

WYBRANE ZAGROŻENIA PROCESU DEKOMPRESJI, CZĘŚĆ II: ANALIZA WYBRANYCH RODZAJÓW RYZYKA

Ryszard Kłós

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

Bezpieczne przejście z atmosfery o wyższym ciśnieniu do atmosfery o niższym ciśnieniu realizowane jest poprzez planowanie procesu dekompresji, najczęściej na drodze zmian ciśnienia i/lub składu czynnika oddechowego w funkcji czasu. Jednak na proces dekompresji ma wpływ większa liczba inherentnych czynników niż tylko zmiany ciśnienia i składu czynnika oddechowego. Ich wartości powinny być utrzymywane w pewnych zakresach, jednak zdarza się, że kontrola nad nimi nie może być utrzymana. W taki przypadku stają się one elementami rezydualnego ryzyka procesu dekompresji. Bezpieczeństwo dekompresji powinno być zapewniane, między innymi, poprzez analizę rezydualnego ryzyka dla każdej realizacji procesu dekompresji.

Słowa kluczowe: dekompresja, ryzyko, zagrożenie, choroba dekompresyjna.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2020 Vol. 72 Issue 3 pp. 7 – 28

ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2020-0014

Strony: 22, rysunki: 1, tabele: 3

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

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 24.04.2020 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 19.05.2020 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Przedstawiona analiza inherentnego ryzyka zakłada wykonanie wszystkich zaleceń przepisów i dobrej praktyki nurkowej, jak: treningu adaptacyjnego, utrzymania higieny, zapewnienia profilaktyki zdrowotnej, prowadzących do utrzymania zdolności do bezpiecznego przechodzenia dekompresji [1].

*Ryzyko*¹ $R(X)$ to funkcja zmiennej losowej X wyrażająca prawdopodobieństwo zajścia niepewnego, potencjalnego zdarzenia $x \leftarrow X$ lub kombinacji zdarzeń $x_1..x_n \leftarrow X$, które w przypadku ekspozycji na nie w czasie τ może się zmaterializować i mieć wpływ na osiągnięcie celu w postaci *zagrożenia* lub *szansy*. *Zagrożenie* lub *szansa*, oznaczane tutaj wspólnie jako² H , to prawdopodobieństwo realizacji zmiennej losowej X , w postaci $x_1..x_n \leftarrow X$, podczas ekspozycji na *ryzyko* R przebiegające w określonym odcinku czasu τ : $H = \int R(X) dt$. Funkcja H , nazywana jest w analizie przetrwania funkcją *hazardu* [2].

REAKCJA

Istnieją różne sposoby reakcji na *ryzyko* R , najczęstsze to [3]:

- akceptowanie z planem rezerwowym, polegające na przygotowaniu planowych działań jeśli *ryzyko* R się zmaterializuje,
- minimalizowanie *ryzyka* R w formie jego przeniesienia³ lub współdzielenia⁴,
- redukowanie/izolowanie, polegające na aktywnym działaniu podjętym celem zmniejszenia prawdopodobieństwa materializacji *ryzyka* R czy ograniczenia wpływu w przypadku jego realizacji,
- unikanie/zastąpienie⁵, polegające na zmianie jakichś aspektów celem uniknięcia jakiegoś typu *ryzyka* R ,
- zamienianie, polegające na poszukiwaniu metody minimalizacji *ryzyka* R , w przypadku jego realizacji, poprzez pojawienie się *szansy*⁶, która może być wykorzystana lub odrzucona,
- wzmacnianie, jako proaktywna forma podejmowana w celu zwiększenia szansy lub wzmocnienia zakresu jej oddziaływania.

Najczęstszym sposobem zabezpieczenia się na wypadek materializacji inherentnego *ryzyka* R wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej *DCS* jest jego akceptacja z planem rezerwowym. Zastosowanie tej strategii jest możliwe jeżeli system dekompresji został zbadany pod kątem wykorzystania planów awaryjnych, jak: możliwość przeprowadzenia akceleracji dekompresji lub zastosowania procedury powierzchniowej dekompresji przerywanej, w przypadku skrócenia czasu pobytu nurka w toni wodnej lub konieczności jego ewakuacji ze środowiska wodnego. Systemy morskie planowane są tak, że możliwe jest kompletowanie ekwiwalentnej dekompresji na stacjach głębszych⁷. Brak możliwości kontynuowania dekompresji tlenowej często jest kompensowany dekompresją przy wykorzystaniu mieszaniny operacyjnej itp. Najważniejszym elementem planu awaryjnego jest możliwość modyfikowania *konserwatyizmu* [4,5].

Rzadko skuteczne plany awaryjne mogą wynikać z adaptacji innych badań i obserwacji. Stosunkowo skuteczną metodą jest wykorzystanie tabel dekompresji powietrznej do planowania dekompresji Nitroksowej Nx poprzez przeliczenie ich według tzw. równoważnej głębokości powietrznej *EAD*⁸. Gorsze efekty daje przeliczanie tabel dekompresji powietrznej dedykowanych do użycia w warunkach morskich na dekompresję dla wyniesionych akwenów, jak wysokogórskie jeziora [6].

Minimalizowanie skutków materializacji *ryzyka* R wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej *DCS* jest przewidzenie systemu transportu do ośrodka hiperbarycznego lub posiadanie: komory hiperbarycznej w pobliżu miejsca nurkowania, instalacji do normobarycznej inhalacji tlenowej, odpowiednio wyposażonej apteczki, przeszkolenia personelu w odpowiednich procedurach medycznych itp. Skutki materializacji inherentnego *ryzyka* R wystąpienia odległych objawów choroby dekompresyjnej *DCS* łagodzi się przez przeniesienie odpowiedzialności na ubezpieczyciela czy współdzielenie jej z pracodawcą.

W przypadku *ryzyka* R wystąpienia objawów *DCS*, poszukiwanie zamiany zagrożenia na szansę jest trudne choć możliwe. Przykładowo, rozwiązanie problemu związanego z koniecznością prowadzenia periodycznego przepłukiwania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego. Czyli, pomimo braku płukań w obiegu znajduje się i tak wystarczająco bogaty w tlen czynnik oddechowy.

Redukowanie potencjalnego *ryzyka* R jest często realizowane poprzez stosowanie różnych patentów nurkowych. Przykładowo, można ograniczać wysiłek potrzebny na utrzymanie się na głębokości podczas dekompresji stosując kompensatory pływalności, bojki dekompresyjne czy wykorzystując linę opustową. Wysiłek potrzebny na przemieszczanie się można minimalizować przez wykorzystanie skuterów podwodnych, holowanie za łodzią itp. Stosowanie dobrych praktyk nurkowych, zasad higieny, odpoczynku, treningu itp., redukuje także inherentne *ryzyko* R wystąpienia choroby dekompresyjnej *DCS*.

Unikanie materializacji *ryzyka* R wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej *DCS* najczęściej polega na rezygnacji z nurkowania, gdy stan psychofizyczny nurka nie jest odpowiedni. Jednak wielokrotnie unikanie musi być wsparte decyzją kierownika nurkowania, gdyż determinacja nurków prowadzi często do konfabulacji lub bagatelizowania *ryzyka* R . Nie chodzi tu tylko o rezygnację z nurkowania podczas choroby, niewyspania czy objawów kaca, ale także rezygnację z cięższych zadań nurkowych, gdy wystąpiła przerwa w nurkowaniu lub przy występowaniu objawów stresu.

Szansę przy unikaniu *ryzyka* R wystąpienia choroby ciśnieniowej *DCS* pojawiają się rzadko. Przykładowo gdy nurkowanie zabezpieczone jest w istotne uzbrojenie techniczne, jak znaczne zapasy tlenu, to zastosowanie oddychania tlenem po nurkowaniu może być ciekawą metodą redukcji⁹ zabezpieczenia przed objawami *DCS*. Proaktywną metodą wzmocnienia szansy może być w tym przypadku zastosowanie *preoksygenacji* przed podjęciem nurkowania¹⁰. Oczywiście wykorzystanie innego uzbrojenia technicznego wspomagającego proces nurkowania, jak wykorzystanie dzwonu nurkowego, jest doskonałą proaktywną formą reakcji na *ryzyko* R , lecz jedynie wtedy, gdy systemy techniczne są sprawne i niezawodne.

PODEJŚCIE

Dla większości rodzajów inherentnego ryzyka *R* towarzyszącego procesowi dekompresji jego bezsporna detekcja jest trudna do przeprowadzenia. Dlatego analizę ryzyka dla nurków z wykorzystaniem aparatu *SCR CRABE SCUBA* wykonano uproszczoną¹¹ metodą *FMEA*¹² proponując jedynie uporządkowanie inherentnego ryzyka *R* wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej *DCS* na bazie prawdopodobieństwa jego materializacji i intensywności jego oddziaływania po jego materializacji. Reakcję na niektóre zdiagnozowane rodzaje ryzyka *R*, które uwzględniono podczas procesu badawczego w ramach realizowanego projektu pokazano w tab.1 i na rys. 1.

Oprócz wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej *DCS* i objawów ośrodkowej toksyczności tlenowej *CNSyn*¹³ rozpatrzono inherentne ryzyka *R* związane z:

- nieprawidłowym składem czynnika oddechowego,
- wydatkowaniem pracy,
- oddziaływaniem niskiej temperatury,
- utratą zasilania tlenem,
- wzrostem zafalowania akwenu.

Wszystkie wymienione ryzyka uzyskały na wstępie wysoki priorytet. Poprzez zaproponowane podczas realizacji projektu rozwiązania możliwe było obniżenie ich priorytetu do średniego oraz w niektórych przypadkach do małego – tab.1.

Najważniejszym problemem do rozwiązania w ramach projektu było opracowanie adekwatnego modelu wentylacji aparatu nurkowego pozwalającego na określenie składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka [7,8]. Jest to zawsze zagadnienie podstawowe przy badaniach aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego. Bez znajomości dokładnego i precyzyjnego składu czynnika oddechowego, którym oddycha nurek, niemożliwe jest szacowanie adekwatnej dekompresji. Najczęściej wydaje się, że jedynym rozwiązaniem jest prowadzenie wiarygodnych pomiarów przynajmniej ciśnienia cząstkowego tlenu. Badania nad takimi pomiarami są prowadzone nieprzerwanie od lat 60. ubiegłego wieku. Jednak, w dużej liczbie sytuacji, wyniki tych badań są nadal nieadekwatne. Dodatkowo, pomiary absorbują uwagę nurka, który musi skupić się na wykonywaniu innych, odpowiedzianych zadań¹⁴.

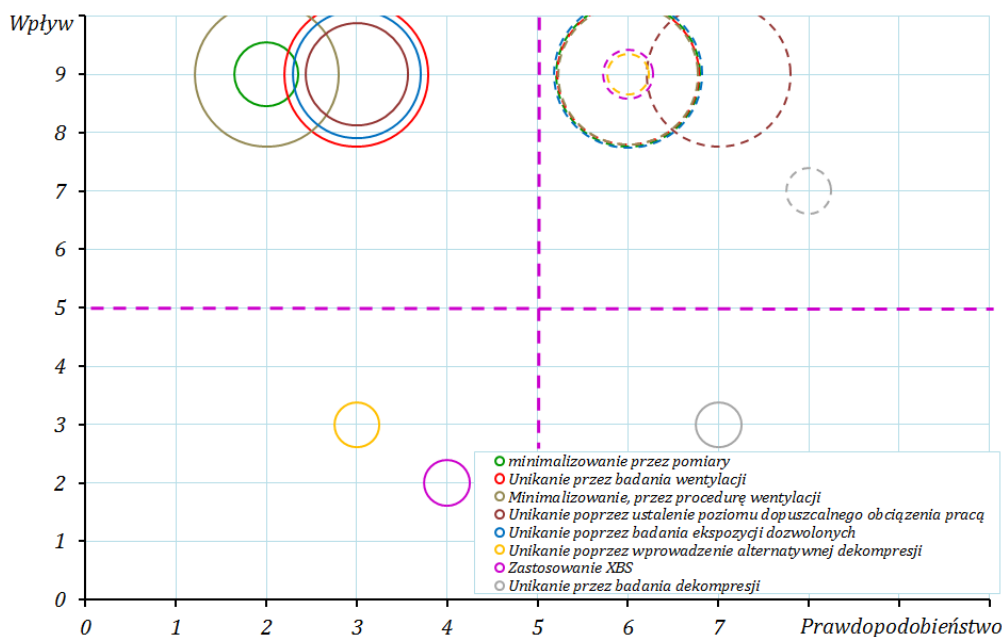
Wybrane elementy analizy inherentnego ryzyka dekompresji rozwiązywane w projekcie.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt materializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo zmaterialiowania się ryzyka	Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo detekcji materializacji ryzyka	Wartość względnej liczby ryzyka RPN	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawiona wartość względnej liczby ryzyka RPN i wartość względnej liczby priorytetu dla ryzyka PR				
		<i>I</i>		<i>P</i>	$PR=I \times P$		<i>D</i>	$RPN=I \times P \times D$		<i>I</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>PR</i>	<i>RPN</i>
Nieprawidłowy skład czynnika oddechowego	Trudności w szacowaniu dekompresji	9	Nieodpowiednia zawartość tlenu	6	54 Wysokie	Brak detekcji	10	540	minimalizowanie przez pomiary	9	2	2	18 Średnie	36 Małe
									Unikanie przez badania wentylacji	9	3	10	27 Średnie	
									Minimalizowanie, przez procedurę wentylacji	9	2	10	18 Średnie	
Wydatkowanie pracy	Wystąpienie objawów DCS	9	Zakwaszenie	7	63 Wysokie	Brak detekcji	10		Unikanie poprzez ustalenie poziomu dopuszczalnego obciążenia praca	9	3	5	27 Średnie	
	wystąpienie objawów CNSyn	9	Ekspozycje o zwiększonym ryzyku CNSyn	6	54 Wysokie	Brak detekcji	10		Unikanie poprzez badania ekspozycji dozwolonych	9	3	8	27 Średnie	
Oddziaływaniem niskiej temperatury	Wystąpienie objawów DCS	9	Ekspozycja na zimno	6	54 Wysokie	Brak detekcji	8		Unikanie poprzez badania prawdopodobnych ekspozycji	9	2	8	18 Średnie	
Utrata zasilania tlenem	Brak alternatywnej dekompresji	9	Awaria	6	54 Wysokie	Idealna detekcja	1	54	Unikanie poprzez wprowadzenie alternatywnej dekompresji	3	3	1	9 Małe	9 Małe
									Zastosowanie XBS	2	4	1	8 Małe	8 Małe
Wzrostem zafalowania akwenu	Brak możliwości utrzymania się na ostatniej stacji	7	Oddziaływanie falowania na nurka	8	56 Wysokie	Idealna detekcja	1	56	Unikanie przez badania na dekompresji	3	7	1	21 Średnie	21 Małe

Prioryteryzacja ryzyka PR	
1-10	Małe
11-50	Średnie
51-80	Wysokie
81-100	Ekstremalne

Intensywność stwarzanego zagrożenia <i>I</i>	Prawdopodobieństwo wystąpienia <i>P</i>	Prawdopodobieństwo detekcji <i>D</i>
1: Prawie nieodczuwalne	1: Nieprawdopodobne	1: idealna detekcja $D_{100} \approx 100\%$
2-3: Niewielkie obciążenie	2-3: Bardzo mało prawdopodobne	2-5: pełna detekcja ($100\% > D_{100} \geq 99,7\%$)
4-6: Umiarkowane oddziaływanie	4-6: Małe prawdopodobieństwo	6-8: możliwa średnia detekcja ($99,7\% > D_{100} \geq 98\%$)
7-8: Duże oddziaływanie	7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo	9: niepełna detekcja ($98\% > D_{100} \geq 90\%$)
9-10: Bardzo duże oddziaływanie	9-10: Wysokie prawdopodobieństwo	10: brak detekcji $D_{100} \approx 0\%$

RPN (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka RPN > 100



Rys. 1 Wybrane elementy analizy inherentnego ryzyka dekompresji rozwiązywane w projekcie: linie przerywane oznaczają ocenę wybranych elementów inherentnego ryzyka dekompresji przyjętych do opracowania w projekcie; linie ciągłe pokazują ocenę tych samych elementów inherentnego ryzyka dekompresji po ich opracowaniu w projekcie.

Podjęto zatem próbę przeprowadzenia dokładnych badań nad modelem wentylacji [8]. Umożliwiło to rezygnację z wentylacji aparatu na dnie, zwłaszcza podczas nurkowań z wykorzystaniem Trymiks Tx , jak to proponowano poprzednio [5]. Wentylacja aparatu w pobliżu miny inteligentnej jest niewskazana, gdyż powoduje hałas, który może być sygnałem dla systemów detekcji i przeciwdziałania zamontowanych w minie. Oprócz tego regularna wentylacja powoduje utratę czasu na dnie na jej prowadzenie, który to czas powinien być maksymalnie wykorzystany do wydatkowania przez nurka pracy użytecznej, bez zbędnego skupiania się na obsłudze sprzętu nurkowego. Dzięki opracowaniu w ramach projektu adekwatnego modelu wentylacji aparatu obniżono priorytet ryzyka R związanego z nieznanym składem czynnika oddechowego do średniego [8].

Podczas badań zachęcano nurków do wykonywania wysiłku, polegającego na napieraniu na płytę oporową poprzez symulowanie pływania w płetwach, o takiej intensywności jaką normalnie są w stanie utrzymać przez długi okres czasu. Gdy marznienie podczas misji było zbyt dokuczliwe dla nurków zezwalano im na zwiększenie aktywności fizycznej nawet powyżej poziomu wysiłku, który normalnie wydatkowali. Intensywność naporu na płytę była mierzona tensometrycznie, co pozwalało na porównywanie wyników przy różnych nurkowaniach tego samego nurka oraz pomiędzy nurkami. Pozwoliło to na ustalenie, że wydatkowany w ten sposób wysiłek jest możliwy do kompensowania zastosowanym poziomem konserwatywności.

Przy badaniach nad możliwością wystąpienia ośrodkowej formy zatrucia tlenowego CNS_{Syn} zmuszono nurków także do zaprzestania jakiegokolwiek wysiłku. Pozwoliło to na ustalenie czy nie występuje wzmożone zagrożenie wystąpieniem ośrodkowych objawów toksycznego działania tlenu CNS_{Syn} . W wyniku przeprowadzonych badań, poziom ryzyka R związanego z wydatkowaniem pracy zostało obniżone do średniego. Podobnie priorytet ryzyka R związanego z ekspozycją nurków na niską temperaturę wody został, w wyniku przeprowadzonych badań, obniżony do średniego.

Podstawowy proces dekompresji wymaga wykorzystania tlenu w końcowej jego fazie. Oryginalną reakcją¹⁵ na ryzyko R utraty zasilania tlenem jest użycie zewnętrznego źródła zasilania XBS ¹⁶. Zastosowanie tego rozwiązania pozwala obniżyć ryzyko R związane z brakiem zasilania tlenem z wysokiego do małego. Jednak należy zwrócić uwagę, że gwarantem sukcesu jest posiadanie w zasięgu systemu XBS . W wodach zanieczyszczonych, jak w warunkach Bałtyku, trafienie na element zawieszony w toni wodnej może być trudne nawet gdy system uzbrojony jest w markery emitujące światło. Dlatego, w ramach projektu, dla systemu Nitroksowego Nx przyjęto opracowanie dekompresji Nx ekwiwalentnej do dekompresji tlenowej. Pozwoliło to na obniżenie poziomu ryzyka R z wysokiego do niskiego. Zaproponowano także linię opustową uzbrojoną w inhalatory. Pozwala to na podanie zarówno tlenu jak i mieszaniny operacyjnej, zaś wędrówka głowicy linii opustowej z nurkami gwarantuje dostępność XBS prawie przez cały czas procesu nurkowania¹⁷.

Poza strefą saturacji, dekompresja najczęściej prowadzona jest z wykorzystaniem stacji dekompresyjnych, gdyż realizacja dekompresji ciągłej jest w warunkach operacyjnych uciążliwa, zwłaszcza podczas jej przebiegu w toni wodnej.

Najczęściej stacje dekompresyjne są rozmieszczane równomiernie ze skokiem co $3 mH_2O$ z ostatnią stacją na głębokości $3 mH_2O$. Stacja na głębokości $3 mH_2O$ jest najdłuższa. Przyjmuje się, że dynamiczny wpływ fali na zanurzone obiekty sięga do głębokości 5-7 razy większej niż jej wysokość. Stąd półmetrowa fala może wywierać wpływ na nurka pozostającego na głębokości stacji $3 mH_2O$. dodatkowo jeśli nurek przechodzi dekompresję na ostatniej stacji $3 mH_2O$ przy linii opuszczanej z burty okrętu, to rozkołysanie jednostki może wpływać na jeszcze większe oddziaływanie na nurka. Może dojść do sytuacji, że raz nurek będzie prawie na powierzchni zaś przy drugim wahnięciu na głębokości znacznie przekraczającej głębokość stacji dekompresyjnej na $3 mH_2O$. Stąd systemy dekompresji dedykowane na warunki morskie są tak budowane, że jest możliwość odbycia łącznego czasu dekompresji dedykowanej dwóm ostatnim stacjom na stacji głębszej

czyli dla omawianego, przykładowego systemu na stacji $6\text{ mH}_2\text{O}$. Przeprowadzenie badań nad taką procedurą dała możliwość obniżenia wysokiego ryzyka R związanego ze wzrostem zafalowania regionu do poziomu małego.

Niektóre zdiagnozowane ryzyka R zostały skompensowane podczas realizacji projektu poprzez wykorzystanie dodatkowych lub redundantnych elementów systemu nurkowego w postaci dodatkowych pomiarów. Dzięki temu można było przeprowadzić pełną analizę *FMEA* starając się obniżyć nie tylko priorytet ryzyka R , lecz także jego RPN – tab. 2. Dotyczyło to:

- spożycia alkoholu,
- zakwaszenia krwi na skutek wydatkowania wzmożonego wysiłku przed nurkowaniem,
- niewytrenowania do przechodzenia dekompresji,
- nieprawidłowego stosunku konsumpcji tlenu do wentylacji płuc,
- wieku.

Wprowadzono obligatoryjne badania alkomatem zarówno nurków roboczych jak i zabezpieczających. Obniżono poziom szacowanej wartości krytycznej liczby ryzyka RPN do poziomu aprobowanego $RPN = 14$, eliminując w ten sposób w znacznym stopniu możliwość dopuszczenia do pracy nurków, którzy spożywali alkohol.

Wybrane elementy analizy inherentnego ryzyka dekompresji minimalizowane w projekcie przez unikanie.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt materializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo zmaterialiowania się ryzyka	Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo detekcji materializacji ryzyka	Wartość względnej liczby ryzyka <i>RPN</i>	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawiona wartość względnej liczby ryzyka <i>RPN</i> i wartość względnej liczby priorytetu dla ryzyka <i>PR</i>				
		<i>I</i>		<i>P</i>	$PR=I \times P$		<i>D</i>	$RPN=I \times P \times D$		<i>I</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>PR</i>	<i>RPN</i>
Spożycie alkoholu	Wystąpienie objawów <i>DCS</i>	7	Zaburzenia toksykologiczne	7	49 Średnie	Brak detekcji	6	294	Unikanie poprzez badania alkomatem	7	2	1	14 Średnie	14 Małe
Wydatkowania wzmózonego wysiłku przed nurkowaniem	Wystąpienie objawów <i>DCS</i>	9	Zaburzenia transportu tlenu przez zakwaszenie	9	81 Ekstremalne	Brak detekcji	10	810	Unikanie poprzez badania zakwaszenia	9	1	1	9 Małe	9 Małe
Niewytrenowania do przechodzenia dekompresji	Wystąpienie objawów <i>DCS</i>	8	Zaburzenia procesów dekompresyjnych	7	56 Wysokie	Możliwa średnia detekcja	8	448	Unikanie poprzez prowadzenie treningów hiperbarycznych	8	3	4	24 Średnie	96 Małe
Nieadekwatny stosunek konsumpcji tlenu do wentylacji płuc	Za mała zawartość tlenu w czynniku oddechowym	9	Zaburzenia procesów dekompresyjnych	9	81 Ekstremalne	Możliwa średnia detekcja	6	486	Unikanie poprzez badania	9	3	3	27 Średnie	81 Małe
Wiek	Wystąpienie objawów <i>DCS</i>	5	Zaburzenia wydolności	6	30 Średnie	Idealna detekcja	1	30	Akceptowanie	5	6	1	30 Średnie	30 Małe

Priorytetyzacja ryzyka <i>PR</i>
1-10 Małe
11-50 Średnie
51-80 Wysokie
81-100 Ekstremalne

Intensywność stwarzanego zagrożenia <i>I</i>	Prawdopodobieństwo wystąpienia <i>P</i>	Prawdopodobieństwo detekcji <i>D</i>
1: Prawie nieodczuwalne	1: Nieprawdopodobne	1: idealna detekcja $D_{95} \cong 100\%$
2-3: Niewielkie obciążenie	2-3: Bardzo mało prawdopodobne	2-5: pełna detekcja ($100\% > D_{95} \geq 99,7\%$)
4-6: Umiarkowane oddziaływanie	4-6: Małe prawdopodobieństwo	6-8: możliwa średnia detekcja ($99,7\% > D_{95} \geq 98\%$)
7-8: Duże oddziaływanie	7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo	9: niepełna detekcja ($98\% > D_{95} \geq 90\%$)
9-10: Bardzo duże oddziaływanie	9-10: Wysokie prawdopodobieństwo	10: brak detekcji $D_{95} \cong 0\%$

***RPN* (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka $RPN > 100$**



Podobnie wprowadzono obligatoryjne badania nurków roboczych na poziom obecności kwasu mlekowego we krwi. Obniżając w ten sposób poziom szacowanej wartości krytycznej liczby ryzyka RPN do poziomu aprobowanego $RPN = 9$, eliminując w znacznym stopniu możliwość dopuszczenia do pracy nurków roboczych, którzy w ostatnim czasie wykonywali ciężką pracę.

Wprowadzono w ramach projektu obowiązkowe treningi hiperbaryczne dla nurków uczestniczących w badaniach zarówno w charakterze nurków roboczych jak i zabezpieczających. Pozwoliło to na obniżenie szacunków wartości krytycznej liczby ryzyka RPN do poziomu aprobowanego $RPN = 96$, eliminując w znacznym stopniu możliwość dopuszczenia do pracy niewytrenowanych nurków.

Od samego początku prowadzono monitoring modułu oddechowego będącego stosunkiem $\varepsilon = \frac{\dot{v}_0}{\dot{V}_E}$ konsumpcji tlenu \dot{v}_0 do wentylacji płuc \dot{V}_E dla całej populacji nurków eksperymentalnych [8]. Na podstawie funkcji $\bar{\varepsilon} = f(H)$ wartości uśrednionych $\bar{\varepsilon}$ stosunku konsumpcji tlenu \dot{v}_0 do wentylacji płuc \dot{V}_E w zależności od głębokości H dokonywano predykcji tego modułu $\hat{\varepsilon} = f(H)$ w funkcji głębokości H dla planowanych, eksperymentalnych rozkładów dekompresji z założoną precyzją $\Delta\hat{\varepsilon}$. Wyniki przeprowadzonego nurkowania eksperymentalnego były automatycznie włączane do bazy danych służącej do określenia zależności $\bar{\varepsilon} = f(H)$ wartości uśrednionych $\bar{\varepsilon}$ stosunku konsumpcji tlenu \dot{v}_0 do wentylacji płuc \dot{V}_E . Takie postępowanie miało zminimalizować ryzyko R przyjęcia nieprawidłowego modułu oddechowego przy planowaniu dekompresji eksperymentalnych. Pozwoliło to na obniżenie krytycznej liczby ryzyka RPN z poziomu $RPN = 486$ do poziomu aprobowanego $RPN = 81$.

Ryzyko R związane z przyjęciem nurków, którzy są zaawansowani wiekiem, przy idealnej detekcji było na poziomie akceptowalnym, gdyż decyzja dopuszczenia takiego nurka do eksperymentu mogła być podjęta jedynie świadomym zamysłem badawczym.

Niektóre zdiagnozowane rodzaje ryzyka R zostały w procesie badawczym jedynie wstępnie rozpoznane, jako propozycje do kontynuowania badań w przyszłości. Dotyczyło to możliwości wykorzystania szansy:

- wykonania nurkowania powtórzeniowego (powyżej 1 h od zakończenia nurkowania poprzedniego),
- wykonania nurkowania powtarzalnego (poniżej 1 h od zakończenia nurkowania poprzedniego),
- wykorzystania akceleracji dekompresji powierzchniowej przez oddychanie tlenem,
- wykorzystania mieszaniny 40% O_2/N_2 w zakresie głębokości $H \in [0; 24]mH_2O$

Wstępne badania nad nurkowaniami powtórzeniowymi zostały także sprawdzone eksperymentalnie dla mieszanin Nx . Już na obecnym etapie, dysponując stosunkowo znaczną populacją tych nurkowań, można stwierdzić, że wyniki te są obiecujące. Dla nurkowań powtarzalnych wykonano jedynie badania pilotażowe, stąd nie można jeszcze wnioskować o skuteczności modelowania takich ekspozycji. Oba typy nurkowań są przydatne nie tylko do planowania powtarzania nurkowań, lecz stanowią bazę do wnioskowania o potrzebnym wypoczynku nurka przed następnymi nurkowaniami.

Wykorzystanie akceleracji dekompresji powierzchniowej przez oddychanie tlenem zostało opracowane jedynie teoretycznie.

Wykorzystanie mieszaniny 40% O_2/N_2 w zakresie głębokości $H \in [0; 24]mH_2O$ w swym zamyśle ma służyć jako procedura awaryjna. Może to być przydatne, gdy podczas pozostawania w oddaleniu od bazy należy wykonać awaryjne nurkowanie interwencyjne przy braku czynnika oddechowego 60% O_2/N_2 i konieczności podjęcia nurkowań na małych głębokościach. Przykładowo, w celu uwolnienia pędnika okrętu po zaplątaniu go w dryfujące sieci bądź liny.

ANALIZA

Do analizy inherentnego ryzyka R wystąpieniem objawów choroby dekompresyjnej DCS pozostałego po redukcji ryzyka, dla którego sposoby reakcji badano w ramach projektu, wykorzystano także metodę $FMEA$. W oparciu o wiedzę ekspercką wykonano analizę jedynie dla wybranych rodzajów ryzyka towarzyszących *procesowi* dekompresji:

- wykonywanie ciężkiej pracy,
- zmarznięcie/przegrzanie nurka,
- gdy nurkowanie jest jednym w cyklu nurkowań,
- gdy nurek jest niewytrenowany lub posiada osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową,
- gdy nurek jest otyły lub jego masa przekracza 80 kg,
- gdy nurek jest w wieku powyżej 40 lat,
- opory oddechowe,
- dekompresja do ciśnienia mniejszego od atmosferycznego i transport powietrzny po nurkowaniu,
- uciski miejscowe powodowane skafandrem i sprzętem,
- wymuszona pozycja pracy lub podczas dekompresji,
- zalanie skafandra,
- dieta,
- zażywanie suplementów diety i leków,
- dehydratacja,
- specyficzne zagrożenia związane z wykorzystywanym wyposażeniem nurkowym, sprzętem pomocniczym, technologią nurkowania itp.

W nurkowaniach poza strefą saturacji nie zezwala się na wykonywanie ciężkiej pracy przez nurka. W nurkowaniach saturovaniach istnieje możliwość stabilizacji homeostazy nurków podczas odpoczynku¹⁸ przed podjęciem dekompresji, która w nurkowaniach poza strefą saturacji nie jest możliwa. Przy wydatkowaniu intensywnego wysiłku organizm może przejść częściowo na przemianę beztlenową, gdzie jednym z produktów metabolicznych jest kwas mlekowy. Powoduje to zakwaszenie krwi. Hemoglobina w środowisku kwasowym traci znacznie zdolność do przenoszenia tlenu zaburzając w ten sposób proces dekompresji.

W niektórych okolicznościach procesu nurkowania nie jest możliwe uniknięcie wydatkowania ciężkiej pracy, przykładowo przy dostaniu się w prąd wodny. Przeciwdziałanie takiemu scenariuszowi, stwarzającemu intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka w dziesięciostopniowej skali względnej oszacowano na poziomie bardzo dużego oddziaływania $I = 9$ – tab. 3. Prawdopodobieństwo zmaterializowania się ryzyka w Morzu Bałtyckim w dziesięciostopniowej skali względnej oszacowano na poziomie małego $P = 5$, a detekcję na poziomie średnim $D = 6$, gdyż nie dla każdego nurka praca o tej samej intensywności jest tak samo niebezpieczna. Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka wyniosła $PR = 45$, co oznacza średnie ryzyko R , jednak wartość względnej liczby ryzyka RPN przekracza ponad 2,5 raza jej wartość krytyczną $RPN_{kr.} = 100$, wynosząc $RPN = 270$. Unikanie wykonywania ciężkiej pracy wiąże się z zastosowaniem narzędzi i przyrządów wspomagających proces nurkowania. Przykładowo, do pływania dystansowego można użyć skuterów podwodnych a do wykonywania prac narzędzi. Plany awaryjne w przypadku materializacji tego rodzaju ryzyka wiąże się z przygotowaniem do wykonania kompensacji procesu dekompresji poprzez dekompresję powierzchniową akcelerowaną dekompresją tlenową lub płukanie tlenem atmosferycznym, zakazem wykonywania wysiłku itp.

Scenariusz planu awaryjnego powinien być opracowany z góry przed podjęciem nurkowania i w miarę możliwości każdorazowo sprawdzony przy udziale nurków i obsługi, aby wszyscy wiedzieli co mają robić w chwili jego wdrożenia do realizacji.

Zmarznięciu nurka zapobiega się przez stosowanie pasywnych lub aktywnych środków ochrony cieplnej. Podczas nurkowań w mroźnym klimacie należy zabezpieczyć ogrzewane miejsca na przebieralnie i do odpoczynku. Nie zawsze środki ochrony pasywnej daje się dobrać prawidłowo do procesu nurkowania a aktywne środki ochrony cieplnej mogą ulec awarii. Stąd nie można wykluczyć materializacji ryzyka zmarznięcia nurka. Przemarznięcie przed nurkowaniem lub po dekompresji jest także niebezpieczne z punktu widzenia procesu nurkowania i późniejszej dekompresji, stąd należy planować ochronę ciepłą nurków także podczas pobytu na powierzchni przed nurkowaniem jak i odpoczynku po dekompresji.

Wybrane elementy analizy inherentnego ryzyka dekompresji minimalizowane w oparciu o wiedzę ekspercką.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt materializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo zmaterialiowania się ryzyka	Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo detekcji materializacji ryzyka	Wartość względnej liczby ryzyka RPN	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawiona wartość względnej liczby ryzyka RPN i wartość względnej liczby priorytetu dla ryzyka PR				
		<i>I</i>		<i>P</i>	$PR=I \times P$		<i>D</i>	$RPN=I \times P \times D$		<i>I</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>PR</i>	<i>RPN</i>
Wykonywanie ciężkiej pracy	Wystąpienie objawów DCS	9	Zaburzenia homeostazy	5	45 Średnie	Możliwa średnia detekcja	6	270	Unikanie z planem awaryjnym	9	5	6	45 Średnie	270 za duże RPN
Zmarznięcie/przeżranie nurka	Wystąpienie objawów DCS	7	Zaburzenia homeostazy	4	28 Średnie	Możliwa średnia detekcja	7	196	Unikanie z planem awaryjnym	7	4	7	28 Średnie	196 za duże RPN
Zalanie skafandra	Wystąpienie objawów DCS	7	Wyziębienie	5	35 Średnie	Możliwa pełna detekcja	3	105	Unikanie z planem awaryjnym	7	4	3	28 Średnie	84 Małe
Nurkowanie w cyklu nurkowań	Wystąpienie objawów DCS	7	Zaburzenia homeostazy	4	28 Średnie	Idealna detekcja	1	28	Aprobowanie z planem awaryjnym	7	4	1	28 Średnie	28 Małe
Niewytrenowanie lub osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową	Wystąpienie objawów DCS	7	Brak treningu	5	35 Średnie	Możliwa pełna detekcja	4	140	Unikanie przez treningi i zwiększony konserwatyzm	7	2	1	14 Średnie	14 Małe
Otyłość lub masa przekracza powyżej 80 kg	Wystąpienie objawów DCS	7	niedopasowanie do aparatu nurkowego	4	28 Średnie	Idealna detekcja	1	28	Aprobowanie z planem awaryjnym	7	4	1	28 Średnie	28 Małe
Wiek powyżej 40 lat	Wystąpienie objawów DCS	5	Starzenie organizmu	3	15 Średnie	Idealna detekcja	1	15	Aprobowanie z planem awaryjnym	5	3	1	15 Średnie	15 Małe

Priorytetyzacja ryzyka PR	
1-10	Małe
11-50	Średnie
51-80	Wysokie
81-100	Ekstremalne

Intensywność stwarzanego zagrożenia <i>I</i>	Prawdopodobieństwo wystąpienia <i>P</i>	Prawdopodobieństwo detekcji <i>D</i>
1: Prawie nieodczuwalne	1: Nieprawdopodobne	1: idealna detekcja $D_{95} \geq 100\%$
2-3: Niewielkie obciążenie	2-3: Bardzo mało prawdopodobne	2-5: pełna detekcja ($100\% > D_{95} \geq 99,7\%$)
4-6: Umiarkowane oddziaływanie	4-6: Małe prawdopodobieństwo	6-8: możliwa średnia detekcja ($99,7\% > D_{95} \geq 98\%$)
7-8: Duże oddziaływanie	7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo	9: niepełna detekcja ($98\% > D_{95} \geq 90\%$)
9-10: Bardzo duże oddziaływanie	9-10: Wysokie prawdopodobieństwo	10: brak detekcji $D_{95} \approx 0\%$

RPN (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka RPN > 100

Wybrane elementy analizy inherentnego ryzyka dekompresji minimalizowane w oparciu o wiedzę ekspercką.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt materializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo zmaterialiowania się ryzyka	Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodo- bieństwo detekcji materializacji ryzyka	Wartość względnej liczby ryzyka RPN	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawiona wartość względnej liczby ryzyka RPN i wartość względnej liczby priorytetu dla ryzyka PR				
		<i>I</i>		<i>P</i>	$PR=I \times P$		<i>D</i>	$RPN=I \times P \times D$		<i>I</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>PR</i>	<i>RPN</i>
Opory oddechowe	Wystąpienie objawów DCS	7	Nieprawidłowe działanie aparatu	4	28 Średnie	Możliwa średnia detekcja	6	168	Sprawdzenie oporów oddechowych	7	4	3	28 Średnie	84 Małe
Transport powietrzny po nurkowaniu	Wystąpienie objawów DCS	7	Zaburzenia homeostazy	7	49 Średnie	Możliwa pełna detekcja	5	245	Inhalacja tlenem	7	4	5	28 Średnie	140 za duże RPN
Uciski miejscowe powodowane skafandrem i sprzętem	Wystąpienie skórnych objawów DCS	4	Zaburzenia homeostazy	4	16 Średnie	Niepełna detekcja	9	144	Kontrola przed nurkowaniem	4	3	7	12 Średnie	84 Małe
Wymuszona pozycja pracy lub podczas dekompresji	Wystąpienie objawów DCS	5	Zaburzenia homeostazy oraz psychiki	4	20 Średnie	Możliwa średnia detekcja	8	160	Unikanie z planem awaryjnym	5	4	8	20 Średnie	160 za duże RPN
Dieta	Obciążenia dekompresyjne	4	Zaburzenia procesów dekompresyjnych	3	12 Średnie	Możliwa średnia detekcja	7	84	Unikanie poprzez treningi, wywiady i przeglądy medyczne	4	2	6	8 Małe	48 Małe
Zażywanie leków	Obciążenia dekompresyjne	4	Zaburzenia procesów dekompresyjnych	5	20 Średnie	Możliwa średnia detekcja	6	120	Unikanie poprzez prowadzenie wywiadu	4	4	5	16 Średnie	80 Małe
Dehydratacja/ hydratacja	Obciążenia dekompresyjne	7	Zaburzenia procesów dekompresyjnych	5	35 Średnie	Możliwa pełna detekcja	6	210	Zachęcanie do hydratacji podczas lub po dekompresji	7	3	6	21 Średnie	126 za duże RPN

Prioryteryzacja ryzyka PR	
1-10	Małe
11-50	Średnie
51-80	Wysokie
81-100	Ekstremalnie

Intensywność stwarzanego zagrożenia <i>I</i>	Prawdopodobieństwo wystąpienia <i>P</i>	Prawdopodobieństwo detekcji <i>D</i>
1: Prawie nieodczuwalne	1: Nieprawdopodobne	1: idealna detekcja $D_{95} \approx 100\%$
2-3: Niewielkie obciążenie	2-3: Bardzo mało prawdopodobne	2-5: pełna detekcja ($100\% > D_{95} \geq 99,7\%$)
4-6: Umiarkowane oddziaływanie	4-6: Małe prawdopodobieństwo	6-8: możliwa średnia detekcja ($99,7\% > D_{95} \geq 98\%$)
7-8: Duże oddziaływanie	7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo	9: niepełna detekcja ($98\% > D_{95} \geq 90\%$)
9-10: Bardzo duże oddziaływanie	9-10: Wysokie prawdopodobieństwo	10: brak detekcji $D_{95} \approx 0\%$

RPN (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka RPN > 100



Niebezpieczne przegrzanie nurka może nastąpić także zarówno pod wodą jak i na powierzchni. Często narażeni na przegrzanie są nurkowie awaryjni wyczekujący na powierzchni do ewentualnego podjęcia akcji ratowniczej. Nurkowie ci muszą być przygotowani do szybkiego zejścia pod wodę, więc są częściowo ubrani w sprzęt nurkowy. Wystawienie ich na bezpośrednie działanie słońca może doprowadzić nie tylko do ich przegrzania, lecz także do ich zasłabnięcia. Pod wodą nurkowie nie zawsze mogą się częściowo rozebrać jak na powierzchni, więc zabranie ze sobą nadmiarowego zabezpieczenia przed zimnem może spowodować późniejsze przegrzanie¹⁹.

Intensywność oddziaływania ryzyka przemarznięcia przegrzania na bezpieczeństwo dekompresji po materializacji ryzyka oszacowano na nieco niższym poziomie niż poprzednio $I = 7$, podobnie prawdopodobieństwo zmaterializowania tego ryzyka $P = 4$. Detekcję jednak oszacowano na nieco gorszą $D = 7$. Wartość względnej liczby priorytetu ryzyka wyniosła $PR = 28$, co oznacza średnie ryzyko R , jednak wartość względnej liczby ryzyka RPN przekracza ok. 2 razy jej wartość krytyczną i wynosi $RPN = 196$.

Zalecane przeciwdziałanie materializacji ryzyka polega na odpowiednim zabezpieczeniu procesu przygotowania do nurkowania, nurkowania i odpoczynku po nurkowaniu. Reakcją na zdiagnozowane ryzyko jest zatem jego unikanie oraz przygotowanie planu awaryjnego, który jest taki sam jak przy materializacji ryzyka konieczności wykonywania ciężkiej pracy.

Zalanie skafandra zostało tutaj wydzielone z poprzedniego ryzyka zmarznięcia nurka ze względu na większe prawdopodobieństwo materializacji tego ryzyka $P = 5$, przy większym prawdopodobieństwie detekcji materializacji ryzyka zmarznięcia nurka $D = 3$. Przeciwdziałanie materializacji ryzyka polega na jego unikaniu poprzez planowe przeglądy skafandra i wymianę uszczelnień szyjnych oraz nadgarstkowych także na wniosek nurka. Kierownik nurkowania podczas przeglądu przygotowania nurka do zanurzenia powinien zwracać uwagę na szczelność skafandra. Pozwoli to na obniżenie szacowanego prawdopodobieństwa materializacji ryzyka do $P = 4$, co spowoduje obniżenie wartości względnej liczby ryzyka poniżej wartości krytycznej $RPN = 84$.

Należy wystrzegać się nurkowań sukcesywnych, zwłaszcza bez ukończenia dekompresji powierzchniowej. Od poprzedniego nurkowania powinien upłynąć wymagany czas. Najczęściej przyjmuje się, że wpływ poprzedniego nurkowania zanika po 12 *godz.* Jednak przy intensywnym nurkowaniu, przykładowo codziennie, może kumulować się zmęczenie. Zmęczenie może powodować efekty podobne jak w przypadku wykonywania ciężkiej pracy, jednak intensywność oddziaływania może być nieco mniejsza a prawdopodobieństwo materializacji tego ryzyka jest ocenione także jako nieznacznie mniejsze niż w przypadku wykonywania ciężkiej pracy. Pomimo tego, że wartość względnej liczby ryzyka plasuje priorytet tego ryzyka jako średni to przy idealnej detekcji otrzymana wartość względnej liczby ryzyka $RPN = 28$ jest ponad trzykrotnie mniejsza niż wartość krytyczna. Zastosowana reakcja na ryzyko polega więc na aprobowaniu z planem awaryjnym. Plan awaryjny jest identyczny z wcześniej opisanym.

Niewytrenowanie lub osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową *DCS* stanowią duże oddziaływanie w przypadku materializacji ryzyka szacowane na poziomie $I = 7$, choć materializacja tego ryzyka szacowana jest jako mała $P = 5$. Oszacowanie zakłada świadomość nurków zawodowych co do tego rodzaju ryzyka i brak chęci podjęcia ryzyka nurkowania bez treningu, a jeśli taka konieczność istnieje to założenie od razu zwiększonego poziomu *konserwatywności* dla procedury dekompresyjnej. Podobnie detekcja na poziomie $D = 4$ pokłada nadzieję w zdrowym rozsądku nurkujących. Jednak w tym przypadku wartość względnej liczby ryzyka przekracza wartość krytyczną o 40%.

Przy świadomym dbaniu o kondycję poprzez treningi ciśnieniowe i towarzyszące oraz stosowanie zwiększonego poziomu *konserwatywności* dla procedur dekompresji nurków z obciążeniami, można wartość względnej liczby ryzyka RPN sprowadzić do minimalnego poziomu: $RPN = 14$.

Otyłość jest uważana jako czynnik obciążający dla wielu rodzajów nurkowań ze względu na małe ukrwienie tkanki tłuszczowej a stosunkowo duży potencjał do absorbowania azotu. Wynika z tego, że po dotarciu azotu do tej tkanki ulega on redystrybucji poprzez błony komórkowe, jednak podczas jego ewakuacji istnieje problem z jego odzyskaniem ze względu na małą perfuzję przez krew tej tkanki.

Silna budowa ciała związana ze zawieszoną masą prowadzi do zwiększonej konsumpcji tlenu. Aparaty nurkowe o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego są projektowane na pewne zakresy konsumpcji tlenu. Jeśli wartość ta jest zawyżona w stosunku do projektu nurek będzie oddychał zubożonym w tlen czynnikiem oddechowym w stosunku do przyjmowanego przy projektowaniu adekwatnej dekompresji. Choć wartość względnej liczby priorytetu ryzyka PR jest podobna jak dla poprzednio omawianych rodzajów ryzyka, to przy pełnej detekcji tego ryzyka, wartość względnej liczby ryzyka RPN jest ponad trzykrotnie mniejsza niż jej wartość krytyczna. Zatem reakcja na to ryzyko polega na jego aprobowaniu, lecz z planem awaryjnym analogicznym do poprzednio omawianego.

Podobnie jak z otyłością przedstawia się sprawa z wiekiem nurka. Reakcja na to ryzyko polega na jego aprobowaniu, lecz z planem awaryjnym analogicznym jak poprzednio.

Zwiększone opory oddechowe mogą być niezauważalne początkowo dla nurka, lecz powodować narastające zmęczenie związane z ich pokonywaniem podczas procesu nurkowania. Kumulatywne zmęczenie może wpłynąć na spływanie oddechu zakłócając wymianę gazową i w konsekwencji prowadzić do problemów dekompresyjnych. Zwiększenie się gęstości czynnika oddechowego wraz z głębokością powoduje niewątpliwie wzrost oporów oddechowych. Aparat *SCR CRABE SCUBA* nie posiada mechanizmów wspomagania, które w tym przypadku mogłyby łagodzić skutki wzrostu oporów oddechowych. Dlatego należy pamiętać, że dodatkowe obciążanie nurka pracą na głębokościach gdzie dochodzi do wzrostu oporów oddechowych może być dla niego niebezpieczne z punktu widzenia dekompresji.

Zwiększenie oporów oddechowych może być powodowane także przez opory pochłaniacza, choć w aparacie *SCR CRABE SCUBA* ten mechanizm indukowania się oporów oddechowych ma mniejsze znaczenie niż dla innych *SCR*.

Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka zwiększenia oporów oddechowych jest duża i szacowana tutaj na poziomie $I = 7$. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka w warunkach stosowania procedur wojskowych jest małe i szacowane tutaj na poziomie $P = 4$. Taki poziom szacowania intensywności oddziaływania po materializacji ryzyka oraz prawdopodobieństwa materializacji tego ryzyka daje średnią wartość względnej liczby priorytetu ryzyka $PR = 28$. Detekcja

oporów oddechowych w warunkach polowych jest utrudniona, dlatego oszacowano ją tutaj na poziomie średnim $D = 6$, co daje zwiększoną o prawie 70% wartość względnej liczby ryzyka $RPN = 168$ w stosunku do wartości krytycznej tej liczby.

Reakcja na możliwość materializacji ryzyka zwiększenia się oporów oddechowych polega na zabezpieczeniu podobnym do poprzednio opisanych, lecz jest wzbogacona o możliwie częste sprawdzanie oporów oddechowych w warunkach laboratoryjnych. Aparat podejrzany o stawianie zwiększonych oporów oddechowych powinien być oddany do dodatkowego sprawdzenia poza obowiązkowymi przeglądami. Standardowo *SCR CRABE SCUBA* nie jest wyposażony przez producenta w urządzenia do eksploatacyjnego sprawdzania oporów oddechowych, lecz zaprojektowanie i wykonanie takiego przyrządu nie przedstawia problemów, gdyż takie przyrządy były na wyposażeniu polskich *SCR*. Takie postępowanie pozwala zwiększyć prawdopodobieństwo detekcji materializacji ryzyka do wartości szacowanej tutaj na pełną na poziomie $D = 3$, co pozwala obniżyć wartość względnej liczby ryzyka do aprobowanego poziomu $RPN = 84$.

Powrót ze środowiska wodnego nie musi stanowić powrotu do ciśnienia atmosferycznego panującego na poziomie morza. W saturacji nurek po wykonaniu wycieczki do środowiska wodnego wraca do ciśnienia panującego na głębokości posadowienia dzwonu a później do plateau saturacji²⁰. Po nurkowaniach prowadzonych w głębokich jaskiniach²¹ lub wysokogórskich jeziorach²² nurek powraca do ciśnienia panującego na granicy akwenu.

Jeśli po nurkowaniu planowany jest transport lotniczy, to wpływ ciśnienia panującego na pokładzie statku powietrznego ma niebagatelny wpływ na bezpieczeństwo dekompresji. Dekompresja policzona dla ciśnienia końcowego panującego na poziomie morza musi być w takim przypadku akcelerowana lub wydłużana [6]. Intensywność oddziaływania po materializacji tego ryzyka została oceniona na dużą $I = 7$, porównywalną z regularnym przypadkiem choroby dekompresyjnej typu *bends*²³, a prawdopodobieństwo na poziomie umiarkowanym $P = 7$. Ponieważ występuje możliwość pełnej detekcji $D = 5$, to produktem jest wartość względnej liczby ryzyka na poziomie $RPN = 245$, stanowiącej dwu i pół krotne przekroczenie wartości krytycznej $RPN_{kr} = 100$.

Jednym z proponowanych zastosowań przeciwdziałania materializacji tego ryzyka jest inhalacja tlenem normobarycznym lub płukanie tlenem w warunkach hiperbarycznych. Powoduje to obniżenie prawdopodobieństwa materializacji ryzyka do względnego poziomu $P = 4$, odpowiadającego małemu prawdopodobieństwu. Obniża to wartość względnej liczby ryzyka do poziomu $RPN = 140$, który jednak nadal przekracza o 40% wartość krytyczną.

Najczęściej uciski miejscowe mogą powodować lokalne utrudnienia w cyrkulacji krwi prowadzące do lokalnego skórno *bends*. Jednak znane są przypadki poważniejszych problemów. Obecnie większość nurków korzysta ze skafandrów typu suchego z regulowaną pływalnością. Niedostateczna kompensacja panującego w nich ciśnienia może prowadzić do lokalnego skórno *bends*, jednak może powodować także do spłytenia oddechu, czasami wręcz ignorowanego początkowo przez nurka. Jednak kumulacyjne zmęczenie powodowane przez pokonywanie oporów oddechowych powodowanych przez skafander z pewnością ujawni się po kilku minutach. Niekiedy stosowanie wielu czynników zabezpieczających, zabieranych dodatkowo przez nurka powoduje brak równomiernego rozprowadzenia gazu w skafandrze²⁴ powodując więcej kłopotów niż spodziewanych korzyści. Ucisk skafandra można porównać do taktyki węży dusicieli, które zwiększając stopniowo ucisk pozbawiają ofiary życia poprzez zatrzymanie u nich wymiany gazowej.

Podczas nurkowań najczęściej spotyka się lekkie objawy powodowane przez ucisk skafandra, jak: nieuzasadnione nadmierne wyczerpanie, bóle głowy czy ogólne złe samopoczucie. Choć doniesienia o zaistniałych wypadkach nurkowych sugerują, że może dojść do omdleń pod wodą.

Przyjęto tutaj, że przypadki drastyczne będą wykluczone przez dużą świadomość nurków zawodowych, stąd intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka przyjęto na poziomie umiarkowanym $I = 4$ a prawdopodobieństwo materializacji na poziomie małym $P = 4$. Detekcję ryzyka przyjęto pierwotnie na poziomie niepełnym $D = 9$, aby przez dotarcie do świadomości kierownika nurkowania, konieczności sprawdzenia przez niego przygotowanego nurka, podnieść ją do poziomu średniego $D = 7$. Powoduje to obniżenie poziomu wartości względnej liczby ryzyka z $RPN = 144$ do akceptowalnego poziomu $RPN = 84$.

Wymuszona pozycja pracy wiąże się z obciążeniem dla procesu dekompresji poprzez zmianę parametrów pracy sprzętu nurkowego, w tym przede wszystkim aparatu nurkowego. Z doświadczeń francuskich wynika, że użycie *Nx - SCR CRABE SCUBA* do operacji minerskich *MCM* na wodach płytkich *VSW* może prowadzić do występowania obrzęku płuc, któremu towarzyszy wystąpienie duszności podczas nurkowania a w późniejszym czasie może prowadzić do pojawienia się płynu w płucach czy nawet zgonu. Wiąże się to z efektem oddziaływania negatywnego ciśnienia w przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego, towarzyszącego wydatkowaniu znacznego wysiłku i ekspozycji na zimno [12,13]. Może sprzyjać temu także nadmierna hydratacja [14,15].

Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka przyjęto na poziomie umiarkowanym $I = 5$, choć zdiagnozowano przypadek śmiertelny, wychodząc z założenia, że zaszła kumulacja niekorzystnych zdarzeń. Prawdopodobieństwo zmaterializowania się ryzyka jest małe i oszacowano je tutaj na poziomie $P = 4$. Detekcja leży na granicy niepełnej i średniej $D = 8$. Takie szacunki powodują, że wartość względnej liczby ryzyka jest o 60% większa od krytycznej $RPN = 160$. Reakcją na to ryzyko powinny być zmiany konstrukcyjne aparatu zmniejszające możliwość wystąpienia podciśnienia w przestrzeni oddechowej. Przy braku współpracy w tym zakresie należy zachować ostrożność przy planowaniu operacji nurkowych i przygotować się na ewentualne problemy.

Dieta jest często pomijanym ryzykiem powodującym obciążenia dekompresyjne. Takie postępowanie nie jest rozsądne, choć szacowane tutaj parametry związane z materializacją tego ryzyka określają wartość względnej liczby ryzyka na poziomie akceptowalnym $RPN = 84$.

Dieta może mieć niekorzystne działanie długofalowe, jak w przypadku nadmiernego rozrostu u nurka tkanki tłuszczowej. Może mieć jednak także działanie bezpośrednie przy zażywaniu suplementów diety, potraw powodujących wzdęcia, zakwaszaniu krwi poprzez nieodpowiednie płyny i potrawy itp. Kombinacja kilku czynników ryzyka współistniejących z ryzykiem stosowania nieodpowiedniej diety może prowadzić do przełamania mechanizmu kompensacji negatywnych czynników, założonego w procedurze dekompresyjnej, co spowoduje wystąpienie objawów choroby dekompresyjnej *DCS*. Prowadzenie okresowych kontroli medycznej, wywiadu toksykologicznego przed nurkowaniem, stałe budowanie formy fizycznej itp., przyczynia się do obniżenia prawdopodobieństwa materializacji tego ryzyka oraz

zwiększenia prawdopodobieństwo jego detekcji. Pozwala to na dalsze obniżenie względnej liczby ryzyka do poziomu $RPN = 48$.

Zażywanie niektórych leków powinno eliminować nurka z planowanego nurkowania. Wspomniane zażywanie suplementów diety może być tak samo obciążające jak zażywanie leków. Czasami wydaje się, że suplementy czy leki pochodzenia roślinnego nie powodują znacznych zmian ustrojowych. To przekonanie może być zgubne. Cechą syntetycznych środków leczniczych jest fakt, że posiadają znaną, standaryzowaną dawkę środka czynnego, gdy leki czy suplementy diety pochodzenia roślinnego mogą charakteryzować się przybliżoną dawką środka czynnego. Jednak zawarte w roślinach czynniki często są niezwykle aktywne, przykładowo toksyny roślinne. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka w porównaniu z dietą jest większe, szacowane tutaj na poziomie mało prawdopodobnym $P = 5$. Przy zażywaniu środków leczniczych należy podejrzewać ich koincydencję z procedurą dekompresyjną, stąd prawdopodobieństwo detekcji jest na granicy pełnej i średniej detekcji $D = 6$. Prowadzenie wywiadu przed nurkowaniem ukierunkowanego na zażywane leki i ich suplementy obniży częściowo prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oraz podniesie nieznacznie detekcję, obniżając względną liczbę ryzyka do akceptowalnego poziomu $RPN = 80$.

Nadmierna hydratacja powoduje diurezę, która jest uciążliwa podczas nurkowania, gdyż nie zawsze jest wtedy możliwe oddanie moczu. Uważa się, że nadmierna hydratacja jest jednym z czynników ułatwiających rozwinięcie się obrzęku płuc²⁵. Dehydratacja zaś obciąża serce²⁶ oraz obniża efektywność dekompresji²⁷. Stąd podczas dekompresji prowadzonej w habitacie zachęca się nurków do spożywania wody zaś przed nurkowaniem odradza się im nadmiernej hydratacji.

Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka nadmiernej hydratacji czy dehydratacji jest duża i szacowana tutaj na poziomie $I = 7$ w dziesięciostopniowej skali. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oszacowano jako małe $P = 5$, biorąc pod uwagę świadomość nurka w tym zakresie. Możliwa jest średnia detekcja $D = 6$ polegająca na obserwacji koloru uryny²⁸. Stosowanie odpowiedniego balansu hydratacyjnego może obniżyć prawdopodobieństwo zmaterializowania się ryzyka do wartości bardzo mało prawdopodobnej $P = 3$, co spowoduje zmniejszenie się względnej liczby ryzyka RPN od wartości $RPN = 210$ do $RPN = 126$, która to wartość jest nieznacznie większa od wartości krytycznej $RPN_{kr} = 100$.

PODSUMOWANIE

Brak starań w zakresie zachowania zdolności do bezpiecznego przechodzenia dekompresji może czynić opracowane rozkłady dekompresji w dużej mierze nieadekwatne. Nieadekwatność ta wiąże się ze zwiększeniem zagrożenia chorobą dekompresyjną powyżej granicy 5% przyjmowanych dla operacji nurkowych w warunkach wojska.

Obniżenie hierarchii jakiegoś rodzaju *ryzyka* do akceptowanego poziomu, na skutek przyjętych reakcji na *ryzyko*, nie powinno powodować braku monitorowania tego rodzaju *ryzyka* a jedynie ustawienie odpowiedniej hierarchii przeglądu możliwych rodzajów diagnozowanego *ryzyka*. Należy zawsze brać pod uwagę koincydencję różnych rodzajów *ryzyka* i ich możliwe kumulacyjne działanie zakłócające proces dekompresji. Przyjęty przy opracowywaniu procesu dekompresji bufor w postaci zwiększonego poziomu *konserwatywności* może być przełamany nie tylko przez pojedynczy rodzaj *ryzyka*, lecz kumulacyjne działanie kilku jego rodzajów. Dobrą praktyką jest prowadzenie pogłębionej analizy *ryzyka* wynikające z przyjęcia kombinacji poszczególnych jego rodzajów dla konkretnej operacji nurkowej. Przy pewnej wprawie niekonieczne jest klasyfikowanie i opisywanie poszczególnych rodzajów *ryzyka*, które mogą zaistnieć podczas nurkowania, lecz jedynie sposoby reakcji na zdiagnozowane rodzaje *ryzyka*. Jednak korzystanie z tabel *FMEA*.

Przeprowadzona analiza skupiała się jedynie na zdiagnozowanych najważniejszych grupach możliwych zakłóceń procesu dekompresji. W oparciu o analizę *ryzyka* starano się wzbogacić system dekompresji o takie plany rezerwowe, które można wykorzystać na wypadek wzrostu inherentnego *ryzyka* wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej *DCS* oraz niektórych innych chorób nurkowych *DCI*²⁹. Nie wszystkie procedury reagowania na rozpoznane *ryzyka* były możliwe do sprawdzenia i walidowania w ramach jednego projektu, dlatego pozostają one jako wskazania kierunków przy kontynuacji badań.

LITERATURA

1. Kłos R. 2020. Selected risks of the decompression proces Part I: Selected inherent residual risks in the decompression proces. Polish Hyperbaric Research. 2020, Tom to be published;
2. — 2007. Mathematical modelling of the normobaric and hyperbaric facilities ventilation. Gdynia : Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-0-2;
3. —. 2013. Diagnozowanie ryzyka na przykładzie wyższej uczelni technicznej. Logistyka. listopad-grudzień, 2013, 6, strony CD1: 275-294;
4. —. 2011. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0;
5. —. 2016. System trymiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5;
6. Wienke B.R. 1993. Diving above sea level. Flagstaff : Best Publishing Co., 1993. ISBN 0-941332-30-6;
7. Kłos R., 2007. Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Nurkowej Gdynia 2007, 2007. ISBN 978-83-924989-2-6;
8. — 2021. Ventilation of Normobaric and Hyperbaric Objects. Boca Raton, FL; USA : CRC Press (Taylor & Francis Group, LLC), 2021. ISBN: 978-0-367-67523-3 (hbk) ISBN: 978-0-367-67524-0 (pbk) ISBN: 978-1-003-13164-9 (ebk);
9. North Atlantic Treaty Organization: Allied diving publication. September 2019. Allied guide to diving operations. Edition C Version 3 . Brussels : NATO Standardization Office, September 2019. NATO standard ADivP-01;
10. PN-EN 60812:2009. 2009. Techniki analizy nieuszkodzalności systemów Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA). Warszawa : Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. ICS 03.120.01; 03.120.30; 21.020;
11. Carlson C.S. 2012 . Effective FMEAs Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis . Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2012 . ISBN 978-1-118-00743-3;
12. Kłos R., 2020. Selected risks of the decompression proces Part I: Selected inherent residual risks in the decompression proces. Polish Hyperbaric Research. 2020, Tom to be published;
13. Castagna O, de Maistre S, Schmid B, Caudal D, Regnard J. 2018. Immersion pulmonary oedema in a healthy diver not exposed to cold or strenuous exercise. Diving and Hyperbaric Medicine. March 2018, Tom 48, strony 40-44.;
14. Cole B. 1993. Decompression and computer assisted diving. Biggin Hill : Dive Information Company, 1993. ISBN 0-9520934-0-5;

15. —. 2018. Immersion pulmonary oedema (IPO/IPE). International Diving Schools Association. 2018, 31, strony 12-13;

dr hab. inż. Ryszard Kłos prof. AMW
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
r.klos@amw.dynia.pl

Numer ORCID: 0000-0002-4050-3978

¹ *Risk,*

² *Hazard,*

³ np. na ubezpieczyciela,

⁴ np. z pracodawcą,

⁵ substytucja,

⁶ najczęściej nowa szansa może wygenerować nowe zagrożenia a każde nowe zagrożenie może być związane z nową szansą,

⁷ najczęściej na stacji $6 \text{ mH}_2\text{O}$,

⁸ *Equivalent Air Depth,*

⁹ nadmiarowość w stosunku do tego, co konieczne lub zwykłe; tutaj określenie odnosi się do nadmiaru pożądanego zabezpieczenia na wypadek uszkodzenia części systemu,

¹⁰ w takim przypadku, dobrą praktyką jest policzenie, czy wykorzystanie tlenu na powierzchni nie zwiększa zagrożenia toksycznością tlenową,

¹¹ z pominięciem prawdopodobieństwa detekcji – takie podejście jest zgodne z proponowanym w *NATO* [9],

¹² *Failure Model and Effect Analysis* [10,11],

¹³ zadania związane z szacowaniem bezpiecznej dekompresji oraz problemy toksykologiczne stanowią podstawę przy pracach nad każdym nowym systemem dekompresji,

¹⁴ działania minerskie prowadzone czasami przy bezpośredniej bliskości przeciwnika dysponującego technicznym uzbrojeniem do detekcji i zwalczania nurków,

¹⁵ proponowaną przez producenta i pierwszego użytkownika,

¹⁶ *External Breathing System,*

¹⁷ nurek zabezpieczający pozostaje przez cały czas przy głowicy linii opustowej i wysła jedynie na linie sygnałowej nurka roboczego do pracy w pobliżu obiektu mino-podobnego,

¹⁸ odpoczynek może trwać nawet powyżej jednego dnia,

¹⁹ można zapobiegać takiemu scenariuszowi dobierając odpowiedni sprzęt i wyposażenie nurkowe; przykładowo przy nurkowaniach dystansowych można ubierać pianki, które można częściowo rozpinąć i klarować pod wodą, umożliwiając wodzie dodatkową penetrację ciała nurka,

²⁰ najczęściej głębokość posadowienia dzwonu jest równoważna głębokości plateau saturacji,

²¹ zmiany ciśnienia atmosferycznego wraz ze wzrostem głębokości jaskiń czy wyrobisk nie mają tak dużego znaczenia jak np. wpływ temperatury pierwotnej skał, lecz zdarza się, że nurkowanie kończy się w odcieym od atmosfery syfonie gdzie ciśnienie może być wyższe od ciśnienia atmosferycznego panującego na tej głębokości, lub może ulegać dość szybkim zmianom, jak w jaskiniach w pobliżu morza, gdzie jego falowanie lub fala przybojowa ma istotny wpływ na ciśnienie panujące w jaskini,

²² ciśnienie atmosferyczne wraz z wysokością maleje i od pewnej wartości stanowi ważny parametr wpływający na bezpieczeństwo dekompresyjny,

²² atmospheric pressure decreases with height and from a certain value it is an important parameter affecting decompression safety,

²³ jedynie bóle mięśniowe i stawowe bez rozwinięcia się postaci neurologicznej – jedynie objawy *DCS I* –rodzaju,

²⁴ przykładowo, niejednokrotnie nurkowie wykorzystujący skafandry z regulowaną pływalnością zabierają dodatkowo kompensatory pływalności, które muszą być ściśle montowane na skafandrze,

²⁵ oddziałujące na nurka ciśnienie wyciska płyny ustrojowe z obwodu kierując je do narządów wewnętrznych, także do płuc, gdzie mogą przechodzić osmotycznie do światła pęcherzyków płucnych,

²⁶ krążąca krew jest gęstsza,

²⁷ znaczna część wymiany gazowej przebiega w fazie rozpuszczonej, stąd jej niedomiar powoduje utrudnienia transportu gazów podczas dekompresji,

²⁸ najlepiej jeśli uryna ma zabarwienie lekko słomkowe,

²⁹ Przykładowo, obrzęku płuc.

