się od siebie kolejnością list słów do zapamiętania (odpowiednio: Lista A → Lista B lub Lista B → Lista A), testami wykonywanymi w warunkach 5 ATA (Test Zegarków Arkusz 1 i Test Liczb Losowych lub CTT-1 A i CTT-2 A), a także obecnością lub brakiem dodatkowego testu w warunkach miernej hiperbarii (2,2 ATA).

##### **15.4.1 Badanie 2a - schemat badawczy**

Zapamiętywanie listy słów (Lista A) (normobaria) → presuryzacja do 5 ATA → przypominanie listy słów (5 ATA, interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 min) → wykonanie testu oceniającego uwagę intensywną (Test Zegarków, Arkusz 1) i ekstensywną (Test Liczb Losowych) (5 ATA) → zapamiętanie listy słów (Lista B) (5 ATA) → dekompresja, przypominanie listy słów (normobaria, interwał zapamiętywanie-przypominanie: 11:40 min). Zarówno w Badania 2a i 2b wszystkie fazy zapamiętywania/przypominania słów trwały 75 sekund.

##### **15.4.2 Badanie 2b - schemat badawczy**

Zapamiętywanie listy słów (Lista B) (normobaria) → presuryzacja do 5 ATA → przypominanie listy słów (5 ATA, interwał zapamiętywanie-przypominanie: 8 min) → wykonanie dwóch testów oceniających funkcje wykonawcze i proces przeszukiwania pola percepcyjnego (CTT-1 A i CTT-2 A) (5 ATA) → zapamiętanie listy słów (Lista A) (5 ATA) → dekompresja → wykonanie testu oceniającego uwagę ekstensywną (Test Liczb Losowych,

2,2 ATA, w trakcie przystanku dekompresyjnego) → dalsza dekompresja → przypominanie listy słów (normobaria, interwał zapamiętywanie-przypominanie: 11:40 min).

Schematy badawcze nałożone na profil dekompresyjny zostały umieszczone w Załącznikach 30 i 31.

### 15.5 Procedura badawcza

Wszystkie testy umieszczono w opisanych, papierowych kopertach formatu C4. W kopertach z listami słów umieszczono także po jednej kartce formatu A4, która posłużyła do zapisywania słów w trakcie procedury przypominania. Aby zminimalizować różnice pomiędzy fazą zapamiętywania i przypominania (niwelacja efektu pamięci zależnej od kontekstu), słowa, które były prezentowane badanym w fazie zapamiętywania wydrukowano na arkuszu formatu A4 przy użyciu czarnej czcionki, a w czasie przypominania badani zapisywali słowa używając czarnego długopisu. Na potrzeby badania przygotowano również zapasowe koperty z testami i zapasowe długopisy, które mogły zostać podane badanym przez małą służbę techniczną, bez konieczności przerywania ekspozycji hiperbarycznej (bez konieczności redukcji ciśnienia). Zdjęcie poglądowe ukazujące wyposażenie badawcze zamieszczono w Załączniku 49.

Badanie przeprowadzono w sobotę i niedzielę w godzinach popołudniowych, mając na uwadze fakt, iż planowe sprężenia terapeutyczne w komorze hiperbarycznej należącej do Mazowieckiego Centrum Terapii Hiperbarycznej (MCTH) kończą się w tych dniach o godzinie 13.30. Charakterystykę komory hiperbarycznej zamieszczono w Załączniku 50. Eksperymenty przeprowadzono w maju ze względu na niewielkie ryzyko przerwania badania z powodu konieczności przyjęcia pacjenta zatrutego tlenkiem węgla, który wymagałby natychmiastowego sprężenia w komorze<sup>39</sup>.

W dniu badania wszyscy uczestnicy zostali przebadani przez lekarza dyżurnego komory hiperbarycznej, celem podjęcia ostatecznej decyzji, czy dana osoba może być poddana ekspozycji na nadciśnienie. Przed rozpoczęciem eksperymentalnego sprężenia została przeprowadzona prelekcja dotycząca zasad bezpieczeństwa w komorze, a także różnych sposobów wyrównywania ciśnienia w uchu środkowym w trakcie kompresji<sup>40</sup>. Osobom

---

<sup>39</sup> Największa liczba pacjentów wymagających tlenoterapii hiperbarycznej z powodu zatrucia tlenkiem węgla występuje w czasie tzw. sezonu grzewczego. Z analizy przeprowadzonej przez autora i kierownika MCTH na potrzeby jednej z publikacji wynika, iż najczęściej pacjentów w omawianym stanie zagrożenia życia jest przyjmowanych w okresie od listopada do kwietnia (analiza danych z lat 2013-2014) (Janus i Piechocki, 2016).

<sup>40</sup> W trakcie dekompresji (depresuryzacji) ciśnienie w uchu środkowym wyrównuje się samoczynnie (nie są potrzebne żadne czynności).



badanym został także przedstawiony szczegółowy plan eksperymentalny. Badanie zabezpieczał medycznie lekarz dyżurny komory, a w ośrodku hiperbarycznym była obecna także pielęgniarka anestezyjologiczna, która miała możliwość (za pomocą śluzy) szybkiego wejścia do komory i udzielenia pomocy w przypadku wystąpienia jakiegokolwiek incydentu w trakcie pobytu w nadciśnieniu. Sprężenie przeprowadzał certyfikowany operator komory.

Wszystkie etapy eksperymentu odbywały się w komorze hiperbarycznej<sup>41</sup>, a przed wykonaniem każdego zadania upewniano się czy badani zrozumieli polecenia eksperymentatora. Zadaniem dystrakcyjnym pomiędzy fazami zapamiętywania i przypominania była obserwacja i analiza wskaźnika pokazującego ciśnienie i temperaturę w komorze, a w trakcie kompresji - badani musieli także regularnie wyrównywać ciśnienie w uchu środkowym<sup>42</sup>. Aby zredukować ryzyko interferencji proaktywnej pomiędzy zapamiętywaniem i przypominaniem kolejnej listy słów, osoby biorące udział w eksperymencie wykonywały w warunkach 5 ATA Test Zegarków Arkusz 1 i Test Liczb Losowych (Badanie 2a) lub CTT-1 A i CTT-2 A (Badanie 2b).

Pomiaru czasu trwania poszczególnych etapów badania, jak i całego eksperymentu dokonywano przez badacza przy użyciu dwóch stoperów mechanicznych, a także poprzez system monitorowania parametrów sprężenia przez operatora komory i lekarza dyżurnego ośrodka hiperbarycznego (procedura *cross-check* - wzajemne, „krzyżowe” sprawdzenie). Jak już wspomniano, czas i liczbę błędów popełnionych w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A zdecydowano się mierzyć/liczyć *post-factum*. Eksperyment nagrywano kamerą certyfikowaną do pracy w warunkach nadciśnienia, a do osób badanych skierowano prośbę o podniesienie ręki natychmiast po zakończeniu rozwiązywania wspomnianych testów. Zdjęcie przedstawiające warunki panujące w trakcie badania zostało zamieszczone w Załączniku 51.

Po zrealizowaniu planu badawczego, uczestników eksperymentu poinformowano, iż w przypadku wystąpienia jakichkolwiek dolegliwości zdrowotnych, które mogą mieć związek z ekspozycją hiperbaryczną, należy natychmiast poszukiwać pomocy medycznej. Przypomniano także o czasowej konieczności powstrzymania się od uprawiania intensywnego wysiłku fizycznego i korzystania z sauny, a także o zakazie spożywania alkoholu i niemożności oddawania krwi (odwodnienie stanowi ryzyko choroby dekompresyjnej). Zarówno w trakcie,

---

<sup>41</sup> Niwelacja efektu pamięci zależnej od kontekstu.

<sup>42</sup> Wydaje się, że wykonanie dodatkowego zadania dystrakcyjnego, które miałyby na celu zapobieganie stosowania powtórek wewnętrznych mogłoby odwieść uwagę badanych od wyrównywania ciśnienia w uchu środkowym. Walory metodologiczne w postaci dodatkowego zadania w trakcie sprężania i rozprężania wydają się być mniej ważne niż bezpieczeństwo i komfort badanych.

jak i po eksperymencie nie wystąpiły jakiegokolwiek powikłania związane z ekspozycją na nadciśnienie.

Na eksperymenty w warunkach komory hiperbarycznej wyraziła zgodę Komisja ds. Etyki Badań Naukowych (Opinia 18/2018).

### **15.6 Profil dekompresyjny (profil nurkowania)**

Plan sprężenia (tożsamy dla Badania 2a i 2b) opracowano przy użyciu modelu dekompresyjnego ZHL16-C + GF (Multideco 4.14, HHS Software Corp, Kanada) dla dekompresyjnego nurkowania powietrznego, przy *gradient factor* 40/85. Profil nurkowania został ustalony na optymalnie 6, a maksymalnie na 7 minut sprężania (kompresji/presuryzacji) do ciśnienia 5 ATA i maksymalnie 10 minut pobytu w warunkach 5 ATA. Początek rozprężania (dekompresji/depresuryzacji), ze stałą prędkością 10 metrów/minutę, został ustalony na maksymalnie 17 minutę ekspozycji hiperbarycznej (7 minut kompresji + 10 minut *plateau* ciśnieniowego = 17 minut). Rozprężanie (trwające 11 minut i 40 sekund, aż do osiągnięcia warunków normobarycznych) zostało przeprowadzone z pięcioma przystankami dekompresyjnymi (ang. *decompression stops*). Wynurzenie (zmniejszanie ciśnienia otoczenia) zajęło 4 minuty i 10 sekund (2 min 30 s + 20 s + 20 s + 20 s + 20 s + 20 s), a przystanki dekompresyjne (przerwy w wynurzaniu) trwały łącznie 7 minut i 30 sekund (30 s + 1 min + 1 min + 1 min + 4 min). Profil dekompresyjny („wynurzeniowy”) został przedstawiony w formie tabeli w Załączniku 52, a plan (wykres) ekspozycji hiperbarycznej przedstawia Załącznik 29. Przygotowano również profile alternatywne w przypadku wydłużenia presuryzacji, na przykład z powodu trudności z wyrównaniem ciśnienia w uchu środkowym przez badanego/badanych i/lub wydłużenia czasu pobytu w warunkach 5 ATA. Przedstawienie wszystkich przygotowanych profili dekompresyjnych (wydłużenie sprężenia i/lub wydłużenie czasu pobytu w warunkach 5 ATA, dekompresja przy dodatkowym oddychaniu 100% tlenem) istotnie wykracza poza możliwość przedstawienia ich w niniejszej pracy.

Aby zrównać interwał zapamiętywanie-przypominanie w warunkach normobarycznych (8 minut) i interwał zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria w trakcie Badań 2a i 2b (zakładając, zgodnie z profilem nurkowania, presuryzację do ciśnienia 5 ATA w czasie 6 minut) pomiędzy fazą zapamiętywania w normobarii, a początkiem sprężenia wykonano kontrolę bezpieczeństwa (wykonano test łączności, sprawdzono po raz kolejny zawartość kieszeni badanych, upewniono się, że każdy został wyposażony w wodę i gumę do żucia, a

także przypomniano sposoby wyrównywania ciśnienia w uchu środkowym). Omawiane czynności zajęły 2 minuty.

### **15.7 Analizy statystyczne**

Analizy statystyczne (jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) w celu oceny różnic międzygrupowych: Badanie 1 (cykl normobarycznych badań pretestowych) vs. Badanie 2a i 2b) wykonano w programie IBM SPSS Statistics (IBM Corporation, USA).

### **15.8 Wyniki**

Wyniki uzyskane w trakcie powietrznych ekspozycji hiperbarycznych (Badanie 2a i 2b) porównano z grupami pretestowymi, celem wstępnego określenia wpływu narkozy azotowej na funkcjonowanie poznawcze. Poniższa tabela podsumowuje charakterystykę porównywanych grup kontrolnych (warunki normobaryczne: Badanie 1 - cykl badań pretestowych) i eksperymentalnych (warunki hiperbarii powietrznej: Badanie 2a i 2b).

**Tabela 10**

Charakterystyki porównywanych grup kontrolnych (warunki normobaryczne) i eksperymentalnych (warunki hiperbarii powietrznej)

Badana zmienna	Grupa kontrolna	Grupa eksperymentalna	Siła efektu
Pamięć - Lista A: zapamiętywanie-przypominanie, a następnie Lista B: zapamiętywanie-przypominanie	Pretest 1 (normobaria; $N = 19$ ; 11 mężczyzn i 8 kobiet; wiek: $M = 30,68$ , $SD = 4,8^*$ ; 16 badanych: wyższe wykształcenie, 2: średnie, 1: podstawowe)	Badanie 2a (hiperbaria powietrzna, 5 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 35,27$ , $SD = 5,53^*$ ; 10 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie)	$f = 0,53$
Pamięć - Lista B: zapamiętywanie-przypominanie, a następnie Lista A: zapamiętywanie-przypominanie	Pretest 2 (normobaria; $N = 19$ ; 11 mężczyzn i 8 kobiet; wiek: $M = 32,52$ , $SD = 4,74^{**}$ ; 16 badanych: wyższe wykształcenie, 3: średnie)	Badanie 2b (hiperbaria powietrzna, 5 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 3,93^{**}$ ; 11 badanych: wyższe wykształcenie)	$f = 0,53$
Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - CTT-1 A i CTT-2 A	Pretest 1 + 2 (normobaria; $N = 38$ ; 22 mężczyzn i 16 kobiet; wiek: $M = 31,6$ , $SD = 4,8^{***}$ ; 32 badanych: wyższe wykształcenie, 5: średnie, 1: podstawowe)	Badanie 2b (hiperbaria powietrzna 5 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 3,93^{***}$ ; 11 badanych: wyższe wykształcenie)	$f = 0,41$

Uwaga intensywna - Test Zegarków Arkusz 1	Pretest 3 (normobaria; $N = 11$ ; 8 mężczyzn i 3 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 6,34$ ; 11 badanych: wyższe wykształcenie)	Badanie 2a (hiperbaria powietrzna, 5 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 35,27$ , $SD = 5,53$ ; 10 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie)	$f = 0,63$
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	Pretest 5 (normobaria; $N = 9$ ; 7 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 37,11$ , $SD = 7,8$ ; 9 badanych: wyższe wykształcenie)	Badanie 2a (hiperbaria powietrzna, 5 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 35,27$ , $SD = 5,53$ ; 10 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie)	$f = 0,66$
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	Pretest 5 (normobaria; $N = 9$ ; 7 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 37,11$ , $SD = 7,8$ ; 9 badanych: wyższe wykształcenie)	Badanie 2b (hiperbaria powietrzna, 2,2 ATA; $N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 3,93$ ; 11 badanych: wyższe wykształcenie)	$f = 0,66$

\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 28) = 5,68; p < ,05]$ )

\*\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 28) = 6,69; p < ,05]$ )

\*\*\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 47) = 11,18; p < ,05]$ )

Krytyczna wartość siły efektu  $f$  obliczonej przy założeniu wartości  $\alpha = 0,05$  i  $1-\beta = 0,8$

Grupy pretestowe wykonujące Test Zegarków Arkusz 1 (Pretest 3) i Test Liczb Losowych (Pretest 5) nie różniły się istotnie pod względem wieku od grup badanych w warunkach komorowej hiperbarii powietrznej (Pretest 3 vs. Badanie 2a [ $F(1, 20) = 0,41; p > ,05$ ]; Pretest 5 vs. Badanie 2a [ $F(1, 18) = 0,38; p > ,05$ ]; Pretest 5 vs. Badanie 2b [ $F(1, 18) = 0; p > ,05$ ]).

### 15.8.1 Normobaria (pamięć - Pretest 1) vs. hiperbaryczne powietrzne (pamięć - Badanie 2a)

W porównaniu do grupy zapamiętującej i przypominającej materiał w normobarii (Pretest 1), wykazano istotne zaburzenie sekwencji zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria ( $[F(1, 28) = 7,02; p < ,05; f = 0,48]$ ), jak i zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria ( $[F(1, 28) = 8,52; p < ,05; f = 0,55]$ ).

**Tabela 11**

Wyniki testów oceniających pamięć długotrwałą

Typ testu	M (liczba słów)		p
	C*	Ex**	
Lista A: zapamiętywanie-przypominanie	9,89 (3,58)	6,36 (3,38)	< ,05
Lista B: zapamiętywanie-przypominanie	8,73 (3,21)	5,45 (2,46)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 19$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Grupa badana w normobarii i grupa badana w komorze hiperbarycznej nie różniły się istotnie pod względem liczby błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały na liście słów do zapamiętania; Lista A ( $[F(1, 28) = 0,76; p > ,05; f = 0,15]$ ), Lista B ( $[F(1, 28) = 0,02; p > ,05; f = 0,02]$ ).

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A) grupa normobaryczna (Pretest 1) i hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria) różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 28) = 5,75; p < ,05; f = 0,44]$ ), jednakże nie różniły się istotnie pod kątem liczby słów pozytywnych ( $[F(1, 28) = 2,72; p > ,05; f = 0,29]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 28) = 3,8; p > ,05; f = 0,36]$ ).

**Tabela 12**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	4,15 (1,46)	3,18 (1,72)	n.i.
Słowa neutralne	2,84 (1,57)	1,45 (1,43)	< ,05
Słowa negatywne	2,89 (1,69)	1,72 (1,34)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa normobaryczna (*N* = 19)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria; *N* = 11)

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B) grupa normobaryczna (Pretest 1) i hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria) różniła się istotnie pod względem liczby odpamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 28) = 7,59; p < ,05; f = 0,52]$ ), jednakże nie różniła się istotnie pod kątem liczby odpamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 28) = 1,8; p > ,05; f = 0,24]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 28) = 2,12; p > ,05; f = 0,27]$ ).

**Tabela 13**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	2,21 (1,27)	1,54 (1,36)	n.i.
Słowa neutralne	2,78 (1,81)	1,09 (1,22)	< ,05
Słowa negatywne	3,73 (1,72)	2,81 (1,53)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa normobaryczna (*N* = 19)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria; *N* = 11)

Graficzne przedstawienie przywoływanych wyników zawiera Załącznik 53.



### 15.8.2 Normobaria (pamięć - Pretest 2) vs. hiperbaryczne powietrzne (pamięć - Badanie 2b)

W porównaniu do grupy zapamiętującej i przypominającej materiał w normobarii (Pretest 2), sekwencja zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria nie była zaburzona ( $[F(1, 28) = 3,59; p > ,05; f = 0,36]$ ). Stwierdzono istotnie gorsze przypominanie słów w warunkach normobarycznych, które zostały zapamiętane w hiperbarii ( $[F(1, 28) = 11,13; p < ,05; f = 0,63]$ ).

**Tabela 14**

Wyniki testów oceniających pamięć długotrwałą

Typ testu	M (liczba słów)		
	C*	Ex**	p
Lista B: zapamiętywanie-przypominanie	8,47 (3,18)	6,45 (1,96)	n.i.
Lista A: zapamiętywanie-przypominanie	7,52 (2,73)	4,36 (2,01)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 19$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Grupa badana w normobarii i grupa badana w komorze hiperbarycznej nie różniły się istotnie pod względem liczby błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały na liście słów do zapamiętania; Lista B ( $[F(1, 28) = 0; p > ,05; f = 0,009]$ ), Lista A ( $[F(1, 28) = 1,28; p > ,05; f = 0,2]$ ).

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B) grupa normobaryczna (Pretest 2) i hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria) nie różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 28) = 2,99; p > ,05; f = 0,32]$ ), neutralnych ( $[F(1, 28) = 0,08; p > ,05; f = 0,05]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 28) = 3,08; p > ,05; f = 0,33]$ ).

**Tabela 15**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	2,36 (1,21)	1,63 (0,92)	n.i.
Słowa neutralne	2,26 (1,55)	2,09 (1,64)	n.i.
Słowa negatywne	3,84 (1,83)	2,72 (1,34)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 19$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria;  $N = 11$ )

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A) grupa normobaryczna (Pretest 2) i hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria) różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 28) = 10,52; p < ,05; f = 0,65]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 28) = 9,17; p < ,05; f = 0,59]$ ), nie różniły się natomiast istotnie pod kątem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 28) = 2,18; p > ,05; f = 0,27]$ ).

**Tabela 16**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	3,52 (1,46)	2,72 (1,34)	n.i.
Słowa neutralne	2,21 (1,18)	1 (0,44)	< ,05
Słowa negatywne	1,78 (1,35)	0,45 (0,68)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa normobaryczna (*N* = 19)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria; *N* = 11)

Graficzne przedstawienie przywoływanych wyników zawiera Załącznik 54.

### 15.8.3 Normobaria (uwaga intensywna - Pretest 3) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga intensywna - Badanie 2a)

W porównaniu do grupy normobarycznej (Pretest 3) nie wykazano istotnych różnic w wykonywaniu Testu Zegarków (Arkusz 1) w warunkach 5 ATA (liczba prawidłowych detekcji [ $F(1, 20) = 1,55; p > ,05; f = 0,26$ ], liczba ominięć [ $F(1, 20) = 0,52; p > ,05; f = 0,15$ ], liczba fałszywych detekcji [ $F(1, 20) = 2,22; p > ,05; f = 0,31$ ], liczba przeanalizowanych bodźców [ $F(1, 20) = 0; p > ,05; f = 0,006$ ]).

**Tabela 17**

Wyniki testu oceniającego uwagę intensywną (Test Zegarków Arkusz 1)

Parametr	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1)	15,45	14,09	n.i.
Liczba poprawnych detekcji	(2,62)	(2,5)	
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1)	2,27	3,09	n.i.
Liczba ominięć	(1,1)	(3,59)	
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1)	0,18	0	n.i.
Liczba fałszywych detekcji	(0,4)	(0)	
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1)	165,63	165,18	n.i.
Liczba przeanalizowanych bodźców	(27,48)	(37,4)	

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 11$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

**15.8.4 Normobaria (uwaga ekstensywna - Pretest 5) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga ekstensywna - Badanie 2a)**

W porównaniu do grupy normobarycznej (Pretest 5) nie wykazano istotnych różnic w wykonywaniu Testu Liczb Losowych w warunkach 5 ATA (liczba poprawnych detekcji [ $F(1, 18) = 0; p > ,05; f = 0,009$ ], liczba ominięć [ $F(1, 18) = 0; p > ,05; f = 0,009$ ]).

**Tabela 18**

Wyniki testu oceniającego uwagę ekstensywną (Test Liczb Losowych)

Parametr	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	16,33	16,27	n.i.
Liczba poprawnych detekcji	(3,39)	(3,06)	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	8,66	8,72	n.i.
Liczba ominięć	(3,39)	(3,06)	

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 9$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

### 15.8.5 Normobaria (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Pretest 1 + Pretest 2) vs. hiperbaryczne powietrzne (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Badanie 2b)

Nie zaobserwowano istotnych różnic czasowych pomiędzy wykonaniem CTT-1 A i CTT-2 A w warunkach normobarycznych (Pretest 1 + Pretest 2,  $N = 38$ ) i w warunkach 5 ATA (odpowiednio [ $F(1, 46) = 0; p > ,05; f = 0,001$ ] i [ $F(1, 46) = 3,52; p > ,05; f = 0,23$ ]). Wskaźnik zakłóceń nie był istotnie różny w obu grupach [ $F(1, 45) = 1,01; p > ,05; f = 0,14$ ]).

**Tabela 19**

Czas wykonania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	<i>M</i> (czas wykonania)		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Czas wykonania CTT-1 A	36,94 s (15,61)	36,9 s (13,35)	n.i.
Czas wykonania CTT-2 A	70,13 s (17,13)	83,2 s (27,43)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 38$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Badani przebywający w środowisku hiperbarii powietrznej (5 ATA), w porównaniu do warunków normobarycznych, popełnili istotnie więcej błędów: CTT-1 A prawie błąd ([ $F(1, 47) = 12,96; p < ,05; f = 0,38$ ]), CTT-2 A prawie błąd ([ $F(1, 46) = 4,26; p < ,05; f = 0,24$ ]) i CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony ([ $F(1, 46) = 9,33; p < ,05; f = 0,39$ ]). Liczba pozostałych, możliwych do popełnienia błędów była międzygrupowo nieistotnie różna: CTT-1 A błąd poprawiony ([ $F(1, 47) = 0,88; p > ,05; f = 0,12$ ]), CTT-1 A błąd niepoprawiony ([ $F(1, 47) = 3,64; p > ,05; f = 0,17$ ]), CTT-2 A błąd kolejności niepoprawiony ([ $F(1, 46) = 0,25; p > ,05; f = 0,08$ ]), CTT-2 A błąd koloru poprawiony ([ $F(1, 46) = 0,63; p > ,05; f = 0,11$ ]). W żadnej z porównywanych grup nie wystąpił poprawiony błąd kolejności w trakcie wykonywania CTT-2 A. Jeden badany z grupy komorowej nie wykonał CTT-1 A, a jeden z badanych (także z grupy komorowej) wykonał CTT-2 A niezgodnie z instrukcją (połączył kółka o jednakowym kolorze, zachowując rosnący ciąg liczbowy).

**Tabela 20**

Liczba istotnie różnych międzygrupowo błędów popełnionych w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	Liczba błędów		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Liczba prawie błędów CTT-1 A	1	4	< ,05
Liczba prawie błędów CTT-2 A	1	2	< ,05
Liczba niepoprawionych błędów koloru CTT-2 A	4	5	< ,05

\*Grupa normobaryczna ( $N = 38$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Graficzne przedstawienie przywoływanych wyników zamieszczono w Załączniku 55.

### 15.8.6 Normobaria (uwaga ekstensywna - Pretest 5) vs. hiperbaryczne powietrzne (uwaga ekstensywna - Badanie 2b)

W warunkach 2,2 ATA (w trakcie przystanku dekompresyjnego) wykonanie Testu Liczb Losowych nie różniło się istotnie od wykonania testu w normobarii (Pretest 5) (liczba poprawnych detekcji ( $[F(1, 18) = 0,31; p > ,05; f = 0,12]$ ), liczba ominięć ( $[F(1, 18) = 0,31; p > ,05; f = 0,12]$ ). W żadnej grupie nie wystąpiła fałszywa detekcja.

**Tabela 21**

Wyniki testu oceniającego uwagę ekstensywną (Test Liczb Losowych)

Typ testu	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	16,33	15,63	n.i.
Liczba poprawnych detekcji	(3,39)	(2,11)	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych	8,66	9,36	n.i.
Liczba ominięć	(3,39)	(2,11)	

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 9$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (2,2 ATA;  $N = 11$ )



## **15.9 Interpretacja wyników i dyskusja**

Celem testów pamięciowych przeprowadzonych na potrzeby Badania 2a i 2b była próba oszacowania dolnej granicy ciśnienia parcjalnego azotu ( $ppN_2$ ), które upośledza przypominanie i zapamiętywanie materiału warunkach nadciśnienia (w sekwencji zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria, a także zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria). Kolejne pytania badawcze dotyczyły występowania zjawiska zniekształceń pamięciowych spowodowanych narkozą azotową, jak również wpływu narkozy na zapamiętywanie i przypominanie słów o określonej walencji emocjonalnej.

### **15.9.1 Pamięć długotrwała**

#### **15.9.1.1 Liczba odpamiętanych słów**

W porównaniu do grupy kontrolnej, która była badana wyłącznie w warunkach ciśnienia atmosferycznego, osoby biorące udział w Badaniu 2a istotnie gorzej odpamiętywały słowa w warunkach nadciśnienia (5 ATA), które zostały zapamiętane w środowisku normobarycznym. Badani z omawianej grupy eksperymentalnej odpamiętali również istotnie mniej materiału w normobarii, który został zapamiętany w warunkach hiperbarycznych (5 ATA). W Badaniu 2b, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej, odpamiętywanie słów w nadciśnieniu (5 ATA), które zostały zapamiętane w normobarii nie było istotnie upośledzone. Uczestnicy eksperymentu, którzy zapamiętywali materiał w hiperbarii (5 ATA), a następnie odpamiętywali go po dekompresji (w normobarii) przypominali sobie istotnie mniej słów.

W Badaniu 2a nie potwierdzono pierwszej hipotezy badawczej o braku zaburzenia sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria. Hipoteza ta została jednak potwierdzona w trakcie Badania 2b. Do chwili obecnej tylko w jednym eksperymencie (Fowler i Ackles, 1975) wykazano upośledzenie odpamiętywania materiału werbalnego w warunkach narkozy, który został zapamiętany w normobarii. Warto jednakże zwrócić uwagę, iż w cytowanym badaniu ciśnienie otoczenia w trakcie fazy przypominania wynosiło 10 ATA (90 m ppw), co znacznie przekracza aktualnie obowiązujący, dopuszczalny limit głębokościowy dla nurkowań powietrznych. Co więcej, grupa badawcza była bardzo niejednorodna pod kątem doświadczenia obejmującego „suche” ekspozycje hiperbaryczne. Tetzlaff i in. (1998) prowadził swoje badanie przy docelowym ciśnieniu otoczenia wynoszącym 6 ATA, nie wykazując, aby przypominanie słów w warunkach hiperbarycznych, które zostały zapamiętane w miernej hiperbarii (1,5 ATA) było upośledzone. Należy jednak podkreślić, iż uczestnikami

badania Tetzlaffa i in. (1998) byli pracownicy komory hiperbarycznej, doskonale zaznajomieni z warunkami „suchych” ekspozycji hiperbarycznych. W trakcie Badania 2a i 2b uczestnikami eksperymentu były osoby nieposiadające uprzedniej praktyki obejmującej przebywania w warunkach komorowej hiperbarii (za wyjątkiem jednego badanego, szacunkowa liczba sprężeń w komorze: ~60). Brak doświadczenia (nieznane warunki środowiskowe) mógł wpływać na większy poziom stresu u badanych (por. Fowler i Ackles, 1975), co w konsekwencji mogło doprowadzić do zaburzenia sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria (pomimo ciśnienia mniejszego o 1 ATA, w porównaniu do badania Tetzlaffa i in. (1998)). Wzmoczona stymulacja adrenergiczna mogła być także związana z samym działaniem wysokiego ciśnienia otoczenia na ciało badanych. Lund i in. (1999), a także Tikkinen i in. (2011) wykazali, że największy poziom kortyzolu stwierdza się na początku komorowej ekspozycji hiperbarycznej, który następnie istotnie obniża się po osiągnięciu docelowego ciśnienia otoczenia. Zjawisko to, szczególnie w grupie niedoświadczonych pętlwonurków, może być odpowiedzialne za podatność sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria na zaburzenia. Uzyskane dane stanowią kolejny dowód, iż w warunkach hiperbarycznych występują pozanarkotyczne czynniki upośledzające funkcjonowanie. Hipoteza ta jest spójna z konkluzjami jakie wysnuli Biersner i Cameron (1970), Fowler i Ackles (1975) a także Philp i in. (1989). Aby badać izolowany wpływ narkozy azotowej na czynności pamięciowe, należy wyniki kontrolne uzyskiwać w warunkach hiperbarii helowo-tlenowej (zachowując przy tym kanon jedynej różnicy).

W eksperymencie Tetzlaffa i in. (1998) osoby badane miały możliwość wcześniejszego przećwiczenia sekwencji zapamiętywanie-przypominanie w warunkach miernej hiperbarii (1,5 ATA). Co więcej, cytowani autorzy uwzględnili w planie badawczym jednonminutową adaptację do warunków nadciśnienia (fazę przypominania rozpoczęto po minucie od uzyskania docelowego ciśnienia otoczenia). W eksperymencie przeprowadzonym na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej przypominanie (bez uprzedniego treningu) rozpoczynało się natychmiast po presuryzacji do 5 ATA. Omawiane różnice metodologiczne również mogły wpływać na odmienności w uzyskanych wynikach. Szczegółowe porównanie metodologii badania Tetzlaffa i in. (1998), a także badania własnego przedstawiono w Załączniku 56.

Zaburzenie sekwencji zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria, zarówno w Badaniu 2a, jak i 2b, jest spójne z wynikami jakie uzyskali Philp i in. (1989), a także Tetzlaff i in. (1998). Potwierdzono zatem drugą hipotezę badawczą. Warto ponownie wspomnieć, iż Philp i in. (1989) stwierdził zaburzenie funkcjonowania pamięci długotrwałej

podczas zapamiętywania materiału w warunkach 4,6 ATA. Pomijając różnice metodologiczne, w chwili obecnej dysponujemy danymi wskazującymi, iż zapamiętywanie materiału w warunkach nadciśnienia indukowanego w komorze jest upośledzone w trakcie oddychania powietrzem przy ciśnieniu 6 ATA (Tetzlaff i in., 1998), 5 ATA (badania własne) i 4,6 ATA (Philp i in., 1989). Dolna, orientacyjna granica zaburzenia kodowania w trakcie ekspozycji na hiperbaryczne powietrze w warunkach komory hiperbarycznej pozostaje wciąż nieznana.

Podsumowując, w odniesieniu do normobarycznej grupy kontrolnej, w trakcie jednego eksperymentalnego nurkowania stwierdzono, iż sekwencja zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria (5 ATA) jest upośledzona. Z drugiej strony, w trakcie kolejnej ekspozycji hiperbarycznej nie stwierdzono istotnego wpływu narkozy azotowej na przypominanie materiału w warunkach nadciśnienia, który został zapamiętany w warunkach normalnych. Oznacza to, iż ciśnienie otoczenia rzędu około 5 ATA ( $ppN_2 = \sim 3,9$  ATA) może być wartością, przy której następuje upośledzenie odtwarzania materiału, który został zapamiętany w normobarii. Wydaje się zatem, iż dolna granica ciśnienia parcjalnego azotu, które zaburza przypominanie materiału nie przyjmuje jednej, stałej i konkretnej wartości. W tym miejscu można wysunąć hipotezę, iż na zaburzenie sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria należy patrzeć pod kątem prawdopodobieństwa wystąpienia. Bardziej prawdopodobne będzie, iż płetwonurek odpamięta w danych warunkach hiperbarycznych (a więc - przy konkretnym  $ppN_2$ ) mniej materiału, im mniejsze doświadczenie nurkowe posiada i im większy stres odczuwa. Po raz kolejny należy zatem podkreślić, iż na procesy pamięciowe w warunkach hiperbarycznych wpływają liczne czynniki, a narkoza azotowa jest tylko jednym z nich.

Stwierdzono również zaburzenie kodowania w warunkach 5 ATA, co sugeruje, iż dolna, orientacyjna granica  $ppN_2$  upośledzająca zapamiętywanie materiału w warunkach nadciśnienia mieści się poniżej tej wartości. Wyniki te można również interpretować przez pryzmat większej podatności procesu zapamiętywania niż przypominania na zaburzenia spowodowane narkozą azotową. Interpretacja ta jest spójna z wynikami jakie uzyskał Tetzlaff i in. (1998) (6 ATA, komora hiperbaryczna), a także Hobbs i Kneller (2009) i Hobbs i Kneller (2015) (odpowiednio: 37-40 m ppw = 4,7-5 ATA i 34-40 m ppw = 4,4-5 ATA, badania w warunkach podwodnych).

### 15.9.1.2 Liczba błędnie odpamiętanych słów

Mając na uwadze wyniki dotyczące liczby błędnie odpamiętanych słów (słów, które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania), w porównaniu do warunków normobarycznych, w Badaniu 2a i 2b, nie zaobserwowano istotnych różnic w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria pod względem wspomnianego parametru. Nie potwierdzono zatem trzeciej i czwartej hipotezy badawczej. W tym miejscu warto ponownie przywołać eksperyment, który przeprowadził w warunkach podwodnych Brebeck i in. (2017). Autorzy wykazali, iż w porównaniu do badanych oddychających powietrzem (21% O<sub>2</sub>, 78% N<sub>2</sub>), osoby badane, które oddychały nitroksenem (EAN28 - 28% O<sub>2</sub>, 72% N<sub>2</sub>), popełniały istotnie mniej błędów (oryg. „*number of incorrect items*”) w teście pamięci długotrwałej. Jest to jedyne dotychczas opublikowane badanie w którym oceniano liczbę błędnie odpamiętanych słów. Niezasadnym jest jednakże porównywanie przywoływanych wyników z wynikami uzyskanymi w Badaniu 2a i 2b. Brebeck i in. (2017) przeprowadzili badanie w warunkach podwodnych, na głębokości 24 m ppw (3,4 ATA). Pomijając kontrowersje dotyczące możliwości porównania wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych, a także znaczne różnice metodologiczne pomiędzy badaniami, ciśnienie parcjalne azotu (ppN<sub>2</sub>) w tych trzech warunkach eksperymentalnych było istotnie różne: ppN<sub>2</sub> przy ciśnieniu otoczenia 3,4 ATA i FiN<sub>2</sub> (ang. *fraction of inspired nitrogen*, wdychowe stężenie azotu) = 0,78 wynosi ~2,65 ATA (dla grupy podwodnej oddychającej powietrzem), ppN<sub>2</sub> przy 3,4 ATA i FiN<sub>2</sub> = 0,72 wynosi: ~2,44 ATA (dla grupy podwodnej oddychającej nitroksenem), a ppN<sub>2</sub> przy 5 ATA i FiN<sub>2</sub> = 0,78 wynosi: 3,9 ATA (dla grup włączonych do Badania 2a i 2b).

Jakkolwiek w badaniu przeprowadzonym na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej nie wykazano aby narkoza azotowa (występująca w trakcie przypominania lub zapamiętywania materiału) powodowała istotne zniekształcenia pamięciowe, wyniki jakie uzyskał Brebeck i in. (2017) sugerują możliwość wystąpienia takiego zjawiska. Cytowani autorzy nie podają wyjaśnienia, które mogłoby tłumaczyć uzyskane dane (istotnie większa liczba błędnie odpamiętanych słów przy większym ciśnieniu parcjalnym azotu). Z tego powodu warto ponownie przywołać pracę Hobbsa i in. (2014) którzy wykazali, iż płetwonurkowie mogą stosować różne techniki mające na celu poznawczą kompensację wpływu narkozy azotowej. Możliwym jest, iż zjawisko przypominające konfabulację (ang. *confabulation*) może stanowić rodzaj kompensacji zaburzonego funkcjonowania procesów pamięciowych. Konfabulacje są rodzajem fałszywych wspomnień, które pozwalają na zachowanie ciągłości czasowej i

przyczynowo-skutkowej uprzednio doświadczonych wydarzeń. Konfabulacje występują zarówno u pacjentów cierpiących na zaburzenia neuropsychiatryczne (np. u pacjentów z zespołem Korsakoffa (ang. *Korsakoff syndrome*), który jest spowodowany niedoborem witaminy B1, w przebiegu chronicznego nadużywania alkoholu), jak i u zdrowych dzieci i osób dorosłych (Bernecker, 2017). Berrios (1998) określił konfabulację jako „*honest lying*” (dosłownie: szczere kłamstwo). Konfabulację należy wyraźnie odróżnić od kłamstwa, które jest świadome, wolicjonalne i nastawione na uzyskanie różnego rodzaju zewnętrznych i/lub wewnętrznych korzyści. Zjawisko „konfabulacji słów” lub „fałszywych wspomnień danego słowa”, które w swoim badaniu zaobserwowali Brebeck i in. (2017) mogłoby polegać na nieświadomym uzupełnianiu braków informacji (słów) innymi słowami (słowa podobne i/lub zachowujące „ciąg logiczny” - jeśli na liście słów do zapamiętania były słowa z określonej kategorii, prawdopodobnym może być „przypomnienie” słowa z tejże kategorii). Przywoływana hipoteza może stanowić asumpt do dalszych badań nad zjawiskiem poznawczej kompensacji zaburzeń pamięci spowodowanych narkozą azotową.

### 15.9.1.3 Walencja emocjonalna odpamiętanego materiału

Odnosząc się do wyników dotyczących charakterystyki zapamiętanego materiału pod kątem walencji emocjonalnej, w Badaniu 2a, w porównaniu do grupy badanej wyłącznie w normobarii, uczestnicy eksperymentu zapamiętując słowa w warunkach normobarycznych i przypominając je w hiperbarii odpamiętali istotnie mniej słów neutralnych ( $M_{\text{normobaria}} = 2,84$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 1,57$  vs.  $M_{\text{komora}} = 1,45$ ,  $SD_{\text{komora}} = 1,43$ ). W Badaniu 2b, w omawianej sekwencji nie stwierdzono istotnych różnic pod kątem przypominania słów o określonym nacechowaniu emocjonalnym. Nie potwierdzono zatem piątej hipotezy badawczej. Wyniki uzyskane w Badaniu 2a są spójne z wynikami jakie uzyskali Kirschbaum i in. (1996) (rodzaj stresu: *Trier Social Stress Test* i egzogenna podaż kortyzolu, materiał do zapamiętania: słowa) i Lupien i in. (1997) (rodzaj stresu: wypowiedz publiczna, materiał do zapamiętania: słowa). Uzyskane wyniki mogą świadczyć o szczególnej podatności neutralnego emocjonalnie materiału na zaburzenia spowodowane narkozą azotową, stresem lub interakcją stresu i narkozy, co może być jedną ze składowych wpływających na globalne upośledzenie procesów pamięciowych w warunkach hiperbarycznych.

W Badaniu 2a, w porównaniu do warunków kontrolnych, w trakcie sekwencji zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria, osoby badane odpamiętały mniej słów neutralnych ( $M_{\text{normobaria}} = 2,78$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 1,81$  vs.  $M_{\text{komora}} = 1,09$ ,  $SD_{\text{komora}} = 1,22$ ). W

trakcie Badania 2b (w tej samej sekwencji) badani przypomnieli sobie istotnie mniej słów neutralnych ( $M_{\text{normobaria}} = 2,21$   $SD_{\text{normobaria}} = 1,18$  vs.  $M_{\text{komora}} = 1$ ,  $SD_{\text{komora}} = 0,44$ ) i negatywnych ( $M_{\text{normobaria}} = 1,78$   $SD_{\text{normobaria}} = 1,35$  vs.  $M_{\text{komora}} = 0,45$ ,  $SD_{\text{komora}} = 0,68$ ). Ponownie, wyniki z Badania 2a są spójne z wynikami jakie uzyskali Kirschbaum i in. (1996) i Lupien i in. (1997). Nie znaleziono badania w którym ekspozycja na stres powodowałaby tożsamy rozkład wyników co w Badaniu 2b. Uzyskane wyniki nie potwierdzają szóstej hipotezy badawczej. Otrzymane dane również mogą świadczyć o wyjątkowej podatności neutralnego emocjonalnie materiału na zaburzenia spowodowane narkozą azotową, stresem lub interakcją stresu i narkozy. Co więcej, wykazano, iż również odpamiętywanie materiału o negatywnej walencji emocjonalnej może być upośledzone. Analogicznie do przedstawionego powyżej wniosku, omawiane zjawiska mogą być składowymi wpływającymi na globalne upośledzenie procesów pamięciowych w warunkach hiperbarycznych.

Warto jednakże podkreślić, iż ekspozycja hiperbaryczna w komorze istotnie różni się pod kątem charakteru czynników wywołujących stres (por. modele środowiskowe) od czynników które występowały w cytowanych eksperymentach (Kirschbaum i in., 1996; Lupien i in., 1997), co nie pozwala na w pełni trafne porównywanie wyników i dyskusję. Nie jest możliwym odniesienie otrzymanych danych do jakiegokolwiek innego badania przeprowadzonego w nadciśnieniu, ze względu na fakt, iż eksperyment przeprowadzony na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej był pionierski - starał się wypełnić lukę w wiedzy na temat wpływu narkozy azotowej lub interakcji stresu i narkozy na zapamiętywanie słów o określonej walencji emocjonalnej.

Jak już wspomniano, wpływ wspomianej interakcji (stres vs. narkoza) na procesy pamięciowe nie jest w pełni poznany. Warto ponownie przywołać badanie przeprowadzone przez Russella i Steinberg (1955). Autorzy stwierdzili, że zarówno stres, jak i narkoza wywołana normobarycznym 30%  $N_2O$  działając osobno powodują zaburzenia pamięci, jednakże gdy oba czynniki występowały razem - nie stwierdzano upośledzenia procesów pamięciowych. Możliwym jest zatem, iż stres niweluje działanie narkozy lub też narkoza redukuje wpływ stresu na pamięć długotrwałą (możliwy jest również wpływ dwukierunkowy). Ekstrapolacja wyników badań uzyskanych przy pomocy normobarycznego  $N_2O$  na warunki narkozy azotowej może być jednak nietrafna. Niemniej, podtlenek azotu, podobnie jak hiperbaryczny azot, działa depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, co sprawia, że konkluzje z badań przeprowadzonych przy użyciu  $N_2O$  mogą stać się hipotezami tłumaczącymi wpływ wysokich ciśnień parcjalnych azotu na aparat poznawczy. Opierając się zatem na badaniu

Russella i Steinberg (1955) można zbudować model teoretyczny obejmujący interakcję stresu i narkozy azotowej, w trakcie ekspozycji hiperbarycznej, jak i w okresie poekspozycyjnym. Narkoza azotowa może redukować wpływ stresu (i odwrotnie - stres może redukować wpływ narkozy) na pamięć długotrwałą w trakcie: presuryzacji (konsolidacja śladu pamięciowego w trakcie sekwencji zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria), *plateau* ciśnieniowego (przypominanie i zapamiętywanie przy docelowym ciśnieniu otoczenia), dekompresji (konsolidacja materiału w trakcie sekwencji zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria), jak i po osiągnięciu normobarii (przypominanie w warunkach resztkowego stresu i rezydualnej narkozy azotowej).

Brakuje jednak danych eksperymentalnych traktujących o izolowanym wpływie narkozy azotowej (bez komponenty stresu) na procesy pamięciowe. Do chwili obecnej tylko Biersner i Cameron (1970), a także Fowler i Ackles (1975) stwierdzili niekorzystny wpływ stresu spowodowanego ekspozycją hiperbaryczno-helioksovą na pamięć. Nie jest zatem jasne czy różnie nasilony stres może oddziaływać na nasilenie narkozy (i odwrotnie). Niemniej, zróżnicowany poziom stresu (i jego potencjalna interakcja z narkozą azotową) może być jednym z czynników odpowiadających za międzyosobnicze różnice w funkcjonowaniu poznawczym pod wpływem narkozy.

Rozważyć należy także hipotezę, iż w odniesieniu do warunków kontrolnych, rozkład wyników (pod kątem walencji emocjonalnej odpamiętanego materiału) w przypadku ekspozycji hiperbarycznej na nienarkotyczną, bezazotową mieszaninę oddechową (helioks) może być odmienny od rozkładu wyników uzyskanych przy użyciu hiperbarycznego powietrza. Sprężenie przy użyciu mieszaniny helowo-tlenowej może ukazać izolowaną rolę stresu (por. Biersner i Cameron, 1970) i czynników środowiskowych (np. wysoka temperatura otoczenia; por. modele środowiskowe) związanych z oddziaływaniem nadciśnienia na pamięć długotrwałą. Wyniki wpływu ekspozycji hiperbarycznej z użyciem helioksu na zapamiętywanie i przypominanie słów o określonej walencji emocjonalnej (w sekwencji normobaria-hiperbaria i hiperbaria-normobaria) zostaną przedstawione w trakcie omawiania Badania 3a i 3b, wraz z pełną interpretacją wyników uwzględniających grupy normobaryczne, hiperbaryczno-powietrzne i hiperbaryczno-helioksove.

Podsumowując całość rozważań, w odniesieniu do grupy normobarycznej, stwierdzono, iż komorowa ekspozycja hiperbaryczna przy użyciu powietrza może upośledzać zarówno sekwencję zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria (5 ATA), jak i sekwencję zapamiętywanie-hiperbaria (5 ATA) i przypominanie-normobaria. Nie stwierdzono aby

narkoza azotowa powodowała występowanie zjawiska zniekształceń pamięciowych (tj. odpamiętywania słów, które nie występowały w materiale, który przedstawiono do zapamiętania). Wykazano szczególną podatność materiału nacechowanego neutralnie (zapamiętywanie w warunkach normalnych i przypominanie w nadciśnieniu), a także materiału o neutralnej i negatywnej walencji emocjonalnej (zapamiętywanie w nadciśnieniu i przypominanie w normobarii) na zaburzenia spowodowane narkozą azotową, co może być istotną komponentą wpływającą na globalne upośledzenie funkcjonowania procesów pamięciowych. Uzyskanych wyników nie należy tłumaczyć jednoczynnikowo, wyłącznie poprzez pryzmat wpływu narkozy azotowej (brak kanonu jedynej różnicy pomiędzy warunkami normo- a hiperbarycznymi; por. modele środowiskowe). Prezentowane dane należy więc traktować jako wstępne, których pozyskanie miało na celu określenie wstępnej charakterystyki zmian poznawczych wywołanych wpływem wysokich ciśnień parcjalnych azotu. Z tego powodu pełna interpretacja wyników będzie możliwa po wykonaniu badań grup kontrolnych w warunkach nienarkotycznej hiperbarii helowo-tlenowej (Badanie 3a i 3b).

Warto podkreślić, iż istotnym ograniczeniem metodologicznym badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej był brak obiektywnej oceny poziomu kortyzolu u badanych (na przykład poprzez oznaczanie tego hormonu w ślinie). Ze względu na stopień skomplikowania procedury badawczej, jak i niedoświadczenie badacza (w chwili przeprowadzania pierwszego badania w warunkach nadciśnienia), zrezygnowano z oznaczania poziomu tego hormonu w toku trwania eksperymentu. Z drugiej strony wpływ ekspozycji na nadciśnienie indukowane w komorze hiperbarycznej na charakterystykę stymulacji adrenergicznej jest dobrze poznany (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011). Istotnym jest również podkreślenie, iż grupa badana w normobarii w schemacie: zapamiętywanie - przypominanie (Lista A), a następnie zapamiętywanie - przypominanie (Lista B) istotnie różniła się od grupy badanej w warunkach komory hiperbarycznej (badanej w tym samym schemacie: Lista A, a następnie Lista B) pod względem wieku ( $M_{\text{normobaria}} = 30,68$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,8$  vs.  $M_{\text{komora}} = 35,27$ ,  $SD_{\text{komora}} = 5,53$ ). Analogicznie, grupa normobaryczna badana w schemacie: zapamiętywanie - przypominanie (Lista B), a następnie zapamiętywanie - przypominanie (lista A) również różniła się od grupy badanej w hiperbarii (przy tożsamym schemacie badawczym) pod kątem wspomnianego parametru ( $M_{\text{normobaria}} = 32,52$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,74$  vs.  $M_{\text{komora}} = 36,9$ ,  $SD_{\text{komora}} = 3,93$ ). Crum, Anthony, Bassett i Folstein za pomocą MMSE (*Mini-Mental State Examination*) stwierdzili, że wpływ naturalnego starzenia się na funkcje poznawcze objawia się ich pogorszeniem od około pięćdziesiątego roku życia. W tym miejscu należy dodać, że



MMSE bada między innymi pamięć długotrwałą, utrzymywanie uwagi czy prakcję konstrukcyjną (za pomocą przerysowywania obrazka). Mało prawdopodobnym jest zatem, aby wspomniane różnice w średniej wieku badanych mogły znacząco wpływać na międzygrupowe różnice w testach pamięciowych.

Ostatnim zarzutem metodologicznym jest fakt, iż w grupie badanej w warunkach komory hiperbarycznej interwał zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria wynosił 11 minut 40 sekund, a w grupie normobarycznej - 8 minut. Wspominana różnica czasów wynika z faktu, iż po przeprowadzeniu badań w warunkach normobarycznych (Pretest 1 i 2), niezależnie od badacza, został zaproponowany inny, bardziej bezpieczny profil sprężenia (który wydłużał dekompresję o 3 minuty i 40 sekund). Jakkolwiek jest mało prawdopodobnym, aby tak niewielka różnica czasu mogła istotnie wpłynąć na liczbę odpamiętanych słów przez badanych, omawiane wyniki należy traktować jako wstępne. Wspominana różnica czasów (8 minut vs. 11 minut i 40 sekund), którą należy interpretować jako uchybienie metodologiczne, ma jednak swoje implikacje praktyczne. Badanie grupy kontrolnej należy w przyszłości przeprowadzać po badaniu grupy eksperymentalnej (grupy badanej w nadciśnieniu), ze względu na ryzyko zmiany modelu dekompresyjnego (jak w niniejszym badaniu), jak i z powodu niemożliwego do wcześniejszego przewidzenia wydłużenia presuryzacji (np. z powodu niemożności wyrównania ciśnienia w uchu środkowym przez badanego) i/lub pobytu przy docelowym ciśnieniu otoczenia, co istotnie wydłuża i rozbudowuje procedurę dekompresyjną.

#### **15.9.4 Uwaga intensywna i ekstensywna**

Autorska wersja Testu Zegarków, jak i Test Liczb Losowych zostały włączone do planu eksperymentalnego celem oceny czy uwaga intensywna i ekstensywna w ujęciu Kolańczyk (1991) jest zaburzona w trakcie komorowej ekspozycji hiperbarycznej przy użyciu powietrza jako czynnika oddechowego. Kolejnym celem badawczym była próba odpowiedzi na pytanie czy osoby biorące udział w eksperymencie mogą stosować mechanizm kompensacyjny polegający na spowolnieniu wykonywania Testu Zegarków, celem minimalizacji wpływu narkozy na procesy uwagowe (tj. czy występuje kompensacyjny efekt przetargu szybkość-poprawność).

W porównaniu do grupy normobarycznej nie wykazano istotnych różnic pomiędzy wykonywaniem autorskiej adaptacji Testu Zegarków i Testu Liczb Losowych w warunkach 5 ATA. Wynik ten oznacza, iż uwaga intensywna i ekstensywna nie jest zaburzona przy ciśnieniu

5 ATA lub też uwaga intensywna i ekstensywna jest przy wspomnianym ciśnieniu zaburzona, ale użyte testy były zbyt mało czułe aby wychwycić upośledzenie funkcjonowania wspomnianych składowych procesów uwagowych.

Przyjmując pierwszą interpretację jako trafną, a także powołując się na istotne różnice w testach oceniających przeszukiwanie (CTT-1 A i CTT-2 A) pomiędzy grupą normobaryczną, a hiperbaryczno-powietrzną (por. dalsza część tekstu), można postawić hipotezę, iż różne składowe aparatu uwagowego są różnie podatne na działanie hiperbarycznego azotu. Hipoteza ta jest paralełą konkluzji Steinberga i Doppelmayra (2017), którzy stwierdzili, że różne funkcje wykonawcze mogą być niejednakowo wrażliwe na wpływ hiperbarycznego azotu (lub też bardziej precyzyjnie - różne sieci neuronalne odpowiedzialne za różne funkcje wykonawcze mogą być różnie podatne na wpływ hiperbarycznego azotu; „*different neural networks within the central nervous system, which process specific executive functions, are affected differently by nitrogen narcosis*”, s. 1).

Nie wykazano wpływu efektu przetargu szybkość-poprawność na wykonanie Testu Zegarków w nadciśnieniu (5 ATA). Efekt ten objawiałby się kompensacyjnie wolniejszym wykonywaniem testu, przy jednocześnie mniejszej liczbie błędów polegających na ominięciu bodźca sygnałowego. Nie potwierdzono zatem siódmej i ósmej hipotezy badawczej. Nie potwierdzono również dziewiątej hipotezy badawczej o istotnie gorszym, w porównaniu do warunków normobarycznych, wykonywaniu Testu Liczb Losowych w warunkach 5 ATA. Nie stwierdzono różnic pomiędzy wykonaniem Testu Liczb Losowych pomiędzy grupą badaną w warunkach 2,2 ATA i w warunkach normalnych, potwierdzając tym samym dziesiątą hipotezę badawczą.

Podsumowując, nie zaobserwowano wpływu ekspozycji na hiperbaryczne powietrze w komorze na zaburzenia uwagi intensywnej (5 ATA), ani uwagi ekstensywnej (5 ATA i 2,2 ATA) mierzonej autorskim Testem Zegarków i Testem Liczb Losowych. Nie wykazano również spowolnienia wykonywania Testu Zegarków, które miałyby na celu poznawczą kompensację wpływu narkozy azotowej na procesy uwagowe. Ze względu na fakt, iż użyte w badaniu testy mogły mieć niedostateczną czułość - należy w przyszłości zintensyfikować wysiłki w celu przeprowadzenia eksperymentów w nadciśnieniu z użyciem okulografu.

Warto zwrócić uwagę na niedoskonałość metodologiczną dotyczącą porównywania grup normobarycznych i grup badanych w hiperbarii. Wyniki w warunkach normobarycznych uzyskano w trakcie Pretestu 3 ( $N = 11$ ) (Test Zegarków Arkusz 1) i Pretestu 5 ( $N = 9$ ) (Test Liczb Losowych), które były prowadzone poza schematem badawczym: zapamiętywanie-

przypominanie-test-test-zapamiętywanie-test-przypominanie. Z tego powodu pełna interpretacja wyników dotycząca funkcjonowania uwagi intensywnej i ekstensywnej zostanie przedstawiona w trakcie omawiania wyników Badania 3a i 3b, a wspomniane powyżej wyniki należy traktować jako wstępne.

### **15.9.5 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze**

Celem wykonania testów CTT-1 A i CTT-2 A warunkach narkozy azotowej indukowanej w komorze hiperbarycznej, z następowym porównaniem wyników do normobarycznych grup kontrolnych (Pretest 1 + Pretest 2) była próba wstępnego określenia wpływu wysokiego ciśnienia parcjalnego azotu na funkcjonowanie procesu przeszukiwania, a także na działanie funkcji wykonawczych. Drugim celem badawczym była próba odpowiedzi na pytanie czy osoby biorące udział w eksperymencie, w warunkach narkozy (5 ATA) będą kompensacyjnie spowalniać wykonywanie testów, aby zniwelować zaburzone funkcjonowanie procesów uwagowych (tj. czy efekt przetargu szybkość-poprawność może być mechanizmem kompensacyjnym w warunkach powietrznej ekspozycji hiperbarycznej w komorze).

Grupy badane w warunkach normobarycznych i hiperbaryczno-powietrznych (5 ATA) nie różniły się istotnie pod względem czasu potrzebnego do wykonania zarówno CTT-1 A, jak i CTT-2 A. Grupa badana w nadciśnieniu popełniła istotnie więcej prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A, jak również popełniła istotnie więcej niepoprawionych błędów koloru podczas rozwiązywania CTT-2 A. Analogicznie do wyników uzyskanych w trakcie wykonywania Testu Zegarków, nie zaobserwowano wpływu efektu szybkość-poprawność na charakter wykonywania testów. Badani poddani wpływowi narkozy azotowej wykonywali test tak samo szybko jak osoby badane w normobarii i jednocześnie popełnili istotnie więcej błędów. Nie potwierdzono zatem jedenastej i dwunastej hipotezy badawczej.

Celem przypomnienia, prawie błąd polega na inicjalizacji połączenia pomiędzy niewłaściwymi kółkami, zatrzymaniu się w pewnej odległości od niewłaściwego bodźca, a następnie na połączeniu odpowiednich kółek. Wydaje się, iż istotna różnica międzygrupowa dotycząca prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A świadczy o upośledzeniu procesu hamowania (ang. *inhibition*) przez narkozę azotową. Wynik ten jest spójny z wynikami uzyskanymi przez Steinberga i Doppelmayra (2017), którzy stwierdzili, że hamowanie jest szczególnie podatne na wpływ narkozy azotowej. Badacze zaobserwowali, iż w warunkach podwodnych na głębokości 20 m ppw (3 ATA) upośledzeniu ulega hamowanie (badane Testem Stroopa), nie stwierdzono natomiast wpływu narkozy azotowej na odświeżanie

informacji w pamięci roboczej i przerzutność uwagi. Uzyskane w toku badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej wyniki potwierdzają hipotezę o podatności procesu hamowania na upośledzenie w dopuszczalnych granicach głębokościowych nurkowań powietrznych.

Błąd koloru niepoprawiony (w trakcie rozwiązywania CTT-2 A) polega na połączeniu dwóch kółek o niewłaściwych kolorach (np. żółte kółko z cyfrą 3 z żółtym kółkiem z cyfrą 4 pomimo, iż powinno nastąpić połączenie z różowym kółkiem z cyfrą 4). Badany po popełnieniu błędu nie koryguje go (kontynuuje wykonywanie testu bez naniesienia poprawki). Wydaje się, iż połączenie dwóch kółek o tym samym kolorze, przy zachowaniu rosnącego szeregu liczbowego świadczy o zaburzeniu monitorowania własnego zachowania, zaburzeniu procesu hamowania i odświeżania informacji w pamięci roboczej, a także upośledzeniu przerzutności uwagi (objawiającym się istotnie gorszym przełączaniem się z jednego ciągu liczbowego na drugi). Warto jednakże zwrócić uwagę, iż CTT-1 A i CTT-2 A są testami, które badają jednocześnie wiele zmiennych (są mało swoiste). Należy zatem w przyszłości przeprowadzić replikację badania Steinberga i Doppelmayra (2017) przy ciśnieniu 5 ATA i przy użyciu różnych testów z których każdy z osobna mierzy inną funkcję wykonawczą. Niemniej, uzyskane wyniki stanowią dowód, iż wszystkie funkcje wykonawcze w ujęciu Miyake i in. (2000), które warunkują kontrolę poznawczą i nadzorują działanie innych funkcji poznawczych (przez co są gwarantem bezpiecznego i skutecznego działania) mogą być podatne na zaburzenia przy ciśnieniu mieszczącym się w dopuszczalnych granicach głębokościowych powietrznych ekspozycji hiperbarycznych.

Uzyskane wyniki potwierdzają również hipotezę, iż czynności bardziej złożone (niezbędne do wykonania CTT-2 A) są bardziej podatne na wpływ hiperbarycznego azotu niż czynności prostsze (wymagane przy CTT-1 A) (por. Kiessling i Maag, 1962; Baddeley i in., 1968). Proste czynności psychomotoryczne (łączenie kółek, przy zachowaniu rosnącego szeregu liczbowego), które wymagały uaktywnienia informacji doskonale znanych (głęboko zakodowanych) dotyczących kolejności cyfr/liczb przy jednocześnie względnie niewielkiej aktywacji funkcji wykonawczych (CTT-1 A) okazały się mniej podatne na zaburzenia niż wykonywanie tych samych czynności, które bardziej angażowały przerzutność uwagi, odświeżanie informacji w pamięci roboczej i hamowanie (naprzemienne łączenie dwóch różnokolorowych ciągów cyfr w trakcie rozwiązywania CTT-2 A).

Rozwiązywanie CTT-2 A można również potraktować jako wykonywanie zadania podwójnego, polegającego na łączeniu kółek zgodnie z rosnącym ciągiem liczbowym i łączeniu

kółek o dwóch różnych kolorach. Brewer i Sandow (1980) w swoim badaniu (analiza zachowania kierowców pod wpływem alkoholu, tuż przed wypadkiem) wykazali, iż prowadzenie samochodu i wykonywanie dodatkowej czynności niezwiązanej bezpośrednio z kierowaniem pojazdem stanowi istotne ryzyko wypadku. Badacze podsumowując wyniki swojego badania stwierdzili, iż alkohol zaburza wykonywanie zadań podwójnych poprzez uszczuplenie zasobów uwagowych, a upośledzenie czynności psychomotorycznych pełni mniej znaczącą rolę. Upośledzenie wykonywania zadań podwójnych pod wpływem alkoholu stwierdzili również Freydier, Berthelon, Bastien-Toniazzo i Gineyt (2014). Ekstrapolacja wyników uzyskanych na podstawie wywiadów z osobami kierującymi pojazdami pod wpływem alkoholu (Brewer i Sandow, 1980) lub przyjmującymi etanol w ramach procedury eksperymentalnej w warunkach normobarycznych (Freydier i in., 2014) na warunki narkozy azotowej indukowanej w komorze hiperbarycznej jest nietrafna. Jednakże ze względu na fakt, iż zarówno alkohol, jak i narkoza azotowa działają depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, wyniki uzyskane w trakcie badań nad wpływem etanolu na procesy poznawcze mogą stać się hipotezami dotyczącymi wpływu narkozy na aparat poznawczy. Z tego powodu, opierając się na cytowanym piśmiennictwie i otrzymanych wynikach, warto postawić hipotezę, iż narkoza azotowa zaburza wykonywanie zadań podwójnych, co może stanowić asumpt do dalszych badań nad tym zagadnieniem. Warto wspomnieć, iż hipoteza ta jest spójna z jedną z interpretacji wyniku badania przeprowadzonego przez Van Wijk i Meintjesa (2014a), którzy przeprowadzili badanie w warunkach komory hiperbarycznej (6 ATA = 50 m ppw). Uczestnicy eksperymentu mieli za zadanie z zasłoniętymi oczami, w ciągu 10 minut dopasować różnokształtne klocki do odpowiednich otworów. W badaniu użyto *Tupperware Shape-O® Toy* (*Tupperware Neuropsychological Task*, TNT) - kuli z dziesięcioma otworami i dziesięcioma odpowiadającymi elementami. Wykonanie zadania spadło średnio o 9,5% w warunkach nadciśnienia, w porównaniu do grupy kontrolnej. Badacze poprosili także uczestników swojego eksperymentu o zapamiętanie jak największej liczby kształtów w trakcie wykonywania powyżej opisanego zadania (ang. *shape memory*). Po upływie czterdziestu minut uczestnicy eksperymentu zostali poproszeni o odtworzenie (narysowanie) jak największej liczby zapamiętanych figur geometrycznych. Badani z grupy eksperymentalnej (wykonujący zadanie w warunkach 6 ATA) zapamiętali o 8% mniej figur niż badani z grupy kontrolnej. Warto zwrócić uwagę, iż uczestnicy badania wykonywali równocześnie dwa zadania, co mogło uszczuplić zasoby poznawcze, które mogłyby zostać wykorzystane w celu zapamiętywania kształtów. Z drugiej strony zapamiętywanie kształtów figur geometrycznych mogło redukować

zasoby, które mogły być wykorzystane w złożonym procesie odbierania bodźców, tworzenia trójwymiarowej reprezentacji poznawczej obiektów, planowania, wykonywania, monitorowania i ewentualnej korekty działania, które były niezbędne na potrzeby dopasowywania klocków do odpowiednich otworów.

Warto zwrócić uwagę, iż przywoływane zagadnienie (upośledzenie wykonywania zadań podwójnych w warunkach narkozy azotowej) może mieć istotne implikacje praktyczne. Osoby przebywające w nadciśnieniu wykonują co najmniej kilka czynności jednocześnie (np. lekarz w trakcie sprężenia terapeutycznego kontroluje kilka parametrów życiowych pacjenta, oblicza dawki leków, ewaluuje wdrożone czynności ratujące życie itd.; płetwonurek utrzymuje pływalność w wodzie, analizuje ilość pozostałej mieszanki oddechowej, monitoruje czas bezdekompresyjny, nawiguje, lokalizuje partnera nurkowego itd.). Opierając się na hipotezie, iż narkoza azotowa zaburza wykonywanie czynności podwójnych, należy rozważyć wprowadzenie procedur zmniejszających ryzyko pomyłki/wypadku w trakcie ekspozycji hiperbarycznej (do których należy np. procedura *cross-check*, polegająca na wzajemnym, „krzyżowym” nadzorze dwóch osób wykonujących dane zadanie). Korzystne może być również wprowadzenie do użytku list kontrolnych (pamięci zewnętrznej - ang. *check-lists*), a także dążenie do uproszczenia już obowiązujących procedur i/lub wprowadzenia sekwencyjności działań (np. początkowo czynność A, a następnie czynność B, zamiast jednoczesnego wykonywania czynności A i B). Należy także rozpocząć dyskusję o powszechnym stosowaniu nienarkotycznych mieszanin helowo-tlenowych przez personel medyczny wykonujący sprężenia terapeutyczne w warunkach wysokiego ciśnienia otoczenia (np. 6 ATA).

Podsumowując, nie stwierdzono aby płetwonurkowie w trakcie ekspozycji hiperbarycznej kompensacyjnie spowalniali wykonywanie testów CTT-1 A i CTT-2 A, celem zniwelowania wpływu narkozy azotowej na proces przeszukiwania. Wykazano, iż wszystkie funkcje wykonawcze w ujęciu Miyake i in. (2000) mogą być podatne na zaburzenia w trakcie ekspozycji na hiperbaryczne powietrze (5 ATA) w komorze. Potwierdzono opisanie w piśmiennictwie zjawisko dotyczące większego zaburzenia czynności bardziej złożonych, w porównaniu do czynności prostszych (Kiessling i Maag, 1962; Baddeley i in., 1968). Uzyskane wyniki mogą również stanowić dowód, iż narkoza azotowa, analogicznie do alkoholu (Brewer i Sadow, 1980; Freydier i in., 2014), zaburza wykonywanie czynności podwójnych. Testy CTT-1 A i CTT-2 A badają jednocześnie wiele zmiennych (są mało swoiste), należy więc w

przyszłości podjąć starania w celu umożliwienia przeprowadzenia badań okulograficznych w nadciśnieniu.

Warto zwrócić uwagę iż grupa badana w normobarii (Pretest 1 + Pretest 2,  $N = 38$ ) i grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ ) różniły się istotnie pod względem wieku ( $M_{\text{normobaria}} = 31,6$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,8$  vs.  $M_{\text{komora}} = 36,9$ ,  $SD_{\text{komora}} = 3,93$ ). Jakkolwiek stwierdzono istotne różnice międzygrupowe w zakresie średniej wieku, mało prawdopodobnym jest, aby miały one wpływ na jakość wykonania testów (D'Elia i in., 2012; Łojek i Stańczak, 2012).

Podkreślić należy, iż niektóre istotne wyniki nie osiągnęły krytycznej siły efektu, co implikuje ostrożność przy ich interpretacji. Potrzebne są dalsze badania, aby zweryfikować wpływ narkozy azotowej na wybrane zmienne poznawcze.

### **15.9.6 Funkcjonowanie grafomotoryczne**

Wiadomym jest, iż w warunkach narkozy azotowej indukowanej w komorze hiperbarycznej pismo staje się rozwlekłe i niewyraźne. Upośledzenie wykonywania czynności precyzyjnych jest spowodowane zamaszystością ruchów (Unsworth, 1966; Krzyżak, 2006)<sup>43</sup>. Jak już wspomniano, CTT-1 A i CTT-2 A oceniają również funkcjonowanie grafomotoryczne. Ze względu na fakt, iż do badania włączono osoby zdrowie, bez wywiadu neurologicznego, w trakcie wykonywania testu badany rysuje linie (a nie zapisuje słowa), jak również ocena wspomnianej zmiennej jest raczej subiektywna i podatna na „patrzenie życzeniowe” badacza, funkcjonowanie grafomotoryczne nie było interpretowane.

---

<sup>43</sup> Jest to obserwacja, która ma bezpośrednie implikacje praktyczne - pletwonurkowie pod wodą porozumiewają się zarówno za pomocą gestów (znaki nurkowe), jak i poprzez komunikaty pisane rysikiem na specjalnych tabliczkach (tabliczki nurkowe).

## **16 Badanie 3a i 3b: badania grup kontrolnych (helioks - 20% O<sub>2</sub> i 80% He, 5 ATA)**

### **16.1 Cel badania**

Jak już wielokrotnie wspomiano, hiperbaryczny hel nie wywołuje mierzalnej narkozy, co sprawia, iż helioks (mieszanka helowo-tlenowa, 20% O<sub>2</sub> i 80% He) może posłużyć do badania grup kontrolnych (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia, co powietrzna grupa eksperymentalna), zachowując przy tym, tak dalece jak to możliwe w badaniach w schemacie międzygrupowym, kanon jedynej różnicy. W trakcie hiperbarycznych ekspozycji helioksowych w komorze zachowany jest realizm sytuacyjny, a także odczuwalny jest wpływ nadciśnienia na ciało badanego. Analogicznie do nurkowań z użyciem powietrza, ekspozycja na hiperbaryczny helioks przebiega w tożsamych warunkach przestrzennych, akustycznych i temperaturowych. Jediną różnicą pomiędzy sprężeniem helioksowym i powietrznym jest brak lub obecność narkozy azotowej.

Istotne odmienności pomiędzy warunkami normobarycznymi, a hiperbarią powietrzną i helioksową zostały przedstawione we wcześniejszej części pracy (por. modele środowiskowe). Różnice uzyskane w trakcie wykonywania testów w warunkach normobarycznych (grupy kontrolne) i hiperbaryczno-powietrznych (grupy eksperymentalne) nie mogą być interpretowane wyłącznie poprzez pryzmat narkozy azotowej, co rodzi poważne wątpliwości dotyczące rzetelności analiz i płynących z nich wniosków. Pomimo faktu, iż badanie z użyciem helioksu (jako grupy kontrolnej) jest pożądanym (pod względem metodologicznym) rozwiązaniem, do chwili obecnej w zaledwie trzech badaniach przeprowadzonych w komorze hiperbarycznej zastosowano omawianą mieszaninę oddechową (Bennett i in., 1967; Fowler i Ackles, 1975; Fowler i in., 1983). Tak mała liczba badań jest związana z faktem, iż helioks jest bardzo drogi i niezwykle trudno dostępny, niewiele komór hiperbarycznych ma możliwość przeprowadzania takich sprężeń (wymagana jest odpowiednia infrastruktura), a także jest bardzo niewielu specjalistów (lekarzy i techników), którzy posiadają wiedzę na temat przeprowadzania bezpiecznych sprężeń przy użyciu tej mieszaniny oddechowej i mają odpowiednie doświadczenie w tym zakresie. Należy także podkreślić, iż również niewielu płetwonurków posiada stosowne uprawnienia do wykonywania nurkowań helioksowych (są to skomplikowane logistyczne nurkowania techniczne z zaawansowaną dekompresją).

Celem Badania 3a i 3b było więc pozyskanie danych kontrolnych dla wyników uzyskanych w trakcie powietrznych ekspozycji hiperbarycznych (Badanie 2a i 2b), przy



zachowaniu kanonu jedynej różnicy (brak narkozy vs. narkoza azotowa). Uzyskane wyniki posłużyły do weryfikacji wstępnych wniosków dotyczących wpływu narkozy azotowej na funkcjonowanie poznawcze, które zostały przedstawione we wcześniejszej części pracy.

W tym miejscu warto podkreślić, iż wpływ pobytu w nadciśnieniu przy użyciu mieszaniny helowo-tlenowej na funkcjonowanie poznawcze nie stanowi głównego tematu niniejszej rozprawy doktorskiej. Jakkolwiek na chwilę obecną dysponujemy niewielką liczbą publikacji na ten temat (por. Biersner i Cameron, 1970; Fowler i Ackles, 1975), pełne przedstawienie wyników uzyskanych w trakcie porównywania grup normobarycznych i hiperbaryczno-helioksowych spowodowałoby znaczące przekroczenie akceptowalnego limitu objętościowego rozprawy doktorskiej. Zdecydowano jednak przeanalizować izolowany wpływ stresu (spowodowanego ekspozycją na hiperbaryczny helioks) na zapamiętywanie i przypominanie słów o danej walencji emocjonalnej. Drugim celem badawczym Badania 3a i 3b było zatem uzyskanie danych na potrzeby dyskusji o interakcji stresu i narkozy azotowej na wspomniany aspekt funkcjonowania procesów pamięciowych. Wreszcie - przeprowadzenie eksperymentalnych nurkowań z użyciem helioksu było niezbędne, aby pozyskać dane, których analiza mogła posłużyć do dyskusji o metodologii badań przeprowadzanych w nadciśnieniu. Z tego powodu postanowiono dodatkowo przeanalizować wpływ hiperbarii helowo-tlenowej na przeszukiwanie i funkcje wykonawcze, w odniesieniu do wyników normobarycznej grupy kontrolnej.

## **16.2 Hipotezy badawcze**

Celem bardziej klarownego przedstawienia hipotez badawczych, grupy zapamiętujące w normobarii i przypominające materiał w warunkach hiperbarycznych (5 ATA) będą oznaczane jako „NH”, a grupy zapamiętujące w hiperbarii (5 ATA) i przypominające słowa w warunkach normalnych jako „HN”. Grupą eksperymentalną będzie grupa oddychająca powietrzem w warunkach 5 ATA, a hiperbaryczną grupą kontrolą - grupa używająca mieszaniny helowo-tlenowej jako czynnika oddechowego (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia – 5 ATA). Do analiz zostanie włączona również normobaryczna grupa kontrolna (zapamiętująca i przypominająca materiał lub wykonująca testy CTT-1 A i CTT-2 A w normobarii).

Zamierzeniem niniejszych eksperymentów będzie weryfikacja następujących hipotez badawczych:

**H<sub>1</sub>** Liczba odpamiętanych słów przez grupę eksperymentalną NH, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej NH nie będzie istotnie różna.

**H<sub>2</sub>** Liczba odpamiętanych słów przez grupę eksperymentalną HN, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej HN będzie istotnie mniejsza.

**H<sub>3</sub>** Liczba błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania) w grupie eksperymentalnej NH, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej NH nie będzie istotnie różna.

**H<sub>4</sub>** Liczba błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania) w grupie eksperymentalnej HN, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej HN nie będzie istotnie różna.

**H<sub>5</sub>** Badani z grupy helioksowej NH, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej będą pamiętali mniej słów neutralnych, a więcej słów pozytywnych i negatywnych.

**H<sub>6</sub>** Badani z grupy helioksowej HN, w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej będą pamiętali mniej słów neutralnych, a więcej słów pozytywnych i negatywnych.

**H<sub>7</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej NH, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej NH zapamiętają mniej słów pozytywnych i negatywnych.

**H<sub>8</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej NH, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej NH nie będą się różnili pod kątem liczby przypominanych słów neutralnych.

**H<sub>9</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej HN, w porównaniu do helioksowej grupy kontrolnej HN zapamiętają mniej słów pozytywnych i negatywnych.

**H<sub>10</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej HN, w porównaniu helioksowej grupy kontrolnej HN nie będą się różnili pod kątem liczby przypominanych słów neutralnych.

**H<sub>11</sub>** Wykonanie Testu Zegarków przez grupę eksperymentalną (5 ATA) nie będzie istotnie różne od wykonania testu przez helioksową grupę kontrolną (5 ATA).

**H<sub>12</sub>** Wykonanie Testu Liczb Losowych przez grupę eksperymentalną (5 ATA) nie będzie istotnie różne od wykonania testu przez helioksową grupę kontrolną (5 ATA).

**H<sub>13</sub>** Wykonanie Testu Liczb Losowych przez grupę eksperymentalną (w trakcie przystanku dekompresyjnego - 2,2 ATA) nie będzie istotnie różne od wykonania testu przez helioksovą grupę kontrolną (2,2 ATA).

**H<sub>14</sub>** Czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A i CTT-2 A przez grupę eksperymentalną (5 ATA) nie będzie istotnie różny od czasu potrzebnego przez helioksovą grupę kontrolną (5 ATA).

**H<sub>15</sub>** Badani z grupy eksperymentalnej (5 ATA), w porównaniu do helioksovej grupy kontrolnej (5 ATA) popełnią więcej błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A.

**H<sub>16</sub>** Czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A i CTT-2 A przez grupę helioksovą (5 ATA) nie będzie istotnie różny od czasu potrzebnego na wykonanie testów przez normobaryczną grupę kontrolną.

**H<sub>17</sub>** Badani z grupy helioksovej (5 ATA), w porównaniu do normobarycznej grupy kontrolnej popełnią więcej błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A.

### **16.3 Osoby badane**

Na potrzeby badania 3a i 3b zostali zrekrutowani doświadczeni płetwonurkowie służący w wojskach specjalnych ( $N = 18$ ), którzy zostali losowo podzieleni na dwie równoliczne grupy. W dniu eksperymentu, z przyczyn zdrowotnych, jeden badany został zdyskwalifikowany z udziału w badaniu przez lekarza zabezpieczającego nurkowanie. Ostatecznie do Badania 3a włączono 8 mężczyzn, w wieku 34-51 lat ( $M = 39,37$ ,  $SD = 5,65$ ), z szacunkową liczbą nurkowań podwodnych od 30 do 3000 ( $M = 641,25$ ,  $SD = 975,87$ ) i szacunkową liczbą treningowych sprężeń w komorze hiperbarycznej od 10 do 60 ( $M = 36,87$ ,  $SD = 19,07$ ). W grupie biorącej udział w Badaniu 3a sześciu badanych miało wyższe wykształcenie, a dwóch średnie. Do Badania 3b włączono 9 mężczyzn, w wieku 33-47 lat ( $M = 39,77$ ,  $SD = 4,46$ ), z szacunkową liczbą nurkowań podwodnych od 70 do 750 ( $M = 293,22$ ,  $SD = 252,4$ ) i szacunkową liczbą treningowych sprężeń w komorze hiperbarycznej od 1 do 80 ( $M = 13,66$ ,  $SD = 25,12$ ). Za wyjątkiem jednego badanego (wykształcenie średnie), wszyscy uczestnicy Badania 3b legitymowali się wyższym wykształceniem. Żadna osoba badana nie była psychologiem lub studentem psychologii, a dla wszystkich uczestników eksperymentu język polski był językiem ojczystym. Procedura rekrutacji badanych pod kątem braku przeciwwskazań medycznych została opisana w Załączniku 48.

Wyniki uzyskane w trakcie ekspozycji hiperbaryczno-helioksowych zostały porównane z wynikami grup eksponowanych na hiperbarię powietrzną. Poniższa tabela podsumowuje charakterystykę porównywanych grup kontrolnych (helioks, 5 ATA - Badanie 3a i 3b) i eksperymentalnych (powietrze, 5 ATA - Badanie 2a i 2b).

**Tabela 22**

Charakterystyka porównywanych grup kontrolnych (warunki hiperbarii helioksowej) i grup eksperymentalnych (warunki hiperbarii powietrznej)

Grupa badawcza i badane zmienne poznawcze	Grupa kontrolna helioks, 5 ATA	Grupa eksperymentalna powietrze, 5 ATA	Siła efektu
	$N = 8$ ; 8 mężczyzn; wiek: $M = 39,37$ , $SD = 5,65$ ;	$N = 11$ ; mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 35,27$ , $SD = 5,53$ ;	
Badanie 2a vs. Badanie 3a (pamięć, uwaga intensywna i ekstensywna)	6 badanych: wyższe wykształcenie, 2: średnie; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 641,25$ , $SD = 975,87$ ; szacunkowa liczba sprężeń w komorze hiperbarycznej: $M = 36,87$ , $SD = 19,07^*$	10 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 142,18$ , $SD = 143,05$ ; szacunkowa liczba sprężeń w komorze hiperbarycznej: $M = 0$ , $SD = 0^*$	$f = 0,68$

	$N = 9$ ; 9 mężczyzn; wiek: $M = 39,77$ , $SD = 4,46$ ; 8 badanych: wyższe wykształcenie,	$N = 11$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 3,93$ ; 11 badanych: wyższe wykształcenie;	
Badanie 2b vs. Badanie 3b (pamięć, przeszukiwanie i funkcje wykonawcze, uwaga ekstensywna)	1: średnie; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 293,22$ , $SD = 252,4$ ; szacunkowa liczba sprężeń w komorze hiperbarycznej: $M = 13,66$ , $SD = 25,12$	szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 222,72$ , $SD = 294,34$ ; szacunkowa liczba sprężeń w komorze hiperbarycznej: $M = 5,45$ , $SD = 18,09$	$f = 0,68$

---

\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 17) = 42,03; p < ,001]$ )

Grupa biorąca udział w Badaniu 2a i grupa kontrolna (Badanie 3a) nie różniły się istotnie pod względem wieku ( $[F(1, 17) = 2,5; p > ,05]$ ) i szacunkowej liczby nurkowań podwodnych ( $[F(1, 17) = 2,85; p > ,05]$ ). Grupa badana w komorze hiperbarycznej (5 ATA) przy użyciu helioksu (grupa kontrolna - Badanie 3b) i powietrza (grupa eksperymentalna - Badanie 2b) nie różniły się istotnie pod względem wieku ( $[F(1, 18) = 2,33; p > ,05]$ ), szacunkowej liczby nurkowań podwodnych ( $[F(1, 18) = 0,32; p > ,05]$ ), a także szacunkowej liczby sprężeń w komorze hiperbarycznej ( $[F(1, 18) = 0,72; p > ,05]$ ).

Porównane zostały również wyniki uzyskane w trakcie hiperbarycznych ekspozycji helioksowych wraz z wynikami grup badanych w normobarii (Pretest 1 i Pretest 2), celem oceny izolowanego wpływu stresu spowodowanego ekspozycją na nadciśnienie na charakterystykę zapamiętanego materiału (pod kątem walencji emocjonalnej odpamiętanych słów).

**Tabela 23**

Charakterystyka porównywanych grup normobarycznych (Pretest 1 lub Pretest 2) i grup badanych w warunkach hiperbarii helioksovej (Badanie 3a lub Badanie 3b)

Grupa badawcza	Normobaria	Helioks, 5 ATA	Siła efektu
Pretest 1 vs. Badanie 3a	$N = 19$ ; 11 mężczyzn i 8 kobiet; wiek: $M = 30,68$ , $SD = 4,8^*$ ; 16 badanych: wyższe wykształcenie, 2: średnie, 1: podstawowe	$N = 8$ ; 8 mężczyzn; wiek: $M = 39,37$ , $SD = 5,65^*$ ; 6 badanych: wyższe wykształcenie, 2: średnie	$f = 0,56$
Pretest 2 vs. Badanie 3b	$N = 19$ ; 11 mężczyzn i 8 kobiet; wiek: $M = 32,52$ , $SD = 4,74^{**}$ ; 16 badanych: wyższe wykształcenie, 3: średnie	$N = 9$ ; 9 mężczyzn; wiek: $M = 39,77$ , $SD = 4,46^{**}$ ; 8 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie	$f = 0,55$

\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 25) = 16,61; p < ,001]$ )

\*\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 26) = 14,79; p < ,05]$ )

Celem oceny wpływu stresu spowodowanego ekspozycją nadciśnieniową przy użyciu nienarkotycznej mieszanki helowo-tlenowej na wykonanie testów oceniających przeszukiwanie i funkcje wykonawcze, porównane zostały wyniki grup normobarycznych (Pretest 1 + Pretest 2) z wynikami grupy badanej w warunkach hiperbarycznych.

**Tabela 24**

Charakterystyka porównywanej grupy normobarycznej (Pretest 1 + Pretest 2) i grupy badanej w warunkach hiperbarii helioksowej (Badanie 3b)

Grupa badawcza	Normobaria	Helioks, 5 ATA	Siłą efektu
	<i>N</i> = 38; 22 mężczyzn i 16		
	kobiet;	<i>N</i> = 9; 9 mężczyzn;	
Pretest 1 + 2 vs.	wiek:	wiek:	
Badanie 3b	<i>M</i> = 31,6, <i>SD</i> = 4,8*; 32 badanych: wyższe wykształcenie, 5: średnie, 1: podstawowe	<i>M</i> = 39,77, <i>SD</i> = 4,46*; 8 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie	<i>f</i> = 0,42

\*Istotne różnice międzygrupowe ( $[F(1, 45) = 21,59; p < ,001]$ )

Podsumowując, na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej porównano wyniki uzyskane w grupach badanych w normobarii, a także w trakcie ekspozycji hiperbaryczno-powietrznych i hiperbaryczno-helioksowych. Wyniki z Badań 2a i 2b (hiperbaryczne powietrze) porównano z wynikami otrzymanych w trakcie Badań 3a i 3b (hiperbaryczny helioks). Celem analizy wpływu ekspozycji na helioks na zapamiętywanie i przypomnienie słów o określonej walencji emocjonalnej, a także na przeszukiwanie i funkcji wykonawcze wyniki z Badań 3a i 3b porównano z wynikami grup normobarycznych (Pretest 1 i 2).

#### 16.4 Plan badawczy

Plan badawczy był tożsamy z planem zastosowanym w Badaniu 2a i 2b (por. Załącznik 30 i 31).

#### 16.5 Procedura badawcza

Przed rozpoczęciem eksperymentu została przeprowadzona prelekcja dotycząca ochrony danych osobowych, profilu nurkowania, szczegółowego schematu badawczego i zasad bezpieczeństwa. Uczestników eksperymentu poinformowano także, iż wyniki badań są poufne (dostępne tylko dla eksperymentatora i promotora), anonimowe, a przed udostępnieniem opisu procedury badawczej na potrzeby recenzji, zostanie ona poddana weryfikacji pod kątem zachowania niejawności danych wrażliwych przez wyznaczoną (przez jednostkę wojskową) osobę.

Istotną różnicą pomiędzy badaniem w warunkach hiperbarii powietrznej (Badanie 2a i 2b), a badaniem przy użyciu helioksu była nieobecność eksperymentatora w komorze w trakcie sprężenia. Było to podyktowane: brakiem uprawnień badacza do wykonywania głębokich nurkowań helioksowych, a także brakiem orzeczenia o odpowiednim stanie zdrowia, który spełniał wymagania obowiązujące pływonurków-żołnierzy wojsk specjalnych. Co równie istotne, w porównaniu do hiperbarycznego powietrza, w trakcie oddychania mieszaniną tlenową-helową w nadciśnieniu występuje dużo bardziej zaznaczone zniekształcenie głosu („głos Kaczora Donalda”), który mógłby istotnie utrudnić przeprowadzenie badania. Aby rozwiązać tę niedogodność (brak bezpośredniego nadzoru przez badacza w komorze) uczestnicy eksperymentu zostali dodatkowo wyposażeni w klarowne plany badawcze, które miały na celu przypomnienie i utrwalenie sposobu wykonywania testów (badani zapoznawali się z nimi w normobarii, a także w trakcie presuryzacji, jako dodatkowe zadanie dystrykcyjne). Badacz, wraz z lekarzem i technikiem przeprowadzającym sprężenie nadzorował eksperyment z zewnątrz, komunikując się z badanymi poprzez system łączności.

Pomiaru czasu trwania poszczególnych faz badania dokonywano przez eksperymentatora przy użyciu telefonu komórkowego i aparatury monitorującej przebieg sprężenia. Podobnie jak w Badaniu 2a i 2b, czas wykonania i liczbę popełnionych błędów w trakcie rozwiązywania CTT-1 A i CTT-2 A mierzono i liczono *post-factum*. Eksperyment nagrywano telefonem komórkowym poprzez niewielki bulaj („okienko”). Ze względu na wąski kąt nagrywania, do badanych skierowano prośbę o wyciągnięcie ręki przed siebie, a następnie jej zabranie, natychmiast po zakończeniu rozwiązywania testu. Ze względu na ochronę danych osobowych żołnierzy, autor niniejszej rozprawy doktorskiej nie otrzymał nagrania z eksperymentu - czasy wykonania CTT-1 A i CTT-2 A były zliczane w obecności osoby wyznaczonej przez jednostkę wojskową. Pozostałe elementy procedury badawczej były tożsame do procedury opisanej w trakcie omawiania Badania 2a i 2b.

Eksperymentalne nurkowanie zabezpieczał lekarz posiadający wiedzę i doświadczenie z zakresu medycyny nurkowej i hiperbarycznej, a sprężenie przeprowadzał doświadczony operator komory. Zarówno w trakcie, jak i po eksperymencie nie wystąpiły jakiegokolwiek powikłania związane z ekspozycją hiperbaryczną. Po badaniu uczestników poinformowano, iż w przypadku wystąpienia jakichkolwiek odroczonej dolegliwości zdrowotnych, które mogą mieć związek z ekspozycją hiperbaryczną, mają natychmiast zgłosić się do lekarza zabezpieczającego nurkowanie (który pozostał na terenie jednostki wojskowej po sprężeniu).



## 16.6 Profil dekompresyjny (profil nurkowania)

W Badaniu 3a i 3b zastosowano tożsamy profil dekompresyjny co w Badaniu 2a i 2b, co wymagało szeregu wyliczeń, gdyż azot i hel różnią się pod kątem zarówno absorpcji (wchłaniania przez tkanki), jak i szybkości usuwania z organizmu. Przygotowano również profile alternatywne, np. dla wydłużenia presuryzacji z powodu trudności z wyrównaniem ciśnienia w uchu środkowym przez badanego/badanych i/lub wydłużenia pobytu w warunkach 5 ATA. Przedstawienie wszystkich przygotowanych profili sprężenia istotnie przekracza możliwość ich przedstawienia w niniejszej pracy.

## 16.7 Analizy statystyczne

Analizy statystyczne (jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) w celu oceny różnic międzygrupowych) wykonano w programie IBM SPSS Statistics (IBM Corporation, USA).

## 16.8 Wyniki

### 16.8.1 Hiperbaryczne powietrze (Badanie 2a) vs. helioks (Badanie 3a)

Porównywane grupy nie różniły się istotnie pod względem liczby słów zapamiętywanych i przypominanych w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria ( $[F(1, 17) = 0,23; p > ,05; f = 0,11]$ ), jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria ( $[F(1, 17) = 0,01; p > ,05; f = 0,02]$ ).

**Tabela 25**

Wyniki testów oceniających pamięć długotrwałą

Sekwencja zapamiętywania	<i>M</i> (liczba słów)		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria (Lista A)	5,62 (3,2)	6,36 (3,38)	n.i.
Zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria (Lista B)	5,62 (3,11)	5,45 (2,46)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa ( $N = 8$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Grupy nie różniły się istotnie pod względem liczby błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały na liście słów do zapamiętania; Lista A ( $[F(1, 17) = 0,67; p > ,05; f = 0,19]$ ), Lista B ( $[F(1, 17) = 0,13; p > ,05; f = 0,08]$ ).

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria) grupy nie różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 17) = 0,2; p > ,05; f = 0,1]$ ), neutralnych ( $[F(1, 17) = ,05; p > ,05; f = 0,05]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 17) = 1,14; p > ,05; f = 0,25]$ ).

**Tabela 26**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	2,87 (0,99)	3,18 (1,72)	n.i.
Słowa neutralne	1,62 (1,59)	1,45 (1,43)	n.i.
Słowa negatywne	1,12 (0,99)	1,72 (1,34)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa ( $N = 8$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria) grupy różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 17) = 4,84; p < ,05; f = 0,5]$ ), jednakże nie różniły się pod kątem liczby odpamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 17) = 0,06; p > ,05; f = 0,05]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 17) = 1,1; p > ,05; f = 0,23]$ ).

**Tabela 27**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	1,37 (1,59)	1,54 (1,36)	n.i.
Słowa neutralne	2,37 (1,3)	1,09 (1,22)	< ,05
Słowa negatywne	2 (1,85)	2,81 (1,53)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa ( $N = 8$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Graficzne przedstawienie wyników testów pamięciowych zawiera Załącznik 57.

Grupa hiperbaryczno-helioksowa i hiperbaryczno-powietrzna nie różniła się istotnie pod względem parametrów wykonywania Testu Zegarków i Testu Liczb Losowych w warunkach 5 ATA (Test Zegarków: liczba prawidłowych detekcji [ $F(1, 17) = 3,63; p > ,05; f = 0,45$ ], liczba ominięć [ $F(1, 17) = 0,29; p > ,05; f = 0,13$ ], liczba fałszywych detekcji [ $F(1, 17) = 1,4; p > ,05; f = 0,24$ ], liczba przeanalizowanych bodźców [ $F(1, 17) = 0,75; p > ,05; f = 0,2$ ]; Test Liczb Losowych: liczba poprawnych detekcji [ $F(1, 17) = 0,11; p > ,05; f = 0,07$ ], liczba ominięć [ $F(1, 17) = 0,11; p > ,05; f = 0,07$ ], w żadnej z grup nie wystąpiła fałszywa detekcja).

**Tabela 28**

Wyniki testu oceniającego uwagę intensywną (5 ATA)

Parametr	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1, 5 ATA)	16	14,09	
Liczba poprawnych detekcji	(1,51)	(2,5)	n.i.
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1, 5 ATA)	2,37	3,09	
Liczba ominięć	(0,91)	(3,59)	n.i.
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1, 5 ATA)	0,12	0	
Liczba fałszywych detekcji	(0,35)	(0)	n.i.
Uwaga intensywna - Test Zegarków (Arkusz 1, 5 ATA)	151,62	165,18	
Liczba przeanalizowanych bodźców	(27,38)	(37,4)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa (*N* = 8)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (*N* = 11)**Tabela 29**

Wyniki testu oceniającego uwagę ekstensywną (5 ATA)

Parametr	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych (5 ATA)	16,75	16,27	
Liczba poprawnych detekcji	(3,1)	(3,06)	n.i.
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych (5 ATA)	8,25	8,72	
Liczba ominięć	(3,1)	(3,06)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa (*N* = 8)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (*N* = 11)

### 16.8.2 Hiperbaryczne powietrze (Badanie 2b) vs. helioks (Badanie 3b)

Grupy różniły się istotnie pod względem liczby słów zapamiętywanych i przypominanych w sekwencji: zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria ( $[F(1, 18) = 12,57; p < ,05; f = 0,78]$ ), a także zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria ( $[F(1, 18) = 31,83; p < ,001; f = 1,24]$ ).

**Tabela 30**

Wyniki testów oceniających pamięć długotrwałą

Sekwencja zapamiętywania	<i>M</i> (liczba słów)		<i>p</i>
	<i>C</i> *	<i>Ex</i> **	
Sekwencja zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria (Lista B)	9,77 (2,22)	6,45 (1,96)	< ,05
Sekwencja zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria (Lista A)	9,88 (2,36)	4,36 (2,01)	< ,001

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa ( $N = 9$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

Grupy badane w warunkach hiperbarii powietrznej i helioksowej nie różniły się istotnie pod względem liczby błędnie odpamiętanych słów (słów które nie występowały na liście słów do zapamiętania; Lista B ( $[F(1, 18) = 0,59; p > ,05; f = 0,17]$ ), Lista A ( $[F(1, 18) = 0,01; p > ,05; f = 0,03]$ )).

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria) grupy różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 18) = 14,57; p < ,05; f = 0,86]$ ), jednakże nie różniły się istotnie pod kątem liczby odpamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 18) = 0,81; p > ,05; f = 0,2]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 18) = 0,78; p > ,05; f = 0,2]$ ).

**Tabela 31**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	2 (0,86)	1,63 (0,92)	n.i.
Słowa neutralne	4,55 (1,13)	2,09 (1,64)	< ,05
Słowa negatywne	3,22 (1,09)	2,72 (1,34)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksova (*N* = 9)

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (*N* = 11)

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie hiperbaria-przypominanie normobaria) grupy różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 18) = 20,3; p < ,001; f = 1,01]$ ), neutralnych ( $[F(1, 18) = 5,2; p < ,05; f = 0,48]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 18) = 22,66; p < ,001; f = 1,04]$ ).

**Tabela 32**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Słowa pozytywne	5,44 (1,33)	2,72 (1,34)	< ,001
Słowa neutralne	2,22 (1,71)	1 (0,44)	< ,05
Słowa negatywne	2,22 (0,97)	0,45 (0,68)	< ,001

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa hiperbaryczno-helioksova (*N* = 9)

\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (*N* = 11)

Graficzne przedstawienie wyników testów pamięciowych zawiera Załącznik 58.

Nie zaobserwowano istotnych różnic czasowych pomiędzy wykonaniem CTT-1 A w warunkach hiperbarii powietrznej i hiperbarii helioksovej [ $F(1, 17) = 1,78; p > ,05; f = 0,3$ ]. Grupy różniły się istotnie pod względem czasu wykonania CTT-2 A [ $F(1, 17) = 6,9; p < ,05; f = 0,61$ ]. Wskaźnik zakłóceń był niemożliwy do obliczenia (por. dalsza część tekstu).

**Tabela 33**

Czas wykonania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	<i>M</i> (czas wykonania)		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Czas wykonania CTT-1 A	43,88 s (8,63)	36,9 s (13,35)	n.i.
Czas wykonania CTT-2 A	57,33 s (11,34)	83,2 s (27,43)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa hiperbaryczno-helioksova (*N* = 9)\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna (*N* = 11)

Grupy badane w warunkach hiperbarii powietrznej i helioksovej nie różniły się istotnie pod kątem liczby błędów: CTT-1 A prawie bład ( $[F(1, 18) = 0,01; p > ,05; f = 0,02]$ ), CTT- 2 A prawie bład ( $[F(1, 17) = 2,01; p > ,05; f = 0,34]$ ), CTT-1 A bład poprawiony ( $[F(1, 18) = 0,02; p > ,05; f = 0,21]$ ), CTT-1 A bład niepoprawiony ( $[F(1, 18) = 0,81; p > ,05; f = 0,21]$ ), CTT-2 A bład koloru poprawiony ( $[F(1, 17) = 2,01; p > ,05; f = 0,07]$ ), CTT-2 A bład koloru niepoprawiony ( $[F(1, 17) = 1,53; p > ,05; f = 0,13]$ ), CTT-2 A bład kolejności poprawiony ( $[F(1, 17) = 1,11; p > ,05; f = 0,23]$ ), CTT-2 A bład kolejności niepoprawiony ( $[F(1, 17) = 1,11; p > ,05; f = 0,23]$ ). Jeden badany z grupy powietrznej nie wykonał CTT-1 A, jak również jeden z badanych (także z grupy powietrznej) wykonał CTT-2 A niezgodnie z instrukcją (połączył kółka o jednakowym kolorze, zachowując rosnący ciąg liczbowy). Graficzne przedstawienie wyników zawiera Załącznik 59.

W warunkach 2,2 ATA (w trakcie przystanku dekompresyjnego) wykonanie Testu Liczb Losowych nie różniło się istotnie pomiędzy grupami (liczba poprawnych detekcji  $[F(1, 18) = 1,36; p > ,05; f = 0,25]$ , liczba ominięć  $[F(1, 18) = 0,41; p > ,05; f = 0,14]$ ). W żadnej grupie nie wystąpiła fałszywa detekcja.



**Tabela 34**

Wyniki testu oceniającego uwagę ekstensywną

Typ testu	<i>M</i>		<i>p</i>
	<i>C*</i>	<i>Ex**</i>	
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych (2,2 ATA)	17,55	15,63	
Liczba poprawnych detekcji	(4,95)	(2,11)	n.i.
Uwaga ekstensywna - Test Liczb Losowych (2,2 ATA)	8,55	9,36	
Liczba ominięć	(3,46)	(2,11)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)\*Grupa hiperbaryczno-helioksova ( $N = 9$ )\*\*Grupa hiperbaryczno-powietrzna ( $N = 11$ )

### 16.8.3 Normobaria (pamięć - Pretest 1) vs. helioks (pamięć - Badanie 3a)

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A) grupy normobaryczne i hiperbaryczno-helioksove (zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria) różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 25) = 5,1; p < ,05; f = 0,46]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 25) = 7,51; p < ,05; f = 0,58]$ ), jednakże nie różniły się pod kątem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 25) = 3,34; p > ,05; f = 0,35]$ ).

**Tabela 35**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria)

Walencja emocjonalna słów	M		p
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	4,15 (1,46)	2,87 (0,99)	< ,05
Słowa neutralne	2,84 (1,57)	1,62 (1,59)	n.i.
Słowa negatywne	2,89 (1,69)	1,12 (0,99)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 19$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksova ( $N = 8$ )

Mając na uwadze Listę B, grupy normobaryczne i hiperbaryczno-helioksove (zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria) różniły się istotnie pod względem liczby odpamiętanych słów negatywnych ( $[F(1, 25) = 5,46; p < ,05; f = 0,44]$ ), jednakże nie różniły się istotnie pod kątem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 25) = 2,08; p > ,05; f = 0,26]$ ) i neutralnych ( $[F(1, 25) = 0,34; p > ,05; f = 0,11]$ ).

**Tabela 36**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	2,21 (1,27)	1,37 (1,59)	n.i.
Słowa neutralne	2,78 (1,81)	2,37 (1,3)	n.i.
Słowa negatywne	3,73 (1,72)	2 (1,85)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna (*N* = 19)

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa (*N* = 8)

Graficzne przedstawienie testów pamięciowych zawiera Załącznik 60.

#### 16.8.4 Normobaria (pamięć - Pretest 2) vs. helioks (pamięć - Badanie 3b)

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B) grupy normobaryczne i hiperbaryczno-helioksove (zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria) różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 26) = 15,47; p < ,05; f = 0,78]$ ), jednakże nie różniły się istotnie pod kątem liczby odpamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 26) = 0,66; p > ,05; f = 0,15]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 26) = 0,87; p > ,05; f = 0,19]$ ).

#### Tabela 37

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista B - zapamiętywanie normobaria-przypominanie hiperbaria)

Walencja emocjonalna słów	M		p
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	2,36 (1,21)	2 (0,86)	n.i.
Słowa neutralne	2,26 (1,55)	4,55 (1,13)	< ,05
Słowa negatywne	3,84 (1,83)	3,22 (1,09)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 19$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksova ( $N = 9$ )

Pod względem liczby odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A), grupy normobaryczne i hiperbaryczno-helioksove (zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria) różniły się istotnie pod kątem liczby zapamiętanych słów pozytywnych ( $[F(1, 26) = 11,03; p < ,05; f = 0,64]$ ) i nie różniły się istotnie pod względem liczby zapamiętanych słów neutralnych ( $[F(1, 26) = 0; p > ,05; f = 0,003]$ ) i negatywnych ( $[F(1, 26) = 0,73; p > ,05; f = 0,17]$ ).

**Tabela 38**

Liczba odpamiętanych słów w zależności od ich walencji emocjonalnej (Lista A - zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria)

Walencja emocjonalna słów	<i>M</i>		<i>p</i>
	C*	Ex**	
Słowa pozytywne	3,52 (1,46)	5,44 (1,33)	< ,05
Słowa neutralne	2,21 (1,18)	2,22 (1,71)	n.i.
Słowa negatywne	1,78 (1,35)	2,22 (0,97)	n.i.

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa normobaryczna (*N* = 19)

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksowa (*N* = 9)

Graficzne przedstawienie wyników testów pamięciowych zawiera Załącznik 61.

### 16.8.5 Normobaria (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Pretest 1 + Pretest 2) vs. helioks (przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - Badanie 3b)

Nie stwierdzono istotnych różnic czasowych w trakcie wykonywania CTT-1 A pomiędzy grupą badaną w normobarii i w warunkach hiperbarii helioksovej [ $F(1, 45) = 1,64$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,21$ ]. Grupa badana w nadciśnieniu (helioks) wykonywała CTT-2 A istotnie szybciej [ $F(1, 45) = 4,51$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,34$ ]. Wskaźnik zakłóceń był niemożliwy do obliczenia (por. dalsza część tekstu).

#### Tabela 39

Czas wykonania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	M (czas wykonania)		
	C*	Ex**	p
Czas wykonania CTT-1 A	36,94 s (15,61)	43,88 s (8,63)	< ,05
Czas wykonania CTT-2 A	70,13 s (17,13)	57,33 s (11,34)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (SD)

\*Grupa normobaryczna ( $N = 38$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksova ( $N = 9$ )

Badani w warunkach 5 ATA, w porównaniu do warunków normobarycznych, popełnili istotnie więcej prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A ( $[F(1, 45) = 10,37$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,33$ ]), a także poprawionych błędów kolejności w trakcie rozwiązywania CTT-2 A ( $[F(1, 45) = 4,54$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,18$ ]). Liczba pozostałych, możliwych do popełnienia błędów była nieistotna międzygrupowo (CTT- 2 A prawie błąd ( $[F(1, 45) = 0,23$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,07$ ]), CTT-1 A błąd poprawiony ( $[F(1, 45) = 1,26$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,13$ ]), CTT-2 A błąd kolejności niepoprawiony ( $[F(1, 45) = 1,26$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,13$ ]), CTT-2 A błąd koloru poprawiony ( $[F(1, 45) = 1,01$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,18$ ]), CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony ( $[F(1, 45) = 0,87$ ;  $p > ,05$ ;  $f = 0,12$ ]). W żadnej z grup nie wystąpił niepoprawiony błąd w trakcie wykonywania CTT-1 A.

**Tabela 40**

Liczba istotnie różnych międzygrupowo błędów popełnionych w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	Liczba błędów		<i>p</i>
	C*	Ex**	
CTT-1 A prawie błąd	1	3	< ,05
CTT-2 A błąd kolejności poprawiony	0	1	< ,05

\*Grupa normobaryczna ( $N = 38$ )

\*\*Grupa hiperbaryczno-helioksova ( $N = 9$ )

Graficzne przedstawienie wyników zawiera Załącznik 62.

### 16.9 Interpretacja wyników i dyskusja

Celem Badań 3a i 3b było pozyskanie danych kontrolnych dla grup hiperbaryczno-powietrznych, które zachowywałyby kanon jedynej różnicy (helioks, 5 ATA - brak narkozy azotowej vs. powietrze, 5 ATA - narkoza azotowa). Kolejnym celem była również weryfikacja wstępnych hipotez, które zostały postawione po analizie wyników uzyskanych w warunkach komorowej ekspozycji hiperbarycznej, w odniesieniu do grup normobarycznych.

Ze względu na charakter otrzymanych danych, celem wyprowadzenia wniosków końcowych, interpretacja wyników zostanie przedstawiona w kolejności: uwaga intensywna i ekstensywna, przeszukiwanie i funkcje wykonawcze, pamięć długotrwała.

#### 16.9.1 Uwaga intensywna i ekstensywna

Nie stwierdzono istotnych różnic w wykonaniu autorskiej adaptacji Testu Zegarków i Testu Liczb Losowych pomiędzy grupami badanymi w nadciśnieniu (5 ATA, powietrze vs. 5 ATA helioks). Wyniki te mogą świadczyć o tym, iż uwaga intensywna i ekstensywna przy ekspozycji na 5 ATA przy użyciu powietrza jako czynnika oddechowego nie jest zaburzona lub też że uwaga intensywna i ekstensywna w warunkach narkozy azotowej jest zaburzona, ale użyte testy są zbyt mało czułe, aby wychwycić potencjalne zaburzenia wspomnianych składowych aparatu uwagowego.

Nie wykazano wpływu efektu przetargu szybkość-poprawność na wykonanie Testu Zegarków w nadciśnieniu. Efekt ten objawiałby się kompensacyjnie wolniejszym wykonywaniem testu, przy jednocześnie mniejszej liczbie błędów ominięcia.

Grupy hiperbaryczno-helioksove i hiperbaryczno-powietrzne nie różniły się istotnie pod względem parametrów wykonania Testu Liczb Losowych w warunkach 2,2 ATA.

Podsumowując uzyskane wyniki, przeszukiwanie trybie intensywnym i ekstensywnym, oceniane za pomocą Testu Zegarków i Testu Liczb Losowych nie było zaburzone. Istotne wady „papierowych” arkuszy testowych oceniających przeszukiwanie (niewielka czułość czy jednoczasowa ocena kilku zmiennych w przypadku CTT-1 A i CTT-2 A) skłaniają do wzmożenia wysiłków w celu umożliwienia wykonywania badań w warunkach nadciśnienia z użyciem sprzętu elektronicznego - okulografu (ang. *eye-tracker*). Badania okulograficzne są w stanie obiektywnie odpowiedzieć na pytanie czy przeszukiwanie w trybie intensywnym i ekstensywnym, przy danym ciśnieniu parcjalnym azotu jest lub też nie jest zaburzone.

Plan badawczy zakładał wykonanie Testu Liczb Losowych w trakcie przystanku dekompresyjnego w warunkach 2,2 ATA. W toku przyszłych badań wydaje się, iż należy zaniechać wykonywania testów w trakcie dekompresji. Jakikolwiek wydłużenie fazy presuryzacji i/lub wydłużenie pobytu w warunkach docelowego ciśnienia otoczenia może implikować zmianę charakterystyki profilu dekompresyjnego („wynurzeniowego”), co może skutkować koniecznością wykonania przystanków przy innym ciśnieniu otoczenia i w innym interwale czasowym. Wydaje się, iż testy należy wykonywać wyłącznie w warunkach normobarycznych (przed i/lub po ekspozycji hiperbarycznej), jak i przy docelowym ciśnieniu otoczenia. Nie bez znaczenia wydaje się być również fakt, że w trakcie dekompresji panują inne warunki fizyczne niż w trakcie pobytu na maksymalnej głębokości (między innymi istotnie niższa temperatura otoczenia), a także występuje istotnie niższy poziom stresu odczuwanego przez badanych (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011).

### **16.9.2 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - normobaria vs. helioks**

Grupy badane w warunkach normobarycznych i hiperbaryczno-helioksowych (5 ATA) nie różniły się istotnie pod względem czasu potrzebnego na wykonanie CTT-1 A. CTT-2 A był wykonywany istotnie szybciej w warunkach hiperbarii helioksovej ( $M_{\text{normobaria}} = 70,13$  s,  $SD_{\text{normobaria}} = 17,13$  vs.  $M_{\text{helioks}} = 57,33$  s,  $SD_{\text{helioks}} = 11,34$ ; różnica średnich: 12,8 s). Ten paradoksalny wynik (lepsze wykonanie testu w niesprzyjających warunkach otoczenia i pod wpływem stresu) można interpretować przez pryzmat większej motywacji grupy helioksovej i/lub ponadprzeciętnej zdolności żołnierzy wojsk specjalnych do przeszukiwania pola percepcyjnego.



Płetwonurkowie-żołnierze wojsk specjalnych w toku szkolenia bojowego wykonują treningowe sprężenia w komorze hiperbarycznej. Ekspozycję nadciśnieniową wykonaną na potrzeby badania eksperymentalnego mogli potraktować jako trening, co pozytywnie wpłynęło na motywację do osiągnięcia jak najlepszego wyniku. Możliwym jest również, iż do służby w tym typie wojsk są przyjmowani kandydaci o wyjściowo ponadprzeciętnej zdolności do przeszukiwania. Żołnierze wojsk specjalnych przechodzą rygorystyczną, wieloetapową selekcję, która ma wyłonić najlepszych kandydatów spośród żołnierzy służących w regularnych jednostkach. Warto wspomnieć, iż Mitroff, Ericson i Sharpe (2018) opracowali narzędzie służące do ewaluacji procesu przeszukiwania i predykcji jakości wykonywanej pracy w realnych warunkach u pracowników lotnisk zatrudnionych przy kontroli bagaży. Niemniej, testy psychologiczne które przechodzą kandydaci do wojsk specjalnych są objęte klauzulą niejawności, co oznacza, iż nie istnieje więc możliwość zweryfikowania tej hipotezy. Paralelnym wytłumaczeniem otrzymanych danych może być fakt, iż żołnierze wojsk specjalnych w trakcie wyczerpującego, wieloletniego treningu ponadprzeciętnie rozwijają przeszukiwanie pola percepcyjnego, które jest niezbędne do przeżycia i wykonania zadania bojowego (wyszukiwanie improwizowanych ładunków wybuchowych<sup>44</sup>, wyszukiwanie celu, zdolność do pomijania dystraktorów itd.) (Kramer, Porfido i Mitroff, 2019; Cornes, Boardman, Ford i Smith, 2019). Jakkolwiek brakuje podłużnych badań oceniających czy następuje poprawa funkcjonowania procesu przeszukiwania u żołnierzy w toku szkolenia bojowego, Schuster, Rivera, Sellers, Fiore i Jentsch (2013) wykazali, iż możliwy jest skuteczny trening tej zmiennej. O tym jak ważne jest przeszukiwanie w tej grupie zawodowej świadczy fakt, iż *Defence Science and Technology Laboratory* (Wielka Brytania) opracował rekomendacje, które mają na celu zwiększenie skuteczności wykrywania/unikania IEDs w warunkach wojennych (Cornes i in., 2019). Zadaniem przeszukiwania (np. na potrzeby policji kryminalnej czy wojska) zajęli się również Riggs i in. (2017), którzy eksperymentalnie oceniali, który ze sposobów wyszukiwania obiektów (monety znajdujące się w trawie) jest optymalny. Kolejnym wytłumaczeniem otrzymanych wyników może być niedoskonałość metodologiczna - do grupy helioksovej zrekrutowano dziewięciu żołnierzy, a przy tak nielicznej grupie włączenie nawet jednego, kolejnego badanego może istotnie wpłynąć na średnią. Niemniej, wojska specjalne cechują się niewielką liczebnością, co sprawia, iż nie było możliwym pozyskanie większej grupy badawczej.

---

<sup>44</sup> IEDs, ang. *improvised explosive devices*.

Wskaźnik zakłóceń (WZ) był niemożliwy do wyliczenia. Ze względu na ekstremalnie trudne warunki badawcze - nagrywanie telefonem komórkowym wnętrza komory hiperbarycznej przez bulaj (niewielkie „okienko”, które wymuszało wąski kąt nagrywania), mając jednocześnie na uwadze dużą gęstość powietrza<sup>45</sup> przy ciśnieniu 5 ATA (nieostry obraz), nie było pewne czy konkretne czasy wykonania testów (ocenie *post-factum* w trakcie oglądania nagrania z eksperymentu) odpowiadają konkretnym osobom (które sygnalizowały ukończenie testu poprzez wyciągnięcie ręki do przodu). Pomimo licznych prób, opisywane warunki eksperymentalne uniemożliwiły rzetelną analizę wyników.

Podsumowując, żołnierze wojsk specjalnych ze względu na fakt, iż posiadają stosowane uprawnienia do wykonywania głębokich nurkowań z użyciem mieszanin helowo-tlenowych, a także legitymują się dużym doświadczeniem w przebywaniu w warunkach „suchego” nadciśnienia są optymalną grupą, którą można zrekrutować do hiperbaryczno-helioksowych grup kontrolnych. Z drugiej strony, należy postawić hipotezę, iż u komandosów występuje ponadprzeciętnie rozwinięta zdolność do przeszukiwania. Omawiane zagadnienie jest kolejnym czynnikiem pokazującym jak wiele aspektów należy uwzględnić w trakcie planowania i przeprowadzania badań w warunkach nadciśnienia. Przywoływanej hipotezie przeczy jednak brak istotnych różnic międzygrupowych uzyskanych w testach oceniających przeszukiwanie w trybie intensywnym i ekstensywnym (Test Zegarków i Test Liczb Losowych). Wydaje się, iż testy oceniające przeszukiwanie należy w przyszłości wykonywać w schemacie badawczym z powtarzaniem pomiarem (ekspozycja na hiperbaryczne powietrze, a następnie ekspozycja na helioks lub odwrotnie), na grupie obejmującej żołnierzy wojsk specjalnych i z użyciem okulografu. Otwartym pozostaje jednakże pytanie o możliwość trafnej ekstrapolacji wyników uzyskanych z użyciem komandosów jako osób badanych na cywilnych płetwonurków. Bardzo niewielu płetwonurków nie służących w wojsku posiada uprawnienia do wykonywania głębokich nurkowań z użyciem mieszanin helowo-tlenowych, a jeszcze mniej legitymuje się odpowiednim doświadczeniem obejmującym przebywanie w warunkach „suchej” hiperbarii. Wreszcie - nie jest możliwe przeprowadzić badanie na grupie cywilnej ze względu na fakt, iż komora hiperbaryczna umożliwiająca sprężenie przy użyciu helioksu stanowi wyposażenie wojsk specjalnych, co wyklucza możliwość pozyskania informacji o jej lokalizacji czy typie przez osoby nieuprawnione.

---

<sup>45</sup> Komora hiperbaryczna była wypełniona powietrzem, a badani oddychali mieszaniną helowo-tlenową przez szczelne maski twarzowe.

Badani w warunkach hiperbarii helioksowej (5 ATA), w porównaniu do grupy kontrolnej, popełnili istotnie więcej prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A (przy, jak już wspomniano, nieistotnej międzygrupowej różnicy dotyczącej czasu wykonywania wspomnianego testu). Istotnie większa liczba prawie błędów podczas wykonywania CTT-1 A może świadczyć o zaburzeniu procesu hamowania. Wpływ stresu na funkcjonowanie tej zmiennej nie jest w pełni zrozumiany. Przykładowo, Schwabe, Höffken, Tegenthoff i Wolf (2013) wykazali, iż stres polepsza funkcjonowanie wspomnianej zmiennej, a Sängler, Bechtold, Schoofs, Blaszkewicz i Wascher (2014) opublikowali badanie, w którym otrzymano wyniki przeciwne. Należy zatem postawić hipotezę, iż różne rodzaje stresu, w trakcie badań z użyciem różnej metodologii mogą powodować różnice w otrzymanych wynikach. Stres wywołany ekspozycją hiperbaryczną z użyciem nienarkotycznej mieszaniny oddechowej (5 ATA) może zaburzać proces hamowania, co wymaga potwierdzenia w toku kolejnych badań. Należy zwrócić uwagę, iż liczba prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-2 A nie była istotnie różna międzygrupowo. W tym miejscu warto do analizy teoretycznej włączyć kolejną zmienną niezależną - poziom leku. Vytal, Cornwell, Letkiewicz, Arkin i Grillon (2013) przeprowadzili eksperyment w trakcie którego badani wykonywani test *n-back* (1, 2, and 3-back) w komfortowych warunkach (bez ryzyka otrzymania wstrząsu elektrycznego), a także w warunkach lęku przed otrzymaniem wstrząsu. Małe i średnie obciążenie poznawcze (ang. *low and medium-load, 1-back* i *2-back*) okazało się bardziej podatne na wpływ lęku (ang. *anxiety-related disruption*), niż duże obciążenie (ang. *high-load, 3-back*). Jakkolwiek w cytowanym eksperymencie oceniany był wpływ lęku na odświeżanie informacji w pamięci roboczej, a nie na hamowanie, możliwym jest, iż małe obciążenie poznawcze w trakcie wykonywania CTT-1 A było bardziej podatne na zaburzenia spowodowane lękiem (wywołanym przebywaniem w zagrażających warunkach otoczenia), niż zadanie indukujące większe obciążenie (CTT-2 A), co tłumaczy uzyskane wyniki. Jak już wspomniano, poziom lęku może być czynnikiem, który powoduje różnice w wynikach uzyskanych w trakcie badań w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych (Hobbs i Kneller, 2011). Możliwym jest więc, iż w warunkach hiperbarii helioksowej zmiennymi wpływającymi na wykonanie testów jest interakcja lęk vs. stres (a w warunkach hiperbarii powietrznej - interakcja lęk vs. stres vs. narkoza azotowa). W przyszłości warto rozważyć prowadzenie badań w trzech warunkach środowiskowych (normobaria, hiperbaria helioksowa i hiperbaria powietrzna), wraz z oceną poziomu lęku (kwestionariusze) i poziomu stresu (poziom kortyzolu w ślinie), celem oceny wpływu

wielowymiarowej interakcji zmiennych środowiskowych i psychologicznych na funkcjonowanie w warunkach nadciśnienia.

Badani w warunkach hiperbarii helioksowej popełnili także istotnie więcej poprawionych błędów kolejności w trakcie wykonywania CTT-2 A (błąd polegający na niezachowaniu kryterium rosnącego szeregu liczbowego, przy zachowaniu naprzemienności kolorystycznej, który został zauważony i poprawiony). Błąd ten może świadczyć o zaburzeniu procesu hamowania, a także odświeżania informacji w pamięci roboczej. Analogicznie do wpływu stresu na proces hamowania, oddziaływanie tej zmiennej na funkcjonowanie pamięci roboczej nie jest w pełni poznane (Shields, Sazma i Yonelinas, 2016). Ponownie - należy postawić hipotezę, iż lęk i stres spowodowany ekspozycją hiperbaryczną z użyciem nienarkotycznej mieszanki oddechowej (5 ATA) może wpływać na funkcje wykonawcze (hamowanie i odświeżanie informacji w pamięci roboczej). Interpretując ten wynik warto także uwzględnić możliwość losowej pomyłki badanego - w dziewięcioosobowej grupie helioksowej błąd wystąpił raz, a przy trzydziestoosobowej grupie normobarycznej nie wystąpił ani razu.

Najważniejszym, ogólnym wnioskiem z badań wydaje się być fakt, iż w warunkach hiperbarycznych ekspozycji helioksowych występują pozanarkotyczne czynniki wpływające na funkcjonowanie poznawcze (por. modele środowiskowe). Wniosek ten jest spójny z wnioskami, które wysnuili Biersner i Cameron (1970), a także Fowler i Ackles (1975).

Do uchybień metodologicznych należy zaliczyć fakt, iż grupy normobaryczne i hiperbaryczno-helioksowe różniły się istotnie pod kątem wieku ( $M_{\text{normobaria}} = 31,6$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,8$  vs.  $M_{\text{helioks}} = 39,77$ ,  $SD_{\text{helioks}} = 4,46$ ). Mało prawdopodobnym jest jednak, aby wspomniane różnice międzygrupowe mogłyby mieć istotny wpływ na dane otrzymane w obu grupach (D'Elia i in., 2012; Łojek i Stańczak, 2012). Co więcej, nie oceniano poziomu lęku zarówno w warunkach normalnych, jak i hiperbarycznych, co sprawia, iż omawiane powyżej rozważania należy traktować jako hipotezy wstępne, które mogą stanowić asumpt do ich eksperymentalnego potwierdzenia lub odrzucenia w toku przyszłych badań (por. dalsza część tekstu).

### **16.9.3 Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - normobaria vs. helioks vs. hiperbaryczne powietrze**

Grupy badane w warunkach hiperbaryczno-helioksowych i hiperbaryczno-powietrznych nie różniły się istotnie pod względem czasu potrzebnego na wykonanie CTT-1

A. CTT-2 A był wykonywany istotnie szybciej w warunkach ekspozycji na helioks ( $M_{\text{helioks}} = 57,33$  s,  $SD_{\text{helioks}} = 11,34$  vs.  $M_{\text{powietrze}} = 83,2$  s,  $SD_{\text{powietrze}} = 27,43$ ; różnica średnich: 25,87 s). Analizę potencjalnych czynników wpływających na istotnie większą szybkość wykonania CTT-2 A w grupie helioksowej, jak i czynniki wpływające na niemożność oceny wskaźnika zakłóceń dla grup hiperbaryczno-helioksowych i hiperbaryczno-powietrznych zamieszczono we wcześniejszej części tekstu. Grupy oddychające helioksem i powietrzem w nadciśnieniu nie różniły się istotnie pod względem jakichkolwiek błędów, które badani mogli popełnić w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A.

Brak normobarycznej grupy kontrolnej skłaniałby ku hipotezie, iż w trakcie ekspozycji na hiperbaryczne powietrze, w porównaniu do warunków hiperbaryczno-helioksowych, ma miejsce kompensacyjne spowolnienie wykonywania CTT-2 A w warunkach wpływu narkozy azotowej, celem zwiększenia poprawności (efekt przetargu szybkość-poprawność). Istotnie szybsze wykonywanie CTT-2 A w trakcie pobytu w nadciśnieniu przy użyciu mieszaniny helowo-tlenowej, w porównaniu do warunków normalnych, jak również brak istotnych różnic międzygrupowych dotyczących czasu wykonywania wspomnianego testu w grupach normobarycznych i hiperbaryczno-powietrznych przeczy jednak tej interpretacji. Otrzymane wyniki stanowią argument za przeprowadzaniem badań w trzech środowiskach badawczych: w normobarii, w hiperbarii helioksowej i hiperbarii powietrznej. Ponadprzeciętna zdolność żołnierzy wojsk specjalnych do przeszukiwania może być zmienną ukrytą, która odpowiada za charakter otrzymanych danych, a odkrycie tej zależności przy porównywaniu dwóch grup badanych w nadciśnieniu (hiperbaryczny helioks vs. hiperbaryczne powietrze) byłoby niemożliwe.

Grupa badana w hiperbarii powietrznej, w porównaniu do warunków normobarycznych popełniła istotnie więcej prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A, jak również istotnie więcej niepoprawionych błędów koloru<sup>46</sup> podczas rozwiązywania CTT-2 A. Z drugiej strony, badani w warunkach hiperbarii helioksowej, w porównaniu do warunków normobarycznych, popełnili istotnie więcej prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A, a także poprawionych błędów kolejności<sup>47</sup> w trakcie rozwiązywania CTT-2 A. Grupy hiperbaryczno-powietrzne i hiperbaryczno-helioksowe z kolei nie różniły się istotnie pod kątem

---

<sup>46</sup> Połączenie dwóch kótek o niewłaściwych kolorach (np. żółte kółko z cyfrą 3 z żółtym kółkiem z cyfrą 4 pomimo, iż powinno nastąpić połączenie z różowym kółkiem z cyfrą 4), które nie zostało zauważone i poprawione.

<sup>47</sup> Połączenie dwóch kótek przy niezachowaniu rosnącego ciągu liczbowego, które zostało zauważone i poprawione.

liczby błędów w trakcie rozwiązywania wspomnianych testów. Po raz kolejny należy podkreślić, iż warto rozważyć w przyszłości prowadzenie badań w trzech warunkach środowiskowych (normobaria, hiperbaria helioksowa i hiperbaria powietrzna), wraz z oceną poziomu lęku (kwestionariusze) i poziomu stresu (poziom kortyzolu w ślinie) celem oceny wpływu wielowymiarowej interakcji zmiennych środowiskowych i psychologicznych (lęk i stres), a także wpływu narkozy na funkcjonowanie w warunkach nadciśnienia. Porównywanie wyników uzyskanych w normobarii i hiperbarii helioksowej mogłoby odpowiadać na pytania o wpływ specyficznych warunków środowiskowych, a także interakcji lęku i stresu na badane zmienne poznawcze. Ocena wyników pozyskanych w warunkach normalnych i w warunkach hiperbaryczno-powietrznych mogłaby pomóc oszacować wpływ środowiska hiperbarycznego, a także interakcji lek *vs.* stres *vs.* narkoza azotowa na poznanie. Wreszcie, ocena międzygrupowych różnic występujących w grupach oddychających helioksem lub powietrzem w nadciśnieniu mogłaby pomóc odkryć izolowaną rolę narkozy azotowej (lub interakcję narkozy, lęku i stresu) w zaburzeniach danych składowych aparatu poznawczego. Badanie grup w warunkach normobarycznych i hiperbaryczno-powietrznych, a następnie wyciąganie wniosków o zaburzeniu danej zmiennej poznawczej wyłącznie przez pryzmat narkozy azotowej wydaje się nadmiernie redukcjonistyczne i nietrafne. W tym miejscu warto zwrócić uwagę, iż tego typu interpretacja występuje w absolutnej większości artykułów traktujących o narkozie azotowej.

Mając na uwadze otrzymane dane można wywnioskować, iż ekspozycja na hiperbaryczny helioks (5 ATA), w porównaniu do grupy badanej w warunkach normalnych może negatywnie wpływać na proces hamowania i odświeżania informacji w pamięci roboczej. Z kolei przebywanie w warunkach narkozy azotowej (5 ATA) może zaburzać funkcjonowanie hamowania, odświeżania informacji w pamięci roboczej i przerzutność uwagi. Co więcej, narkoza azotowa może upośledzać wykonywanie czynności podwójnych, a także mieć istotny wpływ na wykonywanie zadań bardziej złożonych, w porównaniu do zadań prostszych. Odmienny wynik uzyskano w grupie hiperbaryczno-helioksowej - zadania mniej złożone (CTT-1 A) wydają się być bardziej podatne na zaburzenia, niż zadania trudniejsze (CTT-2 A). W porównaniu do warunków normalnych, nie stwierdzono, aby grupy badane w warunkach nadciśnienia, niezależnie od użytego czynnika oddechowego, kompensacyjnie spowalniały wykonywanie testów, celem zniwelowania wpływu niekorzystnych warunków środowiskowych i psychologicznych. Wpływ interakcji specyficznych czynników środowiskowych, lęku i stresu w trakcie ekspozycji hiperbaryczno-helioksowych, a także

interakcji środowiska hiperbarycznego, lęku, stresu i narkozy azotowej (kanon jedynej różnicy: brak narkozy vs. narkoza) był porównywalny w obu grupach, co oznacza, iż czynniki występujące w obu środowiskach badawczych w nieistotnie różny sposób wpływały na przeszukiwanie i funkcje wykonawcze. Otrzymane wyniki można interpretować na trzy sposoby: nie występuje interakcja narkoza azotowa vs. stres lub wspomniana interakcja występuje, ale testy CTT-1 A i CTT-2 A były zbyt mało czułe aby wychwycić różnice w ich wykonaniu w dwóch środowiskach badawczych lub też interakcja lęk vs. stres występuje, ale wpływa na konkretne zmienne poznawcze, przy pomijalnym wpływie na inne.

Po raz kolejny należy również podkreślić, iż w toku badań przeprowadzanych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej nie oceniano poziomu lęku (za pomocą kwestionariuszy), ani poziomu stresu (za pomocą pomiaru stężenia kortyzolu w ślinie). Jakkolwiek brak oceny wspomnianych parametrów jest istotną niedoskonałością metodologiczną opisywanych badań, zrealizowany plan badawczy był pewnym kompromisem pomiędzy optimum metodologicznym, a technicznymi i logistycznymi aspektami możliwości realnego i bezpiecznego wykonania planu eksperymentalnego. Ze względu na stopień skomplikowania procedury badawczej, jak i niedoświadczenie (w danej chwili) autora w prowadzeniu badań w warunkach nadciśnienia - zrezygnowano z pomiaru przywoływanych zmiennych. Z drugiej strony, lękotwórczy potencjał ekspozycji hiperbarycznych jest dobrze poznanym zjawiskiem (Hobbs i Kneller, 2011). Dysponujemy także pracami opisującymi charakterystykę stymulacji adrenergicznej występującej u badanych poddanych wpływowi nadciśnienia (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011). W toku kolejnych badań warto rozważyć redukcję planu eksperymentalnego (ograniczenie liczby ocenianych zmiennych poznawczych), z jednoczesnym włączeniem pomiaru lęku i stresu.

#### **16.9.4 Pamięć długotrwała**

Celem wyprowadzenia wniosków końcowych, interpretacja wyników zostanie przedstawiona w kolejności: zniekształcenia pamięciowe, wpływ narkozy azotowej na charakterystykę odpamiętanego materiału pod kątem walencji emocjonalnej, liczba przypomnianych słów w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, a także zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria.

#### **16.9.4.1 Liczba błędnie odpamiętanych słów**

Grupy hiperbaryczno-powietrzne i hiperbaryczno-helioksove nie różniły się istotnie pod kątem liczby odpamiętanych słów, które nie występowały w materiale do przedstawionym do zapamiętania. Nie stwierdzono zatem istnienia zjawiska zniekształceń pamięciowych, zarówno w schemacie zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria. Dyskusja z piśmiennictwem, jak i wnioski dotyczące zagadnienia zniekształceń pamięciowych spowodowanych narkozą azotową zostały przedstawione we wcześniejszej części tekstu (w trakcie omawiania Badania 2a i 2b).

#### **16.9.4.2 Walencja emocjonalna odpamiętanego materiału**

Na potrzeby dyskusji o wpływie ekspozycji hiperbarycznej na zapamiętywanie i przypominanie słów o określonej walencji emocjonalnej, warto ponownie przywołać wyniki jakie uzyskał Lund i in. (1999) i Tikkinen i in. (2011). Cytowani badacze stwierdzili istotnie większy poziom stresu przed ekspozycją hiperbaryczną, w porównaniu do przebywania w warunkach nadciśnienia i po dekompresji (w normobarii). Wydaje się, zatem iż wyniki uzyskane w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, a także zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria należy interpretować rozłącznie. Celem bardziej klarownego przedstawienia otrzymanych wyników, w poniższej tabeli zamieszczono sumaryczne porównanie wyników uzyskanych w trzech środowiskach badawczych (normobaria, hiperbaria helioksova i hiperbaria powierzna).



**Tabela 41**

Porównanie wyników uzyskanych w trakcie zapamiętywania i przypominania w normobarii (normobaryczna grupa kontrolna) i w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria (5 ATA), w zależności od użytego czynnika oddechowego (powietrze lub helioks)

Porównywane grupy (grupa kontrolna/eksperymentalna)	Lista A			Lista B		
	Poz	Neu	Neg	Poz	Neu	Neg
Normobaria vs. hiperbaryczne powietrze	0	↓	0	0	0	0
Normobaria vs. helioks	↓	0	↓	0	↑	0
Helioks vs. hiperbaryczne powietrze	0	0	0	0	↓	0

↑ - istotnie lepsze przypominanie słów w grupie eksperymentalnej, w porównaniu do grupy kontrolnej

0 - brak istotnych różnic pomiędzy grupą eksperymentalną i grupą kontrolną

↓ - istotnie gorsze przypominanie słów w grupie eksperymentalnej, w porównaniu do grupy kontrolnej

Poz - liczba odpamiętanych słów o pozytywnej walencji emocjonalnej

Neu - liczba odpamiętanych słów o neutralnej walencji emocjonalnej

Neg - liczba odpamiętanych słów o negatywnej walencji emocjonalnej

Analizę stwierdzonych różnic pomiędzy grupą normobaryczną i hiperbaryczno-powietrzną zamieszczono we wcześniejszej części pracy (w trakcie omawiania wyników Badań 2a i 2b).

W jednej z grup hiperbaryczno-helioksowych uzyskano istotnie pogorszenie przypominania słów o pozytywnej i negatywnej walencji emocjonalnej. Identyczny rozkład wyników uzyskał w swoim badaniu Kuhlmann i in. (2005). Należy jednakże wspomnieć, iż grupa badawcza w cytowanym eksperymencie była narażona na inny rodzaj stresu (ekspozycja hiperbaryczna z użyciem nienarkotycznej mieszanki oddechowej vs. złożony stresor społeczny indukowany wykonywaniem *Trier Social Stress Test*). Przeciwnie, w kolejnej grupie nie zaobserwowano wspomnianej tendencji, stwierdzono za to istotnie lepsze przypominanie

słów neutralnych emocjonalnie. W analizowanym piśmiennictwie dotyczącym wpływu stresu na pamięć nie znaleziono badania w którym otrzymano by tożsame wyniki.

Mając na uwadze dane uzyskane w warunkach ekspozycji na hiperbaryczny helioks i hiperbaryczne powietrze (zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria) wydaje się, iż materiał neutralny emocjonalnie może być szczególnie podatny na zaburzenia spowodowane narkozą azotową (lub interakcją stres *vs.* narkoza), co może być jednym z czynników wpływających na globalne upośledzenie procesów pamięciowych w warunkach hiperbarycznych. Z drugiej strony, w innej grupie nie zaobserwowano wspomnianej tendencji.

W poniższej tabeli zamieszczono sumaryczne porównanie wyników uzyskanych w trzech środowiskach badawczych (normobaria, hiperbaria helioksova i hiperbaria powierzna). Grupy eksperymentalne zapamiętywały materiał w hiperbarii (5 ATA) i przypominały w normobarii.

**Tabela 42**

Porównanie wyników uzyskanych w trakcie zapamiętywania i przypominania w normobarii (normobaryczna grupa kontrolna) i w sekwencji zapamiętywanie-hiperbaria (5 ATA) i przypominanie-normobaria, w zależności od użytego czynnika oddechowego

Porównywane grupy (grupa kontrolna/eksperymentalna)	Lista A			Lista B		
	Poz	Neu	Neg	Poz	Neu	Neg
Normobaria <i>vs.</i> hiperbaryczne powietrze	0	↓	0	0	↓	↓
Normobaria <i>vs.</i> helioks	0	0	↓	↑	0	0
Helioks <i>vs.</i> hiperbaryczne powietrze	0	↓	0	↓	↓	↓

↑ - istotnie lepsze przypominanie słów w grupie eksperymentalnej, w porównaniu do grupy kontrolnej

0 - brak istotnych różnic pomiędzy grupą eksperymentalną i grupą kontrolną

↓ - istotnie gorsze przypominanie słów w grupie eksperymentalnej, w porównaniu do grupy kontrolnej

Poz - liczba odpamiętanych słów o pozytywnej walencji emocjonalnej

Neu - liczba odpamiętanych słów o neutralnej walencji emocjonalnej

Neg - liczba odpamiętanych słów o negatywnej walencji emocjonalnej

Analizę stwierdzonych różnic pomiędzy grupą normobaryczną i hiperbaryczno-powietrzną zamieszczono we wcześniejszej części pracy (w trakcie omawiania wyników Badań 2a i 2b).

W jednej z grup hiperbaryczno-helioksowych zaobserwowano istotnie gorsze przypominanie słów o negatywnej walencji emocjonalnej. W drugiej grupie z kolei zaobserwowano istotnie lepsze przypominanie słów pozytywnych. W analizowanym piśmiennictwie dotyczącym wpływu stresu na pamięć nie znaleziono badań w którym otrzymano by tożsame wyniki.

Podsumowując, stres wywołany ekspozycją hiperbaryczną w komorze przy użyciu nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej powoduje zmianę charakterystyki odpamiętanego materiału pod kątem walencji emocjonalnej. Co więcej, zmiana ta jest różna dla sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i dla zapamiętywania w warunkach hiperbarycznych i przypominania w warunkach normalnych. Wyniki te pozwalają wysnuć hipotezę, iż w toku ekspozycji hiperbarycznej różne nasilenie stresu różnie wpływa na procesy pamięciowe. Interpretacja tego wyniku została oparta na pracach Lunda i in. (1999) i Tikkinena i in. (2011), którzy wykazali, iż w toku trwania sprężenia poziom kortyzolu ulega istotnemu zmniejszeniu. Uzyskane dane po raz kolejny wskazują również, iż podczas ekspozycji hiperbarycznych występują pozanarkotyczne czynniki wpływające na procesy pamięciowe (między innymi stres).

Wyniki otrzymane w grupach badanych w nadciśnieniu (hiperbaryczne powietrze vs. hiperbaryczny helioks) mogą zarówno świadczyć o szczególnej podatności neutralnego emocjonalnie materiału na zaburzenia spowodowane narkozą (lub interakcją stres vs. narkoza), jak i o tym, że materiał werbalny może być istotnie gorzej przypominany, niezależnie od jego walencji. Również i w tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, iż charakterystyka wyników testów pamięciowych (pod kątem walencji emocjonalnej zapamiętanego materiału) była różna dla grup badanych w schemacie zapamiętywanie-normobaria i przypominanie hiperbaria, jak i w sekwencji zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria. Niemniej, w trzech z czterech grup upośledzeniu uległo przypominanie słów neutralnych, co jak wspomniano może być jednym z czynników odpowiedzialnych za globalne upośledzenie procesów pamięciowych w trakcie powietrznych ekspozycji hiperbarycznych.

W tym miejscu należy dodać, iż grupy hiperbaryczno-helioksowe i hiperbaryczno-powietrzne teoretycznie powinny różnić się wyłącznie jednym czynnikiem (brak lub obecność narkozy azotowej), a poziom stresu związanego z ekspozycją hiperbaryczną nie powinien

powodować międzygrupowych różnic w funkcjonowaniu pamięci. Jednakże w badaniu Russella i Steinberg (1955) wykazano, iż normobaryczny podtlenek azotu niweluje wpływ tej zmiennej na procesy pamięciowe (zarówno N<sub>2</sub>O, jak stres osobno powodują upośledzenie pamięci, jednakże dochodzi od zniwelowania tego efektu gdy oba czynniki występują równocześnie). Mając na uwadze kontrowersje dotyczące możliwości ekstrapolacji wyników uzyskanych za pomocą normobarycznego N<sub>2</sub>O na warunki narkozy azotowej, warto podkreślić, iż oba czynniki wpływają depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy, co sprawia, iż wyniki uzyskane za pomocą podtlenku azotu i ich interpretacja mogą stać się hipotezami dotyczącymi wpływu narkozy azotowej na pamięć. Do chwili obecnej nie przeprowadzono ani jednego badania, które oceniałoby wpływ hiperbarycznego azotu na potencjalną redukcję wpływu stresu na procesy pamięciowe. Przeprowadzenie takiego badania jest jednak problematyczne, gdyż samo oczekiwanie na sprężenie, jak również ekspozycja hiperbaryczna, niezależnie od użytej mieszaniny oddechowej, powoduje wydzielanie kortyzolu (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011). Potencjalnym sposobem, aby lepiej poznać zagadnienie interakcji stres *vs.* narkoza mogłoby być sprężenie badanych do określonego ciśnienia przy użyciu powietrza jako czynnika oddechowego (grupa kontrolna). Grupa eksperymentalna byłaby sprężana do tożsamego ciśnienia przy użyciu powietrza, po wcześniejszej podaży badanym leku charakteryzującego się antyadrenergicznym profilem działania (z odpowiednim wyprzedzeniem, w zależności od farmakokinetyki danej substancji). Istniałaby w ten sposób możliwość uzyskania wyników dotyczących wpływu interakcji stres *vs.* narkoza azotowa (grupa kontrola) i izolowanego wpływu narkozy (częściowa blokada receptorów adrenergicznych, por. Roozendaal, Bohus i McGaugh, 1996) na procesy pamięciowe. Jednakże ekspozycja hiperbaryczna nasila działanie niektórych leków (Smith, 2011), co sprawia, iż badanie takie znacząco wykraczałoby poza dopuszczalne ryzyko przeprowadzania eksperymentów w nadciśnieniu. Możliwym byłoby również porównanie grupy płetwonurków posiadających duże doświadczenie związane z przebywaniem w warunkach „suchej” hiperbarii z grupą sprężaną w komorze po raz pierwszy. Wydaje się, iż doświadczeni płetwonurkowie mogliby odczuwać mniejszy stres, niż płetwonurkowie sprężani po raz pierwszy. Warto jednak wspomnieć, iż w badaniach oceniających poziom stresu u zawodowych płetwonurków stwierdzono, iż stres jest zawsze obecny przed nurkowaniem (i jest tym większy, im głębsze ma być wykonywane nurkowanie (Zarezadeh i Azarbayjani, 2014)), a badanych charakteryzuje duża zmienność osobnicza pod kątem poziomu kortyzolu (Tikkinen i in., 2011; Zarezadeh i Azarbayjani, 2014). Dobieranie badanych do grup kontrolnych i eksperymentalnych pod kątem

doświadczenia nurkowego i oczekiwanie odpowiednich średnich wartości kortyzolu w trakcie eksperymentu może więc spełniać kryteria myślenia życzeniowego.

Podsumowując, możliwość precyzyjnego określenia wpływu interakcji stres *vs.* narkoza azotowa jest metodologicznie ograniczona, jednakże charakter uzyskanych danych w toku eksperymentów przeprowadzonych na potrzeby niniejszej rozprawy może skłaniać do wniosku, iż omawiana interakcja może zachodzić. Otrzymane wyniki, jakkolwiek niespójne, dostarczają danych pozwalających wysnuć hipotezę, iż zarówno wpływ zmiennych środowiskowych, wraz z narkozą azotową współwystępującą z lękiem i stresem (hiperbaryczne powietrze), jak i wpływ lęku, stresu i środowiska hiperbarycznego (helioks), w porównaniu do braku tych czynników (zapamiętywanie i przypominanie w normobarii) powoduje istotne różnice w liczbie zapamiętanych słów o określonej walencji emocjonalnej, co może być składową zaburzeń pamięci w trakcie pobytu w nadciśnieniu. Istotną różnicą charakterystykę przypominanego materiału (pod kątem walencji emocjonalnej) zaobserwowano także w trakcie porównywania wyników uzyskanych w warunkach hiperbarii helioksovej i hiperbarii powietrznej. Ze względu na małe grupy badawcze, a także brak obiektywnego poziomu lęku i stresu niemożliwym jest przeprowadzenie rzetelnej, wielowymiarowej analizy wpływu różnego nasilenia lęku i stresu (przed, w trakcie i po ekspozycji hiperbarycznej), a także narkozy azotowej na zapamiętywanie i przypominanie słów o określonej walencji emocjonalnej. Zagadnienie wpływu interakcji czynników środowiskowych i psychologicznych na zapamiętywanie i przypominanie materiału werbalnego o określonej walencji z równoczesną oceną poziomu lęku (kwestionariusze) i stresu (poziom kortyzolu w ślinie) wymaga przeprowadzenia dalszych badań w przyszłości, na większych grupach badawczych.

Warto również zwrócić uwagę na jeszcze jeden czynnik, który potencjalnie może wpływać na zapamiętywanie i przypominanie słów o określonej walencji emocjonalnej w trakcie ekspozycji na nadciśnienie. Löfdahl i in. (2013) wykazali, iż w porównaniu do grupy kontrolnej, w warunkach hiperbaryczno-powietrznych obrazy nacechowane negatywnie były oceniane jako mniej negatywne, a nacechowane pozytywnie - jako bardziej pozytywne. Możliwym jest, iż efekt ten występuje również w przypadku słów, co wymaga empirycznego zbadania. Zakładając, iż efekt występuje - narkoza azotowa mogłaby wpływać na odbiór słów przez badanych (tj. na ocenę walencji emocjonalnej), a przez to modulować zapamiętywanie i przypominanie słów o danym nacechowaniu emocjonalnym.

### 16.9.4.3 Liczba odpamiętanych słów

Porównując wyniki uzyskane w trakcie Badania 2a i 3a (hiperbaryczny helioks *vs.* hiperbaryczne powietrze) nie stwierdzono istotnych różnic międzygrupowych w liczbie odpamiętanych słów, zarówno w sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria. Przeciwnie, mając na uwadze dane pozyskane w trakcie Badań 2b i 3b (hiperbaryczny helioks *vs.* hiperbaryczne powietrze) stwierdzono zarówno istotnie gorsze przypominanie materiału w warunkach narkozy azotowej, który został zapamiętany w normobarii, jak i istotne upośledzenie przypominania słów w warunkach normalnych, które zostały zapamiętane w hiperbarii powietrznej. Uzyskane dane sugerują, iż ciśnienie parcjalne azotu ( $ppN_2$ ) występujące w trakcie komorowej ekspozycji na hiperbaryczne powietrze przy ciśnieniu 5 ATA ( $ppN_2 = 3,9$  ATA) może powodować zarówno zaburzenie przypominania materiału w warunkach hiperbarycznych, który został zapamiętany w normobarii, jak i upośledzenie przypominania materiału w warunkach normalnych, który został zapamiętany w nadciśnieniu.

Niemiej, tendencja do zaburzenia sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria nie musi się ujawniać, co może oznaczać, iż ciśnienie parcjalne azotu wynoszące  $\sim 3,9$  ATA może być graniczną wartością przy której następuje upośledzenie odtwarzania materiału, który został zapamiętany w warunkach normalnych. Paralelnym wytłumaczeniem zaburzenia omawianej sekwencji może być wpływ narastającej narkozy azotowej w trakcie presuryzacji na konsolidację śladu pamięciowego. Uzyskane dane nie pozwalają jednakże na odpowiedź na pytanie, która część procesu pamięciowego (konsolidacja śladu pamięciowego, przypominanie lub też obie składowe) ulega zaburzeniu pod wpływem hiperbarycznego azotu. Jak już wspomniano, do chwili obecnej tylko w jednym badaniu (Fowler i Ackles, 1975) wykazano upośledzenie przypominania słów w warunkach hiperbarii powietrznej, które zostały zapamiętane w normobarii. Warto jednakże zwrócić uwagę, iż w cytowanym eksperymencie badani przypominali słowa w warunkach 10 ATA (90 m ppw), co znacznie przekracza aktualnie obowiązujący dopuszczalny limit głębokościowy dla nurkowań powietrznych. Tetzlaff i in. (1998) prowadził badanie w warunkach normobarycznych i w warunkach 6 ATA, nie wykazując aby przypominanie słów w warunkach hiperbarycznych, które zostały zapamiętane w normobarii było upośledzone. Należy jednak podkreślić, iż uczestnikami badania Tetzlaffa i in. (1998) byli pracownicy komory hiperbarycznej, który posiadali bogate doświadczenie obejmujące liczne ekspozycje hiperbaryczne w komorze. Do Badania 2a i 2b zrekrutowano osoby nieposiadające wcześniejszego doświadczenia w

przebywaniu w warunkach „suchej” hiperbarii (za wyjątkiem jednego badanego, szacunkowa liczba sprężen w komorze: ~60). Podobnie jak w badaniu Fowlera i Acklesa (1975), brak doświadczenia mógł wpływać na większy poziom stresu i lęku u badanych, co w konsekwencji mogło doprowadzić do zaburzenia sekwencji zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, pomimo ciśnienia mniejszego o 1 ATA, w porównaniu do badania Tetzlaffa i in. (1998). Uzyskane dane sugerują, iż interpretowanie zaburzeń procesów pamięciowych w trakcie pobytu w hiperbarii wyłącznie przez pryzmat narkozy azotowej jest nadmiernie redukcjonistyczne i nietrafne. Warto dodać, iż omawiany sposób interpretacji wyników dominuje (z nielicznymi wyjątkami; por. Egstrom, Weltman i Baddeley, 1972) w absolutnej większości artykułów dotyczących zagadnienia narkozy azotowej. Z tego powodu bardziej szczegółowa interpretacja uzyskanych danych została zamieszczona w dalszej części tekstu, w trakcie omawiania autorskiego modelu lęk-stres-narkoza-środowisko, który na płaszczyźnie teoretycznej próbuje wieloczynnikowo tłumaczyć upośledzenie funkcjonowania pamięci zarówno podczas ekspozycji hiperbarycznych, a jak i w okresie okołоекspozycyjnym.

W jednej z grup stwierdzono zaburzenie kodowania materiału w warunkach 5 ATA, jednakże w drugiej grupie uzyskano wynik przeciwny. Uzyskane dane sugerują, iż  $ppN_2 = \sim 3,9$  ATA może być graniczną wartością przy której może dochodzić do istotnego wpływu narkozy azotowej na proces zapamiętywania. Pomijając różnice metodologiczne, otrzymane wyniki są spójne z wynikami jakie uzyskał Philp i in. (1989). Cytowani autorzy stwierdzili zaburzenie funkcjonowania pamięci długotrwałej podczas zapamiętywania materiału w warunkach 4,6 ATA ( $ppN_2 = 3,58$ ). Możliwym jest, iż w omawianej sekwencji za upośledzenie przypominania materiału w warunkach normalnych, który został zapamiętany w nadciśnieniu odpowiada zarówno narkoza azotowa występująca w trakcie zapamiętywania, jak i narkoza występująca w trakcie dekompresji, która interferuje z konsolidacją śladu pamięciowego. Uzyskane dane nie pozwalają jednakże na odpowiedź na pytanie, która część procesu pamięciowego (zapamiętywanie, konsolidacja śladu pamięciowego lub też obie składowe) ulega zaburzeniu pod wpływem hiperbarycznego azotu.

Podkreślić należy, iż niektóre omawiane powyżej istotne wyniki nie osiągnęły krytycznej siły efektu, co implikuje ostrożność przy ich interpretacji. Potrzebne są dalsze badania, aby zweryfikować wpływ narkozy azotowej (występującej w trakcie powietrznych ekspozycji hiperbarycznych) czy izolowanej roli stresu (indukowanego w środowisku hiperbarii helowo-tlenowej) na wybrane zmienne poznawcze.

## 17 Model lęk-stres-narkoza

Hobbs i Kneller (2011), opierając się na pracach Hellera, Nitschkea, Etiennea i Millera (1997), Nitschkea, Hellera, Palmieria i Millera (1999), a także Engelsa i in. (2007) skłaniają się ku hipotezie, iż lęk doświadczany przez badanych, którzy przygotowywali się do nurkowania może różnić się od lęku doświadczanego przez płetwonurków w trakcie ekspozycji hiperbarycznej. Autorzy przywołują dwa konstrukty teoretyczne: „*anxious apprehension*” i „*anxious arousal*”. „*Anxious apprehension*” (ang. *anxious* - zaniepokojony, złęczony, ang. *apprehension* - obawa) jest rodzajem lęku pojawiającym się przed ekspozycją hiperbaryczną i charakteryzuje się obawami i ruminacjami (typowo dotyczącymi przyszłości). „*Anxious arousal*” (ang. *arousal* - podniecenie, pobudzenie) jest z kolei rodzajem lęku doświadczanego podczas ekspozycji na nadciśnienie i charakteryzuje się pobudzeniem układu współczulnego (między innymi występuje przyspieszona akcja serca czy przyspieszony oddech).

Jakkolwiek wspomniane podejście jest nowatorskie i wartościowe, niemniej wydaje się, iż jest także nadmiernie uproszczone. Autorzy używają pojęcia „lęk”, aby opisać szereg reakcji związanych z pobudzeniem układu współczulnego, z następstwami wspomnianego pobudzenia, jak i z subiektywnym stanem emocjonalnym płetwonurka. Możliwym jest, iż bardziej trafnym rozwiązaniem byłoby ujmowanie zagadnienia szerzej, jako „lęk i stres przed ekspozycją hiperbaryczną”, jak i „lęk i stres w trakcie ekspozycji hiperbarycznej”. Stres jest humoralną odpowiedzią na bodziec stresowy (wewnętrzny lub zewnętrzny), a lęk - subiektywnym i nieprzyjemnym stanem emocjonalnym (Crocq, 2015; Yaribeygi, Panahi, Sahraei, Johnston i Sahebkar, 2017). W tym miejscu warto również zwrócić uwagę na konstrukty: „*anxious apprehension*”, „*anxious arousal*” i strach (ang. *fear*). Lęk można zdefiniować jako stan emocjonalny związany z przewidywaniem/myśleniem o danym zdarzeniu (ang. *anticipation of future threat*), a strach - jako reakcję emocjonalną na realne (lub postrzegane jako realne, w tym urojone) zagrożenie (ang. *emotional response to real or perceived imminent threat*) (Crocq, 2015). Granica pomiędzy tymi konstruktami jest nieostra zarówno na płaszczyźnie teoretycznej, jak i podczas analizy stanu emocjonalnego płetwonurków w trakcie ekspozycji na nadciśnienie (zagrożające warunki otoczenia). Postanowiono jednak, za Hobbsem i Knellerem (2011), w dalszej części pracy używać pojęć „*anxious apprehension*”, „*anxious arousal*”, bez uwzględniania komponenty strachu.

Przed nurkowaniem, poza występowaniem „*anxious apprehension*” (lęk dotyczący przyszłych wydarzeń) u płetwonurka dochodzi do zwiększenia stymulacji adrenergicznej (wzmoczone wydzielanie hormonów stresu). Coetzee (2011) przeprowadził badanie na



początkujących płetwonurkach ( $N = 60$ ) w celu oceny między innymi poziomu kortyzolu w ślinie (ang. *salivary cortisol level*) przed wejściem do wody. Badacz zaobserwował istotny wzrost poziomu tego hormonu pomiędzy komfortowymi warunkami (ang. *at rest* - dosłownie: w spoczynku), a momentem poprzedzającym nurkowanie. Warto jednak zwrócić uwagę, iż początkujący płetwonurkowie odczuwają stres wywołany nie tylko nadchodzącą ekspozycją podwodną, ale także z powodu przeżywania nowego doświadczenia (ang. *as a result of anticipating taking part in a novel experience*). Z drugiej strony autor artykułu sugeruje, iż w miarę nabywania praktyki, stres przed nurkowaniem może nie zanikać całkowicie, a utrzymywać się na pewnym, względnie stałym poziomie. Ekstrapolując ten wynik na warunki ekspozycji hiperbarycznej w komorze również należy się spodziewać, iż osoby legitymujące się bogatym doświadczeniem obejmującym liczne „suche” sprężenia będą odczuwały mniejszy lęk i stres przed presuryzacją, w porównaniu do osób, które wspomnianego doświadczenia nie posiadają. Z drugiej strony, badanych charakteryzuje duża zmienność osobnicza pod względem poziomu kortyzolu (Tikkinen i in., 2011; Zarezadeh i Azarbayjani, 2014), co może sprawić, iż międzygrupowy poziom tego hormonu w grupach płetwonurków niedoświadczonych i doświadczonych nie musi okazać się istotnie różny.

Zarezadeh i Azarbayjani (2014) przeprowadzili badanie na 10 płetwonurkach zawodowych (mężczyźni). Badani nurkowali na głębokość 1, 10, 20 i 30 m ppw (odpowiednio: 1,1, 2, 3 i 4 ATA). Nurkowania na potrzeby eksperymentu (wykonywane około godziny 10.00<sup>48</sup>) miały miejsce w Zatoce Perskiej (doskonałe warunki nurkowe - ciepłe, przejrzyste wody). Uczestnikom badania pobierano krew przed i chwilę po nurkowaniu (nakłucie żyły znajdującej się w dole łokciowym), celem oznaczenia poziomu kortyzolu<sup>49</sup>. Badacze wykazali istotną różnicę pomiędzy stężeniem tego hormonu przed i po ekspozycji na nadciśnienie. Warto przyrzeć się wynikom pomiaru kortyzolu przed nurkowaniem, w zależności od planowej głębokości zanurzenia: 1 m ppw -  $M = 158,36 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 10 m ppw -  $M = 173,8 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 20 m ppw -  $M = 188,2 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 30 m ppw -  $M = 305,4 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . Jakkolwiek różnice pomiędzy pomiarami są nieistotne, zauważyć można trend: im głębsze nurkowanie ma wykonać płetwonurek, tym większa ilość kortyzolu we krwi.

W kontekście przebywania w nadciśnieniu warto ponownie zwrócić uwagę, iż narkoza „komorowa” różni się od narkozy „podwodnej”. Narkoza wywoływana w komorze jest bardziej

---

<sup>48</sup> Poziom kortyzolu podlega znacznym, dobowym wahaniom (Laudat i in., 1988).

<sup>49</sup> Warto zwrócić uwagę, iż sama inwazyjna technika oznaczania poziomu kortyzolu również mogła powodować jego wzrost.

„euforyczna”, a narkoza występująca pod wodą jest bardziej „lękowa” (Hobbs i Kneller, 2011). Można zatem stwierdzić, iż „*anxious arousal*” może być inny w trakcie ekspozycji w komorze i inny pod wodą (odpowiednio: mniejszy i większy). Z drugiej strony, przy doskonałych warunkach nurkowych wpływ „*anxious arousal*” może być międzyśrodkowo nieistotny, co może powodować, iż upośledzenie funkcjonowania stwierdzone pod wodą może być podobne do tego stwierdzonego w komorze hiperbarycznej (Baddeley i in., 1968).

Model Hobbsa i Knellera (2011) nie obejmuje również lęku i stresu, który występuje po nurkowaniu. W badaniu Zarezadeha i Azarbayjana (2014) stężenie kortyzolu we krwi po nurkowaniu wzrastało (z jednym wyjątkiem) wraz głębokościami na których odbywało się nurkowanie: 1 m ppw -  $M = 189 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 10 m ppw -  $M = 312,6 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 20 m ppw -  $M = 299,1 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 30 m ppw -  $M = 406,7 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . Poziomy kortyzolu po nurkowaniach na 10, 20 i 30 m ppw były istotnie różne, w porównaniu do poziomu po nurkowaniu na 1 m ppw. Jako, że nurkowania odbywały się w wodach ciepłych (między innymi brak „stresu cieplnego”) i charakteryzowały się niskim wysiłkiem fizycznym (niewielki wyrzut kortyzolu), autorzy podsumowują, iż podwyższony poziom tego hormonu był skutkiem głównie zanurzenia i zwiększonego ciśnienia otoczenia (ang. *immersion combined with increased environmental pressure*). Pourhashemi, Sahraei, Meftahi, Hatef i Gholipour (2016) mierzyli poziom stresu u płetwonurków przed i po nurkowaniu w warunkach podwodnych (za pomocą oznaczania poziomu kortyzolu w ślinie, ~10 vs. ~14 mmol/dl, brak informacji o godzinach wykonywanych pomiarów). Mierzono także funkcjonowanie poznawcze 60 minut przed i 20 minut po nurkowaniu. Badacze w tym celu użyli *Paced Auditory Serial Addition Test* (PASAT)<sup>50</sup>. Test polega na losowej ekspozycji cyfr (1-9) w interwałach 3-sekundowych. Zadaniem badanego jest sumowanie dwóch ostatnio usłyszanych cyfr (przed ekspozycją kolejnego bodźca). Test mierzy średni czas reakcji (ang. *mean response time, mean response speed*), a przez to szybkość poznawczą (ang. *speed of information processing*), funkcje uwagowe (poprzez ocenę *the longest chain of correct answers* - najdłuższego ciągu sumowania bez błędu), a także „zmęczenie poznawcze” (ang. *mental fatigue*, poprzez ocenę *the longest chain of incorrect answers* - najdłuższego ciągu błędnych sumowań) (Tombaugh, 2006; Pourhashemi i in., 2016). Opierając się na opisie narzędzia badawczego wydaje się, iż test mierzy również odświeżanie informacji w pamięci roboczej (ang. *updating*), podobnie jak wspomniany wcześniej test *n-back*. Osobami badanymi w omawianym eksperymencie byli

---

<sup>50</sup> Test był początkowo używany do oceny funkcjonowania poznawczego po urazach czaszkowo-mózgowych (ang. TBI, *traumatic brain injury*), jednakże następnie rozszerzono jego zastosowanie (Tombaugh, 2006).

zawodowi pływaczki (N = 12). Nurkowanie na potrzeby badania odbyło się na głębokość 10 m ppw (2 ATA) i trwało 20 minut. Autorzy stwierdzili, iż w porównaniu do testu wykonywanego przed nurkowaniem, po nurkowaniu liczba prawidłowych odpowiedzi była istotnie obniżona, średni czas potrzebny na odpowiedź był istotnie dłuższy, najdłuższe ciągi sumowania bez błędu były istotnie krótsze, a najdłuższe ciągi błędnych sumowań były istotnie dłuższe. Autorzy uważają, iż za upośledzenie funkcjonowania poznawczego po nurkowaniu odpowiada zwiększony poziom kortyzolu.

Lund i in. (1999) przeprowadzili badanie w komorze hiperbarycznej. Badani (N = 8) oddychali 100% tlenem lub powietrzem przy ciśnieniu 2,5 ATA (15 m ppw). Badacze mierzyli poziom między innymi kortyzolu przed i w trakcie sprężenia, a także 20 minut po rozprężeniu. Poziom wspomnianego hormonu w trakcie pobytu w nadciśnieniu był istotnie niższy niż przed sprężeniem. Tikkinen i in. (2011) również badali stężenie kortyzolu przed i po sprężeniu w komorze hiperbarycznej (N = 89, zawodowi pływaczki, mężczyźni, 6 ATA). Badacze stwierdzili istotny spadek poziomu kortyzolu po dekompresji (M = 16 mmol/L przed sprężeniem vs. M = 10,3 mmol/L po rozprężeniu). Dodatkowo, badanych charakteryzowała duża zmienność osobnicza (zaobserwowano znaczne różnice w poziomie kortyzolu pomiędzy poszczególnymi badanymi). Warto podkreślić, iż zarówno w omawianym badaniu, jak i w cytowanych powyżej pracach Zarezadeha i Azarbayjana (2014) i Lunda i in. (1999) brali udział zawodowi pływaczki. Należy także zwrócić uwagę, iż różny rozkład poziomu kortyzolu przed i po nurkowaniu (nurkowania w warunkach podwodnych vs. „suche” ekspozycje hiperbaryczne) stanowi kolejną różnicę pomiędzy tymi środowiskami badawczymi, a przez to jest kolejnym argumentem za ostrożną, międzyrodowiskową ekstrapolacją wyników.

Na zakończenie tej części należy podkreślić, iż wydzielanie kortyzolu zależy nie tylko od wpływu zanurzenia, działania zwiększonego ciśnienia na ciało i zmiennych psychologicznych, ale także na przykład od wysiłku fizycznego (w trakcie/po nurkowaniu) czy ekspozycji na zimno (Zarezadeh i Azarbayjani, 2014). Nurkowanie rekreacyjne w doskonałych warunkach nurkowych vs. obciążające fizyczne nurkowanie w wodach zimnych i nieprzeziernych może zatem indukować różny poziom kortyzolu po nurkowaniu (co może przekładać się na różny wpływ tego hormonu na funkcjonowanie poznawcze).

Opierając się na cytowanych powyżej pracach, a także uwzględniając wpływ narkozy azotowej na poznanie, należy rozwinąć model Hobbsa i Knellera (2011). Wydaje się, iż szersze ujęcie konstruktów „*anxious apprehension*” i „*anxious arousal*” pod postacią odpowiednio „lęku i stresu występującego przed ekspozycją hiperbaryczną”, jak i „lęku i stresu w trakcie

ekspozycji hiperbarycznej” jest bardziej trafne. Co więcej, należy również uwzględnić rezydualny (resztkowy) lęk i stres występujący po ekspozycji na nadciśnienie.

## Grafika 2

Model lęk-stres-narkoza, obrazujący wpływ trzech czynników na procesy poznawcze w okresie przedekspozycyjnym, a także w trakcie i po ekspozycji hiperbarycznej

- Lęk i stres przed ekspozycją hiperbaryczną, brak narkozy azotowej,
- lęk i stres w trakcie ekspozycji hiperbarycznej (podczas presuryzacji), narastająca narkoza azotowa,
- lęk i stres w trakcie ekspozycji hiperbarycznej (docelowe ciśnienie otoczenia - *plateau* ciśnieniowe), względnie stabilna narkoza azotowa,
- lęk i stres w trakcie ekspozycji hiperbarycznej (w trakcie depresuryzacji), malejąca narkoza azotowa,
- lęk i stres po ekspozycji hiperbarycznej, rezydualna narkoza azotowa.

Jak już wspomniano, lęk i stres przed, w trakcie i po ekspozycji hiperbarycznej może być różny dla warunków komory hiperbarycznej i warunków podwodnych. Fraza „rezydualna narkoza azotowa” została dodana, gdyż Balestra i in. (2012) wykazali, iż subtelna, ale mogąca wpływać na funkcjonowanie poznawcze, narkoza azotowa utrzymuje się co najmniej 30 minut po wynurzeniu<sup>51,52</sup>. Pourhashemi i in. (2016) w swoim artykule nie zamieścili informacji o mieszaninie oddechowej, która była używana do nurkowania. Najbardziej prawdopodobnym jest, iż użyto powietrza (najczęściej używany czynnik oddechowy). Niewykluczonym zatem jest, iż sumaryczny efekt trzech czynników: rezydualnej narkozy azotowej, zwiększonego poziomu kortyzolu, jak i rezydualnego „*anxious arousal*” mogły mieć istotną rolę w upośledzeniu funkcjonowania poznawczego stwierdzonego po nurkowaniu. Jakkolwiek niezbędne są dalsze badania nad wpływem resztkowej (poekspozycyjnej/rezydualnej) narkozy azotowej, wydaje się, iż upośledzenia funkcjonowania poznawczego po nurkowaniu nie należy tłumaczyć jednoczynnikowo, wyłącznie przez pryzmat narkozy.

---

<sup>51</sup> Badacze oceniali *Critical Flicker Fusion Frequency* (CFFF) przed nurkowaniem, dwukrotnie w trakcie nurkowania, a także po nurkowaniu. Omawiane badanie polega na prezentowaniu osobie biorącej udział w eksperymencie błysków świetlnych z pewną częstotliwością. Badany ma za zadanie ocenić czy jeszcze widzi błyski czy już ciągłe światło.

<sup>52</sup> Zgodnie z biofizycznymi modelami eliminacji azotu z organizmu - wydalanie nadmiaru azotu, w zależności od rodzaju tkanki, trwa przez pewien określony czas po wynurzeniu.

## 17.1 Funkcjonowanie pamięci w ujęciu modelu lęk-stres-narkoza

W modelu lęk-stres-narkoza fazy zapamiętywania i przypominania (w sekwencjach: zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria) mogą ulegać zaburzeniom w różnych mechanizmach. Podatne na upośledzenie mogą być wszystkie składowe procesy pamięciowych: zapamiętywanie, konsolidacja materiału i przypominanie.

### Grafika 3

Model lęk-stres-narkoza, obrazujący wpływ trzech czynników na zapamiętywanie, konsolidację i przypominanie materiału

1. Zapamiętywanie (normobaria):
  - stres przed fazą presuryzacji (oczekiwanie na sprężenie),
  - lęk przed fazą presuryzacji (odpowiednik „*anxious apprehension*”),
  - brak narkozy azotowej.
2. Konsolidacja śladu pamięciowego (hiperbaria - presuryzacja):
  - stres występujący po fazie zapamiętywania, który towarzyszy presuryzacji,
  - lęk w trakcie przebywania w nadciśnieniu (odpowiednik „*anxious arousal*”),
  - narastająca narkoza azotowa.
3. Przypominanie (hiperbaria, docelowe ciśnienie otoczenia - *plateau* ciśnieniowe):
  - stres w trakcie przypominania,
  - lęk w trakcie przebywania w nadciśnieniu (odpowiednik „*anxious arousal*”),
  - narkoza azotowa.
4. Zapamiętywanie (hiperbaria, docelowe ciśnienie otoczenia - *plateau* ciśnieniowe):
  - stres w trakcie zapamiętywania,
  - lęk w trakcie przebywania w nadciśnieniu (odpowiednik „*anxious arousal*”),
  - narkoza azotowa.
5. Konsolidacja śladu pamięciowego (hiperbaria - depresuryzacja):
  - stres występujący po fazie zapamiętywania, który towarzyszy depresuryzacji,
  - lęk w trakcie przebywania w nadciśnieniu (odpowiednik „*anxious arousal*”),
  - malejąca narkoza azotowa.
6. Przypominanie (normobaria):
  - stres w trakcie przypominania (rezydualny stres po ekspozycji hiperbarycznej),
  - rezydualny lęk po sprężeniu (wygaszanie „*anxious arousal*”),
  - rezydualna narkoza azotowa.

W tym miejscu należy poprzeć powyższe rozważania teoretyczne wynikami badań. Roozendaal, Hahn, Nathan, de Quervain i McGaugh (2004), Payne i in. (2007), a także Wolf (2017) wykazali, iż stres może upośledzać zarówno fazę kodowania, jak i przypominania materiału. W warunkach hiperbarii powietrznej może mieć również miejsce interakcja stresu i narkozy. W badaniu Russella i Steinberg (1955) osoby uczestniczące w eksperymencie miały za zadanie rozwiązywać zadania, które zostały tak zaprojektowane, że badani byli w stanie je rozwiązać lub też nie (ang. *soluble and insoluble problems*). Nierozwiązywalność problemu indukowała u badanych frustrację i stres. Autorzy stwierdzili, iż zarówno ekspozycja na stres, jak i ekspozycja na normobaryczny podtlenek azotu (30%) rozłącznie powodują zaburzenia pamięci (dokładnie - zaburzenia procesu zapamiętywania informacji, „*both nitrous oxide and exposure to stress impair learning*”, s. 67), jednakże do upośledzenia pamięci nie dochodzi gdy stres współwystępuje z narkozą „podtlenkową”. Warto jednakże zwrócić uwagę, iż stres występujący w trakcie wykonywania nierozwiązywalnego zadania różni się od stresu, którego doświadcza płetwonurek w trakcie pobytu w nadciśnieniu. Pomijając jednak kontrowersje metodologiczne i ekstrapolacyjne (użycie N<sub>2</sub>O, a nie hiperbarycznego azotu), możliwym jest, iż stres zaburza funkcjonowanie pamięci przed i po ekspozycji hiperbarycznej, a w trakcie ekspozycji jego rola jest mniej istotna. Jak już jednak wspomniano, możliwości badania interakcji stresu i narkozy są metodologicznie znacznie ograniczone.

Vytal i in. (2013) wykazali, iż „*anxious apprehension*” zaburza odświeżanie informacji w „werbalnej pamięci roboczej” (ang. *verbal working memory*), co może wpływać na upośledzenie zapamiętywania materiału. W chwili obecnej nie dysponujemy badaniami dotyczącymi wpływu „*anxious arousal*” na procesy pamięciowe, jednakże można podjąć ostrożną próbę ekstrapolacji licznych obserwacji dotyczących zaburzeń funkcjonowania pamięci pod wpływem tego rodzaju lęku w sytuacji np. awarii statku powietrznego. CRM (ang. *Crew Resource Management*, aplikacyjna psychologia na potrzeby lotnictwa) kładzie duży nacisk na konieczność stosowania list kontrolnych (ang. *check-lists*) w przypadku awarii statku powietrznego. Piloci w sytuacji poważnej, zagrażającej bezpieczeństwu usterki działają pod presją czasu, w stresie i w lęku („*anxious arousal*”). CRM opiera się zarówno na podłożu teoretycznym z zakresu psychologii poznawczej, jak i na wnikliwej analizie incydentów i wypadków lotniczych. Mnogość usterek i sposobów działania w przypadku ich wystąpienia, a także wspomniana presja czasu, lęk i stres skłaniają ku stosowaniu omawianych list kontrolnych - algorytmów, które krok po kroku prowadzą pilotów poprzez optymalny sposób działania, który znacząco obniża ryzyko katastrofy lotniczej (Helmreich, Merritt i Wilhelm,

1999). Oczywiście jest, iż piloci uczą się także na pamięć postępowania w przypadku danych usterek, jednakże są one podzielone na tzw. *memory items* (usterki głównych systemów wymagające natychmiastowej reakcji, w przeciągu sekund) i inne. Jak już jednak wspomniano liczba usterek w kategorii „inne” jest tak duża, że możliwość ich zapamiętania, a następnie przypomnienia w stresie i pod presją czasu jest istotnie ograniczona (zaburzenia funkcjonowania pamięci pod wpływem stresu i „*anxious arousal*”), co sprawiło, iż listy kontrolne są używane w lotnictwie od dziesięcioleci. Warto wspomnieć, iż implementuje się również zdobyte CRM w dziedzinach medycyny, gdzie personel również działa w stresie i pod presją czasu (między innymi anestezyjologia i medycyna ratunkowa) (Haerkens i in., 2015)<sup>53</sup>. Analogicznie, przebywanie w nienaturalnych (a więc zagrażających dla człowieka) warunkach nadciśnienia może powodować wystąpienie lęku typu „*anxious arousal*” (za: Hobbs i Kneller, 2011) z następowym zaburzeniem działania pamięci. Warto także przywołać pracę Mearsa i Cleary (1980), którzy wykazali, iż wpływ lęku doświadczanego w wodzie jest zmienną niezależną wpływającą na nasilenie upośledzenia funkcjonowania psychomotorycznego pod wpływem narkozy azotowej. Jako, że upośledzenie czynności psychomotorycznych następuje później (przy większym ppN<sub>2</sub>) niż wyższych czynności poznawczych - również należy przyjąć założenie, że „*anxious arousal*” wpływa na funkcjonowanie pamięci. Warto także wspomnieć o badaniu Whitakera i Findleya (1977) w którym oceniano wpływ cyklicznych (kilka dni z rzędu) ekspozycji hiperbarycznych na funkcjonowanie psychomotoryczne. Polepszenie wspomnianego funkcjonowania psychomotorycznego w toku powtarzalnych ekspozycji na nadciśnienie autorzy przypisują procesowi uczenia się i/lub redukcji lęku. Autorzy wprowadzili nie dzielą leku na różne typy, jednakże wydaje się, że cykliczne ekspozycje hiperbaryczne redukują „*anxious arousal*”, co (jako jeden z czynników) powoduje polepszenie funkcjonowania w warunkach narkozy azotowej.

Przywoływany model wydaje się jednak wciąż niepełny gdyż nie uwzględnia zjawisk *context-dependent learning* i *state-dependent learning*. W przypadku ekspozycji hiperbarycznych *state-dependent learning* może mieć istotne znaczenie w trakcie zapamiętywania w normobarii i przypomnienia w hiperbarii, jak i zapamiętywania w hiperbarii i przypomnienia w normobarii, jednakże w tożsamych warunkach (zapamiętywanie i

---

<sup>53</sup> W cytowanym badaniu wykazano pozytywny wpływ zastosowania między innymi list kontrolnych i polepszenia umiejętności miękkich (komunikacja w obrębie personelu) na redukcję ciężkich powikłań i śmiertelności wśród pacjentów.

przypominanie przy docelowym i stałym nadciśnieniu) może być nieistotny. *Context-dependent learning* z kolei nie ma wpływu gdy zarówno faza zapamiętywania i przypominania ma miejsce w tym samym środowisku (zapamiętywanie i przypominanie w komorze hiperbarycznej lub zapamiętywanie i przypominanie w wodzie). Przeciwna sytuacja ma miejsce, gdy wspomniane fazy procesów pamięciowych odbywają się w różnych warunkach (np. zapamiętywanie na lądzie, a następnie przypominanie w wodzie lub odwrotnie; Godden i Baddeley, 1975). Egstrom, Weltman i Baddeley (1972) podkreślają istotną rolę *state-dependent learning* w funkcjonowaniu pamięci w zmiennych warunkach środowiskowych, przypisując temu zjawisku nawet większą rolę w upośledzeniu pamięci niż narkozie azotowej czy wpływowi lęku. Nie mniej istotne wydają się specyficzne warunki środowiskowe panujące w trakcie ekspozycji hiperbarycznych, które zostały wyszczególnione w modelach środowiskowych. Wreszcie, należy podkreślić, iż na upośledzenie funkcjonowania poznawczego w trakcie ekspozycji hiperbarycznej, jak i w okresie ekspozycyjnym może wpływać zarówno doświadczenie nurkowe osób badanych, jak i charakter nurkowania (głębokość nurkowania, wysiłek fizyczny itd.). W przypadku pamięci należy więc rozszerzyć model lęk-stres-narkoza do modelu lęk-stres-narkoza-środowisko (środowisko zewnętrzne i wewnętrzne w trakcie zapamiętywania i środowisko zewnętrzne i wewnętrzne w trakcie przypominania).

Podsumowując, na upośledzenie funkcjonowania pamięci w warunkach nadciśnienia, jak i w okresie okołоекspozycyjnym może wpływać wiele czynników, z których narkoza azotowa jest bardzo istotną, jednakże tylko jedną ze składowych. Przypisywanie upośledzenia procesów pamięciowych wyłącznie wpływowi narkozy, bez uwzględnienia wyżej wymienionych zmiennych (które dominuje w piśmiennictwie traktującym o narkozie azotowej) wydaje się nadmiernie redukcjonistyczne i nietrafne. Z tego powodu warto interpretować uzyskane wyniki testów pamięciowych poprzez sumaryczny wpływ licznych zmiennych wyszczególnionych powyżej.

Omawiany autorski model nie jest pozbawiony wad - jak już wspomniano, brakuje badań oceniających wpływ „*anxious arousal*” na funkcjonowanie poznawcze w warunkach nadciśnienia. Wpływ tego rodzaju lęku można badać na przykład w trakcie eksperymentów w nadciśnieniu przy użyciu mieszanin helowo-tlenowych, które nie powodują narkozy azotowej. Niemniej, upośledzenie funkcjonowania nie mogłoby być przypisywane wyłącznie temu typowi lęku. Ekspozycja hiperbaryczna powoduje wydzielanie hormonów stresu, które wpływają na czynności poznawcze (Zarezadeh i Azarbayjani, 2014). Jak już wspomniano,



użycie leków o antyadrenergicznym profilu działania (które mogłyby niwelować wpływ stresu na pamięć) jest ryzykowne, co uniemożliwia prowadzenie badań na ludziach. Jednak nawet po farmakologicznym zredukowaniu wpływu kortyzolu na pamięć, wciąż istniałby czynniki, które wpływają na poznanie (np. wysoka temperatura otoczenia).

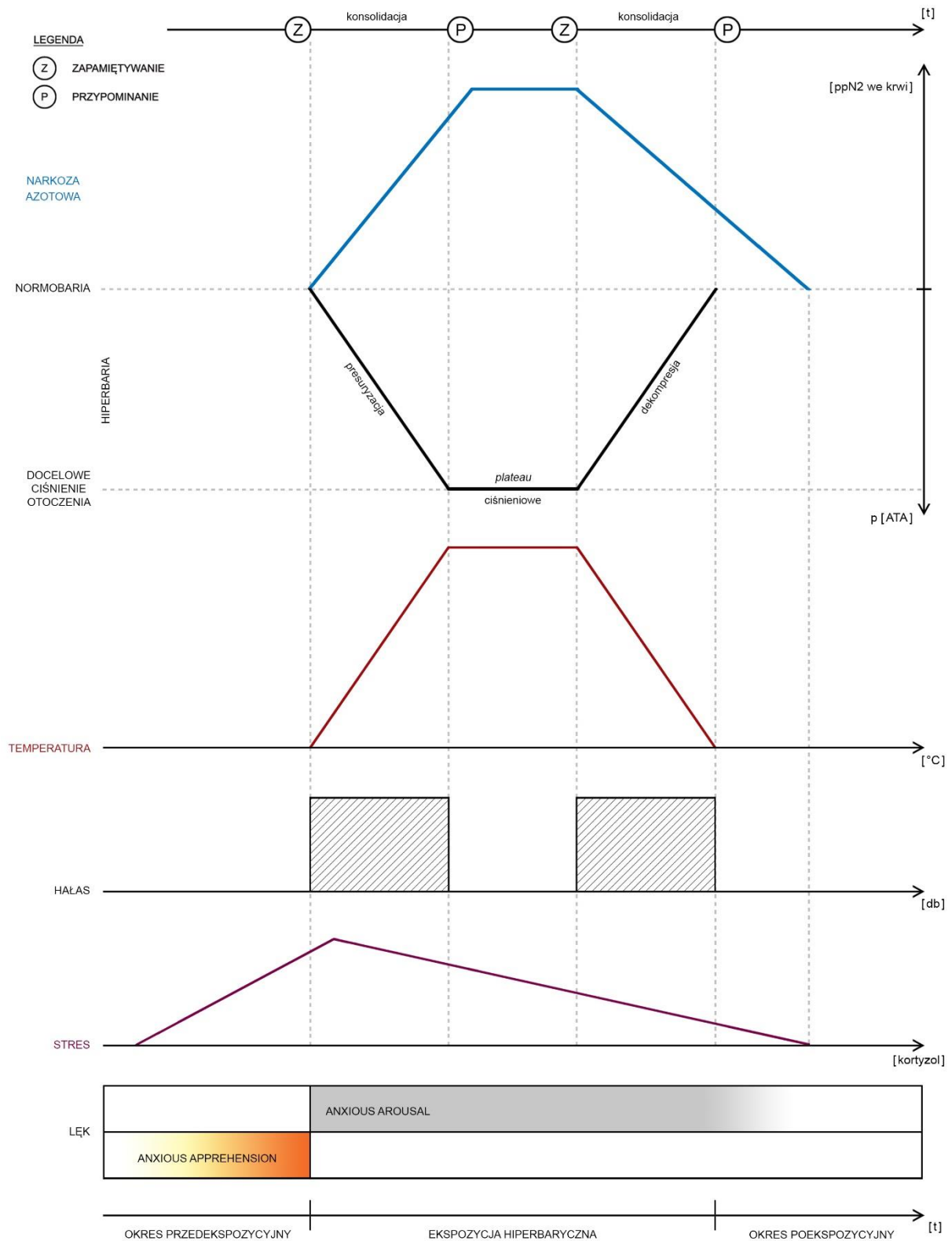
Jakkolwiek charakterystyka poziomu stresu w zależności od fazy ekspozycji hiperbarycznej została poznana zarówno w warunkach komory (Lund i in., 1999; Tikkinen i in., 2011), jak i w warunkach podwodnych (Zarezadeh i Azarbayjani, 2014), nie są znane poziomy „*anxious arousal*” w funkcji czasu (ani w warunkach „suchej”, ani podwodnej hiperbarii). Należy przeprowadzić badanie w komorze hiperbarycznej, jak i pod wodą, optymalnie na grupach płetwonurków zawodowych i niezawodowych, celem oszacowania wspomnianej charakterystyki lęku w zależności od doświadczenia płetwonurków, środowiska hiperbarycznego, jak i fazy nurkowania. Uzyskane wyniki mogłyby pomóc lepiej zrozumieć wpływ „*anxious arousal*” występujący w warunkach nadciśnienia na procesy pamięciowe.

## **17.2 Funkcjonowanie pamięci długotrwałej w ujęciu modelu lęk-stres-narkoza- środowisko - podsumowanie**

Absolutna większość piśmiennictwa dotyczącego wpływu ekspozycji hiperbarycznych z użyciem mieszanin oddechowych zawierających azot na upośledzenie funkcjonowania poznawczego traktuje zagadnienie zero-jedynkowo, wyłącznie przez pryzmat oddziaływania wysokich ciśnień parcjalnych azotu na poznanie. Jest to jednak ujęcie nadmiernie redukcjonistyczne i uproszczone. Co więcej, w literaturze bardzo rzadko są również uwzględniane czynniki występujące przed i po ekspozycji hiperbarycznej (tj. w okresie okołоекспозycyjnym). Charakterystyka niektórych zmiennych występujących przed, w trakcie i po sprężeniu jest znacząco różna, co sprawia, że sekwencje zapamiętywanie-normobaria i przypominanie-hiperbaria, jak i zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria mają miejsce w różnych środowiskach (zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych).

## Grafika 4

Czynniki zewnętrzne i wewnętrzne wpływające na procesy zapamiętywania, konsolidacji i przypominania w okresie okołоекспозycyjnym, jak i podczas pobytu w warunkach nadciśnienia.



W tym miejscu należy podkreślić, iż zmienne takie jak stres, *anxious apprehension* i *anxious arousal* zostały przedstawione w sposób schematyczny. Potrzebne są dalsze badania, celem określenia precyzyjnej charakterystyki zmian poziomu kortyzolu czy nasilenia lęku. Warto również zwrócić uwagę, że narkoza azotowa narasta przez pewien czas, pomimo osiągnięcia docelowego ciśnienia otoczenia (aż do uzyskania względnie stabilnego nasycenia tkanek azotem).

## 18 Ograniczenia metodologiczne badań pamięciowych

Istotnym ograniczeniem metodologicznym jest fakt, iż interwał zapamiętywanie-przypominanie w grupach hiperbarycznych (zapamiętywanie-hiperbaria i przypominanie-normobaria) wynosił 11 minut i 40 sekund, a w przypadku grupy normobarycznej interwał zapamiętywanie-przypominanie w trakcie drugiego zadania pamięciowego wynosił 8 minut. Warto także zwrócić uwagę, iż do grup badanych w warunkach hiperbaryczno-powietrznych włączono zarówno mężczyzn, jak i kobiety (Badanie 2a i 2b: 9 mężczyzn, 2 kobiety), a do grupy helioksovej włączono wyłącznie mężczyzn (Badanie 3a: 8, Badanie 3b: 9). Znane są różnice międzypłciowe dotyczące zapamiętywania materiału o określonej walencji emocjonalnej w warunkach stresu, w zależności od płci badanego (Wolf i in., 2001). Niemniej, w grupach bojowych wojsk specjalnych służą wyłącznie mężczyźni, toteż niemożliwym było włączenie kobiet do grupy hiperbaryczno-helioksovej.

Nie udało się również tak zrekrutować osób do eksperymentu, aby grupy badane w normobarii i grupy badane przy użyciu mieszaniny helowo-tlenowej nie różniły się istotnie pod kątem wieku (pamięć, Lista A-Lista B; Pretest 1 vs. Badanie 3a:  $M_{\text{normobaria}} = 30,68$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,8$  vs.  $M_{\text{helioks}} = 39,37$ ,  $SD_{\text{helioks}} = 5,65$ ; pamięć, Lista B-Lista A; Pretest 2 vs. Badanie 3b:  $M_{\text{normobaria}} = 32,52$ ,  $SD_{\text{normobaria}} = 4,74$  vs.  $M_{\text{helioks}} = 39,77$ ,  $SD_{\text{helioks}} = 4,46$ ). Jednakże ze względu na fakt, iż do grup normobarycznych włączono wyłącznie osoby bez jakiegokolwiek wywiadu neurologicznego (brak chorób OUN, brak ciężkich urazów czaszkowo-mózgowych w przeszłości) i bez wywiadu w kierunku innych stanów, które mogłyby wpływać na funkcjonowanie poznawcze (uzależnienia), a także ze względu na fakt, iż badani z grup helioksowych przechodzą cykliczne, rygorystyczne ewaluacje stanu zdrowia (żołnierze sił specjalnych) - jest mało prawdopodobnym aby te różnice, w tym przedziale wieku mogły wpłynąć na istotne międzygrupowe różnice w wykonywaniu testów pamięciowych.

Warto dodać, iż grupa hiperbaryczno-powietrzna (Badanie 2a) i hiperbaryczno-helioksowa (Badanie 3a) różniły się istotnie pod kątem doświadczenia obejmującego przebywanie w warunkach „suchej” hiperbarii. Grupa hiperbaryczno-powietrzna (Badanie 2b) i hiperbaryczno-helioksowa (Badanie 3b) nie różniły się wprawdzie istotnie pod kątem średniej wspomnianego parametru, jednakże należy wspomnieć, iż jeden badany (pracownik ośrodka hiperbarycznego) oszacował swoją liczbę uprzednich ekspozycji hiperbarycznych w komorze na 60, a pozostali uczestnicy nie mieli żadnego doświadczenia w przebywaniu w warunkach „suchej” hiperbarii. Po nieuwzględnieniu danych pracownika komory hiperbarycznej, grupy

również istotnie różniły się pod kątem szacunkowej liczby odbytych ekspozycji hiperbarycznych w komorze. Jakkolwiek wspomiane różnice międzygrupowe należy traktować jako uchybienie metodologiczne, warto podkreślić, iż niezmiernie trudno jest pozyskać badanych do grup hiperbaryczno-helioksowych i hiperbaryczno-powietrznych, które legitymowałyby się porównywalnym doświadczeniem dotyczącym uprzedniej liczby sprężeń w komorze hiperbarycznej. Grupą, która regularnie uczestniczy w treningowych nurkowaniach w komorze w trakcie oddychania helioksem są w zasadzie wyłącznie żołnierze wojsk specjalnych, a grupą regularnie uczestniczącą w ekspozycjach hiperbarycznych z użyciem powietrza są praktycznie tylko i wyłącznie pracownicy ośrodków hiperbarycznych, jak i komandosi. Jednocześnie warto podkreślić, iż pracownicy komór hiperbarycznych posiadają dużo większe doświadczenie obejmujące ekspozycje na nadciśnienie indukowane w komorze hiperbarycznej. Rozwiązaniem opisywanej niedogodności może być prowadzenie badań z powtarzanym pomiarem (pomiar 1: helioks, pomiar 2: hiperbaryczne powietrze lub odwrotnie) na grupie żołnierzy wojsk specjalnych. Otwartym pozostaje jednakże pytanie o możliwość trafnej ekstrapolacji danych uzyskanych w tej specyficznej grupie badanych mężczyzn na ogół płetwonurków. Podsumowując, jakkolwiek badanie grupy kontrolnej przy użyciu nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej (przy tożsamym ciśnieniu otoczenia co powietrzna grupa eksperymentalna) zapewnia w teorii zachowanie kanonu jedynej różnicy (brak narkozy vs. narkozy) potencjalnie różny poziom lęku i stresu u osób eksponowanych na nadciśnienie w komorze po raz pierwszy i u płetwonurków-żołnierzy wojsk specjalnych, którzy wielokrotnie przebywali w warunkach „suchej” hiperbarii mogą być kolejnymi zmiennymi, które wpływały na otrzymane wyniki.

## **19 Badanie 4 - badanie pretestowe w warunkach podwodnych**

### **19.1 Cel badania i hipotezy badawcze**

Celem pretestu było opracowanie i optymalizacja procedury eksperymentalnej zakładającej wykonanie testów CTT-1 A i CTT-2 A w warunkach podwodnych. Z tego powodu nie postawiono żadnych hipotez badawczych.

### **19.2 Osoby badane**

Do podwodnego badania pretestowego zostali zrekrutowani doświadczeni płetwonurkowie ( $N = 6$ ; 5 mężczyzn, 1 kobieta; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: 100-1000;  $M = 595,83$ ,  $SD = 445,8$ ), w wieku 37-46 lat ( $M = 40,16$ ,  $SD = 3,86$ ). 4 badanych miało wyższe wykształcenie, a dwóch - średnie. Do badania włączono płetwonurków rekreacyjnych (niezawodowych,  $N = 2$ ), a także płetwonurków zawodowych ( $N = 4$ ; płetwonurkowie zatrudnieni w strukturach Straży Pożarnej ( $N = 3$ ), instruktor nurkowania ( $N = 1$ )). Żaden z badanych nie był psychologiem lub studentem psychologii, a dla wszystkich badanych język polski był językiem ojczystym. Procedurę rekrutacji badanych pod kątem braku przeciwwskazań medycznych opisano w Załączniku 48.

### **19.3 Plan badawczy**

Plan badawczy zakładał wykonanie testów CTT-1 A i CTT-2 A po osiągnięciu maksymalnej głębokości przewidzianej dla danego nurkowania (jezioro Pile 29-31 m ppw; zatoka Akaba ~105 m ppw).

### **19.4 Procedura badawcza**

W celu przeprowadzenia podwodnej procedury pretestowej, oryginalne testy CTT-1 A i CTT-2 A zostały zalaminowane przy użyciu przezroczystej folii, a badani rozwiązywali je używając różnych typów markerów permanentnych lub kredek do makijażu oczu.

Badania pretestowe wykonano w trakcie nurkowań w jeziorze Pile (Polska)<sup>54</sup>, a także w zatoce Akaba<sup>55</sup> (Egipt)<sup>56</sup>. Nurkowania w jeziorze Pile ( $N = 3$ ) miały charakter nurkowań bezdekompresyjnych, odbywały się przy pomocy aparatów o obiegu otwartym (por. Załącznik

---

<sup>54</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy dr. Jacka Piechockiego.

<sup>55</sup> Zatoka w północnej części Morza Czerwonego.

<sup>56</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy instr. Honoraty Kacprzak.

1) i z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego. Badanie na głębokościach 29-31 m ppw (3,9-4,1 ATA) przeprowadzono na platformie (w pozycji klęczącej lub leżącej). W trakcie nurkowań temperatura wody wynosiła 6°C, a przezierność wody wahała się w granicach 4-5 metrów. Osobami badanymi byli zawodowi pływonurkowie pracujący w Straży Pożarnej. Nurkowania dekompresyjne w zatoce Akaba ( $N = 3$ ) przeprowadzono z użyciem aparatów o obiegu zamkniętym (por. Załącznik 1), a mieszaniną oddechową był trimiks hipoksyczny (10-12% O<sub>2</sub>, 65-70% He, reszta: N<sub>2</sub>). Badanie na głębokości ~105 m ppw (~11,5 ATA) przeprowadzono w trakcie zawisu w toni. Temperatura wody wynosiła 26°C, a przezierność ~30 metrów. Osobami badanymi byli doświadczeni nurkowie techniczni (zawodowi ( $N = 1$ ) i niezawodowi ( $N = 2$ )). Wszystkie ekspozycje podwodne przewidziane dla Badania 3 były wykonywane w suchych skafandrach, 3 badanych używało standardowych masek nurkowych, a 3 masek pełnotwarzowych (por. Załącznik 1). Zarówno w trakcie, jak i po badaniu nie wystąpiły jakiegokolwiek powikłania związane z ekspozycją hiperbaryczną. Kard z filmu dokumentującego nurkowanie w zatoce Akaba znajduje się w Załączniku 63, a krótki film z przebiegu wspomnianego nurkowania znajduje się na stronie: <https://www.youtube.com/watch?v=whzjpS1N9ss>.

Na badania w warunkach podwodnych wyraziła zgodę Komisja ds. Etyki Badań Naukowych (Opinia 46/2018).

### **19.5 Analizy statystyczne i wyniki**

Uzyskanych wyników nie analizowano z powodu niedoskonałości metodologicznej sposobu testowania.

### **19.6 Wnioski i implikacje praktyczne**

Grupy badane w jeziorze Pile ( $N = 3$ ) i w zatoce Akaba ( $N = 3$ ) różniły się zarówno składem mieszaniny oddechowej (powietrze *vs.* trimiks hipoksyczny), jak i głębokością nurkowania (29-31 m *vs.* ~105 m ppw), co implikowało różny międzygrupowy poziom narkozy azotowej. Niemniej, celem badania nie była ocena wpływu narkozy na funkcjonowanie poznawcze, a opracowanie i optymalizacja podwodnej procedury eksperymentalnej. Wykonanie podwodnych badań pretestowych było konieczne ze względu na fakt, iż nie znaleziono ani jednego artykułu, prezentacji czy rozdziału w książce, który traktowałby o metodologii badań w warunkach nadciśnienia (w szczególności w warunkach podwodnych). Omówienie wszystkich aspektów dotyczących planowania i przeprowadzania badań pod wodą

znacząco wykracza poza ramy niniejszej rozprawy doktorskiej. Wybrane aspekty metodologii prowadzenia eksperymentów podwodnych, które zostały opracowane w trakcie badań pretestowych zostały skrótowo przedstawione poniżej.

Ekspozycja podwodna musi być poprzedzona zarówno zaplanowaniem bezpiecznego profilu nurkowania, jak i wyznaczeniem optymalnego miejsca do wykonywania testów, co wymaga wcześniejszego przeprowadzenia nurkowania w danym akwencie, celem wyszukania odpowiedniej przestrzeni. Jako, że badacz nie zawsze ma możliwość bezpośredniego nadzorowania eksperymentu w warunkach podwodnych, jego zadaniem jest należyte zaznajomienie pomocników (instruktorów nurkowych) ze specyfiką testów, jak i z planem badawczym. Do zadań badacza i/lub instruktorów nurkowych należy również przeprowadzenie kompleksowej odprawy przed nurkowaniem z osobami badanymi, która obejmuje między innymi sposób wykonania testów, jak i aspekty dotyczące bezpieczeństwa. Osoby biorące udział w eksperymencie muszą być bardzo dobrze zaznajomione z planem badawczym, gdyż komunikacja w warunkach podwodnych ogranicza się do zestawu prostych, umownych gestów i/lub lakonicznych komunikatów pisanych rysikiem na tzw. tabliczkach nurkowych<sup>57</sup>. Instruktor nurkowy (jak również eksperymentator, przy założeniu, iż bezpośrednio uczestniczy w badaniach podwodnych) ma za zadanie również transport wyposażenia badawczego do miejsca badania, rozdanie markerów, clipboardów i testów, a także przeprowadzenie briefingu w warunkach podwodnych mającego na celu skrótowe przypomnienie sposobu wykonywania testów. Osoba przeprowadzająca badanie sprawuje także nadzór nad wykonywaniem testów z jednoczesnym nagrywaniem przebiegu eksperymentu, monitoruje parametry nurkowania (między innymi głębokość i czas bezdekompresyjny) i ilość pozostałej mieszaniny oddechowej (zarówno swojej, jak i osób badanych), a także nadzoruje bezpieczne wynurzenie się, z jednoczesnym transportem wyposażenia badawczego na powierzchnię (w torbie siatkowej).

Całościowe omówienie procedury optymalizacji sposobu testowania jest niemożliwe ze względu na ryzyko znacznego przekroczenia akceptowalnych ram objętościowych rozprawy doktorskiej. Warto jednakże wspomnieć, iż po przeprowadzeniu nurkowań pretestowych wprowadzono między innymi użycie nieprzemakalnych (plastikowych) podkładek typu clipboard, zamiast ich standardowych odpowiedników czy zrezygnowano z używania markerów permanentnych i kredek do makijażu oczu na rzecz specjalnych markerów do pisania pod wodą (por. Załącznik 39). Kredki do oczu, jakkolwiek pozwalały pisać po zalaminowanej

---

<sup>57</sup> Podwodna komunikacja głosowa jest możliwa w sytuacji gdy płetwonurkowie używają masek pełnotwarzowych.



powierzchni testu, bardzo szybko zużywały się (wymagały temperowania/ostrzenia w warunkach podwodnych pomiędzy wykonywaniem arkuszy testowych), a także łamały się. Co najistotniejsze jednak - zapis był bardzo nietrwały (linie rozmazywały się, co powodowało utratę wyników). Analogicznie - zapis uzyskany przy pomocy markera permanentnego nie spełniał oczekiwań. W załączniku 64 zamieszczono porównanie zapisu dokonanego kredką do oczu i specjalnym markerem służącym do pisania pod wodą.

Co najważniejsze jednak - w trakcie badania pretestowego sprawdzano możliwość wykonania testów w warunkach podwodnych i mierzono czas ich wykonania, wraz z czasem potrzebnym między innymi na: rozdanie testów, kredek do oczu lub markerów i podkładek, przypomnienie instrukcji wykonywania CTT-1 A, zmianę arkuszy testowych, przypomnienie instrukcji wykonywania CTT-2 A, zebranie testów i ich zabezpieczenie. Ocena możliwości wykonania zakładanego schematu badawczego była niezbędna celem upewnienia się, iż nie dojdzie do przekroczenia czasu bezdekompresyjnego w trakcie docelowego, podwodnego badania eksperymentalnego (Badanie 5). Jak już wspomniano, czas bezdekompresyjny jest czasem, który płetwonurek może spędzić na danej głębokości, a następnie bezpiecznie wynurzyć się bez stosowania zaawansowanych i skomplikowanych procedur dekompresyjnych (tj. bez przystanków dekompresyjnych - przerw w wynurzaniu się i bez stosowania różnych sztucznych mieszanin oddechowych celem przyspieszenia usuwania azotu z ustroju). Procedury dekompresyjne są domeną nurkowań technicznych<sup>58</sup>, a wiadomym było, iż do grupy eksperymentalnej (Badanie 5) zostaną włączeni płetwonurkowie nie-techniczni (pomimo licznych prób nie udało się zrekrutować odpowiedniej liczby płetwonurków posiadających stosowną wiedzę, uprawnienia i doświadczenie pozwalające na wykonywanie podwodnych nurkowań technicznych/dekompresyjnych). W trakcie procedury pretestowej zoptymalizowano pomiar czasu, a także opracowano standaryzację wykonania testów w warunkach podwodnych i technikę umożliwiającą jednoczesny nadzór nad badanymi i nagrywanie przebiegu badania.

Na zakończenie warto wspomnieć, iż omawiany pretest był pierwszym na świecie badaniem podwodnym z użyciem trimiksu hipoksycznego, pierwszym na świecie badaniem z użyciem rebreathera (aparatu oddechowego z układem zamkniętym, por. Załącznik 1), a także najgłębiej dotychczas przeprowadzonym badaniem podwodnym (~105 m ppw = ~11,5 ATA).

---

<sup>58</sup> Podjęcie się przez płetwonurka nurkowań technicznych (skomplikowanych logistycznie nurkowań z użyciem wielu butli i różnych czynników oddechowych) wymaga ogromnego doświadczenia nurkowego i pomyślnego ukończenia licznych, zaawansowanych kursów. Z tego powodu możliwość pozyskania do badań płetwonurków technicznych jest mocno ograniczona.

Do chwili obecnej, najgłębiej wykonany eksperyment przeprowadził Baddeley i Flemming (1967) - 60 m ppw (7 ATA).

## 20 Badanie 5 - badanie eksperymentalne w warunkach podwodnych

### 20.1 Cel badania

Badanie 5 miało na celu zwiększenie trafności ekologicznej. Ekstrapolacja wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na warunki podwodne jest kontrowersyjna. Jak już wspomniano, Baddeley (1966) wykazał, iż upośledzenie funkcjonowania psychomotorycznego spowodowanego narkozą azotową jest dużo większe w warunkach podwodnych, niż w komorze hiperbarycznej. Badacz w cytowanym artykule napisał: „*it is unwise to generalize from pressure chamber experiments to underwater performance*” (s. 81) (Baddeley, 1966). Dysponujemy także danymi, które sugerują, iż narkoza azotowa w tych dwóch środowiskach ma inny charakter. W porównaniu do warunków podwodnych, narkoza indukowana w komorze hiperbarycznej jest bardziej „euforyczna”, co prawdopodobnie ma związek z mniejszym poziomem lęku jaki odczuwają badani (Hobbs i Kneller, 2011). Istotne różnice pomiędzy warunkami panującymi w komorze i w warunkach podwodnych zostały opisane we wcześniejszej części pracy (por. modele środowiskowe). Wyniki uzyskane w Badaniu 2a i 2b można więc trafnie ekstrapolować na warunki panujące w trakcie „suchych” ekspozycji nadciśnieniowych w dzwonach nurkowych, w TBM (ang. *Tunnel Boring Machine* - maszyna używana do drążenia tuneli), w trakcie terapeutycznych sprężeń w komorze hiperbarycznej czy w trakcie pobytu w habitacie, jednakże ekstrapolacja na warunki podwodne może być ekologicznie nietrafna.

Co istotne, międzyśrodowiskowe różnice w funkcjonowaniu psychomotorycznym zostały wstępnie zbadane (Baddeley, 1966), jednakże do chwili obecnej nie dysponujemy jakimikolwiek danymi o potencjalnych różnicach w funkcjonowaniu aparatu poznawczego w trakcie różnych typów ekspozycji nadciśnieniowych. Omawiana część badań miała na celu określenie roli czynników związanych ze specyfiką oddziaływań biofizycznych (wysokie ciśnienie parcjalne azotu), a także psychologicznych i środowiskowych na funkcjonowanie poznawcze (przeszukiwanie pola percepcyjnego, funkcje wykonawcze) w warunkach hiperbarii „suchej”, jak i podwodnej, a także dalszą dyskusję z zagadnieniem możliwości ekstrapolacji wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na nurkowania podwodne (i odwrotnie). Badanie 5 kontynuowało ocenę funkcjonowania poznawczego (uwaga, funkcje wykonawcze) w warunkach podwodnych, częściowo opierając się na metodologii dwóch wcześniejszych badań oceniających wspomniane zmienne (Brebeck i in., 2017; Steinberg i Doppelmayr, 2017).

## 20.2 Hipotezy badawcze

Mając na uwadze modele środowiskowe (czynniki, które mogą wpływać na funkcjonowanie psychomotoryczne i poznawcze w warunkach hiperbarycznych), a także przytoczone wcześniej piśmiennictwo dotyczące możliwości ekstrapolacji wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na warunki podwodne, celem niniejszego eksperymentu była weryfikacja następujących hipotez badawczych:

**H<sub>1</sub>** W porównaniu do grupy badanej w komorze hiperbarycznej (5 ATA, powietrze), badani z grupy podwodnej (4 ATA, powietrze) będą wykonywali testy CTT-1 A i CTT-2 A istotnie dłużej.

**H<sub>2</sub>** W porównaniu do grupy badanej w komorze hiperbarycznej (5 ATA, powietrze), badani z grupy podwodnej (4 ATA, powietrze) popełnią więcej błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A.

## 20.3 Osoby badane

Do eksperymentu w warunkach podwodnych zostali zrekrutowani doświadczeni płetwonurkowie ( $N = 11$ ; 8 mężczyzn i 3 kobiety, w wieku 32-40 lat ( $M = 35,54$ ,  $SD = 2,69$ ), szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: 50-448 ( $M = 196,72$ ,  $SD = 139,55$ )). 10 badanych miało wyższe wykształcenie, a jeden średnie. Do badania włączono płetwonurków rekreacyjnych (niezawodowych,  $N = 4$ ) i płetwonurków zawodowych (zatrudnionych w strukturach Straży Pożarnej,  $N = 7$ ). W trakcie całego badania eksperymentalnego podjęto próbę rekrutowania i zbadania łącznie 17 płetwonurków, jednakże w 5 przypadkach nie udało się pozyskać wyników (złe warunki nurkowe, odwołanie nurkowania, rezygnacja badanego, zbyt mały margines bezpieczeństwa - zbyt krótki czas bezdekompresyjny lub zbyt mała ilość czynnika oddechowego stwierdzona po osiągnięciu docelowej głębokości). Żaden z badanych nie był psychologiem lub studentem psychologii, a dla wszystkich badanych język polski był językiem ojczystym. Procedura rekrutacji osób do eksperymentu, pod kątem braku przeciwwskazań medycznych, została opisana w Załączniku 48.

Wyniki uzyskane w trakcie podwodnego badania eksperymentalnego zostały porównane z wynikami uzyskanymi w trakcie powietrznej ekspozycji hiperbarycznej w komorze (Badanie 2b). Poniższa tabela podsumowuje charakterystykę porównywanych grup badawczych.

**Tabela 43**

Charakterystyka porównywanych grup badawczych (podwodna grupa eksperymentalna vs. grupa hiperbaryczno-powietrzna z Badania 2b)

Badana zmienna	Warunki podwodne	Warunki komory hiperbarycznej	Siła efektu
	$N = 11$ ; 8 mężczyzn i 3 kobiety; wiek: $M = 35,54$ , $SD = 2,69$ ;	$N = 10$ ; 9 mężczyzn i 2 kobiety; wiek: $M = 36,9$ , $SD = 3,93$ ;	
Przeszukiwanie i funkcje wykonawcze - CTT-1 A i CTT-2 A	10 badanych: wyższe wykształcenie, 1: średnie; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 196,72$ , $SD = 139,55$	11 badanych: wyższe wykształcenie; szacunkowa liczba nurkowań podwodnych: $M = 222,72$ , $SD = 294,34$	$f = 0,64$

Krytyczna wartość siły efektu  $f$  obliczonej przy założeniu wartości  $\alpha = 0,05$  i  $1-\beta = 0,8$

Grupy eksperymentalne badane w komorze hiperbarycznej (5 ATA) i w warunkach podwodnych ( $\sim 30$  m ppw =  $\sim 4$  ATA) nie różniły się istotnie pod względem wieku ( $[F(1, 20) = 0,89$ ;  $p > ,05]$ ) i szacunkowej liczby nurkowań podwodnych ( $[F(1, 20) = 0,07$ ;  $p > ,05]$ ).

#### 20.4 Plan badawczy

Plan badawczy zakładał wykonanie testów CTT-1 A i CTT-2 A po osiągnięciu maksymalnej głębokości przewidzianej dla danego nurkowania ( $\sim 30$  m ppw =  $\sim 4$  ATA).

Ze względu na liczne trudności związane z zaplanowaniem bezpiecznego, podwodnego nurkowania, tak aby powtórzyć pełny schemat badawczy z Badania 2a i 2b, postanowiono przeprowadzić wyłącznie testy oceniające proces przeszukiwania i funkcje wykonawcze (CTT-1 A i CTT-2 A). Przeprowadzenie badania przy tożsamym ciśnieniu otoczenia (5 ATA, komora hiperbaryczna i 40 m ppw = 5 ATA w warunkach podwodnych) było niemożliwe z kilku powodów. Po pierwsze, warto wspomnieć o zbyt małym doświadczeniu (w danej chwili)

eksperymentatora w planowaniu i przeprowadzaniu eksperymentów w nadciśnieniu. Podkreślić należy również zbyt krótki czas bezdekompresyjny, który występuje na głębokości 40 m ppw, który uniemożliwił bezpieczne przeprowadzenie wszystkich testów na grupie płetwonurków nie-technicznych, którzy zostali włączeni do badania (brak należytego marginesu bezpieczeństwa). Jak już wspomniano, pozyskanie do grup badawczych płetwonurków technicznych, którzy mogliby przekroczyć czas bezdekompresyjny, stosując następnie procedury dekompresyjne<sup>59</sup> w trakcie wynurzania się była mocno ograniczona. Wspomnieć należy także o nieakceptowalnie dużym zużyciu mieszanki oddechowej na głębokości 40 m ppw<sup>60</sup> (po raz kolejny - brak należytego marginesu bezpieczeństwa).

Warto jeszcze raz przypomnieć, iż osoby badane w komorze hiperbarycznej (Badanie 2a i 2b), ze względu na profil nurkowy, zaabsorbowali tak dużą ilość azotu, iż było wymagane przeprowadzenie wynurzenia z przystankami dekompresyjnymi (tj. miało miejsce powietrzne nurkowanie dekompresyjne/techniczne). Jakkolwiek większość z osób biorących udział w eksperymencie nie była płetwonurkami technicznymi, wykonali oni nurkowanie techniczne według bezpiecznego profilu nurkowania przygotowanego wcześniej przez badacza i instruktora nurkowania technicznego<sup>61</sup>. Profil dekompresyjny został również wielokrotnie zweryfikowany przez lekarza zabezpieczającego badanie w komorze, a także przez certyfikowanego technika przeprowadzającego sprzężenie. Nad prawidłowym przebiegiem ekspozycji hiperbarycznej czuwał eksperymentator, technik obsługujący komorę i lekarz dyżurny ośrodka hiperbarycznego<sup>62</sup>. Podsumowując, płetwonurkowie nie-techniczni włączeni do Badania 2a i 2b wykonali w komorze hiperbarycznej nurkowanie techniczne (wymagające zaawansowanej dekompresji), które zostało odpowiednio zaplanowane, przeprowadzone i nadzorowane. Ze względów bezpieczeństwa nie wolno wymagać od płetwonurków nie-technicznych, którzy zostali włączeni do badania, aby wykonywali podwodne nurkowania dekompresyjne, których charakterystyka znacznie przekracza ich poziom wyszkolenia i doświadczenia.

Czas bezdekompresyjny na głębokości 40 m ppw wynosi około 6-7 minut, co zarówno nie pozwala na przeprowadzenie tożsamego planu badawczego, co w Badaniu 2a i 2b, jak i, co najważniejsze, nie pozostawia należytego marginesu bezpieczeństwa. Przekroczenie czasu

---

<sup>59</sup> Do procedur dekompresyjnych zaliczyć można przystanki dekompresyjne (przerwy w wynurzaniu), a także użycie sztucznych mieszanin oddechowych, które powodują przyspieszenie wydalania azotu z organizmu.

<sup>60</sup> Im głębsze nurkowanie, tym większe zużycie mieszanki oddechowej.

<sup>61</sup> Profil przygotowano dzięki pomocy instr. Honoraty Kacprzak.

<sup>62</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy mgr. inż. Łukasza Pupkiewicza i dr. Jacka Piechockiego.

bezdekompresyjnego oznacza konieczność zastosowania procedur dekompresyjnych (przystanki dekompresyjne, oddychanie sztucznymi mieszaninami oddechowymi), których płetwonurkowie nie-techniczni (którzy zostali włączeni do Badania 5) nie byli szkoleni. Czas bezdekompresyjny na głębokości 30 m ppw jest dłuższy (około 17 minut) jednakże ze względu na wspomniane zbyt małe doświadczenie badacza (w danej chwili) w wykonywaniu testów w warunkach podwodnych, a także ze względu na chęć uproszczenia procedury badawczej i pozostawienia jednocześnie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa - wykonano wyłącznie testy CTT-1 A i CTT-2 A<sup>63</sup>.

Podkreślić należy również, iż wraz ze wzrostem głębokości wzrasta zużycie mieszaniny oddechowej. Aby móc bezpiecznie przeprowadzić badanie na głębokości 40 m ppw wszyscy uczestnicy eksperymentu musieliby używać zestawów dwubutlowych (ang. *twinset*). Nurkowanie w tej konfiguracji wymaga jednak dysponowania odpowiednim sprzętem, a także wymaga odbycia dedykowanego szkolenia i posiadania doświadczenia w wykonywaniu tego typu nurkowań. W trakcie eksperymentu w warunkach podwodnych 7 badanych używało zestawu dwubutlowego (płetwonurkowie zatrudnieni w strukturach Straży Pożarnej), a 4 badanych - pojedynczej butli. Nurkowanie na głębokość 40 m ppw z użyciem pojedynczej butli mogłoby stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia płetwonurków z powodu niedostatecznego zapasu powietrza.

Wszystkie wymienione powyżej czynniki spowodowały konieczność przeprowadzenia badania podwodnego przy niższym ciśnieniu otoczenia (o 1 ATA, a więc przy niższym ciśnieniu parcjalnym azotu), w porównaniu do Badania 2a i 2b. Z tego powodu uzyskane dane należy traktować jako wyniki wstępne, służące do początkowych rozważań na temat różnic w międzyrodowiskowym funkcjonowaniu procesów poznawczych. Wspomniane rozważania mogą być asumptem do przeprowadzenia badań podwodnych przy tożsamym ciśnieniu otoczenia (5 ATA) w przyszłości.

---

<sup>63</sup> Zakładając 2 minuty i 30 sekund na fazę przypominania i zapamiętywania (2x 75 sekund) przy docelowym ciśnieniu otoczenia (4 ATA), 8 minut na wykonanie testów CTT-1 A i CTT-2 A i 3 minuty „marginesu bezpieczeństwa”, pozostają 3 minuty i 30 sekund na: rozdanie testów, przypomnienie badanym (w warunkach podwodnych, za pomocą gestów) sposobu wykonania CTT-1 A i CTT-2 A, zmianę arkuszy testowych, a także zebranie testów i ich zabezpieczenie, co wydawało się zbyt krótkim czasem, zakładając, iż badania prowadziły różne osoby (eksperymentator i pomocnicy eksperymentatora, zakładając ich brak doświadczenia w wykonywaniu badań naukowych w warunkach podwodnych).

## 20.5 Procedura badawcza

W celu przeprowadzenia podwodnej procedury eksperymentalnej, oryginalne testy CTT-1 A i CTT-2 A zostały zalaminowane przy użyciu przezroczystej folii. Badani wpinali je w plastikowe, nieprzemakalne clipboardsy, a następnie rozwiązywali przy pomocy specjalnych markerów służących do pisania pod wodą.

Badanie eksperymentalne przeprowadzono w trakcie nurkowań w morzu Arktycznym ( $N = 3$ )<sup>64,65</sup>, w jeziorze Piłakno (Polska,  $N = 1$ )<sup>66</sup>, a także w jeziorze Pile (Polska) ( $N = 7$ )<sup>67</sup>. Wszystkie nurkowania odbywały się na głębokość ~30 m ppw (~4 ATA) i były nurkowaniami bezdekompresyjnymi, wykonywanymi w suchych skafandrach, aparatach o obiegu otwartym (por. Załącznik 1) i z użyciem powietrza jako czynnika oddechowego. 7 badanych używało masek pełnotwarzowych (płetwonurkowie ze Straży Pożarnej), a 4 - standardowych masek nurkowych. Ze względu na różną charakterystykę zbiorników wodnych i różne doświadczenie nurkowe osób badanych, testy wykonywano na platformie ( $N = 7$ , jezioro Pile), w trakcie zawisu w toni<sup>68</sup> ( $N = 3$ , morze Arktyczne), a także przy linie (służącej do zanurzania i wynurzania się) ( $N = 1$ , jezioro Piłakno). Warunki nurkowe zależały od miejsca badania, co zostało przedstawione w poniższej tabeli.

**Tabela 44**

Warunki środowiskowe panujące w akwenach wodnych w których przeprowadzono badania

Miejsce badania	Temperatura wody	Przezierność wody
Morze Arktyczne	5°C	15-20 m
Jezioro Piłakno	4°C	~2 m
Jezioro Pile	7°C	~4m

Średnia temperatura wody w trakcie badania wynosiła 6,25°C ( $SD = 1,13$ ), a średnia przezierność wody 7,2 m ( $SD = 6,23$ ). Pomimo przeprowadzenia badania w różnych akwenach

<sup>64</sup> Okolice wyspy Spitsbergen (Norwegia).

<sup>65</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy instr. Kamila Wąsowicza.

<sup>66</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy instr. Katarzyny Stankiewicz.

<sup>67</sup> Badanie przeprowadzono dzięki pomocy dr. Jacka Piechockiego, instr. Radosława Szymańskiego i instr. Łukasza Piaskowskiego.

<sup>68</sup> Jakkolwiek badanie przeprowadzone w trakcie zawisu w toni najbardziej przypomina realne warunki nurkowe, wymaga jednak od płetwonurka doskonałej kontroli pływalności („unoszenia się w wodzie”). Jednoczesna kontrola pływalności i wykonywanie testów przekraczały umiejętności niektórych płetwonurków.



wodnych warunki eksperymentalne były podobne. Pomiarów dokonano na wodach zimnych, a wszyscy badani musieli używać latarek nurkowych, ze względu na znaczny niedostatek światła.

Dla zmaksymalizowania bezpieczeństwa, siedem nurkowań odbyło się z dodatkowym, podwodnym zabezpieczeniem w powietrze (butla powietrzna przyczepiona do boi na głębokości 5 m ppw). W trakcie 7 nurkowań ma miejscu był obecny lekarz i eksperymentator. Autor niniejszej rozprawy był obecny pod wodą w trakcie dwóch pierwszych nurkowań eksperymentalnych, a lekarz lub instruktor nurkowy przy pięciu kolejnych. Przy pozostałych ekspozycjach podwodnych ( $N = 4$ ; Morze Arktyczne, jezioro Piłakno) badacz był nieobecny, a eksperyment nadzorowali instruktorzy nurkowania. Zarówno lekarz, jak i instruktorzy zostali wcześniej odpowiednio przeszkoleni z charakterystyki i sposobu przeprowadzania testów CTT-1 A i CTT-2 A. Analogicznie do badań przeprowadzonych w komorze hiperbarycznej (Badanie 2a i 2b) - eksperymenty były nagrywane, a czasy wykonania testów i liczba błędów były mierzone/liczone po wynurzeniu (w trakcie oglądania filmu z eksperymentu). Zarówno w trakcie, jak i po badaniu nie wystąpiły jakiegokolwiek powikłania związane z ekspozycją hiperbaryczną.

Zdjęcie przedstawiające przygotowany do badania sprzęt nurkowy i wyposażenie badawcze autora przedstawia Załącznik 65. Przykładowy profil nurkowania zawiera Załącznik 66. Zdjęcie poglądowe przedstawiające podwodną procedurę eksperymentalną umieszczono w Załączniku 67<sup>69</sup>.

## 20.6 Analizy statystyczne

Porównano 11 wyników CTT-1 A pozyskanych w komorze hiperbarycznej i 11 wyników CTT-1 A uzyskanych w warunkach podwodnych. W warunkach hiperbarii powietrznej jeden z badanych nie wykonał do końca testu CTT-1 A, po czym zasygnalizował (podniesienie ręki), iż test ukończył. Ze względu na małą grupę badawczą postanowiono włączyć popełnione przez badanego błędy w trakcie wykonywania części testu do analizy porównawczej. Do analizy nie włączono czasu wykonania testu.

---

<sup>69</sup> W tym miejscu warto zwrócić uwagę na potencjalne różnice w funkcjonowaniu poznawczym i psychomotorycznym wywołanym narkozą azotową występującą w różnych warunkach nurkowych (por. doskonałe warunki panujące w trakcie nurkowań w zatoce Akaba (Załącznik 63) vs. trudne warunki nurkowe w Polsce (Załącznik 67)). Ocena różnic w funkcjonowaniu poznawczym pomiędzy tymi dwoma środowiskami nie stanowi tematu niniejszej rozprawy doktorskiej, niemniej warto ponownie zwrócić uwagę, iż rozważania na ten temat można znaleźć w piśmiennictwie (Baddeley i in., 1968; Baddeley i in., 1968).

Porównano również 10 wyników CTT-2 A z grupy komorowej i 11 wyników CTT-2 A uzyskanych w warunkach podwodnych. Nierównoliczność grup wynika z faktu wykonania testu niezgodnie z instrukcją przez jedną osobę z grupy badanej w warunkach komory hiperbarycznej (połączenie kółek o jednym kolorze, przy zachowaniu rosnącego ciągu liczbowego).

Analizy statystyczne (jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) w celu oceny różnic międzygrupowych (komora hiperbaryczna, 5 ATA vs. warunki podwodne, ~30 m ppw = ~4 ATA) wykonano w programie IBM SPSS Statistics (IBM Corporation, USA).

## 20.7 Wyniki

Badani w warunkach podwodnych, w porównaniu do grupy badanej w komorze przy 5 ATA, wykonywali testy CTT-1 A i CTT-2 A istotnie dłużej (CTT-1 A [ $F(1, 20) = 32,91$ ;  $p < ,001$ ;  $f = 1,26$ ], CTT-2 A [ $F(1, 19) = 4,79$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,48$ ]).

### Tabela 45

Średnie czasy wykonania CTT-1 A i CTT-2 A

Typ testu	M (czas wykonania)		
	K*	W**	p
CTT-1 A	36,9 s (13,35)	91,72 s (27,7)	< ,001
CTT-2 A	83,2 s (27,43)	142,81 s (81,87)	< ,05

W nawiasach umieszczono wartość odchylenia standardowego (*SD*)

\*Grupa badana w komorze hiperbarycznej (5 ATA)

\*\*Grupa badana pod wodą (~30 m ppw = ~4 ATA)

Wskaźnik zakłóceń był istotnie różny międzygrupowo ( $[F(1, 17) = 10,66$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,72$ ],  $M_{\text{komora}} = 1,54$ ,  $SD_{\text{komora}} = 1,04$  vs.  $M_{\text{woda}} = 0,45$ ,  $SD_{\text{woda}} = 0,16$ ). Graficzne przedstawienie czasów wykonania CTT-1 A i CTT-2 A zawiera załącznik 68.

Osoby biorące udział w eksperymencie w warunkach podwodnych, w porównaniu do grupy badanej w komorze, popełnili istotnie mniej prawie błędów w trakcie rozwiązywania CTT-1 A ( $[F(1, 20) = 5,71$ ;  $p < ,05$ ;  $f = 0,5$ ], komora: 4 vs. woda: 0,  $M_{\text{komora}} = 0,36$ ,

$SD_{komora} = 0,5$  vs.  $M_{woda} = 0$ ,  $SD_{woda} = 0$ ). Liczba pozostałych błędów możliwych do popełnienia w trakcie wykonywania CTT-1 A i CTT-2 A nie była istotnie różna międzygrupowo (CTT-2 A prawie błąd ( $[F(1, 19) = 2,48; p > ,05; f = 0,34]$ ), CTT-1 A błąd poprawiony ( $[F(1, 20) = 1; p > ,05; f = 0,21]$ ), CTT-1 A błąd niepoprawiony ( $[F(1, 20) = 1; p > ,05; f = 0,21]$ ), CTT-2 A błąd kolejności poprawiony ( $[F(1, 19) = 0,9; p > ,05; f = 0,21]$ ), CTT-2 A błąd koloru poprawiony ( $[F(1, 19) = 0,13; p > ,05; f = 0,08]$ ), CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony ( $[F(1, 19) = 1; p > ,05; f = 0,13]$ ). W żadnej z porównywanych grup nie wystąpił niepoprawiony błąd kolejności w trakcie wykonywania CTT-2 A. Jeden badany z grupy komorowej nie wykonał do końca CTT-1 A, a jeden z badanych (także z grupy komorowej) wykonał CTT-2 A niezgodnie z instrukcją (połączył kółka o jednakowym kolorze, zachowując rosnący ciąg liczbowy).

**Tabela 46**

Liczba błędów popełnionych przez badanych w warunkach komory hiperbarycznej (5 ATA) i w warunkach podwodnych (~30 m ppw = ~4 ATA)

Typ błędu	Komora	
	hiperbaryczna, 5 ATA	Warunki podwodne, 30 m ppw = 4 ATA
CTT-1 A prawie błąd	4*	0*
CTT-2 A prawie błąd	2	0
CTT-1 A błąd poprawiony	1	0
CTT-1 A błąd niepoprawiony	1	0
CTT-2 A błąd kolejności poprawiony	0	1
CTT-2 A błąd kolejności niepoprawiony	0	0
CTT-2 A błąd koloru poprawiony	2	3
CTT-2 A błąd koloru niepoprawiony	5	4
Niewykonanie CTT-1 A	1	0
Niewykonanie CTT-2 A	0	0
CTT-1 A niezgodność z instrukcją	0	0
CTT-2 A niezgodność z instrukcją	1	0

\*Istotne różnice międzygrupowe

## 20.8 Interpretacja wyników i dyskusja

Celem Badania 5 była międzyśrodowiskowa ocena różnic w funkcjonowaniu psychomotorycznym i poznawczym. Mając na uwadze czynności psychomotoryczne, w porównaniu do grupy komorowej, osoby biorące udział w eksperymencie podwodnym wykonywały testy istotnie dłużej, pomimo ciśnienia otoczenia mniejszego o 1 ATA. Badani w warunkach komory hiperbarycznej potrzebowali na wykonanie CTT-1 A od 23 do 64 sekund ( $M = 36,9$ ,  $SD = 13,35$ ), a w warunkach podwodnych od 58 do 153 sekund ( $M = 91,72$ ,  $SD = 27,70$ ). Wykonanie CTT-2 A w komorze zajmowało od 43 do 139 sekund ( $M = 83,2$ ,  $SD = 27,43$ ), a pod wodą od 81 do 376 sekund ( $M = 142,81$ ,  $SD = 81,87$ ).

Wydłużenie czasu wykonywania testów należy interpretować poprzez pryzmat innego sposobu testowania (komora - test papierowy i długopis vs. woda - zalaminowany test i specjalny marker do pisania pod wodą). Aby wyeliminować czynnik związany z innym sposobem testowania - w przyszłości warto prowadzić badania (zarówno w komorze hiperbarycznej, jak i w warunkach podwodnych) z użyciem tabliczek nurkowych z nadrukowanym testem i specjalnym rysikiem, po uprzednim uzyskaniu zgody autorów testu na wspomnianą modyfikację. Wydaje się jednak, iż bardziej istotną rolę w genezie międzygrupowych różnic miała inna specyfika środowiska badawczego. W warunkach podwodnych płetwonurek musi utrzymywać pływalność, pokonać opór wody, a test wykonuje w rękawicach nurkowych, w ciemności, przy świetle latarki itd.

Uzyskane wyniki potwierdzają wnioski z eksperymentu Baddeleya (1966) i są kolejnym dowodem popierającym tezę, iż ekstrapolacja wyników badań oceniających czynności psychomotoryczne (mierzone parametrami takimi jak szybkość czy zręczność (ang. *dexterity*)) z komory hiperbarycznej na warunki podwodne (i odwrotnie) jest niezasadna - nawet dla mniejszego ciśnienia otoczenia. Potwierdzono zatem pierwszą hipotezę badawczą. Cytując i jednocześnie wtórując Baddeleyowi (1966): „*it is unwise to generalize from pressure chamber experiments to underwater performance*” (s. 81). Podkreślić jeszcze raz należy fakt, iż większość wiedzy o narkozie azotowej pochodzi z badań komorowych.

Biorąc pod uwagę międzyśrodowiskowe różnice w funkcjonowaniu aparatu poznawczego, warto ponownie przywołać wzór na obliczanie wskaźnika zakłóceń (WZ):

$$WZ = \frac{\text{czas potrzebny na wykonanie CTT-2 A} - \text{czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A}}{\text{czas potrzebny na wykonanie CTT-1 A}}$$

WZ informuje o wydłużeniu czasu potrzebnego do wykonania zadania o większym stopniu złożoności poznawczej (CTT-2 A), w porównaniu do zadania mniej złożonego (CTT-1 A).

Jak już wspomiano, wskaźnik zakłóceń pomiędzy grupą normobaryczną (Pretest 1 + Pretest 2), a hiperbaryczno-powietrzną (Badanie 2b) nie był istotnie różny. Przeciwnie, stwierdzono istotne różnice międzygrupowe w zakresie WZ pomiędzy grupami wykonującymi testy w warunkach hiperbarycznej ekspozycji „suchej” i podwodnej<sup>70</sup>.

Średnia różnica czasów wykonania CTT-1 A i CTT-2 A wynosiła w komorze hiperbarycznej 48,55 sekund ( $SD = 30,15$ ), a w warunkach podwodnych 51,09 sekund ( $SD = 60,58$ ). Po wyłączeniu wyniku istotnie odbiegającego od reszty wyników z grupy podwodnej (223 sekundy), co jednocześnie sprawia, że porównywane grupy są równoliczne ( $N = 10$ ), średnia różnica czasów w komorze hiperbarycznej wynosiła 48,55 s ( $SD = 30,15$ ) i 33,9 s ( $SD = 21,6$ ) w warunkach podwodnych. Wynik ten oznacza, iż pod wodą czas wykonania CTT-2 A, w porównaniu do CTT-1 A, ulegał mniejszemu wydłużeniu, niż w warunkach komory hiperbarycznej.

Wydaje się, iż właściwości fizyczne środowiska podwodnego, jak i specyficzne ograniczenia motoryczne związane z używaniem sprzętu nurkowego sprawiały, iż badani w warunkach podwodnych wykonywali CTT-1 A istotnie dłużej, niż w komorze hiperbarycznej. Analogicznie, czynności psychomotoryczne wymagane do ukończenia CTT-2 A były moderowane przez ekspozycję na środowisko wodne. Spowolnienie wykonywania testów pod wodą przez czynniki zewnętrzne (czynniki środowiskowe) zapewniało wystarczającą lub prawie wystarczającą ilość czasu na odpowiednią poznawczą analizę zadania, co skutkowało mniejszą różnicą czasów wykonania CTT-2 A i CTT-1 A pomiędzy omawianymi dwoma środowiskami badawczymi. W komorze hiperbarycznej analiza poznawcza testu trwała dłużej niż czynności psychomotoryczne (łączenie punktów), a w warunkach podwodnych miała miejsce sytuacja odwrotna.

Kolejnym, paralelnym wytłumaczeniem uzyskanego wyniku może być niedoskonałość metodologiczna. Badani w trakcie wykonywania CTT-1 A w warunkach podwodnych mogli zoptymalizować sposób wykonywania testu („nauczyli się” optymalnie korzystać z markera, zaadaptowali się do warunków badania, uzyskali idealną pływalność itd.), co spowodowało większą sprawność motoryczną w trakcie wykonywania CTT-2 A. Z tego powodu warto rozważyć w przyszłości wykonanie przez badanych testu próbnego na docelowej głębokości. Ze względu na wysokie ryzyko automatyzacji, test ten powinien być jednak różny od testu,

---

<sup>70</sup> W grupie badanej pod wodą, w jednym przypadku WZ przyjął wartość ujemną, co oznacza, iż badany potrzebował mniej czasu na wykonanie CTT-2 A, niż na CTT-1 A. Ujemny wynik wskaźnika zakłóceń nie został przewidziany ani przez autorki testu, ani autorki polskiej adaptacji (por. D’Elia i in., 2012; Łojek i Stańczak, 2012).

który zostanie poddany analizie. Z drugiej strony, wykonanie testu próbnego może stanowić ryzyko przekroczenia czasu bezdekompresyjnego czy spadku ilości czynnika oddechowego do niebezpiecznego poziomu. Po raz kolejny warto zwrócić uwagę, iż specyficzne warunki badawcze nie pozwalają na osiągnięcie optimum metodologicznego.

Grupy badane w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych różniły się istotnie pod względem liczby prawie błędów w trakcie wykonywania CTT-1 A. W komorze (5 ATA) badani popełnili wspomniany błąd cztery razy, a w warunkach podwodnych (~4 ATA) nie wystąpił on ani razu. Prawie błąd podczas rozwiązywania CTT-2 A wystąpił 2 razy w warunkach „suchej” hiperbarii i ani razu pod wodą, jednakże różnica ta nie osiągnęła poziomu istotności. Celem przypomnienia, błąd ten polega na inicjalizacji połączenia pomiędzy niewłaściwymi kółkami, z następowym połączeniem z właściwym kółkiem. Omawiany wynik należy interpretować poprzez pryzmat efektu przetargu szybkość-poprawność (ang. *speed-accuracy trade off*). Im szybciej wykonywane jest dane zadanie, tym mniejsza jego poprawność - występuje więcej błędów (i odwrotnie). W komorze hiperbarycznej efekt ten się nie ujawnił - badani wykonywali test tak samo szybko jak w normobarii, ale popełnili istotnie więcej błędów. Z kolei ekspozycja na warunki podwodne wymuszała wolniejsze wykonywanie testów, przez co badany miał odpowiednią ilość czasu na wykonanie wymaganych operacji poznawczych i odpowiednio głęboką analizę zadania, co skutkowało mniejszą (tu: zerową) liczbą prawie błędów wynikających ze zbyt płytkiej analizy (dłuższy „motoryczny” czas wykonania zadania indukował dłuższy czas na jego poznawczą analizę). Ujmując zagadnienie z perspektywy funkcji wykonawczych - proces hamowania (oceniany za pomocą liczby prawie błędów) był istotnie upośledzony w warunkach komory hiperbarycznej (5 ATA), w porównaniu do warunków normobarycznych. W środowisku podwodnym (~4 ATA) hamowanie nie uległo mierzalnemu upośledzeniu, ze względu na dłuższy czas, który mógł być spożytkowany na analizę poznawczą (0 prawie błędów zarówno w trakcie wykonywania CTT-1 A, jak i CTT-2 A). W tym miejscu warto ponownie przywołać pracę Steinberga i Doppelmayra (2017), którzy wykazali, iż proces hamowania (mierzony Testem Stroopa) był istotnie upośledzony pod wodą, na głębokości 20 m ppw (co odpowiada ciśnieniu 3 ATA). Podczas Badania 5 ciśnienie otoczenia wynosiło ~4 ATA, co znacznie przekraczało wspomniane ciśnienie parcjalne azotu przy którym stwierdzono zaburzenie wspomnianej zmiennej, jednakże środowisko podwodne istotnie spowalniało wykonywanie czynności motorycznych i tym samym dochodziło do kompensacji zaburzonej kontroli zachowania. Nie potwierdzono zatem drugiej hipotezy badawczej. Warunki „suchej” hiperbarii powietrznej i środowisko podwodne indukowało inne

strategie poznawcze wykorzystywane przez badanych. Z tego powodu niezasadna jest ekstrapolacja wyników testów wykonanych w warunkach komory hiperbarycznej oceniających funkcjonowanie poznawcze na warunki podwodne (i odwrotnie). Pomimo faktu, iż ciśnienie pod wodą było o 1 ATA mniejsze w stosunku do ciśnienia panującego w komorze, liczba pozostałych błędów w warunkach: 5 ATA (komora hiperbaryczna) vs. ~4 ATA (warunki podwodne) nie była istotnie różna. Wynik ten również kwestionuje możliwość międzyrodowiskowej ekstrapolacji wyników.

Podsumowując całość rozważań, na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej przeprowadzono pierwsze na świecie badanie, którego głównym celem była próba oceny różnic w funkcjonowaniu wybranych czynności poznawczych (przeszukiwanie, funkcje wykonawcze) w dwóch środowiskach hiperbarycznych. W porównaniu do „suchej” ekspozycji nadciśnieniowej, stwierdzono, iż czynności psychomotoryczne były wykonywane w warunkach podwodnych istotnie dłużej. Dłuższe wykonywanie zadań pod wodą powodowało wystąpienie efektu przetargu szybkość-poprawność, który moderował czynności poznawcze i stanowił o międzyrodowiskowych różnicach w funkcjonowaniu aparatu poznawczego. Ekstrapolacja wyników uzyskanych w komorze hiperbarycznej na warunki nurkowań podwodnych (i odwrotnie) jest nietrafna i niezasadna. Ze względu na znaczne różnice w metodologii badań podwodnych, które oceniały przeszukiwanie (Brebeck i in., 2017), jak i funkcje wykonawcze (Steinberg i Doppelmayr, 2017) nie jest możliwym podjęcie dyskusji z wcześniej opublikowanym piśmiennictwem. Brebeck i in. (2017) oceniali przeszukiwanie u płetwonurków, którzy oddychali powietrzem lub nitroksem (EAN28, 28% O<sub>2</sub>, 72% N<sub>2</sub>) na głębokości 24 m ppw, a Steinberg i Doppelmayr (2017) badali działanie funkcji wykonawczych przy użyciu specjalnego tabletu przystosowanego do pracy w warunkach podwodnych (powietrze jako czynnik oddechowy; 20 m ppw).

W tym miejscu warto dodać, że van Wijk i Meintjes (2014) wykazali, iż wyższe wykształcenie może do pewnego stopnia kompensować upośledzenie funkcjonowania poznawczego wywołanego narkozą azotową. Jest to kompensacja „wewnętrzna”, zależna od indywidualnych cech jednostki. Środowisko podwodne, a także sprzęt nurkowy spowalniają czynności psychomotoryczne, przez co badany ma więcej czasu na poznawczą analizę zadania. Spowolnienie psychoruchowe, które sprawia trudności przy wykonywaniu niektórych czynności pod wodą, skutkuje jednocześnie „zewnętrzna” kompensacją niektórych czynności poznawczych. Co więcej, wspomniany rodzaj kompensacji dotyczy wszystkich płetwonurków przebywających pod wodą.

Na zakończenie warto podkreślić, iż w pełni trafna interpretacja otrzymanych wyników nie jest możliwa ze względu na fakt, iż grupy były badane w różnych warunkach ciśnienia otoczenia (a więc i przy różnych ciśnieniach parcjalnych azotu:  $ppN_{2\text{komora}} = 3,9 \text{ ATA}$  vs.  $ppN_{2\text{woda}} = 3,12 \text{ ATA}$ ). Należy w przyszłości przeprowadzić badanie pod wodą przy tożsamym ciśnieniu, które panowało w komorze hiperbarycznej ( $5 \text{ ATA} = 40 \text{ m ppw}$ ). Jak już jednak wspomniano, badanie na tej głębokości było z licznych powodów niemożliwe i z tego powodu omawiane dane należy traktować jako wyniki wstępne, które posłużyły do początkowych rozważań nad międzyśrodkowymi różnicami w funkcjonowaniu wybranych składowych aparatu poznawczego. Należy przeprowadzić kolejne badania, w trakcie których zostaną rozwiązane problemy logistyczne, które uniemożliwiły przeprowadzenie eksperymentalnych nurkowań z użyciem powietrza powyżej głębokości  $30 \text{ m ppw}$  ( $> 4 \text{ ATA}$ ). Warto również włączyć do analizy poziom lęku jako stanu (mierzonego za pomocą kwestionariuszy). Możliwym jest, iż większy lęk odczuwany w warunkach podwodnych (w porównaniu do środowiska komory hiperbarycznej; Hobbs i Kneller, 2011) może uszczuplać zasoby poznawcze niezbędne do wykonania zadania, co również może stanowić o międzyśrodkowych różnicach w funkcjonowaniu poznawczym. Hipoteza ta wymaga weryfikacji w toku przyszłych eksperymentów.

Na zakończenie podkreślić należy, iż niektóre istotne wyniki nie osiągnęły krytycznej siły efektu, co implikuje ostrożność przy ich interpretacji. Potrzebne są dalsze badania, aby zweryfikować wpływ narkozy azotowej na wybrane zmienne poznawcze w omawianych dwóch warunkach środowiskowych.



## **21 Ograniczenia metodologiczne badań przeprowadzonych w komorze hiperbarycznej i w warunkach podwodnych**

Ograniczenia metodologiczne konkretnych badań zostały przedstawione w akapitach dotyczących interpretacji wyników. W szczególności podkreślić należy, iż istotnymi wadami wspomnianych eksperymentów są niewielkie grupy badawcze, jak i przeprowadzenie badań w schemacie międzygrupowym (zamiast badań z powtarzanym pomiarem). Szczegółowy opis przyczyn wspomnianych ograniczeń został umieszczony w Załączniku 69 i 70.

## 22 Zakończenie

Minęło 196 lat od opisanego stanu „oszołomienia i euforii” w trakcie pobytu w warunkach zwiększonego ciśnienia otoczenia, przypominającego upojenie alkoholowe (1826 rok) i 87 lat od momentu udowodnienia, że to azot jest odpowiedzialny za to zjawisko (Behnke i in., 1935; Unsworth, 1966). Niestety, do chwili obecnej narkoza azotowa wciąż jest zjawiskiem słabo poznanym. Pomimo faktu, iż wielokrotnie wykazywano, że hiperbaryczny azot może w istotny sposób wpłynąć zarówno na bezpieczeństwo osób przebywających w nadciśnieniu, jak i na jakość wykonywanych prac w warunkach hiperbarycznych - rocznie jest publikowanych najwyżej kilka badań eksperymentalnych z tego zakresu. Przykładowo, w wyszukiwarce PubMed, używając kryterium wyszukiwania tytuł/abstrakt „*nitrogen narcosis*” znaleziono tylko jeden artykuł oryginalny z 2021 roku, zero z 2020, dwa z 2019, jeden z 2018, cztery z 2017, jeden z 2016, zero z 2015 itd. Autor ma nadzieję, iż niniejsza rozprawa doktorska wzbogaci dotychczasową wiedzę o tym zjawisku, zwiększy świadomość dotyczącą zagrożeń związanych z narkozą azotową, a także wskaże obszary, które wymagają prowadzenia dalszych badań.

W serii eksperymentów wykazano, iż odpamiętywanie materiału w warunkach „suchych” ekspozycji hiperbaryczno-powietrznych (5 ATA), który został zapamiętany w normobarii, może być istotnie upośledzone. Wniosek ten jest o tyle istotny, że aktualnie obowiązujący limit głębokościowy dla nurkowań powietrznych (które stanowią absolutną większość ekspozycji hiperbarycznych) wynosi właśnie 40 metrów ppw (5 ATA, zgodnie z największą na świecie federacją nurkową PADI). Potwierdzono również możliwość negatywnego wpływu narkozy na zapamiętywanie materiału w warunkach nadciśnienia (5 ATA), objawiającego się istotnie mniejszą liczbą odpamiętanych słów w okresie poekspozycyjnym. Co więcej, kontynuowano badanie zjawiska zniekształceń pamięciowych, nie wykazując aby odpamiętywanie słów, które nie występowały w materiale przedstawionym do zapamiętania stanowiło istotną składową zaburzeń procesów pamięciowych.

Mając na uwadze testy mierzące uwagę wzrokową, nie stwierdzono zaburzeń funkcjonowania uwagi intensywnej i ekstensywnej w ujęciu Kolańczyk (1991), ani wystąpienia kompensacyjnego efektu przetargu szybkość-poprawność na jakość wykonywania testów. Zagadnienie potencjalnych mechanizmów kompensacyjnych mających na celu zniwelowanie wpływu narkozy na poznanie wymaga dalszych badań. Z eksperymentu Steinberga i Doppelmayra (2017) wiadomo, że hamowanie (w przeciwieństwie do przerzutności i odświeżania informacji w pamięci roboczej) może ulec upośledzeniu już w warunkach 3 ATA.

W niniejszej pracy wykazano, że wszystkie funkcje wykonawcze w ujęciu Miyake i in. (2000) są podatne na zaburzenia spowodowane narkozą, w dopuszczalnych limitach głębokościowych nurkowań powietrznych (tj. do 5 ATA).

W toku badań stwierdzono, że stres (wraz z trudnymi warunkami środowiskowymi) spowodowany ekspozycją hiperbaryczną z użyciem mieszaniny helowo-tlenowej (przy 5 ATA) może negatywnie wpływać zarówno na procesy pamięciowe, jak i na funkcje wykonawcze. Jest to ważny wniosek, gdyż do tej pory tylko w dwóch badaniach przeprowadzonych w trakcie bardzo głębokich (10 i 19 ATA, co odpowiada 90 i 180 m ppw) nurkowań helioksowych stwierdzono pogorszenie funkcjonowania pamięci długotrwałej (Biersner i Cameron, 1970; Fowler i Ackles, 1975). Na dużo mniejszych głębokościach (5 ATA = 40 m ppw) również może dochodzić do istotnego wpływu stresu na poznanie, co ma implikacje praktyczne dla wysokospecjalistycznych, głębokich nurkowań z użyciem mieszanin helowo-tlenowych. Nadmienić należy, iż te bardzo trudne i skomplikowane ekspozycje hiperbaryczne są oparte na stosunkowo ubogich danych naukowych (ze względu na znaczne trudności związane z przeprowadzaniem badań z użyciem drogich i trudno dostępnych mieszanin helioksowych).

Stwierdzono szczególną podatność neutralnego emocjonalnie materiału na zaburzenia spowodowane narkozą azotową, co może mieć istotne implikacje praktyczne. Stres spowodowany ekspozycją hiperbaryczną z użyciem nienarkotycznej mieszaniny helowo-tlenowej również powoduje zmianę charakterystyki odpamiętanego materiału, jednakże uzyskane dane nie pozwalają na wysunięcie w pełni trafnych wniosków. Omawiane wyniki mogą posłużyć jako asumpt do kontynuowania badań nad wspomnianymi specyficznymi składowymi zaburzeń procesów pamięciowych w warunkach nadciśnienia, w zależności od użytej mieszaniny oddechowej.

W trakcie badań podwodnych potwierdzono wyniki Baddeleya (1966), uzyskując kolejny dowód potwierdzający niezasadność ekstrapolacji testów psychomotorycznych przeprowadzanych w warunkach "suchych" ekspozycji hiperbarycznych na warunki podwodne (i odwrotnie). Wykazano również międzyśrodowiskowe różnice obejmujące funkcjonowanie poznawcze. Jak wspomniano, w warunkach ekspozycji hiperbaryczno-powietrznej w komorze (5 ATA) stwierdzono upośledzenie procesu hamowania. Jednakże pomimo faktu, iż badania podwodne przeprowadzono przy ciśnieniu 4 ATA (a więc przy większym ciśnieniu parcjalnym azotu, niż w trakcie eksperymentu Steinberga i Doppelmayra, 2017), nie stwierdzono negatywnego wpływu narkozy na tą zmienną. Środowisko podwodne wymuszało wolniejsze wykonywanie testów, co zapewniało odpowiednią ilość czasu na ich poznawczą analizę.

Należy kontynuować badania różnicami obejmującymi funkcjonowanie poznawcze w warunkach ekspozycji komorowych i podwodnych, z użyciem różnych mieszanin oddechowych.

Brakuje artykułów czy rozdziałów w książkach dotyczących metodologii badań przeprowadzanych w środowisku hiperbarycznym. Oznacza to, iż każdy badacz (lub zespół badawczy) musi samodzielnie, od podstaw poznawać specyfikę i ograniczenia badawcze występujące w warunkach nadciśnienia (indukowanego zarówno w komorze hiperbarycznej, jak i w warunkach podwodnych). Rozbudowana część dotycząca wspomnianego zagadnienia, która została przedstawiona w niniejszej rozprawie może pomóc skrócić fazę planowania, uniknąć licznych trudności, a także zwiększyć bezpieczeństwo badanych, co może przełożyć się na wymierne korzyści naukowe.

Wreszcie, obszerny przegląd piśmiennictwa, wraz z interpretacją wyników uzyskanych badań pozwolił na opracowanie wielowymiarowych modeli wyszczególniających czynniki, które potencjalnie mogą wpływać na funkcjonowanie psychomotoryczne i poznawcze w warunkach hiperbarycznych, w zależności od użytej mieszaniny oddechowej (modele środowiskowe). Opracowano również model lęk-stres-narkoza, opisujący zmienne wpływające na procesy pamięciowe przed, w trakcie i po ekspozycji hiperbarycznej. Autor ma nadzieję, iż omawiane konstrukty teoretyczne zmienią nadmiernie redukcjonistyczne podejście przypisujące upośledzenie funkcjonowania psychomotorycznego i poznawczego wyłącznie narkozie azotowej lub jednowymiarowej interakcji lęk vs. narkoza (Hobbs i Kneller, 2011). Co więcej, z nielicznymi wyjątkami (Balestra i wsp., 2012; Zarezadeh i Azarbayjani, 2014) uwaga badaczy jest skupiona wyłącznie na ekspozycji hiperbarycznej, bez uwzględnienia okresu przed- i poekspozycyjnego. Wspomniane okresy są tak samo ważne, jak samo nurkowanie (tj. zanurzenie się pod wodę lub wejście do komory hiperbarycznej). Przykładowo, w okresie przedekspozycyjnym płetwonurek przygotowuje sprzęt czy poznaje specyfikę zadania, które ma wykonać pod wodą, zapamiętuje dane itd. Niebadanie zjawisk poznawczych występujących w tej fazie skutkuje między innymi brakiem świadomości płetwonurków, że ich czynności poznawcze mogą być zaburzone jeszcze przed wystąpieniem narkozy, a także brakiem odpowiednich procedur, co skutkuje pogorszeniem bezpieczeństwa w trakcie ekspozycji hiperbarycznych.

Na zakończenie warto wspomnieć, iż jakkolwiek temat niniejszej rozprawy może być dla naukowców bardzo atrakcyjny, należy pamiętać o wspomnianych, licznych trudnościach metodologicznych związanych z badaniem narkozy azotowej, co zapewne jest jednym z

czynników wpływających na tak małą liczbę badań z tego zakresu. Pomimo wspomnianych trudności, warto wspomnieć, iż płetwonurkowie są bardzo „wdzięczną” grupą badawczą. Osoby biorące udział w eksperymentach były bardzo zainteresowane tematem i niezwykle pomocne. Warto prowadzić dalsze badania nad narkozą azotową zarówno z powodu wielu niewiadomych związanych z omawianym zagadnieniem, jak i z powodu bezpośrednich implikacji praktycznych wpływających na bezpieczeństwo osób przebywających w nadciśnieniu (zarówno rekreacyjnie, jak i zawodowo).

## 23 Bibliografia

- Abraini, J. H. (1995). Evidence for inert gas narcosis mechanisms in the occurrence of psychotic-like episodes at pressure environment. *NeuroReport*, 6(17), 2435-2439.
- Abraini, J. H., David, H. N., Vallée, N. i Risso, J. J. (2016). Theoretical considerations on the ultimate depth that could be reached by saturation human divers. *Medical Gas Research*, 6(2), 119-121.
- Abraini, J. H. i Joulia, F. (1992). Psycho-sensorimotor performance in divers exposed to six and seven atmospheres absolute of compressed air. *European Journal of Applied Physiology*, 65(1), 84-87.
- Adolfson, J. (1956). Deterioration of mental and motor functions in hyperbaric air. *Scandinavian Journal of Psychology*, 6(3), 26-32.
- Adolfson, J., Goldberg, L. i Berghage, T. (1972). Effects of Increased Ambient Air Pressures on Standing Steadiness in Man. *Navy Experimental Diving Unit*, Panama City, USA.
- Adolfson, J. i Muren, M. (1965). Air Breathing at 13 Atmospheres. Psychological and Physiological Observations. *Forsvarsmedicin*, (1), 31-37.
- Adrian, J., Moessinger, M., Charles, A. i Postal, V. (2019). Exploring the contribution of executive functions to on-road driving performance during aging: A latent variable analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 127, 96-109.
- Allen, H. (1992). Carbon monoxide poisoning in a diver. *Archives of Emergency Medicine*, 9(1), 65-66.
- Al-Qazzaz, N. K., Ali, S. H., Ahmad, S. A., Islam, S. i Mohamad, K. (2014). Cognitive impairment and memory dysfunction after a stroke diagnosis: a post-stroke memory assessment. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 10, 1677-1691.
- Al-Waili, N. S., Butler, G. J., Beale, J., Abdullah, M. S., Finkelstein, M., Merrow, M., Rivera, R., Petrillo, R., Carrey, Z., Lee, B. i Allen, M. (2006). Influences of hyperbaric oxygen on blood pressure, heart rate and blood glucose levels in patients with diabetes mellitus and hypertension. *Archives of Medical Research*, 37(8), 991-997.

- Amitai, Y., Zlotogorski, Z., Golan-Katzav, V., Wexler, A. i Gross, D. (1998). Neuropsychological impairment from acute low-level exposure to carbon monoxide. *Archives of neurology*, 55(6), 845-848.
- Andersen, H. L. (2002). Decompression sickness during construction of the Great Belt Tunnel, Denmark. *Undersea & Hyperbaric Medicine*, 29(3), 172-188.
- Anttila, M. (2002). Exotic diving gases. [https://walrussen.nl/sites/default/files/documents/exotic\\_gases.pdf](https://walrussen.nl/sites/default/files/documents/exotic_gases.pdf) [dostęp: 28.04.19].
- Arlt, S. (2013). Non-Alzheimer's disease-related memory impairment and dementia. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 15(4), 465-473.
- Baddeley, A.D. (1966). Influence of depth on the manual dexterity of free divers: a comparison between open sea and pressure chamber testing. *Journal of Applied Psychology*, 50(1), 81-85.
- Baddeley, A. D. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Baddeley, A. D., Cuccaro, W. J., Egstrom, G. H., Weltman, G. i Willis, M. A. (1975). Cognitive efficiency of divers working in cold water. *Human Factors*, 17(5), 446-454.
- Baddeley, A. D., De Figueredo, J. W., Curtis, J. W. i Williams, A. N. (1968). Nitrogen narcosis and performance under water. *Ergonomics*, 11(2), 157-164.
- Baddeley, A. D. i Flemming, N. C. (1967). The Efficiency of Divers Breathing Oxy-Helium. *Ergonomics*, 10(3), 311-319.
- Balestra, C., Lafère, P. i Germonpré, P. (2012). Persistence of critical flicker fusion frequency impairment after a 33 mfw SCUBA dive: evidence of prolonged nitrogen narcosis? *European Journal of Applied Physiology*, 112(12), 4063-4068.
- Banks, W. W., Berghage, T. E. i Heaney, D. M.. (1979). Visual recognition thresholds in a compressed air environment. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 50(10), 1003-1006.
- Bedyńska, S. i Dreszer, J. (2006). Wyśmiej stereotyp! Czynniki redukujące zagrożenie stereotypem. *Psychologia Społeczna*, 2(2), 88-95.

- Behnke, A. R., Thomson, R. M. i Motley, E. P. (1935). Psychologic effects of breathing air at 4 atmospheres' pressure. *American Journal of Psychology*, 112, 554.
- Bennett, P. B., Poulton, E. C., Carpenter, A. i Catton, M. J. (1967). Efficiency at Sorting Cards in Air and a 20 Per Cent Oxygen-Helium Mixture at Depths Down to 100 Feet and in Enriched Air. *Ergonomics*, 10, 53-62.
- Bennett, P. B. i Rostain, J. C. (2003). Inert gas narcosis. W: Brubakk, A. O., Neuman, T. S. (red.), *Physiology and medicine of diving* (s. 300-322). Filadelfia: Elsevier.
- Bernecker, S. (2017). A Causal Theory of Mnemonic Confabulation. *Frontiers in Psychology*, 8, 1207.
- Berrios, G. E. (1998). Confabulations: a conceptual history. *Journal of the History of the Neurosciences*, 7(3), 225-241.
- Biersner, R. J. (1972). Selective Performance Effects of Nitrous Oxide. *Human Factors*, 14(2), 187-194.
- Biersner, R. J. (1976). Motor and Cognitive Effects of Cold Water Immersion under Hyperbaric Condition. *Human Factors*, 18(3), 299-304.
- Biersner, R. J. (1987). Emotional and physiological effects of nitrous oxide and hyperbaric air narcosis. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 58(1), 34-38.
- Biersner, R. J. i Cameron, B. J. (1970). Memory impairment during a deep helium dive. *Aerospace Medicine*, 41(6), 658-661.
- Biersner, R. J., Hall, D. A., Linaweaver, P. G. i Neuman, T. S. (1978). Diving experience and emotional factors related to the psychomotor effects of nitrogen narcosis. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 49(8), 959-962.
- Biersner, R. J., Hall, D. A., Neuman, T. S. i Linaweaver, P. G. (1977). Learning rate equivalency of two narcotic gases. *Journal of Applied Psychology*, 62(6), 747-750.
- Bogusz, W., Garbarczyk, J. i Krok, F. (2010). *Podstawy fizyki*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Bove, A. A. (2014). Diving medicine. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 189(12), 1479-1486.



- Bowen, H. M. (1968). Diver Performance and the Effects of Cold. *Human Factors*, 10(5), 445-464.
- Bracco, D., Videlier, E. i Ramadori, F. (2009). Anesthesia Crisis Resource Management. *Anesthesiology*, 75(3), A1062.
- Brebeck, A. K., Deussen, A., Schmitz-Peiffer, H., Range, U., Balestra, C., Cleveland, S. i Schipke, J. D. (2017). Effects of oxygen-enriched air on cognitive performance during SCUBA-diving - an open-water study. *Research in Sports Medicine Journal*, 11, 1-12.
- Brewer, N. i Sandow B. (1980). Alcohol effects on driver performance under conditions of divided attention. *Ergonomics*, 23(3), 185-190.
- Brumback, T., Cao, D. i King, A. (2007). Effects of alcohol on psychomotor performance and perceived impairment in heavy binge social drinkers. *Drug and Alcohol Dependence*, 91(1), 10-17.
- Buchanan, T. W. i Lovallo, W. R. (2001). Enhanced memory for emotional material following stress-level cortisol treatment in humans. *Psychoneuroendocrinology*, 26(3), 307-317.
- Buss, D. M. (2011). *Psychologia ewolucyjna*. Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
- Carter, R. C. (1979). Mental abilities during a simulated dive to 427 meters underwater. *Journal of Applied Psychology*, 64(4), 449-454.
- Chen, Y. H., Lin, M. S., Lee, J. K., Chao, C. L., Tang, S. C., Chao, C. C., Chiu, M. J., Wu, Y. W., Chen, Y. F., Shih, T. F. i Kao, H. L. (2012). Carotid stenting improves cognitive function in asymptomatic cerebral ischemia. *International Journal of Cardiology*, 157(1), 104-107.
- Chin, W., Joo, E., Ninokawa, S., Popa, D. A. i Covington, D. B. (2017). Efficacy of the U.S. Navy Treatment Tables in treating DCS in 103 recreational scuba divers. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 44(5), 399-405.
- Crosson, D. (1993). Human factors in underwater systems. *American Journal of Aerospace Engineering*, 31(10), 34-37.

- Cholewka, A., Liszka, G. i Walentek, T. (2006). Medycyna hiperbaryczna - podstawy fizyczne. W: Sieroń, A. i Cieślak, G. (red.), *Zarys medycyny hiperbarycznej* (s. 23-47). Bielsko Biała: alfa-medica press.
- Clark, J. E. (2015). Moving in extreme environments: inert gas narcosis and underwater activities. *Extreme Physiology & Medicine*, 4(1), 1-7.
- Coetzee, N. (2011). Measurement of heart rate variability and salivary cortisol levels in beginner scuba divers. *African Journal for Physical Health Education, Recreation and Dance*, 17, 729-742.
- Cornes, K. R., Boardman, M., Ford, C. i Smith, S. (2019). Adopting a multidisciplinary approach to maximising performance during military visual search tasks. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 165(2), 120-123.
- Crocq, M. C. (2015). A history of anxiety: from Hippocrates to DSM. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 17(3), 319-325.
- Cormack, F., Gray, A., Ballard, C. i Tovée, M. J. (2004). A failure of 'pop-out' in visual search tasks in dementia with Lewy Bodies as compared to Alzheimer's and Parkinson's disease. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 19(8), 763-772.
- Courtière, A. i Hardouin, J. (1997). Behavioural effects induced by nitrous oxide in rats performing a vigilance task. *Behavioural Pharmacology*, 8(5), 408-415.
- Cowan, N. (2010). The Magical Mystery Four: How is Working Memory Capacity Limited, and Why? *Current Directions in Psychological Science*, 19(1), 51-57.
- Cross, M. E. i Plunkett, E. V. E. (2008). *Physics, Pharmacology and Physiology for Anaesthetists: Key Concepts for the FRCA*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Crum, R. M., Anthony, J. C., Bassett, S. S. i Folstein, M. F. (1993). Population-based norms for the Mini-Mental State Examination by age and educational level. *Journal of the American Medical Association*, 269(18), 2386-2391.
- Dalecki, M., Bock, O. i Schulze, B. (2012). Cognitive impairment during 5 m water immersion. *Journal of Applied Physiology*, 113(7), 1075-1081.
- Damant, G. C. C. (1930). Physiological effects of work in compressed air. *Nature*, 126, 606-608.

- Daulatzai, M. A. (2013). Neurotoxic saboteurs: straws that break the hippo's (hippocampus) back drive cognitive impairment and Alzheimer's Disease. *Neurotoxicity Research*, 24(3), 407-459.
- Davis, F. M., Osborne, J. P., Baddeley, A. D. i Graham, I. M. (1972). Diver performance: nitrogen narcosis and anxiety. *Aerospace Medicine*, 43(10), 1079-1082.
- Day, A. M., Kahler, C. W., Ahern, D. C. i Clark, U. S. (2015). Executive Functioning in Alcohol Use Studies: A Brief Review of Findings and Challenges in Assessment. *Current Drug Abuse Reviews*, 8(1), 26-40.
- De Bels, D., Pierrakos, C., Bruneteau, A., Reul, F., Crevecoeur, Q., Marrone, N., Vissenaeken, D., Borgers, G., Balestra, C., Honoré, P. M. i Theunissen, S. (2019). Variation of Cognitive Function During a Short Stay at Hypobaric Hypoxia Chamber (Altitude: 3842 M). *Frontiers in Physiology*, 10, 806.
- D'Elia, L. F., Satz, P., Uchiyama, C. L. i White, T. (2012). *Kolorowy test połączeń. Podręcznik dla specjalistów*. Warszawa: Pracownia Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego.
- Filoteo, J. V., Williams, B. J., Rilling, L. M. i Roberts, J. V. (1997). Performance of Parkinson's disease patients on the Visual Search and Attention Test: impairment in single-feature but not dual-feature visual search. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 12(7), 621-634.
- Engels, A. S., Heller, W., Mohanty, A., Herrington, J. D., Banich, M. T., Webb, A. G. i Miller, G. A. (2007). Specificity of regional brain activity in anxiety types during emotion processing. *Psychophysiology*, 44(3), 352-363.
- Fang, D., Jiang, J., Sun, X., Wang, W., Dong, N., Fu, X., Pang, C., Chen, X. i Ding, L. (2014). Attention dysfunction of postoperative patients with glioma. *World Journal of Surgical Oncology*, 15(12), 317.
- Fothergill, D. M., Hedges, D. i Morrison, J. B. (1991). Effects of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> partial pressures on cognitive and psychomotor performance. *Undersea Biomedical Research*, 18(1), 1-19.
- Fowler, B. (1972). Some comments on "a behavioral approach to nitrogen narcosis". *Psychological Bulletin*, 78(3), 234-240.

- Fowler, B. (1973). Effect of hyperbaric air on short term and long term memory. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 44(9), 1017-1022.
- Fowler, B. i Ackles, K. N. (1972). Narcotic effects in man of breathing 80-20 argon-oxygen and air under hyperbaric conditions. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 43(11), 1219-1224.
- Fowler, B. i Ackles, K. N. (1975). Effect of hyperbaric air on long-term memory organization and recall. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 46(5), 655-659.
- Fowler, B i Adams, J. (1993). Dissociation of the effects of alcohol and amphetamine on inert gas narcosis using reaction time and P300 latency. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 64(6), 493-499.
- Fowler, B., Granger, S., Ackles, K. N., Holness, D. E. i Wright, G. R. (1983). The effects of inert gas narcosis on certain aspects of serial response time. *Ergonomics*, 26(12), 1125-1138.
- Fowler, B., Hamilton, K. i Porlier, G. (1986). Effects of ethanol and amphetamine on inert gas narcosis in humans. *Undersea Biomedical Research*, 13(3), 345-354.
- Fowler, B., Hendriks, P. i Porlier, G. (1987). Effects of inert gas narcosis on rehearsal strategy in a learning task. *Undersea Biomedical Research*, 14(6), 469-746.
- Fowler, B., Pang, E. i Mitchell I. (1992). On Controlling Inert Gas Narcosis. *Human Factors*, 4(1), 115-120.
- Fowler, B., White, P. L., Holness, D. E., Wright, G. R. i Ackles, K. N. (1982). The effects of inert gas narcosis on the speed and accuracy of movement. *Ergonomics*, 25(3), 203-212.
- Fowler, B., White, P. L., Wright, G. R. i Ackles, K. N. (1980). Narcotic effects of nitrous oxide and compressed air on memory and auditory perception. *Undersea Biomedical Research*, 7(1), 35-46.
- Frankenhaeuser, M., Graff-Lonnevig, V. i Hesser, C. M. (1963). Effects on Psychomotor Functions of Different Nitrogen-Oxygen Gas Mixtures at Increased Ambient Pressures. *Acta Physiologica*, 59(4), 400-409.

- Fujimoto, S. T., Longhi, L., Saatman, K. E., Conte, V., Stocchetti, N. i McIntosh, T. K. (2004). Motor and cognitive function evaluation following experimental traumatic brain injury. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 28(4), 365-378.
- Germonpré, P., Balestra, C., Hemelryck, W., Buzzacott, P. i Lafère, P. (2017). Objective vs. subjective evaluation of cognitive performance during 0.4-MPa dives breathing air or nitrox. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 88(5), 469-475.
- Godden, D. R i Baddeley, A. D. (1975). Context-Dependent Memory in Two Natural Environments: On Land and Underwater. *British Journal of Psychology*, 66(3), 325-331.
- Godefroy, O. (2003). Frontal syndrome and disorders of executive functions. *Journal of Neurology*, 250(1), 1-6.
- Goodwin, D. W., Powell, B., Bremer, D., Hoine, H. i Stern, J. (1969). Alcohol and recall: state-dependent effects in man. *Science*, 163(3873), 1358-1360.
- Greenwood, P. M., Parasuraman, R. i Alexander, G. E. (1997). Controlling the focus of spatial attention during visual search: effects of advanced aging and Alzheimer disease. *Neuropsychology*, 11(1), 3-12.
- Griva, K., Stygall, J., Wilson, M. H., Martin, D., Levett, D., Mitchell, K., Mythen, M., Montgomery, H. E., Grocott, M. P., Aref-Adib, G., Edsell, M., Plant, T., Imray, C., Cooke, D., Harrington, J., Khosravi, M. i Newman, S. P. (2017). Caudwell Xtreme Everest: A prospective study of the effects of environmental hypoxia on cognitive functioning. *PLoS One*, 12(3), e0174277.
- Grover C. A. i Grover, D. H. (2014). Albert Behnke: nitrogen narcosis. *The Journal of Emergency Medicine*, 46(2), 225-227.
- Haerkens, M., H., T., M., Kox, M., Lemson, J., Houterman, S., van der Hoeven, J. G. i Pickkers, P. (2015). Crew Resource Management in the Intensive Care Unit: a prospective 3-year cohort study. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 59(10), 1319-1329.
- Hamilton, K., Fowler, B. i Porlier, G. (1984, May-June). Interaction of inert gas narcosis with alcohol and amphetamine. Annual Scientific Meeting, San Antonio, USA.

- Hamilton, K., Fowler, B. i Porlier, G. (1989). The effects of hyperbaric air in combination with ethyl alcohol and dextroamphetamine on serial choice-reaction time. *Ergonomics*, 32(4), 409-422.
- Hamilton, K., Laliberté, M. F. i Heslegrave, R. (1992). Subjective and behavioral effects associated with repeated exposure to narcosis. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 63(10), 865-869.
- Hamilton, K., Laliberte, M. F., Heslegrave, R. i Khan, S. (1993). Visual/vestibular effects of inert gas narcosis. *Ergonomics*, 36(8), 891-898.
- Hamilton, K., Laliberté, M. F. i Fowler, B. (1995). Dissociation of the behavioral and subjective components of nitrogen narcosis and diver adaptation. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 1, 41-49.
- Hamilton, K., Porlier, G., Landolt, J., Fraser, W. i Fowler, B. (1986). Effects of inert gas narcosis on the vestibular ocular reflex. *Undersea Biomedical Research*, 13(3), 355-359.
- Hamilton, R. W. (1976). Psychomotor performance of men in neon and helium at 37 atmosphere. *Underwater physiology*, 5, 651-664.
- Hancock, P. A. i Vasmatazidis, I. (2003). Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *International Journal of Hyperthermia*, 19(3), 355-372.
- Hao, J., Li, K. C., Wang, W., Yang, Y. H., Li, K., Yan, B. i Zhan, D. X. (2005). Visual search in Alzheimer disease--an functional magnetic resonance imaging study. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 85(33), 2349-2353.
- Harpur, L. L., Scialfa, C. T. i Thomas, D. M. (1995). Age differences in feature search as a function of exposure duration. *Experimental Aging Research*, 21(1), 1-15.
- Heller, W., Nitschke, J. B., Etienne, M. A. i Miller, G. A. (1997). Patterns of regional brain activity differentiate types of anxiety. *Journal of Abnormal Psychology*, 106(3), 376-385.
- Helmreich, R. L., Merritt, A. C. i Wilhelm, J. A. (1999). The evolution of Crew Resource Management training in commercial aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(1), 19-32.

- Hesser, C. M., Fagraeus, L. i Adolfson, J. (1978). Roles of nitrogen, oxygen, and carbon dioxide in compressed-air narcosis. *Undersea Biomedical Research*, 4, 391-400.
- Hindmarch, I. (1980). Psychomotor function and psychoactive drugs. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 10(3), 189-209.
- Hobbs, M. (2008). Subjective and behavioural responses to nitrogen narcosis and alcohol. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 35(3), 175-184.
- Hobbs, M. (2014). Impairment from gas narcosis when breathing air and enriched air nitrox underwater. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 85(11), 1121-1124.
- Hobbs, M., Higham, P. A. i Kneller, W. (2014). Memory and metacognition in dangerous situations: investigating cognitive impairment from gas narcosis in undersea divers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 56(4), 696-709.
- Hobbs, M. i Kneller, W. (2009). Effect of nitrogen narcosis on free recall and recognition memory in open water. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 36(2), 73-81.
- Hobbs, M i Kneller, W. (2011). Anxiety and psychomotor performance in divers on the surface and underwater at 40 m. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82(1), 20-25.
- Hobbs, M i Kneller, W. (2015). Inert gas narcosis disrupts encoding but not retrieval of long term memory. *Physiology & Behavior*, 144, 46-51.
- Hoffmann, S., Siedler, J., Brandt, A. U., Piper, S. K., Kohler, S., Sass, C., Paul, F., Reilmann, R. i Meisel, A. (2015). Quantitative motor assessment of muscular weakness in myasthenia gravis: a pilot study. *BMC Neurology*, 15, 265.
- Horowitz, T. S., Choi, W. Y., Horvitz, J. C., Côté, L. J. i Mangels, J. A. (2006). Visual search deficits in Parkinson's disease are attenuated by bottom-up target salience and top-down information. *Neuropsychologia*, 44(10), 1962-1977.
- Hughes, R. A. (2002). Peripheral neuropathy. *BMJ*, 324(7335), 466-469.
- Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej <http://www.imgw.pl/> [dostęp: 28.05.15]

- Jakovljević, M., Vidmar, G. i Mekjavic, I. B. (2012). Psychomotor function during mild narcosis induced by subanesthetic level of nitrous oxide: individual susceptibility beyond gender effect. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 39(6), 1067-1074.
- Janus, T. i Piechocki, J. (2016). Co warto pamiętać o zatruciu tlenkiem węgla? *Na Ratunek*, 5, 12-17.
- Janus, T. i Piechocki, J. (2017). Trudności metodologiczne związane z badaniem narkozy gazów obojętnych. Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, Jastrzębia Góra.
- Janus, T. i Surowicz, D. (2018). Dlaczego dane zalecenia w medycynie ratunkowej wyglądają tak, a nie inaczej? Przegląd wybranych zagadnień z zakresu wentylacji i tlenoterapii. *Na Ratunek*, 1, 15-22.
- Jelici, M., Geraerts, E., Merckelbach, H. i Guerrieri, R. (2004). Acute stress enhances memory for emotional words, but impairs memory for neutral words. *International Journal of Neuroscience*, 114(10), 1343-1351.
- Jennings, R.D. (1968). A behavioral approach to nitrogen narcosis. *Psychological Bulletin*, 69(3), 216-224.
- Jin, Z., Piazza, O., Ma, D., Scarpati, G. i De Robertis, E. (2019). Xenon anesthesia and beyond: pros and cons. *Minerva Anestesiologica*, 85(1), 83-89.
- Jones, A. W., Jennings, R. D., Adolfson, J. i Hesser, C. M. (1979). Combined effects of ethanol and hyperbaric air on body sway and heart rate in man. *Undersea Biomedical Research*, 6(1), 15-25.
- Jonides, J. i Yantis, S. (1988). Uniqueness of abrupt visual onset in capturing attention. *Perception & Psychophysics*, 43(4), 346-354.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Karmali, F. i Shelhamer, M. (2008). The dynamics of parabolic flight: flight characteristics and passenger percepts. *Acta Astronautica*, 63(5-6), 594-602.
- Kennedy, K. M. i Raz, N. (2009). Aging white matter and cognition: differential effects of regional variations in diffusion properties on memory, executive functions, and speed. *Neuropsychologia*, 47(3), 916-927.



- Kiessling, R. J. i Maag, C. H. (1962). Performance impairment as a function of nitrogen narcosis. *Journal of Applied Psychology*, 46(2), 91-95.
- Kirschbaum, C., Pirke, K. M. i Hellhammer, D. H. (1993). The 'Trier Social Stress Test'—a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28(1-2), 76-81.
- Kirschbaum, C., Wolf, O. T., May, M., Wippich, W. i Hellhammer, D. H. (1996). Stress- and treatment-induced elevations of cortisol levels associated with impaired declarative memory in healthy adults. *Life Sciences*, 58(17), 1475-1483.
- Kneller, W., Higham, P. i Hobbs, M. (2012). Measuring manual dexterity and anxiety in divers using a novel task at 35-41 m. *Space, and Environmental Medicine*, 83(1), 54-57.
- Kneller, W. i Hobbs, M. (2013). Inert gas narcosis and the encoding and retrieval of long-term memory. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 84(12), 1235-1239.
- Kolańczyk, A. (1991). *Intuicyjność procesów przetwarzania informacji*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- Konarski, M. (2012). Narkoza azotowa. *Polish Hyperbaric Research*, 4(41), 7-19.
- Kot, J. (2018). Terapia hiperbaryczna. W: Sosada, K. & Żurawiński, W. (red). *Ostre stany zagrożenia życia w obrażeniach ciała*, (s. 1019-1025). Warszawa: PZWL.
- Kowalski, J. T., Seidack, S., Klein, F., Varn, A., Röttger, S., Kähler, W., Gerber, W. D. i Koch, A. (2012). Does inert gas narcosis have an influence on perception of pain? *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 39(1), 569-576.
- Kramer, A. F., Hahn, S., Irwin, D. E. i Theeuwes, J. (1999). Attentional capture and aging: implications for visual search performance and oculomotor control. *Psychology and Aging*, 14(1), 135-154.
- Kramer, M. R., Porfido, C. L. i Mitroff, S. R. (2019). Evaluation of strategies to train visual search performance in professional populations. *Current Opinion in Psychology*, 11(29), 113-118.

- Krummel, T., Thiery, A., Villain, M., Schittly, B. i Brouant, B. (2017). Psychotropic Drug Use in Recreational Scuba Divers and its Effect on Severe Narcosis. *International Journal of Sports Medicine*, 38(4), 322-328.
- Krzyżak, J. (2006). *Medycyna Nurkowa*. Poznań: KOOP-graf.
- Kuhlmann, S., Piel, M. i Wolf, O. T. (2005). Impaired memory retrieval after psychosocial stress in healthy young men. *Journal of Neuroscience*, 25(11), 2977-2982.
- Lafay, V., Barthelemy, P., Comet, B., Frances, Y. i Jammes, Y. (1995). ECG changes during the experimental human dive HYDRA 10 (71 atm/7,200 kPa). *The Undersea and Hyperbaric Medicine*, 22(1), 51-60.
- Landy, K. M., Salmon, D. P., Filoteo, J. V., Heindel, W. C., Galasko, D. i Hamilton, J. M. (2015). Visual search in Dementia with Lewy Bodies and Alzheimer's disease. *Cortex*, 73, 228-239.
- Latos, M. (2016). Praktyczne aspekty nebulizacji w postępowaniu przedszpitalnym. *Na Ratunek*, 6(16), 16-20.
- Larrabee, G. J. i Crook, T. H. (1994). Estimated prevalence of age-associated memory impairment derived from standardized tests of memory function. *International Psychogeriatrics*, 6(1), 95-104.
- Laudat, M. H., Cerdas, S., Fournier, C., Guiban, D., Guilhaume, B. i Luton, J. P. (1988). Salivary cortisol measurement: a practical approach to assess pituitary-adrenal function. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 66(2), 343-348.
- Laudate, T. M., Nearing, S., Dunne, T. E., Sullivan, K. D., Joshi, P., Gilmore, G. C., Riedel, T. M. i Cronin-Golomb, A. (2012). Bingo! Externally supported performance intervention for deficient visual search in normal aging, Parkinson's disease, and Alzheimer's disease. *Neuropsychology, Development, and Cognition*, 19(1-2), 102-121.
- Lavoie, M. E., Thibault, G., Stip, E. i O'Connor, K. P. (2007). Memory and executive functions in adults with Gilles de la Tourette syndrome and chronic tic disorder. *Cognitive Neuropsychiatry*, 12(2), 165-181.

- Lee, T., Watkins, S. L., Marshall, H., Dascombe, B. J. i Foster, J. (2015). The Impact of Different Environmental Conditions on Cognitive Function: A Focused Review. *Frontiers in Physiology*, 6(6), 372.
- Lewandowski, B. (2006). Hydrostatyka. W: *Mechanika płynów*. (s. 37-47). Poznań: Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.
- Lewis, V. J. i Baddeley, A. D. (1981). Cognitive performance, sleep quality and mood during deep oxyhelium diving. *Ergonomics*, 24(10), 773-793.
- Lin, E. S. (2012). Fizyka. W: Smith, T., Pinnock, C., Lin T. (red.), *Podstawy anestezjologii* (s. 719-785). red. wyd. pol. Kański, A. Warszawa: DB Publishing wyd. 3.
- Lobue, V. i DeLoache, J. S. (2008). Detecting the snake in the grass: attention to fear-relevant stimuli by adults and young children. *Psychological Science*, 19(3), 284-289.
- Logie, R. H. i Baddeley, A. D. (1983). A Trimix saturation dive to 660 m. Studies of cognitive performance, mood and sleep quality. *Ergonomics*, 26(4), 359-374.
- Logue, P. E., Schmitt, F. A., Rogers, H. E. i Strong, G. B. (1986). Cognitive and emotional changes during a simulated 686-m deep dive. *Undersea Biomedical Research*, 13(2), 225-235.
- Lorenzo-López, L., Amenedo, E., Pascual-Marqui, R. D. i Cadaveira, F. (2008). Neural correlates of age-related visual search decline: a combined ERP and sLORETA study. *NeuroImage*, 41(2), 511-524.
- Löfdahl, P., Andersson, D. i Bennett, M. (2013). Nitrogen narcosis and emotional processing during compressed air breathing. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 84(1), 17-21.
- Lubow, R. E., Dressler, R. i Kaplan, O. (1999). The effects of target and distractor familiarity on visual search in de novo Parkinson's diseasepatients: latent inhibition and novel pop-out. *Neuropsychology*, 13(3), 415-423.
- Lund, V., Kentala, E., Scheinin, H., Klossner, J., Koskinen, P. i Jalonen, J. (1999). Effect of hyperbaric conditions on plasma stress hormone levels and endothelin-1. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 26(2), 87-92.

- Lupien, S. J., Gaudreau, S., Tchiteya, B. M., Maheu, F., Sharma, S., Nair, N. P., Hauger, R. L., McEwen, B. S. i Meaney, M. J. (1997). Stress-induced declarative memory impairment in healthy elderly subjects: relationship to cortisol reactivity. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 82(7), 2070-2075.
- Łojek E. i Stańczak, J. (2012). *Kolorowy test połączeń wersja dla dorosłych. Podręcznik. Polska Normalizacja*. Warszawa: Pracownia Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego.
- Mac Kay, A. P. (2016). Executive functions and aging. *CoDAS*, 28(4), 329-30.
- McEwen, B. S. i Sapolsky, R. M. (1995). Stress and cognitive function. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(2), 205-216.
- Mannan, S. K., Hodgson, T. L., Husain, M. i Kennard, C. (2008). Eye movements in visual search indicate impaired saliency processing in Parkinson's disease. *Progress in Brain Research*, 171, 559-562.
- Maruszewski, T. (2016). *Psychologia Poznania*. Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne.
- McLeod, P., Driver, J., Dienes, Z. i Crisp, J. (1991). Filtering by movement in visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 17(1), 55-64.
- Mears, J. D. i Cleary, P. J. (1980). Anxiety as a factor in underwater performance. *Ergonomics*, 23(6), 549-557.
- Meckler, C., Blatteau, J. E., Hasbroucq, T., Schmid, B., Risso, J. J. i Vidal, F. (2014). Effects of hyperbaric nitrogen-induced narcosis on response-selection processes. *Ergonomics*, 57(2), 210-218.
- Mekjavić, I. B., Savić, S. A. i Eiken, O. (1995). Nitrogen narcosis attenuates shivering thermogenesis. *Journal of Applied Physiology*, 78(6), 2241-2244.
- Mendez, M. F., Cherrier, M. M. i Cymerman, J. S. (1997). Hemispatial neglect on visual search tasks in Alzheimer's disease. *Neuropsychiatry, Neuropsychology, and Behavioral Neurology*, 10(3), 203-208.

- Metz, G. A. (2007). Stress as a modulator of motor system function and pathology. *Reviews in the Neurosciences*, 18(3-4), 209-222.
- Michalodimitrakis, E. i Patsalis, A. (1987). Nitrogen narcosis and alcohol consumption--a scuba diving fatality. *Journal of Forensic Sciences*, 32(4), 1095-1097.
- Mitroff, S. R., Ericson, J. M. i Sharpe, B. (2018). Predicting Airport Screening Officers' Visual Search Competency With a Rapid Assessment. *Human Factors*, 60(2), 201-211.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. i Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 1(1), 49-100.
- Moeller, G., Chattin, C., Rogers, W. i Ryack, B. (1981). Performance effects with repeated exposure to the diving environment. *Journal of Applied Psychology*, 66(4), 502-510.
- Monteiro, M. G., Hernandez, W., Figlie, N. B., Takahashi, E. i Korukian, M. (1996). Comparison between subjective feelings to alcohol and nitrogen narcosis: a pilot study. *Alcohol*, 13(1), 75-78.
- Moskowitz, H. A., Ziedman, K. i Sharma, S. (1976). Effect of Marihuana and Alcohol on Visual Search Performance. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- [https://books.google.pl/books?id=NxdujAqgeTUC&pg=PP3&lpg=PP3&dq=alcohol+visual+search&source=bl&ots=wyJvxQhA4L&sig=ACfU3U3SJUItXFbUxxT8\\_Hv-ARDnckkJDg&hl=pl&sa=X&ved=2ahUKEwjisMDk3v3lAhWCxosKHf2mDYIQ6AEwB3oECAsQAQ#v=onepage&q=alcohol%20visual%20search&f=false](https://books.google.pl/books?id=NxdujAqgeTUC&pg=PP3&lpg=PP3&dq=alcohol+visual+search&source=bl&ots=wyJvxQhA4L&sig=ACfU3U3SJUItXFbUxxT8_Hv-ARDnckkJDg&hl=pl&sa=X&ved=2ahUKEwjisMDk3v3lAhWCxosKHf2mDYIQ6AEwB3oECAsQAQ#v=onepage&q=alcohol%20visual%20search&f=false)
- [dostęp: 22.11.19]
- Muller, M. D., Gunstad, J., Alosco, M. L., Miller, L. A., Updegraff, J., Spitznagel, M. B. i Glickman, E. (2012). Acute Cold Exposure and Cognitive Function: Evidence for Sustained Impairment. *Ergonomics*, 55(7), 792-798.

- Müller, H. J. i von Mühlhausen, A. (1999). Visual search for conjunctions of motion and form: The efficiency of attention to static versus moving items depends on practice. *Visual Cognition*, 6(3-4), 385-408.
- National Transport Safety Board. (1978). Aircraft Accident Report. <http://libraryonline.erau.edu/online-full-text/ntsb/aircraft-accident-reports/AAR79-07.pdf> [dostęp: 30.04.19].
- Navon, D. i Gopher, D. (1979). On the economy of the human processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214-255.
- Nelson, T. O., McSpadden, M., Fromme, K. i Marlatt, G. A. (1986). Effects of alcohol intoxication on metamemory and on retrieval from long-term memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115(3), 247-254.
- Nęcka, E., Orzechowski, J. i Szymura, B. (2017). *Psychologia poznawcza*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Nickerson, R. S. (1998). Confirmation Bias: A Ubiquitous Phenomenon in Many Guises. *Review of General Psychology*, 2(2), 175-220.
- Nieuwenhuys, A. i Oudejans, R. R. (2012). Anxiety and perceptual-motor performance: toward an integrated model of concepts, mechanisms, and processes. *Psychological Research*, 76(6), 747-59.
- Nitschke, J. B., Heller, W., Palmieri, P. A. i Miller, G. A. (1999). Contrasting patterns of brain activity in anxious apprehension and anxious arousal. *Psychophysiology*, 36(5), 628-637.
- Olszański, R. i Siermontowski, P. (2003). *ABC zdrowia nurka*. Głogów: Druk-Ar.
- Ono, H. i O'Reilly, J. P. (1971). Adaptation to underwater distance distortion as a function of different sensory-motor tasks. *Human Factors*, 13(2), 133-139.
- O'Reilly, J. P. (1974). Performance decrements under hyperbaric He-O<sub>2</sub>. *Undersea Biomedical Research*, 1(4), 353-361.
- Ortapamuk, H. i Naldoken, S. (2006). Brain perfusion abnormalities in chronic obstructive pulmonary disease: comparison with cognitive impairment. *Annals of Nuclear Medicine*, 20(2), 99-106.

- Parasuraman, R., Greenwood, P. M. i Alexander, G. E. (2000). Alzheimer disease constricts the dynamic range of spatial attention in visual search. *Neuropsychologia*, 38(8), 1126-1135.
- Parasuraman, R., Greenwood, P. M. i Alexander, G. E. (1995). Selective impairment of spatial attention during visual search in Alzheimer's disease. *Neuroreport*, 6(14), 1861-1864.
- Payne, J. D., Jackson, E. D., Hoscheidt, S., Ryan, L., Jacobs, W. J. i Nadel, L. (2007). Stress administered prior to encoding impairs neutral but enhances emotional long-term episodic memories. *Learning & Memory*, 14(12), 861-868.
- Petri, N. M. (2003). Change in strategy of solving psychological tests: evidence of nitrogen narcosis in shallow air-diving. *The Undersea and Hyperbaric Medicine*, 30(4), 293-303.
- Philp, R. B., Fields G. N. i Roberts, W. A. (1989). Memory deficit caused by compressed air equivalent to 36 meters of seawater. *Journal of Applied Psychology*, 74(3), 443-446.
- Piechocki, J. i Janus, T. (2015). Choroba dekompresyjna i uraz ciśnieniowy płuc u pletwonurków - rozpoznawanie i leczenie. *Na Ratunek*, 4, 24-30.
- Piechocki, J. i Janus, T. Wypadki związane z pracą w warunkach hiperbarycznych w trakcie budowy warszawskiego metra. W trakcie publikacji.
- Piechocki, J., Janus, T. i Nielepiec-Jałosieńska, A. (2012). Wprowadzenie do tlenoterapii hiperbarycznej. *Na Ratunek*, 3, 26-29.
- Piechocki, J., Janus, T., Żyła, Z. i Gałązkowski, R. (2015). Tlenoterapia hiperbaryczna - wskazania, przeciwwskazania i powikłania. Opis pierwszych w Polsce ćwiczeń postępowania w stanach nagłych związanych z leczeniem tlenem hiperbarycznym. *Emergency Medical Service*, 2(4), 348-353.
- Pilcher, J. J., Nadler, E. i Busch, C. (2002). Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review. *Ergonomics*, 45(10), 682-698.
- Poulton, E. C., Carpenter, A. i Catton, M. J. (1963). Mild nitrogen narcosis? *British Medical Journal*, 2(5370), 1450-1451.

- Poulton E. C., Catton M. J. i Carpenter A. (1964). Efficiency at Sorting Cards in Compressed Air. *British Journal of Industrial Medicine*, 21(3), 242-245.
- Pourhashemi, S. F., Sahraei, H., Meftahi, G. H., Hatef, B. i Gholipour, B. (2016). The Effect of 20 Minutes Scuba Diving on Cognitive Function of Professional Scuba Divers. *Asian Journal of Sports Medicine*, 7(3), e38633.
- Power, M. C., Weisskopf, M. G., Alexeeff, S. E., Coull, B. A., Spiro, A. i Schwartz, J. (2011). Traffic-Related Air Pollution and Cognitive Function in a Cohort of Older Men. *Environmental Health Perspectives*, 119(5), 682-687.
- Purcell, D. G. i Stewart, A. L. (1991). The object-detection effect: configuration enhances perception. *Perception & Psychophysics*, 50(3), 215-224.
- Rabbitt, P. (1965). An age-decrement in the ability to ignore irrelevant information. *The Journals of Gerontology*, 20, 233-238.
- Riegel, M., Wierzba, M., Wypych, M., Żurawski, Ł., Jednoróg, K., Grabowska, A. i Marchewka, A. (2015). Nencki Affective Word List (NAWL): the cultural adaptation of the Berlin Affective Word List-Reloaded (BAWL-R) for Polish. *Behavior Research Methods*, 47(4), 1222-1236.
- Riggs, C. A. Cornes, K., Godwin, H. J., Liversedge, S. P., Guest, R. i Donnelly, N. (2017). The importance of search strategy for finding targets in open terrain. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(14), 1-17.
- Risberg, J. i Hope, A. (2001). Thermal insulation properties of argon used as a dry suit inflation gas. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 28(3), 137-143.
- Rogers, R. D. i Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 124, 207-231.
- Rogers, W. H. i Moeller, G. (1989). Effect of brief, repeated hyperbaric exposures on susceptibility to nitrogen narcosis. *Undersea Biomedical Research*, 16(3), 227-232.
- Roozendaal, B. (2002). Stress and memory: opposing effects of glucocorticoids on memory consolidation and memory retrieval. *Neurobiology of Learning and Memory*, 78(3), 578-595.



- Roozendaal, B., Bohus, B. i McGaugh, J. L. (1996). Dose-dependent suppression of adrenocortical activity with metyrapone: effects on emotion and memory. *Psychoneuroendocrinology*, 21(8), 681-693.
- Roozendaal, B., Hahn, E. L., Nathan, S. V., de Quervain, D. J. i McGaugh, J. L. (2004). Glucocorticoid effects on memory retrieval require concurrent noradrenergic activity in the hippocampus and basolateral amygdala. *Journal of Neuroscience*, 24(37), 8161-8169.
- Ross, M., Czernecka, K. i Szymura, B. (2011). Ekstensywny i intensywny tryb przeszukiwania pola percepcyjnego a konsekwencje automatyzacji czynności. *Studia Psychologiczne*, 49(3), 99-113.
- Rostain J. C. i Balon, N. (brak danych). Nitrogen narcosis, the high pressure nervous syndrome and trimix. [http://archive.rubiconfoundation.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/9056/Bennett\\_2004\\_3.pdf?sequenc=1](http://archive.rubiconfoundation.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/9056/Bennett_2004_3.pdf?sequenc=1) [dostęp: 26.01.17].
- Rösler, A., Mapstone, M., Hays-Wicklund, A., Gitelman, D. R. i Weintraub, S. (2005). The "zoom lens" of focal attention in visual search: changes in aging and Alzheimer's disease. *Cortex*, 41(4), 512-519.
- Rösler, A., Mapstone, M. E., Hays, A. K., Mesulam, M. M., Rademaker, A., Gitelman, D. R. i Weintraub, S. (2000). Alterations of visual search strategy in Alzheimer's disease and aging. *Neuropsychology*, 14(3), 398-408.
- Russell, R. W. i Steinberg, H. (1955). Effects of nitrous oxide on reactions to "stress". *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 7(2), 67-73.
- Sandi, C. (2013). Stress and cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 245-261.
- Sato, J., Inagaki, H., Kusui, M., Yokosuka, M. i Ushida, T. (2019). Lowering barometric pressure induces neuronal activation in the superior vestibular nucleus in mice. *PLoS One*, 14(1), e0211297.
- Saults, J. S., Cowan, N., Sher, K. J. i Moreno, M. V. (2007). Differential Effects of Alcohol on Working Memory: Distinguishing Multiple Processes. *Experimental and Clinical Psychopharmacology*, 15(6), 576-587.

- Sänger, J., Bechtold, L., Schoofs, D., Blaszkewicz, M. i Wascher, E. (2014). The influence of acute stress on attention mechanisms and its electrophysiological correlates. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8, 353.
- Schuster, D., Rivera, J. Sellers, B. C., Fiore, S. M. i Jentsch F. (2013). Perceptual training for visual search. *Ergonomics*, 56(7), 1101-1115.
- Schwabe, L., Höffken, O., Tegenthoff, M. i Wolf, O. T. (2013). Stress-induced enhancement of response inhibition depends on mineralocorticoid receptor activation. *Psychoneuroendocrinology*, 38(10), 2319-2326.
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y. i Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 5, 721-733.
- Shields, G. S., Sazma, M. A. i Yonelinas, A. P. (2016). The Effects of Acute Stress on Core Executive Functions: A Meta-Analysis and Comparison with Cortisol. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 68, 651-668.
- Siermontowski, P., Kobos, Z., Olszański, R., Pedrycz, A., Koktysz, R., Dąbrowiecki, Z. i Zając, G. (2011). Ocena wpływu środowiska hiperbarycznego - narkozy azotowej na sprawność umysłową i percepcyjną podczas saturowanych ekspozycji powietrznych za pomocą testów arytmetycznych. *Current Problems of Psychiatry*, 12(2), 137-140.
- Simpson, E. A., Mertins, H. L., Yee, K., Fullerton, A. i Jakobsen. K. V. (2014). Visual Search Efficiency is Greater for Human Faces Compared to Animal Faces. *Journal of Experimental Psychology*, 61(6), 439-456.
- Smith, R. G. (2011). An appraisal of potential drug interactions regarding hyperbaric oxygen therapy and frequently prescribed medications. *Wounds*, 23(6), 147-159.
- Smith, S. M. i Vale, W. W. (2006). The role of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in neuroendocrine responses to stress. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 8(4), 383-395.
- Sparrow, L., Mathieu, D., Wattel, F., Lancry, A. i Nevieri, R. (2000). Effects of breathing air at 4 atm abs: evidence for a change in strategy. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 27(3), 125-130.

- Spieser, L., Servant, M., Hasbroucq, T. i Burle, B. (2017). Beyond decision! Motor contribution to speed-accuracy trade-off in decision-making. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(3), 950-956.
- Staudt, M. D., Herring, E. Z., Gao, K., Miller, J. P. i Sweet, J. A. (2019). Evolution in the Treatment of Psychiatric Disorders: From Psychosurgery to Psychopharmacology to Neuromodulation. *Frontiers in Neuroscience*, 15(13), 108.
- Steinberg, F. i Doppelmayr, M. (2017). Executive Functions of Divers Are Selectively Impaired at 20-Meter Water Depth. *Frontiers in Psychology*, 8, 1000.
- Steinberg, H. i Summerfield, A. (1957). Influence of a Depressant Drug on Acquisition in Rote Learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 9(3), 138-145.
- Stroop, J. R. (1935). Studies for interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662.
- Synodinos, N. E. (1976). Selective impairment by nitrogen narcosis of performance on a digit-copying and a mental task. *Ergonomics*, 19(1), 69-80.
- Tales, A., Butler, S. R., Fossey, J., Gilchrist, I. D., Jones, R. W. i Troscianko, T. (2002). Visual search in Alzheimer's disease: a deficiency in processing conjunctions of features. *Neuropsychologia*, 40(12), 1849-1857.
- Tales, A., Haworth, J., Nelson, S., Snowden, R. J. i Wilcock, G. (2005). Abnormal visual search in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurocase*, 11(1), 80-84.
- Tales, A., Muir, J., Jones, R., Bayer, A. i Snowden, R. J. (2004). The effects of saliency and task difficulty on visual search performance in ageing and Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 42(3), 335-345.
- Tetzlaff, K., Leplow, B., Deistler, I., Ramm, G., Fehm-Wolfsdorf, G., Warninghoff, V. i Bettinghausen, E. (1998). Memory deficits at 0.6 MPa ambient air pressure. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 25(3), 161-166.
- Tikkinen, J., Hirvonen, A., Parkkola, K. i Siimes, M. A. (2011). The effects of increased pressure, variation in inspired gases and the use of a mask during dry chamber dives

- on salivary cortisol in professional divers. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 41(4), 211-215.
- Tikkinen, J., Parkkola, K. i Siimes, M. A. (2013). Reaction Test Revealed Impaired Performance at 6.0 Atm Abs but Not at 1.9 Atm Abs in Professional Divers. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 40(1), 33-39.
- Tikkinen, J. i, Siimes, M. A. (2015). Age-related effects of increased ambient pressure on discrimination reaction time: A study in 105 professional divers at 6.0 atm abs. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 42(1), 33-39.
- Tombaugh, T. N. (2006). A comprehensive review of the Paced Auditory Serial Addition Test (PASAT). *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(1), 53-76.
- Tops, M., van der Pompe, G., Baas, D., Mulder, L. J., Den Boer, J. A., Meijman, T. F. i Korf, J. (2003). Acute cortisol effects on immediate free recall and recognition of nouns depend on stimulus valence. *Psychophysiology*, 40(2), 167-173.
- Treisman, A. M. i Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97-136.
- Turle-Lorenzo, N., Zouani, B. i Risso, J. J. (1999). Narcotic effects produced by nitrous oxide and hyperbaric nitrogen narcosis in rats performing a fixed-ratio test. *Physiology & Behavior*, 67(3), 321-325.
- Uc, E. Y., Rizzo, M., Anderson, S. W., Sparks, J., Rodnitzky, R. L. i Dawson, J. D. (2006). Impaired visual search in drivers with Parkinson's disease. *Annals of Neurology*, 60(4), 407-413.
- Unsworth, I. P. (1966). Inert Gas Narcosis - An Introduction. *Postgraduate Medical Journal*, 42(488), 378-385.
- Vaernes, R., Bennett, P. B., Hammerborg, D., Ellertsen, B., Peterson, R. E. i Tøonjum, S. (1982). Central nervous system reactions during heliox and trimix dives to 31 ATA. *Undersea Biomedical Research*, 9(1), 1-14.
- Vaernes R. J. i Darragh A. (1982). Endocrine reactions and cognitive performance at 60 metres hyperbaric pressure. Correlations with perceptual defense reactions. *Scandinavian Journal of Psychology*, 23(3), 193-199.

- Vakil, E. (2005). The effect of moderate to severe traumatic brain injury (TBI) on different aspects of memory: a selective review. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 27(8), 977-1021.
- Valls-Pedret, C., Sala-Vila, A., Serra-Mir, M., Corella, D., de la Torre, R., Martínez-González, M. Á., Martínez-Lapiscina, E. H., Fitó, M., Pérez-Heras, A., Salas-Salvadó, J., Estruch, R. i Ros, E. (2015). Mediterranean Diet and Age-Related Cognitive Decline: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Internal Medicine*, 175(7), 1094-1103.
- Van Rees Vellinga, T. P., Verhoeven, A. C., Van Dijk, F. J. i Sterk, W. (2006). Health and efficiency in trimix versus air breathing in compressed air workers. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 33(6), 419-427.
- Van Wijk, C. H., Martin, J. H. i Meintjes, W. A. (2017). Diving under the influence: issues in researching personality and inert gas narcosis. *International Maritime Health*, 68(1), 52-59.
- van Wijk, C. H. i Meintjes, W. A. (2014a). Complex tactile performance in low visibility: the effect of nitrogen narcosis. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 44(2), 65-69.
- van Wijk, C. H. i Meintjes, W. A. (2014b). Nitrogen narcosis and tactile shape memory in low visibility. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 41(5), 371-377.
- van Wijk, C. H., Meintjes, W. A. (2014). Subjective Narcosis Assessment Scale: measuring the subjective experience of nitrogen narcosis. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 41(6), 557-563.
- Verleger, R., Koerbs, A., Graf, J., Śmigasiewicz, K., Schroll, H. i Hamker, F. H. (2014). Patients with Parkinson's disease are less affected than healthy persons by relevant response-unrelated features in visual search. *Neuropsychologia*, 62, 38-47.
- Wadman, R. I., Wijngaarde, C. A., Stam, M., Bartels, B., Otto, L. A. M., Lemmink, H. H., Schoenmakers, M. A. G. C., Cuppen, I., van den Berg, L. H. i van der Pol, W. L. (2018). Muscle strength and motor function throughout life in a cross-sectional cohort of 180 patients with spinal muscular atrophy types 1c-4. *European Journal of Neurology*, 25(3), 512-518.

- Walsh, M. J., Tharratt, S. R. i Offerman, S. R. (2010). Liquid nitrogen ingestion leading to massive pneumoperitoneum without identifiable gastrointestinal perforation. *Journal of Emergency Medicine*, 38(5), 607-609.
- Weltman, G., Smith, J. E. i Egstrom, G. H. (1971). Perceptual narrowing during simulated pressure-chamber exposure. *Human Factors*, 13(2), 99-107.
- Whitaker, L. A. i Findley, M. S. (1977). Nitrogen narcosis measured by dual-task performance. *Journal of Applied Psychology*, 62(6), 735-746.
- Wolf, O. T., Schommer, N. C., Hellhammer, D. H., McEwen, B. S. i Kirschbaum, C. (2001). The relationship between stress induced cortisol levels and memory differs between men and women. *Psychoneuroendocrinology*, 26(7), 711-720.
- Wolf, O. T. (2017). Stress and memory retrieval: mechanisms and consequences. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 14, 40-46.
- Wolfe, J. M. i Friedman-Hill, S. R. (1992). On the role of symmetry in visual search. *Psychological Science*, 3(3), 194-198.
- Wolkowitz, O. M., Lupien, S. J., Bigler, E., Levin, R. B. i Canick, J. (2004). The "steroid dementia syndrome": an unrecognized complication of glucocorticoid treatment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1032, 191-194.
- Wood, N. i Cowan, N. (1995). The cocktail party phenomenon revisited: how frequent are attention shifts to one's name in an irrelevant auditory channel? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(1), 255-260.
- Vytal, K. E., Cornwell, B. R., Letkiewicz, A. M., Arkin, N. E. i Grillon, C. (2013). The complex interaction between anxiety and cognition: insight from spatial and verbal working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 93.
- Yantis, S. i Hillstrom, A. P. (1994). Stimulus-driven attentional capture: evidence from equiluminant visual objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 20(1), 95-107.
- Yaribeygi, H., Panahi, Y., Sahraei, H., Johnston, T. P. i Sahebkar, A. (2017). The impact of stress on body function: A review. *EXCLI Journal*, 16, 1057-1072.

Yogev, D. i, Mekjavi, I. B. (2009). Behavioral temperature regulation in humans during mild narcosis induced by inhalation of 30% nitrous oxide. *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 36(5), 361-373.

Zander, J. i Morrison, J. (2008). Effects of pressure, cold and gloves on hand skin temperature and manual performance of divers. *European Journal of Applied Physiology*, 2, 237-244.

Zarezadeh, R. i Azarbayjani, M. A. (2014). The effect of air scuba dives up to a depth of 30 metres on serum cortisol in male divers. *Journal of the South Pacific Underwater Medicine Society*, 44(3), 158-160.