Dwutlenek węgla – przerażający wróg (część 2)

Jest to druga z trzech części serii artykułów o dwutlenku węgla, który jest jednym z najczęstszych czynników przyczyniających się do wystąpienia sytuacji awaryjnych w nurkowaniu. Pierwsza część tej serii znajduje się tutaj. Część trzecia zostanie opublikowana w kolejnym wydaniu Alert Diver.

Dlaczego nadmiar dwutlenku węgla jest niebezpieczny?

Fachowym określeniem na nienormalnie wysoki poziom dwutlenku węgla jest *hiperkapnia.* Wywołuje ona wiele stopniowo coraz poważniejszych problemów, które zaczynają się od łagodnych zaburzeń neurologicznych mających wpływ na percepcję i kontrolę motoryczną i mogą, ale nie muszą być zauważone przez nurka.

CO_2 ma 20 razy większy potencjał narkotyczny od azotu. Zbyt duże stężenie dwutlenku węgla w krwiobiegu ma ogromny psychologiczny wpływ, ponieważ powoduje dezorientację i nieracjonalne zachowanie u nurka. Hiperkapnia może również wywołać u niego lęk, rozdrażnienie, reakcję walki lub ucieczki, albo panikę. Mówiąc bez ogródek, zbyt duże stężenie dwutlenku węgla powoduje, że stajesz się głupi i strachliwy, co jest dość niefortunnym połączeniem. Poważna hiperkapnia prowadzi do osłabienia, a w końcu do utraty przytomności.

Hiperkapnia powoduje również *wazodylatację*, czyli rozszerzenie naczyń krwionośnych. W głowie znajduje się wiele takich naczyń, ale czaszka nie może się rozszerzać razem z nimi. Z tego powodu zwiększony przepływ krwi powoduje zwiększenie ciśnienia śródczaszkowego. Jeżeli po nurkowaniu boli Cię głowa, potencjalnym winowajcą może być nadmiar dwutlenku węgla. Zwiększony przepływ krwi do mózgu i ośrodkowego układu nerwowego oznacza również, że do tych organów dostarczana jest większa ilość tlenu, przez co nurek jest bardziej narażony na zatrucie tlenem ośrodkowego układu nerwowego (CNS).

Ponieważ odruch wzięcia oddechu jest regulowany przez poziom dwutlenku węgla, nie powinno być zaskoczeniem to, że *duszność* (płytki oddech) jest częstym symptomem hiperkapnii. Wystąpienie duszności zależy jednak w dużym stopniu od indywidualnej podatności, dlatego jej brak nie jest gwarancją tego, że u nurka nie wystąpią inne objawy lub symptomy, np. upośledzenie funkcji poznawczych.

Kiedy u nurka dojdzie do hiperkapnii, jej wpływ zazwyczaj utrzymuje się przez co najmniej kilka minut w łagodnych przypadkach, ale może trwać nawet przez kilka godzin w bardziej poważnych sytuacjach.

Pod wodą wszystko się komplikuje

Oczywiste jest to, że wszystkie symptomy opisane powyżej mają poważniejsze konsekwencje i są mniej pożądane pod wodą niż na lądzie. Utrata przytomności bez wątpienia niesie za sobą ryzyko utonięcia, a upośledzenie funkcji poznawczych i inne problemy psychologiczne, takie jak lęk lub panika mogą doprowadzić do podejmowania błędnych, impulsywnych decyzji. Duszność, nawet jeśli jest relatywnie niewielka oraz wynikający z niej ciężki oddech może doprowadzić do szybkiego zużycia gazu, co jest tylko jednym z kilku skutków, które omówimy poniżej. Pamiętajmy też, że reakcja walki lub ucieczki jest wyjątkowo bezproduktywna w jakimkolwiek scenariuszu nurkowym.

Martwe przestrzenie powietrzne

Wymiana tlenu i dwutlenku węgla między krwią a gazem oddechowym odbywa się w *pęcherzykach płucnych,* małych woreczkach położonych na końcu dróg oddechowych w płucach. Aby całkowicie usunąć dwutlenek węgla z naszego organizmu, musi on jednak przejść z pęcherzyków płucnych przez oskrzela, tchawicę i puste przestrzenie w naszej głowie, zanim pozbędziemy się go podczas wydechu.

Wszystkie te miejsca, przez które przechodzi dwutlenek węgla nazywamy *martwymi przestrzeniami powietrznymi.* Nie biorą one udziału w wymianie gazowej, a gaz, który pozostaje w tych przestrzeniach po wydechu (w tym dwutlenek węgla) zostaje wciągnięty do płuc w następnym cyklu oddechowym. Objętość gazu w anatomicznych martwych przestrzeniach powietrznych u przeciętnego człowieka wynosi ok. 150 mililitrów, a przeciętna *objętość oddechowa* w spoczynku (czyli objętość powietrza wdychanego i wydychanego z płuc podczas cyklu oddechowego) wynosi 500 mililitrów. Oznacza to, że ponownie wdychamy ok. 30% zużytego powietrza bogatego w dwutlenek węgla, które opuszcza nasze pęcherzyki płucne. Kiedy oddychamy głębiej – albo świadomie, albo z powodu dużego wysiłku – do naszych płuc

dostaje się mniej tego gazu.

Podczas nurkowania objętość martwych przestrzeni powietrznych jest zwiększona przez ustnik i drugi stopień automatu lub ustnik rebreathera. Ta dodatkowa martwa przestrzeń zmniejsza ilość CO_2, jaką efektywnie usuwamy z organizmu podczas cyklu oddechowego.

Wysiłek oddechowy, gęstość gazu i dynamiczna kompresja dróg oddechowych

Drugim ważnym czynnikiem, który trzeba wziąć pod uwagę pod wodą jest *wysiłek oddechowy (work of breathing – WOB).* Jest to ilość pracy, jaką nasze mięśnie muszą wykonać, aby przesunąć gaz do i z płuc.

Ta praca jest funkcją *masy przepływu gazu* – fizycznej masy molekuł gazu przepływających przez przekrój naszych dróg oddechowych w danej jednostce czasu. Masa przepływu jest z kolei funkcją trzech innych wielkości: *tempa oddychania* (jak szybko oddychamy), *objętości oddechowej* (objętości gazu wymienianego podczas cyklu oddechowego) oraz *gęstości gazu* (masy gazu w danej objętości).

W normalnej sytuacji – niezakłócone oddychanie powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym – nasza przepona bez problemu radzi sobie z tą pracą. Podobnie jak nasze serce, przepona jest zoptymalizowanym mięśniem, który jest efektywny i wytrzymały, produkuje bardzo mało CO_2 i jest w stanie pracować bez przerwy przez całe nasze życie. To odróżnia ją od innych grup mięśni – nie możemy na przykład chodzić lub robić pompek przez nieograniczenie długi czas.

Podczas nurkowania nie oddychamy jednak powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym. Ciśnienie otoczenia zwiększa się z głębokością, tak samo jak gęstość gazu. Kiedy gaz jest gęstszy, jego masa

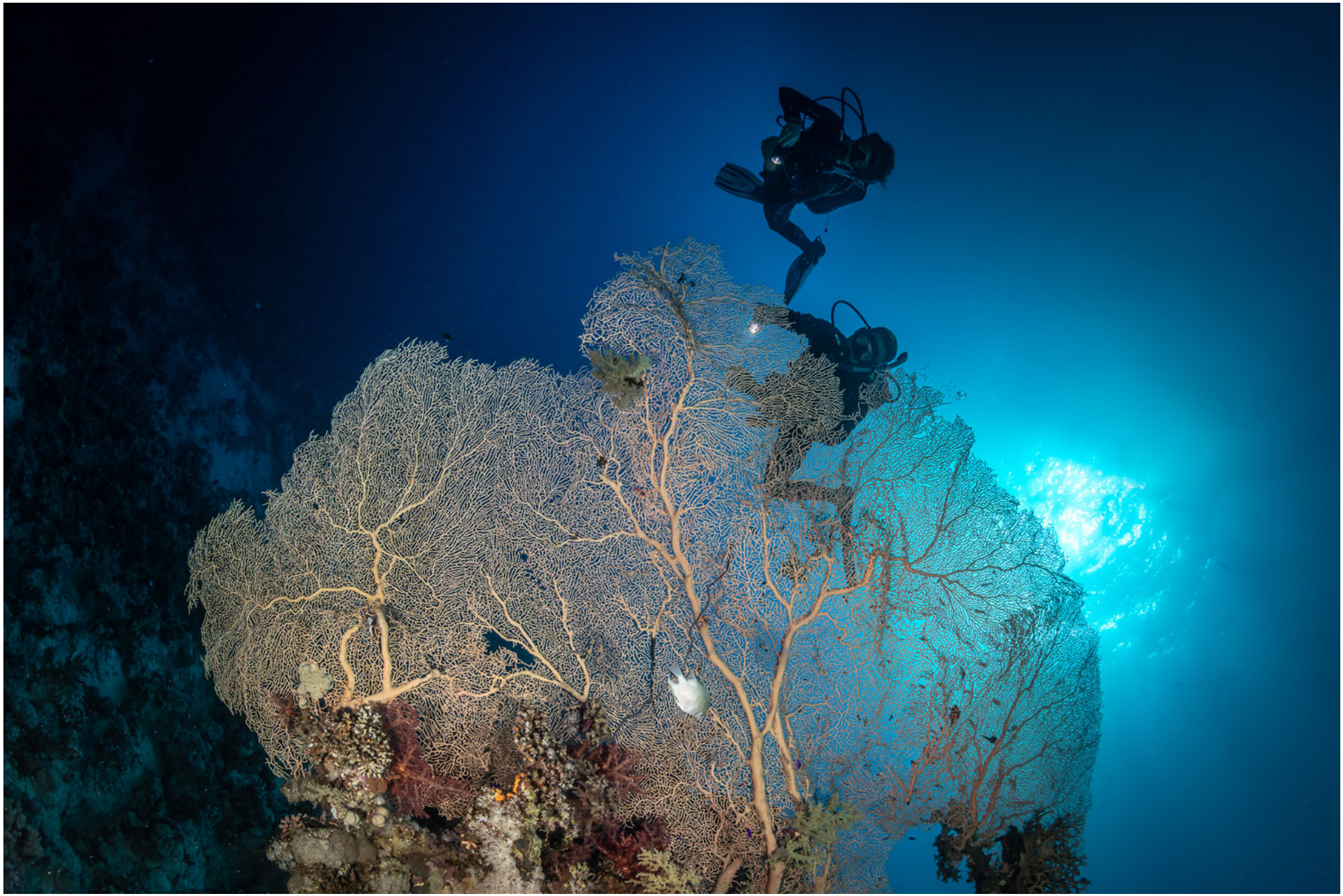
przepływu wzrasta, a to z kolei oznacza większy wysiłek oddechowy. Kiedy wysiłek oddechowy przekroczy optymalny poziom pracy przepony, produkcja CO_2 oraz ryzyko hiperkapnii dramatycznie wzrasta.

Dodatkowym czynnikiem jest *dynamiczna kompresja dróg oddechowych.* Nasze drogi oddechowe nie są sztywnymi rurami, ale przypominają raczej luźne przewody. Z powodu tarcia o ścianki dróg oddechowych duża masa przepływu gazu powoduje różnicę ciśnień, która sprawia, że przewody te kompresują się i ograniczają przepływ, podobnie jak przy ataku astmy. W 2003 roku badacze Enrico Camporesi i Gerardo Bosco udowodnili, że przy oddychaniu powietrzem maksymalna wentylacja, którą nurek jest w stanie osiągnąć na głębokości 30 metrów wynosi połowę maksymalnej objętości gazu pod ciśnieniem panującym na powierzchni.

Wpływ sprzętu

Oprócz *obciążenia wewnętrznego* wywołanego przez ruch gęstego gazu wewnątrz naszych dróg oddechowych, innym czynnikiem zwiększającym wysiłek oddechowy jest *obciążenie zewnętrzne* związane z używaniem sprzętu nurkowego. Nasze mięśnie oddechowe nie tylko muszą przepychać gaz tam i z powrotem, ale muszą również zapewniać energię do uruchomienia mechanicznych części drugiego stopnia automatu. Dodatkowo ustnik działa dosłownie jak szyjka od butelki – wysysanie powietrza przez mały otwór wymaga więcej energii niż przez duży. Możesz się o tym łatwo przekonać próbując oddychać przez słomkę podczas spaceru.

Kiedy nurkujesz na rebreatherze, objętość przemieszczającego się gazu jest o wiele większa niż na obiegu otwartym: nie tylko nasze płuca i drogi oddechowe, ale również cała pętla oddechowa jest napełniona gazem, który musi zostać przepchany w obiegu. Scrubber daje dodatkowy opór, a płuca nurka są jedyną dostępną pompą. Zminimalizowanie wysiłku oddechowego jest kluczowym celem konstrukcji rebreatherów, a nurkom zaleca się zachowanie jeszcze wię



Zalecane limity gęstości gazu

Z powodu większego wysiłku oddechowego Gavin Anthony i Simon Mitchell w swoim artykule badawczym zalecają ograniczenie gęstości jakiegokolwiek gazu oddechowego do 5 g/l i ustalenie nieprzekraczalnego limitu do 6 g/l. Oznacza to maksymalną głębokość nurkowania na powietrzu i na nitroksie równą odpowiednio 29 metrów i 37 metrów. Limity te nie zostały jeszcze powszechnie przyjęte przez organizacje szkoleniowe. Tradycyjny limit głębokości dla nurkowań rekreacyjnych wynosi 40 metrów, a standardy szkoleniowe dla nurkowań dekompresyjnych w niektórych organizacjach szkoleniowych pozwalają na jeszcze głębsze nurkowania: do 55 metrów na powietrzu, gdzie gęstość gazu wynosi prawie 8,4 g/l.

Sytuacje awaryjne

Podczas bezproblemowych nurkowań większość z wyżej wymienionych czynników pozostaje przez nurka niezauważona. Kiedy musimy wykonać większy wysiłek i zwiększa się metabolizm naszego ciała, np. podczas pływania w prądzie lub udzielania pomocy innemu nurkowi w sytuacji awaryjnej, czynniki te mogą jednak nagle ujawnić się i sprawić, że sytuacja, nad którą panujesz zmieni się w trudną lub pogorszyć problemy, które już wystąpiły.

Na tym kończymy drugą część naszej małej serii. W części trzeciej skupimy się na środkach zaradczych, czyli umiejętnościach i procedurach, dzięki którym możemy kontrolować ilość CO_2. Bądźcie bezpieczni i pozostańcie na bieżąco!

O autorze

Tim Blömeke uczy nurkowania rekreacyjnego i technicznego na Tajwanie i Filipinach. Jest również niezależnym pisarzem i tłumaczem oraz członkiem zespołu redakcyjnego Alert Diver. Jeśli masz pytania lub komentarze, możesz skontaktować się z nim przez blog lub na Instagramie.

Tłumacz: Agnieszka Kostera-Kosterzewska