Zrozumieć Wartości-M

By Erik C. Baker, P.E.

Wersja polska Tomasz Żabierek, Izabela Kapuściarek
Hogarthian Divers, lipiec 2005

Pojęcie nasycenia gazem hipotetycznych „tkanek" odniesienia oraz Wartości-M (*M-values*) stanowią podstawowe elementy modelu dekompresyjnego gazu rozpuszczonego, inaczej nazywanego "haldanowskim". Wykorzystując go w szeroko dostępnych programach komputerowych, nurkowie techniczni zawierzają mu bezpieczeństwo swoich profili dekompresyjnych. Właściwe zrozumienie Wartości-M może pomóc w ustaleniu odpowiedniego dla konkretnego nurkowania poziomu konserwatyzmu oraz w ocenie trafności rozmaitych profili dekompresyjnych.

Czym są Wartości-M? Pojęcie "Wartość-M" wprowadzone zostało przez Roberta D. Workmana w połowie lat 60-tych, kiedy prowadził on badania nad dekompresją dla U.S. Navy Experimental Diving Unit (NEDU). Workman był lekarzem w stopniu kapitana w Medical Corps U.S. Navy.

Litera "M" oznacza "Maksimum". Dla danego ciśnienia zewnętrznego, Wartość-M odpowiada maksymalnej wartości absolutnego ciśnienia gazu obojętnego wewnątrz, które hipotetyczna „tkanka" może znieść bez widocznych objawów choroby dekompresyjnej (DCS). Wartości-M reprezentują więc granicę tolerowanego gradientu pomiędzy ciśnieniem gazu obojętnego wewnątrz a ciśnieniem zewnętrznym dla każdej z „tkanek". Innymi określeniami Wartości-M są "granice tolerowanego nadciśnienia" (*limits for tolerated overpressure*), "napięcie krytyczne" (*critical tension*) i "granice przesycenia" (*supersaturation limits*). Termin "Wartość-M" jest powszechnie stosowany przez twórców modeli dekompresyjnych.

RYS HISTORYCZNY

W modelu gazu rozpuszczonego, czyli w modelu haldanowskim, bezpieczny profil dekompresji generowany jest poprzez odniesienie wartości przesycenia każdej z hipotetycznych „tkanek" do kryteriów ograniczających wynurzenie (*ascent limiting criteria*). Od pierwszych lat stosowania modelu, również w jego pierwotnej formie opracowanej w 1908 przez Johna S. Haldane'a, kryteria ograniczające wynurzenie przyjmowały formę współczynników przesycenia (*supersaturation ratios*). Haldane stwierdził, że nurek, którego tkanki zostały nasycone gazem obojętnym podczas oddychania powietrzem na głębokości 10m może wynurzyć się bezpośrednio na powierzchnię (poziom morza) bez narażania się na objawy DCS. Ponieważ ciśnienie otoczenia na głębokości 10m stanowi dwukrotność ciśnienia na poziomie morza, Haldane uznał, że tolerowany współczynnik przesycenia wynosi 2:1 i może on być stosowany jako kryterium ograniczające wynurzenie. Ten przybliżony współczynnik został wykorzystany przez Haldane'a w jego pierwszych tabelach dekompresyjnych. W latach późniejszych, aż do lat 60-tych, twórcy różnych modeli wykorzystywali rozmaite współczynniki dla różnych półokresów poszczególnych „tkanek". Większość tabel dekompresyjnych U.S. Navy stworzona została właśnie w oparciu o metodę współczynników przesycenia.

Powstał jednak problem. Wiele tak wygenerowanych tabel zawodziło przy głębszych i dłuższych nurkowaniach. Robert Workman w systematyczny sposób zrewidował ten model dekompresyjny, wykorzystując w tym celu badania prowadzone uprzednio dla U.S. Navy i doszedł do kilku istotnych wniosków. Po pierwsze zauważył, że oryginalny haldanowski współczynnik 2:1 (dla powietrza) powinien w gruncie rzeczy wynosić 1,58:1, jeśli wziąć pod uwagę ciśnienie parcjalne wyłącznie gazu obojętnego – azotu. (W tym czasie wiadomo już było, że tlen nie odgrywa znaczącej roli w DCS; tylko gazy obojętne, takie jak azot lub hel są odpowiedzialne za chorobę dekompresyjną) W wyniku przeglądu danych eksperymentalnych Workman odkrył, że tkankowe współczynniki tolerowanego przesycenia powinny zmieniać się w zależności od półokresów oraz głębokości. Badania wskazywały, że tkanki szybsze tolerują wyższe wartości przesycenia niż tkanki wolne i że dla wszystkich tkanek tolerowany współczynnik spada wraz ze wzrostem głębokości. Następnie, zamiast używać współczynników, Workman stworzył pojęcie Wartości-M, odpowiadające maksymalnemu tolerowanemu przez każdą z tkanek na odpowiedniej głębokości ciśnieniu parcjalnemu gazów obojętnych. Potem stworzył liniową

estymację Wartości-M jako funkcji głębokości i zauważył, że jest ona zbliżona do rzeczywistych danych eksperymentalnych. Stwierdził, że "liniowa estymacja wartości M jest również przydatna przy tworzeniu programu komputerowego".

WARTOŚCI-M WORKMANA

Przedstawienie przez Workmana Wartości-M w postaci równania funkcji liniowej stanowiło istotny krok w ewolucji dekompresyjnego modelu gazu rozpuszczonego. Jego Wartości-M doprowadziły do wprowadzenia liniowej zależności pomiędzy głębokością (lub ciśnieniem zewnętrznym) a tolerowanym przez każdą z „tkanek" odniesienia ciśnieniem gazu obojętnego. Ta koncepcja stanowi ważny element współczesnego modelu gazu rozpuszczonego, wykorzystywanego przez wielu twórców modeli dekompresyjnych.

Workman wyraził Wartości-M w postaci par współczynników przesunięcie-nachylenie równania funkcji liniowej (patrz rys. 1). Wartość M na powierzchni oznaczana jest symbolem M_O [M-zero] i stanowi punkt przecięcia się wykresu funkcji z osią odciętych przy ciśnieniu zewnętrznym 1 bar (głębokości „0" na poziomie morza). Współczynnik nachylenia funkcji określa się symbolem ΔM [delta M], które odpowiada zmianie wartości M wraz ze zmianą ciśnienia na głębokości.

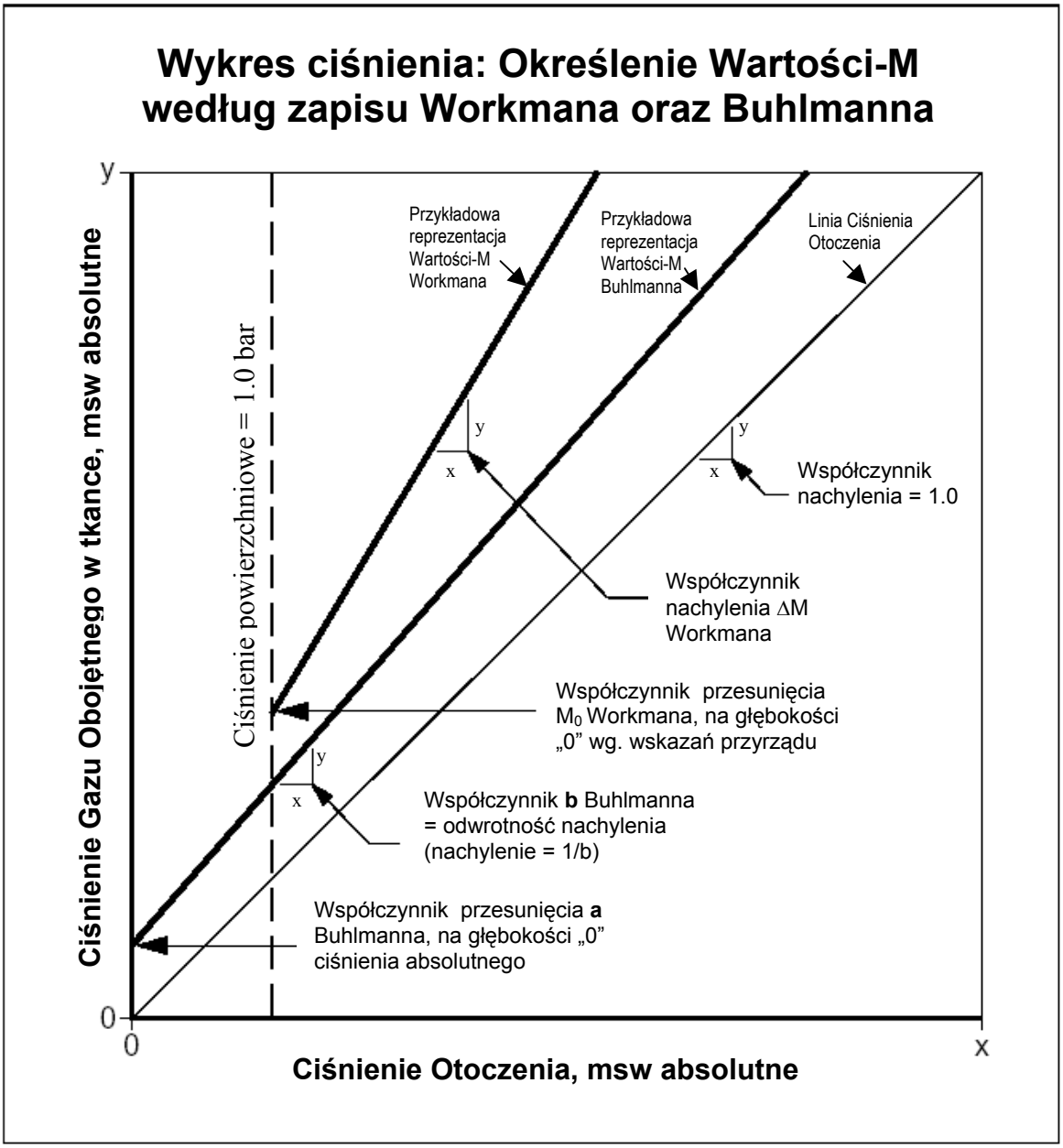
WARTOŚCI-M BÜHLMANNA

W roku 1959 w Laboratorium Fizjologii Hiperbarycznej Szpitala Uniwersyteckiego w szwajcarskim Zurichu badania nad dekompresją rozpoczął profesor Albert A. Bühlmann. W ciągu następnych z górą trzydziestu lat pracy Bühlmann wprowadził szereg istotnych modyfikacji do współczesnego rozumienia dekompresji. W 1983 opublikował pierwsze (niemieckie) wydanie książki "Decompression - Decompression Sickness", która spotkała się z bardzo dobrym przyjęciem. Wersja anglojęzyczna książki ukazała się w 1984 roku. Praca Bühlmanna była pierwszym szeroko dostępnym dla społeczności nurkowej, niemal kompletnym materiałem opisującym problemy i algorytmy wyznaczania dekompresji. W efekcie "algorytm bühlmannowski" stał się podstawą większości komputerów nurkowych i domowej roboty programów komputerowych do liczenia dekompresji. Kolejne wydania książki pojawiły się (w wersji niemieckiej) w latach 1990, 1993 i 1995 pod tytułem "Tauchmedizin", czyli "Medycyna nurkowa". [Angielskie tłumaczenie czwartego wydania (1995) jest w trakcie przygotowań].

Zaproponowana przez Bühlmanna metoda liczenia dekompresji była zasadniczo podobna do tej opisanej przez Workmana. Tu również pojawiają się Wartości-M opisujące liniową zależność pomiędzy ciśnieniem zewnętrznym a tolerowanym ciśnieniem gazu obojętnego w hipotetycznych „tkankach" odniesienia. Podstawowa różnica pomiędzy podejściami wynikała z faktu, że Wartości-M Workmana opierały się na pomiarze głębokości (nurkowanie z poziomu morza), podczas gdy Wartości-M Bühlmanna opierały się na ciśnieniu absolutnym (uwzględniającym wysokość nad poziomem morza). Wynikało to w dość oczywisty sposób z odmiennego kontekstu pracy badaczy – Workman zajmował się nurkowaniami prowadzonymi przez U.S. Navy (odbywającymi się na poziomie morza), podczas gdy Bühlmanna interesowało nurkowanie w wysoko położonych górskich jeziorach Szwajcarii.

Bühlmann opublikował dwa zestawy Wartości-M, które następnie rozpowszechniły się w środowisku nurkowym – zbiór ZH-L12 z wydania książki z roku 1983 roku i ZH-L16 w wydaniu z 1990 roku i późniejszych. "ZH" oznacza tu rodzinne miasto autora – ZüricH, natomiast "L" jest skrótem od "Limit". Liczby 12 i 16 odpowiadają liczbie par współczynników dla równania Wartości-M dla poszczególnych „tkanek" odniesienia dla helu i azotu. Zbiór ZH-L12 liczy dwanaście par współczynników dla szesnastu „tkanek" odniesienia, przy czym te Wartości-M zostały określone empirycznie (tj. w wyniku przeprowadzania rzeczywistej dekompresji). Zbiór ZH-L16A liczy szesnaście par współczynników dla szesnastu „tkanek" odniesienia, a ich wartości zostały wyprowadzone matematycznie z półokresów na podstawie tolerowanej objętości nadmiarowej oraz rozpuszczalności gazów obojętnych. Zbiór ZH-L16A Wartości-M dla azotu został później podzielony na podzbiory B i C, jako że wyprowadzony zestaw A okazał się w rzeczywistości zbyt mało konserwatywny dla średnich przedziałów tkankowych. Zmodyfikowany (nieco bardziej konserwatywny) zestaw B rekomenduje się do wykorzystania przy tworzeniu tabel, natomiast zestaw C – do oprogramowania komputerów nurkowych, liczących dekompresję w czasie rzeczywistym.

Podobnie jak w przypadku Workmana, Wartości-M Bühlmanna wyraża się w formie funkcji liniowej (patrz rys. 1). Współczynnik **a** określa wartość przesunięcia przy zerowym ciśnieniu zewnętrznym (absolutnym), a współczynnik **b** jest odwrotną nachylenia. [Uwaga: zerowy współczynnik **a** nie oznacza, że człowiek może znieść zerowe ciśnienie otoczenia! Jest to wyłącznie matematyczny wymóg równania. Dolna granica zastosowania Wartości-M Bühlmanna jest rzędu 0.5 atm/bar.]



Rysunek 1.

WARTOŚCI-M DCAP i DSAT

Wielu nurków technicznych spotkało się ze zbiorem 11F6 Wartości-M, używanym przez Hamilton Research Decompression Computation and Analysis Program (DCAP). Zbiór ten stworzony został przez Dr Billa Hamiltona i jego współpracowników podczas prac nad nowymi powietrznymi tabelami dekompresyjnymi dla marynarki szwedzkiej. Wartości-M ze zbioru 11F6 sprawdziły się nie tylko w nurkowaniach powietrznych, ale również trimiksowych i stanowią podstawę wielu tabel dekompresyjnych powszechnie używanych przez nurków technicznych.

Nurkowie sportowi znają również Recreational Dive Planner (RDP), rozpowszechniany przez Professional Association of Diving Instructors (PADI). Wartości-M wykorzystane w RDP zostały wygenerowane przez Dr Raymonda E. Rogersa, Dr Michaela R. Powella i ich współpracowników ze stworzonej przez PADI organizacji Diving Science and Technology (DSAT). Wartości-M DSAT-u przetestowano empirycznie w czasie nurkowań analizowanych z wykorzystaniem ultrasonografii dopplerowskiej.

PORÓWNANIE WARTOŚCI-M

Tabele od 1 i 2 prezentują porównanie Wartości-M dla azotu i helu przyjmowane w rozmaitych dekompresyjnych algorytmach haldanowskich,

omawianych w tym artykule. Dla celów porównawczych wszystkie Wartości-M przedstawione są w formacie Workmana. Widać doskonale ewolucję i doskonalenie Wartości-M od Workmana (1965) do Bühlmanna (1990). Zasadniczy trend polega na rosnącym poziomie konserwatyzmu. Stanowi on odzwierciedlenie intensywniejszej walidacji parametrów modelu (doświadczalnego sprawdzania jakości działania) i obejmuje wykorzystanie ultrasonografii dopplerowskiej do monitorowania obecności i ilości "cichych pęcherzyków" (*silent bubbles*), tj. pęcherzyków, których obecność w układzie krążenia jest wykrywalna, ale nie wiąże się z widocznymi objawami choroby dekompresyjnej.

WŁASNOŚCI WARTOŚCI-M

Zbiory Wartości-M można podzielić na dwie kategorie – zbiory bezdekompresyjne i dekompresyjne. Bezdekompresyjne Wartości-M odnoszą się wyłącznie do bezpośredniego wynurzenia na powierzchnię, a przykładem takiego zbioru są wartości z DSAT RDP. Pozbawione przystanków profile zaprojektowane są tak, aby przesycenie żadnej z „tkanek" nie przekroczyło powierzchniowych Wartości-M. Pozwala to na wynurzenie się bezpośrednio na powierzchnię w dowolnym momencie nurkowania. Niektóre algorytmy bezdekompresyjne w swoich wyliczeniach uwzględniają również tempo wynurzenia i zanurzenia.

Zasady matematyczne w Wartościach-M

Równanie Liniowe:	**zapis w formacie y=mx+b**	**zapis w formacie x=(y-b)/m**
zapis Workmana:	$M = \Delta M * Głęb + M_0$	$Tolerowana\ Głębokość = (P - M_0) / \Delta M$
zapis Buhlmanna:	$P_{t.tot}i.g. = (P_{amb} / b) + a$	$P_{otoch.tol} = (P_{t.}i.g - a) * b$

Workman do Buhlmann ⇐	**Konwersja**	⇒ **Buhlmann do Workman**
$a = M_0 - \Delta M * P_{otocz.\ (na\ poziomie\ morza)}$		$M_0 = a + P_{otocz.\ (na\ poziomie\ morza)} / b$
$b = 1 / \Delta M$		$\Delta M = 1 / b$

SPÓJNOŚĆ WARTOŚCI-M

Jednym z wniosków narzucających się po porównaniu Wartości-M stosowanych w różnych algorytmach jest konkluzja, że różnice pomiędzy nimi są stosunkowo niewielkie. Innymi słowy, wartości określone przez niezależnych badaczy z różnych krajów są raczej spójne. To dobry znak, bo oznacza, że nauce udało się dość jednoznacznie wyznaczyć próg dla występowania symptomów choroby dekompresyjnej w populacji ludzkiej.

FORMAT WARTOŚCI-M

Wartości-M są często przedstawiane w postaci równania liniowego, takiego jak zaproponowane przez Workmana lub Bühlmanna. Jest to idealny format dla programowania komputerowego, ponieważ pozwala na liczenie Wartości-M w czasie rzeczywistym, zgodnie z zapotrzebowaniem. Postać liniowa funkcji pozwala również na przedstawianie Wartości-M na wykresie.

Mogą one również być prezentowane w formie macierzy lub tabeli. W takim wypadku uprzednio wyliczone dla każdej „tkanki" odniesienia i dla każdej głębokości przystanku Wartości-M są zorganizowane w rzędach i kolumnach. Taki sposób przedstawienia przydaje się do dokładnego porównania i analizy. Niektóre z wcześniejszych komputerów nurkowych i programów, w procesie obliczeń wykorzystywały tabele do wyszukiwania Wartości-M dla każdego przystanku.

Definicje Workmana:

P = ciśnienie absolutne gazu wewnątrz hipotetycznej „tkanki" odniesienia,

M = tolerowane ciśnienie absolutne gazu wewnątrz hipotetycznej „tkanki" odniesienia,

Głębokość = ciśnienie na głębokości z przyrządu pomiarowego mierzone od poziomu morza,

Tolerowana Głębokość = tolerowana głębokość z przyrządu pomiarowego mierzone od poziomu morza,

$\mathbf{M_0}$ = przesunięcie prostej Wartości-M przy głębokości „0" z przyrządu pomiarowego. Wartość dopuszczalna przesycenia po zakończeniu dekompresji i opuszczaniu wody.

ΔM = współczynnik nachylenia prostej Wartości-M

Definicje Buhlmanna:

$\mathbf{P_{t.tot}i.g}$ = tolerowane ciśnienie absolutne gazu wewnątrz hipotetycznej „tkanki" odniesienia,

$\mathbf{P_{t.}i.g}$ = ciśnienie absolutne gazu wewnątrz hipotetycznej „tkanki" odniesienia,

$\mathbf{P_{otocz.}}$ = ciśnienie otoczenia, absolutne,

$\mathbf{P_{otocz.tol}}$ = tolerowane ciśnienie otoczenia, absolutne,

a = przesunięcie prostej Wartości-M przy absolutnym ciśnieniu zewnętrznym 0 bar,

b = odwrotność współczynnika nachylenia prostej Wartości-M

Tabela 1. Porównanie Wartości-M dla azotu dla różnych Haldanowskich argorytmów dekompresyjnych

Wartości-M Workmana (1965)				Wartości-M Buhlmanna ZH-L12 (1983)				Wartości-M DSAT RDP (1987)			Wartości-M DCAP MF11F6 (1988)				Wartości-M Buhlmanna ZHL-16 (1990)					
Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.	Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.	Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.	Nr. tkanki	HT min.	A M0 msw	B M0 msw	C M0 msw	ΔM wsp.
				1	2.65	34.2	1.2195													
															1	4.0	32.4	32.4	32.4	1.9082
1	5	31.7	1.8					1	5	30.42	1	5	31.90	1.30	1b	5.0	29.6	29.6	29.6	1.7928
2	10	26.8	1.6	2	7.94	27.2	1.2195	2	10	25.37	2	10	24.65	1.05	2	8.0	25.4	25.4	25.4	1.5352
				3	12.2	22.9	1.2121								3	12.5	22.5	22.5	22.5	1.3847
3	20	21.9	1.5	4	18.5	21.0	1.1976	3	20	20.54					4	18.5	20.3	20.3	20.3	1.2780
				5	26.5	19.3	1.1834	4	30	18.34	3	25	19.04	1.08	5	27.0	19.0	19.0	18.5	1.2306
4	40	17.0	1.4	6	37	17.4	1.1628	5	40	17.11					6	38.3	17.8	17.5	16.9	1.1857
				7	53	16.2	1.1494	6	60	15.79	4	55	14.78	1.06	7	54.3	16.8	16.5	15.9	1.1504
5	80	16.4	1.3	8	79	15.8	1.1236	7	80	15.11					8	77.0	15.9	15.7	15.2	1.1223
								8	100	14.69	5	95	13.92	1.04	9	109	15.2	15.2	14.7	1.0999
6	120	15.8	1.2	9	114	15.8	1.1236	9	120	14.41										
7	160	15.5	1.15	10	146	15.3	1.0707	10	160	14.06	6	145	13.66	1.02	10	146	14.6	14.6	14.3	1.0844
8	200	15.5	1.1	11	185	15.3	1.0707	11	200	13.84	7	200	13.53	1.01	11	187	14.2	14.2	14.0	1.0731
9	240	15.2	1.1	12	238	14.4	1.0593	12	240	13.69					12	239	13.9	13.9	13.7	1.0635
				13	304	12.9	1.0395				8	285	13.50	1.0	13	305	13.5	13.4	13.4	1.0552
				14	397	12.9	1.0395	13	360	13.45	9	385	13.50	1.0	14	390	13.2	13.2	13.1	1.0478
				15	503	12.9	1.0395	14	480	13.33	10	520	13.40	1.0	15	498	12.9	12.9	12.9	1.0414
				16	635	12.9	1.0395								16	635	12.7	12.7	12.7	1.0359
											11	670	13.30	1.0						

Nr. tkanki = Numer "tkanki" odniesienia HT- półokres M0 = wartość przesycenia powierzchniowego (na poziomie morza, 1.0 bar) ΔM = współczynnik nachylenia linii Wartości-M

Dekompresyjne Wartości-M charakteryzują się wykorzystaniem parametru nachylenia funkcji liniowej, który określa zmianę Wartości-M w zależności od zmieniającego się ciśnienia zewnętrznego. Wartość parametru zależy od półokresu konkretnej hipotetycznej „tkanki" odniesienia. Generalnie szybsze tkanki mają większy kąt nachylenia, niż tkanki wolne, co wynika z faktu, że tkanki szybkie tolerują wyższe przesycenia. Jeśli współczynnik nachylenia jest większy od 1.0, linia Wartości-M odchyla się w górę i wraz ze wzrostem głębokości rośnie tolerancja przedziału tkankowego na przesycenie. Stały współczynnik równy 1.0 oznacza, że wartość tolerowanego gradientu przesycenia pozostanie niezmieniona niezależnie od głębokości. Współczynnik nachylenia nigdy nie może być mniejszy, niż 1.0, w przeciwnym wypadku linia Wartości-M przecięłaby w którymś momencie linię ciśnienia otoczenia, co odpowiadałoby nieprawdziwej sytuacji, gdy tkanka nie może znieść nawet ciśnienia otoczenia.

LINIA CIŚNIENIA OTOCZENIA

Linia ciśnienia otoczenia jest kluczowym punktem odniesienia dla całego wykresu ciśnień. Linia ta ma współczynnik nachylenia 1.0 i stanowi po prostu zbiór punktów, w których ciśnienie gazu obojętnego wewnątrz „tkanki" jest równe ciśnieniu otoczenia. Jest to o tyle istotne, że w momencie, gdy ciśnienie gazu w tkankach przekroczy linię ciśnienia otoczenia, powstaje gradient przesycenia. Wartość-M odpowiada ustalonej granicy tolerowanego gradientu nadciśnienia ponad linię ciśnienia otoczenia.

STREFA DEKOMPRESJI

Strefa dekompresji (*decompression zone*) jest obszarem wykresu ciśnień ograniczonym z jednej strony przez linię ciśnienie otoczenia, a z drugiej – przez linię Wartości-M (patrz rys. 3). W kontekście modelu gazu rozpuszczonego obszar ten odpowiada funkcjonalnej strefie, w której zachodzi proces dekompresji. W teorii wskazany jest pozytywny gradient ciśnienia, czyli przekroczenie linii ciśnienia otoczenia, by „tkanka" zaczęła się odsycać. W niektórych przypadkach, na przykład przy wysokiej frakcji tlenu w mieszance, „tkanka" może się odsycać, choć całkowite ciśnienie parcjalne gazu obojętnego wewnątrz jest niższe od ciśnienia otoczenia. Efektywny profil dekompresji charakteryzuje się jednak tym, że ciśnienie w „tkance" kontrolującej wynurzenie pozostaje cały czas w strefie dekompresji. Ciśnienie gazu dla różnych „tkanek" może w profilu dekompresyjnym wpadać w lub opuszczać strefę dekompresji, zależnie od tego, która „tkanka" kontroluje wynurzenie w danym momencie. Generalnie tkanki szybkie pierwsze wejdą w strefę dekompresji i będą kontrolować wynurzenie (wartości przesycenia najbardziej zbliżone do Wartości-M), poczym profil dekompresyjny będzie kolejno kontrolowany przez coraz wolniejsze tkanki.

ZŁOŻONE GAZY OBOJĘTNE

Współczesne modele gazu rozpuszczonego odwołują się do pojęcia złożonych gazów obojętnych, przyjmując, że całkowite ciśnienie gazu obojętnego w hipotetycznej „tkance" odniesienia stanowi sumę ciśnień parcjalnych gazów obojętnych obecnych w niej, nawet jeśli każdy z tych gazów charakteryzuje się innym półokresem dla danej tkanki.

Tabela 2. Porównanie Wartości-M dla helu dla różnych Haldanowskich argorytmów dekompresyjnych

Wartości-M Workmana (1965)				Wartości-M Buhlmanna ZH-L12 (1983)				Wartości-M Buhlmanna ZHL-16A (1990)			
Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.	Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.	Nr. tkanki	HT min.	M0 msw	ΔM wsp.
				1	1.0	34.2	1.2195	1	1.51	41.0	2.3557
								1b	1.88	37.2	2.0964
				2	3.0	27.2	1.2195	2	3.02	31.2	1.7400
1	5	26.2	1.5	3	4.6	22.9	1.2121	3	4.72	27.2	1.5321
				4	7.0	21.0	1.1976	4	6.99	24.3	1.3845
2	10	22.5	1.4	5	10	19.3	1.1834	5	10.21	22.4	1.3189
				6	14	17.4	1.1628	6	14.48	20.8	1.2568
3	20	20.1	1.3	7	20	16.2	1.1494	7	20.53	19.4	1.2079
				8	30	15.8	1.1236	8	29.11	18.2	1.1692
4	40	18.3	1.2	9	43	15.8	1.1236	9	41.20	17.4	1.1419
				10	55	15.9	1.0799	10	55.19	16.8	1.1232
5	80	17.0	1.2	11	70	15.9	1.0799	11	70.69	16.4	1.1115
				12	90	15.9	1.0799	12	90.34	16.2	1.1022
6	120	16.4	1.2	13	115	15.9	1.0799	13	115.29	16.1	1.0963
7	160	16.4	1.1	14	150	15.9	1.0799	14	147.42	16.1	1.0904
8	200	16.1	1.0	15	190	15.9	1.0799	15	188.24	16.0	1.0850
9	240	16.1	1.0	16	240	15.9	1.0799	16	240.03	15.9	1.0791

Nr. tkanki = Numer "tkanki" odniesienia HT- półokres ΔM = współczynnik nachylenia linii Wartości-M
M0 = wartość przesycenia powierzchniowego (na poziomie morza, 1.0 bar)

Algorytmy dekompresyjne dla mieszanek gazowych muszą rozwiązać problem obecności różnych gazów w mieszaninie oddechowej, jak na przykład hel i azot w trimiksie. Sposób wykorzystania Wartości-M w tej sytuacji różni się w zależności od algorytmu. Niektóre metody przyjmują jedną Wartość-M dla obu gazów – zwykle jest nią Wartość-M dla azotu. W algorytmie Bühlmanna wylicza się pośrednią Wartość-M, stanowiącą średnią Wartości-M dla azotu i helu, uwzględniającą proporcję tych gazów w przedziale tkankowym. W równaniu liniowym Wartości-M współczynniki **a** (He+N2) i **b** (He+N2) w następujący sposób uwzględniają ciśnienie parcjalne helu (PHe) i azotu (PN2):

a (He+N2) = [**a** (He) x PHe + **a** (N2) x PN2] / [PHe + PN2];

b (He+N2) = [**b** (He) x PHe + **b** (N2) x PN2] / [PHe + PN2].

CO PRZEDSTAWIAJĄ WARTOŚCI-M?

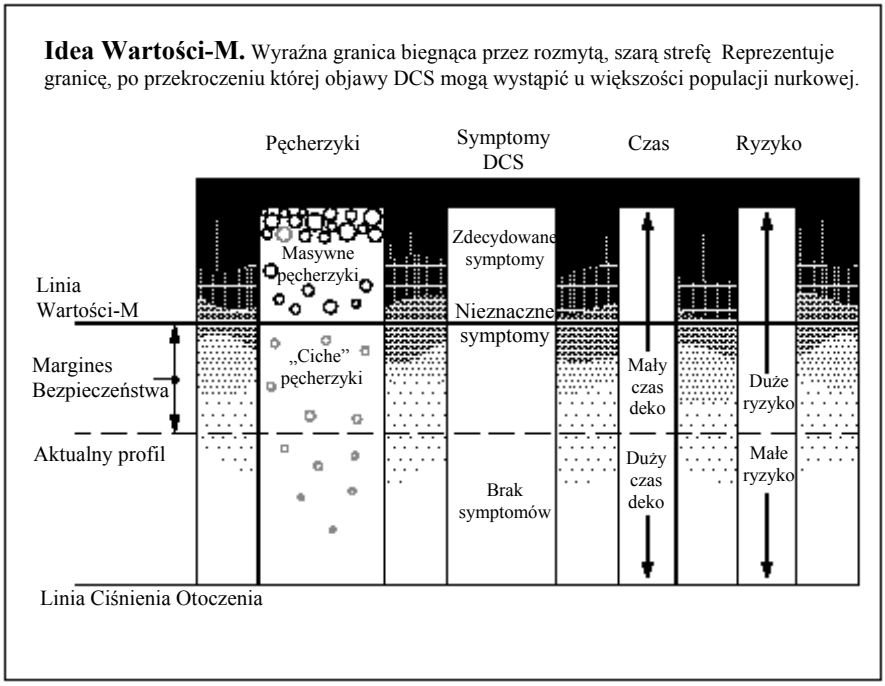
Dość powszechnie funkcjonującym wśród nurków nieporozumieniem jest przekonanie, ze Wartości-M stanowią wyraźną granicę pomiędzy wystąpieniem a niewystąpieniem choroby dekompresyjnej. W efekcie niektórzy nurkują na samej granicy wyznaczonej przez tabele lub komputer nurkowy. Medycyna nurkowa dowodzi jednak, że granice wyznaczone przez Wartości-M okazują się czasem zawodne, w stopniu zależnym od indywidualnych predyspozycji i konkretnej sytuacji. W efekcie trafniejszym określeniem Wartości-M będzie uznanie jej za "wyraźną granicę biegnącą przez rozmytą, szarą strefę" (patrz rys. 2). Powody tego niedookreślenia wiążą się ze złożonością ludzkiej fizjologii, zróżnicowaniem indywidualnym i czynnikami predysponującymi do wystąpienia choroby dekompresyjnej.

Generalnie model gazu rozpuszczonego sprawdził się, a wiedza, stojąca u jego podstawy, wciąż się rozwija. Przykładowo, początkowo przypuszczano, że cały gaz obojętny pozostaje w stanie rozpuszczonym, a jakiekolwiek pęcherzyki oznaczają wystąpienie choroby dekompresyjnej. Obecnie wiemy, że ciche pęcherzyki obecne są nawet podczas nurkowań, które nie wywołują żadnych symptomów. W rzeczywistości w czasie nurkowania mamy do czynienia z kombinacją obu czynników – większość gazu jest rozpuszczona, część natomiast przybiera postać pęcherzyków. Wartość-M odnosi się zatem nie tylko do tolerowanego gradientu przesycenia, ale również do tolerowanej ilości pęcherzyków. Wartości-M są przetestowane doświadczalnie, tj. powstały w wyniku autentycznych nurkowań dekompresyjnych z udziałem ludzi. Testy prowadzone są na stosunkowo małych próbach, w zamierzeniu reprezentujących szeroką populację nurków. Choć dane na temat przybliżonego progu, powyżej którego mogą wystąpić objawy DCS (Wartości-M) są dobre, proces taki nie pozwala na pełną przewidywalność i nie daje absolutnej gwarancji każdemu nurkowi. Wiemy również z doświadczenia, że pewne czynniki zwiększają szansę wystąpienia choroby dekompresyjnej: kiepska kondycja fizyczna, otyłość, zmęczenie, środki odurzające i alkohol, odwodnienie, bardzo zimna woda, niezasklepiony otwór owalny itd. Indywidualna podatność na DCS może również wahać się z dnia na dzień dla jednej i tej samej osoby.

WARTOŚCI-M I KONSERWATYZM

Wartości-M wiążą się z ograniczonymi – o ile w ogóle występującymi – symptomami oraz zmniejszonym ryzykiem. Kryteria te nie muszą być jednak akceptowalne dla wszystkich nurków. Wielu wolałoby utrzymywać swoje profile dekompresyjne w strefie "brak symptomów" i "bardzo niskie ryzyko". Na szczęście twórcy modeli i programów dekompresyjnych doskonale rozumieją, że wyliczenia oparte wyłącznie na Wartościach-M nie mogą stanowić podstawy tabel dekompresyjnych wystarczająco godnych zaufania dla wszystkich nurków i we wszystkich sytuacjach. Dlatego też programy dekompresyjne pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach dodatkowego konserwatyzmu.

Niektóre metody uwzględniają w obliczeniach: wyższą frakcję gazu obojętnego, głębokość większą od faktycznej głębokości nurkowania, dłuższy od faktycznego czas denny lub zwiększenie półokresów w fazie dekompresji. Niektóre programy wykorzystują więcej niż jedną z wymienionych metod. Właściwie zastosowane,



Rysunek 2.

Wartości-M jak i procent Gradientu Wartości-M przydają się w analizie i ocenie profilów dekompresyjnych. Wykorzystanie standardowego zbioru Wartości-M jako punktu odniesienia, pozwala w spójny sposób ocenić różne profile, również te, które wygenerowane zostały na podstawie zupełnie odmiennych programów, algorytmów i modeli dekompresyjnych.

wszystkie te metody okazują się skuteczne. Nurkowie szacują stopień ich skuteczności na podstawie dodatkowego czasu dekompresyjnego i głębokości rozpoczęcia dekompresji oraz poprzez indywidualną ocenę efektów wygenerowanych profili.

ZALEŻNOŚCI WARTOŚCI-M

Podstawowe zależności związane z Wartościami-M i wyliczeniami dekompresji zostały przedstawione na wykresie ciśnień na rys. 3. Obliczenia bazujące na wykorzystaniu określonego procentu Wartości-M wykorzystywane były przez wielu twórców modeli dekompresyjnych na przestrzeni lat. Przykładowo profesor Bühlmann wiele z przeprowadzonych przez siebie prób oceniał na podstawie procentowego wykorzystania Wartości-M i dane te przedstawił w swoich publikacjach.

Procent Gradientu Wartości-M (*Percent M-value Gradient*) określa, jak daleko dany profil dekompresyjny wkroczył w strefę dekompresji. 0%-wy Gradient Wartości-M jest równoznaczny z krzywą ciśnienia otoczenia i stanowi dolną granicę strefy dekompresji. 100% Gradient Wartości-M jest dokładnie prostą Wartości-M i wyznacza górną granicę obszaru.

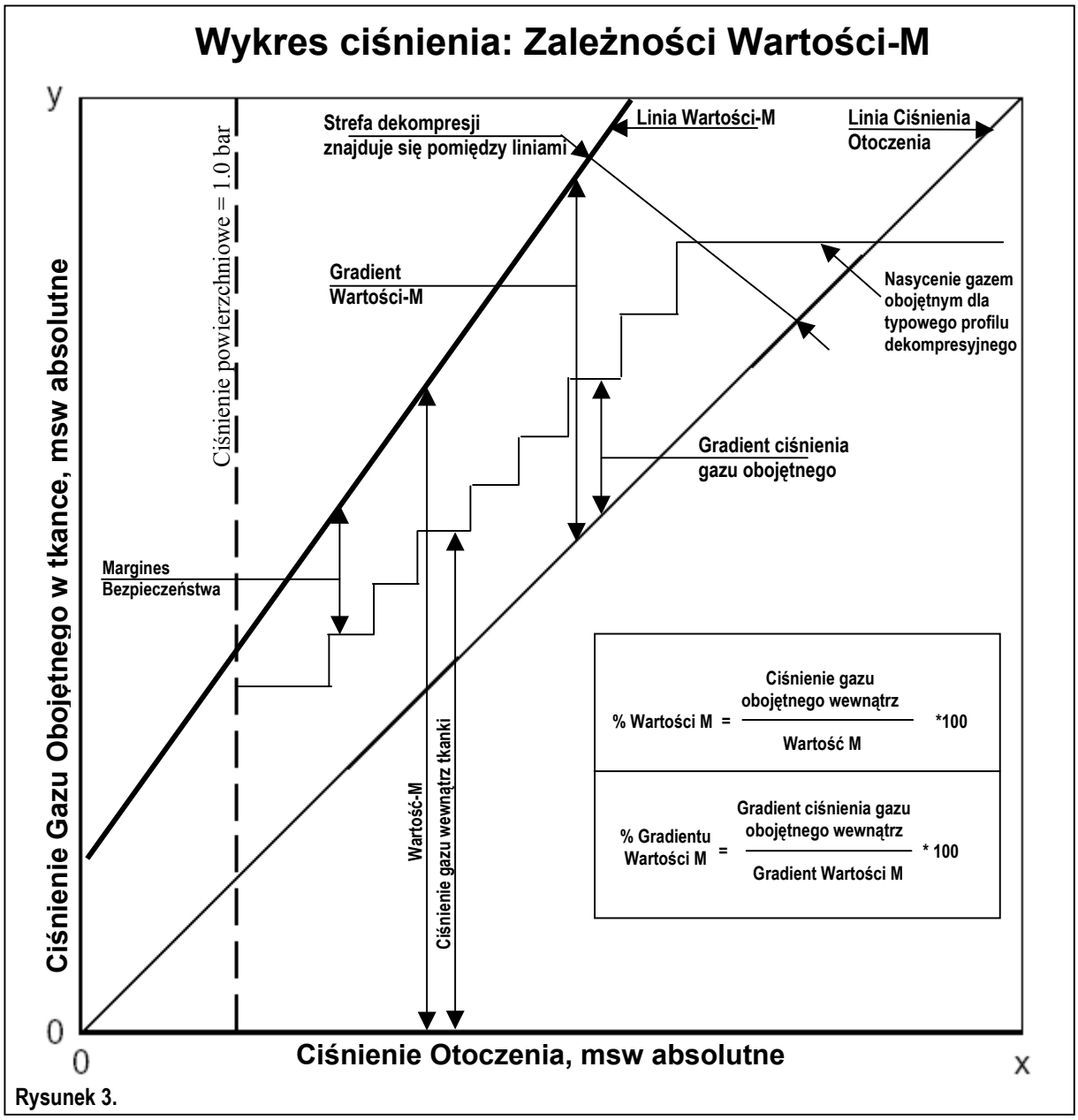
ANALIZA PROFILI

Większość nurków chce wiedzieć dokładnie, jaką rolę odgrywają współczynniki konserwatyzmu (*conservatism factors*) w ich komputerowych programach dekompresyjnych. Większa głębokość i czas trwania dekompresji generowane w wyniku założenia rosnącego konserwatyzmu są oczywiście widoczne, ale warto również mieć dostęp do dokładniejszej informacji. Zarówno procent

UNIWERSALNE WAROŚCI ODNIESIENIA

Większość, o ile nie wszystkie programy dekompresyjne wykorzystywane przez nurków technicznych, odwołuje się do Wartości-M ZH-L16 Bühlmanna. Wartości te powstały i zostały przetestowane w szerokim spektrum ciśnień otoczenia, od nurkowania na wysokości, po głębokie nurkowania w morzu. Jeśli korzysta się z nich z właściwym konserwatyzmem, stanowią rzetelną podstawę nurkowania technicznego (o ile cokolwiek można uznać za rzetelne w nie do końca doprecyzowanej dziedzinie wiedzy). Faktycznie stały się one światowym standardem, który może służyć za uniwersalny punkt odniesienia przy porównywaniu i ocenie profili dekompresyjnych.

Włączenie do profilu dekompresyjnego procentu Wartości-M i procentu Gradientu Wartości-M w sumarycznej formie jest stosunkowo łatwym zadaniem dla twórców programów dekompresyjnych. Tabela 3 jest tego przykładem i przedstawia wpływ współczynników konserwatyzmu używanych w jednym z komercyjnych programów dekompresyjnych. Przy współczynniku konserwatyzmu na poziomie 0% profil osiąga 90% Wartości-M i wkracza w strefę dekompresji na 70% (70% Gradientu Wartości-M). Narzuca się obserwacja, że program ma wbudowany bazowy konserwatyzm, skoro żadna z wartości nie osiąga w tym momencie 100%. Przy współczynniku konserwatyzmu 50% (rekomendowanym w instrukcji do programu), profil osiąga 85% Wartości-M i wkracza w strefę dekompresji na 40-50%. Przy 100% współczynniku konserwatyzmu profil osiąga 77% Wartości-M i wkracza w strefę dekompresji na 20-35%. Warto zauważyć, że wartości podane w Tabeli 3 odnoszą



Rysunek 3.

się do momentu osiągnięcia danego przystanku w procesie wynurzenia, czyli do najgorszego przypadku. Odpowiada to poruszaniu się w profilu po "schodkach" nasycenia gazem przedstawionych na wykresie ciśnień (patrz przykład na rys. 3). Najwyższe wartości dla wszystkich profili wyliczone są w momencie wynurzenia się na powierzchnię, co wyjaśnia dlaczego rozsądnie jest wynurzać się bardzo powoli z ostatniego przystanku.

MARGINES BEZPIECZEŃSTWA

Wykorzystanie standardowego zbioru Wartości-M jako punktu odniesienia pozwala nurkom na indywidualne dopasowanie poziomu konserwatyzmu dekompresji. Wybrany margines bezpieczeństwa zależeć będzie od osobniczych upodobań i wcześniejszych doświadczeń dekompresyjnych. Uczciwa ocena własnych możliwości nurkowania dekompresyjnego jest zawsze konieczna. Na przykład autor tego artykułu (pracownik biurowy), uznał za stosowny dla siebie limit 85% Wartości-M i 50-60% Gradientu Wartości-M dla typowych nurkowań trimiksowych. Aby zapewnić stały margines bezpieczeństwa, profil dekompresyjny może być dostosowany bezpośrednio do założonego z góry procentu Gradientu Wartości-M. Przewagą takiego podejścia jest pełna spójność na przestrzeni całego zakresu ciśnienia otoczenia i całkowita kontrola nad powstałym w ten sposób profilem.

Tabela 3. Efekt wprowadzenia różnego Współczynnika Konserwatyzmu w jednym z dostępnych komercyjnych programów opartym na Wartościach M Buhlmanna zbioru ZH-L16 (ZH-L16A dla helu oraz ZH-L16B dla azotu).
Nurkowanie trimixowe z wykorzystaniem TX 15/40 do głębokości 75m z czasem dennym 30 minut. Mieszaniny dekompresyjne – Nx36 od 33m oraz O2 od 6m

Współczynnik konserwatyzmu 0%				Współczynnik konserwatyzmu 50%				Współczynnik konserwatyzmu 100%			
Przyst. Deko (msw)	Run Time (min)	*Max % Wartości M (Nr. tkanki)	*Max % Gradientu Wartości M (Nr. tkanki).	Przyst. Deko (msw)	Run Time (min)	*Max % Wartości M (Nr. tkanki)	*Max % Gradientu Wartości M (Nr. tkanki).	Przyst. Deko (msw)	Run Time (min)	*Max % Wartości M (Nr. tkanki)	*Max % Gradientu Wartości M (Nr. tkanki).
								42	35	74.3 (4)	29.3 (3)
								39	37	76.0 (4)	31.0 (3)
				36	35	81.6 (4)	47.0 (3)	36	40	77.4 (4)	33.9 (4)
33	36	85.8 (4)	59.4 (4)	33	38	84.5 (4)	55.7 (4)	33	43	77.6 (4)	35.5 (4)
				30	39	79.0 (5)	39.4 (4)	30	45	75.4 (5)	22.6 (4)
27	38	89.0 (4)	69.3 (4)	27	41	82.1 (5)	46.0 (4)	27	49	76.5 (6)	26.3 (5)
24	41	89.5 (5)	69.1 (4)	24	45	83.2 (5)	49.1 (5)	24	53	76.5 (6)	20.3 (5)
21	44	88.3 (5)	65.5 (5)	21	49	82.2 (6)	42.5 (5)	21	58	77.0 (6)	22.1 (6)
18	48	89.8 (6)	67.2 (6)	18	55	83.2 (6)	45.1 (5)	18	68	78.2 (7)	24.9 (6)
15	55	91.1 (6)	72.2 (6)	15	64	83.1 (7)	44.1 (6)	15	78	76.9 (7)	17.6 (7)
12	64	90.3 (7)	67.7 (7)	12	75	83.1 (7)	42.8 (7)	12	96	78.4 (8)	22.5 (7)
9	79	90.7 (7)	70.7 (7)	9	95	84.5 (8)	46.0 (7)	9	124	78.3 (8)	22.4 (8)
6	94	90.9 (8)	70.7 (8)	6	113	84.2 (9)	47.1 (8)	6	147	78.9 (9)	24.4 (9)
3	119	91.1 (9)	72.2 (9)	3	144	85.8 (10)	51.7 (10)	3	189	81.2 (11)	32.6 (10)
0	120	80.2 (11)	80.2 (11)	0	145	88.6 (11)	62.6 (12)	0	190	84.9 (13)	46.6 (13)

* po przybyciu na przystanek

O Autorze:

Erik C. Baker jest inżynierem elektrykiem, pracującym w firmie doradztwa inżynieryjnego na Florydzie. Jego hobby to badania nad dekompresją i fizjologią nurkowania. Napisał w FORTRANIE kilka programów do liczenia i analizy dekompresji. Erik jest certyfikowanym nurkiem jaskiniowym i trimiksowm.

O autorach wersji polskiej:

Tomasz Żabierek jest inżynierem robotykiem, kierownikiem pracowni projektowej w warszawskiej firmie inżynierskiej PRO-CONTROL. Jego hobby to nurkowanie techniczne, posiada stopień Instruktor Trainera Normoxic Trimix IANTD oraz wszystkie stopnie instruktorskie tejże organizacji. Od wielu lat zajmuje się analizą algorytmów dekompresyjnych oraz technikami dekompresyjnymi stosowanymi w nurkowaniach technicznych. Założyciel grupy Hogarthian Divers.

Izabela Kapuściarek jest psychologiem ewolucyjnym i społecznym, zajmującym się badaniami rynku w globalnym marketingu firmy Shell, a dla przyjemności nurkowaniem. Posiada stopien IANTD Advanced Nitrox i PADI Divemaster, obecnie przygotowuje się do nurkowań technicznych i jaskiniowych. Członek grupy Hogarthian Divers.

Bibliografia:

Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. The Physiology and Medicine of Diving. London: WB Saunders.

Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS. 1908. The prevention of compressed air illness. J Hyg (London) 8:342-443.

Bühlmann, AA. 1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag.

Bühlmann, AA. 1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag.

Hamilton RW, Muren A, Röckert H, Örnhagen H. 1988. Proposed new Swedish air decompression tables. In: Shields TG, ed. XIVth Annual Meeting of the EUBS. European Undersea Biomedical Society. Aberdeen: National Hyperbaric Center.

Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD. 1994. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and Technology Corp.

Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen CJ, ed. Underwater 9 Physiology IV. New York: Academic Press.

Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and application. Flagstaff, AZ: Best.

Wienke BR. 1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogenoxygen and helium-oxygen dives. Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

Workman RD. 1969. American decompression theory and practice. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. The physiology and medicine of diving and compressed air work. London: Baillière, Tindall & Cassell.