

ROZDZIAŁ 5

Wewnątrz nurka

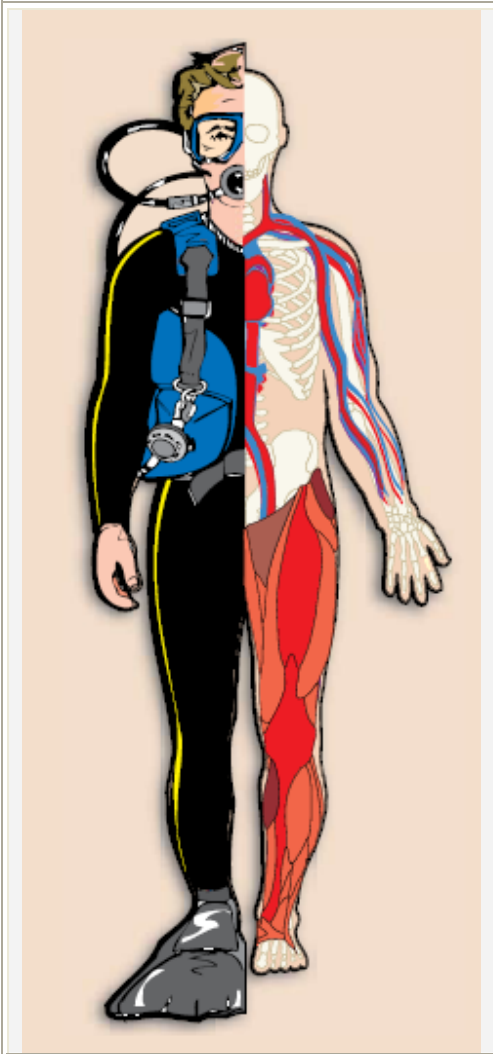
FIZJOLOGIA NURKOWANIA



SPIS TREŚCI

Wewnątrz nurka	1
WSTĘP	3
Układy krążenia i oddechowy.....	5
Budowa i funkcjonowanie układu oddechowego	10
Wpływ nurkowania na układy krążenia i oddechowy	13
Problemy układów krążenia i oddechowego związane z nurkowaniem	18
Odpowiedź fizjologiczna na zmiany temperatury	30
Odpowiedź fizjologiczna na zmiany ciśnienia w przestrzeniach powietrznych ciała	34
Uszy.....	34
Zatoki	35
Płuca	36
Sprzęt	36
Problemy w przestrzeniach powietrznych ciała	37
Uraz ciśnieniowy ucha	38
Uraz ciśnieniowy zatok	42
Uraz ciśnieniowy płuc.....	45
Urazy ciśnieniowe sprzętowe.....	51
Inne urazy ciśnieniowe	52
Fizjologia dekompresji: reakcja organizmu na rozpuszczony gaz obojętny	54
Absorpcja gazów obojętnych	54
Eliminacja gazów obojętnych	57
Choroba dekompresyjna.....	60
Modele dekompresyjne	69
Wstęp do modeli dekompresyjnych	69
Nurkowanie powtórzeniowe	75
Komputery nurkowe.....	80
Limity bezdekompresyjne.....	81
Nurkowanie wielopoziomowe.....	82
Nurkowanie powtórzeniowe	84
Wzbogacone powietrze - nitroks.....	86
Nurkowanie wielodniowe (np na safari nurkowym)	88
Procedury wynurzania	90
Nurkowanie dekompresyjne	93
Nurkowanie na wysokości i latanie po nurkowaniu	95
Przyszłość.....	97

WSTĘP



Spośród wszystkich form życia na Ziemi, tylko ludzie mają możliwość opuszczenia swojego naturalnego środowiska na dłużej niż kilka chwil. Technologia pozwala nam penetrować przestrzeń kosmiczną i docierać w głębiny oceanów. Odwiedzamy miejsca, do życia w których nasze ciała nie są przystosowane, ani też odpowiednio do tego wyposażone. Nurkowanie różni się od innych sposobów eksploracji nowych środowisk. W wielu przypadkach, urządzenia zaprojektowane do eksploracji innego środowiska ostaniają nas i chronią przed nim. Na przykład, skafander kosmiczny odgradza cię od próżni, jednak nie umożliwiając życia w niej. Podobnie, pilot nie lata samodzielnie, a tylko steruje latającą maszyną. Nurkowanie jest inne: nurkując, funkcjonujesz w obcym środowisku w granicach limitów fizjologicznych nakładanych przez to środowisko. Akwalung nie oddycha za ciebie, ale pozwala twojemu układowi oddechowemu funkcjonować pod wodą. Płetwy nie przemieszczają cię, ale stanowią przedłużenie twoich stóp umożliwiając ci poruszanie się pod wodą. Technologia stanowi pomost pomiędzy twoją fizjologią a podwodnym światem. Z zewnątrz perspektywy, jesteś płetwonurkiem dzięki twemu wyposażeniu i umiejętnościom. Jednak od wewnątrz, jesteś nurkiem dlatego, że twoja fizjologia odpowiada i dostosowuje się do warunków podwodnego świata. Te zdolności adaptacyjne robią tym większe wrażenie, gdy zdasz sobie sprawę jak bardzo skomplikowane i złożone jest twoje ciało. Budują je miliardy komórek, każda z nich zdolna funkcjonować jako niezależna jednostka, które łączą się i współpracują tworząc tkanki, organy i układy, każdy z nich o ściśle określonych funkcjach. One z kolei tworzą złożoną, pojedynczą jednostkę potężniejszą niż suma jej składników: ciebie. Jednak pomimo jego złożoności, twoje ciało funkcjonuje w oparciu o te same podstawowe prawa co cała reszta świata żywego. Niezwykłe jest to, że te tysiące drobnych procesów zachodzą w twoim ciele jednocześnie, utrzymując cię przy życiu. Fizjologia nurkowania zajmuje się opisem procesów zachodzących w twoim ciele w trakcie pobytu pod wodą. Bada

odpowiedź twojego organizmu na zmiany wywołane przez środowisko podwodne, jak również problemy (i ich konsekwencje) które mogą wystąpić, gdy twoje ciało nie może odpowiedzieć lub zaadaptować się do zmieniających się warunków, albo czyni to niewystarczająco efektywnie.

Fizjologia widzenia: jak postrzegasz kolory pod wodą

Środowisko, w którym żyjemy, jest wypełnione promieniowaniem elektromagnetycznym o pełnym spektrum długości fal, od nanometrów (nm - to jedna miliardowa metra) do kilometrów (km). Nie jesteśmy w stanie dostrzec większości tego promieniowania, za wyjątkiem wąskiego pasma w zakresie między 400 a 800 nm - które to pasmo nazywamy światłem widzialnym. Jest to w przybliżeniu ta sama część widma promieniowania elektromagnetycznego, która może przenikać przez wodę.

Przedstawiamy tutaj nieco informacji na temat funkcjonowania ludzkiego układu wzrokowego. Obraz jest rzutowany przez rogówkę i soczewkę na wewnętrzną powierzchnię gałki ocznej. Cienka warstwa tkanki nerwowej, siatkówka, pokrywa tą wewnętrzną powierzchnię, będącą właściwie częścią mózgu. Około 200 milionów receptorów wrażliwych na światło gęsto pokrywa powierzchnię siatkówki, wyściełając ścianę gałki. Te fotoreceptory należą do dwóch rodzajów: są to pręciki i czopki. Każdy z nich niezależnie od innych mierzy docierające do niego światło, i generuje impulsy nerwowe.

Intensywność impulsów nerwowych zależy od ilości absorbowanego światła. Jasne światło powoduje silną reakcję, zaś słabe światło powoduje słabszą odpowiedź. Wzorzec reakcji na światło wszystkich

fotoreceptorów siatkówki razem wziętych odpowiada oglądanemu przedmiotowi. Komórki nerwowe siatkówki zamieniają ten wzorzec na sygnały nerwowe, transmitowane do wyższych centrów w mózgu, które „rekonstruuja” obraz. Podczas tej skomplikowanej i wciąż w dużym stopniu nie poznanej obróbki danych powstaje coś wyjątkowego - wrażenie koloru.

Kolor jest jedynie sposobem interpretacji informacji ze świata zewnętrznego przez twoją siatkówkę i mózgowie centra wzrokowe. Naturalne światło jest przypadkową mieszaniną długości fal w zakresie od 400 do 800 nm. Cząsteczki zwane pigmentami absorbują pewne długości fal i odbijają pozostałe. W ten sposób, odbite światło różni się od światła padającego brakiem fal o długościach pochłoniętych przez pigment. Otaczające światło postrzegamy jako bezbarwne - czyli białe; światło kolorowe różni się od niego składem widmowym.

Receptory siatkówki zwane czopkami odpowiadają za zdolność rozróżniania kolorów. Występują trzy typy czopków, różniące się rodzajem występującego w nich, absorbującego światło pigmentu. Każdy z tych rodzajów czopków posiada inne spektrum czynnościowe - różnią się one wrażliwością na fale świetlne o różnej długości. Spektra czynnościowe trzech typów czopków występujących w ludzkiej siatkówce przedstawione są na wykresie poniżej; krzywe niebieska, fioletowa i czerwona odzwierciedlają intensywność reakcji na światło o tej samej energii, ale różnej długości fali. Na przykład, na światło o długości fali 450 nm, czopek typu B jest maksymalnie wrażliwy, podczas gdy pozostałe dwa ledwo zaczynają reagować. Maksymalna czułość dla czopka typu G przypada na długość fali świetlnej 550 nm, a dla typu R - 560 nm.

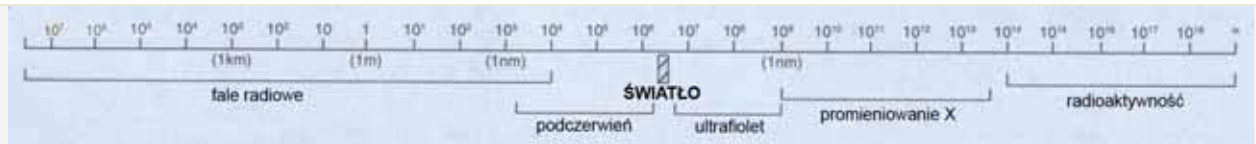
Możemy z tego wyciągnąć ważne wnioski. Mianowicie, określona reakcja pojedynczego czopka może powstać albo pod wpływem stosunkowo słabego światła o długości fali odpowiadającej maksymalnej czułości, albo silniejszego światła o długościach fal krótszych lub dłuższych. Zatem, pojedynczy receptor nie jest w stanie odróżnić słabego światła o długości fali odpowiadającej jego najwyższej czułości od silnego światła spoza tego zakresu. Pojedynczy czopek jest ślepy na kolory, ale względne reakcje na światło każdego z trzech rodzajów czopków położonych blisko siebie pozwalają naszemu systemowi wzrokowemu, analizującemu sygnały, na dokonanie rozróżnienia pomiędzy intensywnością i kolorem światła.

Przykładowo, każdy z trzech rodzajów czopków reaguje na światło o długości fali 500 nm - czopek G najsilniej, zaś czopki R i B słabiej, lecz na tym samym poziomie. Światło, które powoduje takie względne reakcje trzech typów czopków jest odbierane jako zielone. Nie ma znaczenia, czy było to światło o jednej, ściśle określonej długości fali (monochromatyczne), czy była to przypadkowa mieszanina fal świetlnych o różnej długości i intensywności. Jedyną liczącą się rzeczą jest wzajemny stosunek reakcji trzech typów czopków. Jeżeli użyjemy światła monochromatycznego, nasz system wzrokowy rozpozna światło o długości fali ok. 400 nm jako fioletowe, 450 nm - niebieskie, 500 nm - zielone, 550 nm - żółte, 600 nm - pomarańczowe, i około 650 nm jako czerwone. Jednak niezliczone kombinacje długości fal i ich intensywności mogą wywoływać wrażenie takich samych kolorów.

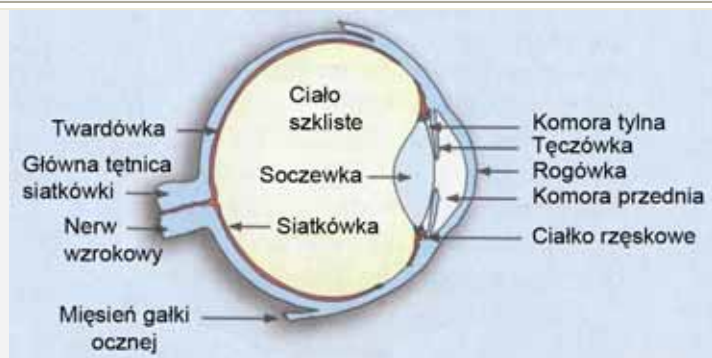
Proces widzenia staje się bardziej skomplikowany przez własność systemu wzrokowego zwanego selektywną adaptacją, polegającą na takim dostrojeniu postrzegania kolorów, by otaczające światło było odbierane jako białe. Mechanizm ten pozwala widzieć te same kolory w pomieszczeniu niezależnie od tego, czy jest ono oświetlone światłem dziennym padającym przez okno, czy światłem żarówki w nocy. Światło dzienne i światło żarówki mają różne składy widmowe i przez to różne kolory, jednak twoje oko będzie postrzegać biały obiekt jako biały bez względu na to, jakie jest źródło otaczającego światła.

Podczas robienia zdjęć aparatem cyfrowym w pomieszczeniu rozświetlonym żarówką, możesz dostrzeżesz różnice w jego składzie spektralnym. Jeżeli ustawisz balans bieli w aparacie na światło dzienne, zdjęcie będzie zabarwione na żółto i czerwono - ustawieś aparat tak, by definiował biel jako zestaw długości fal charakterystyczny dla światła dziennego. Jednak po ustawieniu balansu bieli na światło żarowe, twoje zdjęcia będą miały prawidłowe kolory (przynajmniej w odniesieniu do tego, jak my sami postrzegamy kolory!). Jeżeli wyjdiesz z aparatem z balansem bieli ustawionym na światło żarowe na zewnątrz, twoje zdjęcia będą wydawać się niebieskawe. Wreszcie, możesz ustawić balans bieli na automatyczny; wtedy, w granicach technicznych możliwości aparatu, "biel" będzie "biała" bez względu na rzeczywisty skład spektralny otaczającego światła. Podobnie działa twoje oko - automatycznie ustawia balans bieli. Chociaż do głębszych warstw wody dociera w największej ilości światło niebieskie, to nawet na głębokościach rzędu 50 m mierzone są pewne ilości światła o długości fali 650 nm (czerwonego). Podczas nurkowania, selektywna adaptacja powoduje zwiększenie czułości w zakresie fal długich (czerwonych) i zmniejszenie czułości w zakresie fal krótkich (niebieskich). Pod wodą, generalnie postrzegasz światło otaczające jako bezbarwne (białe) nawet na większych głębokościach, i dzięki temu wciąż widzisz kolory.

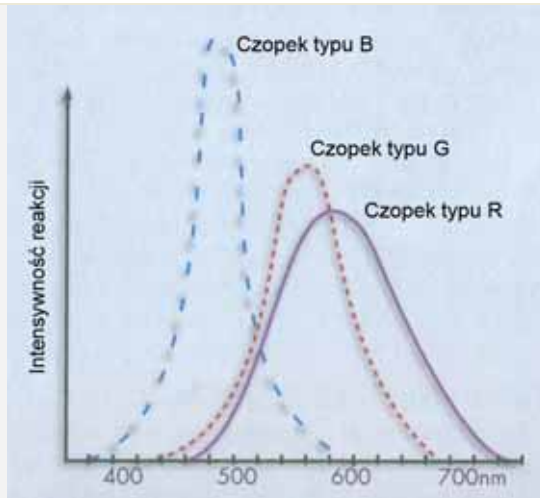
Jednak w tych samych warunkach twój aparat cyfrowy ustawiony na światło dzienne nie może się adaptować, i w związku z tym zdjęcia zrobione w otaczającym świetle na większych głębokościach wychodzą nienaturalnie niebieskie. Możesz korygować balans bieli w aparacie by sprawić, żeby zdjęcia wyglądały lepiej - ale jeśli nie jesteś w bardzo płytkiej wodzie, to bez lampy błyskowej kolory zdjęcia nie będą równie bogate jak tego, co widziałeś pod wodą. Twój naturalny "balans bieli" jest znacznie bardziej elastyczny i dynamiczny niż to, co stworzyliśmy dla aparatów cyfrowych.



Długości fal promieniowania elektromagnetycznego widzialne dla ludzkiego oka należą jedynie do niewielkiego zakresu od ok. 400 do 800 nm - zakres ten określa się jako "światło"



Anatomia ludzkiego oka. Rogówka i soczewka rzutują oglądane przez nas obrazy na siatkówkę, wysłaną fotoreceptorami. Nerw optyczny przekazuje zakodowaną informację od wszystkich fotoreceptorów do mózgu, który analizuje i interpretuje to, co widzimy

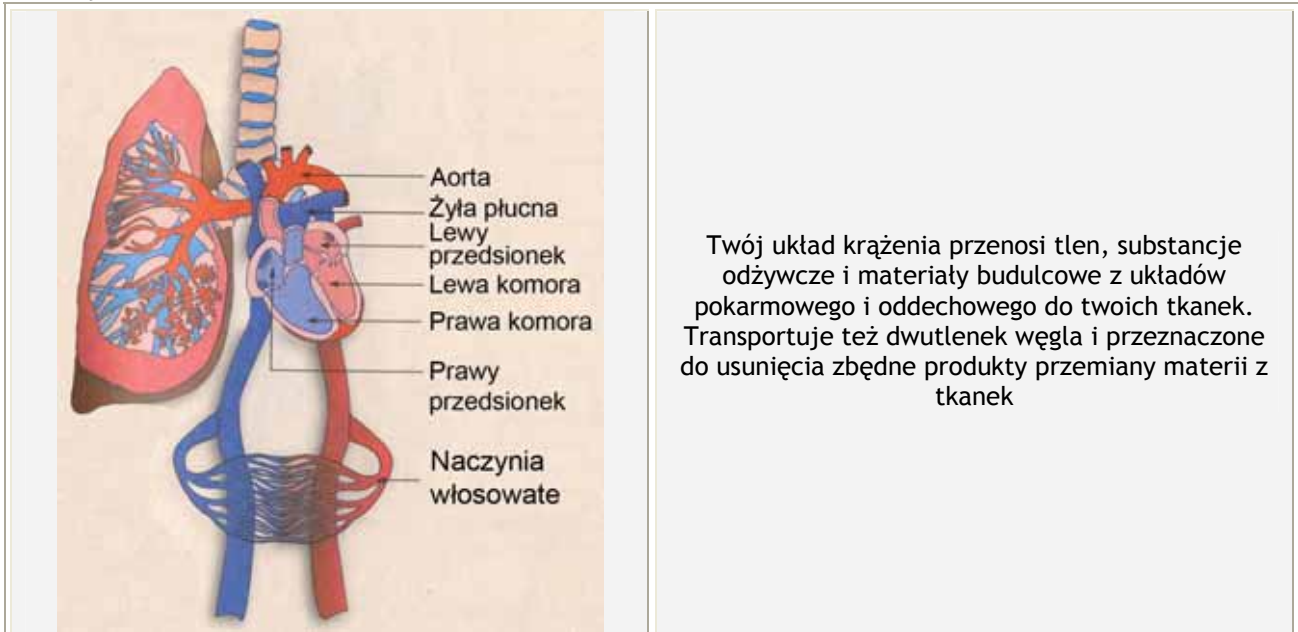


Fotoreceptory różnią się czułością na poszczególne kolory. Światło o tej samej energii, lecz o różnej długości fali, w różnym stopniu pobudzi receptory. Każda z krzywych przedstawia rozkład czułości trzech typów fotoreceptorów zwanych czopkami. Na przykład, czopek B słabo zareaguje na światło o długości fali 400 nm, ale światło o tej samej mocy i długości fali 450 nm wywoła silną reakcję. Światło o długości 400 nm musi być znacznie jaśniejsze, by wywołać taką samą odpowiedź czopka R.

Układy krążenia i oddechowy

Większość bezpośrednich i pośrednich skutków nurkowania na naszą fizjologię dotyczy układów krążenia i oddechowego - i dlatego od omówienia tych właśnie układów zaczniemy. Ludzkie ciało porusza się, wzrasta, naprawia się i rozmnaża, wszystko dzięki różnorodnym, wyspecjalizowanym układom tkanek i organów. Chociaż każdy z tych układów ma określoną funkcję, dla swego normalnego funkcjonowania każdy jest zależny od innych układów organizmu. Chociaż twoje ciało potrzebuje wszystkich tych układów, niektóre mogą „posypać się” bez powodowania poważnych natychmiastowych konsekwencji; jednak zaburzenia funkcjonowania innych układów mogą prowadzić do szybkiego wystąpienia poważnych uszkodzeń, a nawet śmierci. Na przykład, o ile nie jesteś w trakcie ucieczki przed niedźwiedziem lub w podobnej sytuacji, naciągnięcie mięśnia łydki rzadko będzie zagrażać twojemu życiu. Natomiast, o ile nie zostanie udzielona natychmiastowa pomoc medyczna, atak serca zdecydowanie stanowić będzie takie zagrożenie.

Układy krążenia i oddechowy, współpracujące przy dostarczaniu substancji odżywczych i gazów do komórek ciała oraz przy usuwaniu niepotrzebnych substancji, reagują na zmianę warunków związaną z nurkowaniem wyraźniej niż inne układy. Ponieważ cały organizm funkcjonuje dzięki nieustannej wymianie gazowej zapewnianej przez te dwa układy, ich odpowiedź na zmiany wywoływane przez środowisko podwodne może mieć wpływ na każdą komórkę twojego ciała. Te dwa układy współpracują na tyle ściśle, że niewiele z ich reakcji na nurkowanie zachodzi niezależnie od siebie.



Zapotrzebowanie na tlen a układ krążenia

We wszystkich żywych komórkach twojego ciała zachodzą procesy metaboliczne, w których zużywany jest tlen do przetwarzania energii chemicznej na energię użyteczną, niezbędną do życia. W sytuacji braku tlenu, niektóre tkanki potrafią zawiesić swoje czynności życiowe nawet na kilka godzin, a mimo to przetrwać. Inne tkanki, na przykład mięśniowa, mogą funkcjonować przez ograniczony czas korzystając z procesów energetycznych nie wymagających dostaw tlenu. Jednak wiele tkanek obumiera w krótkim czasie w sytuacji, gdy tlen nie jest do nich stale dostarczany. Dotyczy to zwłaszcza układu nerwowego, który bezwzględnie wymaga nieprzerwanych dostaw tlenu, zużywając mniej-więcej jedną piątą całkowitego zapotrzebowania organizmu na tlen.

Twój układ krążenia przenosi tlen, substancje odżywcze i składniki budulcowe od układów pokarmowego i oddechowego do twoich tkanek. Transportuje też dwutlenek węgla i inne niepotrzebne produkty przemiany materii przeznaczone do usunięcia. Chociaż każda z tych funkcji jest niezbędna dla funkcjonowania organizmu, to transport gazów z i do układu oddechowego jest najpilniejszą z nich, i też najbardziej interesującą z nurkowego punktu widzenia.

Krew

Jeśli się skaleczysz, z rany popłynie krew. Nawet bez specjalistycznej wiedzy fizjologicznej i medycznej masz świadomość, że krew jest niezbędna do życia. Krew jest wielofunkcyjną tkanką płynną, złożoną z wielu różnorodnych składników spełniających różne funkcje: dostarczanie tlenu, odprowadzanie dwutlenku węgla, zapewnianie substancji odżywczych, usuwanie zbędnych substancji, mobilizowanie systemu immunologicznego itd.



Czerwone krwinki, czyli erytrocyty, transportują większość tlenu potrzebnego tkankom dzięki zawartości hemoglobiny, białka łatwo wiążącego się z tlenem. Gdyby nie hemoglobina, twoja krew musiałaby krążyć mniej więcej 15-20 razy szybciej by zapewnić tkankom wystarczającą ilość tlenu. Czerwone krwinki stanowią około 45% objętości krwi.

Osocze to ciecz, w której rozpuszczone są substancje odżywcze i związki chemiczne, oraz zawieszono inne składniki krwi. Przenosi ono również rozpuszczone gazy, włączając w to dwutlenek węgla - produkt oddychania komórek ciała, oraz azot, którego poziom waha się w zależności od ciśnienia parcjalnego we wdychanym powietrzu (więcej informacji w sekcji „Fizjologia dekompresji: reakcja na rozpuszczone gazy obojętne”, która szczegółowo opisuje interakcje twojego organizmu z rozpuszczonym azotem).

Chociaż osocze stanowi mniej więcej połowę całkowitej masy krwi i przenosi niektóre rozpuszczone gazy, pod ciśnieniem atmosferycznym jego udział w transporcie tlenu jest znikomy. Czerwone krwinki (erytrocyty) przenoszą niemal cały tlen potrzebny tkankom dzięki hemoglobinie, białku mającemu zdolność łatwego łączenia się i uwalniania tlenu. Gdyby nie hemoglobina, krew musiałaby krążyć 15-20 razy szybciej by zapewnić wszystkim komórkom wystarczającą ilość tlenu - i to w stanie spoczynku. Czerwone krwinki zawierające hemoglobinę stanowią ok. 45% całej masy krwi.

Hemoglobina sprawnie przenosi i uwalnia tlen, ponieważ zmiany ciśnienia parcjalnego wpływają na jej zdolność do przyłączania tego gazu. Krew przechodząca przez płuca napotyka ciśnienie parcjalne tlenu wyższe niż w innych twoich tkankach. Wysokie ciśnienie parcjalne tlenu zwiększa zdolność hemoglobiny do przyłączenia cząsteczek O₂, i dlatego w płucach tlen przenika do krwinek czerwonych i łączy się z hemoglobiną.

Gdy krew dociera do tkanek, następuje obniżenie ciśnienia parcjalnego tlenu - używanego tam w procesach metabolicznych. W tych warunkach, hemoglobina uwalnia cząsteczki tlenu, które mogą być wykorzystane przez tkanki. Teraz, pozbawiona dużej części przyłączonego tlenu, hemoglobina może odwracalnie związać cząsteczki dwutlenku węgla i przetransportować je do płuc, gdzie zostaną usunięte. Dodatkowo, enzym występujący w czerwonych krwinkach uczestniczy w odwracalnej reakcji chemicznej prowadzącej do przekształcenia dwutlenku węgla w dwuwęglany, ulegające rozpuszczeniu w osoczu. Gdy krew dociera z powrotem do płuc, hemoglobina znowu łatwiej łączy się z tlenem, a w mniejszym stopniu z dwutlenkiem węgla. Dlatego dwutlenek węgla jest tutaj uwalniany, podczas gdy nowe cząsteczki tlenu przyłączają się do hemoglobiny. W tym samym czasie, w osoczu następuje odwrócenie wcześniejszej reakcji - dwuwęglany ulegają rozpadowi i wydzielają się dwutlenek węgla, który przenika do przestrzeni dróg oddechowych, skąd jest usuwany na zewnątrz.

Dzięki zdolności transportowania CO₂ w postaci dwuwęglanów, twój system krążenia przenosi znacznie więcej tego gazu niż miałyby to miejsce przy prostym rozpuszczaniu tego gazu w osoczu. Około pięciu procent dwutlenku węgla transportowanego przez krew jest rozpuszczone w osoczu, 20 procent przenoszone jest przez hemoglobinę, a około 75% krąży w postaci dwuwęglanów.

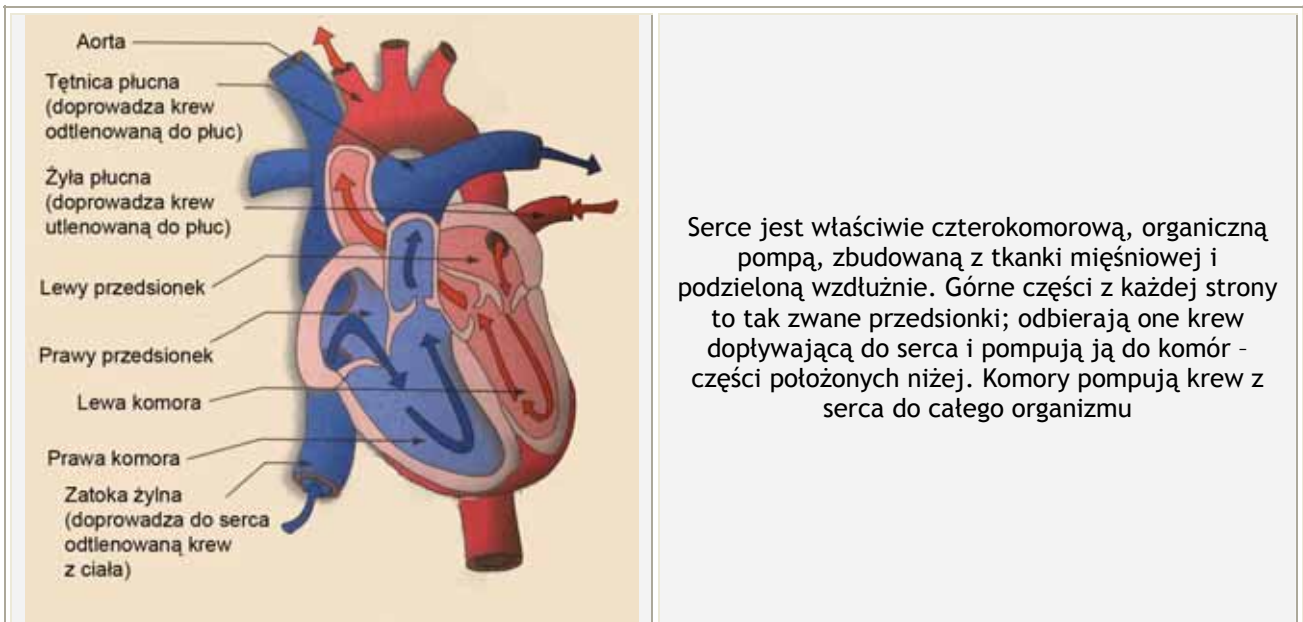
Układ sercowo - naczyniowy

Serce, tętnice, żyły oraz naczynia włosowate składają się na układ sercowo-naczyniowy, czyli układ krążenia, który odpowiada za cyrkulację krwi w twoim organizmie. Serce jest wyspecjalizowanym mięśniem, który pompuje krew przez tętnice do tkanek twojego organizmu. Duże tętnice rozgałęziają się na mniejsze, a te z kolei na cienkie naczynia włosowate, w których następuje wymiana gazów i różnych substancji pomiędzy krwią i tkankami. Naczynia włosowate przechodzą w żyły, łącząc się w coraz większe naczynia doprowadzające krew do serca i następnie do płuc, w których zachodzi wymiana gazowa. Następnie krew przepływa ponownie o serca i cykl się powtarza.

Serce jest właściwie czterojamową, organiczną pompą, zbudowaną z wyspecjalizowanej tkanki mięśniowej i podzieloną wzdłużnie. Górne jamy serca, zwane przedsionkami, przyjmują krew wpływającą do serca i przekazują ją do komór, położonych poniżej. Komory pompują krew z serca wyrzucając ją na obwód.

Bogata w tlen krew, doptywająca do serca z płuc, wpływa do lewej części serca, skąd pompowana jest do aorty - największej tętnicy w całym ciele. Ponieważ lewa część serca zaopatruje w krew całe ciało, jest większa i mocniejsza od prawej strony.

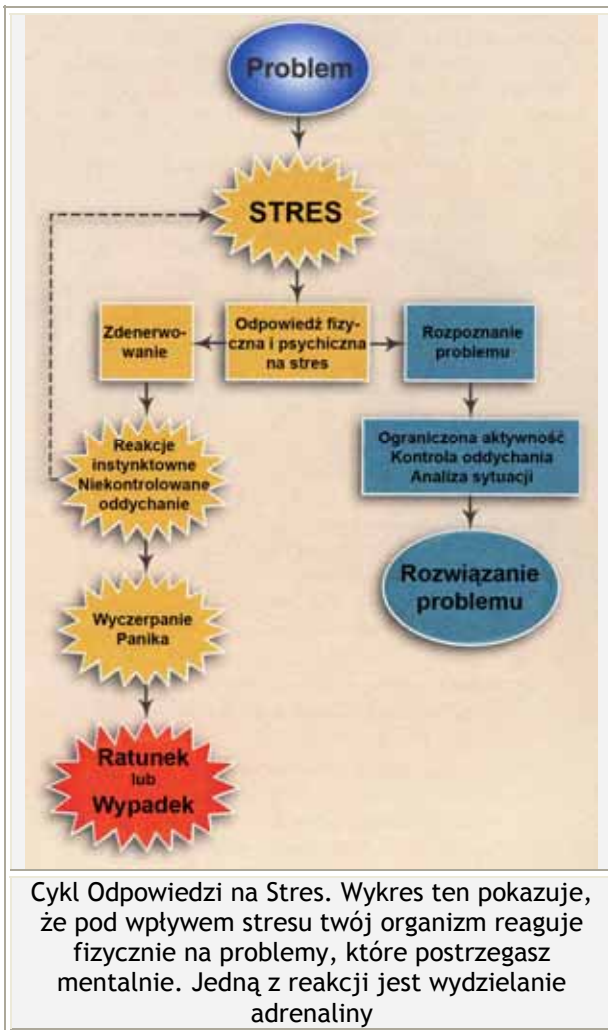
Tętnice szyjne to dwa pierwsze odgałęzienia aorty, dostarczające krew do mózgu. W części położonej dalej od serca tętnice rozgałęziają się na coraz mniejsze, aż przyjmują postać naczyń włosowatych, w których odbywa się właściwa wymiana gazów i substancji między krwią a tkankami. Naczynia włosowate są mikroskopijnej wielkości, mają tak małe średnice że krwinki przemieszczają się w nich pojedynczo, zaś ściany mają tak cienkie, że gaz i rozpuszczone składniki mogą łatwo przez nie dyfundować do otaczających tkanek.





Naczynia włosowate łączą się w żyły, które transportują krew ubogą w tlen do prawej części serca. Prawa komora pompuje krew do tętnicy płucnej, która dostarcza ją do naczyń włosowatych w płucach. Tam właśnie tlen z wdychanego powietrza przechodzi ze światła pęcherzyków płucnych do krwiobiegu. Analogicznie, dwutlenek węgla wydziela się z krwi do przestrzeni pęcherzyków właśnie w obrębie naczyń włosowatych płuc. Wzbogacona w tlen krew wraca przez żyły płucne do lewego przedsionka serca i cały cykl zaczyna się od nowa. Twoje serce poprzez swoje rytmiczne skurcze powoduje, że krew stale krąży, generując tętno (puls) oraz ciśnienie krwi. Twoje tętno odpowiada tempu skurczów serca, i może zwalniać lub przyspieszać, tak aby spełnić potrzeby twojego organizmu, zależne od wykonywanych czynności i procesów życiowych. Puls zdrowej, dorosłej osoby w stanie spoczynku powinien zawierać się pomiędzy 60 a 100 skurczów na minutę. Tempo skurczów serca i puls zmieniają się wtedy, gdy zmienia się zapotrzebowanie twoich tkanek na tlen - ale twój organizm potrzebuje tlenu przez cały czas, i dlatego serce nigdy nie może przestać pracować (a jeśli się zatrzyma, na przykład na skutek zawału serca, występuje stan zagrożenia życia). Jednak, tak jak wszystkie mięśnie, serce musi odpoczywać - czyni to pomiędzy skurczami. Ciśnienie wywoływane przez skurcze twojego serca generuje ciśnienie krwi, które można mierzyć w dwóch momentach - skurczu lub rozkurczu serca, jako ciśnienie skurczowe i rozkurczowe. Ciśnienie krwi i tętno wzrastają na skutek wysiłku fizycznego lub pod wpływem stresu i strachu, jednak zazwyczaj wracają szybko do normy po zaprzestaniu aktywności lub po przeminięciu stresu lub strachu. Tętno i ciśnienie krwi wzrastają podczas wysiłku, ponieważ twoje mięśnie zużywają więcej tlenu i wytwarzają więcej dwutlenku węgla podczas przetwarzania energii chemicznej na energię potrzebną do metabolizmu i pracy. Z tego samego powodu, przyspieszasz oddech podczas wykonywania ćwiczeń. Wkrótce omówimy sposoby, w jakie twoje ciało monitoruje i kontroluje poziom tlenu we krwi.

W wyniku stresu, twoje nadnercza wydzielają adrenalinę (epinefrynę), hormon uwalniany do układu krążenia jako część systemu obronnego organizmu. Adrenalina działa stymulująco na pracę serca, powoduje zwężenie naczyń, i zwiększa tempo oddychania w przygotowaniu twojego organizmu do ucieczki lub walki z czynnikiem powodującym stres, zwiększając zdolność całego organizmu do wysiłku (np. ucieczki). Dzieje się to odruchowo dzięki percepcji; zagrożenie nie musi być realne, aby organizm przygotował się do odpowiedzi na nie - jeśli tylko postrzegasz je jako realne, twój organizm odpowiednio zareaguje. Jak dowiesz się podczas kursu PADI Rescue Diver, jest to częścią Cyklu Odpowiedzi na Stres, który może prowadzić zarówno do rozwiązania problemu, jak i do paniki. Warto zauważyć, że kofeina i inne stymulanty imitują działanie adrenaliny w twoim organizmie, i właśnie dlatego przyspieszają twój puls i zwiększają częstość oddechu.

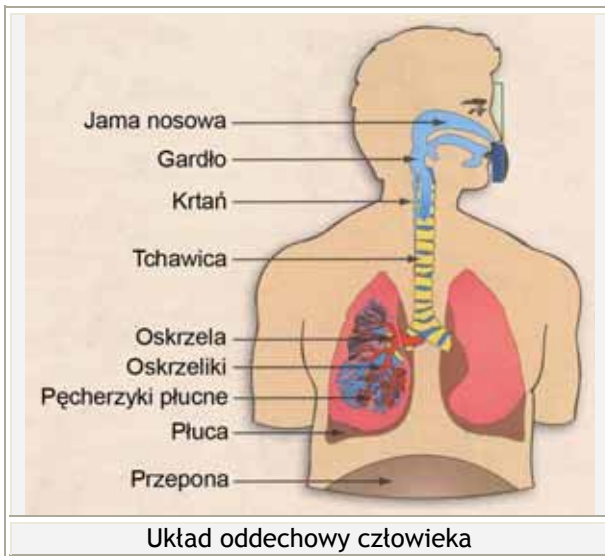


ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Stres i wzmożona aktywność fizyczna zdarzają się dość często w nurkowaniu rekreacyjnym i są stosunkowo przewidywalne. Ponieważ podczas nurkowań technicznych warunki są bardziej ekstremalne i wymagania sprzętowe wyższe, poziom stresu i wysiłek mogą być wtedy jeszcze większe. *Divers Alert Network (DAN)* donosi, że ataki serca i choroby układu sercowo-naczyniowego są coraz częstszymi przyczynami wypadków śmiertelnych podczas nurkowań, zwłaszcza u nurków powyżej 40 roku życia.

- Zasięgnij porady lekarza przed rozpoczęciem nurkowania, jeśli masz nadciśnienie bądź miałeś w przeszłości problemy z sercem
- Ćwicz regularnie, tak by zachować sprawność układu sercowo-naczyniowego
- Kontroluj dietę, by przez nieprawidłowe odżywianie nie zwiększać ryzyka wystąpienia problemów związanych z wysokim ciśnieniem krwi i chorobami serca
- Utrzymuj ilość tkanki tłuszczowej na odpowiednim poziomie przez dietę i ćwiczenia fizyczne
- Nie pal tytoniu

Budowa i funkcjonowanie układu oddechowego

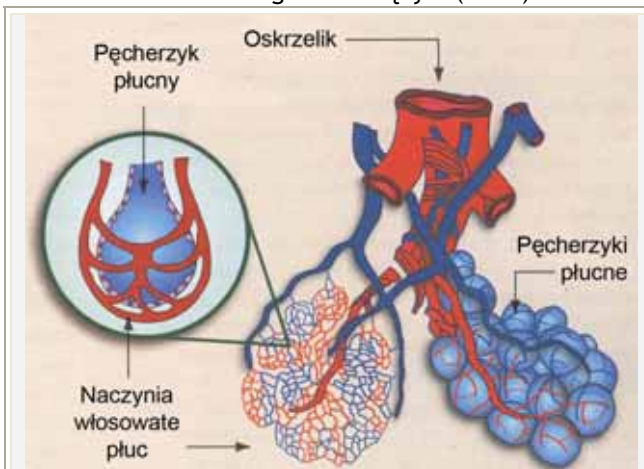
Twój układ oddechowy współpracuje z układem krążenia - zapewnia środowisko, w którym może nastąpić wymiana gazowa. Generalnie, wszystkie gazy wnikają do wnętrza twojego ciała lub opuszczają je przez płuca. Chociaż dwoma najważniejszymi gazami dla twoich procesów metabolicznych są tlen i dwutlenek węgla, to samo dotyczy wszystkich gazów którymi oddychasz, lub które są rozpuszczone w twoich tkankach. Jak obszernie omówiono w dalszej części rozdziału, azot i hel także wnikają do twoich tkanek i opuszczają je za pośrednictwem płuc, co bezpośrednio wiąże się z koniecznością stosowania tabel bądź komputerów nurkowych celem uniknięcia choroby dekompresyjnej.



Zacznijmy od opisu sekwencji zdarzeń zachodzących w układzie oddechowym, związanych z fizjologią oddychania. Odczuwasz potrzebę oddychania wtedy, gdy twój organizm wykrywa podwyższenie poziomu dwutlenku węgla i/lub obniżenie stężenia tlenu w twojej krwi i tkankach. Centra oddechowe w twoim mózgu, położone w rdzeniu przedłużonym, mają największy wpływ na kontrolę oddychania poprzez stymulowanie potrzeby wykonania wdechu w chwili, gdy przekroczone zostanie progowe stężenie CO₂. Chemoreceptory rozmieszczone obwodowo, w różnych częściach twojego ciała, monitorują stężenie tlenu, i sygnalizują ośrodkowi oddechowemu obniżenie poziomu tlenu poniżej wartości progowej. Te słabe sygnały z zewnętrznych chemoreceptorów potęgują wpływ wysokiego stężenia dwutlenku węgla na ośrodek oddechowy, przyczyniając się do pobudzenia oddychania.

Należy zwrócić uwagę, że w większości sytuacji to

stężenie dwutlenku węgla, a nie tlenu, jest najważniejszym czynnikiem kontrolującym oddychanie. Jeśli obwodowe chemoreceptory wykrywają mało tlenu, lecz stężenie dwutlenku węgla jest w normie, twój ośrodek oddechowy może nie stymulować wykonania wdechu. Z drugiej strony, nawet przy normalnych poziomach tlenu, podwyższona ilość CO₂ sprawi, że ośrodek oddechowy może reagować niepotrzebnie zwiększając częstotliwość oddechu. Jest to szczególnie ważne przy nurkowaniu na zatrzymanym oddechu, ma też znaczenie w odniesieniu do przestrzeni martwych w sprężeniu powietrznym i nurkowania na rebreatherach o obiegu zamkniętym (CCRs).



Powiększenie pęcherzyka płucnego i otaczających go płucnych naczyń włosowatych. W tym miejscu zachodzi wymiana gazowa w płucach

Po stwierdzeniu zbyt wysokiego poziomu CO₂ centrum oddechowe stymuluje cię do wykonania wdechu. W tym celu przepona - duży mięsień oddzielający klatkę piersiową od jamy brzusznej - obniża się, powodując zwiększenie pojemności klatki piersiowej. Wzrost objętości i spadek ciśnienia powodują, że powietrze napływa do wnętrza klatki piersiowej, tak by doszło do wyrównania ciśnienia pomiędzy wnętrzem płuc a środowiskiem zewnętrznym. Wydech odbywa się odwrotnie - przepona rozpręża się, pozwalając sile sprężystości płuc doprowadzić do zmniejszenia ich objętości, przez co powietrze zostaje z nich wypchnięte bardzo podobnie jak powietrze wypuszczane z balonu. Zmniejszenie objętości płuc i wzrost ciśnienia wewnętrznego powodują, że powietrze wypływa z twoich płuc.

Podczas wdechu, powietrze przepływa przez usta i/lub nos oraz zatoki, w których powietrze jest zwilżane i filtrowane. Następnie, przechodzi ono

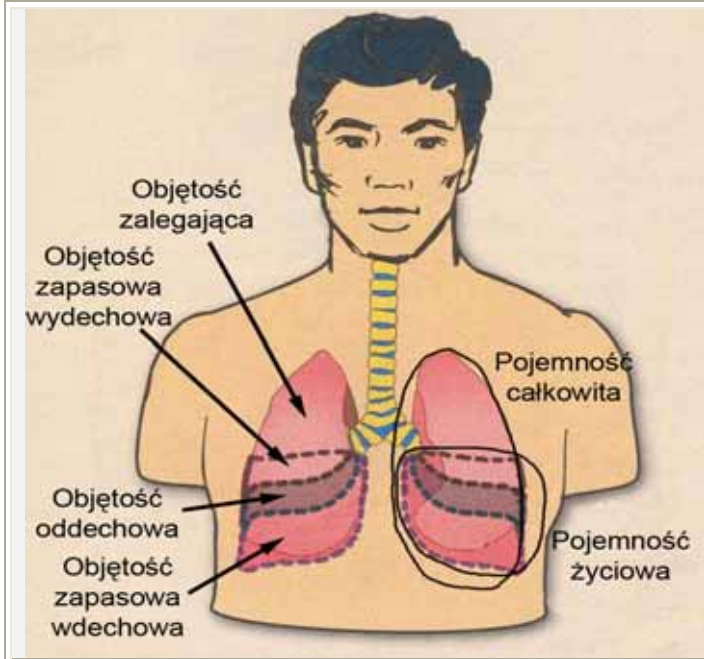
przez nagłośnię w gardle i dalej do tchawicy. Nagłośnia działa jak zawór między tchawicą a przetykiem (prowadzącym do żołądka), chroniąc drogi oddechowe przed dostaniem się do nich pokarmu lub płynów. Tchawica rozdziela się na lewe i prawe oskrzela, które prowadzą do płuc.

Choć często przyrównywane do balonów, płuca właściwie bardziej przypominają dwie duże gąbki, umieszczone wewnątrz chroniącej je klatki piersiowej. Wewnątrz płuc, oskrzela rozdzielają się na coraz drobniejsze kanaliki, zwane oskrzelikami. Najdrobniejsze oskrzeliki kończą się pęcherzykami płucnymi, otoczonymi przez naczynia włosowate. Tutaj właśnie zachodzi wymiana gazowa.

Gazy przemieszczają się między światłem pęcherzyka a naczyniami poprzez cienką błonę rozdzielającą pęcherzyk i ścianę naczynia włosowatego. Błony te są mikroskopijnie cienkie, umożliwiając cząsteczkom gazów swobodne przenikanie i przemieszczanie się pomiędzy światłem pęcherzyka a twoim krwiobiegiem. Tutaj tlen, dwutlenek węgla i inne gazy dyfundują między krwią a pęcherzykiem płucnym, przy czym krew

nie wchodzi w bezpośredni kontakt z powietrzem (ani innym gazem, którym oddychasz). Mechanizmem, który odpowiada za przemieszczanie się gazów, jest dyfuzja - naturalna tendencja gazów do przemieszczania się z obszarów o wysokim ciśnieniu parcjalnemu do obszarów o niskim ciśnieniu parcjalnemu. Gdyby nie dyfuzja, wymiana gazów w płucach nie mogłaby zachodzić.

Aby zapewnić maksymalną powierzchnię kontaktu dla przyspieszenia dyfuzji gazów, pęcherzyki płucne i oplatające je naczynia włosowate występują w bardzo dużych liczbach. Całkowita powierzchnia strefy wymiany gazów w twoich płucach, po rozprostowaniu, miałaby wielkość typowego pokoju mieszkalnego. Mimo wielkości tej powierzchni, twój system oddechowy i krążenia wykorzystuje zaledwie ok. 15-20 procent tlenu dostępnego w każdym oddechu. Sztuczne oddychanie usta-usta jest możliwe, ponieważ wydychane powietrze wciąż zawiera 80-85% początkowej zawartości tlenu, co wystarcza do utrzymania osoby ratowanej przy życiu.



Objętość oddechowa to objętość gazu, którą pobierasz i wydychasz przy normalnym oddechu. Ilość powietrza, jaką możesz usunąć z płuc po wykonaniu normalnego wydechu, to objętość zapasowa wydechowa, zaś objętość jaką możesz dodatkowo pobrać po wykonaniu normalnego wdechu to objętość zapasowa wdechowa. Pojemność życiowa to największa objętość powietrza, jaką możesz pobrać w płucach po maksymalnym wdechu, a objętość zalegająca to ilość powietrza pozostająca w płucach po najsilniejszym wydechu. Suma pojemności życiowej i objętości zalegającej to całkowita pojemność płuc

Tempo oddychania zmienia się w zależności od tempa produkcji dwutlenku węgla przez twoje tkanki, co ma bezpośredni związek z ilością zużywaną energii. W stanie spoczynku, przeciętna osoba wykonuje 12-20 oddechów na minutę, ale w trakcie aktywności fizycznej to tempo wzrasta, gdyż organizm szybciej pochłania tlen i wytwarza dwutlenek węgla. Centrum oddechowe utrzymuje zwiększone tempo oddychania aż do momentu, w którym stężenie dwutlenku węgla powróci do normy.

Podobnie jak tempo oddychania, także objętość wdychanego powietrza zmienia się w zależności od twojej aktywności. Jak ci zapewne wiadomo, oddychasz głębiej i szybciej podczas wykonywania ćwiczeń lub pod wpływem stresu - które zwiększają zużycie O_2 i produkcję CO_2 .

Objętość oddechowa (tidal volume) to objętość gazu, którą pobierasz i wydychasz przy normalnym oddechu. Ilość powietrza, jaką możesz usunąć z płuc po wykonaniu normalnego wydechu, to objętość zapasowa wydechowa (expiratory reserve volume), zaś objętość jaką możesz dodatkowo pobrać po wykonaniu normalnego wdechu to objętość zapasowa wdechowa (inhalatory reserve volume). Pojemność życiowa (vital capacity) to największa objętość powietrza, jaką możesz pobrać w płucach po maksymalnym wdechu (suma trzech poprzednio wymienionych objętości), a objętość zalegająca (residual volume) to ilość powietrza pozostająca w płucach po najsilniejszym wydechu. Suma pojemności życiowej i objętości zalegającej to całkowita pojemność płuc (total lung capacity). Pojęcia objętości oddechowej i pojemności zalegającej odnoszą się bezpośrednio do niektórych reakcji twojego organizmu na nurkowanie.

Wpływ nurkowania na układy krążenia i oddechowy

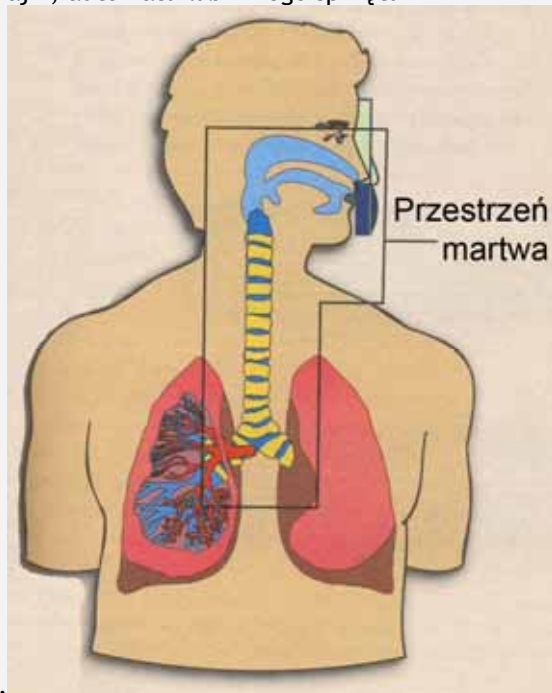
Gdy nurkujesz, twój układ oddechowy i krążenia oczywiście nie przestają funkcjonować, za to muszą przystosować się do warunków istniejących w środowisku podwodnym. Pewne procesy zachodzą bez względu na to, czy oddychasz z akwalungu, czy też nurkujesz na zatrzymanym oddechu. Możesz nurkować tylko dzięki temu, że twój organizm reaguje na zwiększone ciśnienie i wzrost gęstości gazów oddechowych pod wodą.

Reakcje na oddychanie w sprężeniu

Oddychanie w sprężeniu - przez automat lub fajkę - wpływa na reakcje układu krążenia i oddechowego poprzez zwiększanie zawartości dwutlenku węgla i przez zwiększanie oporów oddechowych. Reakcje te wynikają ze zwiększenia objętości przestrzeni martwych, z turbulencji i wzrostu gęstości gazu pod wodą.

Przestrzeń martwa

Przestrzeń martwa (dead-air space) to część objętości oddechowej, która nie uczestniczy bezpośrednio w wymianie gazowej. Bez sprzętu, przestrzeń martwą stanowią zatoki, tchawica i oskrzela. Jednak podczas używania sprzętu przestrzeń martwa dodatkowo powiększa się o objętość fajki, automatu lub innego sprzętu



oddechowego.

Przestrzeń martwa to ta część twojej pojemności oddechowej, która nie bierze bezpośredniego udziału w wymianie gazowej

Przy wykonywaniu wdechu, pierwsza porcja gazu docierającego do pęcherzyków jest tym samym gazem, który pozostał w drogach oddechowych po poprzednim wydechu. Jest on bogatszy w CO₂, i podczas wdechu miesza się ze świeżym gazem - tak, że gaz w pęcherzykach płucnych zawiera zawsze nieco więcej dwutlenku węgla niż wynosi jego zawartość w gazie używanym do oddychania. Oddychanie przez fajkę, automat bądź inny aparat oddechowy zwiększa tę przestrzeń martwą. Dodatkowo, podczas pobytu w wodzie objętość oddechowa jest mniejsza o ok. 15-20% niż na powierzchni, ze względu na ściskanie klatki piersiowej przez wodę (zwłaszcza wtedy, gdy przyjmujesz pozycję pionową).

Na skutek zmniejszenia objętości oddechowej i zwiększenia przestrzeni martwej, zużyty gaz może stanowić większą część każdego oddechu, przez co może odpowiednio wzrosnąć zawartość CO₂ w pęcherzykach płucnych. Zwiększanie poziomu dwutlenku węgla zależy od objętości oddechowej i zalegającej, może zatem wahać się od nieistotnego aż do znacznego. Jednak, w rozsądnych granicach, możesz kompensować wzrost stężenia CO₂, zarówno świadomie jak i nieświadomie. Zwiększenie stężenia CO₂ w pęcherzykach

płucnych prowadzi do zwiększenia zawartości tego gazu we krwi, przy braku istotnego spadku zawartości tlenu. Jednak na skutek zwiększonego stężenia dwutlenku węgla twój ośrodek oddechowy stymuluje wzrost częstości i głębokości oddechów. Fizjolodzy wykazali, że u niektórych nurków ośrodek oddechowy staje się z czasem bardziej tolerancyjny na lekko podwyższony poziom CO₂. Efekt jest szczególnie wyraźny u nurków, którzy nurkują dużo na bezdechu, na przykład polując pod wodą lub biorąc udział w zawodach freedivingowych (wkrótce bliżej omówimy reakcje twojego organizmu na nurkowanie bezdechowe). Zatem, choć twoją nieświadomą reakcją może być wzrost tempa i głębokości oddechów, doświadczenie pozwala przeciwdziałać temu efektowi (w określonych granicach!).

Świadomą reakcją - jedyną, którą możesz kontrolować - jest wykonywanie głębokich wdechów celem zwiększenia objętości oddechowej. Przez zwiększanie ilości wdychanego gazu, zmniejszasz proporcję, jaką stanowi gaz z przestrzeni martwych, w całkowitej objętości docierającej do pęcherzyków płucnych. Jest to jeden z powodów, dla których uczono cię wykonywać powolne i głębokie oddechy podczas nurkowania. Innym sposobem wpływania na objętość martwą jest używanie odpowiedniego sprzętu. Producenci w taki sposób projektują sprzęt do oddychania pod wodą, by zmniejszyć przestrzeń martwą. Jak dowiedziałeś się w Rozdziale Trzecim, jest to jednym z powodów, dla których nie konstruuje się obecnie bardzo długich fajek, które niepotrzebnie zwiększały przestrzeń martwą. Wiele masek pełnotwarzowych i hełmów używanych do nurkowań komercyjnych posiada odrębne części/kieszonki na nos i usta, które oddzielają te części twarzy od reszty przestrzeni maski. Celem tego jest zmniejszenie rzeczywistej przestrzeni martwej, i zapobieżenie gromadzeniu się dwutlenku węgla wewnątrz maski. Natomiast przeciętny drugi stopień automatu oddechowego używanego w nurkowaniu rekreacyjnym ma tak małą objętość, że powoduje wzrost przestrzeni martwej w mniejszym stopniu niż przeciętna fajka.

Gęstość gazu

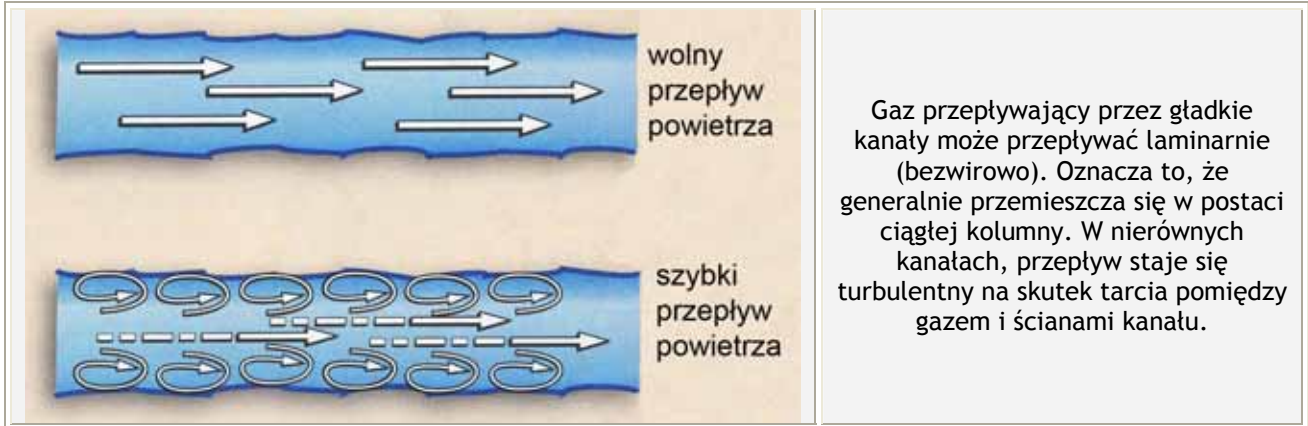
Gdy nurkujesz ze sprzętem powietrznym, głębokie oddychanie wymaga dodatkowej adaptacji z powodu większej gęstości powietrza (lub innego gazu) wdychanego pod ciśnieniem. Im gęstszy gaz, tym mniej płynnie przepływa przy danej prędkości. Przy założeniu braku innych różnic, przy wzroście prędkości gazu o określoną wielkość, opory oddechowe wzrastają nieproporcjonalnie. Dlatego właśnie potrzeba więcej niż dwa razy tyle energii na wdychanie/wydychanie określonej objętości dwa razy szybciej. Jest to spowodowane tym, że gdy gaz przepływa przez gładkie kanały, może przepływać laminarnie (bezwirowo). Oznacza to, że generalnie przemieszcza się on jako ciągła, jednorodna kolumna gazu. Niestety, wdychane przez siebie powietrze nie przepływa gładkimi kanałami, ale przez sprzęt powietrzny, tchawicę i oskrzela. W tych nierównych kanałach, przepływ powietrza jest turbulentny (wirowy) w efekcie tarcia między gazem i ścianami kanałów. Te opory sprawiają, że gaz przemieszcza się szybciej w centralnej części kanałów niż przy ich krawędziach, powodując zawirowania w kierunku odwrotnym od kierunku przepływu, zaburzające spokojny przepływ i zwiększające opór. Im gęstszy jest gaz, tym większe są opory przy danej prędkości przepływu.



Wiele masek pełnotwarzowych i hełmów do nurkowań komercyjnych posiada odrębne części/kieszonki na nos i usta, które oddzielają te części twarzy od pozostałej przestrzeni maski. Służy to zmniejszeniu efektywnej przestrzeni martwej i zapobieżeniu akumulacji dwutlenku węgla wewnątrz

Do pewnego stopnia, ten opór ma pewne pozytywne konsekwencje (nawet na powierzchni) - zwiększa nieznacznie ciśnienie w oskrzelikach i pęcherzykach podczas wydechu. Chroni to kanały powietrzne przed zapadaniem się podczas wydechu, choć pewna ich część zapada się mimo wszystko, zarówno pod wodą, jak i na powierzchni. Więcej informacji na temat wpływu zapadania się kanałów powietrznych na nurkowanie znajdziesz w sekcji "Fizjologiczne efekty zmian ciśnienia w przestrzeniach powietrznych organizmu". Jednak w trakcie nurkowania opory te mogą stanowić problem, ponieważ im szybciej gaz przepływa, im jest on gęstszy, i im bardziej nieregularny kanał którym przepływa, tym więcej energii trzeba zużyć na przewyciężanie oporów powodowanych przez turbulencję. Jest to poważny problem w nurkowaniu

technicznym, ale może mieć znaczenie nawet w stosunkowo płytkiej wodzie - jeżeli ulegniesz wyczerpaniu. Dlatego właśnie uczone o oddychaniu powolnego i głębokiego, nurkowania w stanie relaksu, oraz oszczędzania energii pod wodą. Wykwalifikowani nurkowie techniczni zapobiegają temu zjawisku przez użycie mieszanek oddechowych zawierających hel, który zmniejsza gęstość mieszanki (istnieją też inne korzyści wynikające z używania tego gazu podczas głębokiego nurkowania).



Rebreathery o obiegu zamkniętym i półzamkniętym

Rebreathery o obiegu zamkniętym i półzamkniętym (Closed-Circuit Rebreathers - CCRs i Semiclosed-Circuit Rebreathers - SCR) także wywołują odpowiedź fizjologiczną organizmu. Chociaż objętość gazu dostępnego do oddychania jest bardzo duża, dzięki swojej konstrukcji rebreathery nie mają znacząco większej przestrzeni martwej niż inne rodzaje aparatów do oddychania pod wodą. Wynika to z faktu, że absorbent chemiczny usuwa dwutlenek węgla z wydychanego gazu, który następnie powraca do nurka poprzez pętlę oddechową i zawory regulujące jego przepływ (w Rozdziale Trzecim znajdziesz więcej informacji na temat sposobu funkcjonowania rebreatherów). Dodatkową przestrzeń martwą stanowi zatem tylko objętość ustnika, a jeśli używasz maski pełnotwarzowej, część ustno-nosowa.

Jednak jeśli zużyjesz absorbent albo zapakujesz go niewłaściwie, cały rebreather może stać się jedną wielką przestrzenią martwą. Inaczej niż w typowej przestrzeni martwej, zawartość tlenu będzie wystarczająca (o ile nie wystąpią inne problemy techniczne!), ale rosnący poziom dwutlenku węgla może powodować bóle głowy, przyspieszenie oddechu oraz inne symptomy hiperkapni (zatrucia dwutlenkiem węgla - omówione wkrótce). Dlatego jest istotne, by nurkowie używający CCR bądź SCR wymieniali absorbent odpowiednio często - nie przekraczali jego zalecanej trwałości, oraz by upewnili się, że jest on prawidłowo zapakowany.

Gęstość gazu i przepływ laminarny stanowią ważne zagadnienia w nurkowaniu na rebreatherach. Energia potrzebna do przepływu gazu przez te systemy pochodzi wyłącznie od Ciebie. Kanady oddechowe nie są gładkie, zatem występują naturalne turbulencje, a dodatkowo musisz "przepychać" gaz przez zbiornik z absorbentem. Energia potrzebna do tego znacznie wzrasta wraz z rosnącą gęstością gazu. Dodatkowo, wydychany gaz musi pozostać przez chwilę w sąsiedztwie absorbentu, tak by pochłonięty został cały dwutlenek węgla; szybkie oddychanie skraca ten czas, i może spowodować, że część CO₂ przepłynie przez zbiornik z pochłaniaczem. Z tych powodów, powolne i głębokie oddychanie jest szczególnie istotne podczas nurkowania na rebreatherach.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Aby zmniejszyć znaczenie przestrzeni martwych, gęstości gazu i turbulencji, powinieneś:

- **Oddychać powoli i głęboko podczas nurkowania**
- **Przestrzegać wytycznych producenta odnośnie pojemności i pakowania pochłaniacza dwutlenku węgla do rebreatherów**

Wpływ nurkowania na zatrzymanym oddechu

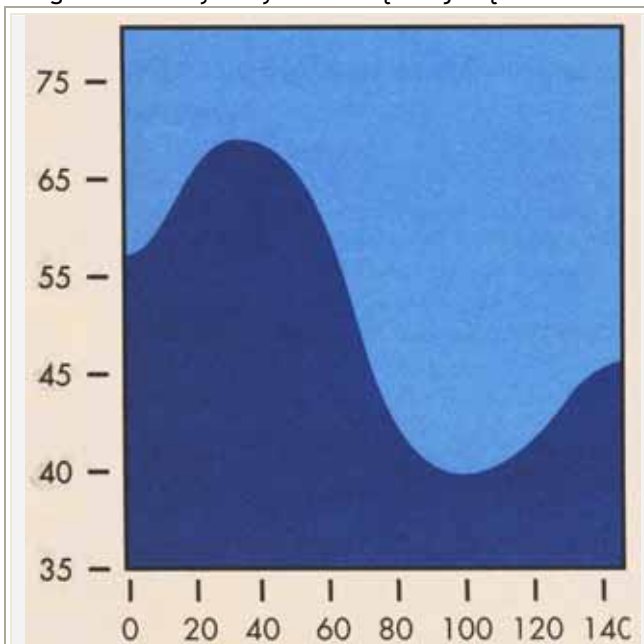
Podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu, twoje ciało musi odpowiednio reagować na zaprzestanie oddychania (bezdech - apnea), aby zapewnić ci przeżycie oraz to, że wkrótce wznowisz oddychanie.

Fizjolodzy stwierdzili, że reakcja twojego organizmu jest nieco inna podczas wstrzymywania oddechu pod wodą i na lądzie, choć wciąż nie jest jasne dlaczego i w jakim stopniu istotne są te różnice.

Podczas bezdechu, układ krążenia wykorzystuje tlen zgromadzony w płucach, mięśniach i krwi, aby zaspokoić zapotrzebowanie tkanek na tlen. Bez wentylacji, po chwili dwutlenek węgla gromadzi się w układzie krążenia, płucach, mięśniach i innych organach. Wzrost stężenia CO₂ sprawia, że twój ośrodek oddechowy stymuluje przeponę do skurczu, co odczuwasz jako potrzebę zaczerpnięcia oddechu.

Początkowo potrzeba ta jest słaba, lecz sukcesywnie nasila się, w miarę jak ciało zużywa tlen i produkuje dwutlenek węgla - aż do tego momentu, gdy musisz wynurzyć się dla nabrania powietrza. To, jak długo potrafisz pozostać na bezdechu, zależy od szeregu parametrów fizjologicznych i reakcji, nie do końca rozumianych przez fizjologów. Znaczenie tych reakcji różni się znacząco u poszczególnych osób, i dlatego niektórzy nurkowie potrafią wstrzymać oddech na czas znacznie dłuższy od innych.

Wiele czynników i procesów w twoim ciele wpływa na czas, na jaki możesz wstrzymać oddech. Jednym z nich, jak uważa wielu fizjologów, jest ciśnienie wody. W miarę zanurzania, ciśnienie wody spręża powietrze w twoich płucach, zwiększając ciśnienie parcjalne tlenu. Zwiększone ciśnienie O₂ umożliwia organizmowi wykorzystanie większej części tlenu niż byłoby to możliwe na powierzchni.



Nieświadomą reakcją twojego organizmu na nurkowanie na zatrzymanym oddechu jest zmiana częstości skurczów serca. Gdy weźmiesz pierwszy głęboki wdech, zachodzi tachykardia, czyli przyspieszenie pracy serca; następnie występuje bradykardia, czyli spowolnienie pracy serca

Mimowolną reakcją organizmu spotykana przy nurkowaniu bezdechowym jest zmiana tempa pracy serca. Gdy po raz pierwszy weźmiesz głęboki wdech, występuje tachykardia, czyli przyspieszenie akcji serca, po niej zaś następuje bradykardia, czyli spowolnienie akcji serca. Badania wykazały także występowanie arytmii (nieregularnego rytmu pracy serca) podczas długich nurkowań na zatrzymanym oddechu odbywanych przez wytrenowanych nurków bezdechowych.

Bradykardia występująca na skutek wstrzymania oddechu określana jest jako odruch ssaków nurkujących (mammalian diving reflex), ponieważ występuje u niektórych ssaków, takich jak wieloryby, foki i morświny. Wydaje się, że właśnie ten odruch umożliwił przeżycie niektórych dzieci bliskich utonięcia w wodzie o temperaturze poniżej 10°C: po resuscytacji, poszkodowani odzyskiwali funkcje życiowe nawet po upływie ponad 20 minut od momentu zatrzymania oddechu, bez wystąpienia trwałych konsekwencji.

Fizjolodzy nie do końca rozumieją, jak i dlaczego występuje odruch nurkowy. Wiadomo, że związany jest z zimną wilgocią na twarzy, ale podczas badań zimna woda nie zawsze powodowała wydłużenie czasu bezdechu. To, że zimna woda na twarzy wydaje się wywoływać taką odpowiedź, tłumaczy, dlaczego odruch nurkowy rzadziej był spotykany u

osób podtopionych w wodach ciepłych.

Wydaje się, że na skutek odruchu nurkowego krew jest koncentrowana w mózgu i sercu, dostarczając tlen z limitowanej puli jedynie do najbardziej wymagających rejonów ciała. Może mieć to związek z rosnącym stężeniem CO₂, na co twój organizm reaguje przez ograniczenie dopływu krwi do kończyn i zwiększenie dopływu do mózgu. Inaczej niż u ssaków morskich, u człowieka ciśnienie wzrasta w miarę przedłużania bezdechu. Zmiany we układzie krążenia występują także jako naturalna odpowiedź na zmiany temperatury; niektórzy fizjolodzy uważają, że zmiany krążenia krwi w wyniku odruchu nurkowego mogą częściowo wynikać z naturalnej reakcji na zimno.

Oprócz nieświadomych reakcji, możesz świadomie zwiększyć czas wstrzymywania oddechu. Pierwszy ze sposobów polega na relaksacji i ograniczeniu wysiłku. Im mniej intensywnie poruszasz się i mniej męczysz, tym wolniej zużywasz tlen i wytwarzasz dwutlenek węgla.

Innym sposobem świadomego zwiększania czasu bezdechów jest trening. Badania wykazały, że wytrenowani freediverzy mogą wstrzymać oddech na dłuższy czas, ponieważ wzrasta ich tolerancja na

podwyższone stężenie dwutlenku węgla, mają oni też zwiększoną wydajność beztlenową - ich ciała mają zwiększoną zdolność wytwarzania energii przy braku tlenu.

Trzecim sposobem zwiększenia czasu trwania bezdechu jest rozpoczynanie nurkowania na zatrzymanym oddechu z mniejszą ilością CO₂ w organizmie. W tym celu powinieneś wykonać świadomą hiperwentylację - trzy lub cztery szybkie, głębokie oddechy tuż przed zanurzeniem. Robiąc to, zmniejszasz stężenie dwutlenku węgla w drogach oddechowych do poziomu poniżej normalnego, co z kolei prowadzi do obniżenia stężenia tego gazu w układzie krwionośnym. Dzięki temu, twoje tkanki będą mogły wytworzyć większą ilość dwutlenku węgla przed osiągnięciem poziomu, który stymuluje oddychanie. Jednak, jak dowiesz się w następnej sekcji, ważne jest ograniczanie hiperwentylację do maksymalnie trzech lub czterech oddechów.

Fizjologiczne uzasadnienie udzielania pierwszej pomocy i pomocy lekarskiej podtopionym

Utonięcie jest często wymieniane jako przyczyna śmierci w wypadkach nurkowych. Choć generalnie to twierdzenie jest prawdziwe, to przebieg zdarzeń prowadzących do wypadku zakończonym utonięciem może być bardzo różny. Na przykład, nurek może ulec wyczerpaniu na powierzchni lub pod wodą, może skończyć mu się powietrze, może też spanikować lub ulec toksyczności tlenowej. Schorzenia lub czynniki mogące prowadzić do utraty przytomności, takie jak cukrzyca, padaczka, hipotermia lub arytmia serca, także mogą powodować utonięcie - i dlatego ludziom z pewnych grup ryzyka odradza się nurkowanie. Utonięcie może także wynikać z zaistnienia innych czynników mogących nawet samodzielnie prowadzić do śmierci, takich jak atak serca podczas nurkowania.

Chociaż utonięcie może być spowodowane przez wiele różnych okoliczności, pierwsza pomoc i opieka medyczna są takie same. Zatem przed omówieniem fizjologii, zdefiniujmy pojęcie utonięcia i podtopienia. Oba wynikają z odcięcia dostępu powietrza przez wodę, ale w wypadku utonięcia ofiara umiera. Ofiara podtopienia przeżywa, przynajmniej czasowo.

Zarówno ofiara utonięcia, jak i podtopienia, może zachłysnąć się wodą - czyli wciągnąć wodę do dróg oddechowych. Około 15% ofiar utonięcia i podtopienia nie zachłystuje się wodą - prawdopodobnie podczas tonięcia odruchowo zaciskają krtań. W efekcie, te osoby duszą się, gdyż nie przestają wstrzymywać oddechu. Jeśli ratownik przywróci ofierze oddech zanim znajdą nieodwracalne zmiany w układzie krążenia i układzie nerwowym, osoba taka przeważnie wraca do zdrowia szybko i bez komplikacji.

W pozostałych 85% wypadków przebieg zdarzeń jest inny. Ofiary tonięcia zachłystują się różną ilością wody, która powoduje urazy płuc, trwające długo po wyciągnięciu poszkodowanego z wody. Poza nielicznymi wyjątkami, konsekwencje są podobne bez względu na to czy ofiara zachłystnęła się słodką czy słoną wodą, gdyż ostateczne konsekwencje są takie same, choć mechanizmy nieco się różnią.

Najważniejszym efektem zachłystnięcia się słodką lub słoną wodą jest hipoksemia. W ten sposób określa się nienormalnie niski poziom tlenu w krwi, który powoduje niewystarczające zaopatrzenie tkanek ciała w tlen (hipoksja).

Mózg jest organem najbardziej wrażliwym na brak tlenu, i dlatego utrata przytomności jest częsta w przypadkach podtopienia. Nawet po przywróceniu do życia, wciągnięcie wody do płuc może spowodować hipoksemię na skutek uszkodzenia płuc, które może nie dawać o sobie znać przez wiele godzin. Uratowana osoba podtopiona może wydawać się całkowicie wyleczona, aż do momentu wystąpienia objawów hipoksemii nawet po upływie kilku godzin po wypadku. Jest to tak zwane wtórne utonięcie. Bez specjalistycznego leczenia, uraz ten może doprowadzić do śmierci.

Jako że hipoksemia w trakcie i po wypadku powoduje uszkodzenia tkanek, podstawowym sposobem ratowania ofiary podtopienia jest jak najszybsze wykonanie sztucznego oddychania, w razie konieczności masażu serca i defibrylacji, a następnie podanie tlenu. Dzięki tym czynnościom, wiele ofiar podtopienia u których doszło do zatrzymania oddychania, a czasem także do zatrzymania akcji serca, odzyskiwało pełną sprawność bez żadnych trwałych konsekwencji.

Generalnie, podczas ratowania podtopionej ofiary nie warto próbować usuwać wody z jej płuc, jednak ratownik musi pamiętać o udrożnieniu górnych dróg oddechowych (ust, nosa i gardła) i zabezpieczeniu przed wlewaniem się większej ilości wody. Ofiara podtopienia może wymiotować (często dochodzi do połknięcia wody) - dlatego do obowiązków ratownika należy także chronienie poszkodowanego przed zachłystnięciem.

Ponieważ uraz płuc i hipoksemia spowodowane podtopieniem mogą utrzymywać się przez godziny i dni po zdarzeniu, bardzo ważne jest, aby wszystkim ofiarom podtopienia udzielona została pomoc przez służby medyczne, które dokonają szczegółowej oceny odniesionych obrażeń, i żeby w miarę możliwości poszkodowani otrzymali do oddychania czysty tlen podczas transportu do szpitala.

Dawniej lekarze uważali, że rodzaj uszkodzeń wynikających z podtopienia zależy od tego, czy ofiara

zachtłsnęła się wodą słoną czy słodką. Obecnie, poza wyjątkowymi sytuacjami, nie ma to większego wpływu na przebieg leczenia, mimo że słodka i słona woda uszkadzają płuca w inny sposób. W obu przypadkach mniej tlenu przechodzi do krwi i dalej do tkanek, i dlatego podstawowym sposobem leczenia samodzielnie oddychającej ofiary podtopienia jest zawsze podanie tlenu.

W sytuacjach nurkowych, podstawowy czynnik powodujący uraz nie zawsze może być oczywisty. Na przykład, nurek może doznać embolii gazowej, stracić przytomność, i w następstwie tego doznać podtopienia. W pierwszych momentach akcji ratowniczej, trudne może być dokładne określenie przyczyn wypadku, ale nie gra to bardzo istotnej roli przy udzielaniu pierwszej pomocy. Na szczęście dla nurków podtopionych, mających uraz ciśnieniowy płuc czy chorobę dekompresyjną, stosuje się te same procedury pierwszej pomocy: sztuczne oddychanie, masaż serca i defibrylacja (jeżeli potrzeba), podanie tlenu, oraz wezwanie fachowej pomocy medycznej najszybciej jak to możliwe



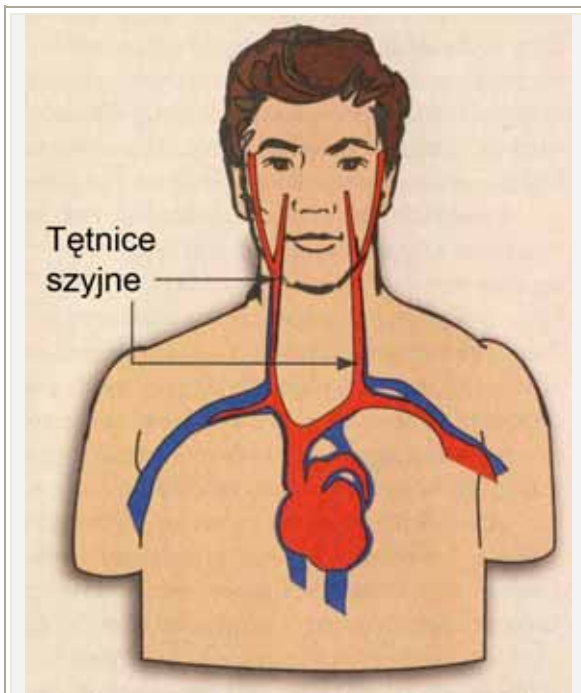
Samodzielnie oddychającej ofierze podtopienia
podaj tlen

Problemy układów krążenia i oddechowego związane z nurkowaniem

Chociaż twoje układy krążenia i oddechowy działają podczas nurkowania wyjątkowo skutecznie, nie można oczekiwać od fizjologii lądowego stworzenia takiego jak człowiek, by przejście do środowiska podwodnego przebiegało bez żadnych komplikacji. W twoim układzie krążenia i oddechowym mogą wystąpić problemy związane z wpływem sprzętu, zaniedbaniem reagowania na zmiany ciśnienia, bądź ignorancją dotyczącą zachowania się organizmu podczas nurkowania. Te problemy mogą wynikać np. z nieprzewidzianego działania sprzętu, bądź z fizjologicznych efektów posiadania zbyt dużej lub zbyt małej zawartości różnych gazów w tkankach.

Odruch zatoki szyjnej (carotid-sinus reflex)

Z rozdziału o budowie układu krwionośnego pamiętasz zapewne, że krew tętnicza dociera do mózgu przez tętnice szyjne, rozgałęziające się po obu stronach szyi. Ponieważ twój mózg nie jest w stanie przetrwać więcej niż kilku minut bez dopływu utlenowanej krwi, receptory w zatoce szyjnej stale monitorują ciśnienie krwi w twoich tętnicach szyjnych. Receptory przesyłają impulsy do centrum krążeniowego w mózgu, które hamuje pracę serca.

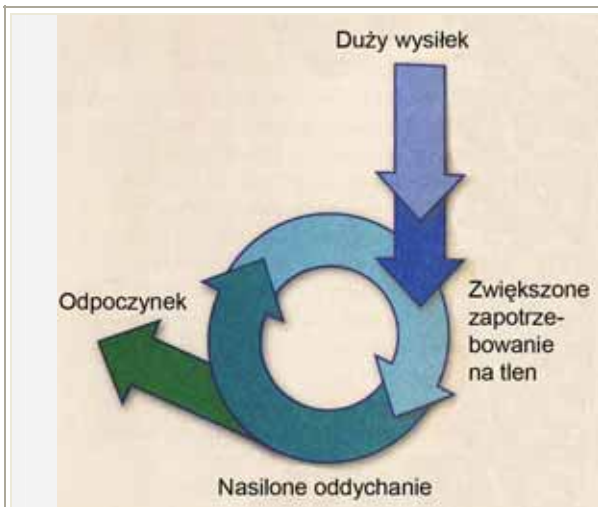


Zbyt ciasne kryza szyjna lub kaptur mogą uciskać tętnice szyjne i powodować utratę przytomności poprzez odruch zatoki szyjnej

Gdy receptory w kłębkach szyjnych wykryją wysokie ciśnienie krwi, stymulują ośrodek krążeniowy, który wysyła sygnały spowalniające tempo pracy twojego serca. Gdy zaś wykryją niskie ciśnienie krwi, przesyłanie sygnałów do ośrodka krążeniowego ustaje, i w efekcie przerywane jest wysyłanie sygnałów do serca. Wtedy tempo pracy serca wzrasta.

Taki mechanizm kontroli powoduje, że możesz mieć problemy gdy ubierzesz suchy skafander ze zbyt ciasną kryzą szyjną, ciasny mokry skafander, kaptur albo jakikolwiek inny element ekwipunku mocno uciskający szyję. Wtedy twoje receptory w zatokach szyjnych mogą nieprawidłowo interpretować ucisk jako wysokie ciśnienie krwi, stymulując centrum krążeniowe w mózgu do spowolnienia pracy serca.

Twoje serce zwalnia, jednak ucisk nie ustaje - i receptory w kłębkach szyjnych w dalszym ciągu odbierają go jako zbyt wysokie ciśnienie krwi. W efekcie, dalej przesyłają sygnały, by spowolnić pracę serca. Jeśli proces ten będzie postępował, może dojść do utraty przytomności na skutek zbyt niskiego dopływu krwi do mózgu. Jednak w większości wypadków, zanim sytuacja stanie się poważna, poczujesz się niekomfortowo i słabo. Zignorowanie tych symptomów grozi omdleniem.



W nurkowaniu, najczęstszą przyczyną hiperkapni jest nadmierny wysiłek i/lub nieodpowiednie oddychanie - szybkie i płytkie. Połączenie małej objętości oddechowej, dużej przestrzeni martwej i zwiększonej produkcji CO₂ może prowadzić do sytuacji, w której dwutlenek węgla produkowany jest szybciej niż organizm może go usuwać

Hiperkapnia

Hiperkapnia (lub hiperkarbia) to nadmiar dwutlenku węgla w twoim układzie oddechowym i układzie krążenia. Jak wspomnieliśmy, może wynikać z wielu przyczyn, w tym ze zbyt dużej przestrzeni martwej lub na skutek wstrzymywania oddechu.

W nurkowaniu, najczęstszą przyczyną hiperkapni jest nadmierny wysiłek, oraz/lub oddychanie niewystarczająco głęboko i wolno. Połączenie małej objętości oddechowej, dużej przestrzeni martwej i wysokiej produkcji dwutlenku węgla może prowadzić do sytuacji, w której będziesz wytwarzać CO₂ szybciej, niż twój układ oddechowy będzie się go w stanie pozbywać. Pod wpływem zwiększonego stężenia dwutlenku węgla, twój ośrodek oddechowy stymuluje cię do przyspieszenia oddychania. Jednak większa gęstość powietrza pod wodą sprawia, że twoja przepona i inne mięśnie oddechowe muszą pracować jeszcze ciężiej by przezwyciężyć opory wynikające z turbulencji. To z kolei prowadzi do wytworzenia jeszcze

większej ilości dwutlenku węgla, co powoduje jeszcze szybsze oddychanie. Ten cykl będzie trwał aż do chwili, gdy zaprzestasz wszelkiej aktywności i dasz swojemu układowi sercowo-naczyniowemu możliwość zaspokojenia jego wymagań dotyczących wymiany gazów.

Gdy poziom dwutlenku węgla w powietrzu w pęcherzykach płucnych i w krwiobiegu wzrasta, możesz doświadczyć bólu głowy, dezorientacji, przyspieszenia oddychania, a później uczucia braku powietrza (duszości). Te symptomy ostrzegają cię przed przemęczeniem, sygnalizując konieczność zatrzymania się, odpoczynku i oddychania powolnego i głębokiego. W związku z rosnącą gęstością gazów, im głębiej nurkujesz, tym łatwiej możesz ulec przemęczeniu, a jednocześnie potrzeba więcej czasu do przywrócenia normalnego stanu. Dodatkowo, dwutlenek węgla wydaje się mieć duży udział w narkozie gazowej (omówionej w dalszej części tego rozdziału), przez co nawet umiarkowana hiperkapnia staje się istotnym problemem podczas głębokich nurkowań.

Ważne jest by zauważyć, że chociaż można uniknąć hiperkapni przez zwiększenie objętości oddechowej podczas umiarkowanego wysiłku, to istnieją granice nałożone przez twoją fizjologię, sprzęt i inne czynniki. Po ich przekroczeniu, będziesz wytwarzać CO₂ szybciej niż dasz radę go usuwać - bez względu na głębokość oddechu - co nieuchronnie prowadzi do hiperkapni. Dlatego ważne jest prawidłowe odbieranie sygnałów twojego organizmu, i zmniejszanie aktywności przy pierwszych objawach przemęczenia.

Hiperkapnia może też wystąpić przez nieprawidłową technikę oddychania - krótkie wstrzymywanie powietrza w płucach przed wykonaniem wydechu (skip-breathing), zamierzone lub nie. Niezamierzone wstrzymywanie oddechu może wystąpić na skutek wyrobienia nawyku wstrzymywania oddechu w celu kontrolowania pływalności. Chociaż kontrola oddechu jest ważnym sposobem regulowania pływalności, wstrzymywanie oddechu jest błędem. Natomiast do zamierzonego wstrzymywania oddechu zazwyczaj dochodzi w błędnym przekonaniu, że pozwala to na wydłużenie czasu korzystania z zapasu powietrza. Jednak zmniejszenie wentylacji powoduje wzrost stężenia CO₂ w krwi, a przez to stymulację oddychania; dlatego ilość zaoszczędzonego gazu jest zazwyczaj zanedbywalna.

Hiperkapnia może też wynikać (choć rzadko) z zanieczyszczonego powietrza w butli. Wynika to zwykle z problemów ze sprężarką, która produkuje tlenek węgla. Katalizatory w systemie filtracji sprężarki przekształcają toksyczny tlenek węgla na dwutlenek węgla, który jest stosunkowo nieszkodliwy. Zatrucie tlenkiem węgla może wystąpić, gdy skażenie przekroczy pojemność filtrów sprężarki, i prowadzi ono do obniżenia poziomu CO₂ we krwi. Jest to jednak inny problem, który wkrótce omówimy.

Wysokie stężenie dwutlenku węgla może ostatecznie prowadzić do utraty przytomności - ale jest bardzo mało prawdopodobne, by do tego doszło na powierzchni. Zazwyczaj, utrata przytomności jest ostatnią szansą twojego organizmu na przywrócenie normalnego oddychania - gdy wszystkie pozostałe metody zawiodą. Oczywiście, utrata przytomności pod wodą może spowodować, że nurek wypuści ustnik automatu i utonie; dlatego jest istotne, by unikać hiperkapni, a jeśli do niej dojdzie, natychmiast zatrzymać się i pozwolić organizmowi na uspokojenie oddechu. Jeśli dalej będziesz doświadczał tych symptomów, lub jeśli wystąpią one bez uprzedniego przemęczenia i/lub nieprawidłowego oddychania, natychmiast przerwij nurkowanie.

Hipokapnia

Ponieważ twój ośrodek oddechowy reguluje oddech przede wszystkim w oparciu o poziom dwutlenku węgla we krwi, hipokapnia (zwana też hipokarbią), czyli niedostateczna ilość dwutlenku węgla, także może powodować problemy fizjologiczne.

Generalnie, hipokapnia wynika albo ze zbyt intensywnej świadomej hiperwentylacji, albo z nieświadomej hiperwentylacji pod wpływem stresu lub strachu. Pierwszym symptomem hipokapni są zawroty głowy podczas nieświadomej hiperwentylacji; później może wystąpić utrata przytomności. Jednak podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu hipokapnia może prowadzić bezpośrednio do tzw. "mroczków płytkiej wody" (shallow-water blackout), bez wystąpienia sygnałów ostrzegawczych.

"Mroczki płytkiej wody" mogą wystąpić w efekcie nadmiernej wentylacji przed nurkowaniem na zatrzymanym oddechu - czyli wykonania więcej niż trzech lub czterech szybkich i głębokich oddechów. Nadmierna hiperwentylacja prowadzi do obniżenia poziomu dwutlenku węgla w układzie oddechowym i układzie krążenia do nienaturalnie niskiego poziomu. Problemem jest to, że podczas takiego nurkowania stężenie dwutlenku węgla nie osiągnie poziomu przy którym następuje stymulacja oddychania, aż do momentu, gdy tkanki zużyją cały tlen dostępny w organizmie. Nurek może pozostać pod wodą tak długo, że dojdzie do obniżenia stężenia tlenu do poziomu znacznie niższego niż podczas typowego nurkowania na zatrzymanym oddechu.

Pod wodą, zwiększone ciśnienie parcjalne O₂ w pęcherzykach płucnych pozwala hemoglobinie łączyć się z tlenem nawet wtedy, gdy stężenie tego gazu spadnie do poziomu, który nie pozwoliłby na łączenie z

hemoglobina na powierzchni. Gdy stężenie CO₂ wzrośnie do poziomu, na którym następuje stymulacja oddychania, pęcherzyki się wynurza, i wtedy PO₂ może gwałtownie spaść poniżej poziomu umożliwiającego hemoglobinie łączyć się z tlenem. Dochodzi wtedy do hipoksji (niedostatku tlenu), i nurek traci przytomność bez wystąpienia sygnałów ostrzegawczych. Może to prowadzić do utonięcia, ale dodatkowo hipoksja powoduje uszkodzenia tkanek, zwłaszcza nerwowej. Najbardziej zaawansowana i najbardziej szkodliwa dla tkanek hipoksja określana jest jako anoksja - stan, przy którym poziom tlenu we krwi spada do zera.

Zatrucie tlenkiem węgla

Chociaż do zatrucia tlenkiem węgla (CO) zazwyczaj dochodzi w sytuacjach nie związanych z nurkowaniem, oddychanie tlenkiem węgla pod ciśnieniem w trakcie nurkowania jest zwykle bardziej poważną i złożoną sprawą. W nurkowaniu, powodem zatrucia tlenkiem węgla są zazwyczaj problemy ze sprężarką, wytwarzającą tlenek węgla w ilościach przekraczających wydajność filtrów - co prowadzi do skażenia gazu oddechowego. Początkowo może to nie zostać zauważone, ponieważ tlenek węgla nie ma ani smaku, ani zapachu.

Powodem, dla którego tlenek węgla może stanowić zagrożenie, jest to, że hemoglobina wiąże się z nim ponad 200 razy łatwiej niż z tlenem, lecz nie uwalnia go równie łatwo. Gdy CO wniknie do krwiobiegu, układ krążenia potrzebuje 8 do 12 godzin na jego wydalanie. Dodatkowo, tlenek węgla wiąże się z różnymi enzymami, uczestniczącymi w różnorodnych procesach biochemicznych w twoim organizmie, i upośledza ich funkcje.

Gdy nurek oddycha powietrzem skażonym tlenkiem węgla, hemoglobina we krwi przepływającej przez naczynia włosowate pęcherzyków płucnych wiąże się z tym gazem, tworząc karboksyhemoglobinę. Powoduje to "zablokowanie" cząsteczek hemoglobiny, co uniemożliwia transport tlenu. Duże powinowactwo hemoglobiny do tlenku węgla nie pozwala na odłączenie cząsteczek CO podczas przepływu krwi przez tkanki - inaczej niż w przypadku odwracalnego połączenia hemoglobiny z tlenem. Gdy nurek kontynuuje oddychanie tlenkiem węgla, gaz wiąże się z kolejnymi cząsteczkami hemoglobiny, i pozostaje coraz mniej nieskażonych czerwonych krwinek zdolnych do przenoszenia tlenu. Jeśli proces postępuje, dochodzi do hipoksji - krew nie ma możliwości dostarczania wystarczającej ilości tlenu, by zaspokoić zapotrzebowanie tkanek.

Podczas nurkowania, dochodzą dodatkowe komplikacje związane z wzrastającym ciśnieniem - pod wodą tkanki mogą otrzymywać wystarczającą ilość tlenu, choć duża część hemoglobiny zablokowana jest przez tlenek węgla. Wynika to z faktu, że zwiększone ciśnienie parcjalne tlenu pozwala na przeniesienie przez osocze większej ilości tlenu niż jest to możliwe na powierzchni. Pomaga to zaspokoić zapotrzebowanie tkanek na tlen, i opóźnia wystąpienie symptomów zatrucia - bólu głowy, dezorientacji, zawężonego pola widzenia. Gdy nurek się wynurza (po pojawieniu się symptomów, bądź z innego powodu), PO₂ obniża się, i krew nie może więcej przynosić wystarczającej ilości tlenu. Pojawia się hipoksja, i nurek traci przytomność bez wystąpienia wcześniejszych objawów. Sytuacja jeszcze się komplikuje, gdy wszyscy nurkowie w grupie używają gazu z tego samego źródła - u wszystkich zatrucie tlenkiem węgla może wystąpić w tym samym momencie.

Zatrucie tlenkiem węgla może sprawić, że wargi i paznokcie poszkodowanego przybiorą barwę jasnoczerwoną - choć nie jest to częste. Hemoglobina połączona z tlenem ma barwę czerwoną, lecz związana z tlenkiem węgla przybiera barwę jeszcze bardziej jaskrawoczerwoną niż zwykle. Skażona krew może być zauważalna, gdy przepływa przez naczynia włosowate warg i paznokci, położone tuż pod powierzchnią skóry. Jednak nie zawsze jest to oczywiste, zwłaszcza pod wodą, gdzie zjawisko pochłaniania kolorów i noszony sprzęt mogą maskować objawy.

Do skażenia tlenkiem węgla powietrza używanego przez nurków dochodzi bardzo rzadko. Natomiast inną przyczyną zatrucia CO jest palenie papierosów. Fizjolodzy stwierdzili, że palenie papierosów powoduje wzrost stężenia tlenku węgla we krwi 3 do 12 razy. Może to upośledzać transport tlenu do tkanek i usuwanie dwutlenku węgla, zwłaszcza u ludzi z chorobą niedokrwinną serca. Krążenie przyspiesza, wzrasta ciśnienie krwi i tempo bicia serca, tak by niezablokowane krwinki czerwone mogły zaspokoić potrzeby tkanek dotyczące wymiany gazowej. Jest to przyczyną, dla której palenie wpływa pobudzająco na pracę serca.

Toksyczność tlenowa

Do początku lat dziewięćdziesiątych, toksyczność tlenowa nie była większym problemem w społeczności nurków rekreacyjnych. Wynikało to z faktu, że podczas nurkowania na powietrzu w limitach nurkowania

rekreacyjnego, niemal niemożliwe jest przekroczenie granic, powyżej których toksyczność tlenowa może wystąpić.

Uległo to zmianie w efekcie wzrostu popularności wzbogaconego powietrza - nitroksu (mieszanka oddechowa o zwiększonej zawartości tlenu w stosunku do powietrza, a zatem o obniżonej zawartości azotu) wśród nurków rekreacyjnych, oraz nurkowań technicznych z wykorzystaniem mieszanek o wysokiej zawartości tlenu lub czystego tlenu podczas dekompresji. Również w leczeniu hiperbarycznym, gdy jest to potrzebne, często stosuje się czysty tlen pod ciśnieniem, co również może powodować występowanie objawów toksyczności tlenowej.

Podczas dyskusji o toksyczności tlenowej, zazwyczaj rozróżnia się jej dwa główne typy. Pierwszy dotyczy symptomów w układzie oddechowym, zaś drugi - w układzie nerwowym. Toksyczność płucna tlenu wynika z przedłużonej ekspozycji na tlen pod ciśnieniem parcjalnym przekraczającym 0,5 atmosfery. Toksyczność tlenu dla centralnego układu nerwowego, albo mózgową (Central Nervous System - CNS toxicity), lub efekt Paula Berta (w 1878, Paul Bert pierwszy wykazał, że ciśnienie parcjalne tlenu było parametrem kontrolującym zachowanie zwierząt zarówno pod niskimi, jak i wysokimi ciśnieniami. W szczególności, wykazał on, że tlen pod wysokimi ciśnieniami działa jak trucizna dla centralnego układu nerwowego, i może powodować silne konwulsje), dotyczy reakcji układu nerwowego na ekspozycję na tlen, i jest zwykle nieprzewidywalna, za wyjątkiem faktu, że występuje pod wysokimi ciśnieniami parcjalnymi tlenu. Ciśnienia parcjalne tlenu nie przekraczające 1,4 bar są uważane za dopuszczalne z punktu widzenia zagrożenia toksycznością CNS. Ciśnienia parcjalne O₂ z zakresu 1,4 - 1,6 bar są dopuszczalne w trakcie dekompresji (w nurkowaniu technicznym), zaś dla ciśnień powyżej 1,6 bar zagrożenie toksycznością mózgową tlenu uważane jest za zbyt wysokie - w każdym razie, z nurkowego punktu widzenia.

W nurkowaniu jesteśmy szczególnie zainteresowani toksycznością płucną i mózgową tlenu, jednak na poziomie biochemicznym fizjologowie wyróżnili wiele form toksyczności tego gazu. Wynika to z faktu, że tlen jest gazem wysoce reaktywnym, roznoszonym przez krew po całym organizmie, i w związku z tym mającym potencjalny wpływ na wszystkie organy. Naukowcy stwierdzili, że ekspozycja na wysokie PO₂ może negatywnie wpływać na siatkówkę oka, błony komórkowe, naczynia włosowate, białka strukturalne, i wiele innych części organizmu. Na szczęście, większość z tych efektów zachodzi w znaczącym stopniu (lub w ogóle) tylko po ekspozycji na tlen o czasie i ciśnieniu parcjalnym znacznie wykraczającym poza wartości akceptowalne podczas nurkowania.

Fizjologowie dobrze poznali reakcje ludzkiego organizmu na toksyczność tlenową, jak również zbadali czas potrzebny do jego regeneracji. Jednak wciąż pozostaje wiele wątpliwości odnośnie sposobu, w jaki dochodzi do uszkodzeń. Generalnie, wydaje się, że pod wysokimi PO₂ tlen reaguje ze związkami chemicznymi w organizmie tworząc wolne rodniki, które z kolei reagują w destrukcyjny sposób ze związkami budującymi ciało. Twój organizm posiada systemy zwalczające wolne rodniki (które powstają podczas metabolizmu, aktywności fizycznej i w innych procesach), jednak ekspozycja na tlen pod wysokimi ciśnieniami może przekroczyć możliwości tych systemów. W efekcie, wolne rodniki zaczynają zaburzać lub modyfikować normalne procesy zachodzące w organizmie.

Toksyczność płucna tlenu

Toksyczność płucna tlenu, określana też jako efekt Lorraina Smitha (w 1899, Lorrain Smith opisał tą formę toksyczności u zwierząt eksperymentalnych), jest formą toksyczności tlenowej bezpośrednio wpływającą na płuca. Poza ekstremalnymi przypadkami (zwykle w efekcie lekceważenia wczesnych symptomów), toksyczność płucna nie jest poważnym problemem nawet jeżeli do niej dojdzie. Można jej też generalnie łatwo uniknąć - przez nie przekraczanie limitów ekspozycji tlenowej.

U większości osobników, toksyczność płucna tlenu wynika z ekspozycji na ciśnienie parcjalne tlenu powyżej 0,5 bara przez długi czas - im wyższe PO₂, tym krótszy czas potrzebny do jej wystąpienia. W efekcie, wystąpienie toksyczności płucnej tlenu jest bardzo mało prawdopodobne nawet podczas nurkowania na wzbogaconym powietrzu (nitroksie) przy zachowaniu limitów bezdekompresyjnych. Na głębokości 15 metrów, ciśnienie parcjalne tlenu podczas nurkowania na powietrzu wynosi 0,53 bara, i można się spodziewać wystąpienia toksyczności tlenowej. Na głębokości 40 metrów, PO₂ wynosi w przybliżeniu 1,04 bara; generalnie, do wystąpienia symptomów toksyczności płucnej należałoby pozostać na tej głębokości przez ponad 12 godzin. Podczas nurkowania na wzbogaconym powietrzu, te ciśnienia parcjalne zostałyby osiągnięte na mniejszych głębokościach, i należy się bardziej liczyć z wystąpieniem płucnej toksyczności tlenu, aczkolwiek wciąż jest to mało prawdopodobne przy pozostawaniu w granicach limitów bezdekompresyjnych.

Natomiast nurkowie techniczni, odbywający długą dekompresję na czystym tlenie pod ciśnieniem parcjalnym 1,6 bara, są w znacznie większym stopniu zagrożeni wystąpieniem toksyczności płucnej tlenu.

Jest to jeszcze bardziej prawdopodobne, gdy wykonują serie nurkowań, pomiędzy którymi odstępy są krótsze niż 24 godziny. Poza tym, naukowcy wykazali występowanie łagodnych symptomów toksyczności płucnej w efekcie bardzo długich ekspozycji na tlen pod ciśnieniem parcjalnym 0,25 bara; w związku z tym, teoretycznie możliwe jest pojawienie się symptomów podczas wykonywania serii długich, płytkich nurkowań w granicach powietrznych limitów bezdekompresyjnych, z bardzo krótkimi przerwami powierzchniowymi. Jest też możliwe, że w efekcie długiej ekspozycji, u nurków może występować lekka toksyczność płucna tlenu, z której jednak nie zdają sobie sprawy.

Podrażnienie płuc wydaje się najbardziej bezpośrednim i zauważalnym symptomem toksyczności płucnej. Może się zacząć jako łagodne podrażnienie gardła, a następnie kaszel. W ciężkich przypadkach może wystąpić uczucie pieczenia w klatce piersiowej oraz niekontrolowany kaszel. Toksyczność płucna powoduje też obniżenie pojemności życiowej i upośledzenie zdolności płuc do wymiany gazów, chociaż te objawy nie są istotne - poza ekstremalnymi przypadkami. Żaden z tych symptomów nie jest szczególnie niebezpieczny, pod warunkiem, że chwilowo zaprzestasz nurkowania, tak by dać organizmowi czas do regeneracji. Organizm łatwo się regeneruje po wystąpieniu toksyczności płucnej, po powrocie do warunków normoksycznych (normalne ciśnienie tlenu - PO₂ 0,21 bara). Ponieważ regeneracja wymaga zarówno zajścia odpowiednich procesów chemicznych, jak i naprawy strukturalnej, czas potrzebny do regeneracji może być bardzo różny. Jednak badania nad czasem potrzebnym do przywrócenia wyjściowej pojemności życiowej płuc po wystąpieniu toksyczności płucnej sugerują, że można oczekiwać pełnej regeneracji po upływie 10 do 36 godzin.

Toksyczność mózgowa tlenu

W nurkowaniu, formą toksyczności najbardziej cię dotyczącą jest toksyczność mózgowa tlenu (toksyczność dla centralnego układu nerwowego - Central Nervous System toxicity - CNS toxicity). Możesz osiągnąć limity ekspozycji zarówno podczas nurkowania rekreacyjnego na nitroksie, jak i podczas nurkowania technicznego z wykorzystaniem nitroksu i czystego tlenu. Podczas gdy toksyczność płucna tlenu nie jest poważnym problemem nawet jeśli wystąpi, toksyczność mózgowa może spowodować utonięcie nurka. Wystąpienie toksyczności mózgowej nie jest też uzależnione od relacji PO₂-czas, tak jak w przypadku toksyczności płucnej.

Toksyczność mózgowa tlenu powoduje wystąpienie symptomów dotyczących centralnego układu nerwowego, takich jak zaburzenia widzenia (widzenie tunelowe, zaburzenia ostrości widzenia), słuchu (dzwonienie w uszach, muzyka), występowanie mdłości, mimowolnych skurczów i fasykulacji (zwłaszcza mięśni twarzy), podrażnienia, oraz zawrotów głowy. Możesz zapamiętać te symptomy używając akronimu VENTID (V - visual system, E - ears, N - nausea, T - twitching, I - irritability, D - dizziness).

Jednak najpoważniejszym z objawów są konwulsje (drgawki tlenowe - hyperoxic seizure). Objawiają się one utratą przytomności i występowaniem silnych, powtarzalnych skurczów niemal wszystkich mięśni ciała, trwających około minuty - lub krócej, gdy obniżone zostanie ciśnienie parcjalne tlenu. Następnie poszkodowany intensywnie oddycha, i stopniowo powraca do pełnej świadomości w ciągu mniej więcej pół godziny. Chociaż testy w kontrolowanych warunkach wykazały, że same konwulsje są raczej nieszkodliwe (choć nieprzyjemne), to zagrożeniem jest szansa zgubienia ustnika przez nieprzytomnego nurka, który następnie może utonąć (z oczywistych względów, maski pełnotwarzowe i hełmy zmniejszają to ryzyko).

Testy prowadzone od lat 40 XX wieku wykazują, że im wyższe ciśnienie parcjalne O₂, tym szybciej pojawiają się symptomy i objawy toksyczności mózgowej tlenu. Pechowo z punktu widzenia planowania nurkowania, występują bardzo duże różnice w podatności na toksyczność mózgową tlenu, nie tylko pomiędzy osobami, ale także u jednej osoby z dnia na dzień lub z nurkowania na nurkowanie. Na przykład, w roku 1947 dr Ken Donald z Royal Navy wystawiał jednego ochotnika na ciśnienie parcjalne tlenu 3,0 bara w komorze testowej, dwudziestokrotnie w ciągu 90 dni. Czas potrzebny do wystąpienia objawów i symptomów toksyczności tlenowej wahał się od niecałych 20 minut do ponad dwóch i pół godziny, i nie zależał od żadnych mierzalnych parametrów.

Inne czynniki dotyczą osobniczej wrażliwości. Chociaż wyniki testów nie są jednoznaczne, aktywność fizyczna wydaje się obniżać odporność na toksyczność mózgową tlenu, prawdopodobnie dlatego, że ćwiczenia zwiększają stężenie dwutlenku węgla, powodując rozszerzenie naczyń i dostarczanie jeszcze większej ilości tlenu do mózgu. Poza tym, istnieją doniesienia, że leki stymulujące centralny układ nerwowy mogą także zwiększać podatność na toksyczność mózgową tlenu.

Monitorowanie ekspozycji tlenowej

Duże zróżnicowanie w podatności na toksyczność mózgową tlenu wyklucza wyliczenie praktycznych limitów PO₂-czas - jednak właściwie upraszcza to monitorowanie zagrożenia. Unikasz wystąpienia toksyczności mózgową tlenu poprzez takie planowanie nurkowań, by twoje PO₂ pozostało na tyle niskie, żeby toksyczność mózgową nigdy nie występowała. Podczas nurkowania rekreacyjnego i technicznego, tą granicą jest 1,4 bara dla dennej (aktywnej) części nurkowania. Podczas dekompresji w nurkowaniu technicznym, dozwolony jest limit 1,6 bara, ponieważ w czasie dekompresji pozostajesz w stanie spoczynku. Z drugiej strony, toksyczność płucna jest stosunkowo przewidywalna na podstawie czasu ekspozycji i ciśnienia parcjalnego tlenu. Do celów rekreacyjnych, większość nurków uznaje za najprostsze pozostawanie w granicach limitów tlenowych dla pojedynczej ekspozycji, określonych przez U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Limity tlenowe dla pojedynczej ekspozycji, wg NOAA

PO ₂ [bar]	Czas
0,6	720 min
0,7	570 min
0,8	450 min
0,9	360 min
1,0	300 min
1,1	240 min
1,2	210 min
1,3	180 min
1,4	150 min
1,5	120 min
1,6	45 min

Dla zwiększonej użyteczności w przypadku wykonywania nurkowań wielokrotnych bądź wielopoziomowych, limity NOAA mogą być stosowane jako procent dozwolonej ekspozycji. Jest to podstawą rozprawdzanych przez PADI tabel ekspozycji tlenowej DSAT, oraz niepoprawnie nazwanego "zegara toksyczności mózgową", często wykorzystywanego przez społeczność nurkową (limity NOAA służą zapobieżeniu wystąpienia toksyczności płucnej, a nie mózgową).

Limity NOAA powstały w celu stosowania przez nurków naukowych, którzy nieraz nurkują przez wiele dni z rzędu. Jednak pomimo łatwości stosowania, metodologia ta okazała się zbyt mało elastyczna dla nurków komercyjnych i technicznych, którzy mogą odbywać przedłużoną dekompresję przy wysokich ciśnieniach parcjalnych tlenu. Ci nurkowie stosują metodę Repex, wynalezioną przez doktora R. W. Hamiltona, odnoszącą się do pozostawania w granicach limitów toksyczności płucnej.

Metoda Repex oblicza ekspozycję tlenową w porcjach zwanych jednostkami toksyczności tlenu (Oxygen Toxicity Units - OTUs), wyliczanych następująco:

$$\text{OTUs} = \text{czas w minutach} \times [(\text{PO}_2 - 0,5) \div 0,5]0,83$$

Dozwolona dzienna ilość OTUs zależy od skumulowanej ekspozycji tlenowej w ciągu wielu dni. Na przykład, jeśli nurkujesz przez jeden dzień, możesz mieć 850 OTUs, lecz przy codziennym nurkowaniu przez kolejne 10 dni, limit wynosi ok. 300 OTUs dziennie. Jeśli porównasz limity NOAA z limitami metody Repex, zobaczysz że limity NOAA pozwalają na maksymalnie 300 OTUs - co jest limitem metody Repex dla nurkowania wielodniowego. Te dwa systemy są zbieżne, lecz metoda Repex jest bardziej elastyczna, jako że pozwala na wyższą ekspozycję jeśli nie zamierzasz nurkować przez wiele kolejnych dni. W nurkowaniu technicznym, przyjętą praktyką jest pozostawanie w granicach zarówno limitów metody Repex, jak i "zegara toksyczności mózgową" NOAA.

Oddychanie czystym tlenem na powierzchni praktycznie nie stwarza zagrożenia wystąpienia toksyczności mózgową, ponieważ ciśnienie parcjalne wynosi jedynie 1,0 bara. Wystąpienie poważniejszych symptomów toksyczności płucnej w tych warunkach wymagałoby ponad 12 godzin nieprzerwanej ekspozycji na działanie tlenu. Dlatego też ratownicy medyczni w sytuacjach awaryjnych mogą zawsze podać pacjentowi (nawet

nurkowi) tlen, bez obaw o możliwość wystąpienia toksyczności tlenowej. Natomiast szpitale zazwyczaj redukują stężenie tlenu w sytuacjach, gdy pacjent wymaga dłuższego leczenia pod zwiększonym ciśnieniem O₂.

Inną procedurą, która wydaje się mieć znaczenie w monitorowaniu ekspozycji tlenowej w nurkowaniu technicznym, jest stosowanie przerw powietrznych (air breaks) - czyli dokonywania regularnej zamiany gazu stosowanego podczas dekompresji na powietrze lub inny gaz o niskiej zawartości tlenu, w celu chwilowego zmniejszenia PO₂. Zazwyczaj, nurkowie techniczni odbywający dekompresję na czystym tlenie na głębokości 6 metrów, przestawiają się na powietrze, lub inny gaz o niskiej zawartości tlenu, na pięć minut w ciągu każdych 20 minut dekompresji. Podczas nurkowań wymagających dłuższej dekompresji, nurkowie techniczni mogą wykonywać przerwy powietrzne podczas wszystkich przystanków, podczas których są wystawieni na PO₂ równe 1,6 bara. Wyniki niektórych badań sugerują, że jeszcze lepsze byłoby wykonywanie częstszych, krótszych przerw, na przykład trzyminutowe przerwy co 10-12 minut. Te przerwy zazwyczaj nie są doliczane do czasu dekompresji.

Uzasadnienie stosowania przerw powietrznych wynika z dużych ilości danych eksperymentalnych i z rzeczywistych nurkowań, wskazujących, że przerwy znacznie zwiększają tolerancję na tlen, a w szczególności opóźniają wystąpienie toksyczności tlenowej. Fizjolodzy uważają że wynika to z faktu, że wiele z mechanizmów upośledzanych przez wysokie ciśnienia parcjalne tlenu może w dużym stopniu ulegać naprawie w ciągu zaledwie kilku minut, nawet jeśli do całkowitej regeneracji musi upłynąć kilka godzin. Przerwy powietrzne wprowadzone zostały w oparciu o ten mechanizm szybkich napraw, i znacznie zmniejszają one ryzyko toksyczności tlenowej.

Narkoza gazowa

Głębokie nurkowanie może powodować zetknięcie się z innym problemem, związanym z rozpuszczaniem się gazów w twojej krwi i ich docieraniem do układu nerwowego za pośrednictwem układu oddechowego i krążenia. Jest nim narkoza gazowa - euforyczny, znieczulający efekt znany też jako „euforia głębin”.

Potocznie określany jest również jako narkoza azotowa, ponieważ azot jest jej najczęstszym sprawcą; jednak inne gazy, takie jak argon, dwutlenek węgla i tlen, mają takie samo lub silniejsze działanie znieczulające jak azot, i albo wywołują działanie bezpośrednio znieczulające, albo współdziałają z innymi gazami w powodowaniu narkozy. W związku z tym, termin „narkoza gazowa” jest właściwszy.



Narkoza gazowa może upośledzać ocenę sytuacji i opóźnić reakcję na pojawiające się problemy. Na głębokości 55 metrów, większość nurków będzie dotkniętych narkozą w takim stopniu, że będą sami zdawać sobie sprawę z zatrucia i euforii

Podczas oddychania powietrzem lub wzbogaconym powietrzem (nitrokssem), narkoza gazowa rozwija się wraz ze wzrostem ciśnień parcjalnych azotu i tlenu w miarę zanurzania. Chociaż duże znaczenie ma indywidualna wrażliwość i zmienność osobnicza, w testach efekt zazwyczaj staje się zauważalny na głębokości około 30 metrów. Na tej głębokości, narkoza jest zwykle łagodna, i objawia się spowolnieniem procesów myślowych, wydłużonym czasem rozwiązywania problemów, a u niektórych nurków lekkim wrażeniem euforii i dobrego samopoczucia.

Efekt narkotyczny wzrasta z głębokością. Czas rozwiązywania problemów ulega wydłużeniu, pogarszają się również zdolności motoryczne. Narkoza może upośledzać ocenę sytuacji i wydłużać czas reakcji na pojawiające się problemy. Przed osiągnięciem głębokości 55 metrów, większość nurków będzie dotkniętych

narkozą w takim stopniu, że będą świadomie zdawać sobie sprawę z zatrucia i wrażenia euforii. Eksperymenty oraz doświadczenie pokazują, że poniżej 60 metrów narkoza silnie wpływa na sprawność nurka, upośledzając zdolność koncentracji i obserwacji otoczenia. Nurkowie schodzący na te głębokości zgłaszają halucynacje wzrokowe i słuchowe, oszołomienie, paranoję i depresję. Zdaniem większości fizjologów, narkoza sama w sobie nie jest szkodliwa. Przemija szybko po zmniejszeniu głębokości, tak że większość nurków odczuwa jej zmniejszenie na długo przed osiągnięciem powierzchni. Nieznane są skutki następne, prócz tego, że niekiedy nurkowie zgłaszają zaburzenia pamięci dotyczące części nurkowania odbytej pod wpływem narkozy. Zatem problemem związanym z narkozą nie jest sama narkoza, ale powodowane przez nią upośledzenie - opóźnianie reakcji na problemy, negatywny wpływ na decyzje dotyczące bezpieczeństwa i zaburzenie zdolności motorycznych. To właśnie narkoza (jako dodatek do bardzo skróconych czasów bezdekompresyjnych) jest powodem, dla którego limit głębokości dla osób nurkujących rekreacyjnie na powietrzu i nitroksie ustalono na 40 metrów. W nurkowaniu technicznym, maksymalna głębokość dla nurków na powietrzu wynosi generalnie od 50 do 55 metrów (w społeczności nurków technicznych występują różnice zdań) dla pojedynczych nurkowań prowadzonych w dobrych warunkach. US Navy ustaliło 58 metrów jako górną granicę dla osób nurkujących na powietrzu, a większość firm zajmujących się nurkowaniem komercyjnym ustaliło swoje limity na tym samym poziomie. Efekty narkotyczne są często porównywane do efektów działania alkoholu. „Prawo Martini” potocznie opisuje siłę narkozy, która na głębokości 30 metrów ma moc jednego martini, a co 15 metrów zwiększa się o kolejne martini. Wielu nurków obytych z nurkowaniem na powietrzu lub nitroksie w tym przedziale głębokości opisuje to jako względnie dokładne (nawet jeśli nieco subiektywne) przybliżenie.

Przyczyny narkozy gazowej

Podobnie jak z wieloma innymi aspektami fizjologii nurkowania, w wypadku narkozy wiadomo więcej o jej skutkach, niż o sposobie ich powstawania. Dokładny mechanizm narkozy nie jest do końca poznany, ale wiadomo, że niemal każdy gaz może powodować znieczulenie pod wysokimi ciśnieniami parcjalnymi - włącznie z gazami obojętnymi.

Fizycy opisują azot jako gaz fizjologicznie obojętny. Nie oznacza to, że jest on zupełnie niereaktywny (bierze udział w wielu reakcjach chemicznych), lecz to, że nie wchodzi w żadne reakcje chemiczne w obrębie twojego ciała. Żadna część wdychanego azotu nie jest używana do budowy białek lub enzymów - wchodzący w ich skład azot pochodzi wyłącznie z pożywienia.

To, że azot jest gazem „obojętnym” nie oznacza jednak, że nie powoduje żadnych efektów. Na przykład, gdy podczas nurkowania rozpuszcza się w twoich tkankach, to przy zbyt szybkim wynurzeniu wydzielający się z roztworu w postaci pęcherzyków gaz może powodować chorobę dekompresyjną (szczegółowo omówioną pod koniec tego rozdziału). Po rozpuszczeniu w tkance mózgowej, gazy reaktywne i niereaktywne, włącznie z azotem, mogą działać jak środki znieczulające. Można porównać narkozę azotową do efektu działania innego gazu o właściwościach narkotycznych, podtlenku azotu, N₂O. Podtlenek azotu, określany niekiedy jako „gaz rozweselający”, był powszechnie używanym środkiem znieczulającym, zwłaszcza w dentystyce, ze względu na działanie narkotyczne już pod ciśnieniem atmosferycznym. W wyższych stężeniach powoduje euforię, objawy podobne do nietrzeźwości, i w bardzo krótkim czasie utratę przytomności. Efekty jego działania są zależne od ciśnienia: przy podwojeniu ciśnienia, mniej więcej dwukrotnie zwiększa się efekt.

Potencjał narkotyczny gazu jest w przybliżeniu proporcjonalny do jego rozpuszczalności w tłuszczach. Zgodnie z tym przybliżeniem, hel byłby tylko w jednej piątej tak narkotyczny jak azot, podczas gdy dwutlenek węgla wywierał dwudziestokrotnie, a tlen - 1,6 razy silniejszy efekt narkotyczny. Jednakże testy na ludziach wykazały, że nie można mierzyć narkozy w tak prosty sposób.

Nietypowym gazem w związku z wpływem na narkozę jest tlen. Głębokie (powyżej 90 m) nurkowania testowe wykazały, że mieszanka zawierająca 4% tlenu i 96% azotu ma silniejsze działanie narkotyczne od powietrza, nie zaś słabsze - jak można się spodziewać w oparciu o wyższą rozpuszczalność tlenu niż azotu w tłuszczach. Jednak inne testy wykazały, że wzrost stężenia tlenu w mieszaninie z azotem rzeczywiście zwiększa narkozę. Większość fizjologów nurkowania tłumaczy tę pozorną niezgodność występowaniem nieznanej dotychczas zależności pomiędzy azotem i tlenem. A chociaż jest jasne, że tlen przyczynia się do narkozy (z tego właśnie powodu traktujesz powietrze i nitroks jako gazy o tym samym potencjale narkotycznym), jego efekt narkotyczny nie wydaje się być związany wyłącznie z jego rozpuszczalnością w tłuszczach.

Dwutlenek węgla jest kolejnym gazem przyczyniającym się do występowania narkozy. Liczne badania wykazały, że wzrost stężenia CO₂ - albo w gazie używanym do oddychania, albo przez jego nagromadzenie

w układzie oddechowym w związku z objętością przestrzeni martwych i z gęstością gazu używanego do oddychania - nasila narkozę. Dokładny mechanizm jest nawet słabiej znany od wpływu tlenu. Niektóre badania wskazują, że CO₂ ma w przybliżeniu dziesięciokrotnie silniejszy efekt narkotyczny od azotu - nie zaś 13 do 20 razy silniejszy, jak należałoby oczekiwać na podstawie pomiarów jego rozpuszczalności w tłuszczach.

Czynniki przyczyniające się do wystąpienia narkozy. Pomędzy osobami występują znaczne różnice w podatności na narkozę azotową, podobnie jak we wrażliwości na jakąkolwiek inną formę intoksykacji. Zatem, na danej głębokości będziesz dotknięty narkozą w mniejszym lub w większym stopniu niż inni nurkowie. Jednakże testy wykazały, że zróżnicowanie nie jest bardzo duże, i na głębokościach powodujących narkozę wszyscy badani wykazują obniżenie zdolności matematycznych, koordynacji i pamięci krótkoterminowej. Jednak wyniki tych testów nie są stałe - wiele parametrów wpływa na osobniczą wrażliwość na wystąpienie narkozy. Innymi słowy, nie możesz być pewien, że podczas nurkowania następnego dnia będziesz mieć umysł równie jasny jak w dniu poprzednim.

Oprócz znieczulającego wpływu azotu i tlenu, spożywanie niektórych leków może przyczynić się do wystąpienia narkozy na głębokościach znacznie mniejszych niż 40 metrów. Większość osób zdaje sobie sprawę z efektów jednoczesnego zażywania substancji takich jak alkohol i Valium, ponieważ ich efekty będą się wzajemnie wzmacniać. Dokładnie taka sama sytuacja występuje w przypadku łączenia narkozy gazowej z substancjami takimi jak alkohol, środki uspokajające i nasenne, czy barbiturany. Nawet środki, których możesz nie uważać za środki uspokajające, takie jak lekarstwa przeciwko chorobie lokomocyjnej, alergiom lub biegunce, mogą powodować nasilenie narkozy. Typowe przykłady to Marezine, Contac i Lomotil¹. Wszystkie te lekarstwa wywierają efekt antycholinergiczny, co oznacza, że blokują przekazywanie części sygnałów nerwowych. Wydaje się to być główną przyczyną wystąpienia znieczulenia. Na poziomie morza, leki te mogą nieznacznie upośledzać sprawność umysłową, lecz ty możesz tego nie zauważać. Jednak na większych głębokościach efekty ich działania poprzez działanie synergistyczne mogą nasilać narkozę gazową. Pod tym względem, alkohol jest szczególnie silnym środkiem, ale inne wymienione substancje również mogą powodować narkozę. Aby nie zostać zaskoczonym przez narkozę, wypróbuj leki przeciw chorobie morskiej najpierw na powierzchni, a potem podczas płytkich nurkowań. Niektóre z tych leków przyczyniały się do występowania bardzo silnej narkozy na głębokościach tak niewielkich jak 18 metrów.

Z kolei, pewne inne czynniki wydają się mieć działanie bardziej subiektywne i zależne od cech indywidualnych. Nurkowie często mają wrażenie silniejszej narkozy w gorszych warunkach, na przykład w zimnej wodzie i przy ograniczonej widoczności raczej niż w ciepłej wodzie o dużej przejrzystości. Jednak obiektywnie przeprowadzane testy wskazują, że siła narkozy jest mniej więcej taka sama, ale stres, duża ilość zadań do wykonania i inne czynniki umysłowe mogą sprawić, że będzie ona bardziej zauważalna w niektórych sytuacjach niż w innych.

Hipoteza Meyera-Overtona. Najczęściej stosowanym przez fizjologów wyjaśnieniem występowania narkozy gazowej jest hipoteza Meyera-Overtona. W potocznej formie, stanowi ona: Wszystkie gazowe bądź lotne substancje wywołują narkozę, o ile przenikają przez błony komórkowe w określonych stężeniach, charakterystycznych dla każdej grupy zwierząt, a relacja pomiędzy stężeniem a siłą narkozy jest w przybliżeniu taka sama dla wszystkich lotnych substancji o działaniu narkotycznym. Jak wspomniano wcześniej, zgodnie z tą hipotezą efekt narkotyczny gazu jest wprost proporcjonalny do jego rozpuszczalności w tłuszczach, które są podstawowym materiałem strukturalnym w komórkach. Rozpuszczalność azotu w tłuszczach jest znacznie wyższa niż rozpuszczalność helu, więc jego potencjał narkotyczny jest znacznie wyższy. Obecnie uważa się, że narkoza zachodzi na połączeniach nerwowych, nazywanych synapsami, gdzie azot zaburza przekaz sygnału elektrycznego pomiędzy neuronami (komórkami nerwowymi). Przede wszystkim, wywiera to wpływ na części mózgu odpowiedzialne za stan gotowości i koordynację i oznacza, że proces przekazywania informacji pomiędzy neuronami będzie wolniejszy. Hipoteza Meyera-Overtona jest wytłumaczeniem przydatnym, ale nie idealnym. Efekt narkotyczny wielu gazów jest proporcjonalny do ich rozpuszczalności w tłuszczach, ale dla innych (zwłaszcza tlenu i dwutlenku węgla) jest inaczej. W związku z tym, fizjolodzy uważają że hipoteza Meyera-Overtona częściowo tłumaczy występowanie narkozy gazowej, ale znaczenie mają także inne procesy biochemiczne, z których wiele jest wciąż badanych.

¹ W tekście podano nazwy handlowe leków stosowanych powszechnie w Stanach Zjednoczonych. W Polsce, W Polsce, przykładami leków o takim działaniu są Aviomarin (przeciw chorobie lokomocyjnej), Contac (przeciw alergiom), Reasec (przeciw biegunce) (przyp. tłum.)

Kontrolowanie narkozy

Są trzy podstawowe sposoby zapobiegania i zmniejszania wpływu narkozy gazowej: ograniczanie głębokości, przyzwyczajanie się do narkozy, i stosowanie alternatywnych mieszanek gazowych.

Ograniczanie głębokości.

Jak wspomniano wcześniej, jednym z powodów ustalenia maksymalnej głębokości dla nurków rekreacyjnych na 40 metrów jest ograniczanie narkozy gazowej. Jest to najbardziej bezpośrednia metoda przeciwdziałania narkozie azotowej. Jednak twoja wrażliwość na narkozę może się zmieniać na skutek interakcji z lekami bądź przez czynniki subiektywne, i dlatego powinieneś traktować 40 metrów jako największą dopuszczalną głębokość, ustalając płytszą maksymalną głębokość na podstawie twojej własnej wrażliwości na narkozę.

Przyzwyczajanie się do narkozy.

Nurkowie techniczni, komercyjni oraz inni stosujący powietrze bądź wzbogacone powietrze poniżej 40 metrów, mogą częściowo ograniczyć narkozę poprzez przyzwyczajanie się do niej. W mniejszym stopniu dotyczy to nurków rekreacyjnych, nurkujących w przedziale głębokości od 18 do 40 metrów. Przyzwyczajanie oznacza, że radzisz sobie z narkozą przez doświadczenie i szkolenie. Nurkowie często zgłaszają zmniejszenie narkozy po wykonaniu kilku głębokich nurkowań na powietrzu lub nitroksie w krótkim okresie czasu. W niektórych przypadkach, nurkowie nurkujący na powietrzu/nitroksie nie odczuwali narkozy nawet na głębokościach rzędu 50 metrów - po zdobyciu doświadczenia w nurkowaniu na te głębokości. Natomiast nurkowie używający powietrza poniżej 60 metrów często twierdzą, że odczuwanie narkozy zmniejsza się po kilku nurkowaniach.

Wydaje się, że przez zdobywanie doświadczenia z narkozą, uczysz się radzić sobie z nią (świadomie i nieświadomie) przez silniejsze koncentrowanie się, pozostawianie sobie więcej czasu na różne czynności, i wizualizację (wyobrażanie sobie przed nurkowaniem) nurkowania i sytuacji awaryjnych. Jest też jasne, że zdolności motoryczne i procedury wyuczone aż do automatyczności (poziomu, przy którym nie jest konieczne świadome myślenie) opierają się upośledzeniu przez narkozę, chociaż narkoza może opóźnić odczucie konieczności wykonania takiej umiejętności bądź procedury.

Chociaż jest pewne, że można do pewnego stopnia ograniczyć odczuwanie narkozy, trwają dyskusje na temat możliwości uzyskania prawdziwej, fizjologicznej odporności na nią. W różnych eksperymentach uzyskano sprzeczne wyniki, i jak na razie brak ostatecznej odpowiedzi.

Użycie alternatywnych mieszanek oddechowych.

Innym sposobem radzenia sobie z narkozą gazową jest używanie gazów o ograniczonym działaniu narkotycznym. Nurkowie techniczni, naukowcy, komercyjni i wojskowi stosują mieszanki helowe do głębokich nurkowań w celu eliminacji lub mocnego ograniczenia narkozy (jak również celem zmniejszenia gęstości gazu). Nurkowie komercyjni i militarni zazwyczaj stosują helioks (mieszankę tlenu i helu), podczas gdy nurkowie techniczni częściej używają trimiksu (mieszanki tlenu, helu i azotu). Im głębsze nurkowanie, tym wyższa jest zawartość helu potrzebna do zmniejszania narkozy. Największym problemem jest wydłużenie czasu dekompresji przy zwiększeniu ilości helu w mieszance kosztem tlenu i azotu.

Chociaż hel ogranicza narkozę, w gazie oddechowym wciąż występuje tlen, a w trimiksie również azot. Oznacza to, że należy wyznaczyć maksymalną głębokość, na jakiej mieszanka gazowa może być używana, ze względu na jej potencjał narkotyczny. W nurkowaniu technicznym wyznacza się Równoważną Głębokość Narkotyczną (Equivalent Narcotic Depth - END), czyli głębokość, na której należy oczekiwać takiej samej narkozy jak podczas nurkowania na powietrzu/nitroksie.



Dla przykładu, mieszanka zawierająca 11% tlenu, 50% helu i 39% azotu (TMx 11/50) posiada END na głębokości 90 metrów wynoszące w przybliżeniu 40 metrów. Innymi słowy, spodziewasz się mniej-więcej takiej samej narkozy przy nurkowaniu z użyciem tej mieszanki na 90 metrów, jaką miałbyś używając powietrza bądź nitroksu na głębokości 40 metrów.

W zarządzaniu narkozą, nurkowie techniczni stosują limity głębokości, przyzwyczajanie oraz alternatywne mieszanki gazowe. Generalnie, powietrze/nitroks jest akceptowalne do głębokości 40

metrów (tak jak u nurków rekreacyjnych), choć w dobrych warunkach, na wodach otwartych, powietrze/nitroks może być stosowane podczas nurkowań dekompresyjnych do głębokości 50 metrów. Trimiks jest wymagany podczas wszystkich nurkowań na głębokości przekraczające 50 metrów, w miejscach bez bezpośredniego dostępu do powierzchni poniżej 40 metrów, oraz podczas nurkowań na wodach otwartych poniżej 40 metrów gdy warunki i/lub założenia nurkowania są bardziej wymagające.

Syndrom nerwowy wysokich ciśnień

Chociaż hel przyczynia się do zmniejszenia narkozy w nurkowaniu technicznym, komercyjnym i innych formach nurkowania głębokiego, na bardzo dużych głębokościach wywiera inny efekt - syndrom nerwowy wysokich ciśnień (High Pressure Nervous Syndrome - HPNS). W zależności od względnych zawartości azotu i helu w mieszance oddechowej, HPNS może wystąpić już na głębokości 90 metrów, chociaż zwykle wiąże się go z nurkowaniami na głębokości przekraczające 120 metrów. Jak dotąd, HPNS był problemem głównie w nurkowaniu komercyjnym, ale doświadczali go także nurkowie techniczni, i przypuszczalnie będzie coraz większym problemem w nurkowaniu technicznym, jako że istnieje tendencja to zwiększania głębokości nurkowań.

Podobnie jak narkoza, HPNS wpływa na układ nerwowy, ale w inny sposób - inne są objawy i symptomy. Może wystąpić drżenie rąk, skurcze, mdłości, zawroty głowy i utrata koordynacji, podobnie jak obniżenie sprawności umysłowej. Nurkowie mogą całkowicie utracić świadomość otoczenia, mogą też wystąpić objawy takie, jak nierozróżnianie ręki prawej od lewej. Podobnie jak w wypadku narkozy, występują znaczne różnice w osobniczej podatności na syndrom nerwowy wysokich ciśnień.

Fizjolodzy nie rozumieją dobrze mechanizmu powodującego HPNS. Wydaje się, że hel pod ciśnieniem zaburza procesy biochemiczne w komórkach nerwowych lub związane z układem nerwowym. Badania wskazują, że hel zaburza liczne procesy w obwodowym układzie nerwowym na wiele różnych sposobów; nie ma jasnych danych wskazujących na występowanie żadnego konkretnego mechanizmu, jest zatem możliwe, że wiele niezależnych procesów biochemicznych powoduje HPNS. Naukowcy stwierdzili również, że im szybsze tempo zanurzania (kompresji), tym silniejszy HPNS.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU:

- **Noś dobrze dopasowane skafandry i kaptury, aby unikać wywierania ciśnienia na receptory w zatokach szyjnych. Jeśli jakiś element sprzętu zbytnio uciska twoją szyję, popraw go lub wymień przed nurkowaniem.**
- **Zawsze podczas pobytu pod wodą oddychaj powoli, głęboko i nieprzerwanie. Nie wstrzymuj oddechu i unikaj przemęczenia.**

- Przestrzegaj zaleceń producenta dotyczących pojemności absorbenta CO₂ w rebreatherach o obiegu zamkniętym i półzamkniętym, oraz jego pakowania.
- Aby uniknąć „mroczków płytkiej wody” unikaj hiperwentylacji składającej się z więcej niż trzech-czterech oddechów przed nurkowaniem na zatrzymanym oddechu.
- Napełniaj butlę tylko w renomowanych bazach/centrach nurkowych.
- Jeśli doświadczysz objawów hiperkapni nie przemijających podczas odpoczynku, albo zatrucia tlenkiem węgla, natychmiast przerwij nurkowanie.
- Nurkuj na wzbogaconym powietrzu - nitroksie, czystym tlenie lub jakimkolwiek innym od powietrza gazie tylko wtedy, gdy jesteś odpowiednio wyszkolony i uprawniony do użycia danej mieszanki. Nie przekraczaj limitów ekspozycji tlenowej.
- Jeśli jesteś nurkiem technicznym, wprowadzaj przerwy na oddychanie powietrzem jako rutynową czynność podczas dekompresji przy ciśnieniu parcjalnemu tlenu wynoszącym 1,6 bara.
- Palenie tytoniu jest szkodliwe, i powinieneś go unikać. Jeśli nie jesteś w stanie całkiem z niego zrezygnować, powstrzymaj się przynajmniej przez 10-12 godzin przed i po nurkowaniu. Jeśli palisz, zasięgnij opinii lekarza przed zaangażowaniem się w nurkowanie, zwłaszcza jeśli dziennie wypalasz paczkę papierosów lub więcej.
- Ograniczaj narkozę gazową przez dostosowywanie maksymalnej głębokości do twojego poziomu wyszkolenia, doświadczenia i indywidualnej wrażliwości. Optymalnie, naucz się radzić sobie z narkozą pod profesjonalnym nadzorem, najlepiej podczas kursu specjalistycznego PADI Nurkowanie Głębokie (*Deep Diver Specialty*).
- Podczas planowania nurkowania, rozważ możliwy wpływ alkoholu i lekarstw na narkozę gazową.

Odpowiedź fizjologiczna na zmiany temperatury

W środowisku lądowym organizm ludzki wystawiony jest na szeroki zakres temperatur, i w związku z tym posiada mechanizmy utrzymujące stałą temperaturę. Utrzymywanie stałej temperatury ciała (około 37°C) jest kluczowe dla prawidłowego zachodzenia procesów chemicznych niezbędnych dla twojego funkcjonowania. Odchylenia od tej temperatury w górę lub w dół, o amplitudzie większej niż kilka stopni i trwające dłużej niż chwilę, mogą zagrażać życiu.

Inaczej niż w przypadku pozostałych zagadnień wynikających z fizjologii nurkowania, podczas nurkowania w skafandrach ochronnych w ciepłym klimacie uwarunkowania termiczne mogą mieć znaczenie jeszcze przed rozpoczęciem nurkowania. Generalnie, problemem może być wtedy zbyt wysoka temperatura. Gdy wejdiesz do wody, twoje ciało będzie zmuszone reagować na warunki termiczne stworzone przez wodę, czyli na utratę ciepła; może to czynić w pewnym zakresie i przez określony czas, zwłaszcza gdy jest chronione izolującym skafandrem.

Reakcje na ciepło



Podczas nurkowania w zimnej wodzie, wymagającej używania grubych skafandrów, przed nurkowaniem może pojawić się ryzyko przegrzania przy gorącej, słonecznej pogodzie

Zbyt dużo ciepła rzadko jest problemem podczas nurkowania, gdyż nawet stosunkowo ciepła woda odprowadza ciepło od ciała. Jednak często ma to znaczenie przed i po nurkowaniu, szczególnie w obszarach o gorącym klimacie, w których występuje zimna woda, stwarzająca konieczność korzystania z grubego skafandra.

Gdy temperatura ciała wzrasta - albo na skutek przebywania w gorącym miejscu, wykonywania rozgrzewających ćwiczeń, albo kombinacji tych czynników, zaczynają zachodzić procesy fizjologiczne mające za zadanie powstrzymanie wzrostu temperatury twojego ciała.

Najpierw rozszerzają się naczynia włosowate skóry, umożliwiając wypromieniowywanie ciepła z krwi przez skórę. Później zaczynasz się pocić, chłodząc skórę - a przez to również krew - przez parowanie. Jeżeli temperatura ciała pozostaje wysoka, wzrasta puls i częstość pracy serca, przyspieszając cyrkulację krwi dla szybszego chłodzenia, wzrasta też częstość oddechu.

Reakcje te zachodzą będą do momentu, gdy temperatura ciała powróci do normy, co w praktyce ma miejsce gdy znajdziesz się w chłodniejszym środowisku (wejdiesz do wody), lub zaprzestasz wykonywania ćwiczenia. Jeśli nie nastąpi to dość szybko, ciało będzie kontynuowało próby obniżenia temperatury, aż do wyczerpania swych fizjologicznych możliwości. Im bardziej sprawny fizycznie jesteś i im mniej tkanki tłuszczowej posiadasz, tym lepiej możesz sobie radzić z hipertermią (przegrzaniem), ale po przekroczeniu pewnych granic możesz doświadczyć wyczerpania cieplnego bądź szoku cieplnego (omówione

wkrótce).

Reakcje na zimno

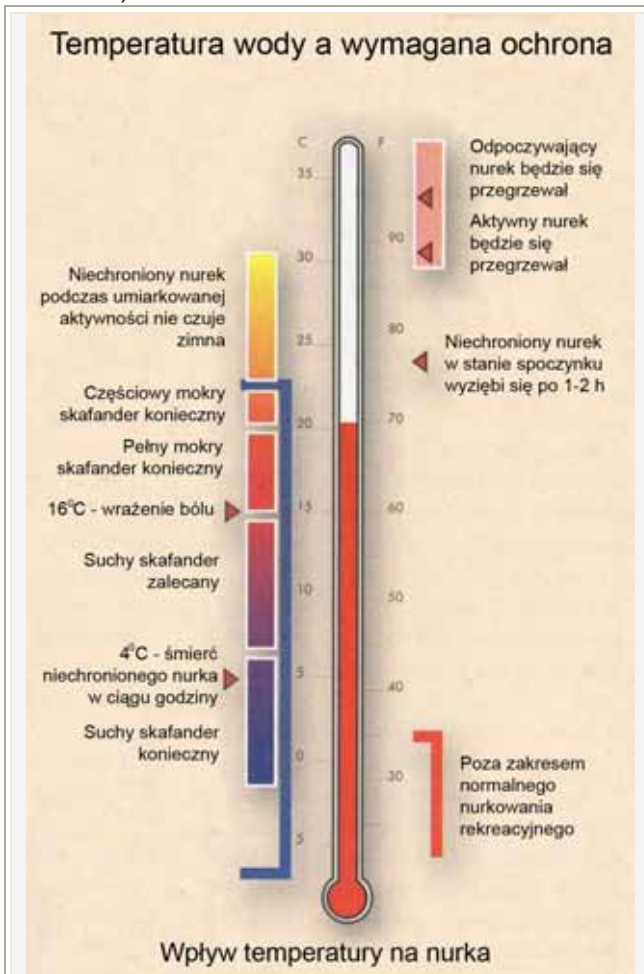
Twoje ciało jest zaopatrzone w mechanizmy fizjologiczne chroniące je przed obniżeniem temperatury. Jak opisano w rozdziale IV, woda przewodzi ciepło dwudziestokrotnie szybciej niż powietrze, i wymaga znacznie więcej ciepła do ogrzania określonej objętości. Oznacza to, że przy takiej samej temperaturze, przy której w powietrzu będzie ci ciepło, w wodzie szybko poczujesz się zimno i niekomfortowo. Na przykład, bez izolującego skafandra, przeciętny nurek niebezpiecznie wyziębnie się w pół godziny w wodzie o temperaturze 16°C, a przeżyje zaledwie około dwóch godzin w wodzie o temperaturze 4°C. Dla większości nurków, woda musi mieć temperaturę przynajmniej 27°C by mogli wytrzymać dłuższy czas bez izolującego skafandra, choć dla wielu osób ta temperatura jest wciąż zbyt niska, by czuli się komfortowo.

Pomijając bardzo ciepłą wodę, skafander ochronny nie zmienia sposobu reagowania organizmu na zimno. Izolując twoje ciało, twój mokry lub suchy skafander wydłuża czas nurkowania przez spowolnienie wychładzania, i przez zwiększanie efektywności mechanizmów odpowiedzialnych za utrzymanie temperatury ciała zapobiega zbyt szybkiej utracie ciepła przez skórę. O ile nie nurkujesz w bardzo ciepłej wodzie, skafander nie eliminuje jednak całkowicie utraty ciepła. Spowalnia jego utratę, ale twój organizm reaguje na zimno w taki sam sposób w skafandrze i bez niego. Twój mokry lub suchy skafander wpływają jednak na to, jak długo procesy zachodzące w twoim organizmie będą w stanie utrzymać temperaturę twojego ciała na odpowiednim poziomie.

Gdy twoje ciało się ochładza, centra termiczne w dłoniach, stopach i głowie uruchamiają procesy przyczyniające się do zatrzymania ciepła, które rozpoczynają się od zmian w krążeniu. Na skutek zwężenia naczyń zmniejsza się dopływ krwi do kończyn, co ogranicza utratę ciepła z krwi przez skórę. Zauważ, że jest to proces dokładnie przeciwny do naturalnych procesów schładzających organizm. Jest to też powód, dla którego po dłuższej ekspozycji na zimno drętwieją palce dłoni i stóp.

Jeśli zwężenie naczyń nie ogranicza utraty ciepła w wystarczającym stopniu, zaczynają się dreszcze, które powodują wytworzenie ciepła poprzez zwiększenie aktywności mięśni i przyspieszenie metabolizmu. W powietrzu, dreszcze często w wystarczającym stopniu zatrzymują obniżanie temperatury ciała na dłuższy czas (w zależności od wielu innych czynników), ale pod wodą są ostatnim etapem walki z zimnem. Jeśli nie

wyjdiesz z wody gdy rozpoczną się dreszcze, twoje ciało wkrótce osiągnie granice możliwości walki o utrzymanie temperatury ciała, i dojdzie do hipotermii - nadmiernego obniżenia temperatury (omówionego wkrótce).



Indywidualne predyspozycje mają znaczenie przy twojej reakcji na zimno i na zdolność twojego ciała do radzenia sobie z nim. Częste wystawianie ciała na zimno (hartowanie) w pewnym stopniu zwiększa zdolność organizmu do zatrzymywania i wytwarzania ciepła. Możesz zobaczyć to w lokalnej społeczności nurkowej: płetwonurkowie nurkujący regularnie w wodach strefy klimatu umiarkowanego potrzebują mniej izolacji podczas nurkowania w tropikach niż osoby nurkujące wyłącznie w ciepłych wodach.

Dawniej fizjolodzy uważali, że osoby z większą ilością tkanki tłuszczowej mają przewagę nad osobami szczuplejszymi pod względem zdolności utrzymywania temperatury; obecnie jednak wydaje się, że nie zawsze jest to prawdą. Badania wykazały, że głębiej położone warstwy mięśni przyczyniają się do zwiększenia odporności, a także przez dreszcze wytwarzają ciepło (tkanka tłuszczowa nie może generować ciepła). Niedawne badania wykazały, że w zakresie temperatur, przy których dreszcze i zwężenie naczyń wystarczają do utrzymania temperatury ciała, od procentowej zawartości tkanki tłuszczowej większe znaczenie ma całkowita masa ciała. Zawartość tkanki tłuszczowej wydaje się mieć znaczenie na obu ekstremach tego zakresu: zanim jeszcze wystąpi skurcz naczyń i dreszcze, oraz gdy te dwa mechanizmy zawiodą i dojdzie do hipotermii. Możesz przedłużyć czas, przez jaki twoje ciało będzie utrzymywać stałą temperaturę, poprzez właściwe korzystanie ze skafandrow nurkowych i stosowanie odpowiednich technik nurkowych.

Znaczna ilość ciepła tracona jest przez głowę, gdyż ciało nie może ograniczyć ilości krwi dostarczanej do skóry głowy. W związku z tym, nurkowanie w kapturze od mokrego skafandra znacznie przyczynia się do powstrzymania utraty ciepła. W bardzo ciepłej wodzie (około 29°C dla większości nurków) pełny mokry skafander może ograniczyć utratę ciepła do takiego poziomu, że będziesz wytwarzać je w takim samym tempie w jakim będzie ono odprowadzane. Pozwoliłoby ci to pozostać w wodzie praktycznie przez nieograniczony czas - przynajmniej ze względu na ciepło!

Chociaż gaz z twojej butli może być dość chłodny, utrata ciepła związana z oddychaniem jest zazwyczaj nieznaczna (pominąwszy bardzo głębokie nurkowania techniczne i komercyjne), ponieważ tchawica i zatoki skutecznie zatrzymują ciepło. Przy wydechu, napływający zimny gaz ogrzewa się, pobierając ciepło z tchawicy i zatok po drodze do płuc. Przy wydechu, gaz ogrzewa te obszary, pomagając ciału zatrzymać ciepło. Ten fizjologiczny mechanizm jest tak skuteczny, że pozwala na zatrzymanie znacznych ilości ciepła nawet podczas oddychania mieszkanką helową (hel jest znany ze zdolności szybkiego odprowadzania ciepła). Mimo to, zwłaszcza podczas głębokich nurkowań, gęsty zimny gaz absorbuje więcej ciepła, niż utraciłbyś podczas oddychania na powierzchni. Nurkowie komercyjni używają specjalnych grzejników wstępnie ogrzewających gazy oddechowe, właśnie celem ograniczenia utraty ciepła przez drogi oddechowe. Nie ma jednak powszechnie stosowanego sposobu na ogrzewanie powietrza podawanego przez automaty używane przez nurków rekreacyjnych. Rebreathery o obiegu zamkniętym i półzamkniętym (CCR i SCR) mają tutaj przewagę, gdyż procesy chemiczne usuwające dwutlenek węgla z gazu oddechowego generują ciepło i ogrzewają gaz.

Pewne zachowania mogą pozornie pomagać ci utrzymać ciepło, jednak w rzeczywistości ich skutek jest wprost przeciwny. Zwiększona aktywność fizyczna powoduje wytworzenie większej ilości ciepła, ale

pomoże ci tylko wtedy, gdy jesteś dobrze izolowany we względnie ciepłej wodzie. W przeciwnym wypadku, stracisz więcej ciepła niż go uzyskasz poprzez zwiększenie przepływu wody wokół twojego ciała, a także przez skórę - przez tymczasowe rozszerzenie naczyń, gdy czujesz, że jest ci ciepłej.

Podobnie, niekiedy nurkowie oddają moc do swoich mokrych skafandrów. Abstrahując od spraw związanych z higieną, ciepły mocz sprawia, że przez chwilę czujesz się bardziej komfortowo. Jednak w rzeczywistości w ten sposób przyczyniasz się do szybszej utraty ciepła. Po pierwsze, sam mocz unosi z sobą znaczną ilość ciepła, a po drugie, wrażenie ciepła powoduje zmniejszenie skurczu naczyń w skórze i kończynach. Zwiększony przepływ krwi przez skórę i kończyny sprawia, że szybciej tracisz ciepło.

Przeżranie i udar cieplny

Chociaż twoje ciało może skutecznie obniżyć swoją temperaturę nawet w dość gorącym środowisku, skafander nurkowy znacznie obniża zdolności schładzania organizmu. Najważniejszym sposobem pozbywania się nadmiaru ciepła jest pocenie się, ale skafander zapobiega parowaniu wody i związanemu z tym obniżeniu temperatury. Schładzanie organizmu przez parowanie potu jest też niemożliwe pod wodą, w skafandrze lub bez niego. Jeśli robisz coś forsownego albo gdy znajdujesz się w gorącym środowisku, lub obie te rzeczy jednocześnie - to w połączeniu z twoim skafandrem może prowadzić to do przeżrania.

Przeżranie to stan, w którym twoje ciało wszystkimi sposobami próbuje zapobiec wzrostowi temperatury. Nurek cierpiący z powodu przeżrania oddycha płytko i szybko, ma słabe i szybkie tętno oraz chłodną i lepłą skórę. Mocno się poci i szybko odwadnia, mogą pojawić się mdłości i osłabienie. Ten sposób oddychania, szybkie tętno i silne pocenie się są niektórymi ze sposobów, jakimi twój organizm próbuje doprowadzić do obniżenia temperatury. Nurek zdradzający objawy przeżrania powinien rozpiąć lub zdjąć skafander, przenieść się do cienia, napić się wody i ochłodzić.

Jeżeli nurek w stanie przeżrania nie będzie w stanie się schłodzić, albo jeszcze się rozgrzeje, to fizjologiczne mechanizmy kontroli ostatecznie zawiodą, i wystąpi udar cieplny. Puls jest wówczas silny i szybki, ustaje pocenie, a skóra jest zaczerwieniona i gorąca. Rośnie temperatura ciała, ponieważ nie działają mechanizmy ją obniżające. Jeśli nie zostanie udzielona pomoc medyczna, udar cieplny może prowadzić do uszkodzenia mózgu i innych organów, a nawet do śmierci. Dlatego jest on jednym z zagrożeń wymagających natychmiastowej pomocy wyspecjalizowanych służb medycznych. W trakcie oczekiwania na pogotowie, ratownicy powinni ściągnąć z poszkodowanego pletwonurka skafander i ubranie, umieścić go w cieniu, i próbować jak najszybciej go schłodzić poprzez polewanie wodą, przecieranie ciała gąbką, i zapewnienie wentylacji. W niektórych przypadkach niezbędna może być bardziej intensywna pierwsza pomoc, zwłaszcza gdy przyjazd pogotowia się opóźnia.

Hipotermia

Jeśli zignoruje dreszcze i będziesz kontynuować nurkowanie, utrata ciepła będzie postępować; może dojść wtedy do obniżenia temperatury ciała. Niekontrolowane dreszcze i zaburzenia koordynacji wskazują na lekką hipotermię i obniżenie temperatury do poziomu nie niższego niż 34°C.

Gdy hipotermia postępuje, ustępują niekontrolowane dreszcze i skurcz naczyń. Wskazuje to na początki ciężkiej hipotermii - stanu, w którym mechanizmy utrzymujące temperaturę zawiodły, podobnie jak przy udarze cieplnym, lecz w drugą stronę. Gdy do tego dojdzie, nurek nagle poczuje się komfortowo - ciepła krew napływa do skóry. Jest to niebezpieczny stan, ponieważ mimo że nurek nie odczuwa zimna, jego ciało traci ciepło w niekontrolowany sposób, i temperatura ciała szybko opada.

Obniżenie temperatury ciała powoduje upośledzenie procesów umysłowych, co objawia się sennością, brakiem koordynacji i zanikami pamięci. Jeśli hipotermia postępuje, dochodzi do utraty świadomości, śpiączki, a potem śmierci.

Nurek w stanie lekkiej hipotermii powinien natychmiast przerwać nurkowanie, i jak najszybciej się ogrzać. Powinien ściągnąć wszystkie mokre rzeczy, założyć ciepłe ubranie i okryć się kocem, oraz pić ciepłe bezalkoholowe napoje.

Poważna hipotermia zagraża życiu - niezbędna jest pomoc medyczna. Oczekując na przyjazd pogotowia, ściągnij z poszkodowanego mokre ubranie, ale unikaj niepotrzebnego zamieszania. Załóż poszkodowanemu ciepłe ubranie, okryj go kocem, i monitoruj jego funkcje życiowe, w razie potrzeby wykonując sztuczne oddychanie i masaż serca. Ponieważ osoby w stanie ciężkiej hipotermii mają przytłumione odruchy, kontynuuj resuscytację aż do przybycia służb medycznych (lub do utraty sił), nawet jeśli poszkodowany wydaje się nie reagować.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU:

- Zapobiegaj możliwemu przegrzaniu i udarowi cieplnemu przed nurkowaniem poprzez zakładanie skafandra w ostatniej chwili przed wejściem do wody. Ogranicz aktywność, nie przebywaj w pełnym słońcu. Zdejmij skafander i ochłódź się jeżeli tylko zauważysz u siebie oznaki przegrzania.
- Pocenie może prowadzić do odwodnienia. Dlatego gdy intensywnie się pocisz, pij dużo wody lub innych napojów nie działających moczopędnie.
- Używaj skafandra odpowiedniego do temperatury wody w której nurkujesz. Zakończ nurkowanie i wyjdź z wody, jeśli tylko wystąpią u ciebie dreszcze.
- Przegrzanie, udar cieplny i hipotermia są stanami zagrażającymi życiu i wymagają pomocy medycznej. Zapisz się na kursy PADI Rescue Diver i Emergency First Response, aby być przygotowanym na okoliczność ich wystąpienia.

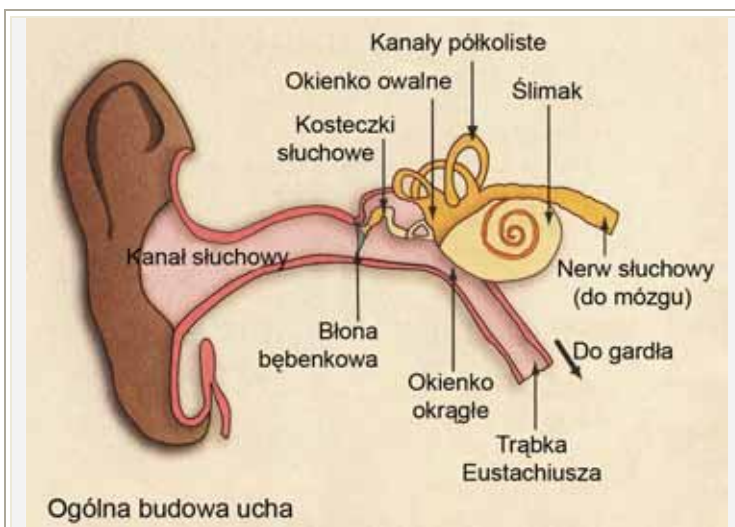
Odpowiedź fizjologiczna na zmiany ciśnienia w przestrzeniach powietrznych ciała

W porównaniu z innymi fizjologicznymi reakcjami organizmu na nurkowanie, wpływ ciśnienia na przestrzenie powietrzne twojego ciała wydaje się być najbardziej oczywisty. Jako świeżo upieczony nurek, odczuwasz ciśnienie w uszach (przestrzeni powietrznej twojego ciała) już przy zanurzeniu poniżej jednego metra, i odczuwasz ulgę przy wyrównaniu ciśnienia.

Twoje ciało składa się w zdecydowanej większości z wody oraz substancji stałych, i dlatego, jak przedstawiono w Rozdziale Czwartym, w granicach praktycznych limitów nurkowania traktujemy tkanki ludzkiego ciała jako nieściśliwe. Dzięki temu, nurkowie używający specjalnych mieszanek byli w stanie odbyć nurkowania nawet na głębokość 700 metrów. (Chociaż podczas nurkowań tak ekstremalnie głębokich, nawet "nieściśliwe" tkanki płynne oraz stałe ulegają nieznacznej kompresji, co wpływa na strukturę białek i innych makrocząsteczek. Dotyczy to jednak głębokości znacznie większych nawet od tych, na które regularnie schodzą nurkowie komercyjni.)

Natomiast gazy są ściśliwe, i dlatego wszystkie przestrzenie twojego ciała, które są wypełnione powietrzem - a zwłaszcza uszy, zatoki, płuca i maska - odczuwają wpływ zmian objętości następujących na skutek zmian ciśnienia. Reagując na te zmiany, możesz usuwać lub dodawać gaz z/do wszystkich przestrzeni powietrznych. Dotyczy to także sztucznych przestrzeni gazowych wokół ciała, stwarzanych przez maskę oraz suchy skafander.

Uszy



Możesz odczuwać ciśnienie hydrostatyczne (ciśnienie wody) już na głębokości jednego metra. W miarę jak się zanurzasz, świadomie wyrównujesz ciśnienie w uszach wraz ze wzrastającym ciśnieniem hydrostatycznym, tak aby uniknąć dyskomfortu.

Spojrzenie na schemat budowy ucha i jego anatomie tłumaczy, jak i dlaczego powinieneś wyrównywać ciśnienie w uszach. Ucho dzielimy na zewnętrzne, środkowe i wewnętrzne, a każda z części ma odrębną funkcję w procesach słyszenia. Ucho zewnętrzne wychwytuje fale dźwiękowe rozchodzące się w powietrzu (albo w wodzie) i przewodzi je dalej, poprzez kanał słuchowy, przez błonę bębenkową do ucha środkowego.

Błona bębenkowa stanowi szczelną barierę pomiędzy uchem zewnętrznym a uchem środkowym. Fale dźwiękowe powodują drgania błony bębenkowej, przylegającej do kosteczek słuchowych, które mechanicznie wzmacniają drgania i przenoszą je dalej, do ślimaka w uchu wewnętrznym.

Ślimak ucha jest narządem częściowo wypełnionym płynem zwanym perylimfą. Kosteczki słuchowe przylegają do okienka owalnego ślimaka. Pod wpływem drgań kosteczek wpukła się ono wewnątrz i na zewnątrz, powodując oscylację fali ciśnieniowych w perylimfie ślimaka, które są zamieniane na impulsy nerwowe interpretowalne przez mózg.

Okienko okrągłe na ślimaku działa jak kompensator ciśnienia, odginając się na zewnątrz kiedy okienko owalne odgina się do wewnątrz i napiera na nieściśniętą perylimfę, oraz wpuklając się do wewnątrz, gdy okienko owalne wygina się na zewnątrz.

Bez tej kompensacji, wibracja nie mogłaby być przenoszona jako fala ciśnieniowa, a słyszenie nie byłoby możliwe.

W uchu wewnętrznym znajdują się też kanały półkoliste, które kontrolują zmysł równowagi i orientacji. Mimo że kanały półkoliste nie biorą udziału w procesach słyszenia, łączą się one ze ślimakiem poprzez układ perylimfatyczny. Z tego powodu, odpowiedź ucha na zmiany ciśnienia dotyczy nie tylko słyszenia, ale również zmysłu równowagi.

Wpływ zmian ciśnienia na ucho objawia się przede wszystkim w uchu środkowym. Ucho zewnętrzne jest otwarte i bezpośrednio łączy się ze środowiskiem zewnętrznym, stąd jest zawsze w równowadze z otaczającym ciśnieniem. Natomiast ucho wewnętrzne jest całkowicie wypełnione nieściśniętym płynem i dlatego niewrażliwe na zmiany otaczającego ciśnienia. Jednakże ucho środkowe jest suche i wypełnione powietrzem (gazem), i z tego powodu wpływają na nie zmiany ciśnienia. Ucho środkowe połączone jest z gardłem poprzez trąbkę Eustachiusza, która pozwala gazom wydostawać się i dostawać do niego.

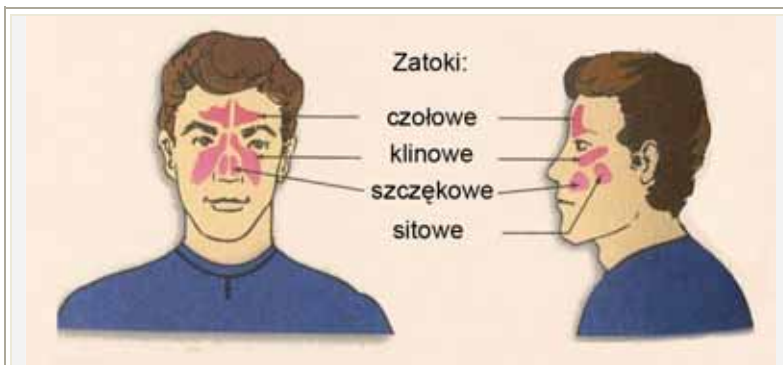
Podczas zanurzania, ciśnienie hydrostatyczne uciska twoją błonę bębenkową, podczas gdy gaz w uchu środkowym ulega kompresji. Kompensujesz ten wzrost ciśnienia w uchu środkowym poprzez wdmuchanie dodatkowego gazu przez trąbkę Eustachiusza, tak aby przywrócić równowagę objętości i ciśnienia po obu stronach błony bębenkowej.

Zazwyczaj wyrównujesz ciśnienie stosując próbę Valsalvy albo manewr Frenzela. Obie techniki polegają na wdmuchiowaniu powietrza przez zatkany nos, co powoduje rozluźnienie tkanek otaczających trąbkę Eustachiusza i powoduje przepływ gazu przez trąbki. Istnieje różnica między tymi technikami - w próbie Valsalvy używasz przepony i próbujesz wydymać powietrze mając zatkany nos; zaś podczas manewru Frenzela używasz mięśni gardła, tak aby ścisnąć powietrze przy zatkany nosie.

Podczas wykonywania manewru Frenzela jest mniejsze prawdopodobieństwo rozerwania okienka okrągłego, który to problem jest omawiany w sekcji Problemy w Przestrzeniach Powietrznych Ciąca; jednak aby go dobrze opanować, potrzeba zazwyczaj więcej czasu. Początkujący nurkowie uczą się wyrównywać ciśnienie "dmuchając przez zatkany nos", i wielu nowych nurków początkowo wyrównuje ciśnienie stosując próbę Valsalvy. Jednak gdy już przyzwyczaisz się do wyrównywania ciśnienia, prawdopodobnie zaczniesz stosować manewr Frenzela.

Podczas wynurzania, ciśnienie w przestrzeni ucha środkowego ulega wyrównaniu samorzutnie, bez konieczności świadomego działania z twojej strony. Rozprężający gaz bardzo łatwo wydostaje się z ucha środkowego, przez trąbki Eustachiusza do gardła, dlatego zazwyczaj nie musisz poświęcać uwagi uszom podczas wynurzania.

Zatoki



Jeśli jesteś w dobrym stanie zdrowia, twoje zatoki są drożne, i gaz swobodnie przepływa przez nie. Ciśnienie w zatokach wyrównywane jest samorzutnie, jednocześnie z wyrównywaniem ciśnienia w uchu środkowym, i dlatego nie musisz nic robić podczas wynurzania czy zanurzania.

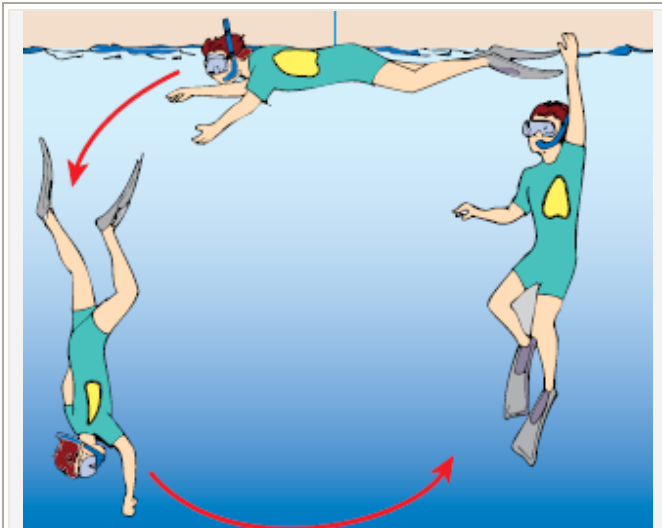
Zatoki mogą powodować problemy wtedy, gdy decydujesz się na nurkowanie mając niecałkowicie drożne drogi oddechowe, na przykład na skutek

przeziębienia lub alergii. Omówimy te problemy wkrótce, w sekcji Problemy w Przestrzeniach Powietrznych Ciąta.

Płuca

Twoje płuca stanowią oczywiście przestrzeń powietrzną, i dlatego wpływają na nie zmiany ciśnienia. Zmiany te zależą jednak od tego, czy nurkujesz na zatrzymanym oddechu, czy też z akwalungiem (lub innym aparatem oddechowym).

Nurkowanie na zatrzymanym oddechu



Podczas wynurzenia po nurkowaniu na zatrzymanym oddechu, powietrze rozpręża się do objętości nieco większej niż początkowa. Ten niewielki spadek objętości spowodowany jest zużyciem części tlenu przez układ oddechowy, oraz wykorzystaniem części powietrza na wyrównanie ciśnienia w masce

Gdy się zanurzasz podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu (freedivingu), wzrastające ciśnienie hydrostatyczne powoduje zmniejszenie objętości twoich płuc, poprzez sprężanie w nich powietrza. Nie powoduje to problemów dzięki temu, że płuca są skonstruowane tak, by zmniejszanie ich objętości było możliwe. Spadek objętości w tym przypadku nie różni się od tego podczas wykonywania wydechu, pod warunkiem, że ciśnienie zewnętrzne nie redukuje objętości płuc poniżej objętości zalegającej płuc. Przeciętny nurek rozpoczynający zanurzenie z pełnymi płucami, po głębokim wdechu, musiałby zanurkować na zatrzymanym oddechu na głębokość większą niż 40 metrów aby płuca zostały ściśnięte poniżej objętości zalegającej płuc. Większość nurków nie jest w stanie zanurkować na taką głębokość, choć dla wielu freediverów startujących w zawodach nie jest to większy problem. Omówimy później potencjalnie dotyczące ich problemy.

W miarę wynurzenia po nurkowaniu na zatrzymanym oddechu, powietrze w twoich płucach rozpręża się do objętości niewiele mniejszej niż na początku nurkowania. Ta

nieznaczna różnica jest spowodowana wykorzystaniem tlenu z powietrza znajdującego się w pęcherzykach płucnych przez układ krążenia, a także zużyciem powietrza użytego do wyrównania ciśnienia w uszach i w masce.

Nurkowanie w sprężce powietrznej

Aparat oddechowy oraz urządzenia pompujące gaz oddechowy z powierzchni dostarczają gaz oddechowy pod ciśnieniem mniej więcej odpowiadającym ciśnieniu otoczenia. Gdyby nie to, nie byłbyś w stanie oddychać. Oznacza to, że twoje płuca dostosowują się do zmieniającej się głębokości z każdym oddechem. Niezależnie od głębokości podczas nurkowania, objętość twoich płuc pozostaje w przybliżeniu taka sama jak podczas oddychania na powierzchni. W miarę zanurzania, płuca wyrównują zmniejszenie objętości, spowodowane przez sprężanie się gazu, wraz z każdym wdechem. Podczas wynurzenia, nadmiar rozprężającego się gazu usuwany jest z każdym wydechem.

W tym przypadku wyrównanie ciśnienia jest całkowicie automatyczne - dopóty, dopóki normalnie oddychasz. Poważne komplikacje mogą powstać jeśli zaczniesz wstrzymywać oddech, co omówiono w dziale Problemy w Przestrzeniach Powietrznych Ciąta.

Sprzęt

Z fizjologicznego punktu widzenia, przestrzeń powietrzna wytworzona przez sprzęt do nurkowania nie różni się wiele od naturalnych przestrzeni powietrznych organizmu, ponieważ także wymagają wyrównywania w nich ciśnienia w miarę wzrastania ciśnienia zewnętrznego. Dwie najważniejsze sztuczne

przestrzenie powietrzne wpływające na nurka to przestrzeń powietrzna maski oraz przestrzeń wokół ciała w trakcie nurkowania w suchym skafandrze.

Podczas zanurzania, ciśnienie powoduje sprężenie powietrze w twojej masce. Aby je wyrównać, wdmuchujesz powietrze przez nos do maski, co powoduje utrzymanie ciśnienia wewnętrznego oraz objętości w masce w równowadze z ciśnieniem otoczenia. Gdy się wynurzasz, rozprężające się powietrze w twojej masce z łatwością ucieka przez jej kołnier, co nie wymaga z twojej strony jakiegokolwiek działania.

Suchy skafander tworzy kolejną przestrzeń powietrzną (gazową), która otacza niemal całe twoje ciało (zazwyczaj z wyjątkiem rąk oraz głowy, choć w niektórych modelach także ręce i głowa są suche). W trakcie zanurzania, gaz w suchym skafandrze ulega kompresji wokół twojego ciała, dlatego dodajesz powietrze/wzbogacone powietrze ze swojej butli poprzez wąż niskiego ciśnienia ze swojego automatu. Alternatywnie, możesz używać argonu dostarczanego przez odrębny system ze specjalnej butli. W obu przypadkach jednak, dodajesz gaz do swego skafandra, tak aby wyrównać ciśnienie i objętość wewnątrz niego.

Podczas wynurzania, gaz w suchym skafandrze ulega rozprężeniu, i wydostaje się przez zawór upustowy znajdujący się najczęściej na ramieniu.

Problemy w przestrzeniach powietrznych ciała

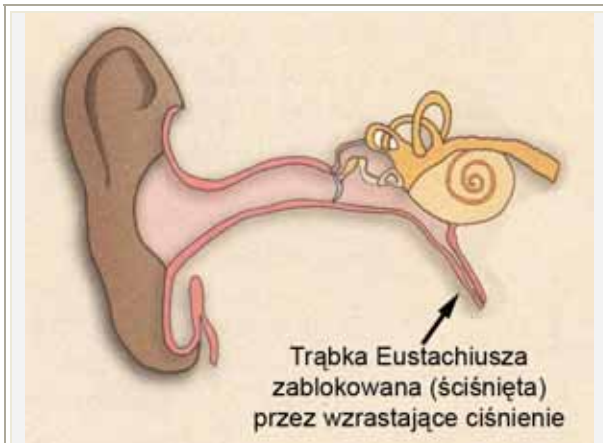
Wszystkie naturalne oraz sztuczne przestrzenie powietrzne w twoim ciele przystosowują się z łatwością do środowiska podwodnego - o ile wyrównujesz w nich ciśnienie do ciśnienia otoczenia. Jeżeli ci się to jednak nie uda, zarówno podczas zanurzania jak i wynurzania, może dojść do urazów zarówno lekkich, jak i stanowiących zagrożenie dla życia.

W każdej przestrzeni powietrznej może dojść do barotraumy (urazu ciśnieniowego) podczas zanurzania lub wynurzenia, ale rodzaj doznanego urazu różni się w zależności od fizjologii dotkniętej przestrzeni powietrznej.

Urazy ciśnieniowe powstałe podczas zanurzania określane są jako "ściśnięcie" (squeeze) i polegają na tym, że ciśnienie hydrostatyczne wciska tkanki ciała do niewyrównanych przestrzeni powietrznych. Urazy ciśnieniowe powstałe podczas wynurzania określane są jako "uraz rozprężeniowy" albo "blokada wsteczna" (reverse squeeze, reverse block, expansion injury) - w zależności od konkretnych warunków - i polegają na tym, że uwięziony, rozprężający się gaz powoduje rozepchnięcie tkanek w miarę jak spadku ciśnienia zewnętrznego. Inne urazy ciśnieniowe powstałe podczas wynurzania dotyczą wciskania pęcherzyków rozprężającego się gazu do krwiobiegu.

Chociaż poszczególne rodzaje urazów ciśnieniowych mogą spowodować poważne obrażenia, łatwo ich unikniesz poprzez stosowanie odpowiednich procedur. Urazy ciśnieniowe prawie zawsze wynikają z niestosowania się i nieprzestrzegania określonych procedur.

Uraz ciśnieniowy ucha



Jeżeli opóźnisz wyrównanie ciśnienia, wzrastające ciśnienie w gardle może spowodować zaciśnięcie ścian trąbki Eustachiusza, utrudniając lub wręcz uniemożliwiając wyrównanie ciśnienia

Zakładając, że wiesz jak wyrównać ciśnienie w uszach, czasami mimo wszystko możesz mieć z tym problemy. Po kilku szybkich zmianach głębokości, twoje mięśnie gardłowe mogą się zmęczyć, lub też po paru miesiącach bez nurkowania możesz nie być tak biegły w technikach wyrównania ciśnienia. Czasami sprzęt uciska twoje gardło - na przykład ciasna kryza szyjna albo paski z maski pełnotwarzowej, częściowo blokując twoje trąbki Eustachiusza.

Jeżeli zanurzasz się zbyt szybko bez wyrównywania ciśnienia, wzrastająca różnica ciśnień pomiędzy twoim uchem środkowym a gardłem może powodować ściśnięcie i zamknięcie się trąbek Eustachiusza, uniemożliwiające wyrównywanie ciśnienia. Jednak najczęstszą przyczyną problemów z wyrównaniem ciśnienia jest zatkanie ucha z powodu przeziębienia lub alergii. Kiedy masz katar albo jeśli jesteś alergikiem, śluz oraz obrzęk błony śluzowej może zablokować trąbki Eustachiusza, utrudniając lub wręcz uniemożliwiając wyrównanie ciśnienia. Próby wyrównania ciśnienia gdy ucho jest zatkane mogą

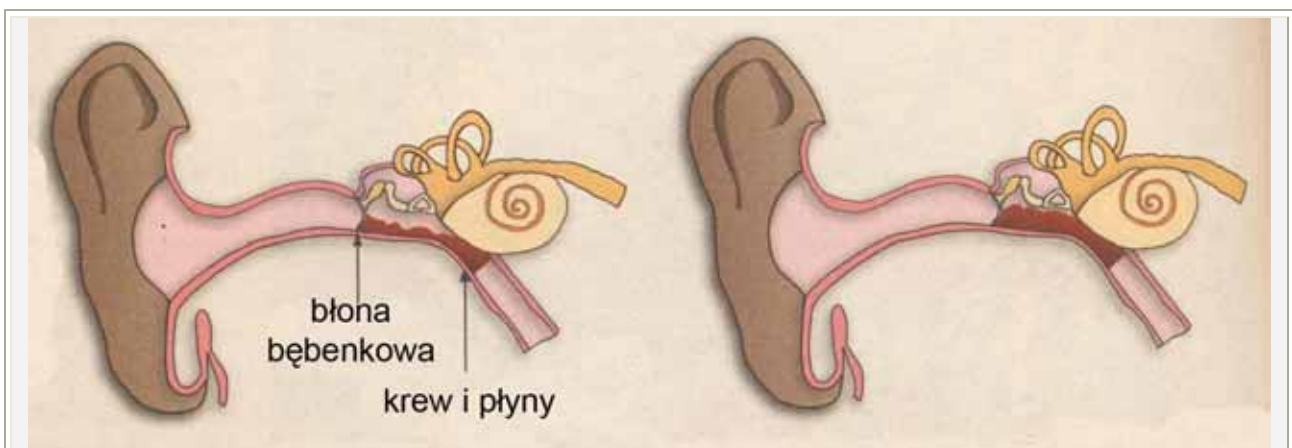
powodować dostanie się śluzu do ucha środkowego, co czasami prowadzi do infekcji.

Niezależnie od przyczyny, niepowodzenie w wyrównywaniu ciśnienia w uszach może prowadzić do jednego lub większej liczby urazów ciśnieniowych.

Ściśnięcie ucha środkowego

Jeżeli nurk zanurza się mimo niemożności wyrównania ciśnienia w uszach, pojawia się u niego ostry ból w uchu spowodowany przez ciśnienie hydrostatyczne uciskające błonę bębenkową w kierunku przestrzeni powietrznej, w której ciśnienie nie jest wyrównane. Jeśli sytuacja taka się przeciąga, a powietrze nie jest dodawane by wyrównać zmniejszenie objętości, ciśnienie hydrostatyczne powoduje wypchnięcie płynów ustrojowych i krwi z tkanek otaczających ucho środkowe do przestrzeni powietrznej ucha. Im dłużej nurk nie wyrównuje ciśnienia, tym więcej płynów ustrojowych i krwi napływa do ucha środkowego.

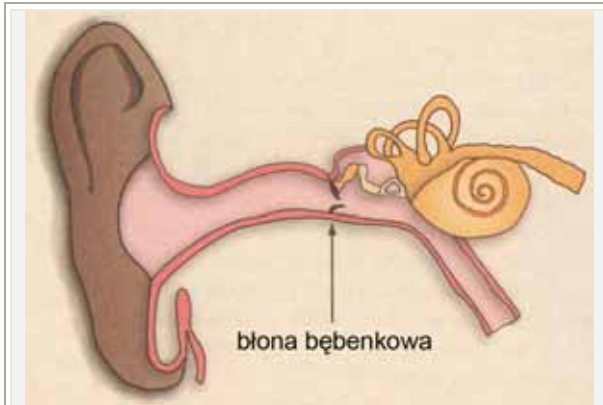
Wtedy ostry ból zmniejsza się, a nurk odczuwa coś w rodzaju "wypełnienia" ucha. Płyny obecne w uchu środkowym powodują przytłumienie wibracji, co powoduje osłabienie słuchu. Ściśnięcie ucha środkowego przeważnie można łatwo wyleczyć poprzez odpowiednie postępowanie medyczne, jednak nie zastosowanie właściwego leczenia może doprowadzić do trwałego upośledzenia słuchu spowodowanego przez infekcję następującą w wyniku urazu mechanicznego.



Jeżeli nurk zanurza się mimo niemożności wyrównania ciśnienia w uszach, pojawia się u niego ostry ból w uchu spowodowany przez ciśnienie hydrostatyczne uciskające błonę bębenkową w kierunku przestrzeni

powietrznej, w której ciśnienie nie jest wyrównane. Jeśli sytuacja taka się przeciąga, ciśnienie hydrostatyczne powoduje wypchnięcie płynów ustrojowych i krwi z tkanek otaczających ucho środkowe do przestrzeni powietrznej ucha

Rozerwanie błony bębenkowej



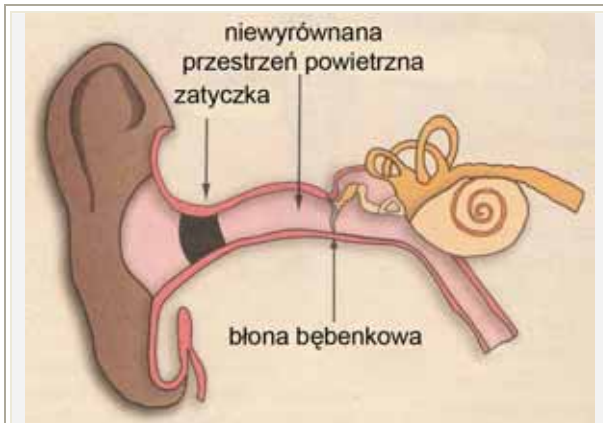
Jeżeli nurek nie wyrównujący ciśnienia w uszach zanurza się szybciej niż możliwe jest wpełnienie płynów z tkanek do przestrzeni ucha środkowego, może dojść do rozerwania błony bębenkowej.

Jeżeli nurek nie wyrównujący ciśnienia w uszach zanurza się szybciej niż możliwe jest wpełnienie płynów z tkanek do przestrzeni ucha środkowego, może dojść do rozerwania błony bębenkowej. Błona ta pęka do wewnątrz ucha, w trakcie czego nurek odczuwa ostry ból, który jednak szybko ustępuje, gdy woda wlewająca się do ucha wypełnia przestrzeń powietrzną i powoduje odczucie ulgi. Jednak ponieważ temperatura wody jest zazwyczaj niższa od temperatury ciała, jej przedostanie się do ucha środkowego powoduje zawroty głowy i dezorientację z powodu wychłodzenia kanałów przedsionkowych. Objawy te jednak ustępują, w miarę jak woda ogrzewa się od ciała.

Generalnie, rozerwana błona bębenkowa zagoi się. Jednak woda dostająca się do ucha środkowego może nanieść bakterie i obcy materiał organiczny, co może być przyczyną infekcji. Właściwe leczenie otolaryngologiczne minimalizuje ryzyko trwałego ubytku słuchu spowodowanego rozerwaniem błony

bębenkowej.

Blokada wsteczna



Zatyczki do uszu, a czasami także kaptury od mokrych skafandrow, powodują powstanie sztucznej przestrzeni powietrznej w kanale słuchowym, pomiędzy zatyczką a błoną bębenkową, w której ciśnienie nie może być wyrównane.

Do blokady wstecznej (zwanej także ściśnięciem wstecznym - reverse squeeze) dochodzi, gdy ciśnienie w uchu środkowym jest wyrównywane podczas zanurzania, ale rozprężający się gaz nie może wydostać się poprzez trąbki Eustachiusza podczas wynurzania. Do sytuacji tej najczęściej dochodzi wtedy, gdy nurek używa środków obkurczających błonę śluzową nosa (krople stosowane podczas kataru, alergii) i specyfików ów traci swoje działanie podczas nurkowania. Do blokady wstecznej może też dojść, gdy nurek z przyblokowanymi trąbkami Eustachiusza na siłę wyrównuje ciśnienie podczas zanurzenia, lecz podczas wynurzania dochodzi do poownego zablokowania trąbek.

Odczucia podczas blokady wstecznej są dokładnie takie same jak przy ściśnięciu ucha środkowego, z tą jednak różnicą, że ciśnienie wypycha błonę bębenkową na zewnątrz, a nie do wewnątrz. W odróżnieniu od ściśnięcia ucha środkowego podczas zanurzania, ograniczona ilość gazu nie pozwala nurkowi przerwać wynurzania z powodu niemożności wyrównania ciśnienia,

i ostatecznie nurek musi się wynurzyć, niezależnie od tego czy uda mu się wyrównać ciśnienie, czy nie. W przypadku blokady wstecznej niektórzy nurkowie donosili o udanym wyrównaniu ciśnienia poprzez odwrotne wyrównanie (wdech przy zatkanym nosie) oraz bardzo powolne wynurzanie się. Mimo to, uporczywa blokada wsteczna może w rzadkich przypadkach powodować rozerwanie błony bębenkowej na zewnątrz, jeśli nurek jest zmuszony do wynurzenia się bez wyrównanego ciśnienia.

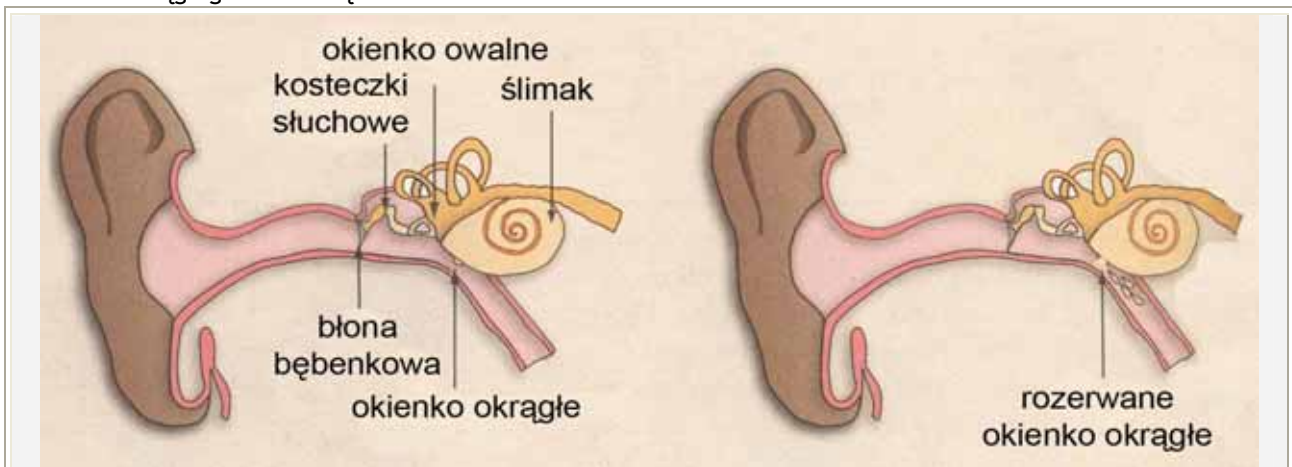
Zatyczki do uszu / kaptury do mokrych skafandrów

Zatyczki do uszu, a czasami także kaptury od mokrych skafandrów, powodują powstanie sztucznych przestrzeni powietrznych w kanałach słuchowych pomiędzy zatyczką a błoną bębenkową, w których ciśnienie nie może być wyrównane. Dlatego nie powinieneś używać zatyczek do uszu podczas nurkowania, może za wyjątkiem specjalnych zatyczek przeznaczonych do nurkowania, które pozwalają wodzie na przedostawanie się do kanału słuchowego. Czasami także ściśle przylegający kaptur może powodować podobny stan poprzez szczelne zatkanie ucha, czemu jednak można natychmiast zapobiec poprzez odciążenie kaptura z ucha i dopuszczenie do niego wody. Jeśli kiedykolwiek napotkasz niespotykane wcześniej trudności z wyrównaniem ciśnienia w trakcie nurkowania w kapturze, sprawdź czy odciążenie go na chwilę nie rozwiąże problemu.

Jeśli nurek używa zatyczek do uszu, to podczas zanurzania będzie odczuwał ból, gdyż ciśnienie będzie wypychać błonę bębenkową na zewnątrz (jak podczas blokady wstecznej) do niewyrównanej przestrzeni powietrznej. Nurek może próbować wyrównać ciśnienie, co jednak spowoduje nasilenie się bólu (lub nawet rozerwanie błony bębenkowej), gdyż dodawanie powietrza do ucha środkowego spowoduje powstanie jeszcze większej różnicy ciśnień bo obu stronach błony bębenkowej. W tym samym czasie, ciśnienie hydrostatyczne może spowodować "wessanie" zatyczki głęboko do przewodu słuchowego. Niewyrównane ciśnienie może też spowodować wyciek płynu do ucha środkowego (ściśnięcie ucha środkowego), do przewodu słuchowego, i/lub zewnętrzne rozerwanie błony bębenkowej.

Rozerwanie okienka okrągłego

Do pęknięcia okienka okrągłego ślimaka może dojść, gdy płetwonurek opóźnia moment wyrównania ciśnienia podczas zanurzania, a potem próbuje wykonać je na siłę, lub też przedłuża próbę Valsalvy. W uchu z niewyrównanym ciśnieniem, błona bębenkowa wpukla się do wewnątrz w odpowiedzi na ciśnienie hydrostatyczne. Ten ruch błony bębenkowej jest przewodzony i wzmacniany poprzez kosteczki słuchowe i okienko owalne do ślimaka - dokładnie tą samą drogą, jak fala dźwiękowa. Okienko owalne także wpukla się do wewnątrz, powodując wzrost ciśnienie w perylimfie, który kompensowany jest przez uwypuklenie okienka okrągłego na zewnątrz.



Do pęknięcia okienka okrągłego ślimaka może dojść, gdy płetwonurek opóźnia moment wyrównania ciśnienia podczas zanurzania, a potem próbuje wykonać je na siłę, lub też przedłuża próbę Valsalvy. W uchu z niewyrównanym ciśnieniem, błona bębenkowa wpukla się do wewnątrz w odpowiedzi na ciśnienie hydrostatyczne. Ten ruch błony bębenkowej jest przewodzony i wzmacniany poprzez kosteczki słuchowe i okienko owalne do ślimaka - dokładnie tą samą drogą, jak fala dźwiękowa. Okienko owalne także wpukla się do wewnątrz, powodując wzrost ciśnienie w perylimfie, który kompensowany jest przez uwypuklenie okienka okrągłego na zewnątrz. Jeśli w tym momencie nurek będzie próbował wyrównać ciśnienie poprzez wykonanie silnej i przedłużonej próby Valsalvy, jednoczesny wzrost ciśnienia perylimfy oraz ciśnienia transmitowanego przez błonę bębenkową może spowodować rozerwanie okienka okrągłego.

Przez cały czas, w organizmie wytwarzany jest płyn mózgowo-rdzeniowy, który omywa nerwy czaszkowe oraz nerwy rdzeniowe. Układ żylny stale produkuje i absorbuje te płyny, włącznie z perylimfą. Podczas manewru Valsalvy, ciśnienie w klatce piersiowej chwilowo wzrasta, ograniczając przepływ krwi w żyłach

głównych prowadzących do serca. W odpowiedzi na to następuje wzrost ciśnienia w dużych żyłach - a w związku z tym także ciśnienia płynu mózgowo-rdzeniowego, i również perylimfy. Jeśli nurek opóźni wyrównanie ciśnienia, okienko okrągłe w uchu wybrzusza się na zewnątrz w odpowiedzi na ciśnienie przenoszone do ślimaka. Jeśli w tym czasie nurek będzie próbował wyrównać ciśnienie poprzez silne i przedłużone wykonanie próby Valsalvy, jednoczesny wzrost ciśnienia perylimfy oraz ciśnienia transmitowanego przez błonę bębenkową może spowodować rozerwanie okienka okrągłego. Rozerwanie okienka okrągłego powoduje uczucie zablokowania ucha; nurek może także doświadczyć upośledzenia słuchu, często wraz z dzwonieniem w uszach i zawrotami głowy. Rozerwanie okienka okrągłego jest poważnym urazem i wymaga leczenia otolaryngologicznego, gdyż w przeciwnym razie może dojść do stałego ubytku słuchu albo nawet całkowitej głuchoty ucha dotkniętego urazem. Nawet pomimo leczenia, rozerwanie okienka okrągłego może mieć trwałe konsekwencje. Uraz ten może też wpływać na utrzymywanie równowagi. Na szczęście, możesz ograniczyć ryzyko rozerwania okienka okrągłego poprzez wyrównywanie ciśnienia odpowiednio wcześniej i często podczas zanurzania, nie wyrównywanie ciśnienia na siłę lub zbyt długo, oraz poprzez stosowanie techniki Frenzela zamiast Valsalvy.

Ucho tlenowe

Ostatnio stwierdzono, że tzw. ucho tlenowe (oxygen ear) także może być przyczyną urazu ciśnieniowego. Jest to zjawisko obserwowane wyłącznie u nurków technicznych oraz innych używających 100% tlenu podczas dekompresji. Niezwykle jest to, że może dojść do tego urazu pomimo właściwego wyrównywania ciśnienia w wodzie, a często dochodzi do niego także na powierzchni, po nurkowaniu. Ucho tlenowe może wystąpić, kiedy nurek techniczny używa czystego tlenu podczas dekompresji. Ponieważ niewielkie zmiany głębokości podczas dekompresji nie są niczym niezwykłym, nurek może wyrównywać ciśnienie kilkakrotnie podczas oddychania tlenem, i w efekcie zawartość tlenu w uchu środkowym dochodzi u niego do 100% (lub blisko tej wartości). Czysty tlen w uchu środkowym nie jest pilnym problemem. Jednak z czasem cienkie błony ucha środkowego oraz łożysko kapilarne zaczynają wchłaniać oraz metabolizować tlen. Skutkujący tym ubytek tlenu powoduje zmniejszenie objętości ucha środkowego, a tym samym efekt analogiczny jak podczas zanurzania bez wyrównywania ciśnienia. Jeśli nurek nie przywróci równowagi ciśnieniowej, skutek także jest taki sam - ściśnięcie ucha środkowego. Może do tego dojść jeszcze podczas dekompresji na danej głębokości, albo po wynurzeniu na powierzchnię po nurkowaniu, podczas którego ostatnie przystanki dekompresyjne były wykonywane na czystym tlenem. Zazwyczaj jednak nie stanowi to problemu, gdyż nurek odczuwa zmieniające się ciśnienie w uchu środkowym i wyrównuje je bez zastanawiania się nad przyczyną. Jeśli jednak nurek się wynurzy i z jakiegoś powodu nie może wyrównać ciśnienia (np. z powodu pojawiającej się po nurkowaniu niedrożności), postępujący metabolizm tlenowy w uchu może spowodować narastający dyskomfort i ściśnięcie ucha środkowego. Jeśli nie jesteś podatny na zatykanie się uszu po nurkowaniu, możesz uniknąć zjawiska ucha tlenowego po prostu przez zdanie sobie sprawy z jego występowania. Po wynurzeniu, na powierzchni łagodnie wyrównaj ciśnienie, tak by zrekompensować zmianę objętości w uchu środkowym spowodowaną przez metabolizm tlenu. Jeśli natomiast masz skłonności do zatykania się uszu po nurkowaniu, możesz po dokończeniu dekompresji na tlenie przerzucić się na powietrze lub nitroks, następnie zanurzyć się nieco (około metra) i wyrównać ciśnienie. Możesz następnie się lekko wynurzyć, ponownie się zanurzyć (znowu jedynie o metr) i raz jeszcze wyrównać ciśnienie. W ten sposób wyrównujesz ciśnienia w uchu środkowym mieszanką azotowo-tlenową, która nie jest metabolizowana tak szybko. Po nurkowaniu, miej przy sobie krople udrażniające nos, tak aby móc zapobiec jakimkolwiek powstającym po nurkowaniu niedrożnościom, które mogłyby utrudniać wyrównywanie ciśnienia.

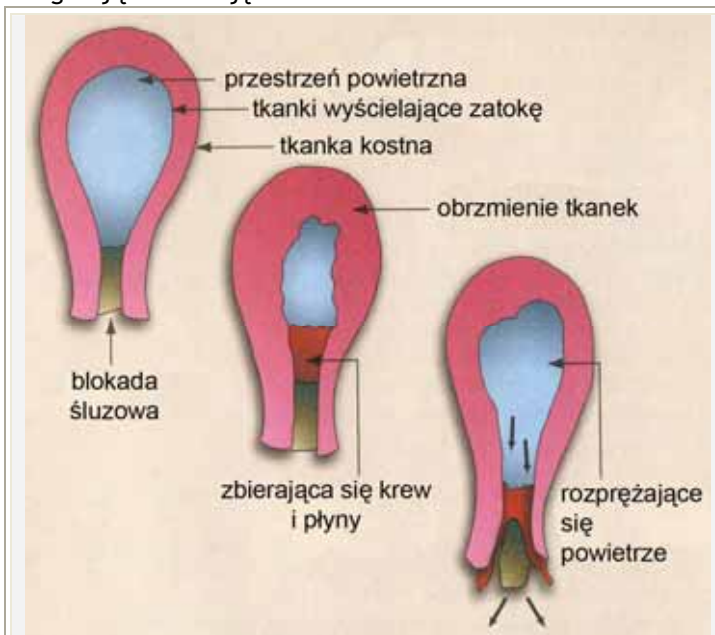
ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU:

- **Wyrównuj ciśnienie w uszach natychmiast po zanurzeniu, i kontynuuj wyrównywanie ciśnienia w miarę jak się zanurzasz. Nie czekaj do chwili, gdy poczujesz dyskomfort - wyrównuj ciśnienie zanim to odczucie się pojawi.**
- **Jeśli nie możesz wyrównać ciśnienia, wynurz się nieznacznie i spróbuj ponownie wyrównać ciśnienie. Jeśli ciągle nie możesz wyrównać ciśnienia, przerwij nurkowanie.**

- Informuj swojego partnera nurkowego lub instruktora o problemie z wyrównaniem ciśnienia. Jest to jedyny sposób, by ta osoba się o tym dowiedziała.
- Nie nurkuj będąc przeziębionym lub z alergią. Nie używaj środków udrażniających drogi oddechowe by umożliwić nurkowanie podczas przeziębienia lub z alergią.
- Wyrównuj ciśnienie z wyczuciem, używając manewru Frenzela. Nigdy nie wykonuj przedłużonego wyrównywania lub nie wyrównuj ciśnienia na siłę stosując manewr Valsalvy, ponieważ może to spowodować rozerwanie okienka okrągłego.
- Jeśli doznasz jakiegokolwiek urazu ciśnieniowego ucha, skontaktuj się niezwłocznie z lekarzem.
- Nie nurkuj z zatyczkami w uszach (chyba, że są to zatyczki specjalnie przeznaczone do nurkowania) i pamiętaj, że być może będziesz musiał odciągnąć na chwilę ściśle przylegający kaptur, by umożliwić normalne wyrównanie ciśnienia w uszach.
- Jeśli nurkujesz technicznie, bądź świadomy zjawiska zwanego uchem tlenowym, i wyrównuj ostrożnie ciśnienie w uszach podczas i po nurkowaniu, jeśli tylko odczujesz taką potrzebę.

Uraz ciśnieniowy zatok

Jeśli nurkujesz przeziębiony lub z objawami alergii, możesz mieć problemy nie tylko z wyrównaniem ciśnienia w uszach, ale także z zatokami. Nurek, który zanurza się z zatkanymi zatokami, może, choć nie musi odczuwać bólu w miarę jak ciśnienie powoduje kompresję gazu w przestrzeniach powietrznych zatok. Jeśli nurek zanurzy się gwałtownie, ból zatok może być odczuwalny między oczami, nad zębami albo w kościach policzkowych. Ból przeważnie słabnie w miarę, jak ciśnienie hydrostatyczne wciąga krew i płyny z otaczających tkanek do przestrzeni powietrznych zatok., przywracając równowagę ciśnieniową. Podczas wynurzania, gaz się rozpręża, wypychając nagromadzone płyny i krew do jamy nosowej. Powoduje to często, że nurek wynurza się z krwią w masce - co ewidentnie wskazuje, że doszło do ściśnięcia (squeeze) zatok. Uraz ten przeważnie sam ulega wyleczeniu, nie wymagając specjalnej pomocy medycznej. Skontaktuj się jednak z lekarzem, jeżeli po nurkowaniu występuje ostry lub rozległy ból albo gorączka sugerująca infekcję zatok.



Nurkowanie z przeziębieniem lub alergią może prowadzić do ściśnięcia zatok. Ciśnienie hydrostatyczne wciska krew i płyny ustrojowe z otaczających tkanek do przestrzeni powietrznej. Gdy nurek się wynurza, gaz ponownie się rozpręża, powodując wypchnięcie nagromadzonej krwi i płynów na zewnątrz zatoki, do jamy nosowej

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU:

- Nie nurkuj jeśli jesteś przeziębiony, występują u Ciebie objawy alergii lub wynikające z innej przyczyny zatkanie nosa.

- **Jeżeli czujesz ból w zatokach podczas zanurzania, prawdopodobnie doszło u ciebie do ściśnięcia zatok. Przestań się zanurzać i zakończ nurkowanie.**
- **Jeśli doszło u ciebie do ściśnięcia zatok, a ból jest silny, przedłuża się albo pojawiają się komplikacje, wybierz się na wizytę do laryngologa. Nie kontynuuj nurkowania dopóki nie wyleczysz zatok i nie pozbędziesz się problemu z zatkanymi drogami oddechowymi.**
- **Udaj się do laryngologa również jeżeli często dochodzi u ciebie do urazu ciśnieniowego zatok.**

Sposoby leczenia urazów ciśnieniowych ucha i zatok

Jak omówiono w Rozdziale Czwartym - Nurkowanie w Świecie Materialnym, to Robert Boyle jako pierwszy stwierdził, że objętość gazów zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do ciśnienia. Brzmi to świetnie z punktu widzenia naukowca planującego zabierać pod wodę nadmuchane balony, ale nie dla osoby z przeziębieniem, alergią, skrzywioną przegrodą nosową, polipami w zatokach, lub po prostu kiepsko działającymi trąbkami Eustachiusza. Dla kogoś, kto ma problemy z wyrównaniem ciśnienia w uszach lub zatokach, lecz mimo to próbuje nurkować, prawo Boyle'a objawia się naprawdę boleśnie.

Urazy ciśnieniowe ucha i zatok.

Jeśli wyższe ciśnienie zewnętrzne "wciska" płyny i krew z tkanek i naczyń do przestrzeni powietrznych ucha i zatok, efektem jest ból uszu i zatok, upośledzenie słuchu, i często zawroty głowy. Te formy urazu ciśnieniowego określane są jako *barotitis (uszy) lub barosinusitis (zatoki)*.

Barotitis może prowadzić do infekcji i zapalenia ucha środkowego. Leczenie przez otolaryngologów zazwyczaj wymaga doustnego przyjmowania antybiotyków, środków zmniejszających wydzielanie śluzu, a w sytuacjach przewlekłych - sterydów. Całkowita absorpcja przez tkanki lub usunięcie przez trąbki Eustachiusza płynów z ucha środkowego może trwać nawet sześć tygodni. W rzadkich przypadkach, w błonie bębenkowej umieszczana jest cienka rurka pozwalająca na wentylację ucha środkowego i zapobiegająca ponownemu naptłynięciu płynów. Oczywiście, uszkodzony nie może nurkować, dopóki rurka nie zostanie usunięta, a błona bębenkowa nie zagoi się. W żadnym wypadku nurek z *barotitis* nie powinien nurkować lub latać samolotem, do chwili, gdy ucho zacznie funkcjonować prawidłowo.

Barosinusitis objawia się bólem w policzkach, pomiędzy oczami, wzdłuż nosa i w górnej szczęce. Nurek powinien zaprzestać nurkowania. Otolaryngolodzy zalecają zazwyczaj doustne przyjmowanie antybiotyków i środków zmniejszających wydzielanie śluzu. Niekiedy ból zmniejsza się po użyciu sprayów do nosa oraz naprzemiennym stosowaniu zimnych i gorących okładów na policzkach, pomagających w udrożnieniu zatok. Lekarz może też zalecić zażywanie środków przeciwbólowych.

Przerwana lub rozerwana błona bębenkowa. Do przerwania lub rozerwania błony bębenkowej dochodzi zazwyczaj wtedy, gdy nurek kontynuuje zanurzanie pomimo silnego bólu w uszach. Także nawracające zapalenia ucha w dzieciństwie mogą spowodować osłabienie błony bębenkowej i zwiększenie jej podatności na przerwanie, a inną przyczyną urazu może być wyjątkowo silne wyrównywanie ciśnienia, zwłaszcza w trakcie kataru.

Zimna woda wlewająca się do ucha może spowodować zawroty głowy. W takiej sytuacji, uszkodzony nurek powinien poinformować partnera o problemie i powoli się wynurzyć. Krew w uchu zewnętrznym generalnie oznacza, że doszło do przerwania błony.

Uszkodowany nurek powinien powstrzymać się od nurkowania, zapobiegać dostaniu się wody do ucha, i jak najszybciej skonsultować się z otolaryngologiem. Przerwanie błony bębenkowej powoduje czasową utratę słuchu, ale słuch powróci po zrośnięciu się błony. Niewielkie rozdarcie błony zrośnie się w przeciągu jednego do sześciu tygodni. W wielu wypadkach lekarz nie będzie musiał przepisywać kropli ani antybiotyków, ponieważ nie dojdzie do infekcji. Musi o tym jednak zdecydować lekarz.

Rozerwania, które nie zrastają się samorzutnie, muszą być operowane. W trakcie operacji nazywanej tympanoplastyką, fragment tkanki umieszczany jest nad i pod rozerwaniem, tak że zostaje ono zakryte.

Uraz ciśnieniowy ucha wewnętrznego.

Do rozerwanie okienka okrągłego, czyli do urazu ciśnieniowego ucha wewnętrznego, zazwyczaj dochodzi na skutek późnego rozpoczęcia wyrównywania ciśnienia i wykonania silnej, przedłużonej próby Valsalvy. Gdy dojdzie do urazu, ucho będzie wydawać się wypełnione, może też wystąpić upośledzenie słuchu. Głuchota może pojawić się natychmiast, albo z niewielkim opóźnieniem.

Nurek, który podejrzewa u siebie uraz ciśnieniowy ucha wewnętrznego, powinien natychmiast skontaktować się z otolaryngologiem. Lekarz może zalecić odpoczynek i unikanie wysiłku przez pewien czas; jeśli jednak słuch nie powróci, konieczna może być operacyjna rekonstrukcja okienka okrągłego. Po takiej operacji, uszkodzony nurek nie powinien nurkować ani latać samolotem przez kilka miesięcy.

Zawroty głowy. Zawroty głowy (vertigo) są symptomem wielu rodzajów urazów ciśnieniowych, i dlatego nie powinny być ignorowane. Przyczyny zawrotów głowy mogą być różne, od lekkiego ściśnięcia ucha środkowego, aż do przerwania błony bębenkowej lub urazu ciśnieniowego ucha wewnętrznego. Dlatego symptom ten powinien być potraktowany poważnie, i nurek powinien natychmiast skonsultować się z lekarzem specjalizującym się w medycynie nurkowej (na przykład z DAN - Divers Alert Network). Dla prawidłowej diagnozy przydatne jest poznanie historii nurkowania.

Pomocna może być ocena stanu ucha przez lekarza, który może rozpoznać przerwanie błony bębenkowej lub okienka okrągłego lub owalnego. Zawroty głowy mogą też świadczyć o chorobie dekompresyjnej, ale w takim wypadku często inne symptomy ułatwiają diagnozę.

Ucho pływaka (zapalenie ucha zewnętrznego - otitis externa).

Chociaż nie jest to właściwie forma urazu ciśnieniowego, ucho pływaka jest prawdopodobnie najczęstszym problemem nurków dotyczącym ucha. To nieprzyjemne schorzenie wynika ze zmiany odczynu (pH) kanału ucha zewnętrznego z kwaśnego na zasadowy na skutek wielokrotnej ekspozycji na wodę i wilgoć.

Symptomy mogą być różne - od kłopotliwego swędzenia, aż do całkowitego zamknięcia kanału ucha zewnętrznego, obrzęku, nasilonego bólu i gorączki.

Najlepszym sposobem zapobiegania temu schorzeniu jest regularne przemywanie uszu po nurkowaniu jednym z łatwo dostępnych roztworów, na przykład przeznaczonych do uszu kropli zawierających kwas octowy. Jeśli nurek jest podatny na zapalenie ucha zewnętrznego, powinien robić to za każdym razem gdy woda dostanie się do kanału słuchowego. Jeśli zaś w uszach nurka znajduje się duża ilość woszczyzny, otolaryngolog powinien okresowo ją usuwać.

Wyrośla kostne (exostoses)

to twarde guzki w kanale ucha zewnętrznego, pojawiające się po wielokrotnej ekspozycji na zimną wodę. Wyrośla kostne mogą zatrzymywać w kanale ucha różne śmieci i paprochy, dlatego nurek z tymi zmianami może wymagać regularnego czyszczenia uszu.

Ostry przypadek ucha pływaka wymaga konsultacji lekarskiej. Na leczenie zwykle składa się czyszczenie ucha, umieszczenie tamponu w przewodzie słuchowym zewnętrznym, doustne przyjmowanie antybiotyków i środków przeciwbólowych, stosowanie kropli dousznych i nagrzewania lampą. Poszkodowany nie powinien nurkować i powinien chronić ucho przed wodą, aż dojdzie do całkowitego wyleczenia.

Niekiedy w uchu zewnętrznym dochodzi do infekcji grzybiczej. Otolaryngolog może ją zdiagnozować i zalecić odpowiednie postępowanie.

Ogólne sposoby zapobiegania.

Powinieneś wyrównywać ciśnienie zaraz po rozpoczęciu zanurzania, a później często w miarę zanurzania. Dogodnie jest korzystać z liny opustowej do kontrolowania tempa zanurzania bądź wynurzania. Dobrze jest też zanurzać się i wynurzać w pozycji pionowej lub ukośnej - z głową powyżej stóp, tak by obniżyć ciśnienie żyłne w głowie i szyi i ułatwić wyrównywanie ciśnienia.

W żadnym wypadku nie nurkuj z przeziębieniem, alergią lub nawet lekkim przytkaniem górnych dróg oddechowych - trąbki Eustachiusza i wejścia do zatok mogą być przyblokowane w stopniu wystarczającym, by uniemożliwić wyrównanie ciśnienia. Jeśli masz alergię, poddawaj się leczeniu.

Po zakończeniu nurkowania, żeby zapobiec uchu pływaka możesz przemyć przewody słuchowe i wysuszyć uszy na słońcu. W aptekach kupić można dostępne bez recepty płyny do przemywania uszu. Oczywiście, zawsze dobrze jest omówić z lekarzem domowym stosowanie środków i metod zapobiegawczych. Nie stosuj żadnego rodzaju antybiotyku do uszu jako środka zapobiegawczego - o ile nie zalecił ci tego lekarz. Jeżeli często masz problemy z wyrównywaniem ciśnienia, twój lekarz również może ci pomóc. Często skutkuje stosowanie sprayu do nosa dziesięć minut przed nurkowaniem. Jednak zabieg ten nie powinien być nigdy stosowany do umożliwienia nurkowania w trakcie przeziębienia, i powinieneś omówić z lekarzem częste stosowanie takiego sprayu.

Skrzywienie przegrody nosowej (chrzęstno-kostnej przegrody rozdzielającej jamę nosową) może przyczyniać się do blokowania trąbek Eustachiusza i ujść zatok. Zanim zrezygnujesz z nurkowania przez niemożność wyrównania ciśnienia, skorzystaj z porady otolaryngologa. Wyprostowanie przegrody lub otwarcie nosa może ułatwić wyrównywanie ciśnienia i umożliwić ci nurkowanie.

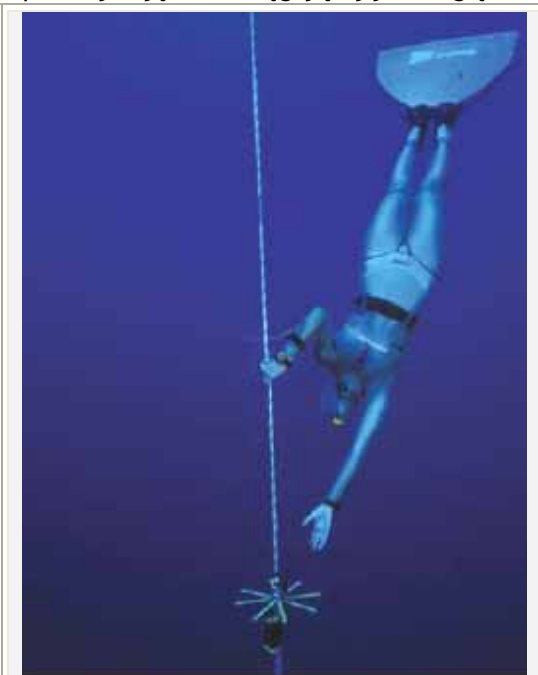
Nie nurkując gdy nie możesz wyrównać ciśnienia, pamiętając o wczesnym i częstym wyrównywaniu ciśnienia w uszach i unikając nasilonego wyrównywania ciśnienia, powinieneś być w stanie uniknąć urazów ciśnieniowych uszu i zatok

Uraz ciśnieniowy płuc

Uraz ciśnieniowy płuc (barotrauma płuc) odnosi się przede wszystkim do sytuacji, w których nurkownik wynurza się wstrzymując oddech po oddychaniu gazem z butli pod wodą. Wszystkie przypadki urazu ciśnieniowego płuc są poważnymi urazami. Zaczniemy jednak od omówienia teoretycznego urazu ciśnieniowego płuc, do którego może dojść podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu.

Ściśnięcie płuc

Jak dowiedziałeś się wcześniej, płuca zmieniają objętość podczas normalnej pracy, i dlatego dla twoich płuc generalnie nie stanowi problemu wzrost ciśnienia i spadek objętości powietrza podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu. Nie wiadomo jednak dokładnie co się dzieje, gdy nurkujesz na głębokość na której twoje płuca są ściśnięte poniżej objętości zalegającej - najmniejszej objętości, jaką płuca mogą mieć w normalnych warunkach na powierzchni. Co prawda, dla większości ludzi oznaczałoby to zanurkowanie na zatrzymanym oddechu na głębokość poniżej 30 metrów, jednakże tylko wtedy, gdy rozważamy nurkowanie na pełnym wdechu. Jeśli wykonasz wydech i zanurkujesz z pustymi płucami, mogą one ulec kompresji poniżej objętości zalegającej już na głębokości dwóch, trzech metrów.



Mandy Rae-Cruishank z Performance Freediving sięga po denną plakiętkę podczas udanego nurkowania po rekord świata w kategorii Stałe Obciążenie na Grand Cayman na Brytyjskich Wyspach Dziewiczych, w 2004 r. Choć ściśnięcie płuc było uważane za potencjalne ryzyko, sukcesy freediverów nurkujących na rekordowe głębokości wykazały, że w praktyce nie jest to problemem

Dawniej fizjolodzy uważali, że limitem nurkowania na zatrzymanym oddechu będzie głębokość około 40 metrów. Podstawą do tych przypuszczeń było to, że przy ciśnieniu panującym na tej głębokości (5 bar) płuca zostaną skompresowane mniej więcej do objętości zalegającej. Uważano, że jeżeli zejdziesz głębiej, to możesz doznać urazu ciśnieniowego płuc (ściśnięcia płuc - lung squeeze lub thoracic squeeze) na skutek nadmiernego ściśnięcia pęcherzyków płucnych oraz innych tkanek powyżej ich fizjologicznych możliwości, powodując wzrost ciśnienia w tętnicach płucnych i ich rozerwanie.

Nie trwało długo zanim nurkowie uprawiający ekstremalny freediving udowodnili, że przewidywania te były błędne. Dzisiaj rekord nurkowania na zatrzymanym oddechu przekracza 150 metrów, a nic nie wskazuje na to, że głębsze nurkowania, choć ryzykowne, nie są możliwe. Pomimo tego, że notowano przypadki śmiertelne podczas bicia rekordów głębokości i czasu nurkowania na zatrzymanym oddechu, do dnia dzisiejszego żaden z nich nie był spowodowany urazem ciśnieniowym płuc (prawie wszystkie śmiertelne przypadki były spowodowane przez utratę przytomności lub utonięcie). Fizjolodzy badali niektórych czołowych nurków uprawiających freediving, próbując dowiedzieć się, dlaczego nie dochodzi u nich do ściśnięcia płuc, a raczej dlaczego ściśnięcie płuc (które musi zachodzić zgodnie z prawem Boyle'a) wydaje się im nie szkodzić. Okazuje się, że nasze ciała są w stanie wytrzymać nadmierne zmniejszenie objętości płuc. Niektóre z tych mechanizmów nie mają skutków następczych, podczas gdy inne tak, ale krótki czas trwania nurkowań ogranicza te skutki.

Wydaje się, że jeśli płuca nurka ulegają kompresji poniżej objętości zalegającej, to dochodzi do naturalnej kompresji klatki piersiowej oraz uniesienia przepony. Pomaga to

skompensować zmniejszenie objętości. Fizjolodzy sądzą, że krew ulega redystrybucji z obszarów obwodowych, tak aby utrzymać równowagę ciśnienia w klatce piersiowej. Wydaje się, że zmniejsza to oczekiwaną redukcję objętości.

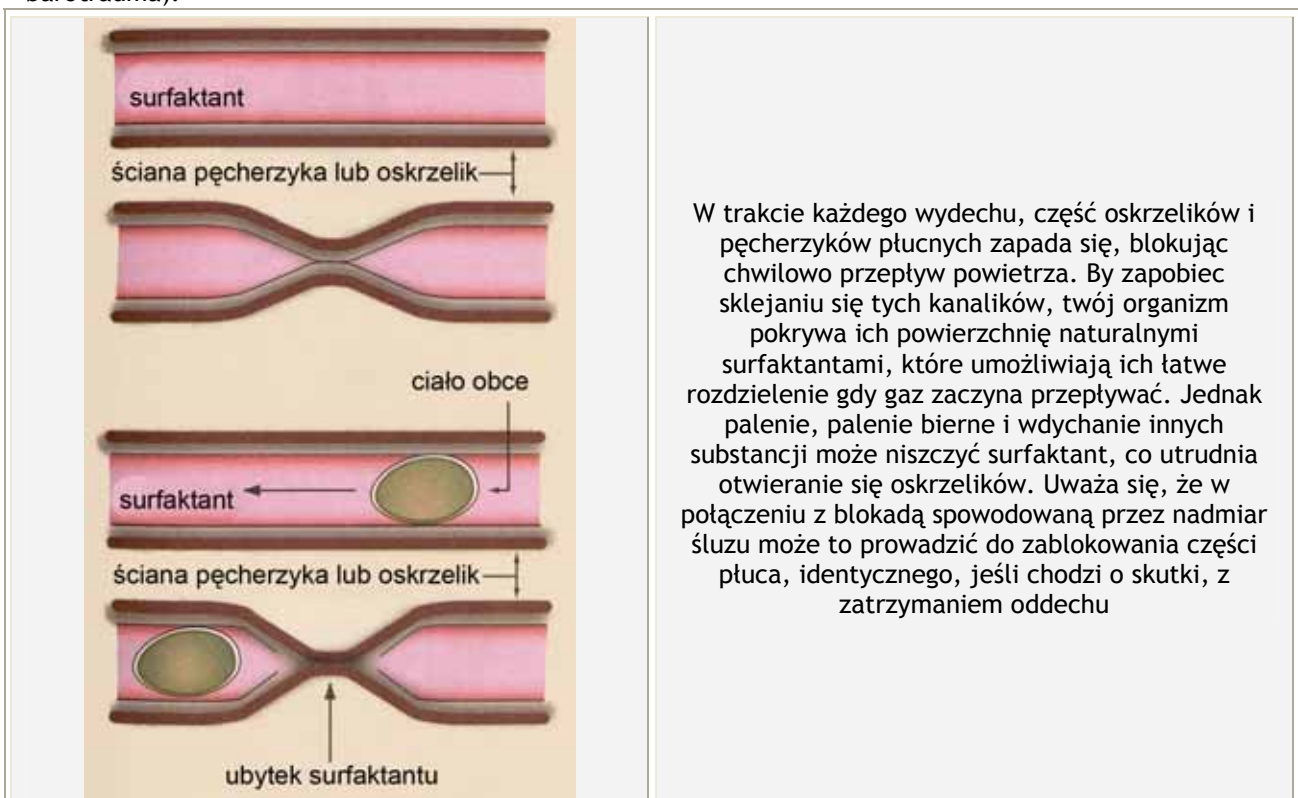
Inną reakcją na tę sytuację może być obrzęk i krwawienie naczyń włosowatych płuc, i wyciek krwi i płynów przez ścianę kapilar do pęcherzyków. To spowodowałoby częściowe ograniczenie efektu zmniejszenia objętości spowodowane kompresją gazu, jednak obrzęk płuc (czyli obecność krwi w płucach) jest urazem, który upośledza wymianę gazową i zmniejsza objętość oddechową, podobnie jak zapalenie płuc. Nie ma wielu doniesień na ten temat, jednakże istnieją dane, że rzeczywiście do takich zmian w organizmie może

dochodzić. W niektórych przypadkach, freediverzy kaszleli krwią po wykonaniu wielu głębokich nurkowań pod rząd.

Fizjolodzy uważają, że obrzęk płuc nie stanowi poważniejszego problemu, gdyż czas trwania ucisku jest krótki i w tym czasie jedynie niewiele płynu może się zgromadzić w płucach. Jest to potwierdzone faktem, że objawy obrzęku płuc występowały jedynie po wykonaniu dłuższej serii głębokich nurkowań na zatrzymanym oddechu. Zatem generalnie substancje nagromadzone w płucach ulegają naturalnej absorpcji. Więc nawet jeśli teoretycznie ściśnięcie płuc mogłoby być urazem zagrażającym życiu, nie udowodniono, by był to problem dotyczący wiele osób. Opisano zaledwie jeden przypadek ściśnięcia płuc wymagający pilnej interwencji medycznej, lecz nie jest pewne, czy ten przypadek nie wynikał częściowo z dostania się wody do dróg oddechowych.

Uraz rozprężeniowy płuc²

Gdy oddychasz z automatu lub innego aparatu do oddychania pod wodą, ciśnienie w twoich płucach wyrównywane jest z każdym oddechem. Sytuacja ulega jednak zmianie, gdy podczas wynurzenia wstrzymasz oddech, albo gdy na skutek urazu lub schorzenia dojdzie do zatrzymania powietrza (gazu) w części płuca. W takiej sytuacji, gaz rozprężający się na skutek spadku ciśnienia z dużym prawdopodobieństwem spowoduje uraz rozprężeniowy płuc (lung overexpansion injury, ascending lung barotrauma).



W trakcie każdego wydechu, część oskrzelików i pęcherzyków płucnych zapada się, blokując chwilowo przepływ powietrza. By zapobiec sklejeniu się tych kanalików, twój organizm pokrywa ich powierzchnię naturalnymi surfaktantami, które umożliwiają ich łatwe rozdzielanie gdy gaz zaczyna przepływać. Jednak palenie, palenie bierne i wdychanie innych substancji może niszczyć surfaktant, co utrudnia otwieranie się oskrzelików. Uważa się, że w połączeniu z blokadą spowodowaną przez nadmiar śluzu może to prowadzić do zablokowania części płuca, identycznego, jeśli chodzi o skutki, z zatrzymaniem oddechu

Złota zasada nurkowania - by nigdy nie wstrzymywać oddechu - wynika właśnie z chęci uniknięcia zagrożenia, jakie niesie ten uraz. Najczęstszą przyczyną wstrzymywania oddechu przez nurków była tradycyjnie panika lub ignorancja, ale dochodziło do niego także na skutek nudności, zadławienia lub nieuwagi. Nieprawidłowe oddychanie (skip-breathing, omówione w sekcji o hipokapni) także było podawane jako przyczyna. Wydaje się też, że przy bardzo szybkim wynurzeniu gaz może rozprężać się w płucach szybciej, niż jest usuwany przy wydechu, także powodując uraz rozprężeniowy.

² W języku angielskim przyjęta jest nazwa tego urazu oddająca jego istotę - *lung overexpansion injury*. W języku polskim określa się go mniej jednoznacznie - jako uraz ciśnieniowy lub barotraumę płuc, które to określenie teoretycznie obejmuje także opisane powyżej ściśnięcie płuc (*lung squeeze*). Dlatego w tytule sekcji użyłem nazwy jednoznacznie odróżniającej ten uraz od ściśnięcia płuc - choć nie stosowanej powszechnie w Polsce, zaś w tekście używałem tych nazw zamiennie (przyp. tłum.)

Rzadsze, choć także możliwe, jest powstanie blokady zatrzymującej gaz w części płuca, i sprawiającej, że ta część płuca jakby "wstrzymuje oddech". Możliwymi przyczynami są przeziębienie lub infekcja dolnych dróg oddechowych, powodujące nagromadzenie śluzu i płynów w płucach. Z tego samego powodu, nie powinieneś nurkować z przeziębieniem, alergią lub innym schorzeniem powodującym nagromadzenie wydzieliny.

Palenie uważane jest za jedną z możliwych przyczyn urazu ciśnieniowego płuc, gdyż generalnie powoduje zwiększenie ilości wydzieliny zalegającej w drogach oddechowych. W trakcie każdego wydechu, część oskrzelików i pęcherzyków płucnych zapada się, blokując chwilowo przepływ powietrza. By zapobiec sklejeniu się tych kanalików, twój organizm pokrywa ich powierzchnię naturalnymi surfaktantami, które umożliwiają im łatwe rozdzielanie gdy gaz zaczyna przepływać. Jednak palenie, palenie bierne i wdychanie innych substancji może niszczyć surfaktant, co utrudnia otwieranie się oskrzelików. Uważa się, że to w połączeniu z blokadą spowodowaną przez nadmiar śluzu może prowadzić do zablokowania części płuca, jeśli chodzi o skutki identycznego z zatrzymaniem oddechu.

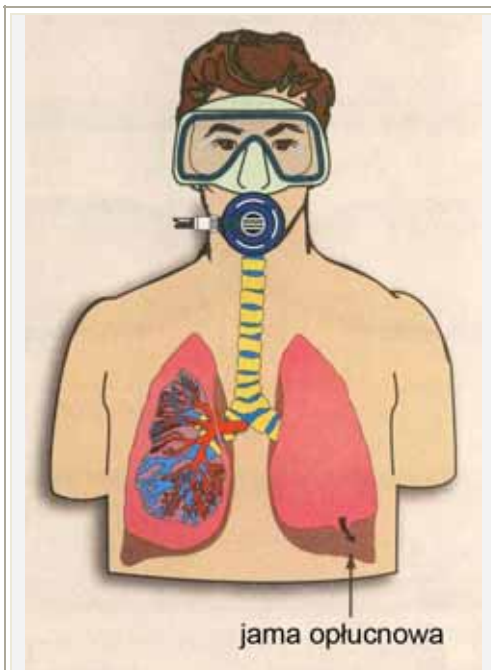
Chociaż zdarzało się to wyjątkowo, notowano także przypadki barotraumy płuc bez wyraźnej przyczyny. Fizjolodzy zauważyli także, że do urazu rozprężeniowego z nieznanymi powodów proporcjonalnie częściej dochodziło u nurków niż w innych okolicznościach wystawiających człowieka na zmiany ciśnienia (komory wysokościowe, samoloty itd.). Tłumaczące to hipotezy zwracały uwagę na rozmieszczenie krwi w trakcie pobytu pod wodą, oraz na to, że gdy nurek wznosi się w kolumnie wody, zmiany ciśnienia są często znacznie szybsze niż w tych innych okolicznościach. Mimo to, do barotraumy płuc w trakcie nurkowania dochodzi bardzo rzadko, a w większości przypadków może być ona przypisana wstrzymywaniu oddechu i/lub nadmiernemu tempu wynurzenia.

Nie potrzeba dużej różnicy ciśnień by doszło do barotraumy płuc. Badania wykazały, że u nurka rozpoczynającego wynurzenie z pełnymi płucami i wstrzymującym oddech, wystarczy zmiana głębokości o jeden lub półtora metra by doszło do urazu rozprężeniowego. Co więcej, ryzyko urazu wzrasta w miarę wynurzenia, gdyż stosunek wzrostu objętości gazu do zmiany głębokości o daną wartość (np. o metr) jest większy bliżej powierzchni - zgodnie z prawem Boyle'a.

Gdy dochodzi do urazu rozprężeniowego, płuco nie pęka jak balon, ale raczej ulega rozdarciu. Największe ryzyko związane z urazem wynika nie z samego rozdarcia, ale z przedostawania się powietrza z płuc do tkanek i krwiobiegu. Możemy podzielić urazy rozprężeniowe płuc na cztery podstawowe kategorie: embolia gazowa, odma opłucnowa, odma śródpiersiowa i odma podskórna. Uraz ciśnieniowy powoduje też rozdarcie naczyń krwionośnych w płucach, i wynikające z tego bezpośrednie mieszanie się krwi z powietrzem w płucach. Często sprawia to, że poszkodowany kaszle krwią.

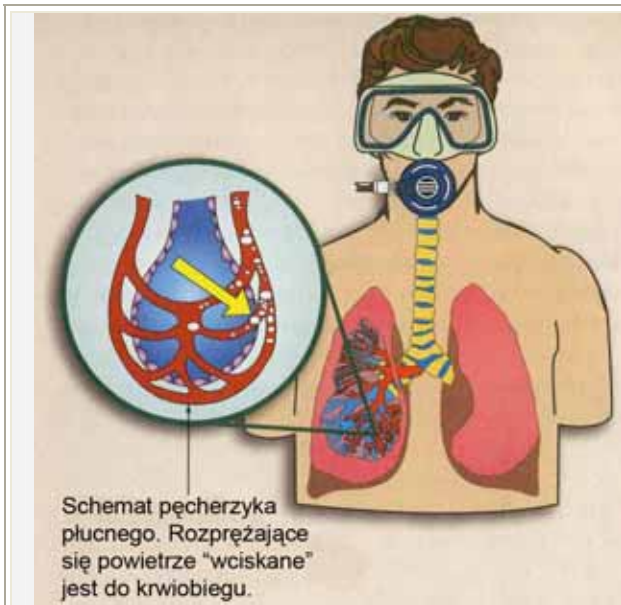
Embolia gazowa.

Do embolii gazowej (gas embolism, arterial gas embolism - AGE), znanej też jako zator gazowy - najpoważniejszego z urazów rozprężeniowych płuc, dochodzi wtedy, gdy powietrze przechodzi do krwiobiegu, z rozdartych pęcherzyków płucnych do naczyń włosowatych płuc. Dla uściślenia, embolia/zator to stan, w którym jakiegokolwiek ciała obce w naczyniach krwionośnych blokuje przepływ krwi; w zatorze gazowym takim "ciałem obcym" jest pęcherzyk powietrza lub innej mieszanki gazowej używanej do oddychania, a w tętniczym zatorze gazowym (AGE) taki pęcherzyk znajduje się w tętniczej części układu krążenia.



Jeżeli przepętnione płuco rozedrze się wzdłuż krawędzi, gaz wycieknie do jamy opłucnowej, powodując częściowe lub całkowite zapadnięcie się płuca. Taki uraz nazywany jest odmą opłucnową

Odma opłucnowa.



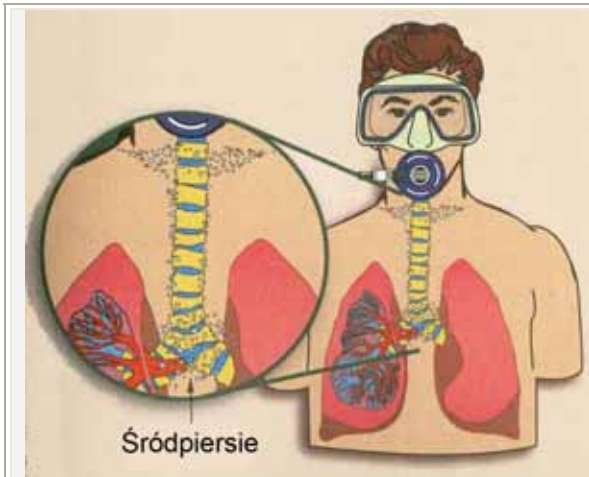
Schemat pęcherzyka płucnego. Rozprężające się powietrze "wciskane" jest do krwiobiegu.

Powietrze przenikające do krwiobiegu w uszkodzonych płucach przepływa żyłami płucnymi do serca, a z lewej komory serca do aorty i części tętniczej układu krążenia. Wraz z krwią tętniczą, pęcherzyki gazu mogą się przemieścić praktycznie do każdego miejsca w organizmie, powodując poważne uszkodzenia przez blokowanie przepływu krwi do tkanek.

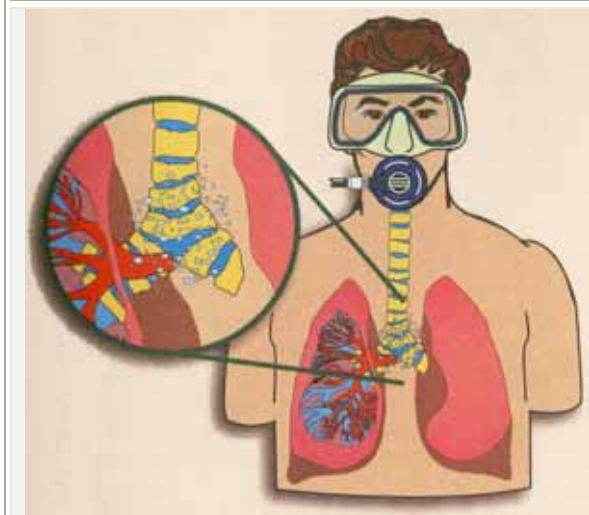
Pierwsze główne odgałęzienia aorty znajdują się w łuku aortalnym, ponad sercem. Odgałęzieniami tymi są tętnice szyjne, zaopatrujące mózg. Jeśli pęcherzyki przepłyną do tętnic szyjnych, co jest prawdopodobne, mogą trafić do mózgu i spowodować mózgową embolię gazową. Blokują wtedy dopływ niosącej tlen części mózgu, powodując jego udar niedokrwienny. Najczęstszym objawem jest utrata przytomności, a do innych należą zaburzenia świadomości, zmieszanie, szok, zmiana osobowości; udar niedokrwienny mózgu może prowadzić nawet do śmierci. W porównaniu z chorobą dekompresyjną, omówioną w dalszej części rozdziału, efekty mózgowej embolii gazowej objawiają się szybko i wyraźnie, podczas gdy choroba dekompresyjna rozwija się zazwyczaj z opóźnieniem.

Jeśli ofiara embolii gazowej ma tyle szczęścia, że pęcherzyki ominą tętnice szyjne, embolia wciąż może pojawić się i powodować uszkodzenia w innych częściach organizmu. Na przykład, jeśli pęcherzyki zablokują odżywiające serce naczynia wieńcowe, ograniczony przepływ krwi może spowodować zawał serca.

Do najpoważniejszego z urazów rozprężeniowych płuc dochodzi wtedy, gdy pęcherzyki powietrza przechodzą do krwiobiegu - z rozdartych



Odma podskórna (subcutaneous emphysema) często występuje jednocześnie z odmą śródpiersiową, i powstaje na skutek przemieszczania się pęcherzyków gazu ze śródpiersia przez obszar stawiający najmniejszy opór, aż do strefy miękkich tkanek u nasady szyi



Inną możliwą konsekwencją urazu rozprężeniowego płuc jest nagromadzenie się gazu w śródpiersiu. Jest to tak zwana odma śródpiersiowa

Jeżeli przepiętne płuco rozedrze się wzdłuż krawędzi, gaz wycieknie do jamy opłucnowej, czyli przestrzeni zawartej pomiędzy dwoma blaszkami opłucnej - jedną okrywającą płuco, a drugą wyścielającą ściany klatki piersiowej, powodując częściowe lub całkowite zapadnięcie się płuca. Taki uraz nazywany jest odmą opłucnową (pneumothorax).

Sama w sobie, odma opłucnowa nie stanowi tak bezpośredniego zagrożenia życia jak embolia, ponieważ poszkodowany wciąż ma jedno funkcjonujące płuco. Zapadnięcie płuca powoduje ostry ból w klatce piersiowej, poszkodowany może też odkastywać skrzepy krwi.

Może dojść do spontanicznego wystąpienia odmy opłucnowej bez wystąpienia urazu rozprężeniowego (zarówno w nurkowaniu, jak i niezależnie od niego), na skutek osłabienia struktury płuc, prowadzącej do ich nagłego rozdarcia i zapadnięcia. Chociaż rzadka, spontaniczna odma opłucnowa może wystąpić w każdym momencie u osoby, u której występuje takie schorzenie. Jeśli dojdzie do niego w trakcie pobytu nurka pod wodą, może być poważniejsze niż odma powstała na skutek urazu ciśnieniowego: stan nurka może ulec pogorszeniu podczas wynurzenia, gdy rozprężające się powietrze naciska na zapadnięte płuco. Spontanicznie występująca odma ma tendencję do nawracania, dlatego bezwzględnie wyklucza dalsze nurkowanie.

Odma śródpiersiowa.

Inną możliwą konsekwencją urazu rozprężeniowego płuc jest nagromadzenie się gazu w śródpiersiu, czyli centralnej części klatki piersiowej. Odma śródpiersiowa (mediastinal emphysema) jest jednak sama w sobie znacznie mniej niebezpieczna niż odma opłucnowa lub embolia gazowa.



Zalecaną procedurą podczas udzielania pierwszej pomocy osobom które doznały jakiegokolwiek urazu rozprężeniowego płuc jest podanie czystego tlenu do oddychania

Gaz gromadzący się w śródpiersiu w wyniku odmy śródpiersiowej może uciskać serce i główne naczynia krwionośne, zaburzając krążenie. Poszkodowany może czuć się bliski omdlenia lub nie móc złapać oddechu w fectie upośledzenia krążenia. Jednak w wielu sytuacjach symptomy są łagodne lub brak ich w ogóle, a poszkodowany może odczuwać jedynie ból w klatce piersiowej i/lub ucisk klatki. Jednak nawet wtedy, symptomy takie wskazują na konieczność udzielenia pierwszej pomocy i pilnego zasięgnięcia opinii lekarza: istnieje prawdopodobieństwo, że doszło jednocześnie do embolii gazowej.

Odma podskórna.

Odma podskórna (subcutaneous emphysema) często występuje jednocześnie z odmą śródpiersiową, i powstaje na skutek przemieszczania się pęcherzyków gazu ze śródpiersia przez obszar stawiający najmniejszy opór, aż do strefy miękkich tkanek u nasady szyi. Powietrze gromadzi się bezpośrednio pod skórą, sprawiając, że poszkodowany odczuwa wypełnienie szyi. Zmienia mu się także głos. Skóra może trzeszczeć pod wpływem dotyku, a w poważniejszych przypadkach uraz może powodować nabrzmienie boków szyi i górnej części klatki piersiowej. Ponieważ odma podskórna wynika z odmy śródpiersiowej, wielu fizjologów traktuje ją po prostu jako odmianę odmy śródpiersiowej, a nie jako odrębny typ urazu.

Pierwsza pomoc i leczenie urazów ciśnieniowych płuc

Chociaż trzy z czterech typów urazu rozprężeniowego płuc nie stanowią same w sobie bezpośredniego zagrożenia życia, stwierdzenie któregośkolwiek z nich jest dowodem, że doszło

do urazu ciśnieniowego płuc. Dlatego najlepszym wyjściem jest takie postępowanie i udzielanie pierwszej pomocy, jak gdyby jednocześnie wystąpiła embolia - i pozostawienie ostatecznej diagnozy lekarzowi specjalizującemu się w medycynie nurkowej.

Podstawową zalecaną pierwszą pomocą w wypadku jakiegokolwiek urazu ciśnieniowego jest podanie tlenu. Tlen jest pomocny na dwa sposoby. Po pierwsze, oddychanie tlenem powoduje obniżenie ciśnienia parcjalnego azotu w pęcherzykach płucnych, i przez to wzrost gradientu ciśnienia azotu pomiędzy krwią a światłem pęcherzyka. Przyspiesza to usuwanie azotu z organizmu, spowalnia i zapobiega wzrostowi pęcherzyków w naczyniach i ułatwia ich usuwanie. Po drugie, pęcherzyki w organizmie powodują uszkodzenia wywołując lokalną hipoksję - blokując przepływ krwi niosącej tlen; dlatego oddychanie tlenem zwiększa stężenie tlenu we krwi i "efektywność" krwi docierającej do tkanek dotkniętych hipoksją. W wypadku mózgowej embolii gazowej jest to szczególnie ważne, gdyż dotkniętą tkanką jest mózg, szczególnie wrażliwy na niedotlenienie.

Poszkodowany nieprzytomny, ale oddychający, powinien zostać położony na lewym boku, z podtrzymaną głową. Leżenie na boku pozwala zachować drożność dróg oddechowych w razie, gdyby poszkodowany miał wymiotować. Stan niektórych pacjentów ulegał pogorszeniu, gdy zmieniali pozycję na siedzącą; dlatego odradzają poszkodowanemu siadanie lub wstawanie podczas udzielania pierwszej pomocy lub transportu - o ile przybyły na miejsce lekarz nie zaleci inaczej. Nieoddychającego poszkodowanego położyć na plecach i rozpocznij sztuczne oddychanie, masaż serca i defibrylację - w zależności od potrzeb. Pamiętaj, że najważniejsze jest zachowanie i przywracanie drożności dróg oddechowych, kontrolowanie oddychania i krążenia, podanie tlenu, oraz jak najszybsze przetransportowanie nurka do szpitala.

Jeśli u nurka doszło do zatoru gazowego (embolii), kluczowa jest szybka rekompresja w celu zmniejszenia ilości i rozmiaru pęcherzyków w krwiobiegu i ponownego przeprowadzenia gazu do roztworu. Skutecznie przywraca to przepływ krwi do tkanek. Żaden inny uraz ciśnieniowy nie wymaga rekompresji - o ile jednocześnie nie występuje embolia gazowa; ale to lekarz musi podjąć decyzję o sposobie postępowania.

Odma opłucnowa może wymagać chirurgicznego usunięcia gazu poprzez dren wprowadzony przez ścianę klatki piersiowej do jamy opłucnowej. Rekompresja pacjenta, u którego wystąpiła jednocześnie embolia gazowa i odma opłucnowa, może być skomplikowana, ze względu na rozprężanie się powietrza w opłucnej podczas dekompresji. W takim wypadku, leczenie odmy musi zostać przeprowadzone w komorze przed przywróceniem pacjenta do ciśnienia atmosferycznego.

Odma śródpiersiowa i podskórna ustąpi samoczynnie, gdyż krew będzie powoli reabsorbować uwięzione powietrze. W wyjątkowych sytuacjach, oddychanie tlenem może przyspieszyć reabsorbcję powietrza.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU:

- **Pamiętaj, by nigdy nie wstrzymywać oddechu podczas korzystania z jakiegokolwiek aparatu do oddychania pod wodą.**
- **Wynurzaj się powoli, nie przekraczając prędkości 18 metrów na minutę lub maksymalnej prędkości dozwolonej przez twój komputer. Jeszcze wolniejsze tempo wynurzania jest lepsze.**
- **Palenie papierosów i przekrwienie płuc mogą stwarzać ryzyko uwięzienia gazu w części płuc, i w następstwie wystąpienia urazu ciśnieniowego. Nie nurkuj z jakąkolwiek formą obturacji płuc. Dla twojego zdrowia i bezpieczeństwa, najlepsze będzie rzucenie palenia.**
- **Bądź przygotowany na wypadek wystąpienia urazu ciśnieniowego płuc. Zalecane jest odbycie kursu PADI Rescue Diver oraz Emergency First Response.**

Czym jest zespół urazów dekompresyjnych?

Chociaż nieraz spotkasz się z użyciem określenia "zespół urazów dekompresyjnych" (decompression illness, DCI) zamiennie z określeniem "choroba dekompresyjna" (decompression sickness, DCS), nie są to synonimy. Choroba dekompresyjna jest jednym z możliwych urazów dekompresyjnych.

Choroba dekompresyjna to określenie stanu spowodowanego przez wydzielanie się nadmiaru azotu lub innego gazu rozpuszczonego we krwi w postaci pęcherzyków, tworzących się w obrębie organizmu.

Szczegółowo omówimy chorobę dekompresyjną, jej przyczyny oraz zapobieganie w następnej części tego rozdziału.

W efekcie urazu rozprężeniowego płuc również może dojść do wepchnięcia gazu do krwiobiegu.

Mechanizm tworzenia pęcherzyków jest inny niż przy chorobie dekompresyjnej, ale ostateczny problem jest taki sam: pęcherzyki blokujące przepływ krwi i powodujące uszkodzenia tkanek na inne sposoby.

Dlatego niektóre z najpoważniejszych symptomów pojawiają się przy obu urazach.

Ponieważ zarówno barotrauma płuc, jak i choroba dekompresyjna wymagają takiej samej pierwszej pomocy, nie ma potrzeby rozróżniać ich podczas udzielania pierwszej pomocy poszkodowanemu nurkowi.

Określenie "zespół urazów dekompresyjnych" odnosi się zatem zarówno do choroby dekompresyjnej, jak i do barotraumy płuc - takie same są procedury postępowania i pierwsza pomoc. Jeżeli będzie to konieczne, lekarz wyspecjalizowany w medycynie nurkowej zidentyfikuje mechanizm konkretnego urazu w późniejszym terminie, gdy nurek znajdzie się w szpitalu.

Urazy ciśnieniowe sprzętowe

Zaniedbanie wyrównywania ciśnienia w sztucznych przestrzeniach powietrznych wokół ciała, stworzonych przez sprzęt nurkowy, także może prowadzić do urazów, choć zwykle nie są one tak poważne jak ściśnięcie twoich naturalnych przestrzeni powietrznych wewnątrz ciała.

Ściśnięcie maski.

Do ściśnięcia przestrzeni powietrznej pod maską (mask squeeze) dochodzi zazwyczaj podczas bardzo szybkich zanurzeń, podczas których nurek zapomina o dopuszczaniu powietrza nosem do wnętrza maski. Wzrastające ciśnienie hydrostatyczne może powodować "wessanie" tkanek otaczających oko do niewyrównanej przestrzeni powietrznej, i ich obrzęk.

Ten obrzęk powoduje generalnie uszkodzenie naczyń krwionośnych, na skutek czego skóra wokół oczu i na policzkach przyjmuje purpurową barwę. Może też dojść do przerwania naczyń włosowatych na powierzchni gałki ocznej. Ściśnięcie maski wygląda dramatycznie i sprawia bardzo poważne wrażenie, chociaż często nurek nie zdaje sobie sprawy że do niego doszło - dopóki nie spojrzy w lustro. Uraz powstały przez ściśnięcie maski zwykle goi się bez żadnych trwałych konsekwencji, ale zawsze rozsądnie jest zasięgnąć porady lekarza.

Ściśnięcie suchego skafandra (dry suit squeeze).

Niewyrównanie ciśnienia wewnątrz suchego skafandra (sporadycznie dotyczy to także powietrza uwięzionego w mokrym skafandrze) może spowodować szczypanie lub zsinienie skóry. Najczęstszą przyczyną jest szybkie wykonanie zanurzenia bez wcześniejszego sprawdzenia, czy inflator suchego skafandra jest podłączony. Dochodzi też do niego w sytuacjach, gdy nurek już w wodzie stwierdza, że wziął zbyt mało balastu, i zamiast wynurzyć się i skorygować problem, pozwala na ściśnięcie skafandra celem zmniejszenia pływalności.

Jeśli nurek zlekceważy szczypanie i kontynuuje zanurzenie, ściśnięcie skafandra może powodować powstanie krwiaków i uszkodzenie skóry. Efekty lekkiego ściśnięcia skafandra może przypominać konsekwencje ściśnięcia maski - nurek może dopiero po nurkowaniu dowiedzieć się że do niego doszło, odkrywając siniaki i krwiaki na całym ciele. Natomiast poważniejsze ściśnięcie może być dość bolesne; w sytuacjach, w których doszło do rozłączenia inflatora suchego skafandra, nurkowie niekiedy zalewali skafandry przez kryżę szyjną lub nadgarstkową by zmniejszyć ściśnięcie, a następnie przerywali nurkowanie.

Inne urazy ciśnieniowe

Powietrze lub inny gaz uwięziony w jakimkolwiek zakamarku ciała może potencjalnie powodować uraz ciśnieniowy. Na przykład, przestrzeń powietrzna pod plombami w zębach w rzadkich wypadkach powodowały problemy. Jeśli w trakcie nurkowania lub po jego zakończeniu odczuwasz nietypowy ból zęba, to właśnie może być przyczyną. W takim wypadku, przedstaw problem twojemu dentyście.

Gaz gromadzący się w jelitach podczas nurkowania także może się rozprężyć przy wynurzeniu i powodować przejściowy dyskomfort. Możesz obniżyć prawdopodobieństwo tego poprzez unikanie spożywania pokarmów działających gazopędnie przed nurkowaniem.

Te i inne rodzaje problemów wynikających ze zmian ciśnienia występują rzadko, ale są możliwe.

Pierwsi twórcy tabel nurkowych

W roku 1670 Robert Boyle spojrzął w oczy węża, którego właśnie skończył poddawać dekompresji w komorze, i zauważył w nich rosnące pęcherzyki. Boyle nie mógł wiedzieć, co je powodowało, ale jako

sumienny naukowiec zanotował swoje obserwacje. Była to pierwsza historyczna wzmianka na temat choroby dekompresyjnej (choć bez podania jej nazwy). Jednak dopiero w latach 70. XIX wieku zrozumiano znaczenie tych pęcherzyków.

U ludzi, choroba dekompresyjna (decompression sickness, DCS) pojawiła się po raz pierwszy w roku 1841, gdy francuscy górnicy zaczęli wydobywanie węgla w pierwszej w świecie kopalni, w której w sztuczny sposób zwiększono ciśnienia powietrza. Lekarze B. Pol i T. J. J. Wattelle opisali kliniczne przypadki DCS w roku 1854, po zbadaniu górników; zauważyli, że schorzenie występowało po opuszczeniu strefy zwiększonego ciśnienia, a powrót do niej powodował ustępowanie objawów. Ponieważ nie rozumieli przyczyn choroby dekompresyjnej, odebrali ją jako paradoks - tak, jak gdyby np. wyjęcie ręki z ognia powodowało oparzenia, a jej powtórne włożenie do ognia likwidowało objawy. Pol i Wattelle jako pierwsi opisali objawy i symptomy DCS, lecz nie potrafili ich wyjaśnić.

Wkrótce potem, to samo zjawisko wystąpiło u robotników pracujących w kesonach ciśnieniowych przy budowaniu mostów. W kesonach wykorzystywano sprężone powietrze, by powstrzymać wodę podczas prac na dnie rzeki. U robotników, opuszczających kesony często rozwijała się choroba dekompresyjna, która stała się znana jako „choroba kesonowa”. Robotnicy pracujący przy budowie mostu brooklińskiego w Nowym Jorku porównywali reakcje cierpiących, którzy zginali się by ulżyć cierpieniom, z „greckim wygięciem” („Grecian bend”), modną postawą kobiet tego okresu. Wkrótce choroba dekompresyjna była powszechnie określana jako „the bends”, czyli „krzywiki”.

Przez lata choroba atakowała nurków i górników bez widocznych przyczyn i prawidłowości, do momentu, gdy francuski lekarz Paul Bert zwrócił na nią uwagę w latach 70. XIX wieku. Po zebraniu raportów medycznych na temat przypadków choroby dekompresyjnej u robotników pracujących w kesonach i nurków, zaczął szukać przyczyn choroby.

Prowadząc eksperymenty nad oddychaniem, Bert stwierdził, że gazowe składniki powietrza oddziałują chemicznie na organizm proporcjonalnie do ciśnienia. Stwierdził też, że azot pochłaniany przez ciało pod zwiększonym ciśnieniem formuje czasami pęcherzyki po obniżeniu ciśnienia.

W roku 1878 Bert opublikował swoje teorie w „La Pression Barometrique”, 1100-stronicowej księdze, która została przetłumaczona na angielski w roku 1943. Bert zalecał, by nurkowie i pracownicy kesonowi wynurzali się powoli, a jeżeli ich „wyginało”, by zawracali i wynurzali się jeszcze wolniej. Teoria Berta została pozytywnie zweryfikowana w roku 1893, podczas konstrukcji tunelu pod rzeką Hudson. Robotników dotkniętych przez DCS leczono w znajdującej się na miejscu komorze dekompresyjnej, co przyczyniło się do zmniejszenia zarówno częstości występowania objawów i symptomów, jak i liczby przypadków śmiertelnych. I choć zalecenia Berta stanowiły wielki postęp w medycynie dekompresji, to zapobieganie chorobie dekompresyjnej przez używanie tabel uwzględniających czas i głębokość zanurzenia zaczęło się dopiero 30 lat później.

W roku 1906 profesor John Scott Haldane, lekarz zainteresowany skutkami oddziaływań gazów na ciało, zajął się przypadkami choroby dekompresyjnej u nurków klasycznych Royal Navy. Już wcześniej Haldane znacząco przyczynił się do rozwoju wiedzy o oddychaniu, wpłynął na poprawę warunków pracy w kopalniach w zakresie bezpieczeństwa gazowego i pierwszej pomocy, a pracując wraz z J. G. Priestleyem odkrył niejako „przy okazji”, że dwutlenek węgla reguluje normalny cykl oddechowy - podkładając kamień węgielny pod fizjologię oddychania.

Zaopatrzony w „La Pression Barometrique” Paula Berta i wyniki innych badań dotyczących ciśnienia, wraz z A. E. Boycottem i G. C. C. Damantem rozpoczął eksperymenty na kozach. Założył, że ciało może znieść określoną nadwyżkę azotu rozpuszczonego w płynach ciała, i na kozach badał, ile dodatkowego azotu organizm może tolerować zanim pojawią się pęcherzyki powodujące „the bends”. Eksperymenty na kozach zakończyły się powodzeniem.

Następnie, Haldane rozpoczął eksperymenty z ochotnikami - nurkami z Royal Navy. Przed ich rozpoczęciem zażądał zmian w ekwipunku nurków klasycznych, włączając w to lepsze pompy, dostarczające czystsze powietrze na większe głębokości. Gdy Haldane kończył swój projekt, zalecenia jego zespołu dotyczące wyciągarek i strojów stały się standardem Royal Navy, a wiele ze zmian konstrukcyjnych wprowadzonych przez nich jest stosowana do dziś przez osoby nurkujące w tradycyjnych hełmach z brązu.

Do zwiększenia bezpieczeństwa przyczyniły się badania jego syna, J. B. S. Haldane’a, który prowadził również pionierskie badania nad toksycznością tlenową w aparatach tlenowych z obiegiem zamkniętym Royal Navy, wykorzystywanych w czasie II wojny światowej do ewakuacji załóg z łodzi podwodnych. Mniej więcej w tym samym czasie Kenneth Donald rozpoczął podobne badania w celu wykorzystania nurków wyposażonych w aparaty tlenowe o obiegu zamkniętym do przyczepiania min do burt wrogich okrętów.

Prace te utrwaliły pozycję Donalda jako niekwestionowanego autorytetu w dziedzinie badań nad toksycznością tlenu; on i J. B. S. Haldane wzajemnie się konsultowali, gdyż obaj prowadzili prace nad wpływem tlenu pod ciśnieniem.

Eksperymenty Haldane’a umożliwiły osiąganie rekordowych głębokości, a następnie wynurzania się bez choroby dekompresyjnej. Ponieważ praktyka potwierdzała teorię Haldane’a, ochotnicy bili rekordy głębokości niemal codziennie, dochodząc do głębokości 64 metrów. Gdy nurkowie regularnie wynurzali się z „nienurkwalnej” głębokości bez choroby dekompresyjnej, Haldane opublikował w roku 1907 pierwsze tabele nurkowe. Czasopismo *The Journal of Hygiene* opublikowało artykuł „The Prevention of Compressed Air Illness”, autorstwa Boycotta, Damanda i Haldane’a w roku 1908; do dziś artykuł ten jest uważany za pracę kładącą podwaliny teorii dekompresji.

Obecnie prace Berta i Haldane’a są kontynuowane. Specjaliści od medycyny nurkowej wciąż badają i udoskonalają tablice nurkowe oraz metody leczenia choroby dekompresyjnej w celu zwiększenia bezpieczeństwa nurkowania oraz minimalizowania ryzyka DCS. Mimo to, zdecydowana większość komputerów nurkowych oraz tabel opiera się na oryginalnym modelu Haldane’a, który ze stosunkowo niewielkimi modyfikacjami obowiązuje już od stu lat.

Fizjologia dekompresji: reakcja organizmu na rozpuszczony gaz obojętny

Minęło ponad 140 lat od chwili, gdy fizjologowie rozpoczęli badania nad chorobą dekompresyjną (decompression sickness - DCS), bolesną przypadłością po raz pierwszy stwierdzoną u górników pracujących w kopalniach, w których sztucznie podnoszono ciśnienie. Później choroba dekompresyjna wystąpiła u robotników pracujących przy budowie mostów w kesonach ze sprężonym powietrzem, umieszczonych na dnie rzek.

Pierwsi fizjologowie stwierdzili, że pod zwiększonym ciśnieniem azot gazowy przechodzi do roztworu w ciele, a potem, po spadku ciśnienia, może wydzielać się w postaci pęcherzyków i powodować chorobę dekompresyjną - jednak wciąż byli zdezorientowani. Dlaczego niektóre rodzaje ekspozycji na azot pod zwiększonym ciśnieniem (podczas nurkowania, lub pracy w warunkach podwyższonego ciśnienia) powodowały DCS, a inne nie? Dlaczego ekspozycja w takich samych warunkach u jednych osób powodowała chorobę dekompresyjną, a u innych nie?

W miarę uzyskiwania wyników kolejnych badań, pierwsi naukowcy zajmujący się dekompresją zrozumieli wiele aspektów reakcji organizmu na azot i inne rozpuszczone gazy obojętne, jednak wciąż zadawali nowe pytania. Czy pęcherzyki mogą się wytworzyć bez wywoływania choroby dekompresyjnej? W jakiej formie organizm wydziela rozpuszczone gazy obojętne - jako pęcherzyki, z roztworu, czy też w obu postaciach? Jak unikać choroby dekompresyjnej?

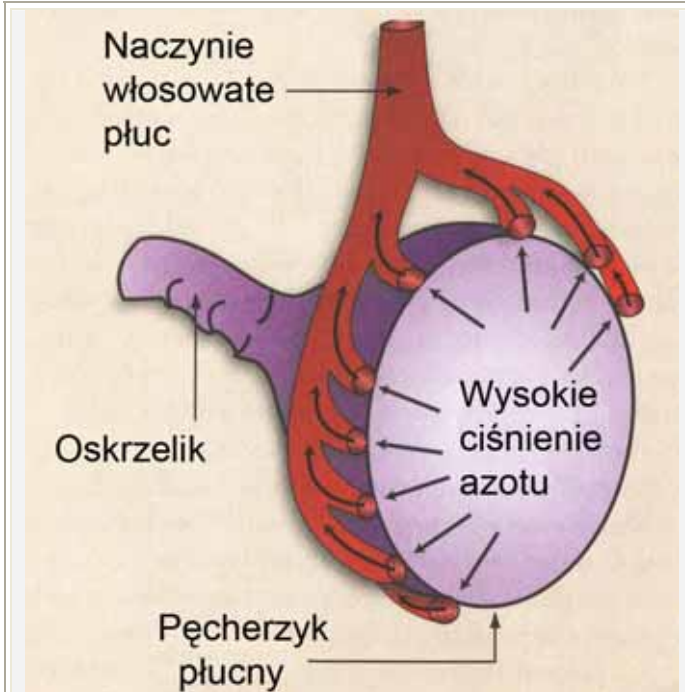
Nawet dzisiaj, odpowiedzi na wiele z tych pytań nie są do końca znane, chociaż wiemy znacznie więcej na temat zachodzących w organizmie procesów, a stan naszej wiedzy wciąż się rozszerza. Badania nad fizjologią dekompresji zajmują się między innymi sposobem pochłaniania i usuwania z organizmu rozpuszczonych gazów, jak również procesami zachodzącymi w organizmie, gdy rozpuszczone gazy zaczną powodować problemy - czyli spowodują chorobę dekompresyjną. Zajmują się też modelowaniem procesów zachodzących podczas dekompresji - co jest jedynym sposobem zapobiegania DCS (oprócz wstrzymania się od nurkowania!). Omówimy bliżej modele dekompresyjne po zapoznaniu się ze znanymi i teoretycznymi procesami zachodzącymi w organizmie nurka.

Absorpcja gazów obojętnych

Gdy jesteś wystawiony na zwiększone ciśnienie podczas nurkowania (lub z innej przyczyny), azot i/lub inne gazy obojętne rozpuszczają się w twoich tkankach, co jest bezpośrednią konsekwencją prawa Henry’ego, omówionego w Części IV. Prawo Henry’ego stanowi, że w stanie równowagi ilość gazu rozpuszczona w cieczy jest wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalnego tego gazu. Ciało ludzkie jest w przeważającej części złożone z cieczy, dlatego gazy rozpuszczają się w nim podobnie jak w wodzie. Ponieważ jednak ciało ludzkie ma skomplikowaną budowę, rozpuszczanie się gazów w tkankach jest bardziej skomplikowane niż ich rozpuszczanie w wiadrze wody.

Z punktu widzenia fizjologii nurkowania rekreacyjnego, prawo Henry’ego dotyczy przede wszystkim dwóch fizjologicznie obojętnych gazów - azotu i helu. Tlen również rozpuszcza się w tkankach pod ciśnieniem,

jednak w granicach limitów dozwolonych ze względu na jego toksyczność nie stwarza problemów dekompresyjnych, ponieważ tkanki metabolizują tlen lub w inny sposób z nim reagują. Inne gazy w powietrzu istnieją w ilościach śladowych, i ich absorpcja nie powoduje większych konsekwencji. Jednak ogólne zasady przedstawione w tym rozdziale dotyczą każdego gazu fizjologicznie obojętnego, którym nurkowi zdarzy się oddychać.



W twoim organizmie, gazy przechodzą do roztworu za pośrednictwem układów krążenia i oddechowego. Gdy się zanurzasz, ciśnienie parcjalne azotu w pęcherzykach płucznych wzrasta, i azot dyfunduje do krwi w naczyniach włosowatych, z którą rozprowadzany jest po organizmie przez układ krążenia

Prawo Henry'ego stanowi, że w ludzkim ciele gazy będą się rozpuszczać proporcjonalnie do otaczającego ciśnienia. Załóżmy, że oddychasz powietrzem (21% tlenu, 79% azotu) na powierzchni i z butli nurkowej, chociaż te same zasady dotyczyć będą każdej mieszaniny gazów obojętnych i tlenu.

Na powierzchni, przed nurkowaniem, twoje ciało jest wysyczone azotem, co oznacza, że tkanki zawierają tyle rozpuszczonego azotu, ile mogą pomieścić pod ciśnieniem atmosferycznym. W miarę zanurzania, gdy ciśnienie wzrasta, twoje ciało przestaje być wysyczone, gdyż pod zwiększonym ciśnieniem w tkankach może rozpuścić się więcej azotu z twojej mieszanki oddechowej. Jeśli pozostaniesz na tej głębokości wystarczająco długo, gaz przechodzący do roztworu osiągnie stan równowagi z ciśnieniem zewnętrznym. Twoje ciało będzie znów wysyczone pod tym nowym ciśnieniem.

Gaz rozpuszcza się w wiadrze wody poprzez prostą dyfuzję przez powierzchnię wody. W twoim ciele, gaz przechodzi do roztworu przez twoje układy oddechowy i krwionośny. W miarę zanurzania, ciśnienie parcjalne azotu w powietrzu pęcherzykowym wzrasta ponad wartość ciśnienia tego gazu w krwi (ciśnienie azotu już rozpuszczonego), i N_2 dyfunduje do krwi przepływającej przez naczynia włosowate

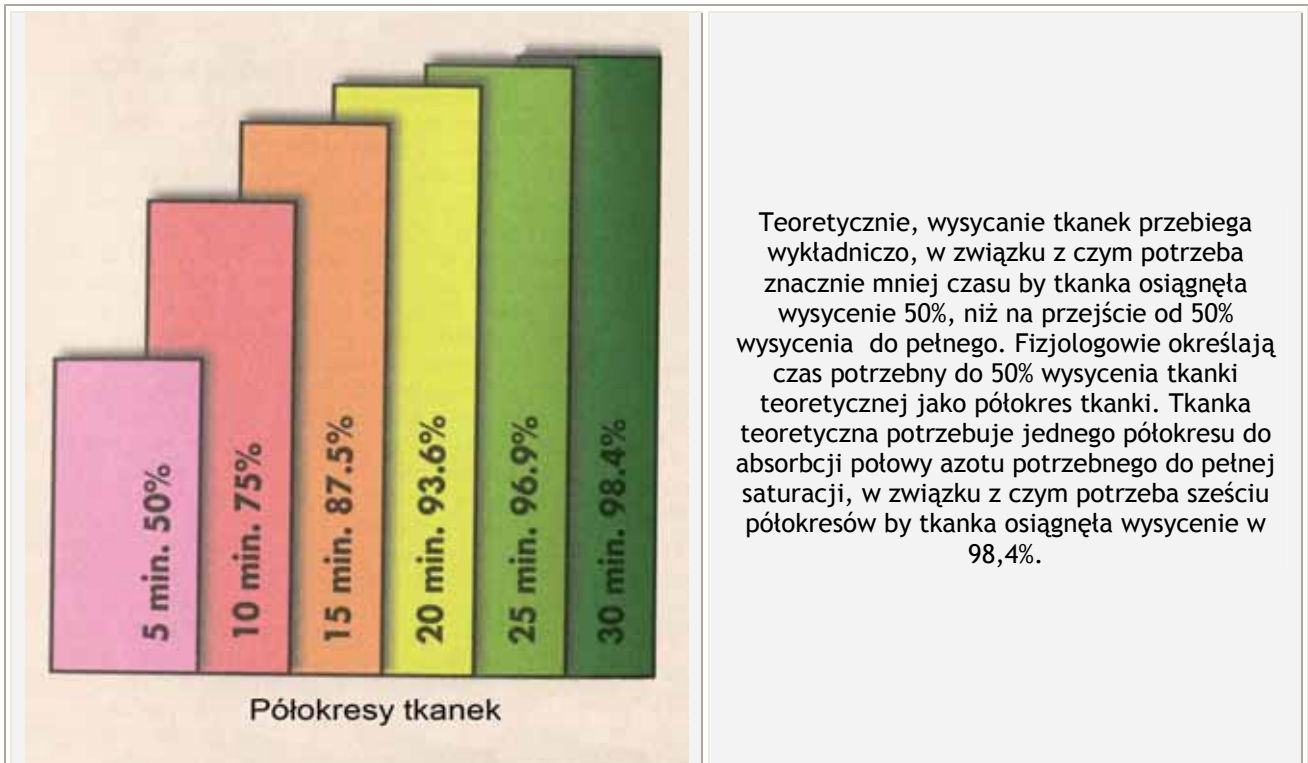
płuc, a następnie rozprowadzany jest po ciele przez układ krwionośny. Im wyższa różnica ciśnień (gradient ciśnień) pomiędzy azotem w powietrzu pęcherzykowym a azotem we krwi, tym szybciej azot rozpuszcza się we krwi.

Gdy krew przepływa przez tkanki ciała, ciśnienie azotu w krwi jest wyższe od ciśnienia tego gazu w otaczających tkankach. Dlatego N_2 dyfunduje z krwi do tkanek. Jak napisano wcześniej, jeśli nurzek utrzymałby stałą głębokość i pozostał tam wystarczająco długo, tkanki w końcu uległyby wysyceniu i stały się niezdolne do absorpcji większej ilości azotu na tej głębokości. Jednak nurkowie rekreacyjni, ale także większość nurków technicznych, komercyjnych, wojskowych i naukowych, zazwyczaj nie osiąga pełnego wysycenia tkanek. Aby doszło do całkowitego wysycenia, należałoby spędzić 12 i więcej godzin na danej głębokości.

Gdy wzrasta ciśnienie azotu w tkankach, zbliżając się do ciśnienia otoczenia, gradient ciśnień maleje, i obniża się tempo absorpcji azotu. Teoretycznie, nasycenie wzrasta wykładniczo, czyli tkankom potrzeba znacznie mniej czasu na osiągnięcie 50% saturacji, niż na przejście z 50% do pełnej saturacji. Fizjologowie określają czas potrzebny do osiągnięcia 50% saturacji tkanki teoretycznej jako półokres tkanki, czyli czas jej połowicznego wysycenia. Półokres to czas potrzebny tkance teoretycznej do absorpcji połowy gazu potrzebnego do pełnej saturacji - zatem potrzeba sześciu półokresów do osiągnięcia nasycenia na poziomie 98,4%. Jest to wielkość tak bliska stu procentom, że w modelowaniu dekompresji zazwyczaj traktuje się tkankę, dla której minęło sześć półokresów, jako całkowicie wysyconą. Półokres jest bardzo ważnym pojęciem, do którego wrócimy w rozdziale o modelach dekompresyjnych.

Tempo absorpcji azotu jest różne dla poszczególnych tkanek, a więc mają one różne półokresy. Niektóre dobrze ukrwione tkanki pochłaniają azot szybko, i potrzebują stosunkowo niewiele czasu do pełnej saturacji. Są więc teoretycznie szybkimi tkankami. Inne tkanki są gorzej ukrwione, a do tego mogą

rozpuścić wiele azotu zanim osiągną wysycenie; mają one długie półokresy, są więc teoretycznie wolnymi tkankami.



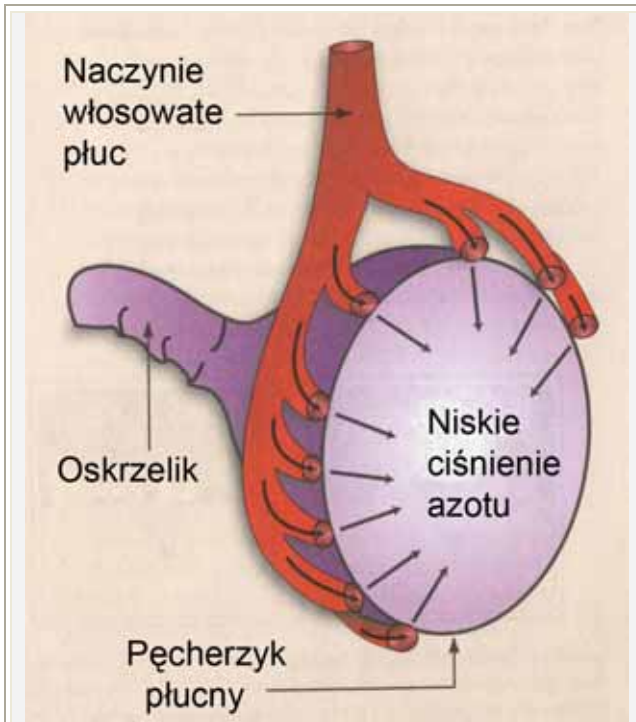
Teoretycznie, wysycanie tkanek przebiega wykładniczo, w związku z czym potrzeba znacznie mniej czasu by tkanka osiągnęła wysycenie 50%, niż na przejście od 50% wysycenia do pełnego. Fizjologowie określają czas potrzebny do 50% wysycenia tkanki teoretycznej jako półokres tkanki. Tkanka teoretyczna potrzebuje jednego półokresu do absorpcji połowy azotu potrzebnego do pełnej saturacji, w związku z czym potrzeba sześciu półokresów by tkanka osiągnęła wysycenie w 98,4%.

Zauważ, że wielokrotnie użyliśmy słowa „teoretycznie”. Fizjologowie mają świadomość, że ciało nie pochłania i uwalnia gazów obojętnych w tak prosty sposób, jak np. wiadro wody. Wiedzą też, że ciało ludzkie zbudowane jest z dużej ilości różnych tkanek i błon o różnym stopniu ukrwienia, i o różnych parametrach jako rozpuszczalniki. Chociaż możemy stwierdzić, że krew i tkanka nerwowa są prawdopodobnie szybkimi tkankami, a tkanki tłuszczowa i kostna są zapewne wolnymi tkankami, nie ma bezpośredniej korelacji pomiędzy konkretnymi tkankami a półokresami. Z tego powodu, możesz słyszeć o „tkankach teoretycznych” (theoretical tissues), „kompartamentach” lub „przedziałach” (compartments), zamiast po prostu o „tkankach” (tissues).

Ilość azotu absorbowanego przez tkanki zależy bezpośrednio od głębokości i czasu nurkowania. Im głębiej się zanurzasz, tym większe jest ciśnienie otoczenia i tym bardziej wzrasta gradient ciśnienia pomiędzy ciśnieniem azotu w płucach i ciśnieniem azotu w tkankach. Im wyższy gradient ciśnienia, tym szybciej azot przechodzi z płuc do krwi i tkanek. Im zaś dłużej pozostajesz pod ciśnieniem, tym więcej czasu ma twoje ciało na absorpcję azotu.

Nie licząc narkozy azotowej, omówionej wcześniej, zwiększone ciśnienie azotu w twoich tkankach nie wywiera istotnych efektów fizjologicznych tak długo, dopóki pozostajesz pod wodą lub, dokładniej, pod ciśnieniem. Jednak gdy się wynurzasz, ciśnienie maleje. Ponieważ twoje ciało absorbowało azot podczas nurkowania, w końcu wynurzysz się na głębokość, na której ciśnienie azotu w tkankach przekroczy ciśnienie otoczenia. Tkanki staną się więc przesycone, czyli będą zawierać więcej rozpuszczonego azotu niż mogłyby utrzymać pod danym ciśnieniem otoczenia. Zgodnie z prawem Henry’ego, azot zaczyna wydzielać się z tkanek i twój organizm zaczyna go usuwać, co rodzi potencjalne problemy związane z możliwością wystąpienia choroby dekompresyjnej.

Eliminacja gazów obojętnych



W trakcie wynurzania, w pewnym momencie ciśnienie azotu w tkankach osiągnie wartość wyższą od ciśnienia zewnętrznego. Azot (lub inny gaz obojętny) dyfunduje z krwi do pęcherzyków płucnych, co powoduje spadek jego ciśnienia we krwi

Zanim jeszcze pierwsi lekarze odkryli, że rozpuszczający się azot (gaz obojętny) jest odpowiedzialny za chorobę dekompresyjną, zauważyli, że choroba rozwija się wtedy, gdy uszkodzony opuszcza strefę podwyższonego ciśnienia, nie zaś wtedy, gdy tam przebywa. Z czasem, fizjologowie rozwinęli teorię, w jaki sposób ciało reaguje na przesylenie.

Dzięki eksperymentom, wcześnie fizjologowie szybko zauważyli, że ciało może tolerować pewien stopień przesylenia bez występowania komplikacji, lecz jeśli gradient ciśnień pomiędzy ciśnieniem w tkankach a ciśnieniem otoczenia przekroczy określony poziom, rozwija się choroba dekompresyjna. Gdyby nie to zjawisko, nurkowanie byłoby niemożliwe, a przynajmniej bardzo skomplikowane - musiałbyś zredukować ciśnienie gazu obojętnego w tkankach do poziomu ciśnienia atmosferycznego jeszcze przed osiągnięciem powierzchni.

Wczesne teorie

Początkowo fizjologowie wierzyli, że eliminacja gazów obojętnych przez organizm jest procesem dokładnie przeciwnym do absorpcji - o ile ciśnienie gazu mieści się w rozsądnych granicach. Uważano, że gdy nurek osiąga małą głębokość, ciśnienie gazów w krwi przekracza ciśnienie w powietrzu pęcherzykowym. Azot (lub inny gaz obojętny) dyfunduje z krwi do powietrza pęcherzykowego, co powoduje spadek ciśnienia gazu we krwi. Azot z

innych tkanek ciała dyfunduje do krwi, która transportuje go do płuc, gdzie jest usuwany do pęcherzyków płucnych. Proces trwa aż do chwili, gdy po wielu godzinach azot w tkankach osiągnie stan równowagi z ciśnieniem parcjalnemu azotu w otoczeniu ($PN_2 = 0,79$ bara)

John Scott Haldane oparł swoją teorię, przedstawioną tutaj w uproszczonej formie, na eksperymentach przeprowadzonych w początkach XX wieku. Aby uprościć obliczenia, zakładał on, że powietrze składa się w 100% z azotu. Haldane uznał, że tkanki mogą mieścić rozpuszczony azot do momentu, gdy prężność azotu w tkankach nie przekroczy wartości równej 1,58 ciśnienia otoczenia. Zostało to wyrażone jako krytyczny stosunek ciśnienia azotu w tkankach do ciśnienia otaczającego, równy 1,58:1 (początkowo wyrażano go jako stosunek 2:1 ciśnienia otoczenia dla stuprocentowego azotu do ciśnienia otoczenia, ale jest to ta sama wartość: $2 \times 0,79 = 1,58$). Teoria zakładała, że o ile nie dojdzie do przekroczenia tej krytycznej proporcji, w organizmie nie dojdzie do wytworzenia fazy gazowej - pęcherzyków w tkankach, a układy krążenia i oddechowy będą usuwać azot w stanie rozpuszczonym aż do momentu powrotu ciała do stanu równowagi. Jeśli natomiast ta krytyczna proporcja zostanie przekroczona, mogą się wytworzyć pęcherzyki powodujące chorobę dekompresyjną.

Opierając się na tych założeniach, Haldane opublikował w 1907 swoje pierwsze tabele nurkowe. Ta właśnie koncepcja reakcji organizmu na nadmiar azotu (podobnie jak helu, neonu i innych gazów obojętnych, po uwzględnieniu ich zróżnicowanej rozpuszczalności w tkankach, z innymi pólkami i ciśnieniami krytycznymi) była bazą dla opracowywania kolejnych modeli dekompresyjnych aż do początku lat 70., gdy technologia wykazała jej niekompletność. Jednak wielokrotnie modyfikowana i poprawiana teoria Haldane'a pozostaje w użyciu do dzisiaj, i na niej opiera się większość modeli dekompresyjnych stosowanych przez dzisiejszych nurków.

Teorie współczesne

Oryginalna koncepcja Haldane’a dotycząca absorpcji i eliminacji gazów obojętnych okazała się prawidłowa, ale niekompletna. Po nurkowaniu, twój organizm usuwa większą część rozpuszczonego gazu obojętnego przez prostą dyfuzję z tkanek do układu krwionośnego, i na zewnątrz za pośrednictwem płuc. Jednak z upływem czasu fizjologowie zaczęli zdawać sobie sprawę, że czysty model Haldane’a nie opisuje problemu wystarczająco dokładnie.

Pierwszym z problemów, które się wyłoniły w efekcie badań nad dekompresją, była kwestia krytycznej proporcji ciśnień, która okazała się znacznie niższa (ponad 200 razy!) od tej, która według fizyków konieczna była do powstania pęcherzyków w czystej wodzie. Zaobserwowano, że w przesyconej tkance faza gazowa tworzy się znacznie łatwiej niż w przesyconej czystej cieczy takiej jak woda. Biorąc pod uwagę warunki panujące w ludzkim organizmie, jest praktycznie niemożliwe, żeby pęcherzyki powstawały w środku cieczy wyłącznie w wyniku jej przesylenia.

Jednak pęcherzyki tworzą się bardzo łatwo w przesyconej tkance dzięki zjawisku nukleacji (nucleation), czyli wzrostowi pęcherzyków powodowanemu przez dyfuzję gazu do już istniejących drobnych kieszonek gazowych. Fizjologowie podejrzewali, że w wielu tkankach znajduje się duża ilość gazowych zarodki (micronuclei), mikroskopijnych kieszonek gazowych na powierzchni ciał stałych, które mogą służyć jako „nasiona” dla wzrostu pęcherzyków. Jeśli nukleacja byłaby źródłem formowania się pęcherzyków, to ich pewna ilość powinna się tworzyć w organizmie bez wywoływania choroby dekompresyjnej.

W początkach lat 70., pierwsze użycie detektora dopplerowskiego przez dr Merril Spencer (Institute of Applied Physiology and Medicine) zrewolucjonizowało badania nad dekompresją. Wykorzystując detektory dopplerowskie, które dzięki ultradźwiękom mogą „śledzić” pęcherzyki przemieszczające się w naczyniach krwionośnych i w sercu, fizjologowie mogli poszukiwać badanych pęcherzyków po nurkowaniach, nawet wtedy, gdy nie występowały symptomy choroby dekompresyjnej. Niemal natychmiast, badania hiperbaryczne wykazały istnienie małych pęcherzyków w krwioobiegu, nawet w sytuacjach, gdy nurkowie nie wykazywali oznak DCS.

Odkrycie tzw. „niemych” pęcherzyków (silent bubbles, nazwanych tak, gdyż nie powodowały DCS) potwierdzało teorię nukleacji, popieraną już wtedy przez wielu fizjologów, i doprowadziło do rewizji poglądów dotyczących sposobów eliminacji przez organizm rozpuszczonych gazów obojętnych oraz gazów obojętnych w fazie gazowej, czyli w postaci pęcherzyków o różnych kształtach i rozmiarach, znajdujących się w tkankach (pęcherzyki w naczyniach włosowatych mają raczej kształt cylindryczny i „kietbaskowaty” niż sferyczny).

Czym jest „Doppler”?

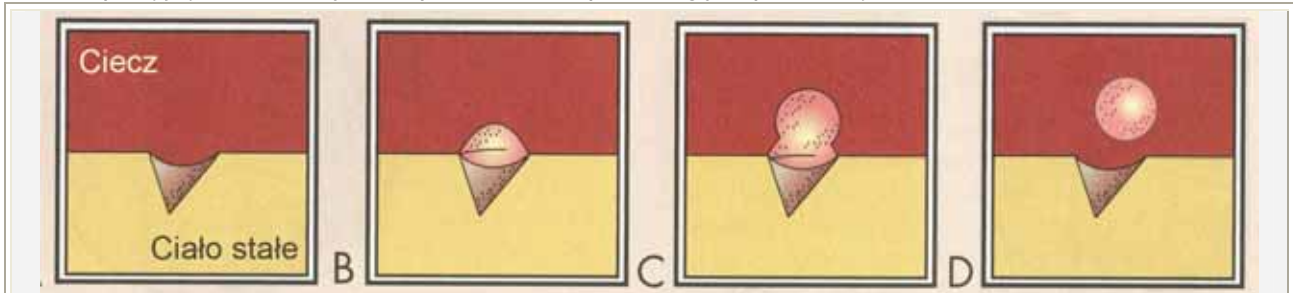
Efekt Dopplera, nazwany od austriackiego fizyka Christiana Dopplera który pierwszy go opisał, odnosi się do pozornej zmiany częstotliwości fal dźwiękowych powodowanych przez względny ruch źródła dźwięku i obserwatora. Klasycznym przykładem jest zmiana brzmienia dźwięku syreny karetki w trakcie jej przybliżania i następnie oddalania.

W badaniach nad dekompresją, falami dźwiękowymi są ultradźwięki emitowane przez dopplerowski przepływomierz ultradźwiękowy, które powodują powstanie słyszalnego dźwięku po odbiciu od pęcherzyków przemieszczających się wraz z krwią. Nurek może mieć symptomy choroby dekompresyjnej przy braku wykrywalnych pęcherzyków, bądź duże ilości pęcherzyków, lecz brak symptomów. Jednak generalnie profile nurkowe, po przeprowadzeniu których wykrywano duże ilości pęcherzyków, wiązały się też z dużym prawdopodobieństwem wystąpienia DCS. Dlatego pomiary prowadzone przy użyciu detektora dopplerowskiego są ważnym sposobem oceny profili nurkowych

Pomimo różnic pomiędzy modelami fizjologicznymi i teoriami, obecnie niemal wszyscy fizjologowie zajmujący się dekompresją zgadzają się co do tego, że nukleacja odpowiada za tworzenie się pęcherzyków, a pewna ilość fazy gazowej powstaje w ciele praktycznie po każdym nurkowaniu. Drobne zarodzia gazowe wydają się być stabilne w hydrofobowych szczelinach, bądź być stabilizowane przez białka lub inne cząsteczki rozmieszczone na granicy między cieczą a gazem. Zarodzia gazowe mogą się tworzyć w wyniku przemieszczania się powierzchni naczyń względem siebie, przy czym tworzą się strefy niskiego ciśnienia. Jest to tak zwana trybonukleacja (tribonucleation). Kawitacja Reynolda (Reynold’s cavitation), która jest wynikiem przemieszczania się cieczy i powstawania przy tym zawirowań, także może wytwarzać strefy niskiego ciśnienia w których mogą się tworzyć zarodzia gazowe, i jest możliwe że podciśnienie powstające w efekcie pracy mięśni również za to odpowiada.

Liczba zarodki istniejących w ciele w danym momencie jest nieznana, nie wiadomo też czy ich liczba może zwiększać się z czasem - chociaż wydaje się, że intensywne ćwiczenia powodują ich powstawanie. W

każdym razie, podczas dekompresyjnej części nurkowania rozpuszczony gaz będzie dyfundował do zarodki, powodując ich wzrost - aż do powstania pęcherzyków. W związku z tym, podczas dekompresji nie ma określonego limitu przesylenia, poniżej którego nie powstają nigdy pęcherzyki, a powyżej którego tworzą się zawsze. Zamiast tego, faza gazowa w ciele wzrasta proporcjonalnie do stopnia przesylenia - czasu nurkowania, głębokości, początkowej ilości zarodki, i do pewnego stopnia tempa wynurzenia. Model dekompresyjny - tabela bądź komputer - bierze pod uwagę te parametry.



Pęcherzyki bardzo łatwo tworzą się w przesyconej tkance dzięki zjawisku nukleacji, czyli wzrostowi pęcherzyków powodowanemu przez dyfuzję rozpuszczonego gazu do niewielkich, już istniejących kieszonek gazowych. Fizjologowie sądzą, że w wielu tkankach może stale występować pewna liczba zarodki gazowych - mikroskopijnych kieszonek na powierzchni tkanek, które działają jak „nasiona”, na których tworzą się pęcherzyki

W przesyconych tkankach, gaz obojętny dyfunduje do zarodki gazowych, powiększając je, aż uwolnią się od powierzchni tkanek w postaci małych pęcherzyków. Dopóki ilość tak powstałych pęcherzyków jest niewielka, twoje tkanki stopniowo usuwają gaz obojętny przez połączenie dyfuzji gazu rozpuszczonego (oryginalna koncepcja Haldane'a), wychwytywania i dyfuzji mikropęcherzyków w naczyniach włosowatych płuc, oraz redyfuzji gazu z wolnych mikropęcherzyków do krwiobiegu, gdy ciśnienie gazu wokół nich ulega zmniejszeniu.

Pęcherzyki wykrywane przez ultradźwiękowy detektor Dopplera znajdują się w naczyniach żylnych, chociaż początkowo tworzą się w naczyniach włosowatych mięśni i w tkance tłuszczowej. Podczas wzrastania mikropęcherzyków w naczyniach włosowatych podczas dekompresji, powiększają się one i /lub łączą ze sobą aż do chwili, gdy mogą się oderwać, przepłynąć do systemu żylnego i przemieszczać się z krwią, gdzie stają się wykrywalne dzięki detektorowi Dopplera, przykładowo zazwyczaj w okolicy serca. Przemieszczają się w systemie żylnym aż do płuc, gdzie grzęzną w naczyniach włosowatych. Wtedy gaz z pęcherzyków bez szkody dla nurka dyfunduje do pęcherzyków płucnych, oprócz wyjątkowych sytuacji, gdy pęcherzyki akumulują się szybciej niż mogą być eliminowane (jest to płucna odmiana choroby dekompresyjnej, „the chokes”).

Chorobę dekompresyjną powodują pęcherzyki wzrastające w innych miejscach. Obszarem wzrostu fazy gazowej w największym stopniu odpowiadającej za „krzywiki”, the bends (ból stawów kończyn) są prawdopodobnie ścięgna i więzadła wokół stawów; te pęcherzyki najprawdopodobniej nie powstają w naczyniach włosowatych. Pęcherzyki wykrywalne przy pomocy detektora Dopplera są spokrewnione z pęcherzykami powodującymi bóle stawów, ale niekoniecznie są to te same pęcherzyki. Fizjologowie monitorują pęcherzyki w naczyniach żylnych, próbując odgadnąć, co dzieje się w pozostałych tkankach. Dlatego nie można stosować detektora dopplerowskiego jako „detektora krzywików” u konkretnego poszkodowanego, chociaż to urządzenie jest bardzo użyteczne do oceny dekompresji podczas licznych nurkowań z udziałem wielu nurków.

Fizjologowie generalnie uważają, że profile dekompresyjne powodujące powstawanie drobnej fazy gazowej (z mięśni lub tkanki tłuszczowej) będą powodować wytwarzanie drobnej fazy gazowej także w innych tkankach, jak ścięgna i więzadła. Statystycznie rzecz biorąc, wyniki badań przeprowadzonych na wielu nurkach podczas licznych nurkowań świadczą, że jest to prawda. Dlatego upowszechniła się ocena harmonogramów dekompresyjnych przy użyciu detektora Dopplera, dzięki której fizjologowie mogą oceniać modele dekompresyjne także wtedy, gdy u stosujących je nurków nie występuje DCS.

Zatem zgodnie z aktualnymi teoriami, organizm eliminuje azot poprzez dyfuzję - tak, jak uważano początkowo. Nie jest to jednak jedyny sposób usuwania gazu, i nie zachodzi bez powstawania pewnej ilości subklinicznych (nie powodujących objawów) pęcherzyków. Narastanie fazy gazowej do pewnego stopnia zachodzi prawdopodobnie podczas fazy dekompresyjnej wszystkich nurkowań. Stosowanie się do tabel bądź

wskazań komputera nurkowego nie zapobiega całkowicie powstawaniu pęcherzyków, ale ogranicza ich ilość do poziomu, na którym pozostajesz chroniony od choroby dekompresyjnej. Zatem, nie wystąpią u ciebie objawy i symptomy DCS, choć mogą występować pewne ilości subklinicznych pęcherzyków.

Współczesna teoria dekompresji i modele dekompresyjne koncentrują się na roli tworzenia pęcherzyków w rozwoju choroby dekompresyjnej. Na podstawie danych eksperymentalnych, możliwe wydaje się zredukowanie bądź eliminacja zarodki gazowych. Eksperymenty nad kompresją, przeprowadzane na żelach agarowych, krewetkach i szczurach, wskazują, że podczas dekompresji tworzy się mniej fazy gazowej, jeśli badany obiekt wcześniej wystawiony był na szybki wzrost ciśnienia. Uważa się, że ten początkowy wzrost ciśnienia może powodować „zgniatanie” zarodki gazowych i przechodzenie ich do roztworu. Pozostaje mniej zarodki funkcjonujących jako „nasiona” dla wzrostu pęcherzyków w fazie dekompresyjnej nurkowania. Inne badania wskazują na rolę zachowań, które mogą zmniejszyć ryzyko choroby dekompresyjnej; jednym z takich ochronnych zachowań jest regularne ćwiczenie.

Matematyczne modelowanie powstawania pęcherzyków jest znacznie bardziej złożone niż modele stosowane przez Haldane’a; może ono jednak znacznie poprawić strategię dekompresji stosowane przez nurków technicznych, komercyjnych i wojskowych. Modele oparte o powstawanie pęcherzyków zapewne nie wpłyną znacząco na bezpieczeństwo w rekreacyjnym nurkowaniu bezdekompresyjnym (i tak częstotliwość występowania choroby dekompresyjnej jest niższa niż 1%), ale mogą wpłynąć na planowanie nurkowań powtórzeniowych i na procedury związane z wykonywaniem przystanków bezpieczeństwa.

Choroba dekompresyjna

Obecnie uważa się, że pewna ilość pęcherzyków pojawia się w organizmie po każdym nurkowaniu. Jeśli jest ich niedużo i są niewielkich rozmiarów, nie powodują efektów; jednak jeśli jest ich więcej, ich objętość może być wystarczająco duża, by wystąpiła choroba dekompresyjna. Generalnie, żeby doszło do choroby dekompresyjnej, pęcherzyki muszą się pojawić w słabo ukrwionych tkankach bądź w tętniczej części układu krwionośnego. Pęcherzyki pojawiające się w żyłnej części układu krwionośnego są zazwyczaj nieszkodliwe, zatem faza gazowa musi pojawić się w części tętniczej, lub zostać w jakiś sposób przeniesiona z części żyłnej do tętniczej, lub obie te rzeczy mogą wystąpić jednocześnie.

Ponieważ pęcherzyki mogą się wytworzyć niemal w dowolnej części ciała (lub zostać tam przeniesione), choroba dekompresyjna może objawiać się poprzez wiele pozornie niezwiązanych symptomów o zróżnicowanym natężeniu. Oznacza to również, że różne czynniki mogą teoretycznie predysponować cię do wystąpienia DCS, a inne mogą mieć działanie ochronne - znowu teoretycznie.

Lekarze zajmujący się medycyną nurkową łatwo rozpoznają niektóre z objawów i symptomów choroby dekompresyjnej, lecz inne oznaki występujące po nurkowaniu mogą być skutkiem choroby dekompresyjnej lub nie. W wielu typach nurkowania, dokładny mechanizm powodujący uraz - poza samym tworzeniem się fazy gazowej - pozostaje nieznany. Przykładowo, wciąż nie wiadomo, co powoduje bóle kończyn i stawów podczas choroby dekompresyjnej. Trudności są spowodowane przez fakt, że interakcje pomiędzy fazą gazową i tkankami mogą być bardzo złożone. Fizjologowie przypuszczają, że do efektów może się zaliczać podrażnienie ścian naczyń krwionośnych i zachodzenie licznych procesów biochemicznych. Na przykład, pęcherzyki mogą powodować skupianie się płytek krwi i czopowanie niektórych naczyń krwionośnych. Możliwe jest również, że układ odpornościowy atakuje pęcherzyki w podobny sposób jak drobnoustroje chorobotwórcze, czyli za pośrednictwem białych krwinek, enzymów i na inne jeszcze sposoby. Na skutek zachodzenia wszystkich tych procesów, choroba dekompresyjna może być znacznie bardziej skomplikowana niż wynikałoby to z prostej mechaniki pęcherzyków blokujących przepływ krwi do tkanek.

Pomimo różnorodności możliwych objawów i symptomów, przy wątpliwościach odnośnie tego, co właściwie je powoduje, różne odmiany choroby dekompresyjnej mają szereg cech wspólnych. Choroba dekompresyjna zwykle pojawia się z opóźnieniem, i może wystąpić nawet do 36 godzin po nurkowaniu - chociaż mniej więcej połowa przypadków DCS objawia się w ciągu godziny od zakończenia nurkowania. Natomiast podczas nurkowania na mieszkankach zawierających hel, choroba dekompresyjna często objawia się szybko, nieraz jeszcze w czasie dekompresji; jest to bardzo rzadkie podczas nurkowania na powietrzu lub nitroksie, chyba że poszkodowany pominął znaczną część głębszych przystanków dekompresyjnych. Choroba dekompresyjna może nasilać się w ciągu pierwszych kilku godzin od wystąpienia. Znając te fakty, lekarze wiedzą że symptomy pojawiające się 48 godzin po nurkowaniu, lub te pojawiające się zaraz po nurkowaniu lecz przemijające bez zastosowania pierwszej pomocy lub innych zabiegów, prawdopodobnie nie wynikają z wystąpienia DCS (choć diagnoza jest wciąż potrzebna).

Fizjologowie tradycyjnie wyróżniali dwa typy choroby dekompresyjnej. Typ I jest mniej poważny, i występują w nim tylko dolegliwości bólowe; natomiast Typ II jest poważniejszy, i dotyczy centralnego

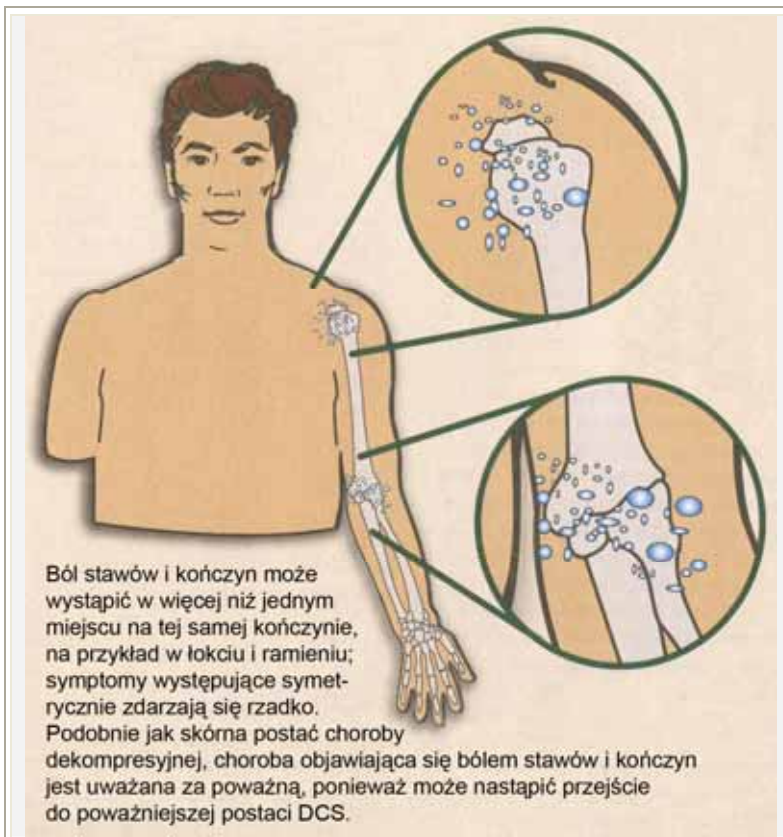
układu nerwowego; różni się je na podstawie symptomów występujących u poszkodowanych. W ostatnim czasie, fizjologowie wyróżnili jeszcze Typ III (bardzo poważny, interakcja pomiędzy embolią gazową i chorobą dekompresyjną). W każdym z tych typów występują podkategorie, wyróżnione na podstawie dokładnych objawów i symptomów.

Chociaż podział ten jest użyteczny podczas badań nad chorobą dekompresyjną, w praktyce klinicznej jest mniej przydatny, gdyż nie ukazuje bezpośrednio powagi danego przypadku. Przykładowo, nurek z mrowiącymi koniuszkami palców i nurek sparaliżowany od pasa w dół mogą obaj cierpieć na Typ II choroby dekompresyjnej. Poza tym, możliwe jest jednoczesne występowanie różnorodnych objawów i symptomów.

Choroba dekompresyjna typu I

Choroba dekompresyjna Typu I objawia się wyłącznie bólem, jej objawy i symptomy nie stanowią bezpośredniego zagrożenia życia, i jest mało prawdopodobne, że będzie mieć poważne długoterminowe konsekwencje. Mimo to, fizjologowie wciąż nie rozumieją wszystkich procesów zachodzących w ciele gdy pojawiają się pęcherzyki, dlatego należy zacząć udzielanie pierwszej pomocy i wezwać pomoc lekarską, gdy tylko osoba po zakończeniu nurkowania zacznie wykazywać objawy choroby dekompresyjnej - także tylko Typu I.

Skórna postać choroby dekompresyjnej.



Pęcherzyki pojawiające się w naczyniach włosowatych skóry mogą spowodować wystąpienie skórnej postaci choroby dekompresyjnej (cutaneous decompression sickness). Charakteryzująca się ona czerwoną wysypką, pojawiającą się najczęściej na ramionach i w górnej części klatki piersiowej. Ten typ DCS występuje częściej po „nurkowaniach” w komorze ciśnieniowej niż po rzeczywistych nurkowaniach w wodzie, dlatego niektórzy fizjologowie sądzą, że częściowo odpowiedzialna za jej wystąpienie może być dyfuzja gazu obojętnego przez skórę. Chociaż skórna postać choroby dekompresyjnej sama w sobie nie jest niebezpieczna, jej obecność wskazuje na możliwość wystąpienia także poważniejszych symptomów. Jeśli brak oznak innych postaci DCS, lekarze mogą zalecić leczenie wyłącznie przez oddychanie tlenem, bez stosowania rekompresji.

Choroba dekompresyjna objawiająca się bólem stawów i kończyn.

Ból stawów i kończyn pojawia się w mniej więcej 75% przypadków DCS. Jak wspomniano, przyczyna bólu stawów nie jest znana. Fizjologowie proponują różne wyjaśnienia przyczyn powstawania bólu, w tym wzrost pęcherzyków w obrębie szpiku kostnego, lub podrażnienie przez pęcherzyki ścięgien i więzadeł. Ponieważ ból jest stacjonarny u niektórych pacjentów, u innych zaś przemieszcza się z czasem, prawdopodobnie różne mechanizmy mogą odpowiadać za niego. Ból kończyn i stawów może występować w różnych częściach jednej kończyny, na przykład w barku i łokciu; ból występujący symetrycznie po obu stronach ciała jest zjawiskiem niezwykłym. Podobnie jak przy skórnej postaci choroby dekompresyjnej, DCS objawiająca się bólem kończyn jest traktowana poważnie przede wszystkim ze względu na możliwość równoległego wystąpienia poważniejszych problemów.

Choroba dekompresyjna typu II

W Typie II choroby dekompresyjnej pojawiają się symptomy mogące stanowić bezpośrednie zagrożenie życia lub grozić trwałą niepełnosprawnością. Przede wszystkim, dotyczy to uszkodzeń układu nerwowego.

Neurologiczna postać choroby dekompresyjnej.

Jeśli symptomy DCS dotyczą układu nerwowego, są to najpoważniejsze przypadki choroby dekompresyjnej. Ponieważ system nerwowy przebiega przez całe ciało, neurologiczna postać choroby dekompresyjnej może wpływać na zdolność poruszania, zmysł dotyku, ale także na funkcje życiowe - oddech lub pracę serca. Do objawów należą mrowienie i drętwienie kończyn, utrata przytomności, zatrzymanie oddechu i paraliż. Neurologiczna postać choroby dekompresyjnej najczęściej dotyczy rdzenia kręgowego, często powodując drętwotę i paraliż kończyn dolnych, postępujące w górę ciała. W stosunkowo krótkim czasie, nieleczone ofiary mogą zostać sparaliżowane od szyi w dół.

Chociaż wiadomo, że bezpośrednią przyczyną neurologicznej postaci choroby dekompresyjnej jest faza gazowa, dokładny mechanizm powodowania uszkodzeń przez pęcherzyki nie jest znany. Istnieją teorie, że pęcherzyki mogą blokować dopływ krwi do tkanki nerwowej, lub że pęcherzyki powstające w obrębie tkanki powodują w niej krwawienia.

Płucna postać choroby dekompresyjnej.

Choroba dekompresyjna objawiająca się w naczyniach włosowatych płuc wskazuje na możliwość pojawienia się symptomów zagrażających życiu. Na szczęście, jest ona rzadka. W normalnych warunkach, „nieme” pęcherzyki i mikropęcherzyki docierające do płucnych naczyń włosowatych dyfundują do pęcherzyków płucnych bez szkody dla zdrowia nurka. W wyjątkowych przypadkach, albo jeśli pęcherzyki pojawiają się w dużych ilościach (przyczyną może być zlekceważenie tabel bądź wskazań komputera), ich tempo napływania może przekroczyć możliwości ich likwidacji w naczyniach włosowatych płuc, i wtedy część pęcherzyków może przedostawać się do tętniczej części układu krwionośnego. Wielu fizjologów sądzi, że ten właśnie mechanizm odpowiada za występowanie mózgowej postaci DCS.

Możliwe jest również, że gdy tempo napływania pęcherzyków przekracza możliwości dyfuzji azotu do pęcherzyków płucnych i przemieszczania się ich przez płucne naczynia włosowate, mogą one blokować i wstrzymywać przepływ krwi do płuc. Jeśli do tego dojdzie, to mniej krwi przepływać będzie przez płuca i docierać do lewej strony serca, co spowoduje wzrost tempa pracy serca i ciśnienia krwi. Bez natychmiastowej pomocy lekarskiej, system krążenia może całkowicie zaprzestać pracy. Może się też zdarzyć, że krew zacznie opływać zablokowane naczynia włosowate przez drożne naczynia, tak że krążenie zostanie zachowane. Jeśli pęcherzyki będą dalej napływać szybciej niż następować będzie ich eliminacja, mogą zaburzać wymianę gazową. To spowoduje jednocześnie ograniczenie dopływu tlenu do tkanek i spowolnienie usuwania azotu; oznakami będą bóle przy oddychaniu, często występujące jednocześnie z krótkim, drażniącym kaszlem. Poszkodowani często odczuwają duszności i mają wrażenie braku powietrza, co spowodowało nadanie tej odmianie płucnej DCS nazwy „the chokes”. Objawy mają tendencję do szybkiego narastania, i mogą prowadzić do wystąpienia szoku.

Warto zauważyć, że dwie ostatnie odmiany płucnej formy choroby dekompresyjnej występują tylko w razie silnego przesylenia gazem obojętnym, które może wystąpić np. wtedy, gdy nurek techniczny wynurzy się na powierzchnię bez odbycia większej części wymaganej dekompresji.

Mózgowa postać choroby dekompresyjnej.

Pęcherzyki przemieszczające się przez płucne naczynia włosowate do części tętniczej układu krwionośnego mogą wędrować dalej do mózgu przez tętnice szyjne, w analogiczny sposób jak gaz wtłoczony do krwiobiegu podczas urazu ciśnieniowego płuc, powodujący embolię gazową. Symptomy mózgowej postaci choroby dekompresyjnej są właściwie takie same jak embolii gazowej, i należą do nich nieostre widzenie, bóle głowy, dezorientacja, nieprzytomność i śmierć.

Choroba dekompresyjna typu III

Typ ten DCS nie jest powszechnie wyróżniany, jednak niektórzy fizjologowie klasyfikują możliwą interakcję embolii gazowej i choroby dekompresyjnej jako Typ III choroby dekompresyjnej. Uważa się, że pęcherzyki gazu wtłoczone do krwiobiegu na skutek urazu ciśnieniowego płuc mogą pełnić rolę zarodków dla powstających pęcherzyków w tkankach przesyconych rozpuszczonym gazem obojętnym.

Chociaż badania nad tym zagadnieniem nie są bardzo zaawansowane i nie doprowadziły do uzyskania rozstrzygających wyników, wydaje się, że ten mechanizm może odpowiadać za powstawanie najbardziej poważnych i niebezpiecznych przypadków choroby dekompresyjnej, w szczególności neurologicznej postaci DCS.

Inne formy choroby dekompresyjnej

Inne formy DCS występują rzadziej niż te wymienione powyżej, jednak również mogą się zdarzyć. Pęcherzyki w tętniczej części układu krwionośnego mogą powodować bardzo różnorodne symptomy, od zawrotów głowy do zawału serca, w zależności od ich lokalizacji. Choroba dekompresyjna może się nawet objawiać w układzie pokarmowym, chociaż jest to rzadkie.

Zmęczenie.

Najczęstszym symptomem choroby dekompresyjnej jest nadmierne zmęczenie, chociaż fizjologowie nie są pewni jaki mechanizm je powoduje. Sprawa jest komplikowana przez fakt, że nurkowanie samo w sobie jest męczące, zwłaszcza w zimnej wodzie, w której ciało wydatkuje duże ilości energii na utrzymanie stałej temperatury. Zazwyczaj fizjologowie traktują nadmierne zmęczenie podobnie jak inne symptomy DCS. Jednak nie powinieneś ignorować nadmiernego zmęczenia pojawiającego się bez poważnej przyczyny.

Objawy choroby dekompresyjnej w uchu środkowym.

Choroba dekompresyjna może się objawiać w obrębie ucha, powodując utratę słuchu, zawroty głowy lub dzwonienie w uszach. Uraz ciśnieniowy ucha może objawiać się w podobny sposób, dlatego może być ciężko rozróżnić te dwa przypadki. Często symptomy w obrębie ucha są jedynymi oznakami DCS występującymi u nurka.

Choroba dekompresyjna objawiająca się w uchu środkowym jest często kojarzona z nurkowaniami na mieszkankach gazowych zawierających hel. Fizjologowie uważają, że objawy DCS w uchu środkowym mogą wynikać z tworzenia się pęcherzyków w perylimfie ślimaka podczas dekompresji. Ponieważ ta odmiana choroby często występuje tuż po przełączeniu z mieszanki zawierającej hel na mieszkankę zawierającą tylko tlen i azot, niektórzy sądzą, że azot z ucha środkowego dyfunduje do mikropęcherzyków wewnątrz ślimaka, powodując ich wzrost i wystąpienie objawów DCS.

Czynniki ryzyka i zapobieganie

Indywidualne różnice fizjologiczne mogą wpływać na prawdopodobieństwo wystąpienia u ciebie choroby dekompresyjnej. Fizjologowie nie znają jeszcze wszystkich czynników, które mogą predysponować poszczególnych nurków do choroby dekompresyjnej, i w związku z tym nie mogą brać ich wszystkich pod uwagę podczas opracowywania modeli dekompresyjnych.

Indywidualne cechy twojej fizjologii i twoje zachowanie podczas nurkowania mogą stwarzać czynniki predysponujące cię do wystąpienia choroby dekompresyjnej, albo też chronić cię przed nią. Oznacza to, że sposób i prędkość absorpcji i/lub eliminacji przez ciebie gazu obojętnego używanego do oddychania będzie w pewnym stopniu odbiegać od wartości przewidywanych przez tabele lub komputer nurkowy.

Czynniki zestawione poniżej zostały generalnie uznane za te, które mogą wpływać na ryzyko wystąpienia u ciebie choroby dekompresyjnej. Znaczenie większości z nich nie zostało naukowo udowodnione, lecz opiera się raczej na ogólnych doniesieniach, przewidywaniach teoretycznych, doświadczeniach społeczności nurkowej, anegdotach, a niekiedy po prostu na zdrowym rozsądku. Dlatego wiążą się nimi liczne znaki zapytania, i nie ma praktycznego sposobu na skonstruowanie modeli dekompresyjnych biorących pod uwagę wszystkie te czynniki u wszystkich osób. Jako rozsądny nurek, powinieneś brać je pod uwagę i nurkować konserwatywnie, unikając zbliżania się do limitów bezdekompresyjnych twojego komputera lub tabel.

Ilość tkanki tłuszczowej.

Azot łatwiej rozpuszcza się w tłuszczu niż w wodzie, i dlatego uważa się, że nurek z większą ilością tkanki tłuszczowej może w czasie nurkowania zaabsorbować więcej azotu niż przewidują to modele dekompresyjne. Niektóre badania prowadzone na ludziach i zwierzętach potwierdzają tę hipotezę, lecz wyniki innych nie wskazały na istnienie związku pomiędzy ilością tkanki tłuszczowej i prawdopodobieństwem wystąpienia DCS. Być może to inne czynniki biochemiczne, takie jak np. zwiększona zawartość cholesterolu, predysponują nurków do wystąpienia choroby dekompresyjnej. Ponieważ hel jest znacznie słabiej rozpuszczalny w tłuszczach niż azot, nie jest jasne, w jakim stopniu nadmiar tkanki tłuszczowej będzie zwiększał ryzyko wystąpienia DCS podczas nurkowań na trimiksie bądź helioksie.

Ćwiczenia fizyczne.

Stwierdzono, że ćwiczenia fizyczne mogą zarówno chronić, jak i zwiększać ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej. Te dane się nie wykluczają - efekt ćwiczeń zależy od czasu jaki upłynął pomiędzy ćwiczeniami a nurkowaniem. Badania na zwierzętach wykazały, że intensywne ćwiczenia więcej niż 12 godzin przed nurkowaniem dają efekt ochronny, zaś intensywne ćwiczenia tuż przed lub kilka godzin przed nurkowaniem wydają się predysponować do wystąpienia choroby dekompresyjnej. Według niektórych hipotez, białka wytwarzane podczas ćwiczeń chronią Cię przed DCS, lecz na krótko przed nurkowaniem ćwiczenia mogą spowodować wzrost liczby zarodki gazowych na których tworzą się pęcherzyki. Chociaż wyniki tych badań są interesujące, uzyskane informacje na temat ćwiczeń i nurkowania wciąż budzą wątpliwości.

Ćwiczenia modyfikują i przyspieszają krążenie, zatem wydają się wpływać na absorpcję i eliminację gazów obojętnych. Podczas pierwszej, głębszej części nurkowania, aktywność fizyczna może zwiększać ryzyko DCS poprzez zwiększanie absorpcji gazu obojętnego. Spokojne ćwiczenia (np. łagodne poruszanie kończynami) podczas przystanku dekompresyjnego mogą zwiększać bezpieczeństwo, gdyż prawdopodobnie przyspieszają eliminację rozpuszczonego gazu. Dane eksperymentalne potwierdzają prawdziwość obu tych koncepcji. Wiele badań wskazuje, że ćwiczenia tuż po nurkowaniu zwiększają ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej. Według jednej z hipotez, ćwiczenia fizyczne przyczyniają się do powstawania chwilowych stref niskiego ciśnienia i zarodki gazowych, zwiększających tworzenie się fazy gazowej. Według innej hipotezy, podczas intensywnych ćwiczeń wzrasta ciśnienie krwi, co może prowadzić do przedostawania się pęcherzyków z żyłnej części układu krwionośnego do części tętniczej.

Płeć.

Ponieważ u kobiet występuje wyższa zawartość tkanki tłuszczowej niż u mężczyzn, niektórzy fizjologowie uważają, że kobiety będą naturalnie bardziej wrażliwe na wystąpienie DCS. Jednak niedawne badania nie wykazały związku pomiędzy ryzykiem wystąpienia DCS a płcią. Lekarze zajmujący się medycyną nurkową traktują ten problem jako nierozwiązany, i zazwyczaj zakładają, że ewentualna różnica we wrażliwości kobiet i mężczyzn na chorobę dekompresyjną jest niewielka.

Wiek.

Wyniki niektórych badań na osobach wystawionych na zwiększone ciśnienie (w tym na osobach nie nurkujących) wskazują na związek pomiędzy wiekiem a ryzykiem wystąpienia DCS. Może to wynikać ze zmian naturalnie zachodzących z wiekiem, takich jak obniżenie sprawności układów oddechowego i krążenia - co negatywnie wpływa na wymianę gazową. Dodatkowo, u starszych osób zwykle występuje większa ilość tkanki tłuszczowej.

Pomimo tego, inne badania nie stwierdziły związku pomiędzy wiekiem a ryzykiem wystąpienia choroby dekompresyjnej. Według jednej z teorii, sprawność fizyczna zmniejsza się z wiekiem, i dlatego ryzyko związane z wiekiem może raczej odzwierciedlać ryzyko związane ze zmniejszoną sprawnością fizyczną. Mimo to, nawet u sprawnych osób wiek powoduje nieuniknione zmiany w układach krążenia i oddechowym, i dlatego w starszym wieku zalecane jest nurkowanie bardziej konserwatywne.

Sprawność fizyczna. Wiele badań przeprowadzonych na ludziach i zwierzętach wykazało, że sprawność fizyczna zapewnia ochronę przed chorobą dekompresyjną. Na przykład, wyniki badań na szczurach dowiodły, że wytrenowane szczury przeżywały profile dekompresyjne powodujące śmierć niesprawnych fizycznie szczurów. Sprawny fizycznie organizm generalnie toleruje wyższy poziom stresu niż organizm niewytrenowany, i zapewne dotyczy to także stresu powodowanego przez dekompresję. Zawartość tkanki tłuszczowej i wiek także mogą odzwierciedlać sprawność fizyczną jako zmienne kontrolujące ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej. Co ciekawe, w przeciwieństwie do innych wymienionych tutaj czynników ryzyka, brak danych wskazujących, że sprawność fizyczna nie zwiększa odporności na DCS.

Odwodnienie.

Modele dekompresyjne zakładają, że gazy obojętne transportowane są do tkanek przez prawidłowo funkcjonujący układ krwionośny. Tymczasem odwodnienie (dehydratacja) zmniejsza ilość krwi która przeprowadza wymianę gazową, przez co spowalniana jest eliminacja gazu z organizmu. Z tego powodu, odwodnienie jest uważane za czynnik zwiększający podatność na DCS, i rzeczywiście jest często wiązany z przypadkami choroby dekompresyjnej. Jednak wyniki badań prowadzonych na zwierzętach nie są jednoznaczne. Często występuje dehydratacja chroniczna, więc związek pomiędzy odwodnieniem a DCS może być przypadkowy.

W każdym razie, wszystkie układy w twoim organizmie funkcjonują lepiej, gdy jesteś dobrze nawodniony. Spożywanie środków o działaniu diuretycznym (np. kofeiny), obfite pocenie, a nawet suche powietrze z butli - wszystkie te czynniki przyczyniają się do odwodnienia twojego organizmu. Także podczas metabolizmu alkoholu zużywane są duże ilości wody, i dlatego osoba skacowana jest najprawdopodobniej częściowo odwodniona. Rozsądnym rozwiązaniem jest pełne nawodnienie się przed nurkowaniem, o ile któryś z tych czynników dotyczy ciebie.

Choroby, zranienia.

Jakikolwiek stan zaburzający normalne krążenie może potencjalnie wpływać na eliminację z twojego organizmu gazów obojętnych. Wyleczone zranienia mogą powodować lokalne zaburzenia przepływu krwi, zaś choroby zazwyczaj wpływają negatywnie na wydolność układu krążenia.

Alkohol.

Uważa się, że alkohol spożyty przed lub po nurkowaniu wpływa na twoją fizjologię, zwiększając ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej. Tuż przed nurkowaniem, nawet niewielkie ilości wypitego alkoholu mogą przyspieszać krążenie, zwiększając nasycenie tkanek gazami obojętnymi powyżej wartości przewidywanych przez modele dekompresyjne. Alkohol przyczynia się także do wystąpienia narkozy azotowej. Po nurkowaniu, alkohol rozszerza naczynia krwionośne, przypuszczalnie przyspieszając usuwanie z tkanek azotu i przyczyniając się do powstawania pęcherzyków. Dodatkowo, alkohol ma działanie diuretyczne.

Dwutlenek węgla.

Podwyższony poziom CO₂ wynikający z wstrzymywania oddechu podczas nurkowania lub nieprawidłowego oddychania, może zaburzać transport gazów przez układ krwionośny na skutek rozszerzania naczyń, i zwiększać lub modyfikować wchłanianie gazów obojętnych podczas nurkowania. Brak poważnych dowodów na potwierdzenie tych przypuszczeń, lecz zgadzają się one z naszym stanem wiedzy na temat reakcji organizmu na zwiększone stężenie dwutlenku węgla.

Zimno.

Różne badania dowodzą, że ekspozycja na zimno w trakcie i po nurkowaniu może wpłynąć na ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej. Wynika to z reakcji twojego organizmu na niską temperaturę - jak pamiętasz, w razie konieczności organizm ogranicza krążenie obwodowe celem zachowania ciepła. Obecnie uważa się, że jeśli pletwonurkowi jest tak samo zimno podczas całego nurkowania, to krążenie zmienia się w niewielkim stopniu, i ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej jest albo takie samo, albo nawet zmniejszone. Jednak jeśli nurkowi jest ciepło na początku nurkowania, a potem się wyziębia (co wydaje się stosunkowo częste w nurkowaniu sportowym), wtedy ryzyko wystąpienia DCS rośnie. Jest to spowodowane tym, że nurek będzie mieć normalne krążenie na początku nurkowania, w trakcie absorpcji gazu, lecz ograniczone krążenie w trakcie jego eliminacji.

Badania wykazały, że u nurków wystawianych na zimno po nurkowaniu istnieje większe ryzyko wystąpienia DCS niż u nurków, którzy po wynurzeniu zabezpieczają się przed chłodem. Wiąże się to z faktem, że w cieple odbywa się normalne, nieograniczone krążenie obwodowe. Z drugiej strony, stwierdzono również, że jeśli zmarznięci nurkowie po nurkowaniu brali gorący prysznic, to ryzyko tworzenia się pęcherzyków w ich tkankach także wzrastało. Prawdopodobnie wynika to z faktu, że ciepło zmniejsza zdolność tkanek do utrzymywania gazów obojętnych w stanie rozpuszczonym.

Wysokość n.p.m. i latanie po nurkowaniu.

Większość modeli dekompresyjnych zakłada, że po nurkowaniu nurek wynurza się do poziomu ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza. Dlatego mogą pojawić się komplikacje, jeżeli po nurkowaniu planujesz lot samolotem lub wzniesienie się wysoko ponad poziom morza w inny sposób (np. przejazd przez góry), zanim twoje tkanki pozbędą się nadmiaru azotu. W takim wypadku, obniżone ciśnienie atmosferyczne na wysokości zwiększyłoby gradient ciśnień pomiędzy twoimi tkankami a środowiskiem zewnętrznym. Mogłoby to przyspieszać powstawanie fazy gazowej w twoim ciele - na co wskazują liczne eksperymenty.

Będziesz mieć podobne problemy, jeśli zanurkujesz na wysokości bez uwzględniania obniżonego ciśnienia atmosferycznego przy pomocy specjalnych tabel, albo komputera zaprojektowanego do nurkowania na

wysokości. Gdy wystąpi choroba dekompresyjna spowodowana ekspozycją na wysokość, powrót na poziom morza zwykle nie usuwa jej objawów.

Przestrzegając aktualnych wytycznych odnośnie nurkowania na wysokości i latania po nurkowaniu (opisanych wkrótce) możesz skutecznie ograniczyć ryzyko.

Niezarośnięty otwór przedsionkowy.

W większości sytuacji, należy spodziewać się pęcherzyków w tętniczej części układu krwionośnego tylko w razie wystąpienia poważnej choroby dekompresyjnej, gdy ilość pęcherzyków docierających do płuc przekracza możliwości ich wychwytywania w naczyniach włosowatych płuc, albo w razie wystąpienia embolii gazowej po urazie ciśnieniowym płuc, gdy gaz przechodzi przez uszkodzone ściany pęcherzyków płucnych bezpośrednio do krwiobiegu.

Jednak niekórzy fizjologowie zwrócili szczególną uwagę na niewielką część nurków, u których stwierdzono tak zwany niezarośnięty otwór przedsionkowy (atrial septum defect - ASD, lub patent foramen ovale - PFO, określane też po prostu jako „dziura w sercu”). PFO jest pozostałością po życiu płodowym: płód nie oddycha, więc otwór ten pozwala krwi omijać płuca nienarodzonego dziecka. Po porodzie, otwór zazwyczaj zarasta w ciągu roku, lecz u niektórych osób nie zarasta całkowicie.

Ocenia się, że PFO występuje u 20 do 34% populacji. Dla ogromnej większości z nich nie stanowi to żadnego problemu, gdyż otwór jest zakrywany przez wyrostek tkanki, utrzymywany na miejscu przez ciśnienie panujące w sercu i skutecznie rozdzielający dwie połowy serca. Jednak w niektórych nietypowych okolicznościach, wyrostek ten pozwala na bezpośredni przepływ krwi z części żyłnej serca do tętniczej, a u bardzo małego procentu ludzi PFO jest stale otwarte, i przepływ krwi z żyłnej do tętniczej części serca zachodzi regularnie.

Problemem jest to, że obecność niezarośniętego otworu przedsionkowego może teoretycznie pozwolić zazwyczaj nieszkodliwym pęcherzykom na przejście z żyłnej części serca (z krwi płynącej w kierunku płuc) do części tętniczej, i w ten sposób ominąć płuca. Mogłoby to powodować poważne postacie choroby dekompresyjnej. Prace naukowe potwierdzają występowanie problemu: na przykład, dwa badania wykazały, że nieproporcjonalnie duża część nurków u których wystąpiła neurologiczna postać choroby dekompresyjnej miała PFO.

Chociaż fizjologowie regularnie badają ten problem, rola PFO w powstawaniu choroby dekompresyjnej jest wciąż kwestionowana. PFO nie wydają się być przyczyną większości wypadków dekompresyjnych.

Badania naukowe prowadzone przy Johnson Space Center przy NASA w Houston w Teksasie (astronauci przechodzą dekompresję przed spacerami w przestrzeni kosmicznej) pokazały, że u osób z niezarośniętym otworem przedsionkowym bardzo ciężko doprowadzić do transferu pęcherzyków przez PFO, nawet jeśli prowadzący badania specjalnie próbowali to wywołać. Teoretycznie, przesylenie gazem obojętnym mogłoby ułatwić przepływ pęcherzyków przez PFO, ale potwierdzono to tylko u zwierząt u których doprowadzono do poważnego przesylenia azotem - takiego jakie mogłoby wystąpić po ominięciu znacznej części wymaganej dekompresji.

Zarówno praktyka, jak i pewne dane eksperymentalne wskazują, że ryzyko wystąpienia DCS u nurków z PFO nie jest znacząco większe niż u nurka bez tej przypadłości, przy założeniu przestrzegania podstawowych, konserwatywnych praktyk nurkowych. Nie jest nawet pewne, że jeśli do przepływu krwi pomiędzy komorami dochodzi także w stanie spoczynku, to jest to powód do obaw. Mimo tego, nurek świadomy posiadania PFO powinien zdecydować się na konsultację u specjalisty oraz bardzo konserwatywnie przestrzegać limitów podczas nurkowania.

Odwrócone profile.

Od dawna zalecano nurkom nie wykonywanie głębokich nurkowań po płytkich, oraz unikanie profili typu „zęby piły”, ze znacznymi zmianami głębokości w górę i w dół. Twierdzono, że zwiększa to ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej, chociaż przegląd literatury wykazał, że te wytyczne wywodziły się ze znacznych ograniczeń długości nurkowania powtórzeniowego podczas korzystania z tabel US Navy do planowania głębokiego nurkowania po nurkowaniu płytkim.

Analiza odwróconych profili wykazała, że występują one często, zwłaszcza w nurkowaniu bezdekompresyjnym. W odniesieniu do głębokich nurkowań dekompresyjnych istnieją teoretyczne zastrzeżenia wynikające z modeli uwzględniających powstawanie pęcherzyków. Ale według obecnego stanu wiedzy, nie ma podstaw by sądzić, że odwrócone profile są istotnym czynnikiem ryzyka dla nurkowań bezdekompresyjnych płytszych niż 40 metrów, i dla różnic głębokości nie przekraczających 12 metrów.

Ponieważ jednak większość danych eksperymentalnych uzyskano podczas nurkowań o typowych profilach, wciąż zalecane jest unikanie profili odwróconych.

Wcześniejsze przypadki DCS. Badania nurków oraz innych osób pracujących pod zwiększonym ciśnieniem wskazują, że osoba, u której już kiedyś wystąpiła choroba dekompresyjna, będzie bardziej predysponowana do jej ponownego wystąpienia w przyszłości. Według jednej z hipotez, pierwszy przypadek DCS u danej osoby uszkadza systemy bądź zaburza procesy odpowiedzialne za reagowanie na stres dekompresyjny. Inni fizjologowie argumentują, że osoba, u której wystąpił pierwszy przypadek DCS, może być od początku bardziej podatna, i drugi przypadek po prostu wynika z tej predyspozycji. W każdym razie, rozsądnym zachowaniem dla osoby u której wystąpiła choroba dekompresyjna jest nie wznawianie nurkowania bez zgody lekarza specjalizującego się w medycynie hiperbarycznej, i nurkowanie bardzo konserwatywne - nie zbliżanie się do limitów.

Wpływ nurkowania na ciążę

Możesz ukończyć wiele kursów nurkowania, czytać publikacje nurkowe, uczestniczyć w specjalnych programach, a mimo tego wiedzieć bardzo niewiele o wpływie nurkowania na ciążę - przede wszystkim dlatego, że niewiele wiadomo o tym zagadnieniu, co nie uległo zresztą zmianie w ciągu ostatnich ponad dwudziestu lat.

Dyskusje na ten temat zawsze koncertują się na jednym podstawowym problemie - czy nurkowanie w jakikolwiek sposób może zaszkodzić rozwijającemu się płodowi. Analiza czynników fizjologicznych związanych z nurkowaniem, oraz potencjalnego sposobu ich oddziaływania na dziecko w łonie matki, pozwolą ci rozszerzyć swoją wiedzę o możliwych skutkach nurkowania w trakcie ciąży.

Ściśnięcie - dotyczy ono wyłącznie przestrzeni powietrznych w ciele lub wokół ciała nurka. Ponieważ wody płodowe całkowicie otaczają płód, nie ma przestrzeni powietrznych, i płód nie może ucierpieć na skutek ściśnięcia.

Uraz ciśnieniowy płuc - Ponieważ płód nie oddycha powietrzem, lecz wchłania tlen bezpośrednio z krwi matki, nie może doświadczyć urazu ciśnieniowego płuc. Ciężarna kobieta, u której wystąpi embolia gazowa, naraża jednak na niebezpieczeństwo zarówno życie swoje, jak i życie dziecka. Jeżeli embolia wymaga leczenia w komorze dekompresyjnej, co jest prawdopodobne, leczenie może być ryzykowne dla dziecka ze względu na możliwość wystąpienia toksyczności tlenowej (opisane niżej). Jednak biorąc pod uwagę łatwość uniknięcia barotraumaty płuc oraz to, że uraz nie zagraża samemu płodowi, urazy ciśnieniowe płuc nie są poważnym zagrożeniem dla płodu, gdyż ich wystąpienie u zdrowych nurków przestrzegających podstawowych standardów nurkowych jest mało prawdopodobne.

Toksyczność tlenowa - Toksyczność tlenowa jest potencjalnym problemem przede wszystkim u osób nurkujących na nitroksie, a także w nurkowaniu technicznym, wymagającym dekompresji na nitroksach o dużej zawartości tlenu bądź na czystym tlenie. Eksperymenty na ciężarnych owcach wykazały brak zagrożenia dla płodu w warunkach wysokiego ciśnienia. Przy zwiększonym ciśnieniu parcjalnemu tlenu, u płodów nie nastąpiło istotne zwiększenie stężenia tlenu we krwi nawet wówczas, gdy matki wystawiono na ciśnienia parcjalne dochodzące do 2,1 atm - znacznie powyżej 1,4 atm będącego limitem dla osób nurkujących na nitroksie, przy ciśnieniu parcjalnemu 1,6 atm będącym limitem awaryjnym. Przy ciśnieniu parcjalnemu 3,15 atm wystąpił wzrost stężenia tlenu u płodów, ale to ciśnienie jest bez porównania większe niż te, z którymi mają do czynienia nurkowie (ciśnienie parcjalne tlenu 3,15 atm odpowiada nurkowaniu na powietrzu na głębokość 141 metrów, bądź na nitroksie 40 na głębokość 69 metrów). Wzrost ciśnienia tlenu w krwi płodu nie powinien powodować u niego poważniejszych komplikacji. Jest to dobra wiadomość dla kobiet, które po głębokim nurkowaniu odkryły, że są w ciąży.

Jest jedna sytuacja, w której nurek może zostać poddany działaniu bardzo wysokich ciśnień parcjalnych tlenu. Podczas leczenia choroby dekompresyjnej w komorze ciśnieniowej, zazwyczaj elementem procedury jest chwilowa ekspozycja na tlen pod wysokim ciśnieniem. Płód narażony na bardzo wysokie ciśnienia tlenu, zwłaszcza w późnym okresie ciąży, teoretycznie może być zagrożony uszkodzeniem narządu wzroku - tzw. retrolental fibroplasia. Jest to możliwe, ponieważ u wcześniaków w przeszłości poddawanych leczeniu tlenem, dochodziło do tego urazu, prowadzącego niekiedy do ślepoty. Jednak operatorzy komór dekompresyjnych nie zauważyli, żeby u dzieci matek leczonych w komorach dekompresyjnych z powodów nie związanych z nurkowaniem dochodziło do uszkodzeń tego typu. Inną kwestią jest to, czy płód może ucierpieć z powodu zbyt małej ilości tlenu. Łożysko reguluje przepływy tlenu do płodu. Poza tym, istnieją naturalne mechanizmy fizjologiczne, zapewniające dziecku wystarczającą ilość tlenu nawet wtedy, gdy matka ma go mało. U płodu może zatem dojść do znacznego obniżenia stężenia tlenu tylko w ekstremalnych sytuacjach, takich jak utonięcie matki.

Choroba dekompresyjna - Czy płód może ucierpieć w wyniku choroby dekompresyjnej lub w wyniku

tworzenia się pęcherzyków azotu? Zagadnienie to wzbudza wiele kontrowersji wśród fizjologów, a wielu informacji niezbędnych do udzielenia odpowiedzi na to pytanie wciąż brakuje. Rozważamy najczęściej trzy główne problemy:

1. Czy jeżeli u nurkującej kobiety wystąpi choroba dekompresyjna, to ucierpi także dziecko? Badania na ciężarnych owcach wykazały, że jeśli w końcowych etapach ciąży były one wystawione na wysokie ciśnienia - choć nie na tyle wysokie, by spowodować chorobę dekompresyjną - jagnięta rodziły się zdrowe. Jednak owce, u których w końcowych etapach ciąży wywoływano chorobę dekompresyjną i nie leczono jej, rodziły martwe jagnięta. Teoretycznie więc, wystąpienie choroby dekompresyjnej u kobiety w późnej fazie ciąży mogłoby powodować śmierć płodu. Nie znane są jednak konsekwencje dla płodu, gdy u matki w początkowym etapie ciąży wystąpi choroba dekompresyjna, która zostanie wyleczona i przeminie bez żadnych trwałych efektów. Dane z ośrodków zajmujących się leczeniem hiperbarycznym (nie tylko w związku z nurkowaniem) mogą w przyszłości pozwolić na rozwiązanie tego problemu, jednak obecnie wiadomo bardzo niewiele.

2. Czy pęcherzyki azotu powstają u płodu w takim samym tempie jak u matki? Jest to poważny problem dla kobiety, która odkrywa, że była w ciąży podczas nurkowania bezdekompresyjnego, uznawanego za bezpieczne dla niej samej. Wczesne eksperymenty przeprowadzane na psach i szczurach wykazały odporność płodów na tworzenie się w nich pęcherzyków, lecz wyniki późniejszych badań prowadzonych na owcach i kozach nie były jednoznaczne. W jednym z eksperymentów, u owcy sprężonej do ciśnienia odpowiadającego głębokości 50 metrów pęcherzyki wytworzyły się u matki, lecz nie u płodu. W podobnym eksperymencie przeprowadzonym na owcach i kozach pęcherzyki wytworzyły się zarówno u matek, jak i u płodów. Jednak młode zwierzęta urodziły się normalne. W oparciu o te dane niektórzy badacze uznali, że płód jest w pewnym stopniu chroniony, i że pęcherzyki wystąpią u dziecka z mniejszym prawdopodobieństwem niż u matki. Jednak mamy wciąż zbyt mało danych, dlatego nikt dotąd nie sformułował wytycznych dotyczących stopnia ryzyka w zależności od głębokości i czasu trwania nurkowania.

3. Czy pęcherzyki mogą powodować komplikacje przy porodzie? Wydaje się, że każdy pęcherzyk wytworzony w ciele płodu może zaburzać jego prawidłowy rozwój. Gdy pęcherzyki azotu tworzą się u nurka, są one przeważnie filtrowane w płucach, dzięki czemu nie osiągają one części tętniczej układu krążenia, gdzie mogłyby powodować uszkodzenia. Ponieważ płuca płodu nie funkcjonują, nie posiada on systemu usuwającego pęcherzyki; jednak z drugiej strony, pęcherzyki tworzące się u matki będą filtrowane przez łożysko i nie dotrą do dziecka.

W celu rozpoznania problemu, przeprowadzono dwie serie badań nurkujących kobiet. W jednym z badań, w grupie kobiet nurkujących w trakcie ciąży na głębokość 30 metrów lub powyżej, częściej wystąpiły komplikacji porodowe niż w kontrolnej grupie kobiet nie nurkujących. Jednakże wartość ta nie odbiegała zbyt od średniej dla całej populacji. W innym, podobnym badaniu nie stwierdzono różnic w częstotliwości występowania zaburzeń.

Również badania na zwierzętach nie dostarczyły ostatecznych dowodów nad wpływem wysokich ciśnień na rozwój płodu. Na przykład, w jednym z eksperymentów wystawiono owce we wczesnym etapie ciąży - w okresie najszybszego rozwoju płodu - na bardzo wysokie ciśnienia. Nie stwierdzono nieprawidłowości u płodów. Są to dobre informacje dla kobiet, które nurkowały na duże głębokości zanim jeszcze dowiedziały się, że są w ciąży.

Pierwsza pomoc i leczenie choroby dekompresyjnej

Jak dowiedziałeś się podczas dyskusji o urazie ciśnieniowym płuc, jeśli nie możemy natychmiast skorzystać z pomocy lekarskiej, to traktujemy chorobę dekompresyjną (decompression sickness - DCS) i embolię gazową (arterial gas embolism - AGE) jako jeden typ urazu: uraz dekompresyjny (decompression illness - DCI). Przeczytaj rozdział „Pierwsza pomoc i leczenie przy urazie ciśnieniowym płuc” by przypomnieć sobie o zalecanych procedurach postępowania w wypadku wystąpienia DCI.

Przypadek DCI zdiagnozowany jako choroba dekompresyjna (DCS) zazwyczaj wymaga leczenia przez rekompresję, chociaż w wypadku skórnej postaci choroby dekompresyjnej, przy braku innych objawów, lekarz może uznać że nie jest to konieczne. Niezwłocznie przeprowadzona terapia rekompresyjna okazała się bardzo skuteczne w redukowaniu lub zapobieganiu trwałym uszkodzeniom. Uważa się, że opóźnienia w rozpoczęciu terapii są ważną przyczyną występowania trwałych uszkodzeń ciała.

Rekompresja sprawia, że pęcherzyki w ciele poszkodowanego zmniejszają objętość lub przechodzą ponownie do roztworu - symptomy są likwidowane poprzez skuteczne usunięcie ich bezpośrednio

przyczyny. Następuje przywrócenie przepływu krwi do porażonych tkanek, i jednocześnie zwiększenie stężenia tlenu. Następnie zaczyna się długa, powolna dekompresja, zwykle połączona z terapią tlenową, podawaniem odpowiednich leków i kroplówek, tak że zgromadzony gaz ma dużo czasu na bezpieczne opuszczenie tkanek.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU

- **Korzystaj z komputerów i tabel nurkowych do planowania twoich nurkowań konserwatywnie, pozostawaj w bezpiecznej odległości od limitów. Przestrzegaj wszystkich zaleceń producenta podczas korzystania z komputera nurkowego.**
- **Zwracaj uwagę na czynniki, które mogą predysponować cię do wystąpienia choroby dekompresyjnej. Jeśli występują niektóre z nich, nurkuj jeszcze bardziej konserwatywnie.**
- **Zapoznaj się z procedurami udzielania pierwszej pomocy w wypadku wystąpienia choroby dekompresyjnej, najlepiej podczas kursów PADI Rescue Diver i Emergency First Response.**

Modele dekompresyjne

Uwaga: ten rozdział oparty jest na podręczniku „The Recreational Diver’s Guide to Decompression Theory, Dive Tables and Dive Computers” autorstwa dr Johna Lewisa i Karla Shreevesa (wydanie II, 1992, Intl. PADI, Inc., nakład wyprzedany) przerobionym i uaktualnionym przed włączeniem do tego wydania „Encyklopedii Nurkowania Rekreacyjnego”.

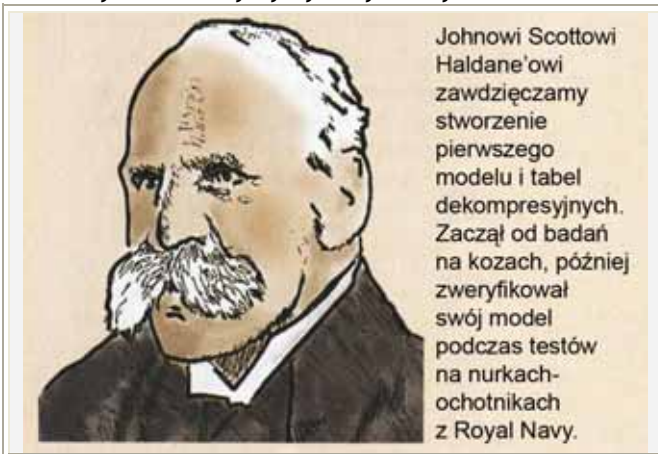
Wstęp do modeli dekompresyjnych

Chociaż niniejsza dyskusja dotycząca problemów związanych z dekompresją dotyczy nurków, istnieje możliwość wystąpienia choroby dekompresyjnej podczas każdego przedsięwzięcia, podczas którego ludzie doświadczają znacznego obniżenia ciśnienia. W związku z tym, do osób potencjalnie zagrożonych DCS należą robotnicy pracujący w kesonach, lotnicy i astronauta, oraz oczywiście nurkowie. Osoby z tych grup polegają na **modelach dekompresyjnych** dla zmniejszenia zagrożenia chorobą dekompresyjną. Celem modelowania dekompresji jest konstruowanie przewidywalnych procedur na podstawie zdobytej wiedzy i przewidywań (teoria dekompresji), które pozwolą kontrolować i ograniczać formowanie się fazy gazowej w twoim organizmie. Tabele nurkowe i komputery nurkowe są narzędziami, umożliwiającymi stosowanie modelu. Wbrew powszechnej opinii, celem modelowania dekompresji nie jest po prostu zapobieganie DCS; to można osiągnąć bardzo prosto - poprzez wstrzymanie się od nurkowania. Dlatego celem jest umożliwienie nurkowania trwającego jak najdłużej przy zachowaniu minimalnego ryzyka wystąpienia DCS. (Zerowe ryzyko byłoby idealne, ale jak dotąd nauka nie osiągnęła punktu, w którym byłoby to możliwe). Podczas dążenia do tego celu, niemal każdy duży krok w rozwoju teorii dekompresji i modeli dekompresyjnych pozwalał na wydłużenie czasu nurkowania i zmniejszenie ryzyka.

Młodszy oficer Andrew Catto powinien był zginąć, a przynajmniej zwijać się w agonii. Jest rok 1907, i Catto przeżył niemożliwe nurkowanie. Brytyjska Royal Navy uważa nurkowania poniżej 30 metrów za ekstremalnie niebezpieczne - a Catto zanurkował na głębokość 55 metrów. Nikt przedtem nie spędził na tej głębokości więcej niż 10 minut bez wystąpienia „krzywików” - a Catto pozostał na tej głębokości przez 29 minut. Niezwykle nurkowanie Catto było możliwe dzięki nowemu modelowi dekompresyjnemu stworzonemu przez Johna Scotta Haldane’a - modelowi, który pozostał praktycznie niezmienny przez następne 100 lat.

Nie myl terminów „użyteczny” i „wiarygodny” w modelach dekompresyjnych. Generalnie, cokolwiek potwierdzonego podczas rzeczywistych nurkowań z udziałem ludzi na określonej głębokości i w określonym czasie, z akceptowalnie niskim ryzykiem wystąpienia DCS, jest wiarygodnym modelem. Zwróć uwagę na te dwa najważniejsze punkty: możemy ufać modelom dekompresyjnym wyłącznie wtedy, gdy zostały sprawdzone podczas rzeczywistych nurkowań, i musimy określić poziom ryzyka który skłonni jesteśmy zaakceptować.

Co ciekawe, aby być wiarygodnym, model bynajmniej nie musi być oparty na rzeczywistych danych ani też skomplikowany. Na przykład, jeśli ograniczymy głębokość do 30 metrów, zawsze będziemy wykonywać trzyminutowy przystanek bezpieczeństwa na głębokości 5 metrów, a pomiędzy nurkowaniami wykonywać będziemy przerwy powierzchniowe trwające nie mniej niż 90 minut, moglibyśmy użyć pary kostek sześciennych do określenia limitu bezdekompresyjnego w minutach. Limity byłyby przypadkowe, a w większości wypadków podczas tego samego nurkowania ty i twój partner mielibyście różne limity, lecz najdłuższy możliwy dopuszczalny czas wynikający z tego modelu wynosiłby 12 minut. Jeśli porównasz tę wielkość z bazą danych ludzkich nurkowań, stwierdzisz, że wszystkie nurkowania dozwolone przez ten model swobodnie mieściłyby się w przedziale ryzyka który społeczność nurkowa uznaje za dopuszczalny dla nurków rekreacyjnych. Zatem, jest to wiarygodny model dekompresyjny, w granicach wyznaczonych przez jego projekt. Jednak nie byłby to zbyt użyteczny model, ponieważ wyznaczone przez niego limity byłyby znacznie i niepotrzebnie skrócone, według naszej wiedzy uzyskanej na podstawie rzeczywistych nurkowań. Użyteczny model dekompresyjny musi być wiarygodny, i musi przewidywać, tak dokładnie jak to możliwe, najdłuższe czasy bezdekompresyjne i najkrótsze wymagane przystanki dekompresyjne, jednak przy akceptowalnym ryzyku DCS. Aby to uzyskać, przewidywania modelu muszą odtwarzać tak blisko jak to możliwe wyniki rzeczywistych nurkowań. Historycznie, próba modelowania procesów zachodzących w ludzkiej fizjologii była głównym sposobem podejścia do tego zagadnienia, ale, jak zobaczysz, model nie musi być doskonały by być użytecznym.



Jak dowiedziałeś się wcześniej, współczesna teoria dekompresji i oparte na niej modelowanie rozpoczęło się od prac Johna Scotta Haldane'a. Royal Navy zatrudniło Haldane'a, by rozwiązał problem występowania choroby dekompresyjnej u nurków, a sto lat później hołdem dla jego geniuszu są niemal wszystkie komputery nurkowe i tabele stosowane współcześnie, opierające się na modelach teoretycznych stworzonych przez niego. W oparciu przede wszystkim o eksperymenty na kozach, Haldane i jego współpracownicy stworzyli teorię, która zakładała zróżnicowaną absorpcję azotu przez różne tkanki ciała, i przewidywała, że przez ograniczanie ilości pochłoniętego w ten sposób azotu do określonych poziomów, można uniknąć tworzenia fazy gazowej i przez to choroby

dekompresyjnej.

Oryginalny model dekompresyjny Haldane'a składał się z pięciu tkanek z półokresami wynoszącymi od 5 do 75 minut, i matematycznie przewidywał, w jaki sposób różne tkanki w organizmie mogą pochłaniać i eliminować azot. Chociaż jednak powszechnie przyjęto, że różne tkanki mają różne tempo absorpcji i eliminacji azotu, ważne jest rozróżnienie pojęcia „tkanki” w fizjologii dekompresji i w modelowaniu dekompresji. Haldane wierzył, że istnieje pewien związek pomiędzy półokresami które ustalił i rzeczywistymi tkankami w ciele, jednak nie planował, by konkretne tkanki rzeczywiste odpowiadały określonym tkankom teoretycznym. Zamiast tego, Haldane próbował po prostu matematycznie modelować fakt, że różne części ciała nie pochłaniają i uwalniają azotu w jednym, określonym tempie. Dzisiaj najczęściej stosowane są określenia „przedział tkankowy” (tissue compartment), „tkanka teoretyczna” (theoretical tissue) i „teoretyczny przedział tkankowy” (theoretical tissue compartment), jednak niekiedy stosuje się, cokolwiek nieprecyzyjnie, określenie „tkanka” (tissue). Co więcej, porównywanie modeli z przypadkami choroby dekompresyjnej nie wskazuje na określone związki pomiędzy symptomami a teoretycznymi tkankami, wzbudzając wątpliwości co do tego, czy tkanki teoretyczne w ogóle odpowiadają tkankom rzeczywistym. Dlatego coraz większa ilość ekspertów zajmujących się dekompresją używa określenia „kompartament” lub „przedział” (compartment), całkowicie rezygnując z odniesienia „tkanki”. Zatem, może się zdarzyć, że jeden nurek przekroczy limit „tkanki” 5-minutowej, inny zaś „tkanki” 480-minutowej, i u obu jedynym symptomem będzie ból nadgarstka. Współczesne modele przy obliczeniach biorą pod uwagę nawet 20 lub 30 teoretycznych przedziałów o półokresach dochodzących do, i przekraczających, 600 minut.

Jako dodatek do przewidywanego tempa absorpcji i eliminacji azotu, model Haldane'a wprowadził też krytyczny stosunek pomiędzy teoretycznym ciśnieniem rozpuszczonego azotu a ciśnieniem otoczenia. Haldane używał krytycznego stosunku wynoszącego 1,58 ciśnienia parcjalnego azotu w tkankach : 1

ciśnienie otoczenia (dokładniej, ponieważ traktował powietrze jako 100% azot, używał stosunku 2:1, co jest tą samą wartością po przeliczeniu całkowitego ciśnienia na ciśnienie azotu) dla wszystkich przedziałów tkankowych. Według założeń Haldane’a, wystąpienia choroby dekompresyjnej należałoby oczekiwać po nurkowaniu, podczas którego przekroczony zostanie krytyczny stosunek dla któregośkolwiek z kompartmentów. Aby tego uniknąć, Haldane skonstruował układ głębokości, czasów i przystanków dekompresyjnych które pozwalały nurkowi na pozbycie się nadmiarowego azotu podczas wynurzenia, lecz bez przekroczenia tych wartości krytycznych. To była podstawa pierwszych opublikowanych tabel nurkowych. Dzięki jego pracom, wkrótce nurkowie bezpiecznie odbywali nurkowania wcześniej uważane za niemożliwe ze względu na ryzyko wystąpienia DCS.

W późnych latach 30., badania prowadzone przez US Navy wykazały, że różne kompartmenty mają różne wartości krytyczne, zamiast jednej wspólnej wartości zaproponowanej przez Haldane’a. Stwierdzono, że szybkie przedziały (te o krótkich półokresach) mogą tolerować znacznie wyższe przesylenie azotem niż przewidział Haldane, zaś wolne przedziały (o długich półokresach) - nieco niższe. Badania prowadzone w latach 50. wykazały natomiast, że nie tylko różne tkanki teoretyczne mają różne wartości krytyczne, ale wartości te różnią się dla jednej tkanki w zależności od głębokości.

W tym samym okresie, US Navy po raz pierwszy opisało procedury nurkowań powtórzeniowych (które omówimy później), biorąc pod uwagę eliminację azotu z tkanek podczas przerwy powierzchniowej pomiędzy nurkowaniami. Wcześniej, wszystkie nurkowania przeprowadzone tego samego dnia były do siebie dodawne, tak że limity nurkowań powtórzeniowych i czas przystanków dekompresyjnych oparte były na łącznym czasie wszystkich nurkowań. Dokonując tych ważnych zmian, US Navy zwiększyło ilość kompartmentów do sześciu (dodając przedział o półokresie 120 minut), oraz wprowadziło pojęcie M-wartości (M-value) dla ułatwienia wyliczania maksymalnych dopuszczalnych ciśnień azotu (wartości krytycznych) dla danej tkanki. Oryginalnie, M-wartości określały maksymalne dopuszczalne ciśnienie azotu w danym przedziale tkankowym w stopach wody morskiej (wartość bezwzględna) - fswa. Ułatwiło to matematyczne formułowanie tabel nurkowych przez określenie maksymalnego nadwyżkowego ciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego dla każdej tkanki teoretycznej, i przez likwidację konieczności każdorazowego wyliczania zmiennych stosunków.

Większość modeli dekompresyjnych używanych we współczesnych komputerach i tabelach także opiera się na ciśnieniach gazów obojętnych i na M-wartościach, chociaż, jak napisano wcześniej, uważa się że nie istnieją prawdziwe M-wartości powyżej których tworzą się pęcherzyki, a poniżej których nie. Badania wskazują raczej, że modele dekompresyjne zapobiegają wystąpieniu choroby dekompresyjnej przez kontrolowanie wielkości i ilości pęcherzyków.

Chociaż teorie uległy zmianie, podstawowa metodologia używana w dużej większości tabel i komputerów nurkowych pozostaje neo-Haldane’owska, czyli opiera się o te same założenia, które jako pierwszy zastosował Haldane. Niektóre z parametrów uległy zmianie, zmieniły się też nazwy części pojęć, jednak model Haldane’a pozostaje podstawą większości współczesnych modeli, włącznie z niemal wszystkimi stosowanymi w komputerach nurkowych. Głównym powodem jest to, że model Haldane’a opiera się na stosunkowo nieskomplikowanych obliczeniach matematycznych, co czyni go idealnym dla niewielkich, prostych komputerów nurkowych, i że model jest stosunkowo wiarygodny z punktu widzenia nurków rekreacyjnych, a nawet większości nurków technicznych i komercyjnych. Jest wiarygodny i użyteczny, nawet jeśli nie modeluje dokładnie procesów zachodzących w ludzkim organizmie.

Wszystkie modele neo-Haldane’owskie używają pojęcia przedziałów teoretycznych. Każdy z przedziałów różni się od pozostałych na dwa ważne sposoby: 1) absorbuje azot (lub inny gaz obojętny) w różnym tempie, co jest odzwierciedlone jako jego półokres; oraz 2) może tolerować różną ilość gazu obojętnego, co odzwierciedla jego M-wartość, dla uproszczenia opisywana też jako dopuszczalne nasycenie azotem (chyba, że rozważamy nurkowanie techniczne z użyciem helu!). Gdy zastosujesz te pojęcia w odniesieniu do modelu, zobaczysz, że model Haldane’a i sposób jego działania nie są wcale trudne do zrozumienia.

Nasycenie azotem i półokresy

Zacznijmy od omówienia nasycenia kompartmentów azotem i koncepcji półokresu, wspomnianego już wcześniej. Aby uprościć dalsze rozważania, założymy że oddychasz powietrzem, zarówno na powierzchni, jak i podczas nurkowania.

Jeśli nie nurkowałeś przez więcej niż jeden dzień, modele dekompresyjne zakładają, że wszystkie twoje przedziały tkankowe mają nasycenie azotem równe zero. Dokładniej rzecz ujmując, ciśnienie azotu wewnątrz twoich tkanek wynosi 0,79 bara gdy oddychasz powietrzem na poziomie morza. Jednak, dla uproszczenia obliczeń matematycznych, założymy że na powierzchni nasycenie tkanek teoretycznych

azotem wynosi zero. Taka definicja ułatwia też zrozumienie zagadnienia, a nie wpływa na model teoretyczny.



Ilustracja 1: Nasycenie azotem kompartmentu 5-minutowego w trakcie 15-minutowego pobytu na głębokości 30 metrów

Załóżmy, że nurkujesz teraz na głębokość 30 metrów. Zgodnie z modelem Haldane'a, wszystkie twoje przedziały tkankowe zaczną absorbować azot, i po dostatecznie długim czasie uległyby wysyceniu (osiągnęły stan równowagi) - do momentu osiągnięcia nasycenia azotem odpowiadającego głębokości 30 m. Nurkowie saturowani, którzy całymi dniami żyją i pracują w zanurzonych kapsułach mieszkalnych, są rzeczywistym tego przykładem. Po wielu godzinach na głębokości, ich ciała osiągną stan saturacji gazem obojętnym (azotem i/lub helem), i ich wymagania dekompresyjne pozostają takie same, bez względu na to czy pozostaną tam przez dzień, przez tydzień, czy jeszcze dłużej. Bez względu na głębokość - a dotyczy to także powierzchni, czyli głębokości 0 - jeśli pozostaniesz na niej wystarczająco długo, twoje

kompartymy zostaną nasycone azotem do wartości odpowiadającej tej głębokości.

Stosując półokresy, możemy przewidzieć, ile czasu musi minąć zanim na danej głębokości każdy z kompartmentów zostanie nasycony azotem do określonego poziomu. Załóżmy, że szybko zanurzyłeś się na głębokość 30 metrów podczas pierwszego nurkowania tego dnia. Jak już wiesz, początkowo nasycenie twoich przedziałów tkankowych wynosiło zero, zaś po odpowiednio długim czasie kompartmenty zostaną nasycone do poziomu odpowiadającego głębokości 30 metrów. Każdy z kompartmentów wymaga czasu równego jego półokresowi do zwiększenia nasycenia o połowę wielkości brakującej do pełnego wysycenia. Podczas twojego nurkowania na głębokości 30 metrów, przedział tkankowy o półokresie wynoszącym 5 minut (potocznie określane jako 5-minutowy kompartment) zostanie nasycony azotem do poziomu odpowiadającego głębokości 15 metrów w ciągu zaledwie 5 minut, ale 120-minutowy kompartment potrzebować będzie dwóch godzin (120 minut) by osiągnąć ten sam poziom.

Gdyby interesowało nas jedynie nasycenie gazem obojętnym danego przedziału po upływie jednego półokresu, moglibyśmy tutaj się zatrzymać. Jeśli jednak chcemy być w stanie obliczyć nasycenie dowolnego kompartmentu po dowolnym czasie, musimy zbadać co stanie się po upływie kilku półokresów.

Podczas pierwszego półokresu, gradient ciśnień się zmniejsza (gradient - czyli różnica pomiędzy początkowym nasyceniem azotem, w naszym przykładzie równym zero, a nasyceniem po saturacji, równym głębokości) o połowę. Podczas pierwszych 5 minut, nasycenie 5-minutowego kompartmentu zwiększyło się do odpowiadającego głębokości 15 metrów. W tym momencie, gradient ciśnień uległ zmniejszeniu z 30 metrów do 15 metrów. Podczas kolejnych 5 minut, gradient ciśnień znów ulega zmniejszeniu o połowę, a nasycenie kompartmentu azotem wyniesie 22,5 metra.

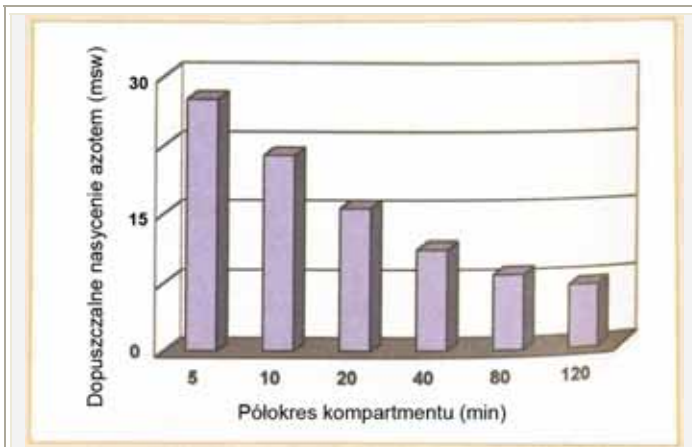
W każdym kolejnym 5-minutowym okresie, gradient ciśnień między środowiskiem zewnętrznym a tkanką ulega zmniejszeniu o połowę. Jednocześnie, podczas każdego półokresu, nasycenie kompartmentu azotem zwiększa się o połowę wartości gradientu ciśnień na początku tego półokresu. Matematycy określają funkcję opisującą takie zmiany nasycenia jako funkcję wykładniczą.

Sześć przedziałów tkankowych w modelu US Navy miało półokresy wynoszące 5, 10, 20, 40, 80 i 120 minut, i zachowanie każdego z nich było jakościowo takie samo. Aby osiągnąć nasycenie odpowiadające głębokości 15 metrów na głębokości 30 metrów, kompartmenty wymagałyby odpowiednio 5, 10, 20, 40, 80 i 120 minut - czyli czasu równego jednemu półokresowi. Pozostały gradient ciśnień, czyli różnica pomiędzy wartością aktualną a wartością ostateczną, po całkowitym wysyceniu - będzie ulegał zmniejszeniu o połowę z każdym kolejnym półokresem.

Gdyby każdy z kompartmentów w ciągu każdego półokresu zwiększał nasycenie azotem tylko o połowę, to z matematycznego punktu widzenia nigdy nie mógłby osiągnąć wysycenia, choć byłby bardzo blisko.

Ponieważ jednak po upływie sześciu półokresów kompartment wysycony jest w 98,4%, większość modeli dekompresyjnych traktuje sześć półokresów jako czas potrzebny do całkowitego wysycenia. W naszym przykładzie, 5-minutowy kompartment zostałby nasycony azotem do poziomu odpowiadającego głębokości 30 metrów po 30 minutach (po upływie sześciu 5-minutowych półokresów) na tej głębokości.

Dopuszczalne nasycenie azotem



Ilustracja 2: Graficzne przedstawienie sześciopredziałowego modelu Haldane’owskiego

Chociaż model Haldane’a jest tak elegancki i klarowny, sam w sobie nie mógłby służyć do przewidywania nawet prostych nurkowań bezdekompresyjnych - ani w żaden inny sposób modelować ludzkiej fizjologii. Limity bezdekompresyjne mogą być określone tylko w jeden sposób - poprzez eksperymentalne nurkowania testowe. Dopuszczalne nasycenie azotem każdego z kompartmentów może być określone dopiero wtedy, gdy nurkowania testowe dostarczą wystarczającą ilość danych. Jednak gdy już określimy półokresy, to dane dotyczące limitów bezdekompresyjnych na różnych głębokościach całkowicie wystarczą do określenia dopuszczalnego nasycenia azotem - czyli M-wartości - każdego z przedziałów. Należy pamiętać, że modele Haldane’a nie opisują dokładnie ludzkiej fizjologii. Jak

wspomniano wcześniej, Haldane przypuszczał, że różne tkanki wpływają na sposób absorpcji azotu przez ciało, choć dzisiaj wielu fizjologów to kwestionuje. Poza tym, Haldane oparł swój model na przypuszczeniu, że jeśli u nurka nie występują symptomy choroby dekompresyjnej, oznacza to, że w jego ciele nie pojawiły się pęcherzyki.

Dzisiaj wiemy, że pęcherzyki tworzą się bez powodowania symptomów choroby dekompresyjnej. Stosujemy modele dekompresyjne, by ograniczyć tworzenie się pęcherzyków do poziomu, na którym nie powodują choroby dekompresyjnej, a jak dotąd żaden model dekompresyjny nie bierze pod uwagę indywidualnych różnic fizjologicznych. Bez względu na to, czy nurek jest młodszy czy starszy, szczuplejszy czy „z brzuszkiem”, czy jest kobietą czy mężczyzną, model przewiduje dokładnie ten sam wzorzec absorpcji i eliminacji azotu podczas realizacji danego profilu nurkowego. (Niektóre komputery nurkowe i oprogramowanie do obliczania dekompresji pozwalają na zwiększenie poziomu konserwatywności, lecz nic w modelu nie określa takiej potrzeby, ani korzyści z takiego postępowania)

Dlatego możemy ufać modelom dekompresyjnym tylko do takiego stopnia, w jakim zostały przetestowane, a ich przewidywania porównane z wynikami rzeczywistych nurkowań odbytych przez ludzi. Modele Haldane’owskie działają bardzo dobrze... w określonych granicach. Jak omówimy wkrótce, problemy zaczynają się wtedy, gdy próbujemy stosować modele dekompresyjne w sytuacjach, w których nie zostały przetestowane.

Ilustracja 2 przedstawia model Haldane’owski. Każda kolumna reprezentuje kompartment, z jego półokresem podanym poniżej. Wysokości kolumn przedstawiają wartości dopuszczalnego nasycenia azotem danego kompartmentu. Na przykład, najwyższe dopuszczalne nasycenie azotem ma przedział 5-minutowy - odpowiada ono głębokości 27 metrów. Kolejne kompartmenty o dłuższych półokresach posiadają odpowiednio coraz niższe dopuszczalne nasycenia.

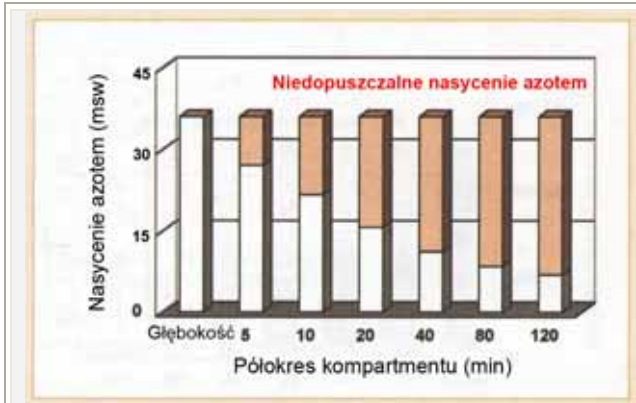
Patrząc na ilustrację 2 zauważysz, że najniższe dopuszczalne nasycenie (kompartmentu 120-minutowego) odpowiada głębokości 6 metrów. Oznacza to, że według tego modelu nie istnieje limit dla głębokości mniejszych niż 6 metrów - dlatego, że na głębokościach mniejszych niż 6 metrów nasycenie azotem nigdy nie może przekroczyć wartości dopuszczalnej dla któregośkolwiek z kompartmentów, bez względu na czas nurkowania.

Pomyśl o dopuszczalnym nasyceniu azotem każdego z przedziałów tkankowych jako o maksymalnej głębokości, na jakiej ten przedział może pozostać przez nieograniczony czas, i ciągle pozwalać na wynurzenie. Innymi słowy, dopuszczalne nasycenie azotem każdego przedziału jest równe głębokości, na jakiej osiągnąłby on saturację. Wynika z tego, że na każdej głębokości mniejszej od dopuszczalnego nasycenia azotem dla jakiegokolwiek kompartmentu, dopuszczalny czas nurkowania byłby nieograniczony, gdyż żaden z przedziałów nie osiągnąłby nigdy nasycenia krytycznego.

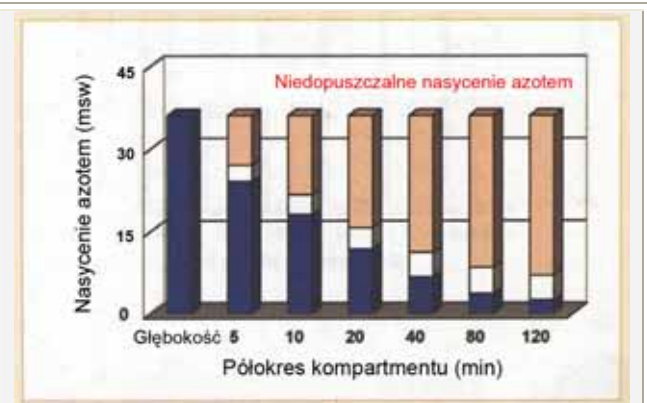
Według modelu przedstawionego na ilustracji 2, gdybyś pozostał na głębokości 5,5 metra przez 12 godzin, wszystkie kompartmenty uległyby nasyceniu do poziomu odpowiadającego tej głębokości. Ale wciąż pozostawałbyś w granicach dopuszczalnego nasycenia azotem, które umożliwiłoby wynurzenie bez wykonywania przystanków dekompresyjnych. Gdyby jednak nasz model posiadał kompartmenty o jeszcze dłuższych półokresach i jeszcze niższych dopuszczalnych wartościach nasycenia, głębokość na której

możnaby przebywać bez ograniczeń byłaby może jeszcze mniejsza, i wynosiła na przykład 4,5 metra. Jednak podczas testów, ponad 100 nurków wystawiono na ciśnienie odpowiadające głębokości 6,3 metra przez 48 godzin, a następnie wynurzono. Chociaż wykryto u nich znaczne ilości niemych pęcherzyków, nie wystąpił ani jeden przypadek choroby dekompresyjnej.

Teoria dekompresji w praktyce

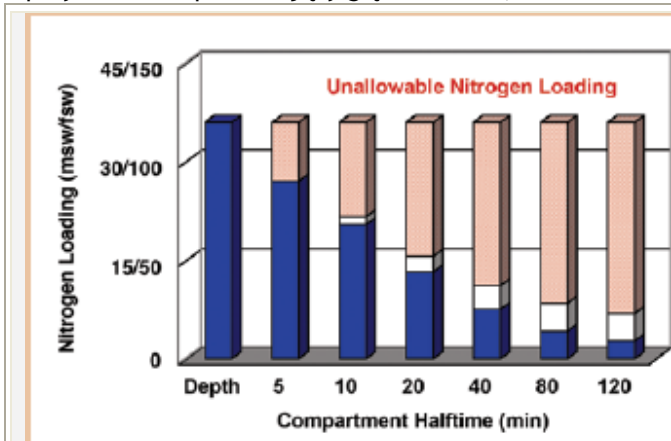


Ilustracja 3. Model na początku nurkowania na głębokość 36 metrów. Żaden z kompartmentów nie zaabsorbował jeszcze azotu.

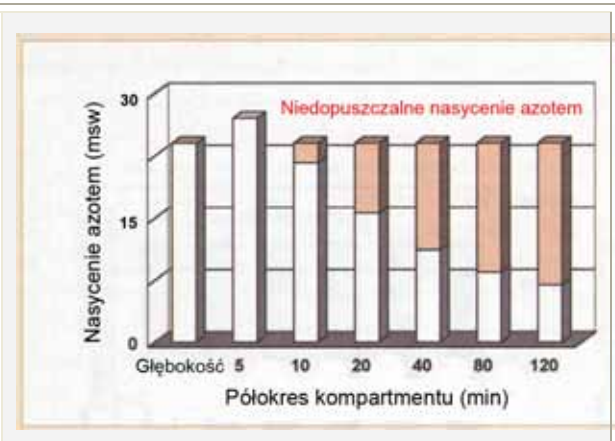


Ilustracja 4. Nasycenie kompartmentów azotem po 10 minutach na głębokości 36 metrów.

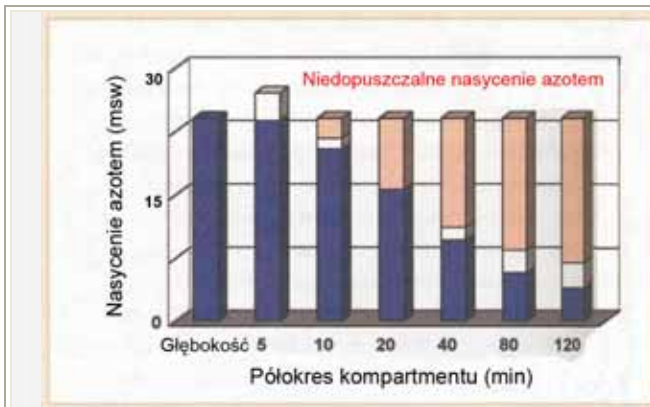
Spójrzmy teraz co się stanie, gdy wybierzemy się z naszym modelem dekompresyjnym na nurkowanie. Zanurzyłeś się właśnie bezpośrednio na głębokość 36 metrów, co zostało przedstawione przez kolumnę po lewej stronie wykresu na ilustracji 3. Być może będzie ci łatwiej to sobie wyobrazić, gdy pomyślisz o głębokości jako o zbiorniku połączonym przez zawory z każdym z przedziałów. 5-minutowy kompartment ma największy zawór i napełnia się najszybciej, zaś 120-minutowy kompartment ma zawór najmniejszy, napełnia się zatem najwolniej. Jak wiesz, jeśli jednak pozostaniesz na tej głębokości przez odpowiednio długi czas, to ostatecznie każdy z przedziałów osiągnie ten sam poziom co „zbiornik”, czyli w tym przykładzie odpowiadający głębokości 36,6 metra.



Ilustracja 5. Trzydzieści minut na głębokości 36 metrów. Kompartment 5-minutowy jako pierwszy osiągnął dopuszczalne nasycenie azotem



Ilustracja 6. Model na początku nurkowania na 24 metry. Zauważ, że kolumna głębokości jest krótsza niż przedział 5-minutowy. Oznacza to, że na głębokości 24 metrów przedział 5-minutowy nigdy nie może osiągnąć dopuszczalnego nasycenia azotem



Ilustracja 7. 20-minutowy kompartment jako pierwszy osiąga limit, co czyni go kompartmentem kontrolującym nurkowanie na głębokość 24 metrów

Nurkując rekreacyjnie, nie zostaniesz pod wodą tak długo. Musisz zakończyć nurkowanie zanim którykolwiek z przedziałów osiągnie swoje dopuszczalne nasycenie azotem. Ponieważ dopuszczalne nasycenie każdego z przedziałów odpowiada głębokości 30 metrów lub mniejszej, ilustracja 3 przedstawia czerwoną strefę niedopuszczalnych wartości nasycenia azotem dla poszczególnych przedziałów. Jeśli nasycenie azotem któregoś z przedziałów tkankowych osiągnie niedozwolony poziom, przekroczysz limity bezdekompresyjne i będziesz musiał wykonać przystanek dekompresyjny przed wynurzeniem. Po pobycie na głębokości 36 metrów przez 10 minut, model dekompresyjny będzie wyglądał tak, jak przedstawiono to na ilustracji 4. Przedziały są częściowo wypełnione, lecz w tym momencie nie możemy powiedzieć, który z przedziałów będzie ostatecznie kontrolował czas denny. Chociaż 5-minutowy przedział wypełni się najszybciej, ma on też najwyższą wartość dopuszczalnego nasycenia azotem. Zauważ, że 10-minutowy przedział osiągnął nasycenie odpowiadające głębokości 18 metrów - połowę nasycenia docelowego, jako że czas denny zrównał się z jego półokresem.

Na ilustracji 5, osiągnąłeś limit bezdekompresyjny wynoszący 13 minut, i widzimy, że to nurkowanie kontrolowane jest przez kompartment 5-minutowy - on jako pierwszy osiągnął dopuszczalne nasycenie azotem. Podczas danego nurkowania, kompartment kontrolujący to ten, który decyduje, co zgodnie z modelem będziesz musiał zrobić. Podczas nurkowania bezdekompresyjnego jest nim ten przedział tkankowy, który jako pierwszy osiągnie dopuszczalne nasycenie azotem. Podczas nurkowania dekompresyjnego jest nim ten kompartment, który jako pierwszy zmusi cię do wykonania przystanku i usunięcia części azotu, zanim zaczniesz kontynuować wynurzenie.

Zazwyczaj podczas nurkowań na głębokości większe od 30 metrów to 5-minutowy kompartment kontroluje nurkowanie bezdekompresyjne. Wolniejsze przedziały tkankowe mają większe znaczenie podczas płytszych nurkowań. Dla przykładu, przeanalizujmy nurkowanie na głębokość 24 metrów, przedstawione na ilustracji 6. Zauważ, że dla przedziału 5-minutowego kolumna głębokości jest krótsza od kolumny dopuszczalnego nasycenia azotem. Oznacza to, że kompartment 5-minutowy nigdy nie osiągnie swojego dopuszczalnego nasycenia podczas nurkowania na 24 metry, bez względu na czas pobytu na tej głębokości. W praktyce, jeśli ograniczymy nasze nurkowanie do głębokości wynoszących 24 metry lub mniej, możemy całkowicie usunąć przedział 5-minutowy z modelu.

Na tej głębokości, przedział 10-minutowy jest najszybszym z kompartmentów które mogą osiągnąć dopuszczalne nasycenie azotem, chociaż z ilustracji 7 wynika, że to przedział 20-minutowy kontroluje nurkowanie na głębokość 24 metrów, i jako pierwszy osiąga dopuszczalne nasycenie.

Wiesz już więcej na temat działania Haldane'owskich modeli dekompresyjnych niż większość nurków. Przejdziemy teraz do omówienia przewidywań modelu dla nurkowań wielopoziomowych, powtórzeniowych, wielodniowych, dekompresyjnych, na wzbogaconym powietrzu i na trimiksie. Najpierw spojrzymy na tabele nurkowe i ich działanie, oraz na ich podobieństwa i różnice do komputerów nurkowych w zastosowaniu modeli dekompresyjnych.

Nurkowanie powtórzeniowe

Gdyby nurkowanie rekreacyjne ograniczone było do bezdekompresyjnych nurkowań na stałą głębokość, nie potrzebowalibyśmy modeli dekompresyjnych - nawet wspomnianego na początku rozdziału hipotetycznego modelu „kostkowego”. Moglibyśmy wtedy eksperymentalnie ustalić dopuszczalny czas bezdekompresyjny i zapamiętać go. Ponieważ jednak nie możemy w praktyczny sposób przeanalizować każdego istniejącego profilu w nurkowaniu wielopoziomowym, powtórzeniowym i dekompresyjnym, modelowanie dekompresji

jest konieczne jeśli chcemy umożliwić sobie wykonywanie takich nurkowań. Zarówno tabele, jak i komputery nurkowe wymagają stosowania modeli dekompresyjnych.

Doktor Michael Powell nasłuchuje uważnie, lecz w słuchawkach słycać niewiele. Jest rok 1987, i Powell bada ochotników po nurkowaniach testowych w Institute of Applied Physiology and Medicine, przy pomocy dopplerowskiego przepływomierza ultradźwiękowego, który wykrywa pęcherzyki w organizmach nurków znacznie poniżej poziomów wskazujących na niedopuszczalne ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej.

Podobnie jak u Andrew Catto 80 lat wcześniej, u tych nurków testowych powinny były wystąpić „krzywiki” - przynajmniej zgodnie z tabelami nurkowymi US Navy. Ale nie tylko nie zdradzali symptomów DCS, lecz nawet rzadko kiedy występowały u nich nieme pęcherzyki. Nowa hipoteza dr Raymonda Rogersa wydaje się prawdziwa. Kompartymet o półokresie krótszym niż ten używany przez US Navy kontroluje bezdekompresyjne nurkowania powtórzeniowe. Jest to duży krok naprzód w zastosowaniu teorii dekompresji w nurkowaniu rekreacyjnym.

W poprzedniej części przeanalizowaliśmy wiele nurkowań bezdekompresyjnych, rozważaliśmy półokresy różnych kompartymentów i wartości dopuszczalnego nasycenia azotem. Gdybyśmy dodali do modelu wartości nasycenia dopuszczalne na przystankach dekompresyjnych (to tylko sześć dodatkowych wartości), moglibyśmy odtworzyć całe Standardowe Tabele Dekompresyjne US Navy do Nurkowania na Powietrzu (US Navy Standard Air Decompression Tables). Później omówimy nurkowania dekompresyjne, lecz na razie zajmijmy się czymś lepiej znanym większości nurków: nurkowaniami powtórzeniowymi.

Nurkowania powtórzeniowe - podejście us navy

Gdy zastanowimy się nad nurkowaniami powtórzeniowymi, konieczność stosowania modeli dekompresyjnych stanie się oczywista. Wyobraź sobie dylematy konstruktora tabel nurkowych, który musi ustalić bezpieczne limity nurkowania powtórzeniowego bez znajomości szczegółów pierwszego nurkowania. Istnieją niezliczone kombinacje głębokości i czasu trwania pierwszego nurkowania oraz długości przerwy powierzchniowej, a stopień trudności zadania rośnie z beznadziejnego do kompletnie niemożliwego jeśli próbujemy wyliczyć parametry dwóch lub więcej nurkowań powtórzeniowych. W zależności od dokładnych parametrów pierwszego nurkowania, którykolwiek z przedziałów w modelu może kontrolować nurkowanie powtórzeniowe, lecz nie ma możliwości dowiedzenia się z wyprzedzeniem, który to kompartymet. Podczas tworzenia pierwszych tabel dla nurkowań powtórzeniowych w latach 50., US Navy rozwiązało problem korzystając z prostej, lecz eleganckiej metody. Uznali, że najgorszą sytuacją dla nurka odbywającego nurkowanie powtórzeniowe, na przykład powtórzeniowe nurkowanie dekompresyjne, byłoby gdyby to najwolniejszy z kompartymentów (przedział 120-minutowy w ich wersji modelu) kontrolował nurkowanie powtórzeniowe. Dlatego wszystkie Tabele Nurkowań Powtórzeniowych US Navy, włącznie z literami oznaczającymi grupy powtórzeniowe, tabelą przeliczania przerw powierzchniowych oraz tabelą czasów zalegania azotu, wyliczone są w oparciu o tempo eliminacji azotu z przedziału 120-minutowego. Chociaż traktujemy nurkowanie powtórzeniowe jako coś oczywistego w nurkowaniu sportowym, to gdy US Navy po raz pierwszy opublikowała swoje Tabele Nurkowań Powtórzeniowych, był to znaczący krok naprzód. Wcześniej, czasy denne wielokrotnych nurkowań były po prostu dodawane do siebie - przez co drugie lub trzecie nurkowanie danego dnia były znacznie skrócone, lub nakładały obowiązek odbywania długiej dekompresji. US Navy z powodzeniem przetestowało swoje Tabele Nurkowań Powtórzeniowych, i w 1956 zostały one oficjalnie zatwierdzone do stosowania we flocie.

Nurkowania powtórzeniowe - podejście DSAT

Przez mniej więcej trzy dekady, Tabele Nurkowe US Navy stanowiły punkt odniesienia względem prawidłowego nurkowania powtórzeniowego. Jednak w 1987 dr Micheal Powell z Institute of Applied Physiology and Medicine (IAPM) w Seattle w stanie Washington rozpoczął serię nowych eksperymentów hiperbarycznych. Testował nową hipotezę dotyczącą nurkowania powtórzeniowego, która miała stać się podstawą Planera Nurkowań Rekreacyjnych (Recreational Dive Planner - RDP) skonstruowanego przez DSAT (Diving Science and Technology), a rozpowszechnianego przez PADI.

Pomysł narodził się w głowie dr Raya Rogersa, który wnioskował, że ponieważ nurkowie rekreacyjni często nurkują znacznie inaczej od nurków marynarki, to być może inny zestaw tabel nurkowych byłby dla nich bardziej odpowiedni. Przede wszystkim, Rogers proponował, że nurkowania powtórzeniowe dla nurków rekreacyjnych, mieszczących się w limitach bezdekompresyjnych krótszych niż dozwolone w tabelach US

Navy, mogłyby się opierać o szybszy, 60-minutowy półokres. Oznaczało to, że limity bezdekompresyjne nurkowań powtórzeniowych dla nurków rekreacyjnych korzystających z RDP wyliczane były przy założeniu szybszej eliminacji azotu na powierzchni - co oznaczałoby dłuższe nurkowanie dozwolone po określonej przerwie powierzchniowej, lub krótszą wymaganą przerwę powierzchniową dla umożliwienia danego nurkowania.

Bez wchodzenia w obliczenia teoretyczne, sam możesz ocenić korzyści wynikające z zastosowania teorii Rogersa: korzystając z Tabeli Nurkowań Powtórzeniowych US Navy, zaplanuj nurkowanie powtórzeniowe na określonej głębokości, po dowolnym pierwszym nurkowaniu i przerwie powierzchniowej. Sprawdź w tabeli czas zalegania azotu (Residual Nitrogen Time - RNT) dla nurkowania powtórzeniowego, i wydłuż czas przerwy powierzchniowej o dwie godziny. Generalnie, stwierdzisz, że RNT obniża się do mniej więcej połowy wartości wyjściowej. Na przykład, do przejścia z grupy powtórzeniowej G do D w tabeli US Navy potrzeba mniej więcej dwóch godzin, i w tym czasie na głębokości 30 metrów w Tabeli Nurkowań Powtórzeniowych US Navy nastąpi redukcja RNT z 26 minut do 14 minut.

Teraz wykonaj to samo ćwiczenie z RDP. Stwierdzisz, że wymagana przerwa powierzchniowa do obniżenia RNT o połowę wyniesie godzinę, a nie dwie. Aby porównać z wcześniejszym przykładem, w ciągu godziny następuje przejście z grupy powtórzeniowej H do grupy B, a na głębokości 30 metrów RNT obniży się z 12 minut do 6 minut.

Wypróbuj swoje własne przykłady, lecz pamiętaj, by do porównania używać RNT, ponieważ różne czasy bezdekompresyjne na dwóch tabelach mogą wprowadzić zamieszanie. W niektórych przykładach widać to wyraźniej niż w innych, ale ogólnym wnioskiem jest, że przerwy powierzchniowe zgodne z hipotezą Rogersa są mniej więcej o połowę krótsze niż wymagane przez US Navy. Można powiedzieć, że każda hipoteza skracająca czas wymaganej przerwy powierzchniowej o połowę może być nazwana rewolucyjną... o ile działa. Jak stwierdziliśmy wcześniej, można ufać modelowi dekompresyjnemu tylko jeśli sprawdza się podczas rzeczywistych nurkowań.

Z całym szacunkiem do obliczeń Rogersa, DSAT zastosował się do tej filozofii i zdecydował się przetestować nowy model. Eksperymenty mające na celu wypróbowanie RDP zostały przeprowadzone w IAPM pod przewodnictwem dr Powella. Na dane testowe złożony się 2943 nurkowania, częściowo w wodzie, częściowo zaś symulowane w komorach ciśnieniowych; przy pomocy detektora Dopplera, wszyscy nurkowie byli badani, czy w ich krwiobiegu nie powstają pęcherzyki.

Tylko w 301 z tych nurkowań wykryto mierzalną ilość pęcherzyków, i wystąpił zaledwie jeden przypadek choroby dekompresyjnej - zatem ryzyko DCS wyniosło zaledwie 0,03%. Testy przeprowadzone były w powtarzalnych i dokładnie kontrolowanych warunkach, i bezsprzecznie zakończyły się powodzeniem. Potwierdziły, że nawet jeśli model Rogersa wydawał się radykalny, to miał jedną wielką zaletę - działał. Jako dodatek do testów hipotezy Rogersa dotyczącej nurkowań powtórzeniowych, badania DSAT potwierdziły też wcześniejsze odkrycia Karla Hugginsa z University of Michigan, który wcześniej na mniejszą skalę przeprowadził testy dotyczące nurkowania wielopoziomowego. Dzięki temu, eksperymenty DSAT stanowiły pierwszy niezaprzeczalny dowód, że nurkowanie wielopoziomowe i nowe, bardziej liberalne nurkowanie powtórzeniowe mogą być bezpiecznie łączone.

RDP - Planer Nurkowań Rekreacyjnych

Pojawienie się Planera Nurkowań Rekreacyjnych (Recreational Dive Planner - RDP) stanowiło ważny krok w planowaniu nurkowań bezdekompresyjnych. Jego debiut poprzedziły trzy lata przygotowań, rozpoczętych od badań nad harmonogramami nurkowań specyficznymi dla nurkowań rekreacyjnych. Było to pierwsze zaplanowane na dużą skalę przedsięwzięcie nastawione na bezdekompresyjne nurkowania rekreacyjne. Tabele RDP wprowadziły trzy podstawowe modyfikacje, które usunęły większość trudności jakie mieli nurkowie rekreacyjni stosujący tabele US Navy - które przez szereg lat w wielu częściach świata były praktycznie jedynymi w powszechnym użyciu.

Po pierwsze, w RDP zmieniono kompartment kontrolujący przerwy powierzchniowe na lepiej dostosowany do nurkowań rekreacyjnych. Poprzednio używany przedział tkankowy był dostosowany do nurkowań dekompresyjnych prowadzonych przez nurków wojskowych i komercyjnych. Po drugie, zwiększono liczbę grup powtórzeniowych dla zwiększenia precyzji i usunięcia niepotrzebnych kar czasowych wynikających z zaokrąglania, a po trzecie zwiększono konserwatyzm przy określaniu maksymalnego dopuszczalnego nasycenia azotem.

Lepiej dobrany półokres - Nurkowanie rekreacyjne definiuje się jako takie, przy którym nie przekracza się limitów bezdekompresyjnych ani głębokości 40 metrów podczas nurkowania na powietrzu, lub głębokości na której ciśnienie parcjale tlenu wynosi 1,4 bara podczas nurkowania na wzbogaconym powietrzu. Przy tych ograniczeniach, teoretyczne tkanki o długich półokresach (tkanki wolne) nie zbliżają się do limitów

saturacji. Praktycznie jest zatem stosować pólkresy używane dla obliczania przerw powierzchniowych inne niż te stosowane w tabelach US Navy.

Tabele US Navy wyliczały przerwy powierzchniowe na podstawie kompartymetu o 120-minutowym pólkresie, jak najbardziej poprawnie przy planowaniu wojskowych nurkowań dekompresyjnych - ze względu na wysoki poziom azotu w tkankach nurka po nurkowaniu wymagającym wykonywania przystanków dekompresyjnych. Jednak dla zastosowania przez osoby odbywające wyłącznie nurkowania bezdekompresyjne (rekreacyjne), wybór przedziału o tak długim pólkresie wiązałby się z niepotrzebnymi ograniczeniami.

Prowadząc dokładne analizy komputerowe, dr Raymond Rogers, twórca RDP, poszukiwał pólkresu, który wyliczałby czas przerwy powierzchniowej odpowiednio dla nurków rekreacyjnych. Stwierdził, że 40-minutowe pólkresy byłyby odpowiednie dla niemal wszystkich rozsądnych profili nurkowań bezdekompresyjnych. Jednak niewielka część profili, głównie te zawierające wielokrotne, długie i płytkie (poniżej 15m) nurkowania, wymagałyby pólkresów dłuższych niż 40 minut. Dla zwiększenia bezpieczeństwa, model RDP został oparty o kompartymet o 60-minutowym pólkresie, który zapewnia bezpieczeństwo podczas odbywania ogromnej większości profili bezdekompresyjnych, i jedynie nieznacznie skraca czasy nurkowań powtórzeniowych w stosunku do modelu opartego na przedziale 40-minutowym. Pozostaje niewiele profili - bardzo długich, płytkich nurkowań bezdekompresyjnych, które mogłyby być kontrolowane przez kompartymety o pólkresach dłuższych niż 60 minut. Model RDP rozwiązał ten problem przez dodanie dwóch zasad - reguł WX i YZ, ponieważ wybranie przedziału o jeszcze dłuższym pólkresie niepotrzebnie skracałoby wszystkie nurkowania powtórzeniowe, tylko dla uwzględniania profili rzadko stosowanych w rzeczywistych sytuacjach nurkowych.

Więcej grup powtórzeniowych - Dla nurkowań bezdekompresyjnych, tabele US Navy wprowadzały 14 grup ciśnieniowych jako odzwierciedlenia ilości azotu zalegającego w tkankach po nurkowaniu. W RDP zwiększono tę ilość do 26, eliminując przez to niepotrzebne zaokrąglenia w obliczeniach czasu odsycania podczas przerwy powierzchniowej.

Więcej konserwatyzmu - Choć użycie 60-minutowego przedziału zwiększa czasy nurkowań powtórzeniowych, to w porównaniu z tabelami US Navy, w RDP zmniejszono maksymalne poziomy azotu dopuszczalne w tkankach teoretycznych. Skraca to czas bezdekompresyjny pierwszego nurkowania w porównaniu z tabelami US Navy, i jest zgodne z zaleceniami lekarzy, by nurkowie rekreacyjni stosowali limity bardziej konserwatywne niż nurkowie wojskowi i komercyjni. Obecnie, te obniżone limity stały się niemal standardem w spoteczności nurkowej.

Zatem, w zależności od profilu nurkowania, RDP skraca pierwsze nurkowanie, ale w mniejszym stopniu ogranicza nurkowania powtórzeniowe, ponieważ oparcie wyliczeń eliminacji azotu z organizmu o przedział 60-minutowy pozwala na skrócenie przerwy powierzchniowej mniej więcej o połowę w stosunku do wyliczeń opartych o kompartymet 120-minutowy, jak w tabelach US Navy. W rezultacie, podczas kolejnych nurkowań nurek stosujący RDP nadrabia z nawiązką skrócony czas pierwszego nurkowania (w stosunku do czasu dozwolonego przez tabele US Navy), przez cały czas pozostając w bardziej konserwatywnych limitach poziomu azotu. Od momentu wprowadzenia RDP, producenci sprzętu wypuścili na rynek dziesiątki typów komputerów. Prawie wszystkie opierają się o bardziej konserwatywne poziomy nasycenia tkanek, i stosują bardziej odpowiednie przedziały przy wyliczaniu nurkowań powtórzeniowych.

W porównaniu z tabelami US Navy, dla nurka rekreacyjnego wyraźne są korzyści ze stosowania tabel RDP - używanie 60-minutowego przedziału dla obliczeń eliminacji azotu, i większej ilości grup powtórzeniowych. Przy nurkowaniu z użyciem tabel US Navy, przeciętne nurkowanie kończyło się w jednej z grup powtórzeniowych E do H. Dla tych nurkowań, zazwyczaj potrzeba było około 45 minut dla zmniejszenia grupy o jedną - i uwzględnienia tym samym eliminacji azotu podczas przerwy powierzchniowej, półtorej godziny dla zmniejszenia o dwie grupy, i ponad dwóch godzin dla zmniejszenia o trzy grupy. Tymczasem w trakcie wielu wyjazdów nurkowych pomiędzy nurkowaniami mija mniej niż dwie godziny, a na jednodniowych rejsach czarterowych, czas przerwy powierzchniowej jest często krótszy niż 45 minut. RDP znacznie szybciej przyznaje „punkty” za czas spędzony na powierzchni. Korzystający z RDP nurek zazwyczaj zmienia grupy powtórzeniowe co 4 do 5 minut. Po typowym nurkowaniu i przerwie powierzchniowej trwającej 30 minut, nurek zmienia 5 do 8 grup powtórzeniowych. Ma to szczególne znaczenie podczas planowania więcej niż dwóch nurkowań. Nurkowania powtórzeniowe zabronione przez tabele US Navy nie tylko stają się możliwe przy wykorzystaniu RDP, ale także mają rozsądne czasy denne.

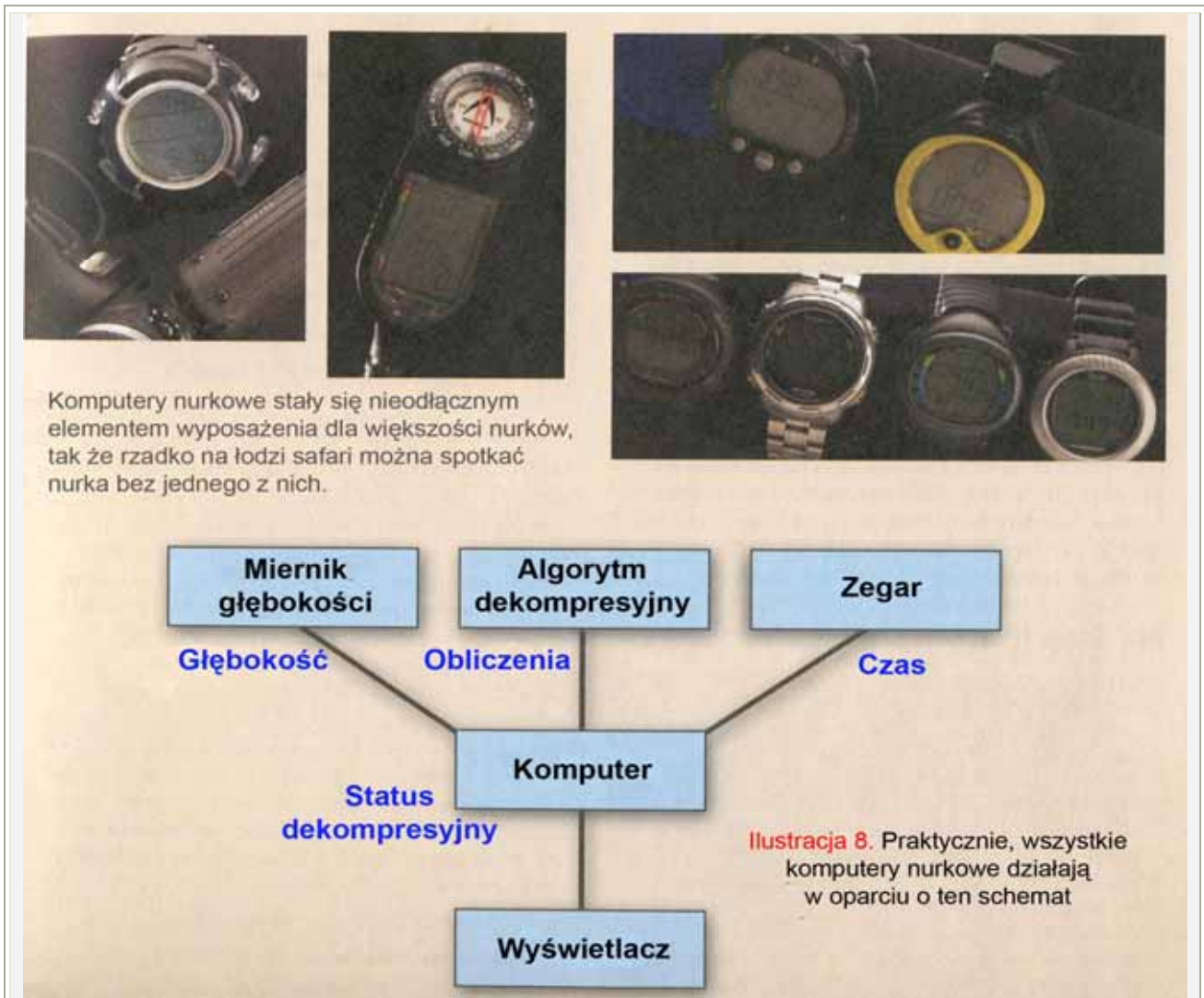
	tabele US Navy	RDP	tabele US Navy	RDP
	Czas	Czas	Grupa	Grupa

	bezdekompresyjny	bezdekompresyjny	powtórzeniowa	powtórzeniowa
Nurkowanie I				
Głębokość 24 metry	40 minut	30 minut		
Rzeczywisty czas denny	30 minut		G	R
Przerwa powierzchniowa	30 minut		J	K
Nurkowanie II				
Głębokość 18 metrów	16 minut	26 minut	J	R
Rzeczywisty czas denny	15 minut		J	K
Przerwa powierzchniowa	30 minut			
Nurkowanie III				
Głębokość 18 metrów	niedozwolone	26 minut		

Nazywa się Hannes Keller, jest młodym szwajcarskim matematykiem i nauczycielem inżynierii, zafascynowanym nurkowaniem. Chciałby skonstruować specjalne tabele, które umożliwiłyby nurkom schodzenie na głębokości większe niż 305 metrów - ale ma problem. Musiałby spędzić dostojnie tysiące godzin nad obliczeniami; a ponieważ jest rok 1958, komputery są rzadkie i bardzo drogie. Ale Keller jest pewny siebie: odwiedza biuro IBM w Zurichu i odważnie prosi o przyznanie darmowego czasu komputerowego na realizację swojego projektu. IBM ofiaruje mu cztery godziny, które Keller wykorzystuje do skonstruowania ponad 400 tabel, sięgających do głębokości 396 metrów. Gdyby prowadził obliczenia ręcznie, potrzebowałby na to ponad dwóch lat.

Cztery lata później, Keller z powodzeniem nurkuje na głębokość 330 metrów koło wyspy Catalina u wybrzeży Kalifornii, korzystając ze swoich tabel dla mieszanek gazowych. Jego prace, choć nie bezpośrednio użyteczne dla nurkowania rekreacyjnego, stanowiły ważny krok w rozwoju tabel nurkowych: udowodniły przydatność komputerów. Ich prędkość wkrótce uwolni twórców tabel od żmudnych obliczeń, redukując dni obliczeń do minut. Ale w 1958 roku zapewne nawet Keller nie wyobrażał sobie dnia, w którym noszone przez nurków komputery będą generowały indywidualne profile dekompresyjne podczas nurkowania - a niektóre będą uwzględniać zmiany siedmiu lub więcej mieszanek gazowych podczas nurkowania

Komputery nurkowe



Komputery nurkowe stały się nieodłącznym elementem wyposażenia dla większości nurków, tak że rzadko na łodzi safari można spotkać nurka bez jednego z nich.

Określenie „komputer nurkowy” jest jednym z kilku, które stosowane były przez społeczność nurkową przez ponad dekadę - oprócz takich jak decompression meter, decompression computer, deco-meter i wielu innych. Podczas przeprowadzonych w 1988 roku warsztatów Amerykańskiej Akademii Nauk Podwodnych (The American Academy of Underwater Sciences - AAUS) poświęconych komputerom nurkowym, zebrano co najmniej 22 nazwy i akronimy używane do opisu tego urządzenia. Jednak ostatecznie uczestnicy warsztatów zgodzili się na określenie „komputer nurkowy” - dive computer, które zostało powszechnie przyjęte.

W momencie pisania tego podręcznika, w Ameryce Północnej sprzedawano kilkanaście modeli komputerów nurkowych, a na świecie dostępnych było wiele innych modeli. Występowały one w niesłychanej różnorodności kształtów i rozmiarów, ale wszystkie były odmianami podstawowego urządzenia przedstawionego na Ilustracji 8.

Komputer nurkowy dysponuje dwoma „zmysłami” - głębokości i czasu, oraz posiada wyświetlacz (najczęściej ciekłokrystaliczny - LCD) na którym nurek może odczytywać informacje. Komputery nurkowe, tak jak wszystkie komputery, dokonują obliczeń i przeliczają liczby bardzo dokładnie i szybko, lecz nie mogłyby wiele zdziałać bez informacji na temat sposobu dokonywania obliczeń! Ta informacja dostarczana jest w formie modelu dekompresyjnego (w dalszym tekście - algorytmu) zaprogramowanego w komputerze.

Model dekompresyjny objaśnia komputerowi, co ma zrobić z danymi dostarczonymi z detektorów głębokości i czasu.

W nurkowaniu rekreacyjnym, podstawową rolę komputerów jest informowanie nurka, kiedy zbliża się - lub osiąga - limit bezdekompresyjny, tak żeby mógł on zmieścić się w tym limicie. Wszystkie komputery wyświetlają głębokość, pozostały czas bezdekompresyjny, i czas dotychczasowego nurkowania. Oprócz tych podstawowych informacji, komputery nurkowe podają szereg dodatkowych informacji - innych niemal w każdym z dostępnych komputerów nurkowych (bardziej szczegółowo omówionych w Rozdziale III).

Możliwe jest używanie komputerów do planowania nurkowania - przez przewijanie czasów bezdekompresyjnych na różnych głębokościach przed nurkowaniem lub w czasie przerwy powierzchniowej; jednak tylko niektóre komputery nurkowe umożliwiają planowanie nurkowań wielopoziomowych lub serii nurkowań powtórzeniowych. Zatem do takiego planowania ciągle będziesz musiał użyć tabel nurkowych (lub oprogramowania dekompresyjnego do laptopa/komputera stacjonarnego, zwłaszcza jeśli jesteś nurkiem technicznym).

Jeśli przekroczysz limit bezdekompresyjny, większość komputerów wyświetli głębokość pierwszego przystanku dekompresyjnego oraz czas wymaganej dekompresji. W komputerach przeznaczonych przede wszystkim dla nurków rekreacyjnych ta funkcja jest zwykle bardzo uproszczona - wystarczająca zaledwie do doprowadzenia cię na powierzchnię jeśli omyłkowo przekroczysz limity. Komputery nurkowe przeznaczone dla nurków technicznych dostarczają bardziej szczegółowe informacje dotyczące dekompresji.

Obecnie niemal wszystkie komputery nurkowe posiadają jakiś rodzaj wskaźnika tempa wynurzenia - wizualny, dźwiękowy, lub oba jednocześnie. Do informacji wyświetlanych opcjonalnie należy głębokość maksymalna oraz całkowity czas denny, co jest szczególnie przydatne wtedy, gdy jesteś oczekiwany na łodzi o konkretnej godzinie. Niektóre komputery mierzą ciśnienie w butli, i oprócz czasu pozostałego do osiągnięcia limitu bezdekompresyjnego podają, na ile czasu wystarczy ci powietrza.

Coraz większa liczba komputerów nurkowych może być używana z wzbogaconym powietrzem - nitroksenem, co wiąże się z podawaniem przez nie limitów dotyczących ciśnienia parcjalnego tlenu (PO₂). Zazwyczaj, PO₂ jest wyświetlane, tak żebyś mógł pozostać w przyjetnych granicach (np. 1,4 bara) i uniknąć poważnych problemów wynikających z toksyczności tlenu - co omówiono wcześniej. Wreszcie, większość nurków od czasu do czasu styka się z problemem latania po nurkowaniu, zdarza się też nurkowanie na wysokości - i komputery nurkowe także są tutaj pomocne. Wkrótce omówimy te zagadnienia bardziej szczegółowo. Przy wszystkich tych opcjach, charakterystykach i możliwościach należy pamiętać o jednej rzeczy podczas używania komputera. Podobnie jak tabele nurkowe, jego obliczenia opierają się o modele teoretyczne, którym możemy ufać tylko wtedy, gdy są przetestowane podczas rzeczywistych nurkowań. Komputery nurkowe mogą wykonywać obliczenia na podstawie modelu w sposób bardziej elastyczny niż zostało to zrobione w tabeli, ale sam model nie jest bardziej wiarygodny w formie elektronicznej niż w formie drukowanej.

Jak na razie, komputery nurkowe nie mierzą żadnych parametrów fizycznych w twoim ciele - one tylko mierzą głębokość, odczytują czas i przeliczają uzyskane dane. Chociaż mogą eliminować niepotrzebne zaokrąglanie i wydłużać czas nurkowania przez dokładne śledzenie twojego profilu, opierają się na dokładnie tych samych zasadach dotyczących nurkowania powtórzeniowego, wielopoziomowego i dekompresyjnego, co tabele nurkowe.

Limity bezdekompresyjne

Pewien kardiolog bierze udział w konferencji „Człowiek na morzu” w Seattle w stanie Waszyngton, w późnych latach 60. Zainteresowany jest ssakami morskimi, a nie człowiekiem czy chorobą dekompresyjną. Jednak zwyczajna rozmowa miała zupełnie zmienić bieg jego kariery, a nauce o dekompresji dać potężne narzędzie, którego tak potrzebowała.

Nazywa się dr Merrill Spencer, i prowadził badania nad użyciem dopplerowskiego ultradźwiękowego przepływomietru do opisu krążenia krwi w organizmie. Rozmowa z fizjologiem nurkowania schodzi na temat pęcherzyków, a Spencer wzmiankuje, że podczas kalibracji dopplerowskiego przepływomietru stwierdził, że pęcherzyki przepływające przez plastikowe rurki są łatwo wykrywalne. Implikacje tego co powiedział są ogromne: dopplerowski przepływomierz może wykrywać pęcherzyki w ludzkim układzie krwionośnym! To jest przełom o którym marzyli naukowcy zajmujący się medycyną hiperbaryczną.

W ciągu kilku miesięcy Spencer rozpoczął eksperymenty hiperbaryczne. Jego doświadczenia z przepływomierzem potwierdziły to, co przewidywano od lat: pęcherzyki mogą się tworzyć w ludzkim ciele w ilościach mniejszych niż te, które powodują chorobę dekompresyjną. Spencer określa te nie

powodujące objawów pęcherzyki jako „pęcherzyki nieme”, silent bubbles. W ciągu dziesięciu lat, nazwisko Spencer stanie się niemal synonimowe dla dopplerowskiego przepływomierza ultradźwiękowego, niemych pęcherzyków i badań nad dekompresją

Limitom bezdekompresyjnym dotyczącym nurków rekreacyjnych poświęcono trzy duże eksperymenty, przeprowadzone przez Spencera (1976), Thalmanna (1984) oraz Powella, Spencera i Rogersa (1987). Dr Merrill Spencer z Institute of Applied Physiology and Medicine badał detektorem Dopplera nurków nurkujących aż do limitów bezdekompresyjnych tabel US Navy, i poszukiwał u nich oznak choroby dekompresyjnej. Każdy z kolejnych testowanych przez niego profili skutkowało wystąpieniem dużej ilości niemych pęcherzyków, i przynajmniej jednym przypadkiem choroby dekompresyjnej.

18 metrów przez 60 minut

21 metrów przez 50 minut

8 metrów przez 720 minut

Jedynym zmierzonym przez niego przykładem czasu dennego przekraczającym limity tabel US Navy było 45,7 metra przez 10 minut. Badania Spencera wskazywały, że konserwatywne korzystanie z tabel nurkowych (już wtedy zalecane przez większość organizacji szkoleniowych) rzeczywiście było potrzebne. Spencer proponował skrócenie limitów bezdekompresyjnych dla nurków rekreacyjnych, chociaż w tym czasie jeszcze nie zweryfikowano niezależnie jego badań.

Komandor Edward Thalmann z Jednostki Nurkowania Eksperymentalnego US Navy przeprowadził w 1984 roku badania, które na pierwszy rzut oka przeczyły wnioskowi Spencera. Ponieważ testy Spencera przeprowadzone były na ograniczonej liczbie nurków, badania Thalmanna wprowadziły nieco zamieszania odnośnie stosownych limitów bezdekompresyjnych. Thalmann dążył do wydłużenia limitów bezdekompresyjnych US Navy, i wykonał pomiary podczas 107 nurkowań, bez wystąpienia żadnych przypadków DCS:

18 metrów przez 66 minut

30 metrów przez 30 minut

37 metrów przez 24 minuty

45 metrów przez 14 minut

Jednak dokładniejsza analiza raportu Thalmanna wydaje się wyjaśniać pozorne sprzeczności. Podczas jego eksperymentów, wykonywany był krótki przystanek dekompresyjny na głębokości 3 metrów - a czas spędzony na tych przystankach nie został zanotowany; można zatem uznać, że były to raczej nurkowania dekompresyjne. W każdym razie, problemem jest to, że ciężko precyzyjnie określić „właściwe” limity bezdekompresyjne.

Wyniki uzyskane przez Thalmanna wskazują, że jeśli występowanie klinicznych objawów DCS jest jedynym sposobem diagnozy (Thalmann nie stosował detektora Dopplera do oceny stanu nurków), to znacznie ważniejsze jest to, co nie działa, niż to, co może działać czasami. Dobrą analogią jest przejazd samochodem na czerwonym świetle z prędkością 160 km/h: czasem może się to udać, co jednak nie kwalifikuje takiego postępowania jako racjonalnego.

Omówione wcześniej testy prowadzone przez dr Michaela Powella były pierwszymi, które w sposób naukowy zweryfikowały wyniki uzyskane przez Spencera. Powell analizował profile o skróconych czasach bezdekompresyjnych, bardzo zbliżonych do tych zaproponowanych przez Spencera. Ograniczenia te odpowiadały w przybliżeniu zmniejszeniu o 3 metry głębokości z tabel US Navy, i wyniosły np. 20 minut na głębokości 30 metrów, 25 minut na głębokości 27 metrów, i tak dalej. Jak wspomniano wcześniej, w tych badaniach sporadycznie stwierdzano więcej niż tylko drobne ilości pęcherzyków.

Co model dekompresyjny stanowi w związku z „właściwymi” czasami bezdekompresyjnymi? Nic. Jak wspomniano wcześniej, żaden istniejący model ludzkiej fizjologii nie może przewidzieć limitów bezdekompresyjnych. Muszą być one ustalone eksperymentalnie, i tylko modele dekompresyjne skonstruowane w oparciu o tak uzyskane dane mogą być stosowane w rozmaitych sytuacjach nurkowych. Jedynie przewidywania, które podczas testów prowadzonych w kontrolowanych warunkach okazały się zapewniać akceptowalny, minimalny poziom ryzyka, mogą być stosowane do planowania rzeczywistych nurkowań, i dlatego musimy się odwoływać do bazy danych wyników testów Spencera i Powella.

Nurkowanie wielopoziomowe

Są lata 50., 60., 70. lub wczesne 80. i nurek - jakkolwiek nurek - ostrożnie opada na głębokość 30 metrów, na której limit bezdekompresyjny US Navy wynosi 25 minut. Po 10 minutach, wypytywa na

głębokość 18 metrów, później na 15 metrów, wreszcie na 12 metrów. Pozostałe 15 minut przemija błyskawicznie, i nurek z ociąganiem wynurza się, zmuszony do tego przez nieelastyczność limitu bezdekompresyjnego. Czuje się oszukany. Na głębokości 12 metrów jego organizm absorbuje azot powoli, lecz gdyby został na 30 metrach, dozwolony czas jego nurkowania byłby taki sam. Musi być jakaś możliwość brania pod uwagę czasu spędzonego na mniejszej głębokości i wydłużenia czasu całkowitego nurkowania!

Ta sytuacja powtarza się u setek nurków i podczas setek zanurzeń, nurkowanie za nurkowaniem, przez 35 lat. Nurkowie komercyjni opracowują metodę ekstrapolowania czasów z tabel US Navy, tak by brać pod uwagę wolniejszą absorpcję azotu na mniejszych głębokościach. Pierwsze nie-elektroniczne „deko-metry” usiłują odwzorować absorpcję azotu przez ciało, i biorą pod uwagę czas spędzony płyciej. Inni nurkowie wydłużają czasy „na oko”. Pomimo intuicyjnej świadomości że nurkowanie wielopoziomowe musi być możliwe, musi upłynąć prawie 35 lat, zanim przewidywania zostaną podparte badaniami, testami i analizą statystyczną

Jak napisano wcześniej, gdybyś odbywał tylko jedno nurkowanie bezdekompresyjne dziennie, i każdorazowo na tę samą głębokość, to nie potrzebowałbyś właściwie ani tabel nurkowych, ani komputera nurkowego. Jeśli odbywałbyś nurkowania powtórzeniowe, ograniczając czas twoich nurkowań do czasów zestawionych w tabeli nurkowej dla najgłębszego punktu twojego profilu, potrzebujesz wprawdzie tabel nurkowych, lecz wciąż mógłbyś się obyć bez komputera nurkowego. Komputer nurkowy oszczędza ci nieco roboty, ale jeśli nie przeszkadza ci ograniczanie czasu nurkowania do limitów bezdekompresyjnych wyliczonych dla jednej, maksymalnej głębokości, to praktycznie jedyną korzyścią wynikającą z posiadania komputera jest wyliczanie czasu bezdekompresyjnego w oparciu o twoją rzeczywistą głębokość, a nie o głębokość zaokrągloną w górę, do następnej wartości występującej w tabeli.

Jeśli jednak chcesz zaplanować i przeprowadzić rzeczywiste nurkowanie wielopoziomowe, komputer nurkowy jest praktycznie niezbędny. Wprawdzie możesz zaplanować nurkowanie wielopoziomowe z kołową wersją RDP - The Wheel, jednak komputer zapewnia znacznie większą elastyczność i wydłużenie czasu nurkowania. Wprowadzenie komputerów nurkowych zrewolucjonizowało nurkowanie, a najważniejszą częścią tej rewolucji było właśnie umożliwienie odbywania nurkowań wielopoziomowych.

Nurkowanie wielopoziomowe jest sposobem bezpiecznego wydłużania czasu dennego znacznie powyżej limitów bezdekompresyjnych dla największej głębokości. Na poziomie modelu, wygląda następująco: przypuśćmy, że pierwsze nurkowanie zamierzasz odbyć na głębokość 36,5 metra. W trybie planowania, twój komputer wyświetla, że bezdekompresyjny czas nurkowania na tej głębokości wynosi 10 minut. Rozpoczynasz nurkowanie, schodzisz na zaplanowaną głębokość, i po 10 minutach twój komputer sygnalizuje, że czas bezdekompresyjny dobiegł końca (w przykładzie dochodzimy do limitów, aby wyraźniej zademonstrować metodę, a nie dlatego że jest to dobry pomysł!). Pozostały czas bezdekompresyjny wynosi 0, i twój komputer sygnalizuje - przez migotanie cyfr na wyświetlaczu, pojawiające się strzałki, sygnały dźwiękowe itd. - że musisz rozpocząć wynurzenie, bo w przeciwnym wypadku będziesz musiał wykonać przystanek bezdekompresyjny.

Rozpoczynasz wynurzenie, lecz na głębokości około 24 metrów zachodzi ważna zmiana. Czas bezdekompresyjny nie wynosi już 0; zaczyna się wydłużać, a im płyciej się znajdujesz, tym więcej czasu ci pozostaje.

Nie usunąłś z organizmu azotu - w każdym razie, nie była to znacząca ilość. Wydłużenie czasu wynika ze funkcjonowania modelu. Wcześniej dowiedziałeś się, że 5-minutowy kompartament kontrolował czas denny na głębokości 36,5 metra. Jednak na głębokości 24 metrów 5-minutowy kompartament nie odgrywa już więcej roli - nie może osiągnąć dopuszczalnego nasycenia azotem. Na mniejszych głębokościach, to wolniejsze przedziały kontrolują czas denny.

W miarę wynurzenia, przedziały kontrolujące ulegają zamianie na coraz wolniejsze, ponieważ wynurzasz się ponad głębokości, na których kolejne kompartamenty szybsze mogą osiągnąć dopuszczalne nasycenie azotem. Ponieważ te wolniejsze przedziały nie osiągnęły jeszcze dopuszczalnych limitów, czas bezdekompresyjny ulega wydłużeniu. Jeśli będziesz kontynuować powolne wynurzenie przez cały czas nurkowania, twoje nurkowanie na głębokość 36,5 metra może w rzeczywistości trwać ponad 60 minut, i wreszcie zmuszony będziesz do wynurzenia z powodu wyczerpania powietrza, a nie z powodu wykorzystania całości czasu bezdekompresyjnego.

Brzmi to świetnie, ale czy jest bezpieczne? Raz jeszcze, wszystkie modele bezdekompresyjne wymagają weryfikacji. Gdy na początku lat 80. komputery nurkowe po raz pierwszy pojawiły się w użyciu, dr Carl Edmonds miał wątpliwości odnośnie nurkowania wielopoziomowego: "Nie było przeprowadzonych wystarczających testów, potwierdzających tę koncepcję". Wówczas miał właściwie rację. Karl Huggins

przeprowadził ograniczone (choć uwieńczone powodzeniem) testy w roku 1983, ale dopiero w 1987 testy Powella, dotyczące 3000 ekspozycji w różnych kombinacjach nurkowań wielopoziomowych i powtórzeniowych, doprowadziły do uzyskania wyników ostatecznie uwiarygadniających koncepcje nurkowań wielopoziomowych i powtórzeniowych. Od tego czasu, nurkowanie wielopoziomowe stało się podstawowym rodzajem nurkowania rekreacyjnego, i miliony nurków wielopoziomowych wykonywane są każdego roku - co nie skutkuje znaczącym wzrostem ilości przypadków choroby dekompresyjnej. Bez wątplenia, nurkowanie wielopoziomowe jest wiarygodną i sprawdzoną koncepcją.

Dawniej nurkowie próbowali stosować tabele US Navy do planowania nurkowań wielopoziomowych. Traktowano każdą głębokość jak nurkowanie, a późniejszy pobyt na mniejszej głębokości jako nurkowanie powtórzeniowe bez przerwy powierzchniowej. Problem z tym podejściem polegał na tym, że mogłoby prowadzić do odbywania nurkowań znacznie wykraczających poza przetestowane profile, a nawet powyżej poziomów dozwolonych przez model dekompresyjny. Wynika to z faktu, że „powtarzanie się” - repetting up, jak nazywane było to podejście, nie zawsze brało pod uwagę nasycenie azotem nowego przedziału kontrolującego.

Jedynym wyjątkiem jest The Wheel - kołowa wersja DSAT-owskiego Planera Nurkowań Rekreacyjnych, rozpowszechniana przez PADI. Podstawowym celem testowania profili wielopoziomowych przez Powella była weryfikacja kołowej wersji RDP, której forma doprowadziła do uproszczenia planowania nurkowań wielopoziomowych, jak również korzystania z innych funkcji Planera, w porównaniu z tabelami konwencjonalnymi. Jednak ani DSAT, ani PADI nie utrzymują, że The Wheel może stanowić substytut komputera nurkowego. Chociaż kołowa wersja RDP umożliwia planowanie nurkowań wielopoziomowych, nie może precyzyjnie śledzić twojego profilu tak jak komputer; nie jest też równie wygodna. Chociaż nurkowanie powinno przebiegać z większej głębokości do mniejszej, komputer nurkowy może prowadzić obliczenia przy powrocie na większą głębokość; The Wheel nie ma takiej możliwości.

Mimo to, możliwość planowania nurkowań wielopoziomowych przez The Wheel sprawia, że jest ono dogodne jako urządzenie zapasowe. W razie awarii komputera podczas kosztownego wyjazdu nurkowego, lepsze jest ograniczone i mniej dogodne nurkowanie wielopoziomowe niż żadne. Kołowa wersja RDP jest też świetnym narzędziem do planowania nurkowań z komputerem, ponieważ jest najłatwiejszym sposobem szacowania, ile czasu można pozostać na danej głębokości podczas odbywania nurkowania wielopoziomowego.

Istnieje wygodna zasada przybliżonego wyliczenia ekwiwalentnego czasu azotu (equivalent nitrogen time - ENT) na drugiej głębokości podczas dwupoziomowego, pojedynczego nurkowania. Po prostu, pomnóż czas na pierwszej głębokości przez tę głębokość, i następnie podziel przez drugą głębokość. Możesz stosować tę metodę do planowania nurkowania z komputerem jeśli nie masz The Wheel, lecz nie do stosowania innego typu tabeli do planowania nurkowań wielopoziomowych.

$$ENT2 = (D1 \times T1) \div D2$$

Na przykład, wyobraź sobie że chcesz spędzić 20 minut na głębokości 30 metrów, a następnie wynurzyć się do głębokości 15 metrów. ENT dla tego przykładu wyniesie 40 minut: $(20 \times 30) \div 15 = 40$. Następnie odejmij wyliczony ENT od limitu bezdekompresyjnego dla drugiej głębokości. Limit bezdekompresyjny dla głębokości 15 metrów wynosi 80 minut. $80 - 40 = 40$, zatem możemy liczyć na dodatkowe 40 minut czasu bezdekompresyjnego na drugiej głębokości.

Jeśli ty i twój partner korzystacie z różnych typów komputerów, możecie zauważyć, że podczas wynurzania komputery podają wam różne czasy bezdekompresyjne na różnych głębokościach. Nie licząc drobnych różnic w głębokościach na jakich byliście, różne dopuszczalne czasy bezdekompresyjne zależą od ustawień modelu samego komputera. Komputer, który podaje krótsze czasy bezdekompresyjne podczas planowania, będzie też podawał krótsze czasy podczas samego nurkowania - przy założeniu, że pozostałe parametry są takie same.

Nurkowanie powtórzeniowe

Jedną z różnic między nurkami rekreacyjnymi a wojskowymi (oprócz, oczywiście, celu samego nurkowania!) jest to, że nurkowie rekreacyjni często wykonują nurkowania powtórzeniowe, podczas gdy nurkowanie militarne często wymaga odbywania dekompresji, ale rzadziej - konieczności wykonywania więcej niż jednego zanurzenia dziennie. Nurkowanie techniczne często wymaga odbywania dekompresji, a nieraz są to dekompresyjne nurkowania powtórzeniowe - jest to ważne zagadnienie, którym zajmiemy się wkrótce.

Jest maj 1942 roku, i pancernik HMS Queen Mary pozostaje na powierzchni tylko dzięki czujności

strażników portowych. Okręt był jednym z wielu celów włoskich płetwonurków wojskowych, dosiadających „torped” - zasilanych przez akumulatory pojazdów podwodnych, z odłączanymi głowicami wybuchowymi, które miały być mocowane do burt statków. Tym razem Royal Navy powstrzymuje włoskich sabotażystów, lecz inne okręty mają mniej szczęścia. Oficerowie sztabu Royal Navy są wściekli - jednak reagują poprawnie: „Jeśli mogą Włosi, możemy i my!” Powstają plany utworzenia jednostek Royal Navy zajmujących się podwodnym sabotażem. Są jednak problemy. Nurkowie muszą być samodzielni, a chociaż w tym czasie we Francji J. Y. Cousteau eksperymentuje nad automatami o obiegu otwartym, to nie istnieją one w Wielkiej Brytanii w okresie Drugiej Wojny Światowej. Co więcej, nurkowie muszą być w stanie nurkować i wynurzać się wielokrotnie w ciągu dnia. Po raz pierwszy, nurkowania powtórzeniowe są operacyjną koniecznością. Royal Navy potrzebuje pomocy, i zwraca się do osoby o zasłużonym nazwisku - profesora J.R.S. Haldane’a, syna Johna Scotta Haldane’a.

Brak jest czasu na wynalezienie sprzętu do oddychania powietrzem lub nowych tabel, dlatego Royal Navy adaptuje systemy służące do ucieczek z łodzi podwodnych. Nurkowie będą oddychać czystym tlenem. Profesor Haldane, prowadzący wcześniej badania nad wydostawaniem się z łodzi podwodnych, dostrzega, że jest to zarówno przekleństwo, jak i błogostawieństwo. Oddychanie czystym tlenem eliminuje ryzyko choroby dekompresyjnej - nie ma azotu, nie ma „krzywików”. Jednak z drugiej strony, czysty tlen może być toksyczny pod wodą na głębokościach tak niedużych jak 6 metrów, jednak musi być stosowany na głębokościach dochodzących do 18 metrów. Jest to znacznie bardziej niebezpieczne niż nurkowanie na powietrzu - ale trwa wojna...

Eksperymenty Haldane’a prowadzą do opisanie operacyjnych ograniczeń wynikających ze stosowania tlenu, i Royal Navy wysyła płetwonurków wojskowych przeciwko flocie państw Osi. Jednak chociaż sprostano wymaganiom na okres wojny, to problem z nurkowaniem powtórzeniowymi na powietrzu nie został rozwiązany, lecz ominięty. Techniki nurkowań powtórzeniowych zostaną zbadane i wprowadzone dopiero dziesięć lat później przez US Navy

Oczywiście, nurkowanie powtórzeniowe jest ważną częścią nurkowania rekreacyjnego, a wobec rosnącej popularności wielodniowych rejsów safari częste są wielokrotne nurkowania powtórzeniowe. Nie jest też niczym wyjątkowym odbywanie trzech, czterech, a nawet sześciu czy siedmiu nurkowań z rzędu. Dlatego istotne jest określenie granicy pomiędzy bezpieczeństwem i ryzykiem, oraz między zweryfikowanymi i niesprawdzonymi praktykami nurkowymi. Jak zawsze, liczy się to, co sprawdza się w praktyce - podczas rzeczywistych nurkowań.

Zacznijmy od dwóch płytkich nurkowań zbadanych przez Powella, które mogłyby reprezentować typowe popołudniowe nurkowanie z łodzi czarterowej, popularne w większości tropikalnych destynacji i w wielu rejonach umiarkowanych.

16,8 metra przez 65 minut
57 minut przerwy powierzchniowej
16,8 metra przez 43 minuty
Całkowity czas denny - 108 minut

Używając Planera Nurkowań Rekreacyjnych - Tabeli bądź eRDP, potraktowałbyś te nurkowania jako odbywające się na głębokość 18 metrów, z czasem bezdekompresyjnym wynoszącym 55 i grupą ciśnieniową po wynurzeniu W. Po przerwie powierzchniowej trwającej 57 minut, nastąpi przejście do grupy ciśnieniowej I, i twój limit bezdekompresyjny byłby ograniczony do 30 minut, tak że całkowity czas denny wyniósłby 85 minut. Jest to przykład, jak komputer nurkowy - lub wersja kołowa RDP, The Wheel - demonstruje swoją przydatność poprzez dodanie nawet 23 minut do czasu dennego przez uniknięcie niepotrzebnych zaokrążeń.

Te dane demonstrują, że modele Haldane’owskie są zbieżne z wynikami badań przeprowadzanych na żywych nurkach podczas nurkowań płytkich, nie przekraczających 18 metrów.

Powell testował także profile powtórzeniowe, reprezentujące głębsze nurkowania rekreacyjne, częste w wielu tropikalnych rejonach świata:

40 metrów przez 12 minut
43 minuty przerwy powierzchniowej
27 metrów przez 16 minut
Całkowity czas denny - 28 minut

Zgodnie z RDP - Tabelą, pierwsze nurkowanie byłoby ograniczone do 10 minut, a po 43-minutowej przerwie powierzchniowej grupa ciśnieniowa wyniosłaby C. Pozwoliłoby to na spędzenie pełnych 16 minut na

głębokości 27 metrów, tak że całkowity czas denny byłby tylko o dwie minuty krótszy od testowanego przez Powella.

Te dane ukazują, że modele Haldane’owskie są zbieżne z wynikami badań przeprowadzanych na żywych nurkach podczas głębokich nurkowań (od 18 do 40 m).

Patrząc na te dane, zauważasz, że czasy są równe lub nieznacznie przekraczają limity modelu. Jest to odchylenie od normalnych zaleceń (nie zbliżania się do limitów), jednak te nurkowania testowe przeprowadzane były w kontrolowanych warunkach, z możliwą natychmiastową rekompresją. Celem takich nurkowań testowych jest zbadanie modelu, więc idealne nurkowania odbywają się aż do samych limitów. Również profile tych nurkowań są „kwadratowe”, czyli badane osoby spędzają cały czas na maksymalnej głębokości. Jest to odejście od profili typowych nurkowań rekreacyjnych, gdzie na maksymalnej głębokości spędza się zaledwie część czasu.

Inny harmonogram nurkowań powtórzeniowych, przetestowany przez Royal Navy, okazał się całkowicie nieskuteczny:

45 metrów przez 5 minut
60 minuty przerwy powierzchniowej
45 metrów przez 5 minut
60 minuty przerwy powierzchniowej
45 metrów przez 5 minut

Royal Navy przeprowadzała te nurkowania w ciepłej wodzie na otwartym oceanie. U jednego z nurków już po drugim nurkowaniu wystąpiły objawy poważnej, wymagającej rekompresji choroby dekompresyjnej. Po trzecim nurkowaniu, wielu nurków narzekało na bóle odpowiadające Typowi I DCS.

Oczywiście, te nurkowania wykraczają poza zalecane limity rekreacyjne wynoszące 40 metrów - która była największą głębokością zbadaną przez Powella. Dodatkowo, podczas tych nurkowań nie były wykonywane przystanki bezpieczeństwa, których RDP wymaga na głębokości 5 m przez 3 minuty.

Chociaż wprowadzenie przystanków bezpieczeństwa mogłoby spowodować różnicę w tym badaniu, te nurkowania są przykładem tego, co nie okazało się skuteczne. Odbywanie głębokich, powtórzeniowych nurkowań bezdekompresyjnych z krótkimi przerwami powierzchniowymi okazało się być bardzo ryzykowne, i powinno być unikane, nawet jeśli niektóre komputery (zwłaszcza starsze modele) na nie pozwalają. Jest to wyraźna wskazówka, że modele Haldane’owskie, choć wiarygodne i użyteczne w przetestowanych granicach, mimo wszystko nie są modelami doskonałymi. Możemy im ufać tylko jeśli sprawdzają się podczas rzeczywistych nurkowań. Zaś komputery, jako urządzenia matematyczne, pokazują nam tylko wyliczenia danego modelu w danych sytuacjach.

Do pewnego stopnia, komputery nurkowe mogą zapewniać bezpieczeństwo nawet jeśli ktoś wykracza poza sprawdzone granice - lecz nie oznacza to, że takie nurkowania są akceptowalne. Raczej uważa się, że w podobnych sytuacjach model niedoskonały jest lepszy od braku jakiegokolwiek modelu. Chociaż dzisiejsze komputery używają coraz bardziej wyrafinowanych metod obliczeniowych, tak by umożliwić nam pozostawanie w akceptowalnych, sprawdzonych granicach, wyłącznie naszą odpowiedzialnością jest stosowanie komputerów w naszych głowach podczas użytkowania komputerów na naszych nadgarstkach.

Wzbogacone powietrze - nitroks

Wyobraź sobie, że nurkowanie rekreacyjne byłoby możliwe już w XVII wieku. Rozmowa dwóch nurków rekreacyjnych planujących nurkowanie na nitroksie i używających stosowanych wówczas określeń naukowych, mogłaby wyglądać tak:

Jacob: Na jakiej mieszance będziesz dziś nurkować?

Charles: Wziąłem 40% ogniste powietrze i resztę zepsutego powietrza. Wiesz, nasyconego flogistonem.

Jacob: Czy to nie to samo co 40% deflogistonowane powietrze?

Charles: Oczywiście, tylko że ja nie potrafię tego wymówić.

Gdyby dyskusja ta odbyła się 100 lat później, wiedzieliby już, że flogiston nie istnieje, ogniste powietrze i powietrze deflogistonowane to tlen, zaś powietrze zepsute lub flogistonowane to azot.

Wzbogacone powietrze, czyli nitroks (zapisywany też jako EANx) stał się popularny wśród nurków rekreacyjnych. Wzrost popularności rebreaterów o obiegu zamkniętym i półzamkniętym sprawił, że nitroks zaczął być używany jeszcze częściej. Zmiany zawartości azotu wprowadzają nową zmienną do modeli dekompresyjnych.

Jeśli zignorujesz gazy śladowe (co można zrobić do celów modelowania dekompresji), powietrze składa się w 21% z tlenu i w 79% z azotu. Z punktu widzenia modeli Haldane’owskich, tylko azot ma znaczenie. Badania wykazały, że rozpuszczony tlen - w granicach ekspozycji, o których dowiedziałeś się wcześniej -

nie przyczynia się do występowania DCS, gdyż twoje ciało metabolizuje go albo w inny sposób zużywa. Oznacza to, że jeśli do powietrza dodamy tlen i tym samym obniżymy zawartość azotu, to zgodnie z modelami Haldane’owskimi powinniśmy mieć wydłużone czasy bezdekompresyjne na danej głębokości w porównaniu z takim samym nurkowaniem na powietrzu. Im więcej tlenu i mniej azotu, tym więcej masz czasu na danej głębokości - chociaż teraz musisz wziąć pod uwagę ekspozycję tlenową, tak jak dowiedziałeś się wcześniej.

Aby używać modeli Haldane’owskich skonstruowanych do nurkowania na powietrzu z nitrokiem, musisz wprowadzić poprawkę na PN2. Aby to zrobić, po prostu stosujesz Prawo Daltona dotyczące ciśnień parcjalnych (więcej w Części IV) i odszukujesz głębokość, na której powietrze ma takie samo ciśnienie parcjalne N₂ jak wzbogacone powietrze którego używasz na rzeczywistej głębokości. Ponieważ EANx zawiera mniej niż 79% azotu, ta równoważna głębokość powietrzna (Equivalent Air Depth - EAD) jest mniejsza niż głębokość rzeczywista.

Matematycznie, możesz łatwo wyliczyć EAD stosując formułę opartą na Prawie Daltona:

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

We wzorze tym, EAD to równoważna głębokość powietrzna, FO₂ - zawartość procentowa tlenu w postaci ułamka dziesiętnego (np. 36% to 0,36), zaś D - rzeczywista głębokość.

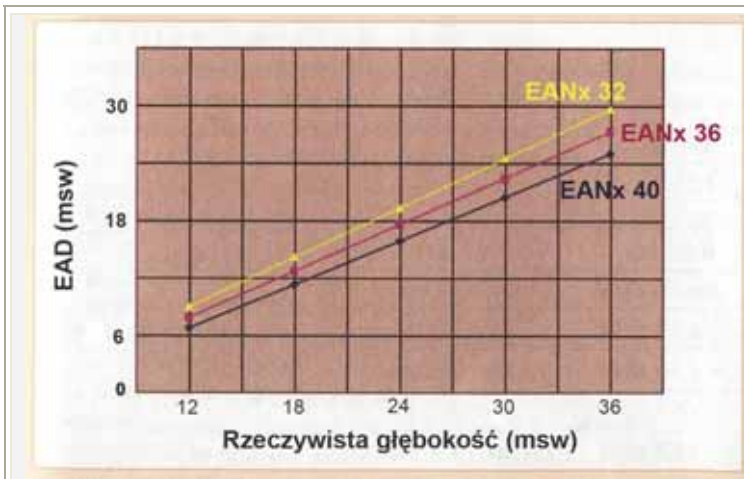
Jak widać na ilustracji 9, dla wartości FO₂ = 0,36 (EANx36, czyli mieszanka zawierająca 36% tlenu, 64% azotu), EAD dla głębokości 28 metrów wynosi ok. 20 metrów, i w związku z tym czas bezdekompresyjny na tej głębokości wydłuża się z 25 minut do 40 minut, co jest znaczącą zmianą. Jednak, jak pamiętasz, w grę wchodzi też inne względy bezpieczeństwa. Nurkując na nitroksie 36, osiągasz PO₂ równe 1,4 bara na głębokości 28 metrów; ze względu na ryzyko toksyczności tlenowej (opisane wcześniej) jest to maksymalna głębokość na jaką możesz zejść na tej mieszance.

Naukowiec aż do końca...

Antoine Lavoisier przyczynił się do obalenia teorii flogistonowej dzięki odkryciu tlenu i (to może rzecz o szerszym znaczeniu) prawa zachowania masy. Te kamienie milowe w rozwoju nauki wpływają na nas każdego dnia.

Niestety, Antoine był nie tylko naukowcem, ale także poborcą podatków. Osoby wykonujące ten zawód nigdy nie były popularne i doceniane, jednak we Francji schyłku XVIII wieku było to szczególnie wyraźne. W 1794 roku Lavoisier został stracony na gilotynie, i tuż po tym przeprowadził swój ostatni eksperyment. Kazał swojemu asystentowi patrzeć na swoje oczy: po oddzieleniu głowy od tułowia Lavoisier zamierzał mrugać tak długo jak to możliwe, tak by udowodnić, że śmierć na gilotynie nie jest natychmiastowa. Asystent doliczył się trzynastu mrugnięć zanim naukowiec zamknął oczy po raz ostatni

Do tego wydłużenia czasu bezdekompresyjnego podczas nurkowania na EANx nie wliczają się korzyści wynikające z nurkowania wielopoziomowego bądź powtórzeniowego. Używając nitroksu i komputera nitroksowego, zazwyczaj będziesz kończyć nurkowanie z powodu zużycia powietrza w butli, nie zaś z powodu zbliżania się do limitów bezdekompresyjnych. Także wykonując serię nurkowań zorientujesz się, że czasy nurkowań powtórzeniowych są znacznie dłuższe, ponieważ gromadzisz w tkankach mniej azotu. Korzyści ze stosowania nitroksu są jasne. Dochodzimy jednak do podstawowego problemu podczas omawiania modeli dekompresyjnych: możemy ufać modelowi tylko jeśli jego wiarygodność została potwierdzona podczas nurkowań testowych. Stosowanie EAD do powietrznych modeli dekompresyjnych wygląda świetnie na papierze lub w komputerze, ale czy sprawdziło się podczas rzeczywistych nurkowań?



Ilustracja 9. Ekwiwalentne głębokości powietrzne dla trzech mieszanek nitroksowych. Pamiętaj, że ze względu na ryzyko toksyczności tlenowej maksymalne PO₂ wynosi 1,4 bara, zatem największa głębokość, na jakiej może być używany EANx40 to 25 metrów, EANx36 - 28 metrów, a EANx32 - 33 metry (przyp. tłum.)

Odpowiedź brzmi „tak, bez żadnych wątpliwości”. J.B.S. Haldane zademonstrował koncepcję zastosowania wartości EAD (procedurę, a nie nazwę) w latach 40., a nitroks był używany przez nurków naukowych na długo przed tym, nim stał się popularny wśród nurków rekreacyjnych. Dostłownie miliony nurkowań zostały odbyte na nitroksie, zarówno pojedynczych, wielokrotnych, jak i wielopoziomowych (również dekompresyjnych - ale o tym wkrótce), i panuje zgoda co do tego, że modele Haldane’owskie można stosować równie bezpiecznie podczas nurkowań na nitroksie, jak podczas nurkowania na zwykłym powietrzu.

Nurkowanie wielodniowe (np na safari nurkowym)

Powietrze z sykiem napływa do komory hiperbarycznej. Czwórka ochotników wyrównuje ciśnienie w uszach, i stara się uniknąć przegrzania, podczas gdy temperatura wzrasta wraz z ciśnieniem - w ciągu kilku sekund z początkowych 15°C do 32°C. Wskaźnik głębokości zatrzymuje się na 27 metrach. Jest to pierwsze nurkowanie pierwszego dnia uciążliwej, wielodniowej serii nurkowań powtórzeniowych. Przez następne sześć dni, ci ochotnicy będą wykonywać po cztery nurkowania dziennie, praktycznie spędzając cały tydzień w 5,5-metrowej, zatłoczonej puszcze.

Eksperymenty prowadzi dr Michael Powell, który niecałe dwa lata wcześniej testował model stworzony przez DSAT. Teraz, pod koniec roku 1988, często dyskutowany jest problem, czy pod koniec wielodniowej serii nurkowań powtórzeniowych profile uważane za bezpieczne staną się bardziej ryzykowne. DSAT, PADI, DAN i Powell zamierzają to rozstrzygnąć.

W 1989 roku zakończono eksperymenty. Wyniki doświadczeń były jasne: z wykonywaniem czterech nurkowań dziennie przez sześć kolejnych dni nie wiąże się żadne istotne ryzyko. Podobnie, praktyka nurkowa nie wykazała zwiększonej częstości DCS w takich warunkach. Jednak nawet dzisiaj problem nurkowania wielodniowego nie jest dokładnie zbadany naukowo - choć DAN i inne organizacje nieustannie gromadzą dane na ten temat. Podczas nurkowania wielodniowego zaleca się zatem ostrożność - nie dlatego, że istnieje zagrożenie, lecz dlatego, że zbyt mało wiemy

Żadna tabela nurkowa nie bierze pod uwagę nurkowań odbytych poprzedniego dnia, a zwłaszcza podczas wielu kolejnych dni. 12 godzin od zakończenia nurkowania, tabele klasyfikują cię jako „czystego” i na żadnej głębokości nie skracają twoich limitów bezdekompresyjnych. Do lat 80., żaden z powszechnie stosowanych modeli Haldane’owskich nie uwzględniał kompartmentów o półokresach wystarczająco długich, by wpłynąć na profil nurkowania po upływie 12 godzin.

Wątpliwości dotyczące wiarygodności modeli dekompresyjnych podczas nurkowania wielodniowego po raz pierwszy pojawiły się w latach 80. Zadawano pytanie, czy azot może się akumulować podczas wielu następujących po sobie nurkowań przeprowadzonych w ciągu kilku dni. Istnieją dowody, że może - i wiele z obecnie stosowanych komputerów posiada kompartmenty o półokresach dłuższych niż 480 minut, a w związku z tym pamięć wykraczającą poza okres 12 godzin.

Czy przynosi to jakiegokolwiek mierzalne korzyści nurkom rekreacyjnym? Jako że komputer nurkowy może mieć niemal nieograniczoną pamięć, spójrzmy, co taki komputer może oferować.

Aby zbadać tą teorię, użyjemy HALa, najdoskonalszego komputera nurkowego (nazwanego oczywiście od Haldane'a). Niestety, HAL istnieje tylko w komputerach osobistych, za to posiada 1530 kompartmentów o półokresach od 6 sekund do 24 godzin. Wartości dopuszczalnego nasycenia azotem zostały zaczerpnięte z formuły Spencera opartej o dane empiryczne, w związku z czym HAL przewiduje limity bezdekompresyjne zgodne z danymi testowymi oraz wartościami Planera Nurków Rekreacyjnych (RDP). Bez wchodzenia w nużące szczegóły dotyczące obliczeń, spojrzmy jak HAL wyliczy twoje limity bezdekompresyjne podczas kolejnych dni nurkowania bezdekompresyjnego.

Po pierwsze, musimy określić, jaki harmonogram nurkowania wielodniowego spowoduje maksymalne nasycenia azotem, a w związku z tym wywrze największy wpływ na twoje nurkowania kolejnego dnia. Chociaż w sensie praktycznym niełatwo ułożyć taki harmonogram, jest łatwe w sensie matematycznym - możemy przyjąć taki hipotetyczny harmonogram nurkowania, który spowoduje osiągnięcie dopuszczalnych wartości nasycenia azotem we wszystkich tkankach teoretycznych po zakończeniu dnia nurkowego (lub jednego z kolejnych dni). Chociaż jest mało prawdopodobne, by taki harmonogram istniał w rzeczywistości, żadna kombinacja nurków wielodniowych nie może spowodować niczego więcej - zakładając, że pozostaniemy w granicach limitów bezdekompresyjnych wyznaczanych przez model.

Założmy, że ten najgorszy z możliwych (z punktu widzenia skrócenia czasów bezdekompresyjnych) scenariusz doprowadził do maksymalnego nasycenia azotem wszystkich kompartmentów HALa pewnego dnia o godzinie 19:00. Rankiem następnego dnia - o godzinie 7:00, po upływie 12 godzin - korzystając z ogromnej pamięci i mocy obliczeniowej HALa, przeglądamy czasy bezdekompresyjne na różnych głębokościach. Przewidywania HALa będą następujące (kolumna „Kolejny dzień” w tabeli poniżej) - zestawiono je razem z przewidywaniami limitów bezdekompresyjnych pierwszego „czystego” dnia („Pierwszy dzień”), czyli z wartościami nasycenia azotem przedziałów wynoszącymi 0.

Głębokość (m)	Limity bezdekompresyjne	
	Kolejny dzień	Pierwszy dzień
3	14:07 h	30:55 h
6	4:23 h	7:58 h
9	2:36 h	3:36 h
12	1:51 h	2:03 h
15	1:19 h	1:19 h
18	0:55 h	0:55 h

Model dekompresyjny HALa zachowuje informację o poprzednich nurkowaniach nawet do sześciu dni. Jednak zgodnie z przedstawionymi powyżej obliczeniami, nawet w najgorszej sytuacji - przy założeniu maksymalnego nasycenia azotem wszystkich kompartmentów przed rozpoczęciem 12-godzinnej przerwy powierzchniowej - po przerwie brak jakichkolwiek różnic dla głębokości większych niż 12 metrów. Przyczyną tej pozornej niezgodności jest to, że choć niektóre kompartmenty mają długą „pamięć”, to także reagują bardzo powoli. Na przykład, gdybyś polegał wyłącznie na kompartmentcie 480-minutowym, to na głębokości 36 metrów twój czas bezdekompresyjny wyniósłby 79 minut (oczywiście, z tego właśnie powodu model ma wiele tkanek teoretycznych).

Na mniejszych głębokościach, HAL znacznie skraca czas bezdekompresyjny. Jednak te czasy i tak znacznie wykraczają poza limity jakiegokolwiek praktycznego nurkowania bezdekompresyjnego, rekreacyjnego lub nie. Podczas nurkowania wielopoziomowego, twój komputer może pokazywać skrócony czas bezdekompresyjny podczas płytszej części nurkowania, jednak wciąż pozostanie go na tyle dużo, że będziesz ograniczony przez ilość gazu, a nie przez model dekompresyjny. Najwolniejsze kompartmenty mogą w większym stopniu wpływać na czasy nurków dekompresyjnych nurków technicznych lub komercyjnych, jednak ponieważ ich tempo nasycania azotem jest tak małe, nie wpływają znacząco także na rzeczywiste nurkowania dekompresyjne.

Jeżeli przyszłe badania wykażą, że nurkowanie wielodniowe wiąże się z mierzalnym wzrostem ryzyka, będzie to wymagało wprowadzenia odpowiednich zmian do modeli dekompresyjnych. Wynika to z tego, że żaden komputer nie jest w stanie dokładnie przewidzieć rzeczywistych ograniczeń wynikających z nurkowania wielodniowego, bez względu na jego moc obliczeniową lub ilość przedziałów w stosowanym modelu.

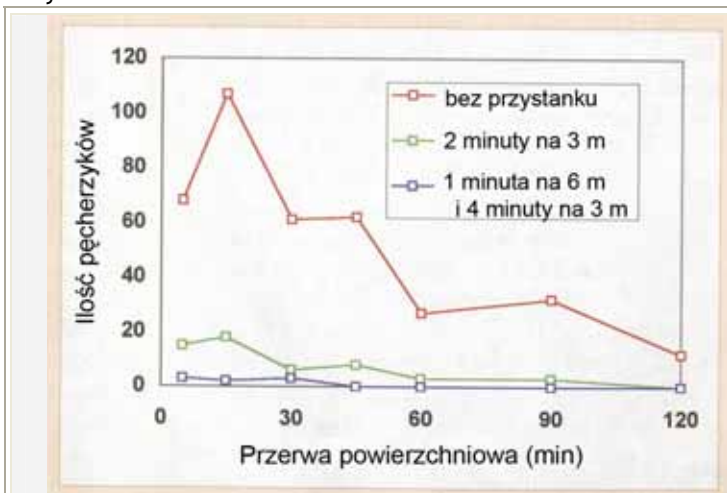
Testy prowadzone przez Powella wykazały, że nurkowanie wielodniowe jest akceptowalnym stopniu bezpieczne - i co roku korzystają z tego tysiące nurków na całym świecie. Jednak powinniśmy brać pod uwagę, że modele Haldane'owskie nie zawsze dokładnie przewidują skutki profili dekompresyjnych, i dlatego nurkować konserwatywnie. Podczas nurkowania unikaj zbliżania się do limitów bezdekompresyjnych, a po wielu dniach intensywnego nurkowania wykonaj jednodniową przerwę.

Procedury wynurzania

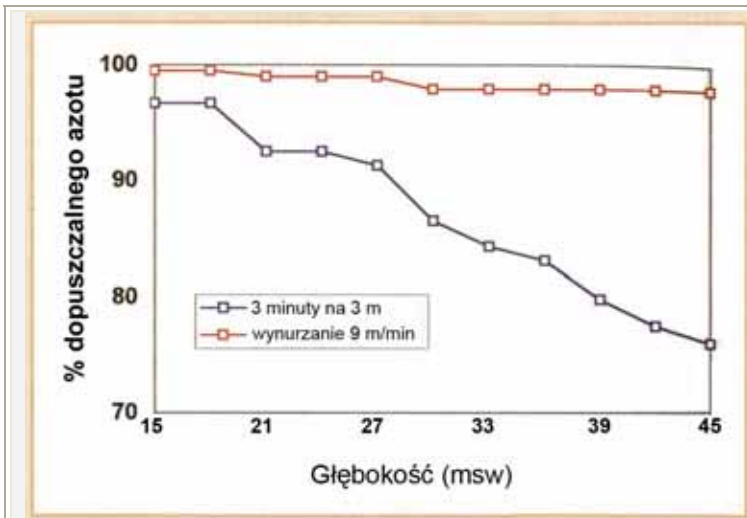
W połowie lat 50. w Jednostce Nurkowania Eksperymentalnego w Waszyngtonie toczy się zażarta dyskusja. Trwa spotkanie nurków US Navy z naukowcami konstruującymi tabele US Navy, pod przewodnictwem Maino des Granges'a, a głównym tematem sporu jest tempo wynurzania, które będzie zastosowane w nowych tabelach. Komandor Doug Fane, reprezentujący podwodną jednostkę dywersyjną US Navy, jest zdecydowany: prędkość wynurzania 7,6 metra na minutę, użyta podczas konstrukcji wcześniejszych tabel, jest zdecydowanie zbyt wolna dla jego nurków. Upiera się, że nowa prędkość wynurzania powinna wynosić przynajmniej 30 metrów na minutę. Sprzeciwia się temu ekipa nurków klasycznych: osiągnięcie takiego tempa wynurzania byłoby absolutnie niemożliwe dla wyciągarki wydobywającej na powierzchnię obciążonego nurka w ciężkim skafandrze i hełmie. Ostatecznie, strony idą na kompromis, i ustalają pośrednie tempo wynurzania, które odtąd wynosić będzie 18 metrów na minutę. Dla tej wartości przeprowadzono wszystkie obliczenia i testy. Ta wartość zostanie też „odziedziczona” przez nurków rekreacyjnych, którzy będą się do niej stosować przez trzy dekady

W rozdziale tym omówione są dwa potencjalnie groźne stany bezpośrednio związane z wynurzaniem - embolię gazową i chorobę dekompresyjną. Oba wynikają z obecności pęcherzyków gazu w organizmie, ale pęcherzyki te mogą mieć różne pochodzenie. Embolia gazowa (AGE) powstaje na skutek urazu ciśnieniowego płuc, zaś do choroby dekompresyjnej (DCS) dochodzi wtedy, gdy gaz obojętny wydziela się z roztworu i formuje pęcherzyki w tkankach i w naczyniach krwionośnych.

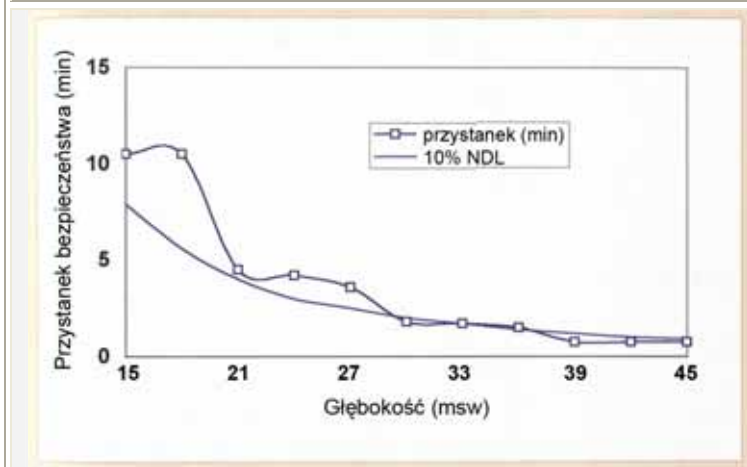
Na procedurę wynurzania składają się trzy odrębne zagadnienia. Pierwszym jest rozpoczęcie wynurzania, które dla nurka rekreacyjnego zaczyna się najpóźniej w momencie osiągnięcia limitu bezdekompresyjnego. Drugim - przystanek bezpieczeństwa, wykonywany na niewielkiej głębokości przez określony czas. Trzecie zagadnienie to tempo wynurzania. Zatem rozważając zapobieganie AGE i DCS, powinniśmy skupić się na skróceniu czasów bezdekompresyjnych, na przystankach bezpieczeństwa, oraz na zmniejszeniu tempa wynurzania.



Ilustracja 10. Wyniki eksperymentów Andrew Pilmanisa dotyczących przystanków bezpieczeństwa. Stosowanie przystanków znacznie zmniejsza ilość pęcherzyków wykrywalnych detektorem Dopplera



Ilustracja 11. Zmniejszenie nasycenia azotem po odbyciu przystanku bezpieczeństwa w porównaniu ze zmniejszeniem prędkości wynurzenia do 9 metrów na minutę



Ilustracja 12. Związek pomiędzy głębokością a długością przystanku bezpieczeństwa wymaganej do zmniejszenia nasycenia azotu kompartymentu kontrolującego do 90% wartości dopuszczalnej

Czy skrócone czasy bezdekompresyjne są istotnym elementem procedury wynurzenia? Eksperymenty Spencera i Powella zasługują na uznanie przez społeczność nurkową, i takie stanowisko zajęły praktycznie wszystkie organizacje szkoleniowe i większość producentów komputerów nurkowych. Nie ma danych wskazujących na istotne korzyści, które możnaby uzyskać poprzez dalsze skracanie limitów bezdekompresyjnych.

Natomiast przystanki bezpieczeństwa są zupełnie inną sprawą. Przystanek bezpieczeństwa to przystanek dekompresyjny, który nie jest wymagany ani przez tabelę, ani przez komputer nurkowy, gdyż wykonujący go nurek mieści się w granicach limitów bezdekompresyjnych modelu. Powinienes włączać przystanki bezpieczeństwa w procedurę wynurzenia jako dodatkowe zabezpieczenie.

W 1975 roku, Andy Pilmanis wykazał korzyści wynikające ze stosowania przystanków bezpieczeństwa w trakcie testów prowadzonych w USC Hyperbaric Chamber na wyspie Catalina, u wybrzeży Kalifornii. Chociaż jego testy z użyciem detektora Dopplera były prowadzone na ograniczonej liczbie ochotników, wyniki były jednoznaczne - jak widać na ilustracji 10. Po nurkowaniu na głębokość 30 metrów przez 25 minut (do limitów bezdekompresyjnych tabel US Navy), wykonanie trwającego zaledwie 2 minuty przystanku na głębokości 3 metrów spowodowało pięciokrotne zmniejszenie ilości wykrywalnych pęcherzyków, zaś wykonanie 5-minutowego przystanku sprawiło, że stały się one niemal niewykrywalne. Te ograniczone dane były pierwszymi wskazującymi na korzyści wynikające ze stosowania przystanków bezpieczeństwa jako standardowej procedury podczas wynurzenia. W 1995, Uguccioni z zespołem opublikowali wyniki eksperymentu, mającego na celu ocenę wpływu przystanku bezpieczeństwa na ilość wykrywalnych pęcherzyków po przeprowadzonych na wodach otwartych trwających 28 minut nurkowaniach nitroksowych na głębokość 30 metrów. Pięćdziesięciu nurków wykonało po dwa nurkowania, podczas jednego zatrzymując się na 3 minuty na głębokości 6 metrów, a podczas drugiego wynurzając się bezpośrednio na powierzchnię. Bez przystanku bezpieczeństwa, u 42 z nich (84%) wykryto pęcherzyki, natomiast po odbyciu

przystanku pęcherzyki wykryto u 18%. Te dane potwierdzają znaczenie stosowania przystanków jako standardowej procedury podczas wynurzania.

Często divemasterzy nalegają, by nurkowie powracali na łódź z co najmniej 35 barami powietrza w butlach. Jest to dobrą praktyką, mającą na celu zapobieżenie wypadkom powodowanym przez nagłe wyczerpanie zapasu powietrza. Jednak w wielu sytuacjach wydawałoby się, że zasada ta powinna zostać zamieniona na „nigdy nie wynurzaj się do przystanku bezpieczeństwa z mniej niż 35 barami, lecz nie powracaj na łódź z więcej niż 7 barami” - lub coś w tym rodzaju. Nie oznacza to oczywiście, że powinieneś ignorować pozostawianie odpowiedniej rezerwy powietrza w butli na wynurzenie w złych warunkach lub w prądzie, ale że powinieneś planować pozostawienie zapasu powietrza na wykonanie przystanku bezpieczeństwa podczas planowania nurkowania. Posiadanie odpowiedniej rezerwy powietrza na odnalezienie łodzi jest bezwzględnie koniecznością, i powinieneś zaplanować pozostawienie w butli odpowiedniej ilości powietrza na bezpieczne wynurzenie - a dodatkowo rezerwy. Jeśli jednak odnalazłeś łódź i warunki wynurzania są dobre, a zużyłeś więcej gazu niż planowałeś lecz wciąż masz w butli 35 bar lub więcej, często bardziej sensowne jest zużycie części gazu na wykonanie kilkuminutowego przystanku na głębokości 3-6 metrów niż wynurzenie z rezerwą, ale bez wykonania przystanku.

Określanie „prawidłowego” tempa wynurzania jest bardziej skomplikowaną sprawą. Zastanówmy się najpierw, jak tempo wynurzania wpływa na nurkowanie bezdekompresyjne i model Haldane’owski. Intuicyjnie wyczuwamy, że prawdopodobieństwo urazu ciśnieniowego płuc maleje wraz z tempem wynurzania, ponieważ wolniejsze tempo pozostawia nurkowi więcej czasu na reakcję na dyskomfort wynikający z przepętnienia płuc, lub po prostu na wznowienie oddychania - może bez zdania sobie sprawy z bliskości zagrożenia.

Jednak z drugiej strony, 30 lat doświadczeń US Navy w połączeniu ze starannie przeprowadzonymi i monitorowanymi eksperymentami Powella, Spencera, Thalmanna i wielu innych badaczy doprowadziło do wniosków, że przy normalnym oddychaniu tempo wynurzania wynoszące 18 metrów na minutę pozwala z dużą pewnością unikać urazu ciśnieniowego - o ile nie występują określone problemy zdrowotne, takie jak choroba czy uszkodzenie płuc. Jeśli to rozumowanie jest poprawne - a nie ma powodów, by twierdzić inaczej - to wolniejsze tempo wynurzania może być usprawiedliwione tylko wpływem na zapobieganie DCS. Inaczej niż było w przypadku urazów ciśnieniowych, intuicja nie pomaga przy próbach oceny efektu zmniejszenia tempa wynurzania na zachowanie azotu w kompartmentach, zgodnie z modelami Haldane’owskimi. Na szczęście, możemy użyć HALa do porównania trzech różnych procedur wynurzania: bezpośrednie wynurzenie na powierzchnię z prędkością 18 metrów na minutę zmniejszone tempo wynurzania, wynoszące 9 metrów na minutę wynurzenie z prędkością 18 metrów na minutę, z 3-minutowym przystankiem na głębokości 5 metrów. Zgodnie z HALem, zmniejszenie tempa wynurzania z 18 metrów do 9 metrów na minutę rzeczywiście przyczyniło się do zmniejszenia nasycenia azotem wszystkich tkanek, oprócz tych najwolniejszych. Jednak redukcja ta była stosunkowo mało istotna, a zupełnie nieznaczna w porównaniu z redukcją po wykonaniu 3-minutowego przystanku na głębokości 5 metrów. Podczas nurkowania do limitów bezdekompresyjnych, według HALa, największa korzyść wynikająca ze zmniejszenia tempa wynurzania z 18 do 9 metrów odpowiada niecałej minucie przystanku wykonanego na głębokości 5 metrów.

Jeśli ten wynik wyda ci się zastanawiający, spójrz na niego w inny sposób: zmniejszenie tempa wynurzania o połowę w przybliżeniu odpowiada wykonaniu przystanku w połowie głębokości, z której zaczyna się wynurzenie, o długości równej wydłużeniu czasu wynurzania. W naszym przykładzie (wynurzania z głębokości 18 metrów), redukcja prędkości do 9 metrów na minutę odpowiada wykonaniu 1-minutowego przystanku na głębokości 9 metrów. Nasycenie azotem kompartmentów nie zostanie znacznie zmniejszone - jest to zarówno głębiej, jak i krócej niż 3-minutowy przystanek na 5 metrach.

Należy zauważyć, że chociaż wykonanie 3-minutowego przystanku bezpieczeństwa na głębokości 5 metrów jest zawsze bardziej efektywnym sposobem dekompresji niż tylko zmniejszenie prędkości wynurzania, nie jest jednak bardzo skuteczne podczas nurkowania na mniejsze głębokości (jak widać na ilustracji 11). Zastosowanie którejkolwiek z procedur pozwala na zmniejszenie nasycenia azotem o nie więcej niż 5% po nurkowaniu do limitów bezdekompresyjnych na głębokość mniejszą niż mniej więcej 18 metrów.

Zgodnie z naszą wiedzą o modelach Haldane’owskich, podczas nurkowań na głębokości większe niż około 30 metrów nurkowanie kontroluje kompartment 5-minutowy. Dzięki krótkiemu półokresowi, szybko pozbywa się on azotu podczas przystanku bezpieczeństwa. Jednak na mniejszych głębokościach nurkowanie kontrolowane jest przez coraz to wolniejsze kompartmenty, i dlatego 3-minutowy przystanek bezpieczeństwa staje się coraz mniej efektywny.

Możemy spojrzeć na problem z innej strony, i użyć modelu do uzyskania odpowiedzi na pytanie, jak długi przystanek bezpieczeństwa należy wykonać, by zmniejszyć nasycenie azotem kompartmentu

kontrolującego do 90% limitu bezdekompresyjnego. Jak widać na ilustracji 12, istnieje zależność pomiędzy głębokością a tak wyliczoną długością przystanku bezpieczeństwa. Przystanek trwający zaledwie 1 minutę po nurkowaniu bezdekompresyjnym na głębokość 46 metrów dość skutecznie zmniejsza nasycenie kompartmentu kontrolującego, ale potrzeba więcej niż 10 minut dla osiągnięcia takiego samego rezultatu po nurkowaniu do limitów bezdekompresyjnych na głębokość 12 metrów. Na ilustracji 12 pokazano także krzywą przedstawiającą 10% czasu bezdekompresyjnego, która w przybliżeniu, choć niedoskonale, odzwierciedla długość wymaganego przystanku bezpieczeństwa. Pamiętając że jest to czysto teoretyczne przybliżenie, możemy założyć, że idealny przystanek bezpieczeństwa powinien być większą z wartości: 3 minuty lub 10% czasu dennego.

Generalnie, modele Haldane’owskie nie zakładają żadnej określonej prędkości wynurzania, i brak danych wskazujących, że stosowanie prędkości mniejszych niż 18 metrów przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa - ze względu na dekompresję lub urazy ciśnieniowe. Jednak konserwatywnie jest zawsze zalecany - i obecnie kładzie się coraz większy nacisk na wynurzanie z prędkością mniejszą niż 18 metrów na minutę. Jest to przydatne jako sposób przekonywania nurków do kontrolowania tempa wynurzania.

Powinieneś traktować 18 metrów na minutę (albo wartość podawaną przez komputer) jako maksymalne dopuszczalne tempo wynurzania.

Należy też podkreślić różnice pomiędzy tabelami i komputerami przy włączaniu prędkości wynurzania do modeli Haldane’owskich. Tabela (zarówno RDP, jak i stworzona przy użyciu specjalnego oprogramowania do planowania dekompresji) zakłada, że będziesz się wynurzać z przepisaną prędkością. Jeśli przekroczysz tę prędkość znajdując się blisko limitów bezdekompresyjnych, to możesz przekroczyć dopuszczane przez model nasycenie azotem.

W ograniczonym zakresie, komputer nurkowy może dostosowywać swoje limity bezdekompresyjne do twojego tempa wynurzania dzięki temu, że bez przerwy odświeża model. Praktycznie wszystkie produkowane obecnie komputery nurkowe wymagają wynurzania z prędkością mniejszą niż 18 metrów na minutę, i będą sygnalizować dźwiękowo lub wizualnie przekroczenie tej prędkości. W niektórych komputerach dopuszczalne tempo wynurzania zależy od głębokości, i spada w miarę wynurzania nawet do 6 metrów na minutę. Niektóre modele dekompresyjne skracają pozostały czas bezdekompresyjny w razie znacznego przekroczenia przepisanego tempa wynurzania.

Trzeba wspomnieć, że w nurkowaniu technicznym i komercyjnym, zwłaszcza z użyciem helu, prędkość wynurzania może mieć duże znaczenie. Hel dyfunduje szybciej niż azot, i dlatego podczas nurkowania z jego użyciem obowiązują inne zasady i założenia. Z praktyki nurkowej wynika, że 9 metrów na minutę jest dobrą maksymalną prędkością wynurzania po nurkowaniu na trimiksie lub helioksie.

Warto też wiedzieć o nowych modelach dekompresyjnych, tak zwanych „modelach pęcherzykowych” (bubble models), które w odróżnieniu od modeli Haldane’owskich próbują przewidzieć tworzenie się i zachowanie pęcherzyków w organizmie. Modele te mogą być szczególnie przydatne dla nurków dekompresyjnych. Według większości z nich, jeśli jesteś nasycony gazem obojętnym w stopniu wymagającym odbycia dekompresji, to tempo wynurzania zaczyna mieć większe znaczenie. W przyszłości, takie modele mogą także pomóc w ulepszeniu procedur wynurzania.

Nurkowanie dekompresyjne

Nie tak dawno temu, nurkowania wymagające odbywania przystanków dekompresyjnych były tematem tabu w społeczności nurków sportowych. Wzrost popularności nurkowania technicznego uczynił je „akceptowalnymi”, chociaż dla nurków rekreacyjnych dekompresja powinna pozostać procedurą stosowaną tylko w sytuacjach awaryjnych.

„...Jeżeli pracujesz na dobrze zaopatrzonej łodzi nurkowej, będziesz mieć do dyspozycji „windę”. W przeciwnym wypadku, spuszcza ją ci w dół wiadro umocowane na linie. Siadasz okrakiem na wiadrze, z liną pomiędzy nogami, i pozwalasz im utrzymywać cię na odpowiedniej głębokości i regulować twoją dekompresję...”

Jest to opis nurkowania dekompresyjnego z książki Toma Eadie’go, nurka US Navy, pt. „Lubię nurkowanie” (I like diving) wydanej w 1929 roku

Aby wyliczyć harmonogramy dekompresyjne, potrzebujemy dodatkowego zestawu zmiennych oprócz dopuszczalnego nasycenia azotem na powierzchni - czyli wartości maksymalnego nasycenia na głębokościach wymaganych przystanków dekompresyjnych. Jeśli jesteśmy nurkami technicznymi lub komercyjnymi i nurkujemy na mieszankach zawierających hel, musimy także dobrać póltekresy i wartości

dopuszczalnego nasycenia tak, by były właściwe dla helu. Gdy dokonamy tych zmian, model będzie działał w taki sam sposób jak ten, który już poznaliśmy.

Wyobraź sobie, na przykład, że nurkujesz na powietrzu przez 20 minut na głębokość 46 metrów. Po takim nurkowaniu przekroczone zostają dopuszczalne nasycenia wszystkich kompartmentów o półokresach krótszych niż 60 minut. Nie możesz oczywiście wynurzyć się bezpośrednio na powierzchnię, ale w miarę wynurzania osiągniesz maksymalne dopuszczalne nasycenie na danej głębokości dla jednego z przedziałów. Przedział ten staje się kompartmentem kontrolującym (w danym momencie), i musisz pozostać na danej głębokości do chwili, gdy z przedziału usunięta zostanie dostateczna ilość azotu, by wynurzyć się do następnego przystanku. Gdy tak wynurzasz się od przystanku do przystanku, kompartmentami kontrolującymi kolejno stają się przedziały o coraz dłuższych półokresach (coraz wolniejsze), i dlatego na kolejnych przystankach należy spędzać coraz więcej czasu.



Chociaż nurkowie techniczni często używają powietrza podczas dennej części nurkowania dekompresyjnego, dekompresję odbywają na nitroksie bądź czystym tlenie

Zgodnie z tabelami US Navy, twoje 20-minutowe nurkowanie na głębokość 46 metrów będzie wymagało wykonania 2-minutowego przystanku na głębokości 6 metrów, i 7-minutowego przystanku na głębokości 3 metrów. Przez lata, tabele US Navy były najczęściej używanymi do planowania nurkowania dekompresyjnego, podobnie jak do planowania nurkowań bezdekompresyjnych. US Navy przetestowało je podczas nurkowań eksperymentalnych w latach 50., i uzyskane wyniki potwierdziły ich użyteczność podczas ograniczonego planowania nurkowań dekompresyjnych na powietrzu.

Użyte powyżej słowo „ograniczonego” wynika z ostrożności: w niektórych przypadkach, profile dekompresyjne dopuszczalne według tabel US Navy i modelu okazały się niewiarygodne.

W 1986 roku, Thalmann z powodzeniem testował tabele US Navy dla ekspozycji trwającej przez 60 minut na głębokości 30 metrów, ale stwierdził, że 60-minutowe nurkowania na głębokość 36 metrów skutkowały wystąpieniem 1 przypadku choroby dekompresyjnej na 20 nurkowań, nawet gdy wykonywano przystanki dekompresyjne odpowiadające 70-minutowemu nurkowaniu. Dla 40-minutowego nurkowania na głębokość 45 metrów, nawet 1,6-krotne wydłużenie całkowitego czasu dekompresji nie pozwoliło całkowicie wyeliminować zagrożenia DCS. Thalmann ostatecznie uznał 60 minut na 30 metrach i 30 minut na 45 metrach za najdłuższe dopuszczalne czasy denne podczas nurkowania na powietrzu.

Thalmann testował także trzy zestawy nurkowań powtórzeniowych, każdy złożony z dwóch nurkowań na głębokości 30 metrów lub 45 metrów. Testy te doprowadziły do wystąpienia 6 przypadków choroby dekompresyjnej po zaledwie 32 nurkowaniach, mimo wydłużenia czasów dekompresji w stosunku do wymaganych przez tabele o 63% do 83%.

Te ograniczone dane wykazały, że w niektórych sytuacjach modele Haldane’owskie nie są w stanie wyliczyć wiarygodnych harmonogramów dla powtórzeniowych nurkowań dekompresyjnych na powietrzu. Wydaje się, że w miarę odchodzenia od limitów bedekompresyjnych model staje się coraz mniej wiarygodny - zwłaszcza podczas nurkowań powtórzeniowych. Dla nurkowań dekompresyjnych na powietrzu lub nitroksie, dane te podkreślają znaczenie konserwatywnego postępowania: jeśli podczas nurkowania musiałeś wykonać awaryjną dekompresję, powinno to być ostatnie nurkowanie tego dnia.

Teraz spójrzmy na nurkowanie techniczne, które na pierwszy rzut oka pozornie przeczą tym zasadom i potwierdzającym je danym. Nurkowie techniczni odbywają nurkowania wyraźnie bardziej agresywne niż te testowane przez Thalmanna, i często wykonują dekompresyjne nurkowania powtórzeniowe. Chociaż jednak

częstość DCS jest nieco wyższa wśród nurków technicznych niż wśród rekreacyjnych, nie zbliża się nawet do wartości uzyskanych w eksperymentach Thalmanna.

Powodem tej pozornej sprzeczności jest to, że nurkowie techniczni używają często innych gazów niż powietrze do odbywania nurkowań dekompresyjnych, nie stosują tabel US Navy, i coraz częściej stosują procedury nie-Haldane’owskie podczas planowania i odbywania dekompresji. Wszystkie one, zgodnie z praktyką, zmniejszają ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej.

Chociaż nurkowie techniczni często używają powietrza podczas najgłębszej części nurkowania dekompresyjnego, odbywają dekompresję na nitroksach bądź czystym tlenie. W tym celu przetaczają gazy oddechowe w miarę wynurzania (pamiętasz, że muszą utrzymywać ciśnienie parcjalne tlenu poniżej wartości 1,6 bara podczas dekompresji). Takie postępowanie znacząco zmniejsza czas dekompresji, ponieważ to zewnętrzne ciśnienie określa tempo powstawania pęcherzyków, lecz gradient ciśnień parcjalnych determinuje tempo odsycania kompartmentów. Jest to szczególnie wyraźne podczas oddychania czystym tlenem, który może być używany już na głębokości 6 metrów (tam PO2 wynosi 1,6 bara).

Równoważna Głębokość Powietrzna (EAD) dla tlenu wynosi -10 metrów - bez względu na rzeczywistą głębokość. W związku z tym, nurek techniczny oddychający tlenem na głębokości 6 metrów usuwa azot szybciej niż gdyby znajdował się na powierzchni, ale dzięki pozostawaniu na głębokości 6 metrów formowanie pęcherzyków w jego tkankach jest zminimalizowane. Taka procedura znacząco skraca wymagany czas dekompresji. A jak stwierdził R.W. Hamilton, uznany autorytet w dziedzinie modelowania dekompresji, „Krótsza dekompresja jest bezpieczniejszą dekompresją”. Nurkowie techniczni stosują takie same procedury podczas nurkowania na mieszankach zawierających hel.

Nurkowie techniczni nie używają (a przynajmniej używają bardzo rzadko) tabel dekompresyjnych US Navy; właściwie, rzadko używają jakichkolwiek drukowanych tabel. Popularnym trendem w nurkowaniu technicznym jest stosowanie oprogramowania do planowania dekompresji, które może być używane do tworzenia indywidualnych tabel dla planowanej głębokości i konkretnych mieszanek gazowych. Mogą używać tych tabel jednocześnie z komputerem nurkowym przeznaczonym do nurkowań technicznych, pozwalającym na zamienianie gazów w trakcie nurkowania. Zarówno oprogramowanie do komputerów osobistych, jak i programy stosowane w komputerach nurkowych, stosują dopuszczalne wartości nasycenia wyraźnie niższe od tych stosowanych w Standardowych Tabelach Powietrznych US Navy. Dzięki temu, planowane harmonogramy dekompresji są znacznie bardziej konserwatywne - przy zachowaniu tych samych wartości pozostałych parametrów.

Wreszcie, nurkowie techniczni stosują takie procedury podczas planowania harmonogramów dekompresyjnych, które nie są przewidziane przez modele Haldane’owskie. Na przykład, często wykonują przystanki dekompresyjne znacznie głębiej niż wymagają tego modele Haldane’owskie, ponieważ najnowsze, pęcherzykowe modele dekompresyjne sugerują, że takie postępowanie znacznie zwiększa efektywność dekompresji (zwłaszcza podczas nurkowania na mieszankach zawierających hel). Dodatkowo, nurkowie techniczni regularnie przedłużają jeden lub dwa ostatnie przystanki dekompresyjne, a potem kontynuują oddychanie tlenem na powierzchni. Takie postępowanie wydaje się przyczyniać do utrzymania akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa technicznego nurkowania dekompresyjnego.

Nurkowanie na wysokości i latanie po nurkowaniu

Chociaż zagadnienia nurkowania na wysokości i latania po nurkowaniu cieszyły się ostatnio sporym zainteresowaniem społeczności nurkowej, nie są to nowe problemy dla ekspertów zajmujących się dekompresją. Oba zagadnienia były rozpatrywane od lat 50., kiedy US Navy opublikowało swoje tabele. Nurkowanie na wysokości i latanie po nurkowaniu, chociaż nie identyczne, mają wspólną cechę - należy brać przy nich pod uwagę obniżone ciśnienie atmosferyczne. Podczas nurkowania na wysokości, nurkowanie zaczyna się i kończy w strefie obniżonego ciśnienia atmosferycznego. Podczas latania po nurkowaniu, niedługo po wynurzeniu na powierzchnię następuje dalsze obniżenie ciśnienia atmosferycznego, poniżej wartości wyjściowej.

Trwa Druga Wojna Światowa, i bardzo wielu z walczących żołnierzy Aliantów cierpi na chorobę dekompresyjną niemal codziennie. Jednak to, co byłoby uznane za kryzys w czasie pokoju, w czasie wojny jest traktowane za ledwie jako niedogodność: operacje są kontynuowane bez względu na „krzywki”. Co może zaskakiwać, poszkodowani żołnierze nie są nurkami. To lotnicy.

Bombowce i eskortujące je myśliwce, przekraczające Kanał La Manche w złowrogich grupach, nie są hermetyczne, jednak nad wrogim terytorium przelatują na wysokościach przekraczających 9100 metrów. Powód jest jeden - niemiecka artyleria przeciwlotnicza nie są w stanie dokładnie celować do samolotów

na tej wysokości. Początkowo uważano, że załogi samolotów cierpią z powodu anoksji, czyli zbyt małej ilości tlenu; jednak systemy podawania tlenu nie zlikwidowały wszystkich objawów związanych z przebywaniem na dużych wysokościach.

Do końca wojny, Alianci odbędną setki misji. Oprócz powodowania ogromnych zniszczeń, loty te przyczynią się do uzyskania ogromnej ilości danych dotyczących przypadków choroby dekompresyjnej. W 1945 roku w oparciu o te dane dr Behnke napisał pracę, w której po raz pierwszy porównał przypadki choroby dekompresyjnej podczas latania na dużych wysokościach z do tych spotykanych u nurków

Haldane skonstruował swój model w oparciu o dane dotyczące nurkowania na poziomie morza - było to logiczne podejście, zważywszy, że większość nurkowań Royal Navy odbywała się w morzu. Jak napisano wcześniej, model zakładał, że nurek wynurzy się i po wynurzeniu pozostanie pod ciśnieniem pełnej atmosfery. Dopuszczalne wartości nasycenia azotem wyliczone zostały przy założeniu określonego maksymalnego gradientu ciśnień pomiędzy ciśnieniem azotu w tkankach ciała a ciśnieniem atmosferycznym. Pobyt na wysokości, gdzie następuje spadek ciśnienia w powietrzu otaczającym nurka, stwarza konieczność obniżenia wartości dopuszczalnego nasycenia azotem, a tym samym skróceniu ulegają czasy nurkowań bezdekompresyjnych.

Nurkowanie na wysokości

Korzystając z tabel nurkowych, wprowadzamy poprawkę na wysokość nad poziomem morza korzystając ze specjalnych dodatkowych tabel, które umożliwiają przeliczenie rzeczywistych głębokości podczas nurkowania na wysokości na głębokości teoretyczne, które można użyć do tabel przeznaczonych do nurkowania na poziomie morza. Najlepszym podejściem teoretycznym do nurkowania na wysokości jest stosowanie tak zwanych „Poprawek Krzyżowych” (Cross Corrections), wprowadzonych w 1970 roku i używanych do dziś. Metoda polega na wyliczeniu głębokości równoważnej, podobnej do wartości EAD (Równoważna Głębokość Powietrzna - Equivalent Air Depth), wyliczanej podczas nurkowania na nitroksie. Jednak w tym przypadku głębokość teoretyczna na wysokości jest większa niż głębokość rzeczywista. Możesz skorzystać z tabel, albo użyć poniższej formuły:

Głębokość teoretyczna = Głębokość rzeczywista ÷ Ciśnienie na wysokości

Na przykład, na głębokości 1829 metrów ciśnienie atmosferyczne spada z 1 bara na poziomie morza do 0,8 bara. Aby wprowadzić Poprawkę Krzyżową, wyliczamy głębokość teoretyczną korzystając z wzoru powyżej. Na przykład, dla głębokości 24 metrów głębokość ekwiwalentna na tej wysokości wyniesie:

$$24 \text{ m} \div 0,8 = 30 \text{ m}$$

Nasz czas bezdekompresyjny dla głębokości 24 metrów na wysokości 1829 metrów został obniżony z 30 do 20 minut.

Poprawka Krzyżowa nie została dokładnie zbadana w kontrolowanych warunkach, ale jej przydatność, nie potwierdzona w laboratorium, sprawdziła się w praktyce. Nurkowie stosowali Poprawkę Krzyżową przez prawie cztery dziesięciolecia, i nigdy nie pojawiły się poważniejsze wątpliwości co do jej przydatności. Należy jednak być ostrożnym, ponieważ mimo sprawdzenia się Poprawki Krzyżowej w konserwatywnym planowaniu nurkowań bezdekompresyjnych, niewiele jest danych poświęconych innym jej zastosowaniom.

Latanie po nurkowaniu

Latanie po nurkowaniu jest częste wśród nurków podróżujących po świecie, i jest zagadnieniem cieszącym się sporym zainteresowaniem. Wytyczne DAN zalecają po nurkowaniu bezdekompresyjnym co najmniej 12-godzinną przerwę przed lotem, podczas którego ciśnienie w kabinie nie będzie niższe niż na wysokości 2400 metrów, albo przed przejazdem przez góry o tej wysokości. Po nurkowaniach wymagających przystanków dekompresyjnych, czas wymaganej przerwy wzrasta do 24 godzin lub więcej.

Dr Richard Vann z Duke University badał ten problem eksperymentalnie. Przeanalizował ponad 800 przypadków ekspozycji bliskich limitom RDP. Przy przerwach powierzchniowych trwających krócej niż 12 godzin, u badanych osób wystąpiło 40 przypadków DCS - zatem prawdopodobieństwo choroby wyniosło 5%. Dodatkowo, nurkowania powtórzeniowe stwarzały konieczność wydłużenia przerwy przed lotem, tak by ryzyko stało się akceptowalne. Dobrą wiadomością jest, że choroba dekompresyjna nie wystąpiła w żadnym przypadku, gdy przerwa powierzchniowa przed lotem trwała powyżej 17 godzin. Nieco później, badania US Navy wskazały, że rzeczywiste zanurzenie i aktywność fizyczna (dr Vann prowadził doświadczenia w

komorach ciśnieniowych, na ochotnikach w spoczynku) mogą stwarzać konieczność wydłużenia przerwy powierzchniowej przed lotem - chociaż nie zostało to potwierdzone.

Jeśli jesteś nurkiem podróżującym drogą lotniczą, albo musisz przejechać przez góry, podczas planowania nurkowań powinieneś uwzględnić aktualne zalecenia dotyczące latania przed nurkowaniem. Wyobraź sobie, że nurkujesz ostatniego dnia rejsu safari. Powinieneś zakończyć nurkowanie przed południem, tak by przeznaczyć popołudnie na suszenie i pakowanie sprzętu. Nawet jeśli wylatujesz następnego dnia o 8:00 rano, twoja przerwa powierzchniowa wyniesie 18 godzin - co jest zgodne z wnioskami z eksperymentów Vanna i aktualnymi rekomendacjami dotyczącymi przerwy powierzchniowej przed lotem. Nurkowanie nocne na dzień przed lotem nie jest dobrym pomysłem, chyba że twój lot następnego dnia odbędzie się po południu.

Ponieważ latanie po nurkowaniu jest zagadnieniem aktywnie badanym, pozostawaj na bieżąco z wynikami najnowszych badań i zaleceniami oraz stosuj je podczas planowania nurkowań.

Przyszłość

Jest rok 2050. Scott i Frank, dwaj doświadczeni nurkowie techniczni, wynurzają się po rutynowym nurkowaniu na 330 metrów. Nagle na wyświetlaczu w masce Scotta miga ostrzegawcze światelko, a kobiecy głos komputera informuje go o wykryciu problemów podczas dekompresji.

„Co się dzieje?” - pyta Frank przez interkom.

„Beata mówi, że nanity wariują. Wykrywają pęcherzyki w moich naczyniach.”

„To niedobrze. Jakie są zalecenia?”

„Czekaj chwilę.” - Scott wciska przycisk w komputerze swojego rebreathera, i po chwili odczytuje zalecaną procedurę na wyświetlaczu maski. Ponaglany przez komputer, wybiera opcję ZATWIERDŹ. „Wracamy na 100 metrów” - mówi do Franka - „Nanity jak dotąd rozbiły pęcherzyki, ale na wszelki wypadek Beata zaraz podniesie stężenie O₂ w mojej mieszance. Chce żebym wziął leki przeciwtoksyczne, tak żeby mnie nie uderzyło. Jak na razie, nie potrzebuję kortykosteroidów. W każdym razie, czeka nas dodatkowo jakaś godzinka na deco.”

„Nie ma sprawy” - stwierdza Frank - „Na szczęście załadowałem do terminala dodatkowy film, więc nie będziemy się nudzić. Daj tylko znać załodze, że będziemy później.”

Modele Haldane’owskie są zdecydowanie najczęściej stosowanymi spośród wszystkich modeli dekompresyjnych, jednak oczywiście istnieją także inne modele. Było wiele prób opracowania modeli opartych o teorie inne niż te zaproponowane przez Haldane’a. Jednym z najwcześniejszych - model dyfuzyjny zaproponowany przez Hemplemana - został użyty do skonstruowania tabel Royal Navy w roku 1969. W 1977 Hills rozbudował ten model. Z kolei Kidd i Stubbs w 1962 roku skonstruowali urządzenie do wyliczania dekompresji oparte na przedziałach ułożonych seryjnie, a nie niezależnych, jak u Haldane’a. W modelu Kidda-Stubbsa przedziały wypełniane są kolejno, jeden za drugim, a nie równoległe i niezależnie od siebie - jak w modelu Haldane’a. Chociaż skonstruowane przez nich urządzenie do wyliczania dekompresji nigdy się nie przyjęło, to teoretyczne podejście jest wciąż stosowane w Kanadzie, w tabelach nurkowych DCIEM.

Jak jednak już wiesz, przyszłość prawdopodobnie należy do modeli opierających się na przewidywaniach wystąpienia fazy gazowej - pęcherzyków. Wielokrotnie, choć z różnym powodzeniem, próbowano modelować wpływ pęcherzyków na dekompresję. Yount (1979) opracował Model Zmiennej Przepuszczalności (Variable Permeability Model, VPM) i stosował go do określania ryzyka wystąpienia choroby dekompresyjnej u szczurów i u ludzi. W 1991 roku, Gernhardt (który później został astronautą, i pracował nad problemami dekompresyjnymi podczas lotów kosmicznych) stworzył model bubble index, który skutecznie przewidywał wyniki nurkowań z dużej bazy danych firmy Comex dotyczących nurkowań komercyjnych.

Ostatnio, Weinke wprowadził algorytm RGBM (Reduced Gradient Bubble Model), który został zastosowany w wielu komputerach nurkowych. Chociaż zredukowane gradienty opierają się na obliczeniach wzrostu pęcherzyków, na przykład podczas prowadzenia nurkowań o odwróconych profilach, odbywania nurkowań powtórzeniowych i wynurzania z dużymi prędkościami, to w praktycznych zastosowaniach model RGBM jest właściwie zmodyfikowanym modelem Haldane’, z wartościami dopuszczalnego nasycenia azotem dostosowanymi do przewidywań modelu RGBM.

W przyszłości, spodziewamy się modeli opracowanych na podstawie badań nad fizjologią człowieka, i opierających się o prawa fizyki newtonowskiej, a nie dopasowujących się tylko do danych

eksperymentalnych. Możemy też oczekiwać podejść, które matematycznie opisują dane eksperymentalne, ale są znacznie bardziej złożone i elastyczne niż model Haldane’a.

Duże są oczekiwania w stosunku do nanomedycyny; szczególnie rozważane jest opracowanie mikroskopijnych, skomputeryzowanych urządzeń zwanych nanitami (nanytes), wszczepianych do krwiobiegu. Takie urządzenia umożliwiłyby bezpośrednio monitorowanie procesów zachodzących w twoim ciele, umożliwiając modyfikowanie profilu nurkowego zanim dojdzie do choroby dekompresyjnej. Również, chociaż rekompresja jest standardowym sposobem leczenia choroby dekompresyjnej, opracowano eksperymentalne procedury leczenia z zastosowaniem farmaceutyków. Może to oznaczać, że w przyszłości leki stosowane w razie choroby dekompresyjnej - albo prewencyjnie, dla jej zapobieżenia - będą standardową częścią twojej apteczki pierwszej pomocy.

To, co dzisiaj brzmi jak science-fiction, może wcale nie być aż tak odległe. Wiele nurkujących dzisiaj osób pamięta przewidywania ekspertów, że stworzenie praktycznych komputerów nurkowych jest niemożliwe - i w tym czasie mieli oni rację. W każdym razie, miejmy nadzieję, że wkrótce doczekamy się realistycznych modeli dekompresyjnych opartych na badaniach nad ludzką fizjologią. Oczekując na jego pojawienie, korzystać będziemy z błyskotliwości Haldane’a.

Divers Alert Network (DAN): jego rola w badaniach problemów i fizjologii nurkowania

Jako organizacja zajmująca się bezpieczeństwem i zdrowiem osób nurkujących rekreacyjnie, istniejąca od 1981 Divers Alert Network (DAN) świadczy społeczności nurkowej szeroki zakres usług. Należy do nich utrzymywanie działającego przez całą dobę telefonu alarmowego w razie wypadków nurkowych, telefonicznej informacji dotyczącej medycyny nurkowania, udzielanie wsparcia finansowego i prowadzenie programów szkoleniowych dla komórek dekompresyjnych, oraz prowadzenie różnorodnych programów badawczych w Centrum Medycznym Duke University (USA). Poza Stanami, DAN posiada również biura na całym świecie, w tym w Japonii, Australii i Nowej Zelandii, Południowej Afryce i Europie. DAN wytworzył również serię niedrogich zestawów pierwszej pomocy tlenowej w razie wypadków nurkowych, i opracował programy nauczania ich obsługi.

W zakres działalności DAN wchodzi również analiza wypadków nurkowych i zbieranie danych dotyczących śmiertelności wśród nurków. DAN bierze udział w leczeniu większości urazów odniesionych przez nurków rekreacyjnych i technicznych na całym świecie, i monitoruje komory dekompresyjne celem określenia ilości leczonych przypadków choroby dekompresyjnej i innych urazów nurkowych, oraz analizuje czynniki mające wpływ na te wypadki. Zebrane dane są udostępniane społeczności nurkowej - od nurków rekreacyjnych do naukowców i lekarzy medycyny zajmujących się problematyką nurkową. Informacje te pomagają lekarzom w śledzeniu trendów dotyczących rodzajów urazów nurkowych, analizie ich objawów oraz skuteczności leczenia. Wyniki badań i wnioski publikowane są w roczniku „Report on Diving Accidents and Fatalities” oraz w „Project Dive Exploration”.

Zgodnie ze statystykami DAN, w ciągu ostatnich 10 lat całkowita liczba nagłych wypadków nurkowych lekko wzrosła. Jednak liczba próśb o konsultację, kierowanych do linii informacyjnej DAN, wzrasta znacząco każdego roku. W 1995 roku, Sekcja Medyczna DAN odebrała ponad 14,000 zapytań. Zarząd DAN wiąże wzrost zainteresowania z wzrastającą liczbą członków DAN oraz szerszej wiedzy o tej usłudze. Sekcja Badawcza DAN prowadzi szereg badań, które mogą nieść bezpośrednie korzyści nurkom rekreacyjnym. Między innymi, w ramach projektu Project Dive Exploration gromadzone są rzeczywiste profile nurkowe, ściągane z komputerów noszonych przez nurków. DAN wykorzystuje te dane do poszukiwania odpowiedzi na szereg ważnych pytań, dotyczących między innymi wpływu starzenia na nurkowanie, choroby morskiej, czy urazów ciśnieniowych ucha.

Informacje na temat DAN i jego usług dostępne są pod numerem telefonu (001) 800-446-2671, albo na stronie <http://www.diversalertnetwork.org>. Aby dowiedzieć się więcej o badaniach prowadzonych przez Sekcję Naukową DAN, odwiedź stronę <http://www.diversalertnetwork.org/research>.